

**JOSUÉ FERREIRA SILVA JUNIOR**

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA COMO BASE PARA O MANEJO  
SUSTENTÁVEL DA IRRIGAÇÃO NO NOROESTE PAULISTA**

**Botucatu**

**2017**

**JOSUÉ FERREIRA SILVA JUNIOR**

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA COMO BASE PARA O MANEJO  
SUSTENTÁVEL DA IRRIGAÇÃO NO NOROESTE PAULISTA**

Tese apresentada à Faculdade de  
Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus  
de Botucatu, para obtenção do título de  
Doutor em Agronomia (Irrigação e  
Drenagem)

Orientador: Fernando Braz Tangerino  
Hernandez

**Botucatu**

**2017**

À Professora Dra. Ligia Sampaio Reis, a quem sempre recorro nos momentos de angústia e de conquistas, e que me dedicou sua confiança, carinho e respeito durante todos esses anos.

Aos meus pais, Maria de Lourdes Teles da Silva e Josué Ferreira da Silva, incentivadores de todas as minhas realizações.

Às minhas irmãs, Ângela Emanuela Teles da Silva e Luana Luara Teles da Silva, pelos momentos de amizade, carinho e acolhida.

À minha noiva Ilca Puertas de Freitas e Silva, pelo suporte e paciência nos momentos de crise e ansiedade advindos das responsabilidades do doutorado.

Dedico.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, que sempre esteve ao meu lado, por incluir em meu caminho as pessoas certas, principalmente nos momentos de dificuldade.

Aos meus familiares, nas figuras dos meus tios Maria Auxiliadora e Samuel Ferreira e, também, meus tios Maura Aprígio e Antonio Aprígio, por acreditarem nesse sonho.

Ao Professor Dr. Fernando Braz Tangerino Hernadez pela coragem, dadas as circunstâncias, pela confiança e pela atenção cedidas.

Ao Professor Dr. Antonio Evaldo Klar, primeiro orientador, a quem devo grande parte dessa conquista, por toda sabedoria e ensinamento de vida e de formação acadêmica.

A minha noiva, Ilca Puertas de Freitas e Silva, que abraçou comigo o desafio do doutorado e me fez forte para concluir esse trabalho.

Aos docentes e funcionários da pós-graduação, não apenas por seus ensinamentos acadêmicos, mas também pela convivência ao longo dos anos que estive em Botucatu-SP.

Aos amigos que cultivei, em especial aos queridos amigos Ana Paula Russo Schimidt Jefery e Fernando Ferrari Putti.

Ao Professor Dr. Rafael Montanari pela sua imensa humildade e atenção.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) que através do financiamento do projeto “Modelagem da Produtividade da Água em Bacias Hidrográficas com Mudanças de Uso da Terra” (Processo 2.009/52.467-4) implantou

a Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista, fornecendo os dados que possibilitou a execução e conclusão desta Tese.

## RESUMO

Produzir mais utilizando a mesma área é o desafio enfrentado por todos os produtores de alimentos. Esse desafio tem fortalecido a agricultura irrigada e contribuído para a manutenção do saldo positivo na balança comercial, de empregos e geração de renda e garantindo a segurança alimentar. Para manter-se competitivo o setor agrícola tem investido em tecnologias que garantam elevada produtividade, como por exemplo a irrigação. A agricultura irrigada minimiza os riscos associados à produção agrícola, principalmente os relacionados com o clima, como a ausência de chuvas por períodos prolongados. Em 2015, a demanda consuntiva dos recursos hídricos nacional foi estimada em  $2.275,07 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , considerando a vazão retirada. A agricultura irrigada é responsável pela maior parcela do uso da água. Entretanto, o uso desse recurso finito e cada vez mais escasso, tem sido sistematicamente negligenciado e o manejo inadequado da irrigação tem comprometido a eficiência no uso da água, ocasionando perdas energéticas e de produtividade nas lavouras. Em recente levantamento, constatou-se a expansão das áreas irrigadas no Noroeste Paulista pelo incremento de 116 novos pivôs centrais. Nessa região encontra-se instalada a Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista que disponibiliza gratuitamente através do Canal CLIMA da UNESP informações sobre as condições climáticas regional, além de outros serviços, que auxiliam no planejamento da irrigação, incluindo a evapotranspiração. Considerando a importância econômica da produção irrigada para região Noroeste do Estado de São Paulo e a relevância do uso racional da água para manutenção da agricultura irrigada, o presente trabalho teve como objetivo elaborar o mapa que caracteriza Zonas Homogêneas de Evapotranspiração de Referência para área de atuação da Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista como ferramenta para o adequado manejo da irrigação, bem como ressaltar a importância do Canal CLIMA da UNESP como instrumento de difusão de tecnologia. Foram determinadas quatro Zonas Homogêneas de ETo, com ajuste considerados satisfatórios por apresentar índices de correlação superiores a 0,51, índices de determinação acima de 0,68 e raiz do erro médio quadrático inferiores a 0,30. Além disso, as variações da evapotranspiração de referência e da evapotranspiração da cultura foram inferiores a 7,8%, adotando-se como critério de

comparação os dados climáticos da Estação mais próxima a área irrigada. Os custos simulados com energia elétrica para irrigação integral da cultura do milho, em média, variaram entre R\$ 40,50, R\$ 65,82 e R\$ 161,20 considerando os diferentes cenários de manejo da irrigação em pivôs centrais localizados em Zonas Homogêneas distintas. Dada a expansão da área irrigada na região Noroeste Paulista e sua importância no desenvolvimento econômica da região, e considerando o crescente acesso ao Canal CLIMA da UNESP, principalmente nos períodos de déficit hídrico, é possível inferir que a Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista desempenha papel fundamental para o manejo sustentável da irrigação.

**Palavras-chave:** Agricultura irrigada. Sistema de assessoramento ao irrigante. Recursos hídricos. Gestão da água. Tecnologia da informação.

## ABSTRACT

Produce more using the same area is the challenge faced by all producers of food. This challenge has strengthened the irrigated agriculture and contributed to the maintenance of surplus in trade balance, employment and income generation and guaranteeing food security. To remain competitive agricultural sector has invested in technologies that ensure high productivity, such as irrigation. Irrigated farming minimizes the risks associated with agricultural production, especially those related to the climate, as the absence of rainfall for prolonged periods. The consumptive use of water resources in Brazil was estimated in  $2.275,07 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , for the year 2015, whereas the flow withdrawal. Irrigated agriculture is responsible for the largest use of water. However, the use of finite and increasingly scarce has been systematically neglected and inadequate irrigation management has compromised the efficiency in water use, energy and productivity losses in crops. In a recent survey, it has been the expansion of irrigated areas in the Northwest of São Paulo by the increment of 116 new central pivots. In this region is the Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista that provides free through the Canal CLIMA da UNESP information on the regional climatic conditions, in addition to other services, which assist in the planning of irrigation, including evapotranspiration. Considering the economic importance of irrigated production to northwestern region of São Paulo State and the relevance of the rational use of the water for maintenance of irrigated agriculture, the present work had as objective to draw up a map featuring Homogeneous Areas of Evapotranspiration of Reference for Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista as a tool for the proper management of irrigation, as well as highlight the importance of the Canal CLIMA da UNESP as an instrument of dissemination of technology. Four Homogeneous Areas were determined from ETo, with adjustment considered satisfactory by correlation indices greater than 0.51, indices for determining above 0.68 and root of the mean squared error of less than 0.30. Moreover, the variations of evapotranspiration of reference and the evapotranspiration of culture were lower than the 7.8%, adopting as a criterion for comparing the climate data from the nearest station to irrigated area. Simulated costs with electricity for irrigation of corn growing, on average, ranged between R\$ 40.50, R\$ 65.82 and R\$ 161.20 considering the

different scenarios of irrigation management in central pivots placed in Homogeneous Areas. Given the expansion of irrigated area in the Northwest of São Paulo and its importance in the economic development of the region, and considering the growing access to the Canal CLIMA da UNESP, especially during periods of water shortage, it is possible to infer that the Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista plays a key role for the sustainable management of irrigation.

**Keywords:** Irrigated agriculture. Irrigation advisory services. Water resources. Water management. Information technology.

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>19</b>
2.1 Histórico e importância da agricultura irrigada .....	19
2.2 Evolução da irrigação por pivô central no Brasil .....	21
2.3 Manejo da irrigação .....	23
2.4 Serviço de Assessoramento ao Irrigante .....	24
2.5 Estudo de caso: CIMIS ( <i>California Irrigation Management Information System</i> ) .....	26
2.6 Canal CLIMA da UNESP Ilha Solteira .....	27
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>30</b>
3.1 Localização da área .....	30
3.2 Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista .....	31
3.3 Variáveis agrometeorológicas .....	34
3.4 Balanço hídrico climatológico .....	35
3.5 Procedimentos para elaboração dos mapas climáticos .....	36
3.5.1 Obtenção e recorte dos mapas .....	36
3.5.2 Inserção dos pontos para interpolação dos dados .....	37
3.5.3 Escolha do método de interpolação e ajuste de modelos à semivariogramas experimentais .....	37
3.5.4 Interpolação e construção dos mapas climáticos .....	38
3.5.5 Definição das Zonas Homogêneas .....	39
3.6 Validação das Zonas Homogêneas .....	40
3.6.1 Coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) .....	41
3.6.2 Coeficiente de determinação ( $R^2$ ) .....	42
3.6.3 Raiz do erro médio quadrático (REM <sub>Q</sub> ) .....	42
3.6.4 Índice de concordância ( $d$ ) .....	42

<b>3.7 Tabela de distribuição mensal da ETo .....</b>	<b>43</b>
<b>3.8 Simulação de custos de energia com irrigação por pivôs centrais.....</b>	<b>43</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>45</b>
<b>4.1 Balanço hídrico climatológico .....</b>	<b>45</b>
<b>4.2 Distribuição espacial da ETo.....</b>	<b>49</b>
<b>4.3 Zonas homogêneas.....</b>	<b>51</b>
<b>4.4 Simulações .....</b>	<b>55</b>
<b>4.4.1 Zona Homogênea 2 .....</b>	<b>56</b>
<b>4.4.2 Zona Homogênea 1 .....</b>	<b>61</b>
<b>4.4.3 Zona Homogênea 4 .....</b>	<b>64</b>
<b>4.4.4 Variações médias da ETo e ETc.....</b>	<b>68</b>
<b>4.5 Importância econômica da agricultura irrigada para o Noroeste Paulista e transferência de tecnologia realizada pelo Canal CLIMA - UNESP Ilha Solteira</b>	<b>68</b>
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>73</b>
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>74</b>

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1 - Evolução da área irrigada nacional e incremento pelos diferentes sistemas de irrigação à área irrigada nacional ao longo de 16 anos, 2000-2015.</b>	<b>21</b>
<b>Figura 2 - Acessos mensais ao portal Canal CLIMA UNESP Ilha solteira no período de janeiro de 2011 a novembro de 2016. Adaptado de UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (2016a).</b>	<b>29</b>
<b>Figura 3 - Localização geográfica da área em estudo e identificação das áreas irrigadas por pivô central (Amendola, 2016), para o ano de 2015.</b>	<b>30</b>
<b>Figura 4 - Espacialização da Rede de Estações Agrometeorológicas do Noroeste Paulista.</b>	<b>32</b>
<b>Figura 5 - Vista frontal de uma das Estações que compõe a rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista.</b>	<b>34</b>
<b>Figura 6 - Mapa pedológico para região delimitada. Adaptado de Oliveira et al. (1999).</b>	<b>36</b>
<b>Figura 7 - Transferência dos parâmetros de ajuste dos modelos de semivariogramas entre os softwares GS+ e ArcGis®.</b>	<b>39</b>
<b>Figura 8 - Organograma dos procedimentos metodológicos adotados para obtenção dos mapas de distribuição da ETo mensais e definição das Zonas Homogêneas.</b>	<b>40</b>
<b>Figura 9 - Coeficiente de cultura (<math>K_c</math>) para as cultivares de milho AS 1555 PRO2 (A) e Status VIPTERA (B). Adaptado de Allen et al. (1998).</b>	<b>44</b>
<b>Figura 10 - Balanço hídrico climatológico para o período de 2012 a 2015 utilizando os dados da Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista.</b>	<b>47</b>
<b>Figura 11 - Análise descritiva das médias mensais para precipitação e evapotranspiração de referência registradas na Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista.</b>	<b>48</b>
<b>Figura 12 - Distribuição da ETo para a região delimitada.</b>	<b>51</b>

<b>Figura 13 - Interseção dos mapas para os meses mais críticos para o manejo da irrigação.....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 14 - Mapa representativo das Zonas Homogêneas e valores estimados mensais da evapotranspiração, em mm dia<sup>-1</sup>, para cada zona. ....</b>	<b>53</b>
<b>Figura 15 - Localização do pivô central (P1) e das Estações Bonança (1), Ilha Solteira (2) e Marinópolis (4), utilizadas para simulação na Zona Homogênea 2. ....</b>	<b>56</b>
<b>Figura 16 - Comportamento da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) para as Estações Bonança, Ilha Solteira, Marinópolis e ET<sub>o</sub> estimada para Zona Homogênea 2 (Zona Homogênea 2), durante o ciclo da cultura do milho. ....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 17 - Comportamento da evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>), em diferentes estádios fenológicos do milho (I - inicial; II - vegetativo; III - florescimento; IV - enchimento de grãos e V - maturação), Zona Homogênea 2. ....</b>	<b>59</b>
<b>Figura 18 - Localização do pivô central (P2) e das Estações Ilha Solteira (2), Marinópolis (4) e Santa Adélia (8), utilizadas para simulação na Zona Homogênea 1.....</b>	<b>61</b>
<b>Figura 19 - Comportamento da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) para as Estações Ilha Solteira, Marinópolis, Santa Adélia e ET<sub>o</sub> estimada para Zona Homogênea 1, durante o ciclo da cultura do milho. ....</b>	<b>62</b>
<b>Figura 20 - Comportamento da evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>), em diferentes estádios fenológicos do milho (I - inicial; II - vegetativo; III - florescimento; IV - enchimento de grãos e V - maturação), Zona Homogênea 1. ....</b>	<b>63</b>
<b>Figura 21 - Localização do pivô central (P3) e das Estações Marinópolis (4) e Paranapuã (5), utilizadas para simulação da Zona Homogênea 4. ....</b>	<b>65</b>
<b>Figura 22 - Comportamento da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) para as Estações Marinópolis, Paranapuã e ET<sub>o</sub> estimada para Zona Homogênea 4, durante o ciclo da cultura do milho.....</b>	<b>66</b>
<b>Figura 23 - Comportamento da evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>), em diferentes estádios fenológicos do milho (I - inicial; II - vegetativo; III -</b>	

<b>florescimento; IV - enchimento de grãos e V - maturação), Zona Homogênea 4 (Zona 4). .....</b>	<b>67</b>
<b>Figura 24 - Perfil do agronegócio regional, com base no valor de produção agropecuária (VPA), em função da área irrigada.....</b>	<b>70</b>
<b>Figura 25 - Produtividade média para as culturas do milho, soja, e feijão para cultivo irrigado e não irrigado.....</b>	<b>70</b>
<b>Figura 26 - Número médio de acessos ao Canal CLIMA em função da deferência hídrica da região.....</b>	<b>71</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Número de pivôs centrais e áreas irrigadas entre os 60 municípios de interesse. ....	31
Tabela 2 - Posicionamento geográfico, localidade e data de início de operação Rede Agrometeorológica do Noroeste de São Paulo. ....	33
Tabela 3 - Distâncias, em km, entre as Estações e entre os limites geográficos do mapa.....	33
Tabela 4 - Sensores padrões que equipam a Rede de Estações Agrometeorológicas no Noroeste Paulista. ....	34
Tabela 5 - Médias da evapotranspiração de referência (ET <sub>o</sub> ), calculada pelo método de Penman-Monteith para o período de 2012-2015. ....	35
Tabela 6 - Precipitações médias mensais e precipitação anual para o período de 2012-2015, Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista, UNESP Ilha Solteira. ....	35
Tabela 7 - Especificações dos pivôs utilizados para simulação com custos de energia. ....	43
Tabela 8 - Especificações das culturas selecionadas para análise de custo energético. ....	43
Tabela 9 - Tarifas energéticas praticadas pela concessionária de energia. ....	44
Tabela 10 - Resumo mensal e anual dos parâmetros precipitação (P), evapotranspiração de referência (ET <sub>o</sub> ), déficit hídrico (Def) e excedente hídrico (Exc) para a Rede de Agrometeorológica do Noroeste Paulista. ....	46
Tabela 11 - Critérios de ajuste (SQ <sub>res</sub> e R <sup>2</sup> ), tipo de modelo e parâmetros de semivariogramas experimentais para interpolação de dados da ET <sub>o</sub> por krigagem ordinária. ....	49
Tabela 12 - Validação das zonas a partir dos dados observados e preditos por krigagem ordinária, ajustado para o modelo gaussiano do semivariograma....	54

<b>Tabela 13 - Evapotranspiração da cultura (ETc) nos diferentes estádios fenológicos da cultura do milho híbrido, calculados a partir de diferentes fontes de dados da evapotranspiração de referência, Zona Homogênea 2.....</b>	<b>58</b>
<b>Tabela 14 - Simulação de custos com energia para irrigação integral no ciclo de milho em diferentes cenários.....</b>	<b>60</b>
<b>Tabela 15 - Evapotranspiração da cultura (ETc) nos diferentes estádios fenológicos da cultura do milho híbrido, calculados a partir de diferentes fontes de dados da evapotranspiração de referência, Zona Homogênea 1.....</b>	<b>63</b>
<b>Tabela 16 - Simulação de custos com energia para irrigação integral no ciclo de milho em diferentes cenários, Zona Homogênea 1.....</b>	<b>64</b>
<b>Tabela 17 - Evapotranspiração da cultura (ETc) nos diferentes estádios fenológicos da cultura do milho híbrido, calculados a partir de diferentes fontes de dados da evapotranspiração de referência, Zona Homogênea 4.....</b>	<b>66</b>
<b>Tabela 18 - Simulação de custos com energia para irrigação integral no ciclo de milho em diferentes cenários, Zona Homogênea 4.....</b>	<b>67</b>
<b>Tabela 19 - Variações observadas entre os valores da evapotranspiração de referência (ETo) e evapotranspiração da cultura (ETc) obtidos pela estimativa das Zonas Homogêneas em relação aos dados da Estação mais próxima a área irrigada. ....</b>	<b>68</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o quinto maior exportador de produtos agrícolas do mundo. Comercializou, em 2013, cerca de 83,9 bilhões de dólares, segundo dados da FAO (2013). A extensa área agrícola, estimada em 74,8 milhões de hectares, é ocupada principalmente pelas culturas da soja, do milho e da cana-de-açúcar, que juntas somaram 77,2% da área colhida (IBGE, 2016).

Para manter-se competitivo o setor agrícola tem investido em novas tecnologias que garantam elevada produtividade. Assim, produzir mais utilizando a mesma área é o desafio enfrentado pelos produtores brasileiros. Esse desafio tem fortalecido a agricultura nacional e contribuído para a manutenção do saldo positivo na balança comercial, de empregos e geração de renda e da segurança alimentar.

Por ser uma atividade de risco a produção agrícola está sujeita as ações, positivas ou negativas, de diversos fatores como a disponibilidade de recursos humano e financeiro, correto manejo da cultura, disponibilidade de nutrientes e variações climáticas. Esse último pode interferir negativamente na produção agrícola, pois alterações na temperatura, umidade e distribuição das chuvas comprometem o bom desenvolvimento das culturas e, conseqüentemente, a produção.

Sabe-se que a disponibilidade de água é fator determinante para o sucesso de qualquer cultura e, por esse motivo, entre as diversas tecnologias utilizadas para a produção agrícola, a irrigação vem ganhando destaque. Dados levantados em 2014 assinalam que o Estado de São Paulo possui a quarta maior área irrigada por pivôs centrais com aproximadamente 180 mil hectares irrigados contra 406, 233 e 201 mil hectares irrigados nos estados de Minas Gerais, Goiás e Bahia, respectivamente (ANA, 2016).

Acompanhando a tendência da agricultura irrigada as regiões Noroeste e Extremo Oeste paulista têm ampliado suas áreas irrigadas com pivôs centrais. Essas regiões somam mais de 17 mil hectares irrigados, 255 pivôs, distribuídos em 45 municípios. Destacam-se nessas regiões os municípios de Itapura, Riolândia, Cardoso e Pereira Barreto, que juntos somam 35% dos equipamentos instalados na região (ANA, 2016).

Nesses municípios a produção irrigada é composta principalmente pelas culturas da soja, do milho e do feijão. Segundo dados do Instituto de Economia Agrícola

(IEA), em 2015, foram irrigados 6 mil hectares e produzidos 27 milhões de toneladas desses produtos (IEA, 2015).

A agricultura irrigada reduz os riscos e proporciona incremento na produção agrícola. Essa premissa é válida e facilmente verificável quando se comparam os valores da produção nos sistemas de cultivo irrigado e não irrigado. Com base nos dados do IEA e considerando os municípios citados (Itapura, Riolândia, Cardoso e Pereira Barreto) a média da produção em áreas irrigadas, no ano de 2014, foram superiores em 152, 100 e 65% para as culturas da soja, do feijão e do milho, respectivamente, quando comparadas a média da produção obtida em áreas não irrigadas.

A crise hídrica brasileira trouxe à tona a importância da gestão de água para os diversos setores usufrutuários desse bem. Embora considerada importante para a produção de alimentos, a agricultura foi duramente criticada como pivô da crise hídrica nacional por consumir cerca de 70% do volume de água disponível (REYNOL, 2015).

A crescente demanda por alimentos vem pressionando os diversos setores agrícolas para incorporar novas tecnologias que garantam, tanto quanto possível, maiores produtividades. Nesse contexto, a irrigação vem ampliando sua participação na produção de alimentos pela adição de novas áreas irrigadas.

Acompanhando o cenário nacional, a expansão da irrigação no Noroeste Paulista vem ocorrendo gradativamente (AMENDOLA, 2016). Contudo, a irrigação realizada por pequenos e grandes proprietários tem sido feita de modo especulativo, muitas vezes com projetos de irrigação mal dimensionados, sem a anuência de qualquer profissional da área (HERNANDEZ, 1998).

De acordo com Hernandez (2016), por essa razão, a Área de Hidráulica e Irrigação da UNESP Ilha Solteira por meio da Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista tem entre seus objetivos aproximar-se dos produtores de alimentos, estimulando a utilização de metodologias mais avançadas, transferindo conteúdo e informações técnicas necessárias à modernização da agropecuária regional e tem na Internet uma ferramenta fundamental para democratizar o conhecimento e a informação e também efetivar a transparência das ações para a sociedade, sendo a maior parte dessas garantidas através de recursos públicos.

Diante do exposto, o presente trabalho tem por objetivo estabelecer um mapa com Zonas Homogêneas de evapotranspiração de referência, em base histórica,

para região Noroeste Paulista como ferramenta para o manejo sustentável da irrigação e ressaltar a importância da Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista e do Canal CLIMA da UNESP para agricultura irrigada regional.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Histórico e importância da agricultura irrigada**

A mais antiga evidência de irrigação na agricultura remota a cerca de 6.000 a.C no vale do Jordão, localizado no Oriente Médio. Acredita-se que a irrigação também era praticada no Egito no mesmo período (6.000 a.C) e a primeira representação pictográfica da irrigação foi registrada no Egito por volta de 3.100 a.C (SOJKA; BJORNEBERG; ENTRY, 2002).

Segundo os mesmos autores, nos milênios seguintes a irrigação espalhou-se por toda Pérsia, Oriente Médio e Oeste do Mediterrâneo. De forma independente, e durante o mesmo período, a irrigação surgiu em todo o continente asiático, Índia, Paquistão, China e em outros lugares.

O início da irrigação no Brasil surgiu indiretamente e de forma tardia, quando comparadas as primeiras experiências mundiais, pela construção do reservatório do Cadro no Rio Grande do Sul. Empreendimento de iniciativa privada foi iniciado em 1881 e efetivamente operacionalizado em 1903 com objetivo de permitir o suprimento de água para a lavoura de arroz irrigado. Anos depois, em 1912, outro empreendimento similar foi construído, em Cachoeira do Sul - RS, para atender a cultura do arroz (BRASIL, 2008).

Embora considerada uma técnica antiga, o uso da irrigação ganhou espaço na década de 1900, com início nos estados de Rio Grande do Sul e São Paulo para as culturas irrigadas do arroz e café, respectivamente, avançando para a região Nordeste nas décadas de 60 e 70 (BRASIL, 2008).

A irrigação, como tecnologia, garantiu a subsistência de grandes civilizações e, desde então, modernizou-se para atender as exigências por alimentos de uma população crescente.

Segundo dados da FAO (2012) foram irrigados cerca de 275 milhões de hectares no mundo, em 2012, valor que representou 85% da área equipada para irrigação. Ao longo dos anos de 1970 a 2012 houve um aumento de 76% da área equipada para irrigação, saindo de 184 para 324 milhões de hectares.

De acordo com o mesmo autor, o método de irrigação mais utilizado foi o por superfície (86%), seguido pelos métodos de aspersão (11%) e localizada (3%). Entre os métodos citados, de um modo geral, a irrigação por superfície é menos eficiente

na aplicação de água que a aspersão, que por sua vez é menos eficiente que a irrigação localizada. Entretanto, em termos de custo de instalação, o preço da irrigação por superfície é mais barato que a irrigação por aspersão, que por sua vez é mais barata que a irrigação localizada.

Cerca de 61% das áreas irrigadas são destinadas à produção de cereais, seguido pela produção de hortícolas (10%), forragens e pastagens (7%), oleaginosas (7%), frutíferas (6%), fibrosas (5%) e açucareiras (4%). A maior cultura de cereal irrigada do mundo é o arroz, cobrindo 29% da área total das culturas irrigadas e quase metade da área de cereais irrigados. Em resumo, a agricultura irrigada engloba 20% do total da área cultivada no mundo e contribui com 40% da produção mundial de alimentos (FAO, 2012).

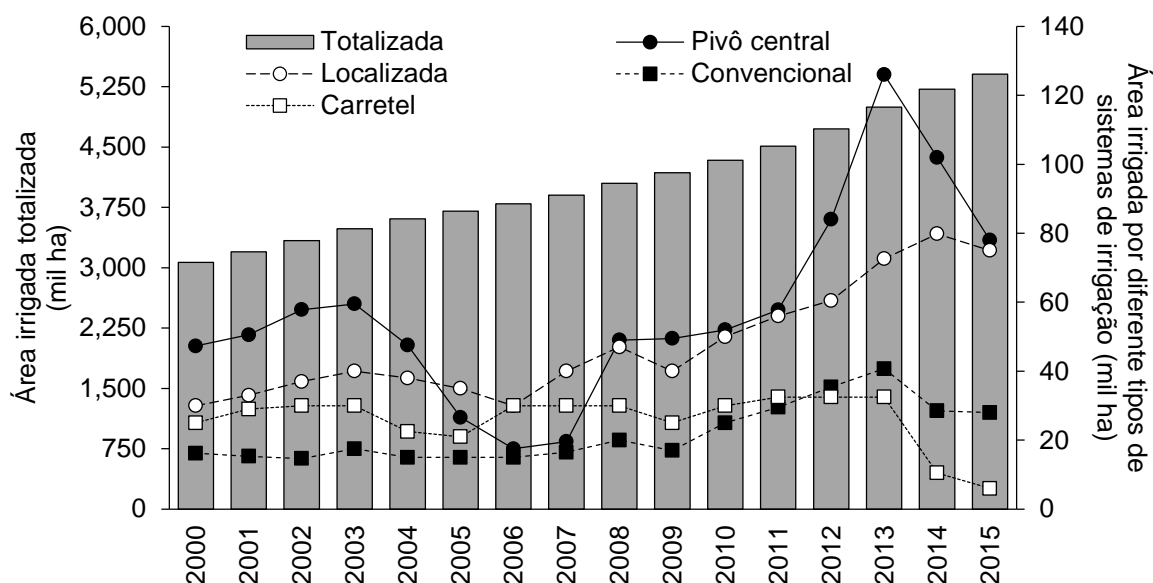
Grande parte da área irrigada concentra-se na Ásia, sendo a China e a Índia os países com maiores áreas irrigadas - 69,4 e 66,7 milhões de hectares, respectivamente. Juntos, esses dois países detêm 42% da área irrigada no mundo e adotam, predominantemente, o método de irrigação por superfície (FAO, 2012).

No cenário nacional, segundo dados da FAO (2012), o Brasil possui a nona maior área irrigada do mundo, atrás de Tailândia, México, Indonésia, Irã, Paquistão, Estados Unidos, Índia e China.

Segundo a Agência Nacional de Água (ANA, 2016) e de acordo com dados periódicos dos Censos Agropecuários realizados pelo IBGE (2006; 2009) e da ANA (2014), a irrigação brasileira tem crescido a taxas médias anuais entre 4,4% e 7,3% desde a década de 1960. Partindo de 462 mil hectares equipados para irrigação em 1960, ultrapassamos a marca de 1 milhão de hectares na década de 1970 e de 3 milhões de hectares na década de 1990. Estima-se que em 2015 foi superada a marca de 5,4 milhões de hectares sob irrigação, com destaque para o incremento de área irrigada por pivôs centrais (Figura 1).

O Censo Agropecuário 2006 (IBGE, 2009), baseado em levantamento subjetivo dos estabelecimentos agropecuários (questionários), apresentou um amplo panorama da área equipada para irrigação nos municípios brasileiros. Foram adotadas as seguintes classes de métodos: inundação, sulcos, aspersão (pivôs centrais), aspersão (outros métodos), localizado (gotejamento, microaspersão, etc.) e outros métodos de irrigação e/ou molhação (ANA, 2016).

**Figura 1 - Evolução da área irrigada nacional e incremento pelos diferentes sistemas de irrigação à área irrigada nacional ao longo de 16 anos, 2000-2015.**



Em 2006, foram identificados 4,45 milhões de hectares equipados para irrigação no País. A inundação (25,7% da área total) e a aspersão (54,7%) foram os métodos predominantes, sendo esta subdividida em pivôs centrais (19,6%) e outros métodos de aspersão (35,1%). Regionalmente, verifica-se a concentração da inundação na região Sul; dos pivôs centrais no Centro-Oeste, Sudeste e Nordeste; e dos outros métodos de aspersão nas regiões Sudeste e Nordeste (ANA, 2016).

A importância e o avanço da agricultura irrigada se dá pelos diversos benefícios observados, tais como: aumento da produtividade da ordem de 2 a 3 vezes em relação à agricultura de sequeiro; redução do custo de produção; melhor uso do solo durante o ano; diminuição da ociosidade de máquinas e implementos agrícolas; mitigação dos efeitos adversos do clima; elevação da produtividade agrícolas, tanto em quantidade quanto em qualidade; abertura de novos mercados, internos e externos; regularidade na oferta de alimentos e, consequentemente, obtenção de melhores remunerações ao produtor rural (MENDES, 1998).

## 2.2 Evolução da irrigação por pivô central no Brasil

Em registro, o primeiro sistema de irrigação por pivô central foi construído no ano de 1948 pelo inventor Frank L. Zybach que submeteu seu invento a avaliação

em 1949. Três anos depois, em 1952, foi patenteado no estado do Colorado, Estados Unidos (LIMA, 2010).

Segundo o mesmo autor foram produzidas unidades desse sistema até 1954, ano em que Frank L. Zybach vendeu os direitos de fabricação para a empresa americana Valley. Essa empresa permaneceu isolada no mercado de pivôs até 1968 quando a empresa Lindsay iniciou a fabricação de pivôs centrais. Atualmente as duas empresas, Valley e Lindsay, lideram o mercado mundial de pivôs.

No Brasil, as duas primeiras unidades de pivôs centrais foram inauguradas na Fazenda Santa Isabel, em 25 de maio de 1979, município de Brotas - SP, (VALMONT, 2015). Desde então esse sistema de irrigação foi se consolidando como tecnologia para agricultura brasileira e ganhando anualmente novas áreas, isso graças a grande aceitação do pivô central por oferecer necessidade mínima de mão de obra; simplicidade de operação; adaptar-se a terrenos planos e ondulados (até 20%); poder aplicar fertilizantes via água; conseguir irrigar de forma localizada desde que a cultura seja plantada em círculos (LIMA, 2010).

Segundo projeções de Christofides (1999), complementadas pela Câmara Setorial de Equipamentos de Irrigação (CSEI) da Associação Brasileira de Máquinas e Equipamentos (ABIMAQ), houve um crescimento acumulado de 169% durante o período de 1996 a 2014. Outra informação importante, a partir dessas projeções, é que o Brasil dobrou sua área irrigada por pivôs centrais recentemente, entre os anos de 2010-2011.

As projeções superestimaram a área irrigada para o ano de 2014. Um mapeamento nacional de pivôs centrais de 2014 identificou 19.892 equipamentos, ocupando 1,275 milhão de hectares (ANA, 2016). De acordo com o mesmo autor, os resultados apontam crescimento de 43,3% da área equipada por pivôs em relação aos dados apresentados no Censo Agropecuário de 2006 que levantou 893 mil hectares (IBGE, 2009). Cabe destacar os biomas Mata Atlântica e Cerrado que concentram, respectivamente, 11,4% e 79,1% da área total de pivôs centrais (ANA, 2016). Regionalmente, observa-se proporções similares às aquelas apresentadas pelo Censo Agropecuário 2006 (IBGE, 2009), entretanto, com maior participação do Centro-Oeste e menor participação do Nordeste (ANA, 2016).

Nesse mapeamento foram identificadas áreas irrigadas por pivôs centrais em 21 Unidades da Federação, com Minas Gerais, Goiás, Bahia e São Paulo concentrando

cerca de 80% da área total - respectivamente, 31,9%, 18,3%, 15,8% e 14,1% (ANA, 2016).

### 2.3 Manejo da irrigação

O crescimento populacional tem forçado o uso da maior quantidade de solos agricultáveis para a produção de alimentos. Esse fator impulsionou o uso da irrigação, uma vez que essa tecnologia proporciona a complementação hídrica das culturas em regiões úmidas e torna possível a produção agrícola em regiões áridas e semiáridas, que representa cerca de 55% da área total do planeta. Além disso, as áreas irrigadas garantem a produção de alimentos para mais da metade da população mundial (LIMA; FERREIRA; CHRISTOFIDIS, 1999).

O desenvolvimento da irrigação nos últimos anos incorporou um conjunto de novas tecnologias que possibilitaram o controle mais preciso da água e do uso de fertilizantes e defensivos agrícolas. Esse conjunto de tecnologias proporcionou a redução de problemas relacionados a drenagem e ao perigo de contaminação dos solos, tornado o processo produtivo mais eficiente e ambientalmente mais sustentável. Além disso, o surgimento de diversos sistemas de irrigação elevou os rendimentos das lavouras maximizando os benefícios socioeconômicos (BRASIL, 2008).

Segundo dados da (ANA, 2015) a demanda consuntiva total estimada para o Brasil, em 2015, foi de  $2.275,07 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , quando considerada a vazão retirada. O setor de irrigação foi responsável pela maior parcela de retirada, seguido das vazões de retirada para fins de abastecimento humano urbano, indústria, animal e abastecimento humano rural. A vazão efetivamente consumida foi de  $1.209,64 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

Entretanto, Sousa et al. (2003) sugere que os usuários da agricultura irrigada brasileira não realizam estratégias de manejo adequado da irrigação. Esses autores ressaltam que a ausência no manejo da água para irrigação pode contribuir para aplicação de água em excesso ou em quantidade insuficiente para o desenvolvimento da cultura. No primeiro caso, o excesso de água compromete a sanidade de rios, lagos e lençóis freáticos em função da lixiviação de elementos tóxicos e nutrientes. No segundo caso, a aplicação insuficiente de água pode afetar o desenvolvimento da planta em função dos efeitos fisiológicos do estresse hídrico.

Para o manejo da irrigação, fica claro a necessidade de se monitorar algum ou alguns fatores, de maneira a responder de forma objetiva às questões referentes ao manejo. Esse monitoramento pode ser feito na planta, no solo ou no clima (MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2009).

Segundo os mesmos autores a propriedade do solo em armazenar água é um conceito básico e deve ser utilizado como suporte e referência. Para determinação de quando e quanto irrigar faz-se necessário o monitoramento da planta, do solo ou do clima.

A metodologia de monitoramento do clima vem sendo mais utilizada em virtude da possibilidade de utilização de medidas de algumas de suas variáveis para estimar a evapotranspiração da cultura irrigada, que vai definir o consumo de água pelas plantas (MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2009).

Esses autores ressaltam que com o advento de Estações meteorológicas automáticas de fácil instalação e acesso aos dados e com preços mais acessíveis tem permitido a expansão do uso das medidas climáticas completas e atualizadas para o manejo da irrigação.

## **2.4 Serviço de Assessoramento ao Irrigante**

O uso da água na agricultura corresponde a cerca de 70% do total consumido. Para produzir 1 kg de soja e milho, são necessários 1800 e 900 litros de água respectivamente (BRASIL; UNESCO, 2013). Segundo Lobo (2012), o Brasil exporta água que está presente nas *commodities* agrícolas, sendo o quarto país que mais exporta água, esses indicadores fizeram com que as políticas públicas comecem a trabalhar na gestão hídrica. Espera-se que em 2025, cerca de dois terços da população mundial poderão sofrer com a falta de água (BRASIL; UNESCO 2013).

O aumento da produtividade, utilizando o máximo de recursos disponíveis de forma eficiente e racional ocorre devido aos avanços da tecnologia oriunda de pesquisas agrícolas. Atualmente, o foco dessas pesquisas está direcionado ao uso da terra e da água, os quais são fatores limitantes dos sistemas produtivos (FERERES; SORIANO, 2007).

Para otimização dos sistemas de irrigação e uso sustentável da água, energia e recursos, tem-se o apoio do Serviço de Assessoramento ao Irrigante (SAI). Com a utilização do SAI, é possível assessorar os irrigantes, orientando sobre o manejo

adequado da irrigação associando a tecnologia ao irrigante e, quando possível, agregando inovações tecnológicas, aperfeiçoando a gestão técnico-econômica principalmente das associações dos irrigantes. O objetivo do SAI é contribuir com o manejo do cultivo, envolvendo os fatores relacionados ao cálculo de necessidades hídricas, avaliações dos sistemas de irrigação, elaboração de calendário de irrigação, dentre outros (LIMA et al., 2015).

O aperfeiçoamento do manejo de irrigação utilizando a água de forma racional e eficiente estão relacionados aos serviços de consultoria utilizando a tecnologia do sensoriamento remoto e sistemas de informações geográficas (LORITE et al., 2012). A produtividade de água para a cultura é definida como a razão entre a quantidade produzida e a quantidade de água utilizada para atingir tal produção, com esse conceito leva-se a compreensão da interação entre culturas, áreas agrícolas e as diversas práticas de manejo (PERRY et al., 2009).

Assim, os serviços de consultoria em irrigação desempenham um papel importante em relação ao auxílio dos usuários a adotar novas técnicas e tecnologias para aumentar a produtividade (econômico ou social), com o mínimo de riscos ambientais, contribuindo para a sustentabilidade do setor agrário (SMITH; MUNÓZ, 2002). Esses serviços podem ser prestados por empresas privadas, órgãos públicos ou cooperativas, tendo a sustentabilidade financeira como ponto crítico na promoção de serviços de irrigação de consultoria (ORTEGA; JUAN; TARJUELO, 2005).

O Serviço de Assessoramento ao Irrigante teve início nos Estados Unidos (ECHING, 2002; ENGLISH, 2002), tendo como referência global o CIMIS, *California Irrigation Management Information System*, desenvolvido no início da década de 1980, sendo possivelmente o melhor conceito de SAI (<http://www.cimis.water.ca.gov>). Esse sistema integrado baseia-se na programação de dados coletados referentes a evapotranspiração, auxiliando os irrigantes da Califórnia na gestão do uso eficiente dos recursos hídricos (LIMA et al., 2015). O CIMIS foi desenvolvido como um projeto conjunto entre o Departamento de Recursos Hídricos da Califórnia (DWR) e da Universidade da Califórnia - Davis (ORTEGA; JUAN; TARJUELO, 2005).

O CIMIS tem uma das redes mais completas de Estações meteorológicas automáticas dos EUA para determinar a evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) e os coeficientes de cultura (K<sub>c</sub>), sendo essas informações divulgadas aos usuários para realizarem a melhor forma de manejo da irrigação (ORTEGA; JUAN; TARJUELO,

2005). Atualmente, as inovações tecnológicas são usadas (sensoriamento remoto, Sistema de Informação Geográfica (GIS), Internet, etc.) para continuar a fornecer informações precisas e oportunas para os agricultores (ECHING, 2002).

O CIMIS tem sido o modelo para o desenvolvimento de outros serviços de assessoria de irrigação, embora adaptadas às particularidades de cada situação (social, económico, ambiental, etc.) (ORTEGA; JUAN; TARJUELO, 2005). Além do CIMIS, outros serviços de orientação ao irrigante têm sido desenvolvidos nos EUA, como por exemplo, na Universidade da Florida, Universidade da Georgia, na Cooperativa de Extensão do Texas, Universidade Estadual de Utah, Universidade de Minnesota (SMITH; MUNÓZ, 2002). Outros exemplos são a Iniciativa Rural de Uso Eficiente da Água Rural na Austrália e na Europa, e serviços atuando no Reino Unido e na Itália (HESS; KNOX, 2002; GIANNINI; BAGNONI, 2002). Os serviços de assessoria de irrigação são bastante comuns também na Espanha, como em Múrcia, Navarra e Castilla-La Mancha (ORTEGA; JUAN; TARJUELO, 2005).

O conhecimento do irrigante sobre quando (tempo), quanto (lâmina) e como (método e sistema) irrigar, se faz necessário para manejar de forma racional e sustentável a aplicação de água nas culturas de interesse (LIMA et al. 2012). Nesse sentido, é importante desenvolver serviços de aconselhamento e apoio para auxiliar os irrigantes na tomada de decisão (ORTEGA; JUAN; TARJUELO, 2005).

Para o serviço de assessoria ao irrigante ser bem-sucedido, é importante e necessário disponibilizar informações que serão aplicáveis e úteis para os agricultores refletindo em benefícios para a sociedade, resultantes, principalmente do manejo sustentável da água (ORTEGA; JUAN; TARJUELO, 2005).

## **2.5 Estudo de caso: CIMIS (*California Irrigation Management Information System*)**

O Sistema de Informação para Manejo da Irrigação da Califórnia, uma tradução livre para a abreviação CIMIS, é uma rede integrada de mais de 100 Estações agrometeorológicas espalhadas em diversas áreas, urbanas ou rurais, em toda a Califórnia. É operada pelo DWR e tem por finalidade ajudar agricultores, parques, campos de golfe e outros usuários na determinação de quando e quanto irrigar. A principal utilização do sistema CIMIS é fornecer informações para melhorar a gestão

da água e da energia por meio de práticas de irrigação eficientes (ECHING; MOELLENBERNDT, 2002).

As Estações meteorológicas coletam os dados de minuto a minuto e os valores horários e diários são calculados e armazenados em *dataloggers*. Um computador na sede do DWR, em Sacramento - CA, inicia o recebimento de dados das Estações toda meia-noite, horário do padrão do pacífico, e recupera os dados em intervalos de tempo predeterminados (ECHING; MOELLENBERNDT, 2002).

O processamento de dados pelo CIMIS envolve a verificação de acurácia dos dados meteorológicos medidos, o cálculo da evapotranspiração e outros parâmetros intermediários, a sinalização de parâmetros medidos e calculados e armazenamento das informações em um banco de dados (ECHING; MOELLENBERNDT, 2002).

Inicialmente o CIMIS foi projetado para auxiliar os agricultores no manejo adequado da irrigação, determinando quando e quanto irrigar. Com o passar dos anos a base de usuários desse sistema foi expandindo e, atualmente, incluem paisagistas, agências locais de água, professores, estudantes, engenheiros civis, consultores, hidrólogos, agências governamentais e outros (ECHING; MOELLENBERNDT, 2002).

Os principais benefícios relatados pelos agricultores, usuários CIMIS, são a redução no consumo de água e aumento da produção como efeito da melhoria no manejo da irrigação (ECHING; MOELLENBERNDT, 2002).

## **2.6 Canal CLIMA da UNESP Ilha Solteira**

Em consonância com a política de trabalho da Área de Hidráulica e Irrigação da UNESP Ilha Solteira, que defende a democratização do conhecimento e da informação, combinada com a transparência de ações, o Canal CLIMA da UNESP<sup>1</sup> é a parte visível da Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista, implantada a partir de 2010 através do financiamento FAPESP ao projeto “Modelagem da Produtividade da Água em Bacias Hidrográficas com Mudanças de Uso da Terra” (Processo 2.009/52.467-4) que teve por objetivo introduzir estudos que combinam sensoriamento remoto e o conceito de rede de Estações agrometeorológicas para estudos de evapotranspiração em escala regional, até então inexistentes na região.

---

<sup>1</sup> <http://clima.feis.unesp.br>

Após estruturada a Rede Agrometeorológica, o Canal CLIMA da UNESP Ilha Solteira foi lançado oficialmente em 1 de janeiro de 2011. É um dos canais de comunicação oferecidos pela Área de Hidráulica e Irrigação da UNESP Ilha Solteira que disponibiliza dados de variáveis agrometeorológicas obtidas pelas Estações automáticas de forma livre e gratuita com atualização a cada cinco minutos. Entre as variáveis disponibilizadas está a evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>), base para que os irrigantes possam fazer o adequado manejo da aplicação da água às culturas. Resume-se por manejo adequado a aplicação da água no momento e na quantidade adequadas às culturas, aumentando a eficiência do uso da água, a lucratividade e a preservação dos recursos hídricos. Em base histórica, o conhecimento da evapotranspiração de uma região serve para que sistemas de irrigação sejam adequadamente projetados, atendendo adequadamente as necessidades de água das culturas sem superdimensionar os sistemas de irrigação, o que elevaria os investimentos necessários para a sua implantação (UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA, 2016a), ou ainda, possibilita esquemas de manejo de irrigação baseados em valores médios mensais, como é a proposta deste trabalho.

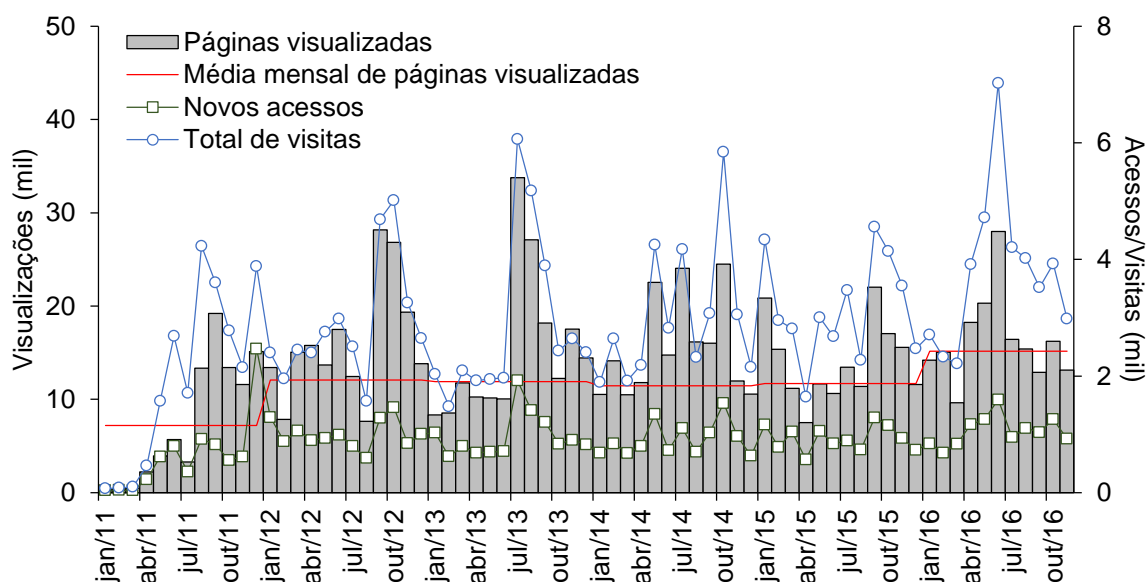
A Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista é composta por 8 estações automáticas com sensores padronizados que operam em tempo de varredura de 10 segundos. Pelo Canal CLIMA da UNESP as variáveis, que compõem o banco de dados, podem ser acessadas através de produtos e serviços, basicamente, os “produtos” permitem o acesso das informações nas últimas 24 horas não havendo a necessidade do Internauta se identificar. Já os “serviços” constituem o acesso irrestrito a todo o banco de dados, permitindo diferentes tipos de buscas através de rotinas pré-definidas, que ofertam os dados em base diária, mensal, anual, ou qualquer outro intervalo de tempo desejado. Neste caso, como o acesso é qualificado, há a necessidade de realizar um cadastro prévio e “logar” a cada novo acesso ao banco de dados. Em 09 de dezembro de 2016, estavam cadastrados 1.562 Usuários, que fizeram 14.010 acessos, portanto, com média de 6,5 acessos qualificados diariamente.

O Canal CLIMA da UNESP se tornou mais um canal de comunicação baseado na Internet operado pela Área de Hidráulica e Irrigação da UNESP Ilha Solteira, integrando o consolidado projeto “Planejamento e Gerenciamento Hidroagrícola e Ambiental”, que está em seu 12º ano e se configura em uma atividade permanente

de Extensão Universitária, que tem como objetivo mais amplo, transformar todos os dados obtidos em informação, disponibilizando-os e divulgando-as, integrando pesquisa, ensino e extensão.

Os dados de acesso, disponibilizados pela ferramenta Google Analytics, até o dia 30 de novembro de 2016 representam claramente o crescente interesse por informações acerca das condições climáticas locais (Figura 2). Anualmente o Canal CLIMA recebe cerca de 34,5 mil acessos que visualizam em torno de 5 páginas com permanência média de 9 minutos.

**Figura 2 - Acessos mensais ao portal Canal CLIMA UNESP Ilha solteira no período de janeiro de 2011 a novembro de 2016. Adaptado de UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (2016a).**



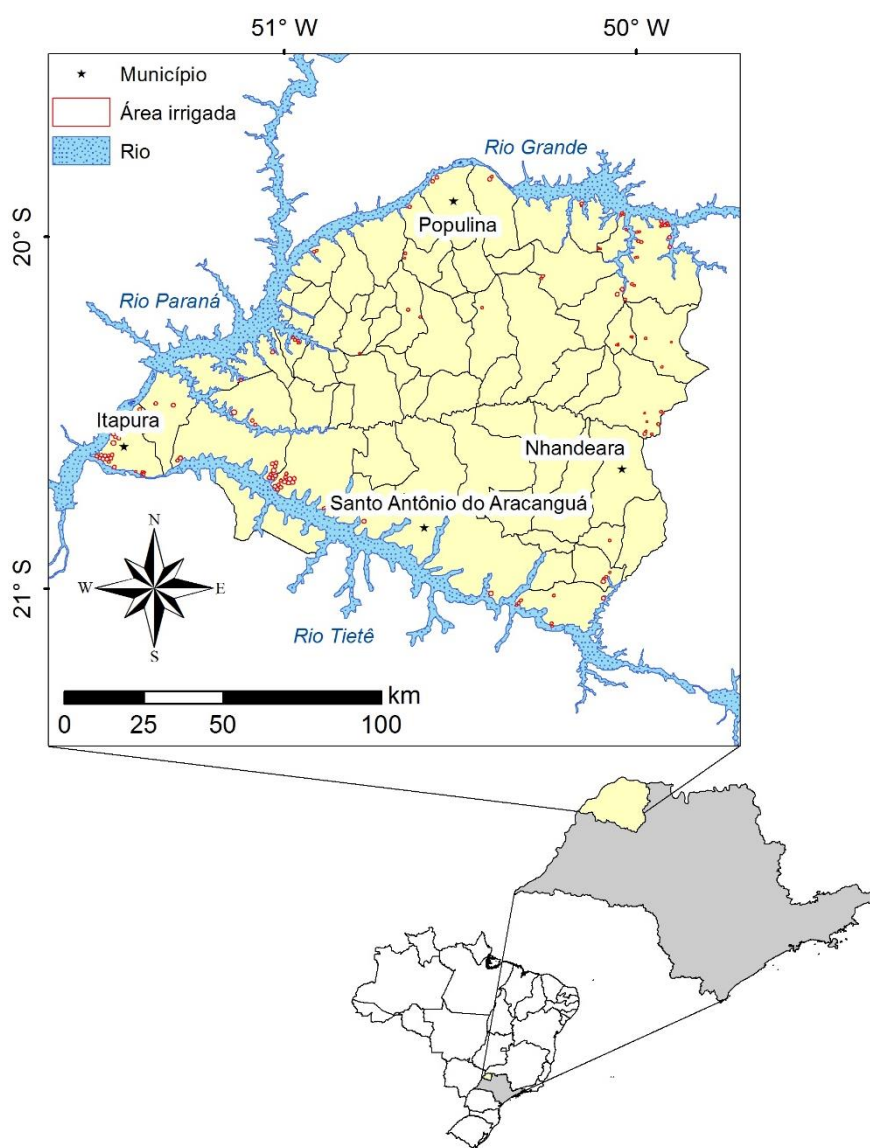
Em recente estudo, Amendola (2016) identificou um incremento de 6.528 hectares irrigados entre os anos de 2000 e 2015 na região Noroeste Paulista, reforçando a relevância da Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista e a divulgação dos dados através do Canal CLIMA da UNESP Ilha Solteira como instrumento de planejamento e uso eficiente dos recursos hídricos e ambiental na região.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Localização da área

A área delimitada para estudo corresponde a parte Oeste do que se caracterizou como a região Noroeste do Estado de São Paulo. Essa área abrange 60 municípios com área total estimada em 16.130 km<sup>2</sup> e localizada geograficamente entre os meridianos 49° 47' e 51° 34' de Longitude Oeste e os paralelos 19° 47' e 21° 8' de Latitude Sul (Figura 3).

**Figura 3 - Localização geográfica da área em estudo e identificação das áreas irrigadas por pivô central (Amendola, 2016), para o ano de 2015.**



Cerca de 42% dos municípios contidos na área de interesse utilizam o sistema de irrigação por pivôs centrais. A relação dos municípios, a quantidade de equipamentos instalados e a área irrigada por pivôs centrais estão detalhados na Tabela 1.

**Tabela 1 - Número de pivôs centrais e áreas irrigadas entre os 60 municípios de interesse.**

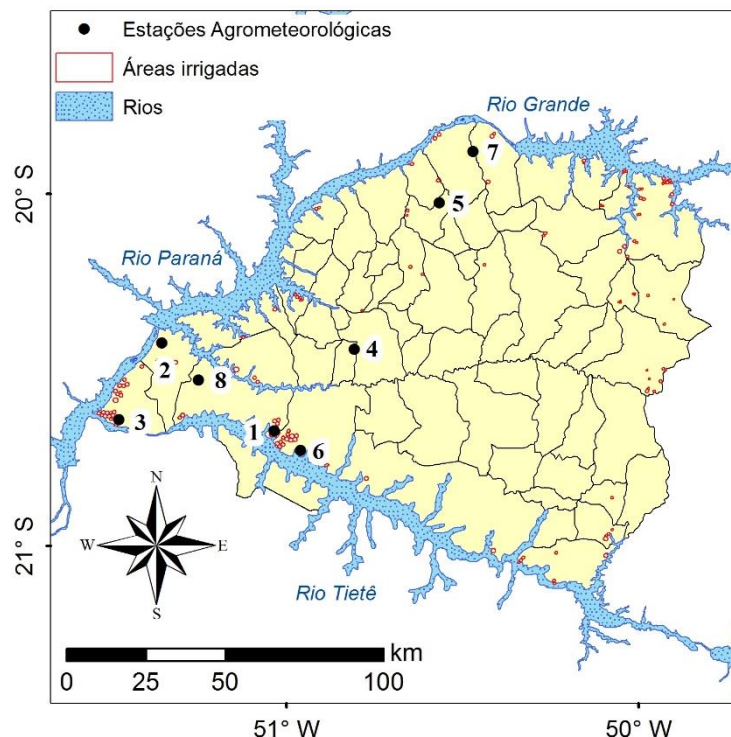
Municípios	Número de pivôs centrais	Área irrigada (ha)
Itapura	26	2.147
Sud Mennucci	13	1.320
Pereira Barreto	10	1.035
Cardoso	23	1.020
Buritama	6	374
Votuporanga	8	372
Populina	4	365
Suzanápolis	3	340
Santo Antônio do Aracanguá	3	319
Pedranópolis	3	277
Ilha Solteira	3	264
Turiúba	4	250
Santa Fé do Sul	4	202
Ouroeste	2	177
Mira Estrela	4	150
Fernandópolis	2	118
Urânia	2	117
Santa Clara d'Oeste	2	112
Álvares Florence	3	110
Rubinéia	1	97
Paranapuã	2	89
Mesópolis	1	79
Parisi	5	77
Estrela d'Oeste	1	50
Monções	1	48
Santana da Ponte Pensa	1	32
<b>Total</b>	<b>137</b>	<b>9.541</b>

Fonte: Adaptado de Amendola (2016)

### 3.2 Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista

Composta por 8 estações automáticas espalhadas em 7 municípios distintos (Figura 4), a Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista coleta diferentes informações climáticas (temperatura, umidade, radiação solar, velocidade e direção do vento, precipitação) e as envia ao Núcleo de Apoio Computacional à Irrigação - NACI, localizado junto ao Laboratório de Hidráulica e Irrigação da UNESP Ilha Solteira.

**Figura 4 - Espacialização da Rede de Estações Agrometeorológicas do Noroeste Paulista.**



É de responsabilidade do NACI o processamento e a disponibilização dos dados climáticos aos internautas pelo Canal CLIMA da UNESP Ilha Solteira através do sítio <http://clima.feis.unesp.br>.

As Estações estão listadas em ordem alfabética da seguinte forma: Bonança, Ilha Solteira, Itapura, Marinópolis, Paranapuã, Santa Adélia Pioneiros (com nomenclatura abreviada para Pioneiros), Populina e Santa Adélia (com nomenclatura abreviada para Sta. Adélia).

As Estações encontram-se posicionadas em diferentes municípios, com exceção das Estações Bonança e Sta. Adélia que pertencem ao município de Pereira Barreto. As localizações geográficas, a identificação numérica (ID), bem como a relação dos municípios a que pertencem, e a data de início de operação para cada Estação que compõe a Rede Agrometeorológica do Noroeste de São Paulo estão resumidas na Tabela 2.

**Tabela 2 - Posicionamento geográfico, localidade e data de início de operação Rede Agrometeorológica do Noroeste de São Paulo.**

ID	Estações	Latitude (Sul)	Longitude (Oeste)	Altitude (m)	Município	Início de operação
1	Bonança	20,6731	51,0339	357	Pereira Barreto	02/09/2011
2	Ilha Solteira	20,4234	51,3536	337	Ilha Solteira	20/08/1991
3	Itapura	20,6411	51,4750	335	Itapura	16/11/2011
4	Marinópolis	20,4465	50,8073	370	Marinópolis	06/08/1998
5	Paranapuã	20,0246	50,5659	436	Paranapuã	16/12/2010
6	Pioneiros	20,7283	50,9597	350	Sud Mennucci	07/07/2011
7	Populina	19,8796	50,4704	394	Populina	11/06/2011
8	Sta. Adélia	20,5283	51,2494	426	Pereira Barreto	14/07/2011

Fonte: Adaptado UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (2016a).

Para melhorar a compreensão da espacialização das Estações dentro da área delimitada foram especificadas, na Tabela 3, as distâncias, em linha reta, entre as Estações e estas, perpendicularmente, aos limites Oeste, Leste, Norte e Sul do mapa.

**Tabela 3 - Distâncias, em km, entre as Estações e entre os limites geográficos do mapa.**

	Bonança	Ilha Solteira	Itapura	Marinópolis	Paranapuã	Pioneiros	Populina	Sta. Adélia
Bonança	-	-	-	-	-	-	-	-
Ilha Solteira	43	-	-	-	-	-	-	-
Itapura	46	27	-	-	-	-	-	-
Marinópolis	35	57	73	-	-	-	-	-
Paranapuã	87	93	117	52	-	-	-	-
Pioneiros	10	53	54	35	88	-	-	-
Populina	106	110	135	72	19	107	-	-
Sta. Adélia	28	15	27	47	91	38	109	-
Norte	46	4	12	51	22	74	9	21
Sul	19	28	2	42	101	17	126	11
Leste	113	156	156	99	70	107	14	137
Oeste	16	2	4	60	34	21	16	23

As Estações estão padronizadas em áreas com dimensões de 10x10 metros, recobertas com grama batatais (*Paspalum notatum*), dotadas de sistemas de irrigação por gotejamento em subsuperfície (Figura 5) e equipadas com sensores padronizados (Tabela 4), diferenciando apenas no sistema de transmissão de dados. Para as Estações Ilha Solteira e Sta. Adélia as transmissões de dados são feitas por sistema de rádio (RF450, rádio 900 MHz, Campbell) e nas demais Estações são feitas por modem celular (GPRS).

**Figura 5 - Vista frontal de uma das Estações que compõe a rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista.**



Fonte: Fernando B. T. Hernandez, 2016

**Tabela 4 - Sensores padrões que equipam a Rede de Estações Agrometeorológicas no Noroeste Paulista.**

Modelo	Descrição do sensor	Fabricante
LI200	Piranômetro - Radiação global	LI-COR
LI190SB-L16	Quantum - Radiação fotossinteticamente ativa (PAR)	LI-COR
CH100-SW	Regulador e Carregador de tensão 12v	CAMPBELL
NR-LITE-L12	Radiômetro líquido - Radiação líquida	KIPP & ZONE
CS215-L18	Temperatura e umidade relativa	CAMPBELL
TB4-L15	Pluviômetro	CAMPBELL
03002-L12	Anemômetro - Velocidade e direção do vento	YOUNG
CR1000-ST-SW-NC	Datalogger CR1000	CAMPBELL
PTB101B	Barômetro	VAISALA

Fonte: Adaptado de UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (2016a).

### 3.3 Variáveis agrometeorológicas

Foram considerados os dados de ETo, calculados segundo Penman-Monteith (ALLEN et al, 1998), e a precipitação pluviométrica, em escalas mensal e anual, ambos para o período compreendido de janeiro de 2012 a dezembro de 2015 para todas as Estações que compõe a Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista.

Em função da variação no início de operação das Estações desconsiderou-se os dados referentes ao ano de 2011 e anteriores. Desta forma, os dados médios mensais e anuais foram calculados para um período de 4 anos completos (2012 a 2015).

A consistência dos dados foi caracterizada ao se verificar que não houveram dados discrepantes ou ausentes para a série estudada. Os resumos dos dados da ETo e da precipitação estão contidos na Tabela 5 e na Tabela 6.

**Tabela 5 - Médias da evapotranspiração de referência (ETo), calculada pelo método de Penman-Monteith para o período de 2012-2015.**

Estações	ETo (mm dia <sup>-1</sup> )												Média
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
Bonança	4,6	4,5	4,0	3,3	2,6	2,2	2,5	3,6	4,1	4,7	4,6	4,5	3,8
Ilha Solteira	5,1	5,0	4,2	3,7	3,1	2,7	3,1	4,4	5,2	5,1	5,2	5,2	4,3
Itapura	5,2	4,8	4,3	3,4	2,8	2,5	2,8	4,1	4,6	5,0	5,0	4,9	4,1
Marinópolis	4,9	4,9	4,2	3,5	2,8	2,5	3,0	4,3	5,0	5,1	4,9	4,9	4,2
Paranapuã	4,1	4,6	3,9	3,4	2,8	2,5	2,9	3,9	4,6	4,9	4,7	4,8	3,9
Pioneiros	4,8	4,5	3,7	3,3	2,3	2,2	2,2	3,4	3,7	4,3	3,9	3,8	3,5
Populina	4,5	4,6	4,0	3,3	2,7	2,4	2,7	3,8	4,3	4,9	4,4	4,1	3,8
Sta. Adélia	4,7	4,6	3,9	3,4	3,1	2,9	3,4	4,9	4,8	5,4	4,7	4,7	4,2

Fonte: adaptado de UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (2016a).

**Tabela 6 - Precipitações médias mensais e precipitação anual para o período de 2012-2015, Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista, UNESP Ilha Solteira.**

Estações	Precipitação pluvial (mm)												Ano
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
Bonança	163	187	142	65	65	55	33	3	104	53	180	164	1214
Ilha Solteira	197	173	192	111	42	69	31	6	74	95	200	156	1346
Itapura	131	223	195	65	45	60	36	3	93	61	162	132	1206
Marinópolis	189	175	200	58	56	62	33	6	77	63	174	161	1254
Paranapuã	229	183	279	67	55	60	41	6	76	94	150	220	1460
Pioneiros	168	200	147	78	64	61	37	4	121	53	187	167	1287
Populina	212	124	198	96	65	52	34	2	80	100	152	131	1246
Santa Adélia	182	124	192	96	60	63	40	5	112	71	140	156	1241

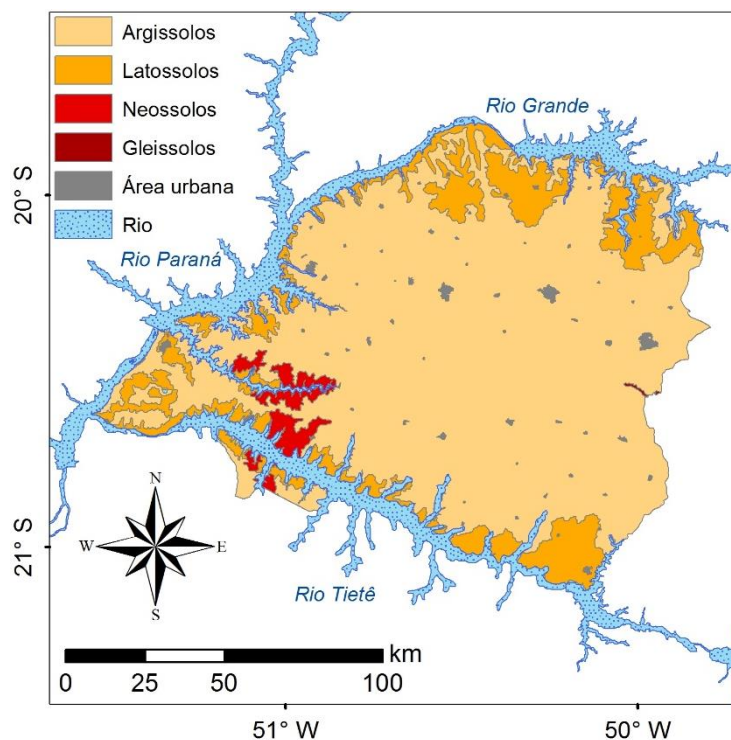
Fonte: adaptado de UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (2016a).

### 3.4 Balanço hídrico climatológico

Com os valores da ETo e da precipitação pluviométrica foi possível calcular o balanço hídrico climático mensal. A metodologia utilizada foi proposta por Thornthwaite e Mather (1995) e os balanços hídricos para cada Estação foram calculados pela ferramenta BHnorm (ROLIM, 1998).

A capacidade de água disponível (CAD) adotada para os cálculos foi de 60 mm. A definição desse valor considerou uma profundidade média do solo de 60 centímetros, que abrange grande parte das culturas anuais e perenes, e a predominância de argissolos na área delimitada (Figura 6), cuja CAD é, em média, de 1,0 mm cm<sup>-1</sup> (REICHARDT, 1987). Assim, o valor indicado da CAD pode ser considerado adequado para o planejamento das principais culturas da região.

**Figura 6 - Mapa pedológico para região delimitada. Adaptado de Oliveira et al. (1999).**



O estudo do balanço hídrico teve por finalidade indicar os meses mais críticos para o manejo da irrigação. A partir desses meses foi possível identificar e zonear áreas homogêneas quanto a distribuição da ETo.

### 3.5 Procedimentos para elaboração dos mapas climáticos

#### 3.5.1 Obtenção e recorte dos mapas

Foram obtidos mapas vetoriais do Brasil, dos Estados brasileiros e dos municípios do Estado de São Paulo pela importação de arquivos gratuitamente disponibilizados no endereço <http://downloads.ibge.gov.br>. Por padrão, esses mapas possuem as coordenadas geográficas referenciadas de acordo com o Sistema de Referência Geocêntrica para as Américas (SIRGAS 2000).

O arquivo vetorial em formato *shapefile* com os municípios do Estado de São Paulo foi inserido no *software* ArcGis® 10.1 e, posteriormente, procedeu-se a seleção (comando *Select Features* e *Select by Lasso*) dos municípios de interesse para o estudo.

Os municípios selecionados foram recortados pelo processo *Edit Features*, e exportados no formato *shapfile*. As coordenadas foram reprojatadas de SIRGAS 2000 para UTM (Universal Transversa de Marcator), Zona 22º Sul, Datum de referência SAD 69 (South American Datum), utilizando a sequência de comandos *Geoprocessing, ArcToolbox, Data Management Tools, Projections and Transformatios, Project*.

O arquivo *shapefile* contendo a seleção dos municípios de interesse estabeleceu o mapa base para interpolação dos dados.

### 3.5.2 Inserção dos pontos para interpolação dos dados

Os dados médios obtidos do Canal CLIMA da UNESP Ilha Solteira foram inseridos em planilhas eletrônicas (MS Excel) obedecendo a seguinte ordem: coluna A - identificação (ID) das Estações, numeradas de 1 a 8 segundo a ordem estabelecida na Tabela 2; coluna B - nome das Estações agrometeorológicas; coluna C - coordenadas X (longitude), expressas em UTM, Zona 22º sul; coluna D - coordenadas Y (latitude), também expressas em UTM, Zona 22º sul e colunas de E a P com as médias das ETo para os meses janeiro a dezembro.

Essas tabelas foram importadas para o *software* ArcGis® 10.1, pelo comando *Add Data*, e convertidas em pontos geográficos, pelo comando *Display XY Data*. Posteriormente os pontos foram exportados como arquivo *shapfile* (*Data, Export Data*).

### 3.5.3 Escolha do método de interpolação e ajuste de modelos à semivariogramas experimentais

O método escolhido para interpolações dos dados foi o da krigagem, por fornecer os algoritmos de erros associados aos resultados obtidos segundo um modelo contínuo de variação espacial (CRESSIE, 1993).

Foram geradas novas planilhas eletrônicas (MS EXCEL) contendo os dados médios da ETo mês a mês e ordenados da seguinte forma: coluna A - identificação (ID) das Estações, numeradas de 1 a 8 segundo a ordem proposta na Tabela 2; coluna B - coordenadas X (longitude), expressas em UTM, Zona 22º Sul; coluna C -

coordenadas Y (latitude), também expressas em UTM, Zona 22º Sul e coluna D com as médias das ETo para o mês de interesse, representando os valores de Z.

Cada planilha foi importada para o *software* geoestatístico GS+, *Gamma Design Software* (2012), pela sequência de comandos *Data, Import data*. Posteriormente foi executado o comando *Autocorrelacion, Variogram e Primary variate (Z)* para o ajuste automático de modelos teóricos à semivariogramas experimentais dos dados.

Como critério para determinação do melhor ajuste, o software considera o maior valor para o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o menor valor para soma de quadrados de resíduos ( $SQ_{res}$ ).

Executado o ajuste, as informações para o tipo (linear, exponencial, gaussiano, esférico) e os parâmetros (alcance da dependência espacial, efeito pipeta e distância entre o efeito pipeta e o patamar) do modelo de semivariograma foram transcritos para o *software* ArcGis® 10.1 para interpolação dos dados e construção dos mapas de distribuição da ETo na área de estudo.

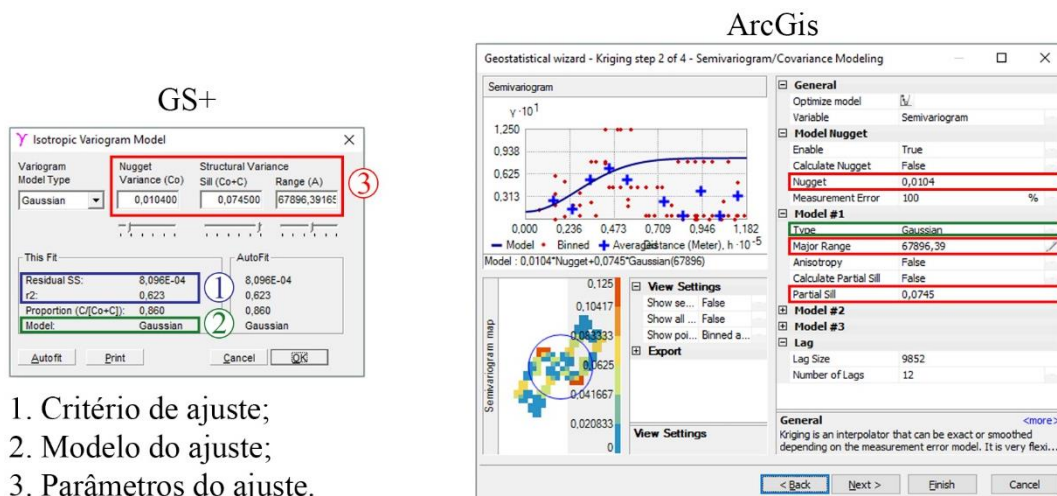
#### 3.5.4 Interpolação e construção dos mapas climáticos

Para interpolação dos dados, na plataforma ArcGis® 10.1, foi utilizado o procedimento *Geoestatistical Analyst*. O tipo de krigagem escolhida foi a ordinária e os ajustes de modelos à semivariogramas experimentais foram do tipo Gaussiano.

Durante o procedimento de interpolação, é permitido ao usuário inserir e, ou, alterar informações como o tipo e os parâmetros dos modelos. Assim, as informações obtidas no software GS+ foram transcritas para o software ArcGis® 10.1 (Figura 7).

Ao finalizar o procedimento *Geoestatistical Analyst* é gerado um raster que representa a interpolação dos dados, em concordância com o ajuste do modelo de semivariograma definido. Esse raster foi estendido à dimensão da área delimitada pelos municípios por meio dos comandos *Properties, Extent* e os intervalos entre as classes da ETo foram padronizados em  $0,5 \text{ mm dia}^{-1}$ .

**Figura 7 - Transferência dos parâmetros de ajuste dos modelos de semivariogramas entre os softwares GS+ e ArcGis®.**



### 3.5.5 Definição das Zonas Homogêneas

Os meses em que se registraram os maiores valores de deficiência hídrica foram caracterizados como aqueles mais críticos para o manejo da irrigação e serviram de referência para determinação de Zonas Homogêneas da ETo.

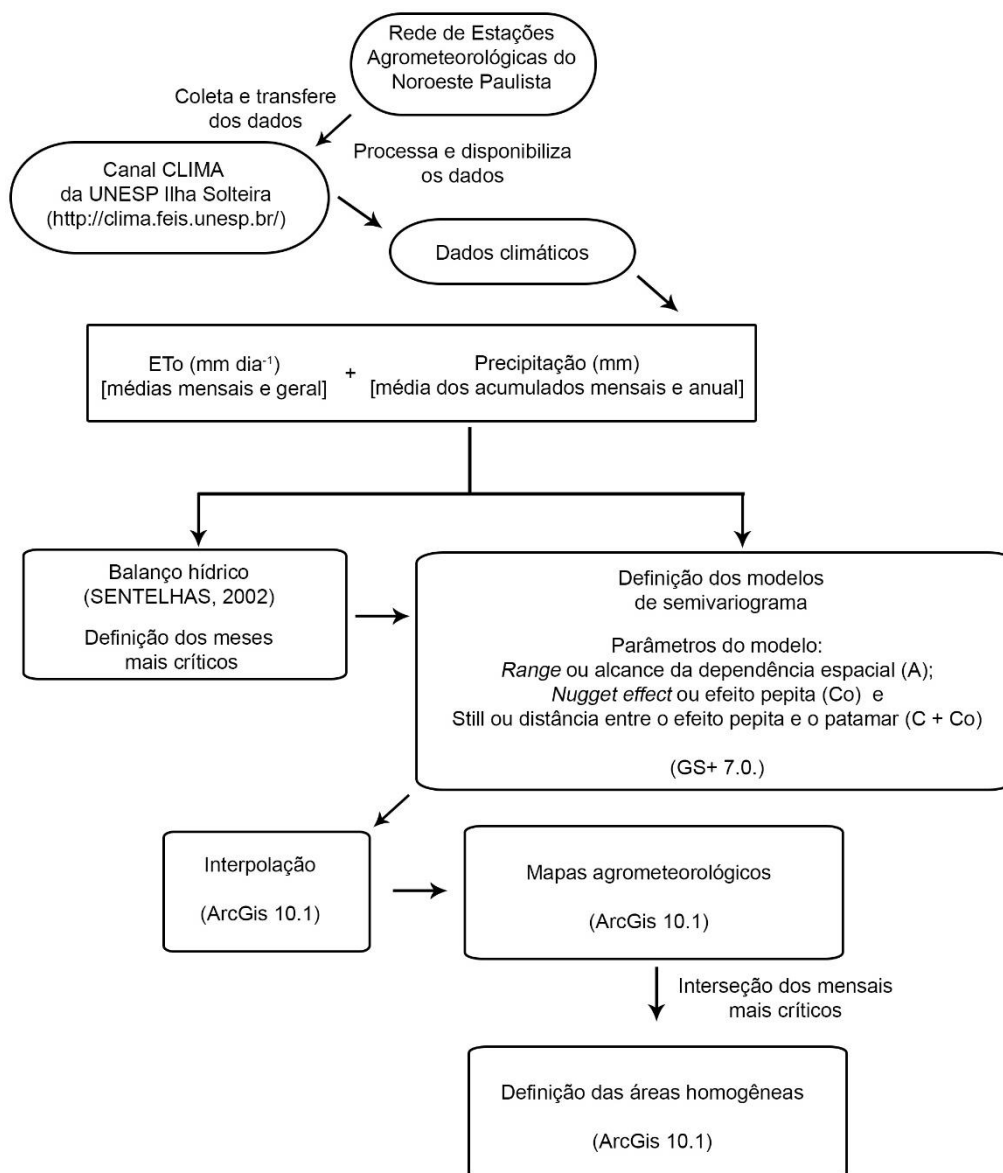
A interseção dos mapas de distribuição da ETo para os meses críticos possibilitou a visualização de áreas equivalentes. A interseção foi processada pelos comandos *Geoprocessing, Intersect*.

Sobre as Zonas Homogêneas foram desenhados, manualmente, os polígonos que caracterizaram as zonas climáticas.

Foi obedecida a seguinte sequência de eventos: os dados climáticos são coletados pela Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista que os transfere para a corpo técnico do Canal CLIMA da UNESP, que processa e disponibiliza os dados climáticos aos usuários finais. Os dados de interesse para a construção dos mapas foram a ETo e a Precipitação, ambos em base histórica. Os dados da ETo foram espacializados por krigagem para construção de mapas médios mensais. Além disso, os dados da ETo em conjunto com a precipitação foram utilizados para determinação do balanço hídrico que indicou os meses mais críticos para irrigação (meses com maiores deficiências hídricas). Esses mapas, para os meses mais críticos foram sobrepostos para determinação do mapa final, que caracterizou as Zonas Homogêneas de ETo. Um resumo de todo o procedimento adotado para

obtenção dos mapas e Zonas Homogêneas é apresentado em forma de organograma na Figura 8.

**Figura 8 - Organograma dos procedimentos metodológicos adotados para obtenção dos mapas de distribuição da ETo mensais e definição das Zonas Homogêneas.**



### 3.6 Validação das Zonas Homogêneas

A validação das áreas ocorreu aplicando-se diferentes indicadores que correlacionam dados observados com dados estimados. Essa metodologia é uma adaptação daquela proposta por Castro et al. (2010) que utilizou os indicadores na escolha do método de interpolação mais indicado para os parâmetros do balanço hídrico.

Foi considerado como valor observado a média da ETo para as Estações contidas dentro de uma mesma Zona Homogênea e, de forma análoga, foi considerado como valor estimado a média da ETo predita para as Estações contidas nessa mesma Zona Homogênea.

As estimativas da ETo foram obtidas pelo procedimento *Validation/Prediction* do ArcGis® 10.1 que determinou os valores preditos e os erros padrões associados a cada ponto inserido no mapa.

Para a Zona Homogênea em que não houve a presença de Estações agrometeorológica os valores estimados e observados foram considerados equivalentes. Esses valores foram calculados com base na ponderação feita pelo software ArcGis® 10.1. Desta forma, para os meses em que a zona foi coberta por uma única classe de intervalo da ETo os valores estimados e observados foram os do ponto médio da classe. Para os meses em que a zona foi coberta predominantemente por duas classes de intervalos da ETo os valores foram determinados pela média aritmética dos pontos médios de cada classe.

### 3.6.1 Coeficiente de correlação de Pearson (r)

É uma medida do grau de relação linear entre duas variáveis quantitativas que pode assumir valores entre -1 a 1, sendo os valores negativos uma indicativa de relação inversa entre as variáveis, enquanto uma variável aumenta a outra variável diminui, e os valores positivos uma indicativa de relação direta, enquanto uma variável aumenta a outra também aumenta. O valor 0 (zero) representa que não houve correlação entre as variáveis analisadas.

O coeficiente de correlação de Pearson é calculado pela seguinte equação:

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{(\sum(x_i - \bar{x})^2) \cdot (\sum(y_i - \bar{y})^2)}} \quad (1)$$

Onde r é o coeficiente de correlação de Pearson,  $x_i$  são os valores observados,  $\bar{x}$  é a média dos valores observados,  $y_i$  são os valores estimados e  $\bar{y}$  é a média dos valores estimados.

### 3.6.2 Coeficiente de determinação ( $R^2$ )

Avalia a qualidade do ajuste do modelo indicando quanto o modelo foi capaz de explicar os dados coletados. O coeficiente de determinação é dado pela equação:

$$R^2 = \frac{(\sum (x_i - \bar{x}) \cdot y_i)^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (2)$$

Onde  $x_i$  são os valores observados,  $\bar{x}$  é a média dos valores observados,  $y_i$  são os valores estimados e  $\bar{y}$  é a média dos valores estimados.

### 3.6.3 Raiz do erro médio quadrático (REMQ)

Índice comumente utilizado para expressar a acurácia dos resultados numéricos com a vantagem de apresentar os valores dos erros nas mesmas dimensões da variável analisada. O REMQ é definido por:

$$\text{REMQ} = \sqrt{\frac{\sum (O_i - E_i)^2}{J}} \quad (3)$$

Onde  $O_i$  representou os valores observados,  $E_i$  representou os valores estimados e  $J$  é o número de observações.

### 3.6.4 Índice de concordância (d)

Segundo Camargo e Sentelhas (1997) a exatidão de um modelo está associada ao afastamento dos valores estimados em relação aos observados; matematicamente, esta aproximação é dada pelo índice de concordância (d), cujos valores oscilam de zero para nenhuma concordância a 1 para a concordância perfeita. O valor d é determinado pela equação:

$$d = 1 - \frac{\sum (O_i - E_i)^2}{\sum (|O_i - \bar{O}| + |E_i - \bar{O}|)^2} \quad (4)$$

Onde  $d$  é o índice de concordância,  $O_i$  representou os valores observados,  $E_i$  representou os valores estimados e  $\bar{O}$  é a média dos valores observados.

### 3.7 Tabela de distribuição mensal da ETo

Após a validação do mapa que representa as Zonas Homogêneas foi construída uma tabela com os valores médios mensais para cada zona. A construção dessa tabela seguiu os mesmos procedimentos para validação do mapa, em que, para cada Zona Homogênea, foi associado o valor que representa a média das Estações agrometeorológicas contidas na respectiva Zona Homogênea.

### 3.8 Simulação de custos de energia com irrigação por pivôs centrais

Estabelecidas as Zonas Homogêneas da ETo, foram realizadas simulações para quantificar os custos com energia para irrigação com pivô central em diferentes Zonas Homogêneas, considerando as diferentes fontes de dados da ETo (Estações mais próximas e a estimativa da Zona Homogênea) para o cálculo da evapotranspiração da cultura (ETc).

As simulações consideraram pivôs reais e foram realizadas para um ciclo da cultura do milho cujo as datas de plantio, florescimento e colheita também reais. As especificações do pivô (Tabela 7) e da cultura cultivada (Tabela 8) sob irrigação foram disponibilizadas por irrigantes da região.

**Tabela 7 - Especificações dos pivôs utilizados para simulação com custos de energia.**

Pivô	Latitude (Sul)	Longitude (Oeste)	Área irrigada (ha)	Potência (kW)	Lâmina 100% (mm)	Giro 100% (h)	Capacidade (mm dia <sup>-1</sup> )
P1	20,6833	50,6833	145	362	4,3	12,9	7,0
P2	20,3167	51,0167	93	163	5,4	12,5	9,0
P3	20,0333	50,9167	98	71	4,5	10,6	9,0

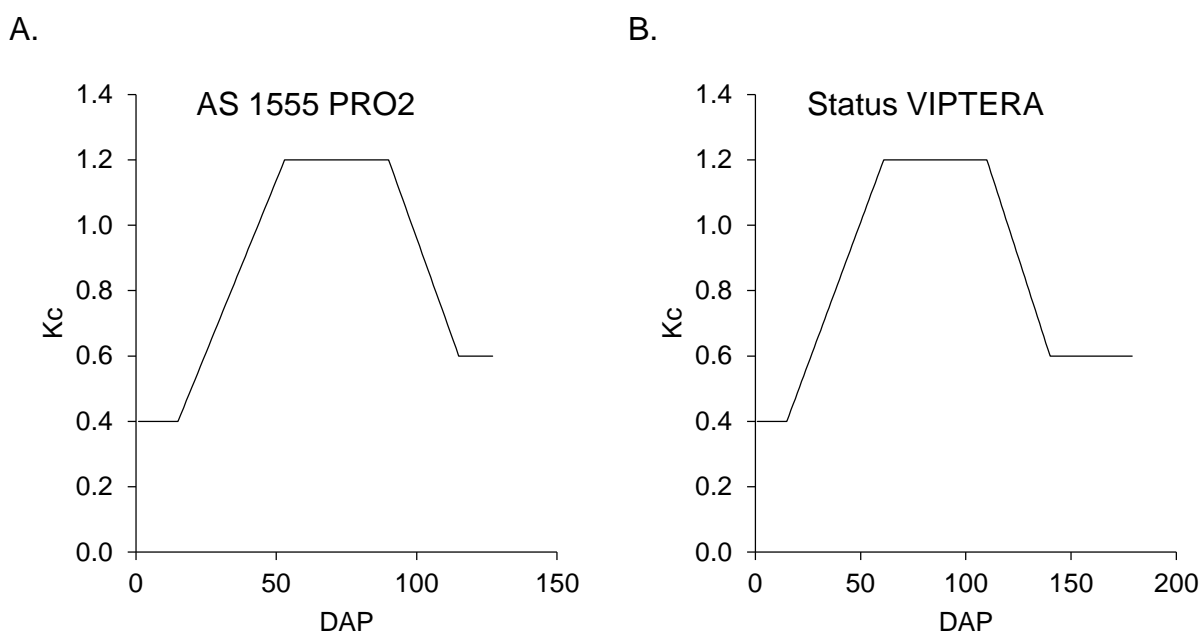
**Tabela 8 - Especificações das culturas selecionadas para análise de custo energético.**

Pivô	Cultura	Cultivar	Datas			Ciclo (dias)
			Plantio	Florescimento	Colheita	
P1	Milho	STATUS Viptera	25/04/2016	25/06/2016	21/10/2016	179

P2	Milho	AS 1555 PRO2	25/03/2016	17/05/2016	30/07/2016	127
P3	Milho	AS 1555 PRO2	25/03/2016	17/05/2016	30/07/2016	127

A evapotranspiração da cultura foi estimada segundo a metodologia descrita em Allen et al. (1998), multiplicando o valor da ETo pelo Coeficiente de Cultura (Kc) variável a cada fase fenológica, Figura 9 A e B, respeitando as condições locais definidas na Tabela 8.

**Figura 9 - Coeficiente de cultura (Kc) para as cultivares de milho AS 1555 PRO2 (A) e Status VIPTERA (B). Adaptadp de Allen et al. (1998).**



As tarifas energéticas foram as práticas pela Elektro<sup>2</sup>, considerando as seguintes características: Grupo A4, Rural Irrigante, Horário Verde, Trifásico. Para fins práticos assume-se que a demanda contratada não foi ultrapassada e que a irrigação ocorreu apenas no horário fora de ponta (Tabela 9).

**Tabela 9 - Tarifas energéticas praticadas pela concessionária de energia.**

Tarifa de energia (TE)	Consumo fora ponta (kWh)	Consumo reservado fora ponta (kWh)	Demanda contratada (kW)
Valor (R\$)	0,20416	0,06125	10,24200

<sup>2</sup> <http://www.elektro.com.br/seu-negocio/irrigacao-e-aquicultura>

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Balanço hídrico climatológico

O somatório mensal da ETo, representada pela evapotranspiração assumindo um coeficiente de cultura médio de 1,0 - condição ideal para a maioria das culturas presentes na região - em uma profundidade efetiva do sistema radicular de 60 cm, foi superior a precipitação mensal em todas as localidades estudadas, o que, em geral, levou à déficits hídricos concentrados entre os meses de abril a outubro e excedentes hídricos concentrados entre os meses de janeiro a março (Tabela 10). A precipitação média para a região foi de 1.262 mm, ao passo que a ETo foi de 1.454 mm, representando um déficit de 15% no volume de chuvas para suprir a demanda evapotranspirativa regional (Tabela 10).

Analisando o comportamento para as médias anuais da precipitação, ETo e déficits hídricos, é possível inferir que a área onde se localiza a Estação Marinópolis apresenta as condições climáticas menos favoráveis à atividade agrícola irrigada. Essa área apresenta o menor valor acumulado de chuvas (1.200 mm) e o maior déficit hídrico (427 mm). Análise semelhante pode ser indicada para a área onde se localiza a Estação Ilha Solteira, que registrou a maior demanda evapotranspirativa da região, 1.575 mm, superando em aproximadamente 22% o volume de chuvas acumulado para a mesma localidade, além de somar um déficit hídrico de 400 mm (Tabela 10).

Entre as localidades avaliadas a que contém a Estação Pioneiros foi a que apresentou melhores condições climáticas para o desenvolvimento de atividades irrigadas, uma vez que, embora registre o 3º menor volume de chuvas, apresenta a menor demanda evapotranspirativa (1.332 mm) da região e a o menor volume de déficit (184 mm).

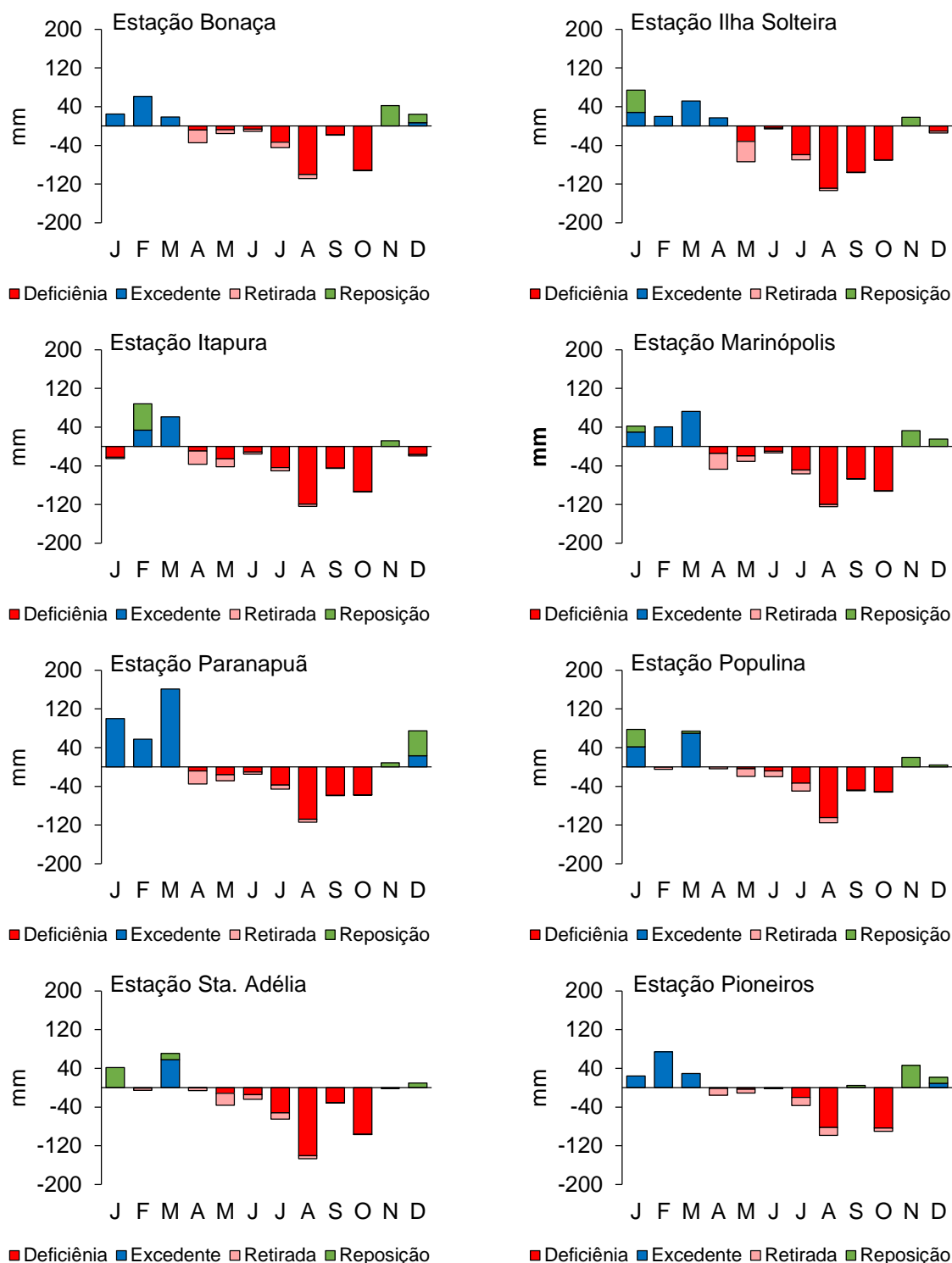
De acordo com Doorenbos e Pruitt (1997), para o desenvolvimento de um projeto de irrigação, é indispensável o conhecimento da frequência e do volume das chuvas bem como a época e os períodos de déficit. Essas informações são disponibilizadas no estudo do balanço hídrico que, segundo Sentelhas e Angelocci (2009), é o cálculo das entradas e saídas de água num sistema dentro de uma escala espacial.

**Tabela 10 - Resumo mensal e anual dos parâmetros precipitação (P), evapotranspiração de referência (ETo), déficit hídrico (Def) e excedente hídrico (Exc) para a Rede de Agrometeorológica do Noroeste Paulista.**

Bonança	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
P (mm)	163	187	142	65	65	55	33	3	104	53	180	164	1214
ETo (mm)	138	126	124	99	81	66	78	112	123	146	138	140	1369
Def (mm)	-	-	-	8	8	7	33	100	19	92	-	-	266
Exc (mm)	25	61	18	-	-	-	-	-	-	-	-	7	111
Ilha Solteira	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
P (mm)	227	160	182	128	22	75	26	3	60	88	174	147	1292
ETo (mm)	153	140	130	111	96	81	96	136	156	158	156	161	1575
Def (mm)	-	-	-	-	32	4	59	129	96	70	-	10	400
Exc (mm)	28	20	52	17	-	-	-	-	-	-	-	-	117
Itapura	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
P (mm)	131	222	195	65	45	60	36	3	93	61	162	132	1205
ETo (mm)	156	134	133	102	87	75	87	127	138	155	150	152	1496
Def (mm)	22	-	-	9	26	11	44	119	45	94	-	16	386
Exc (mm)	-	33	62	-	-	-	-	-	-	-	-	-	95
Marinópolis	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
P (mm)	209	157	221	68	35	74	27	4	70	51	145	139	1200
ETo (mm)	147	137	130	105	87	75	93	133	150	158	147	152	1515
Def (mm)	-	-	-	9	33	1	57	125	80	107	2	13	427
Exc (mm)	2	20	91	-	-	-	-	-	-	-	-	-	113
Paranapuã	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
P (mm)	254	169	260	69	28	72	35	6	63	88	132	238	1414
ETo (mm)	123	129	121	102	87	75	90	121	138	152	141	149	1427
Def (mm)	-	-	-	8	37	2	47	111	74	64	9	-	353
Exc (mm)	131	40	139	-	-	-	-	-	-	-	-	29	340
Pioneiros	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
P (mm)	168	200	147	78	63	61	37	4	121	53	187	167	1286
ETo (mm)	144	126	118	93	74	63	74	102	108	143	141	146	1332
Def (mm)	-	-	-	2	3	1	20	82	-	77	-	-	184
Exc (mm)	24	74	29	-	-	-	-	-	-	-	-	11	138
Populina	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
P (mm)	212	124	198	95	65	52	34	2	80	100	152	131	1245
ETo (mm)	135	129	124	99	84	72	84	118	129	152	132	127	1384
Def (mm)	-	-	-	-	4	8	33	105	48	51	-	-	250
Exc (mm)	41	-	69	-	-	-	-	-	-	-	-	-	111
Sta. Adélia	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
P (mm)	182	124	192	96	60	63	40	5	112	71	140	156	1241
ETo (mm)	141	129	121	102	96	87	105	152	144	167	141	146	1531
Def (mm)	-	1	-	-	12	14	52	141	32	96	1	-	349
Exc (mm)	-	-	59	-	-	-	-	-	-	-	-	-	59

Importante ferramenta de planejamento e gestão, o balanço hídrico médio no Noroeste Paulista, no período de 2012 a 2015, evidenciou que os meses críticos para a irrigação foram os de agosto, setembro e outubro quando os déficits de água no solo são mais intensos, com médias de 114, 49 e 81 mm, respectivamente, ao mesmo tempo em que são maiores as taxas de ETo, levando ao maior uso da água e à elevação dos custos de produção nesses meses (Figura 10).

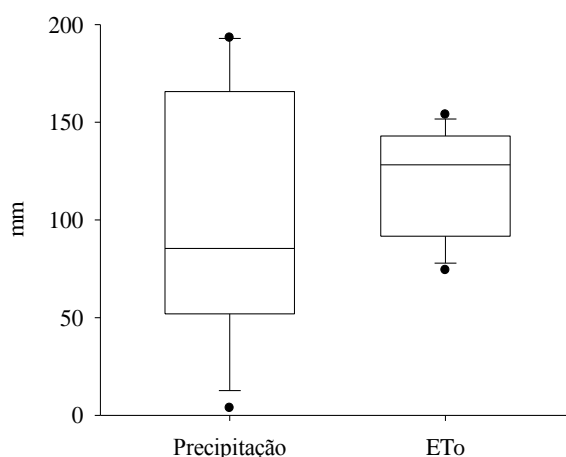
**Figura 10 - Balanço hídrico climatológico para o período de 2012 a 2015 utilizando os dados da Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista.**



A variabilidade observada ao longo do ano para precipitação foi maior que a observada para ETo, isso porque o padrão de distribuição das chuvas é fortemente influenciado pela ocorrência cada vez mais frequente de chuvas convectivas,

caracterizadas por uma distribuição localizada, grande variabilidade espacial, intensidade moderada a forte, de curta a média duração e predominância de ocorrência no final da tarde ou início da noite (UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA, 2016b; GARCEZ; ALVAREZ, 1988). Ao contrário da precipitação, que apresenta uma grande variabilidade principalmente pela ocorrência de chuvas convectivas, a ETo tem uma distribuição dependente das condições gerais do tempo (Figura 11).

**Figura 11 - Análise descritiva das médias mensais para precipitação e evapotranspiração de referência registradas na Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista.**



Segundo Oliveira, Kuhn e Silva (2006), a chuva constitui-se na mais importante fonte natural de água às plantas e na principal via de reabastecimento do reservatório de água do solo. Segundo os mesmos autores, quando a quantidade de chuva não é suficiente para atender as necessidades da cultura, complementa-se o fornecimento da água com a irrigação. Desta forma, as informações de ETo e precipitação são fundamentais para o planejamento das atividades agrícolas locais, principalmente aquelas relacionadas à época de plantio e ao manejo da irrigação. A análise da distribuição temporal desses fatores climáticos fornece subsídio para minimizar os efeitos adversos do clima na condução das diversas culturas da região.

## 4.2 Distribuição espacial da ETo

O modelo e os parâmetros de ajuste à semivariogramas experimentais utilizados para interpolação dos dados da ETo estão contidos na Tabela 11.

**Tabela 11 - Critérios de ajuste ( $SQ_{res}$  e  $R^2$ ), tipo de modelo e parâmetros de semivariogramas experimentais para interpolação de dados da ETo por krigagem ordinária.**

Meses	$SQ_{res}$	$R^2$	Modelo	Parâmetros		
				Co	C + Co	A
Janeiro	$3,47 \cdot 10^{-3}$	0,50	Gaussiano	0,0290	0,3470	175.629,952
Fevereiro	$8,09 \cdot 10^{-4}$	0,62	Gaussiano	0,0104	0,0745	67.896,392
Março	$8,62 \cdot 10^{-4}$	0,63	Gaussiano	0,0215	0,2430	181.865,335
Abril	$6,82 \cdot 10^{-5}$	0,65	Gaussiano	0,0129	0,0567	141.162,141
Maio	$5,66 \cdot 10^{-3}$	0,54	Gaussiano	0,0001	0,1132	41.742,424
Junho	$4,83 \cdot 10^{-3}$	0,49	Gaussiano	0,0001	0,0872	31.869,734
Julho	$0,54 \cdot 10^{-1}$	0,29	Gaussiano	0,0001	0,2112	32.389,350
Agosto	$1,25 \cdot 10^{-1}$	0,34	Gaussiano	0,0010	0,3460	31.523,325
Setembro	$1,10 \cdot 10^{-1}$	0,45	Gaussiano	0,0010	0,4130	45.552,936
Outubro	$0,45 \cdot 10^{-1}$	0,21	Gaussiano	0,0001	0,1672	34.467,811
Novembro	$0,53 \cdot 10^{-1}$	0,37	Gaussiano	0,0620	1,1590	189.313,153
Dezembro	$0,78 \cdot 10^{-1}$	0,24	Gaussiano	0,1150	1,0160	180.999,309

$SQ_{res}$  - soma de quadrados do resíduo;  $R^2$  - coeficiente de regressão; Co - efeito pepita; C + Co - distância entre o efeito pepita e o patamar e A - alcance.

Esses parâmetros foram utilizados para gerar os mapas interpolados da ETo para cada mês. Segundo Mardikis et al. (2005) a utilização da krigagem em espacialização de dados climáticos é comumente utilizada. A krigagem assume que a distância (ou a diferença) entre os pontos amostrados reflete uma correlação espacial que pode ser utilizada para explicar sua variação em uma superfície (CHILDS, 2004).

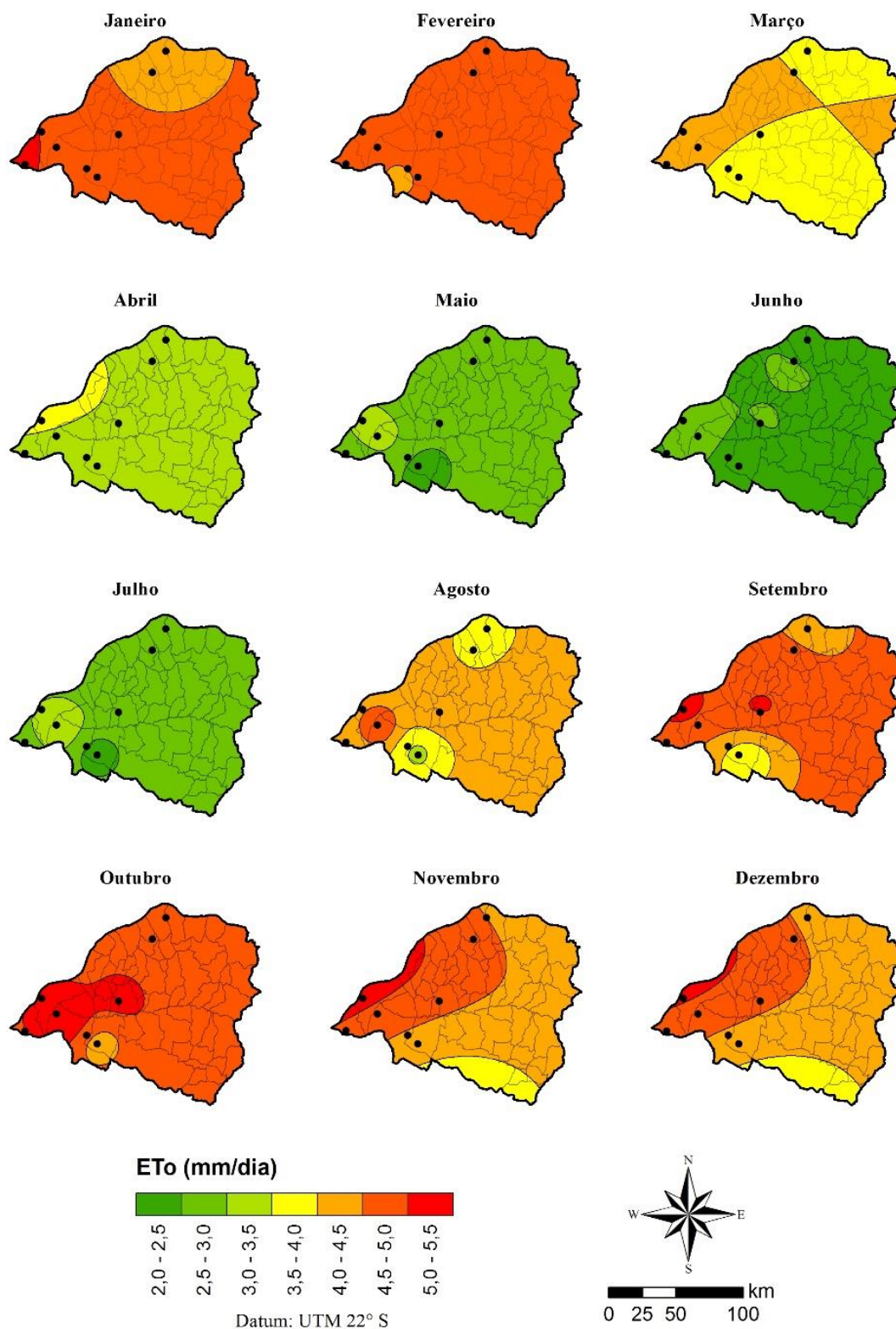
Alguns trabalhos sugerem um melhor desempenho utilizando a krigagem como método de interpolação em comparação a outros métodos (MELLO et al., 2003; ALVES et al., 2008; VILANOVA; SIMÕES; TRANIN, 2012; LEMOS FILHO et al., 2010; SARTORI et al., 2010; RIBEIRO et al., 2011).

A distribuição espacial da ETo, Figura 12, destaca que a demanda evapotranspirativa reduz-se continuamente entre os meses de janeiro a junho, quando atinge o menor valor da ETo (média de  $2,5 \text{ mm dia}^{-1}$ ) e, a partir daí, aumenta progressivamente até atingir o maior valor em outubro (média de  $5,0 \text{ mm dia}^{-1}$ ).

A ETo representa o consumo hídrico de referência para uma determinada região, sendo utilizado para o cálculo da necessidade de água de todas as culturas (CONCEIÇÃO, 2005). O cálculo da necessidade de água para uma determinada

cultura é fator principal e determinante para um manejo adequado da irrigação. Desta forma, a disponibilização da distribuição mensal da ETo possibilita aos irrigantes uma importante ferramenta para o uso mais eficiente da tecnologia da irrigação.

**Figura 12 - Distribuição da ETo para a região delimitada.**

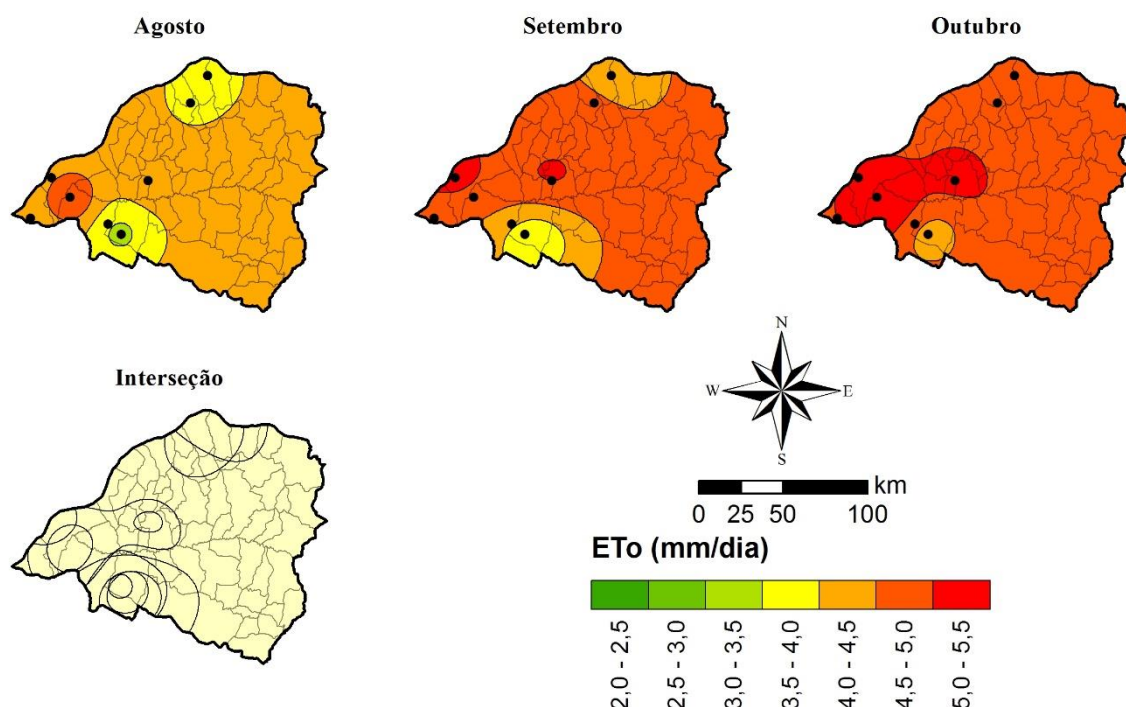


### 4.3 Zonas homogêneas

O balanço hídrico e os mapas de distribuição da ETo reforçam a decisão de que os meses de agosto, setembro e outubro são os mais críticos para o manejo da irrigação, uma vez que a demanda evapotranspirativa é crescente em um período no qual as deficiências hídricas, em média, são elevadas.

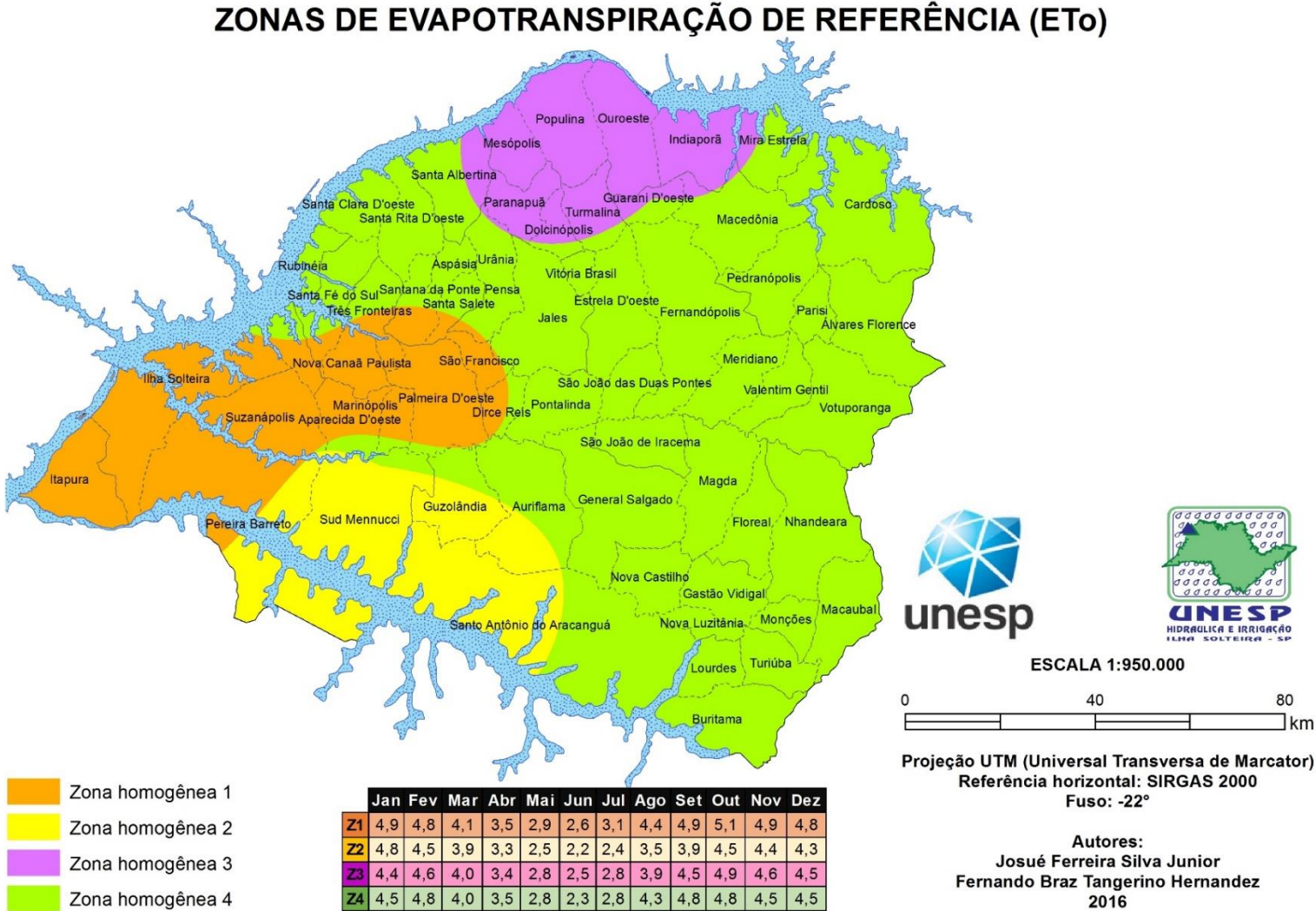
Essa premissa foi a base para a elaboração do mapa final de regiões homogêneas da ETo para o Noroeste Paulista. Metodologicamente, os mapas para esses meses críticos foram sobrepostos para visualização e esboço de Zonas Homogêneas de ETo, como indicado na Figura 13.

**Figura 13 - Interseção dos mapas para os meses mais críticos para o manejo da irrigação.**



Da sobreposição surgem quatro Zonas Homogêneas de ETo, uma a Oeste cujos valores médios são mais elevados e engloba o município de Itapura, que possui a maior área irrigada (2.147 ha) dentro da região delimitada; uma ao Norte, que envolve grande parte do município de Sud Mennucci e parte de Santo Antônio do Aracanguá. Juntos, esses municípios somam pouco mais de 2.300 ha irrigados; outra Zona Homogênea ao Sul do mapa, que envolve os municípios de Mesópolis, Populina e Ouroeste; e por fim uma grande região central, que envolve a maioria dos municípios selecionados, como representado na Figura 14.

Figura 14 - Mapa representativo das Zonas Homogêneas e valores estimados mensais da evapotranspiração, em mm dia<sup>-1</sup>, para cada zona.



Os valores médios da tabela contida na Figura 14 são estimativas extraídas do software ArcGis® (*Validation/Prediction*) conforme metodologia proposta. Esses valores, estimados em série histórica, servirão de base para o manejo racional da irrigação. Proposta similar ao que se faz na Califórnia (CIMIS), que identificou 18 Zonas Homogêneas de ETo, possibilitando ao irrigante fazer o uso racional da água em base histórica.

Os valores estimados foram correlacionados com os valores observados para validação do método proposto. Além da correlação dos dados foram medidos o índice de concordância (d) e a raiz do erro médio quadrático (REMQ), os valores obtidos estão relacionados na Tabela 12.

**Tabela 12 - Validação das zonas a partir dos dados observados e preditos por krigagem ordinária, ajustado para o modelo gaussiano do semivariograma.**

Meses	r	R <sup>2</sup>	d	REMQ
Janeiro	0,82	0,67	0,86	0,20
Fevereiro	0,81	0,66	0,87	0,11
Março	0,69	0,48	0,70	0,14
Abril	0,51	0,26	0,68	0,12
Maio	0,84	0,71	0,89	0,14
Junho	0,84	0,71	0,90	0,13
Julho	0,86	0,74	0,91	0,18
Agosto	0,88	0,77	0,93	0,22
Setembro	0,89	0,79	0,91	0,29
Outubro	0,88	0,77	0,93	0,15
Novembro	0,79	0,62	0,81	0,24
Dezembro	0,77	0,59	0,76	0,30

Conforme Souza et al. (2011), a utilização conjunta desses indicadores estatísticos pode ser considerada como uma boa alternativa para validação de modelos estatísticos. Isso porque esses indicadores permitem a análise simultânea do desvio da média e a identificação da ocorrência de sub ou superestimativa, espalhamento e ajustamento dos modelos, quando comparados a valores estimados e medidos.

Os valores de r, em geral, indicam que o modelo de krigagem resultou em ETo interpoladas com alta correlação (>0,77), com exceção para os meses de março e abril que apresentaram valores de r equivalentes a 0,69 e 0,51, respectivamente, podendo ser consideradas como moderadas.

Os valores de R<sup>2</sup> obtidos, em sua maioria superiores a 0,59, demonstram que as ETo estimadas variam de forma proporcional às aquelas calculadas pelas Estações

agrometeorológicas, representando de forma satisfatória a variabilidade sazonal da ETo.

O REMQ é uma medida da magnitude média dos erros estimados, tem valor sempre positivo e quanto mais próximo de zero, maior a qualidade dos valores medidos ou estimados (BELLO-PINEDA; HERNÁNDEZ-STEFAÑONI, 2007). Desta forma, foram observados dados de REMQ variando de 0,11 a 0,30.

Vilanova, Simões e Tranin (2012), avaliando a interpolação geoespacial da ETo no Sul de Minas, observou elevados índices ( $R^2=0,90$ ;  $R=0,99$ ;  $d=0,99$  e  $REMQ = 0,09$ ) quando comparadas os dados da ETo estimado por krigagem e o observado para uma estação localizada na área interpolada.

#### 4.4 Simulações

Após a validação explicitada na Tabela 12, passou-se a verificar o comportamento dos valores médios propostos em uma segunda validação comparando o manejo da irrigação utilizando os dados diários ou estimados da ETo, para o ano de 2016, em plantios de milho e em três diferentes Zonas Homogêneas delimitadas.

A primeira simulação foi realizada na Zona Homogênea 2, tendo por objetivo quantificar a importância da estação agrometeorológicas inserida no centro da maior área irrigada do Noroeste Paulista em comparação com duas outras estações que poderiam ser a fonte primária da ETo.

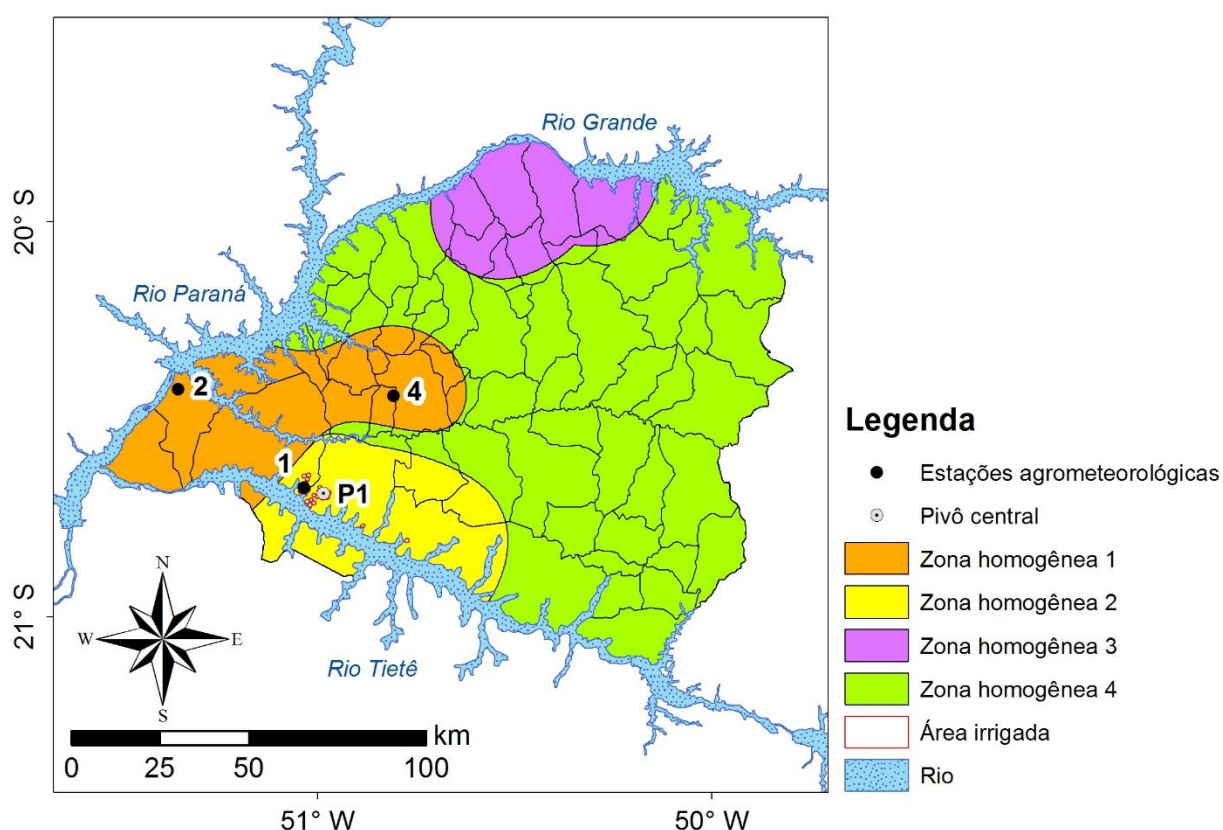
As demais simulações confrontam as opções de fonte diárias da ETo para o irrigante com o proposto através da Zona Homogênea correspondente que oferta o valor médio histórico como base para a estimativa da evapotranspiração da cultura de interesse.

Os resultados das simulações representam os valores máximos de necessidade de água aplicadas às culturas em cada condição operacional do sistema de irrigação utilizado e, portanto, os máximos custos de energia. A opção de não considerar as chuvas se deve a grande variabilidade no tempo e no espaço, cada vez mais difícil de mensurar em base histórica face ao aumento da frequência das chuvas convectivas.

#### 4.4.1 Zona Homogênea 2

Situada na porção norte do mapa, abrange os municípios de Sud Mennucci, Pereira Barreto, Guzolândia, Auriflama e Santo Antônio do Aracanguá. Essa região concentra 22 pivôs com área irrigada de aproximadamente 2.277 ha (Figura 15).

**Figura 15 - Localização do pivô central (P1) e das Estações Bonança (1), Ilha Solteira (2) e Marinópolis (4), utilizadas para simulação na Zona Homogênea 2.**



Mais da metade dessa área irrigada, cerca de 58%, pertencem ao município de Sud Mennucci sendo que a segunda maior parcela pertence ao município de Pereira Barreto, que abriga cerca de 37% da área irrigada. O valor médio estimado da ETo para Zona Homogênea 2 é de 3,7 mm dia<sup>-1</sup> com flutuações anuais acima da média nos meses de setembro a março e abaixo da média nos meses de abril a agosto.

Cronologicamente, um irrigante inserido na Zona Homogênea 2 disporia gratuitamente de informações agroclimáticas advindas das Estações de Ilha Solteira, funcional desde 1991, ou Marinópolis, funcional desde 1998. Posteriormente, devido

à importância dos municípios de Sud Mennucci e Pereira Barreto - que concentram grande área irrigada na região de interesse - a UNESP Ilha Solteira inseriu em sua Rede Agrometeorológica a Estação Bonança no ano de 2011.

Dessa forma, diferentes Estações fornecem diferentes dados da ETo, o que também resultam em diferentes demandas hídricas para a cultura (ETc). Assim, os custos com energia naturalmente irão variar. Nesse sentido, foram simulados 4 cenários diferentes para se irrigar integralmente uma cultura de milho híbrido (Status VIPTERA):

Cenário 1. Dados diários da ETo obtidos pela Estação Ilha Solteira na determinação da ETc. A Estação encontra-se a 48 km do pivô central, em linha reta;

Cenário 2. Dados diários da ETo obtidos pela Estação Marinópolis na determinação da ETc. A Estação encontra-se a 33 km do pivô central, em linha reta;

Cenário 3. Dados diários da ETo obtidos pela Estação Bonança na determinação da ETc. A Estação encontra-se a 6 km do pivô central, em linha reta e

Cenário 4. Dados diários da ETo obtidos pela estimativa da Zona Homogênea 2 na determinação da ETc.

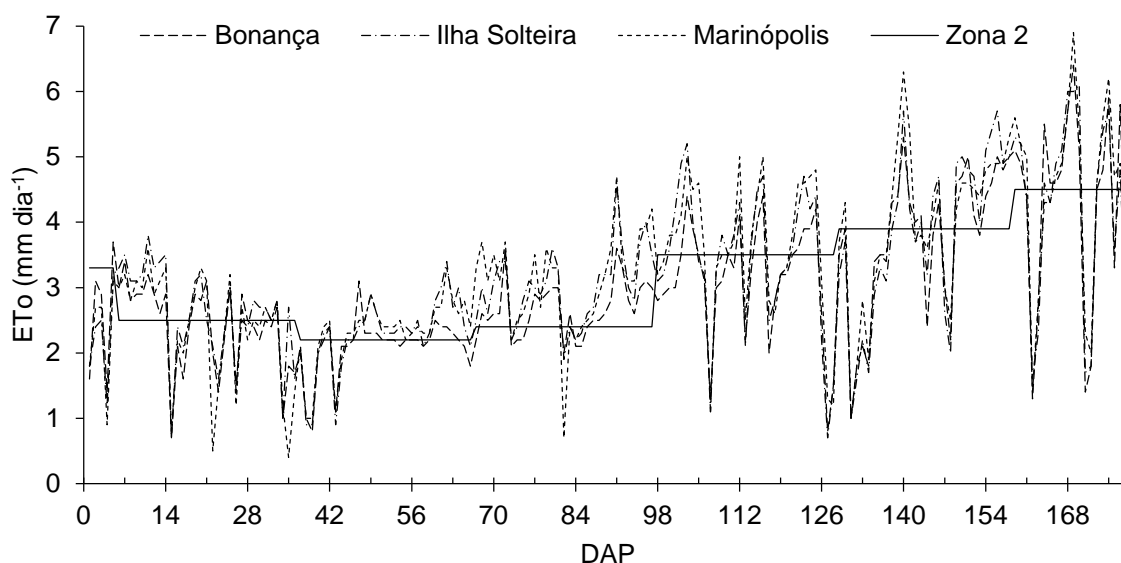
As simulações da demanda hídrica para a cultura do milho foram realizadas considerando um pivô real, P1, situado nas coordenadas 20° 41' S e 50° 59' O, cujo irrigante disponibilizou as datas de plantio (25/04/2016), florescimento (25/06/2016) e colheita (21/10/2016) da cultura, bem como a área irrigada (145 ha), potência instalada (362 kW), capacidade de irrigação (7 mm dia<sup>-1</sup>), lâmina de irrigação em 100% (4,3 mm) e giro do equipamento em 100% (12,9 h).

As datas fornecidas evidenciaram um prolongamento do ciclo da cultura, 179 dias, justificado pelo plantio em período mais frio, o que pode ter retardado o desenvolvimento das plantas e, adicionalmente, o milho permaneceu no campo por mais tempo para redução no teor de umidade do grão, segundo informações do próprio produtor.

Os somatórios dos dados diários da ETo obtidos durante o ciclo da cultura resultariam em demandas de 565, 575, 532 e 554 mm, respectivamente para os dados obtidos das Estações Ilha Solteira, Marinópolis e Bonança e da Zona Homogênea 2.

Um resumo do comportamento da ETo diária para os diferentes cenários analisados está contido na Figura 16.

**Figura 16 - Comportamento da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) para as Estações Bonança, Ilha Solteira, Marinópolis e ET<sub>o</sub> estimada para Zona Homogênea 2 (Zona Homogênea 2), durante o ciclo da cultura do milho.**



As diferenças nos somatórios da ET<sub>o</sub> evidenciam a importância na escolha dos valores que servirão de referência para o planejamento da irrigação. O uso adequado da ET<sub>o</sub> pode gerar uma economia de água e, conseqüentemente, uma economia nos custos com energia para o irrigante, bem como garantir a sustentabilidade da atividade agrícola na região.

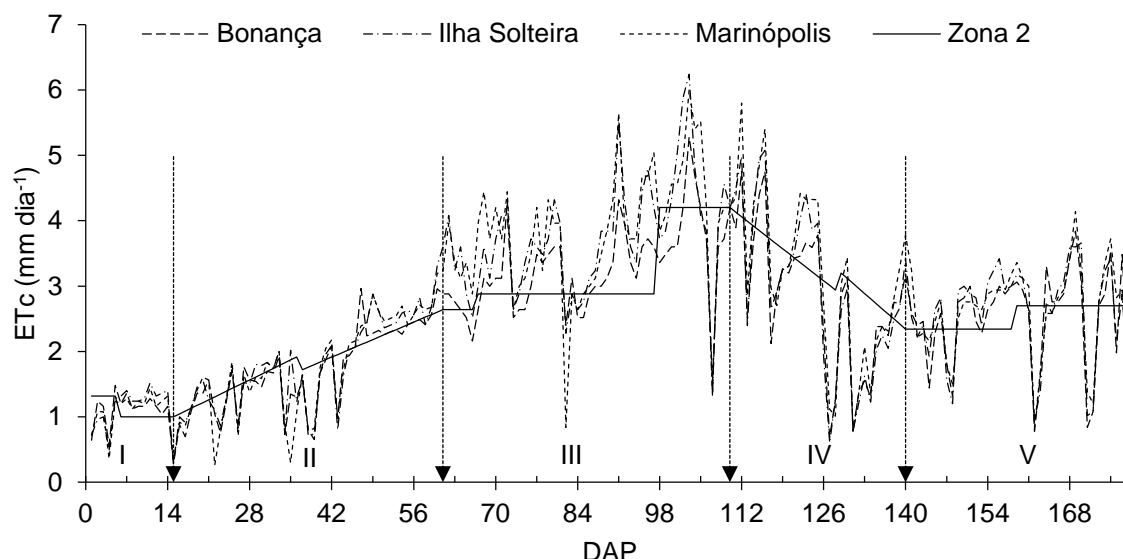
A quantidade de água consumida pela cultura é calculada pelo produto da ET<sub>o</sub> e o coeficiente da cultura (K<sub>c</sub>). Este consumo varia de acordo com o estágio fenológico da planta e entre os diferentes tipos de culturas. Analisando o comportamento da ET<sub>c</sub>, dentro de cada estágio fenológico, observa-se que as variações entre os diferentes cenários seriam maiores nas fases de florescimento e enchimento de grão (Tabela 13).

**Tabela 13 - Evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>) nos diferentes estádios fenológicos da cultura do milho híbrido, calculados a partir de diferentes fontes de dados da evapotranspiração de referência, Zona Homogênea 2.**

Cenários	Estádios fenológicos				
	I	II	III	IV	V
Bonança	16,0	77,3	164,3	84,3	97,9
Ilha Solteira	16,8	81,1	187,7	87,1	100,4
Marinópolis	16,0	79,4	191,5	94,5	102,6
Zona Homogênea 2	16,6	82,9	159,7	96,9	98,8
Média	16,4	80,2	175,8	90,7	99,9
Desvio padrão	0,4	2,4	16,1	6,0	2,1
Coeficiente de variação (%)	2,4	3,0	9,2	6,6	2,1

Essa variabilidade nos estádios fenológicos III e IV podem ser melhor observadas na Figura 17.

**Figura 17 - Comportamento da evapotranspiração da cultura (ETc), em diferentes estádios fenológicos do milho (I - inicial; II - vegetativo; III - florescimento; IV - enchimento de grãos e V - maturação), Zona Homogênea 2.**



Segundo Magalhães e Durães (2006) o efeito da falta de água, associado à produção de grãos, é particularmente importante em três estádios de desenvolvimento da planta: iniciação floral e desenvolvimento da inflorescência; período da fertilização e enchimento dos grãos.

Simulando, os somatórios da ETc seriam de 473, 484, 440 e 455 mm, respectivamente para os dados obtidos das Estações Ilha Solteira, Marinópolis e Bonança e da Zona Homogênea 2. Esses valores estão coerentes com os encontrados na literatura (BERGAMASCHI; MATZENAUER, 2014; ALBUQUERQUE, 2010; DOORENBOS; PRUITT, 1997).

Entre os cenários avaliados, o que representou um menor custo ao irrigante foi o da Estação Bonança (Tabela 14). Esta observação reforça a importância da expansão da Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista e o uso do Canal CLIMA como ferramenta de assessoramento aos irrigantes locais.

**Tabela 14 - Simulação de custos com energia para irrigação integral no ciclo de milho em diferentes cenários**

Estações	Distância	Custos	Custo Zona Homogênea 2	$\Delta$ (R\$)	R\$ ha <sup>-1</sup>
Ilha Solteira	48 km	R\$ 75.736,18		-R\$ 2.048,94	-R\$ 14,13
Marinópolis	33 km	R\$ 76.974,30	R\$ 73.687,24	-R\$ 3.287,06	-R\$ 22,67
Bonança	5 km	R\$ 71.968,64		R\$ 1.718,60	R\$ 11,85

É coerente sugerir que o critério de selecionar a Estação mais próxima mostra-se adequado para o planejamento da irrigação. Outra opção possível é a utilização da estimativa obtida na Zona Homogênea 2, que computou uma demanda superior em 15 mm (3,5%) daquela observada pela Estação bonança, mais próxima ao pivô. Essa variação representaria um acréscimo de R\$ 11,85 por hectare no custo da energia para irrigação, segundo os critérios adotados.

Em média, a simulação do custo com energia por milímetro aplicado na irrigação foi de R\$ 161,20, com valores mínimo e máximo de R\$ 159,04 e R\$ 163,67 respectivamente.

Vale ressaltar que as simulações se referem a gestão dos recursos hídricos tendo como base o enfoque energético para irrigação de uma cultura dentro de um determinado ciclo, não sendo possível avaliar, com os dados disponíveis nesse trabalho, o efeito agrônomo da sazonalidade do suprimento hídrico para cada estágio fenológico. Para isso, seria necessário a implantação de experimentos a campo, que seriam também influenciados pela ocorrência das chuvas.

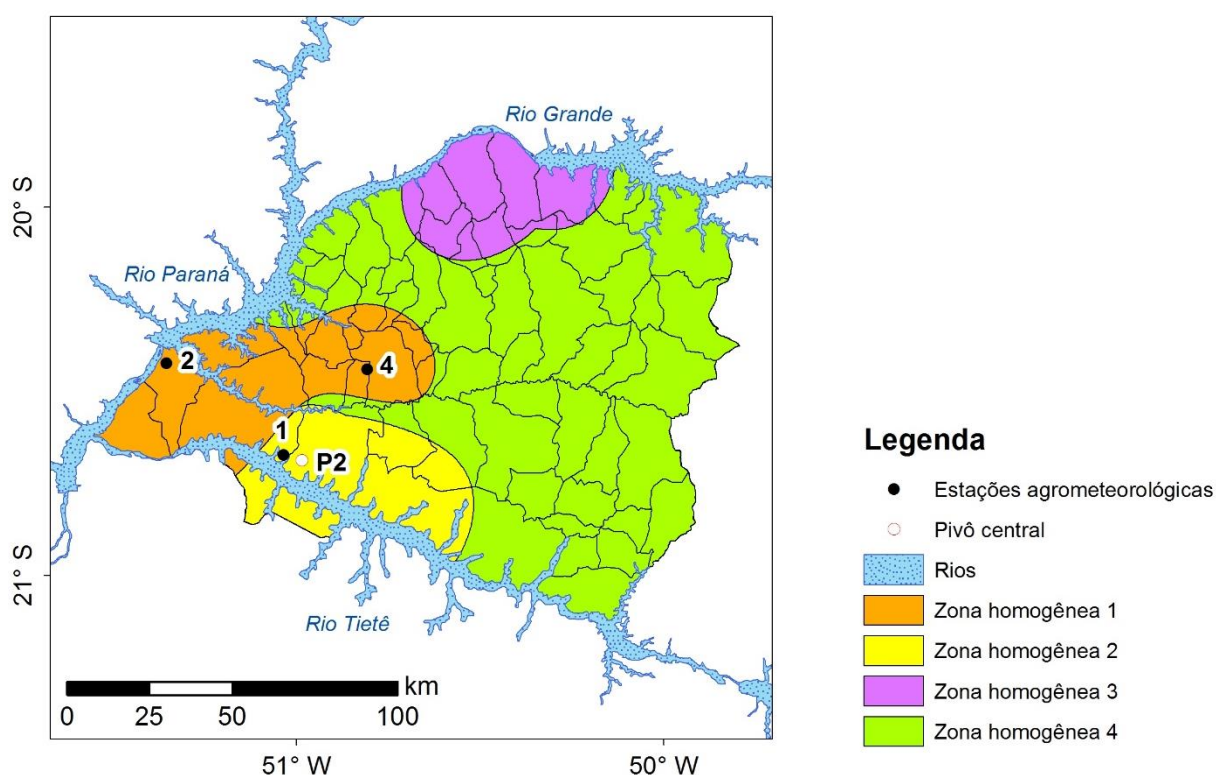
Considerar a ocorrência de chuvas no cálculo dos custos energéticos poderiam, com grande probabilidade, minimizar as diferenças apontadas nessas simulações. Consequentemente, os custos seriam também minimizados pela uniformização do suprimento hídrico em cada simulação.

A opção pelo uso da ETo em base histórica através das Zonas Homogêneas pode ser um fator a mais para induzir ou convencer irrigantes a adotarem o manejo da irrigação, uma vez que muitos alegam ser dificultosa a operação de ir à Internet todos os dias para buscar a informação base do manejo. Com a ETo fixada mensalmente, uma planilha previamente construída para manejo da irrigação facilitaria a decisão com racionalidade de irrigar ou não e com qual lâmina, pois os dados de entrada ficariam restritos à chuva ou a irrigação praticada.

#### 4.4.2 Zona Homogênea 1

De forma análoga a Zona Homogênea 2, foi realizada a simulação para Zona Homogênea 1 (Zona Homogênea 1) que está situada na porção oeste do mapa e abrange o município de Itapura, principal município com área irrigada da região delimitada. A Zona Homogênea 1 acumula 36 pivôs com área total irrigada de 3.039 ha (Figura 18).

**Figura 18 - Localização do pivô central (P2) e das Estações Ilha Solteira (2), Marinópolis (4) e Santa Adélia (8), utilizadas para simulação na Zona Homogênea 1.**



O valor médio estimado da ETo para Zona Homogênea 1 é de 4,2 mm dia<sup>-1</sup> com flutuações anuais acima da média nos meses de agosto a fevereiro e abaixo da média nos meses de março a julho.

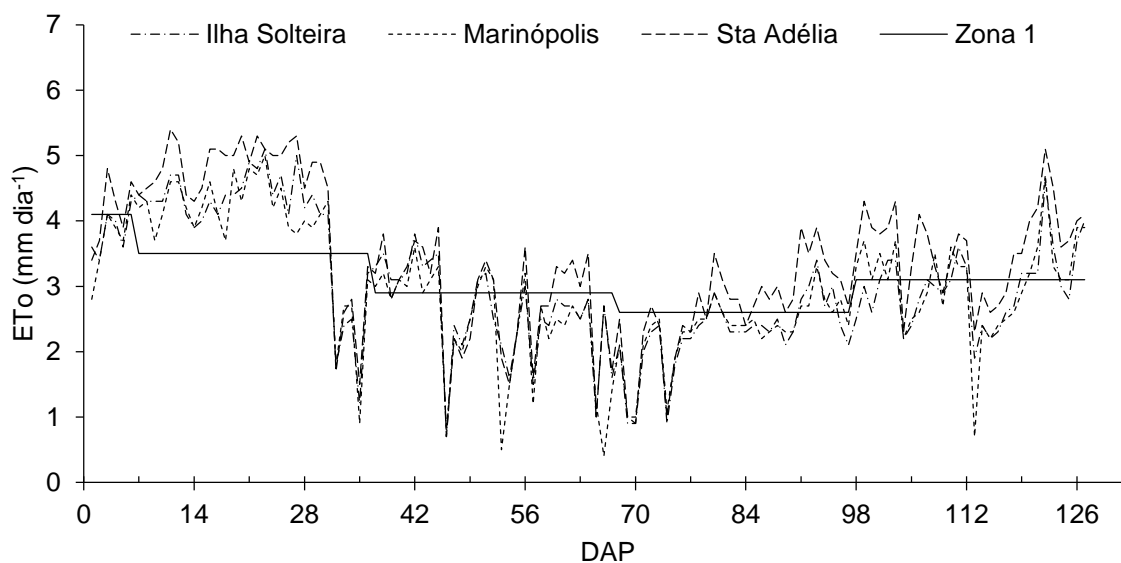
As simulações da ETo, ETc e custo com energia foram calculadas para o ciclo da cultura do milho considerando um pivô real, P2, situado nas coordenadas 20° 19' S e 51° 1' O, cujo irrigante disponibilizou as datas de plantio (25/03/2016), florescimento (17/05/2016) e colheita (30/07/2016) da cultura, bem como a área irrigada (93 ha), potência instalada (163 kW), capacidade de irrigação (9 mm dia<sup>-1</sup>), lâmina de irrigação em 100% (5,4 mm) e giro do equipamento em 100% (12,5 h).

Foram simulados 4 cenários, considerando como prováveis as escolhas, pelo irrigante, dos dados fornecidos pela Estação Ilha Solteira (cenário 1), Marinópolis (cenário 2), Santa Adélia (cenário 3) e Zona Homogênea 1 (cenário 4).

O ciclo da cultura foi de 127 dias, a cultivar utilizada foi a AS155 PRO 2, segundo informações do próprio produtor. Para o período estabelecido, os somatórios dos dados diários da ETo resultaram em demandas de 383, 376, 432 e 391 mm considerando os dados obtidos das Estações Ilha Solteira, Marinópolis e Santa Adélia e da Zona Homogênea 1, respectivamente. A diferença entre os valores máximo e mínimo observados, calculado em 56 mm, reforçam a importância na escolha dos valores que servirão de referência para o planejamento da irrigação.

Um resumo do comportamento da ETo diária para os diferentes cenários analisados está contido na Figura 19.

**Figura 19 - Comportamento da evapotranspiração de referência (ETo) para as Estações Ilha Solteira, Marinópolis, Santa Adélia e ETo estimada para Zona Homogênea 1, durante o ciclo da cultura do milho.**



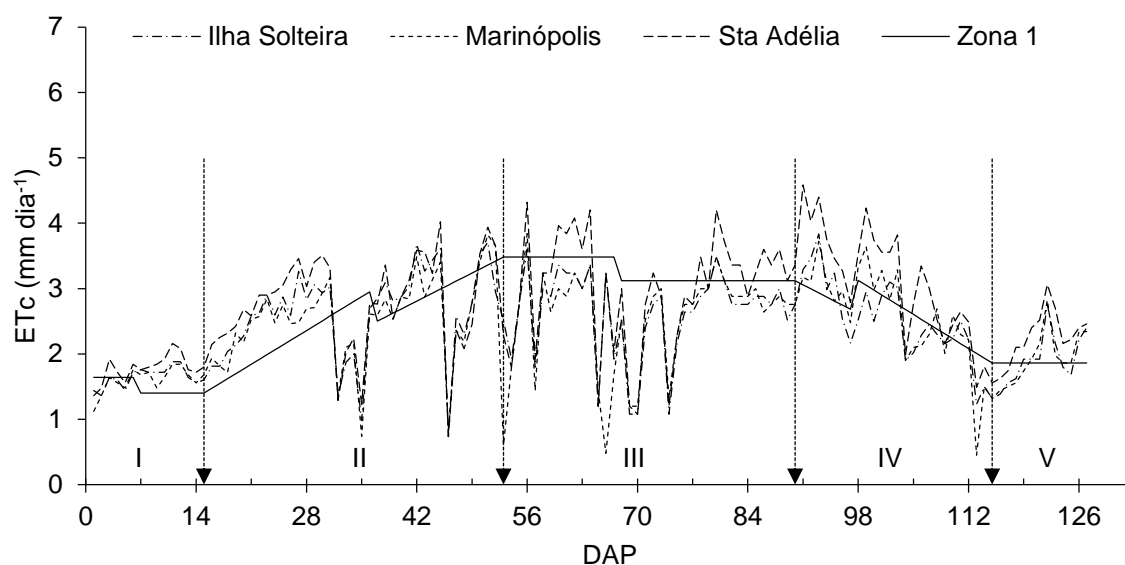
As simulações da ETc apresentaram uma média de 321 mm, com valor máximo de 348 mm, com base nos dados diários da Estação Santa Adélia, e valor mínimo de 302 mm, com base nos dados diários da Estação Marinópolis. As maiores variações ocorreram nos estádios fenológicos III e IV (Tabela 15), assim como observado para simulação realizada na Zona Homogênea 2.

**Tabela 15 - Evapotranspiração da cultura (ETc) nos diferentes estádios fenológicos da cultura do milho híbrido, calculados a partir de diferentes fontes de dados da evapotranspiração de referência, Zona Homogênea 1.**

Cenários	Estádios fenológicos				
	I	II	III	IV	V
Ilha Solteira	24,7	100,0	97,3	62,6	23,3
Marinópolis	24,0	94,8	95,3	64,2	23,5
Santa Adélia	26,7	105,8	111,0	77,0	27,5
Zona Homogênea 1	22,4	97,3	120,5	65,0	22,3
Média	24,5	99,5	106,0	67,2	24,2
Desvio padrão	1,8	4,8	11,9	6,6	2,3
Coeficiente de variação (%)	7,3	4,8	11,2	9,8	9,5

A ETc para Zona Homogênea 1 manteve-se com valores inferiores aos dados diários em grande parte do ciclo, principalmente nos estádios fenológicos I, II e IV (Figura 20). Essas diferenças foram minimizadas no estágio fenológico III, quando a média da Zona Homogênea 1 foi superior às medias dos valores diários das Estações.

**Figura 20 - Comportamento da evapotranspiração da cultura (ETc), em diferentes estádios fenológicos do milho (I - inicial; II - vegetativo; III - florescimento; IV - enchimento de grãos e V - maturação), Zona Homogênea 1.**



Entre os cenários avaliados, o que representou um menor custo ao irrigante foi o da Estação Marinópolis (Tabela 16), novamente reforçando a importância da expansão da Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista e a consequente divulgação de forma livre e gratuita das variáveis obtidas e da evapotranspiração de referência como ferramenta de assessoramento aos irrigantes locais.

**Tabela 16 - Simulação de custos com energia para irrigação integral no ciclo de milho em diferentes cenários, Zona Homogênea 1**

Estações	Distância	Custos	Custo Zona Homogênea 1	$\Delta$ (R\$)	R\$ ha <sup>-1</sup>
Ilha Solteira	36 km	R\$ 20.592,58		R\$ 775,74	R\$ 8,32
Marinópolis	27 km	R\$ 20.348,06	R\$ 21.368,32	R\$ 1.020,27	R\$ 10,94
Santa Adélia	32 km	R\$ 22.184,27		-R\$ 815,95	-R\$ 8,75

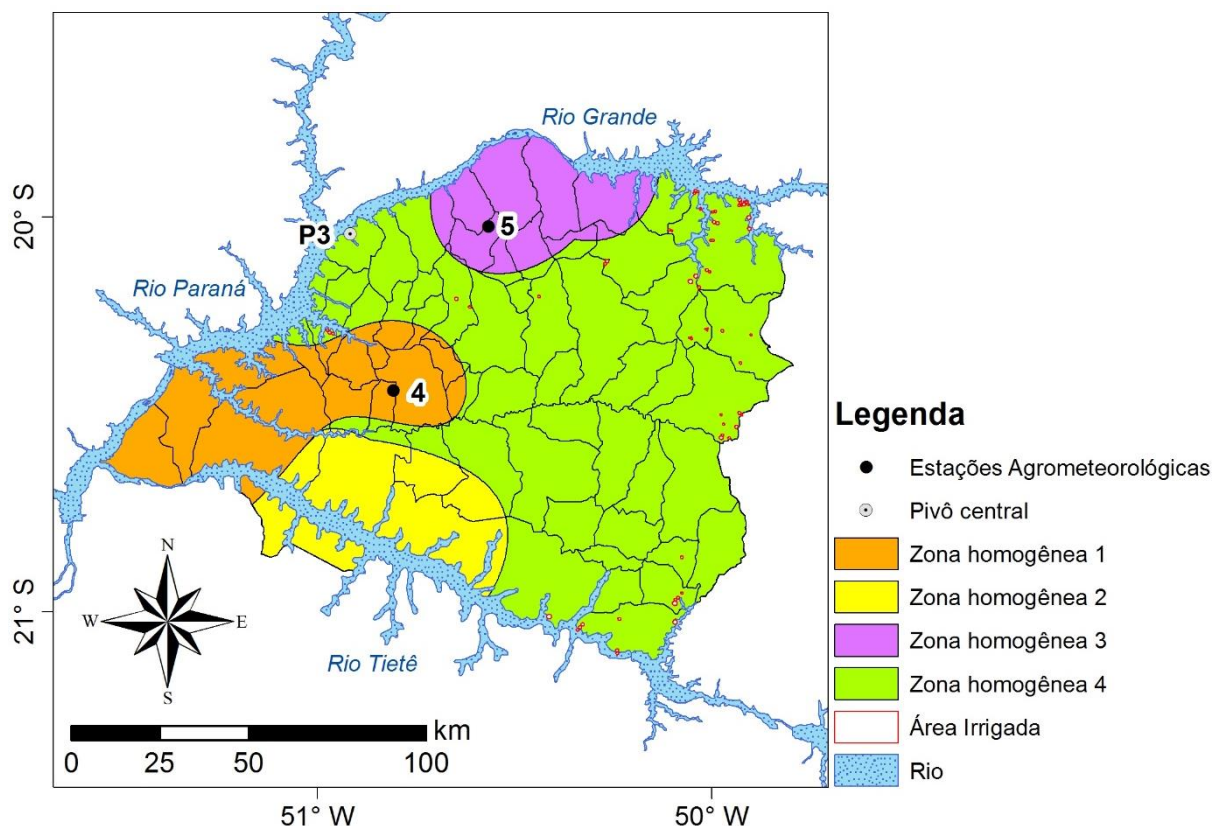
Como observado para Zona Homogênea 2, o critério de selecionar a Estação mais próxima mostra-se adequado para o planejamento da irrigação. Outra opção possível é a utilização dos dados da Estação Ilha Solteira e, por fim, a estimativa obtida na Zona Homogênea 1, que computou uma demanda superior em 26 mm (8,5%) e 20 mm (6,3%) daquelas observadas pelas Estações Marinópolis, mais próxima ao pivô, e Ilha Solteira, respectivamente. Essas variações representariam um acréscimo de R\$ 10,94 e R\$ 8,32 por hectare no custo da energia para irrigação, segundo os critérios adotados.

Em média, a simulação do custo com energia por milímetro aplicado na irrigação foi de R\$ 65,82, com valores mínimo e máximo de R\$ 63,74 e R\$ 67,43 respectivamente. O menor custo com energia, comparado a simulação realizada na Zona Homogênea 2, deve-se a menor potência do motor e o ao menor ciclo da cultura.

#### **4.4.3 Zona Homogênea 4**

A Zona Homogênea 4 (Zona Homogênea 4) que está situada na porção central do mapa e abrange a maioria dos municípios estudados. Destacam-se nessa região os municípios de Cardoso, Buritama e Votuporanga, que apresentam expressivas áreas irrigadas por pivôs centrais. Ao todo, a Zona Homogênea 4 acumula 67 pivôs com área total irrigada de 3.334 ha (Figura 21).

**Figura 21 - Localização do pivô central (P3) e das Estações Marinópolis (4) e Paranapuã (5), utilizadas para simulação da Zona Homogênea 4.**



O valor médio estimado da ETo para Zona Homogênea 4 é de  $4,0 \text{ mm dia}^{-1}$  com flutuações anuais acima da média nos meses de agosto a março e abaixo da média nos meses de abril a julho.

As simulações da ETo, ETc e custo com energia foram calculadas para o ciclo da cultura do milho considerando um pivô real, P3, situado nas coordenadas  $20^{\circ} 2' \text{ S}$  e  $50^{\circ} 55' \text{ O}$ , cujo irrigante disponibilizou as datas de plantio (25/03/2016), florescimento (17/05/2016) e colheita (30/07/2016) da cultura, bem como a área irrigada (71 ha), potência instalada (98 kW), capacidade de irrigação ( $9 \text{ mm dia}^{-1}$ ), lâmina de irrigação em 100% (4,5 mm) e giro do equipamento em 100% (10,6 h).

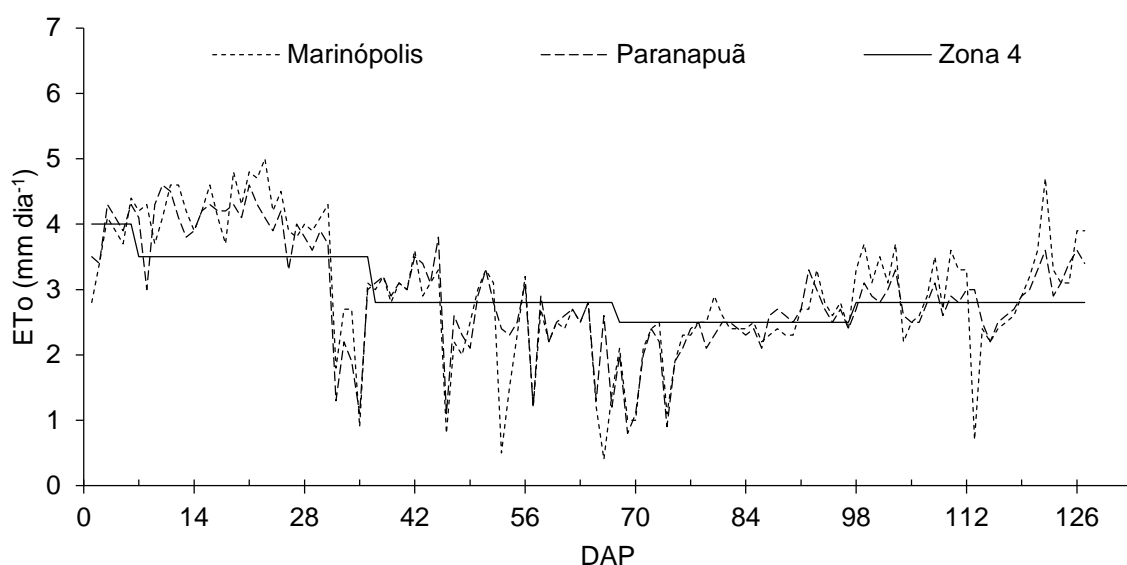
Foram simulados 3 cenários, considerando como possíveis escolhas os dados diários fornecidos pela Estação Marinópolis (cenário 1), os dados diários fornecidos pela Estação Paranapuã (cenário 2) e os dados estimados para Zona Homogênea 4 (cenário 3).

O ciclo da cultura foi de 127 dias, a cultivar utilizada foi a AS 1555 PRO 2, segundo informações do próprio produtor. Para o período estabelecido, os somatórios da ETo resultaram em demandas de 376, 371 e 375 mm considerando

os dados obtidos das Estações Marinópolis e Paranapuã e da Zona Homogênea 4, respectivamente.

Um resumo do comportamento da ETo diária para os diferentes cenários analisados está contido na Figura 22.

**Figura 22 - Comportamento da evapotranspiração de referência (ETo) para as Estações Marinópolis, Paranapuã e ETo estimada para Zona Homogênea 4, durante o ciclo da cultura do milho.**



As simulações da ETc apresentaram uma média de 305 mm, com valor máximo de 314 mm, com base nos dados diários da Estação Santa Adélia, e valor mínimo de 301 mm, com base nos dados diários da Estação Marinópolis. As maiores variações ocorreram nos estádios fenológicos IV e V (Tabela 17).

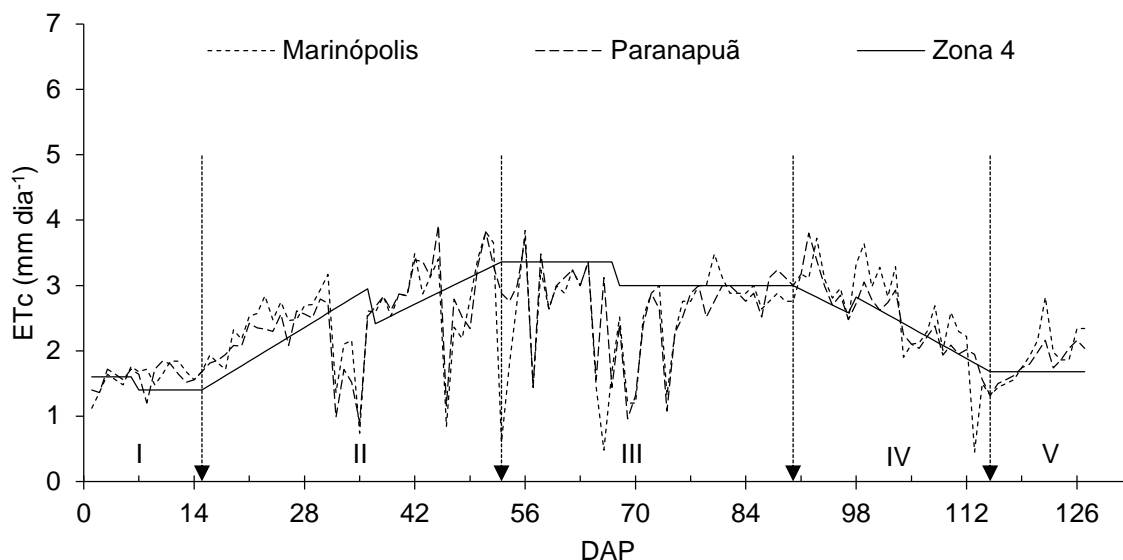
**Tabela 17 - Evapotranspiração da cultura (ETc) nos diferentes estádios fenológicos da cultura do milho híbrido, calculados a partir de diferentes fontes de dados da evapotranspiração de referência, Zona Homogênea 4.**

Cenários	Estádios fenológicos				
	I	II	III	IV	V
Marinópolis	24,0	94,8	95,3	64,2	23,5
Paranapuã	26,7	105,8	111,0	77,0	27,5
Zona Homogênea 4	22,2	95,5	116,0	59,8	20,2
Média	24,3	98,7	107,4	67,0	23,7
Desvio padrão	2,3	6,2	10,8	8,9	3,6
Coeficiente de variação (%)	9,3	6,3	10,1	13,3	15,4

A ETc para Zona Homogênea 4 manteve-se com valores inferiores aos dados diários em grande parte do ciclo, principalmente nos estádios fenológicos I, II, IV e V

(Figura 23). Essas diferenças foram minimizadas no estágio fenológico III, quando a média da Zona Homogênea 4 foi superior às medias dos valores diários das Estações, de forma semelhante a observada na Zona Homogênea 1.

**Figura 23 - Comportamento da evapotranspiração da cultura (ETc), em diferentes estádios fenológicos do milho (I - inicial; II - vegetativo; III - florescimento; IV - enchimento de grãos e V - maturação), Zona Homogênea 4 (Zona 4).**



Entre os cenários avaliados, o que representou um menor custo ao irrigante foi o da Estação Marinópolis (Tabela 18). Esta observação reforça a importância da expansão da Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista e o uso do Canal CLIMA como ferramenta de assessoramento aos irrigantes locais.

**Tabela 18 - Simulação de custos com energia para irrigação integral no ciclo de milho em diferentes cenários, Zona Homogênea 4**

Estações	Distância	Custos	Custo Zona Homogênea 4	$\Delta$ (R\$)	R\$ ha <sup>-1</sup>
Marinópolis	45 km	R\$ 12.280,39	R\$ 12.568,83	R\$ 288,43	R\$ 4,07
Paranapuã	36 km	R\$ 12.253,38		R\$ 315,45	R\$ 4,46

A diferença de distância entre as Estações, em relação ao pivô, foi de aproximadamente 9 km. Essa proximidade torna indiferente a escolha de uma ou outra Estação, dado que a diferença de custo entre elas foi de R\$ 27,01. Além disso, a Zona Homogênea 4 mostra-se como uma alternativa para o planejamento da irrigação.

Em média, a simulação do custo com energia por milímetro aplicado na irrigação foi de R\$ 40,50, com valores mínimo e máximo de R\$ 40,06 e R\$ 40,75 respectivamente.

#### 4.4.4 Variações médias da ETo e ETc

Admitindo-se o critério da Estação mais próxima ao pivô, para comparação dos dados obtidos quando utilizados as Zonas Homogêneas, foi possível observar que as variações foram maiores para ETc que para ETo. Entretanto, as variações não foram superiores a 7,8% (25,7 mm) no ciclo da cultura (Tabela 19). Conveniente observar que estas são as variações máximas que ocorrem entre a escolha diária da ETo e o uso das Zonas Homogêneas em base histórica, uma vez que sempre haverá alguma chuva durante o ciclo e neste caso, o tempo de irrigação será minimizado pela sua presença, até o limite da fração da CAD - Capacidade de Água Disponível utilizado como crítico para grãos, geralmente entre 40-50%, ou seja, mantendo-se uma reserva no solo entre 50-60%.

**Tabela 19 - Variações observadas entre os valores da evapotranspiração de referência (ETo) e evapotranspiração da cultura (ETc) obtidos pela estimativa das Zonas Homogêneas em relação aos dados da Estação mais próxima a área irrigada.**

Comparações	Variações	
	ETo	ETc
Zona Homogênea 2 vs. Bonança	-1,8% (-10,1 mm)	-4,0% (-18,1 mm)
Zona Homogênea 1 vs. Marinópolis	3,8% (14,9 mm)	7,8% (25,7 mm)
Zona Homogênea 4 vs. Paranapuã	1,0% (3,9 mm)	3,8% (13,1 mm)

#### 4.5 Importância econômica da agricultura irrigada para o Noroeste Paulista e transferência de tecnologia realizada pelo Canal CLIMA - UNESP Ilha Solteira

Segundo Amendola (2016) houve um incremento de 6,5 mil hectares irrigados por pivô central entre os anos de 2000 a 2015 para a região Noroeste do Estado de São Paulo, que apresenta condições naturais como inverno ameno, solos com adequada fertilidade, rodovias, hidrovias para o desenvolvimento de uma agropecuária de alto nível baseada nos sistemas de irrigação.

Registra-se o crescimento das áreas irrigadas plantadas com feijão, milho, soja, sorgo e mais recentemente citros, inclusive com o uso de sistemas tipo pivô central. Segundo Repassi, Tarsitano e Proença (2013), avaliando os custos e a lucratividade na produção de milho safrinha para o município de Pereira Barreto - SP, concluem que o uso da irrigação para produzir milho safrinha é de suma importância, pois esse período as chuvas são escassas, nessa região.

Adicionalmente, analisando os dados do Instituto de Economia Agrícola (IEA), para o ano de 2015 e considerando os 5 Escritórios de Desenvolvimento Rural (EDR) contidos na área delimitada (Andradina, Fernandópolis, General Salgado, Jales e Votuporanga), foi possível observar a importância econômica da agricultura irrigada para o Noroeste Paulista, bem como identificar os perfis do agronegócio dentro de cada EDR.

Em resumo, o agronegócio regional concentra-se em duas atividades principais, a produção da cana-de-açúcar e da carne bovina. Essas duas atividades somam 82, 77, 71, 71 e 58% do valor da produção agropecuário (VPA) registrados nos EDRs de Andradina, General Salgado, Fernandópolis, Votuporanga e Jales, respectivamente (IEA, 2015).

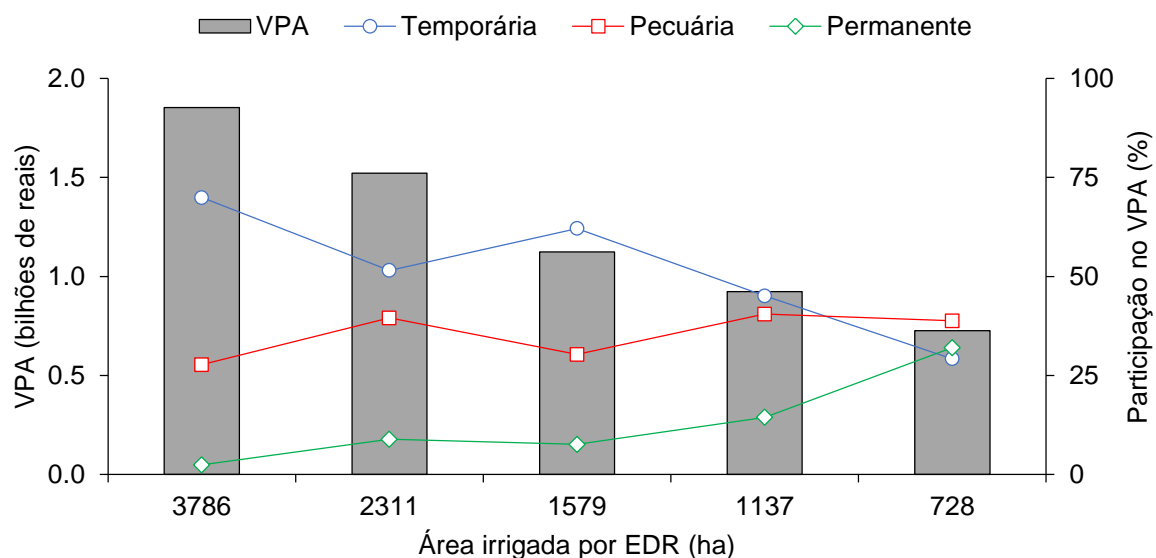
Analisando-se o VPA, e considerando a presença de áreas irrigadas por pivôs centrais, foi possível constatar a relevância da agricultura irrigada e a mudança de perfil do agronegócio nos diferentes EDRs. Em ordem decrescente, os valores das áreas irrigadas por pivôs centrais (AMENDOLA, 2016) para os EDRs de Andradina, General Salgado, Votuporanga, Fernandópolis e Jales são de 3.786, 2.311, 1.579, 1.137 e 728 ha, respectivamente.

Regiões com elevadas áreas irrigadas apresentam melhores desempenhos no VPA e apresentam perfil agrícola voltado para a produção de culturas temporárias como o abacaxi, milho, soja, feijão e amendoim. Quando a presença de áreas irrigadas diminui, outros setores do agronegócio se destacam, como a pecuária e a produção de culturas permanentes (Figura 24). Para pecuária, além da produção de carne bovina, destacam-se a produção de leite, carne de frango e ovos. As culturas permanentes que se destacam na região são a laranja, a seringueira, a uva, a manga e a banana (IEA, 2015).

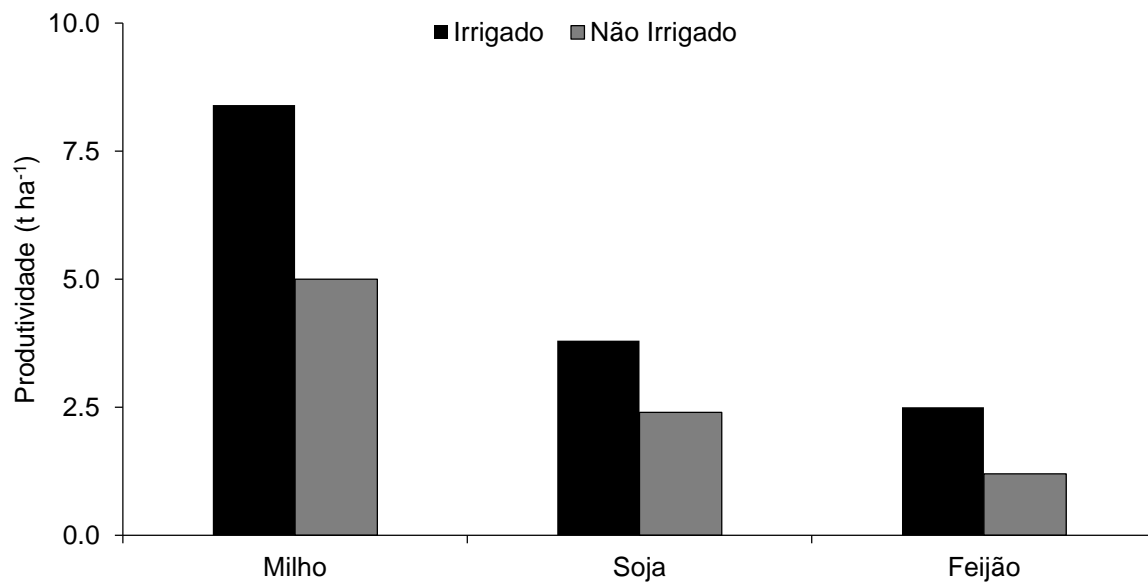
Outra observação pertinente, extraída da análise do VPA, é o ganho em produtividade para as culturas irrigadas na região estudada. Para o ano de 2015, a produtividades de milho, soja e feijão irrigados foram, em média, superiores em 68,

58 e 108%, respectivamente, quando comparados com ao cultivo não irrigado (Figura 25).

**Figura 24 - Perfil do agronegócio regional, com base no valor de produção agropecuária (VPA), em função da área irrigada.**



**Figura 25 - Produtividade média para as culturas do milho, soja, e feijão para cultivo irrigado e não irrigado.**



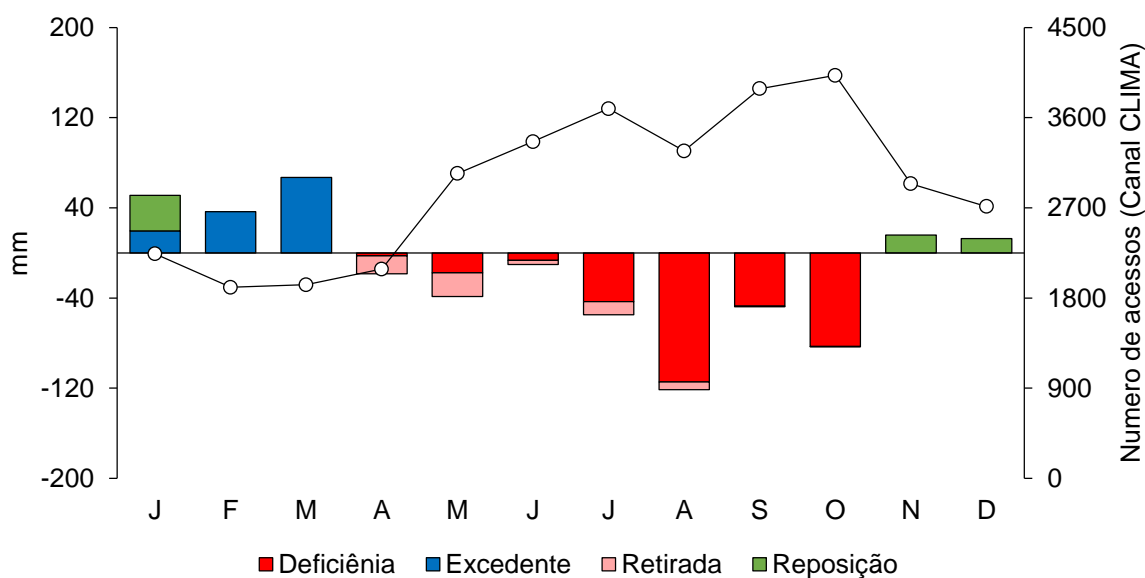
Segundo Lima et al. (2015) as grandes perdas de água na irrigação e a insuficiente informação dos agricultores sobre o manejo adequado da irrigação constituem-se nas duas barreiras críticas específicas relacionadas com a água. Além

disso, os autores ratificam que a irrigação é a atividade de maior consumo de água, com significativo potencial de crescimento na demanda por esse recurso, e uso nem sempre racional.

Com a expectativa de aumento da área irrigada no Noroeste Paulista faz-se necessário a transferência de tecnologias e informações aos usuários dos recursos hídricos, como forma de aumentar a eficiência do uso da água em suas diversas utilidades, especialmente para produção agropecuária.

O Canal CLIMA da UNESP é parte do projeto maior de fortalecer e desenvolver uma agricultura irrigada sustentável para a região Noroeste Paulista com base em informação técnica e transferência de tecnologias, a sua importância pode ser evidenciada claramente como ferramenta de extensão universitária à comunidade. Figura 26 cujos acessos médios mensais, desde 2011, aumentam no período de deficiência hídrica (calculado com base nas médias mensais da precipitação e ETo para as 8 estações agrometeorológicas).

**Figura 26 - Número médio de acessos ao Canal CLIMA em função da deficiência hídrica da região.**



Em 2011 o Canal CLIMA da UNESP teve em média 24 visualizações de páginas diárias e em 2016 registra 538 visualizações de páginas diárias, saindo de um tempo médio por visita de 7 minutos para 9 minutos, de fato se constituindo em um Serviço de Assessoramento ao Irrigante, porém passivo em sua estrutura, o que per dizer que se o Irrigante desejar realizar o manejo racional da água encontrará os

elementos técnicos para isso, através da evapotranspiração de referência divulgada a cada hora, sem nenhum ônus.

Por outro lado, um sistema ativo de apoio ao irrigante, semelhante ao CIMIS ou ao S@i (LIMA et al., 2015), implicaria em uma interação dialógica entre a UNESP e o Irrigante, ou seja, este deveria informar a data do seu plantio, a espécie e a variedade plantada, suas coordenadas geográficas e a capacidade de seu sistema de irrigação e assim, seria calculada a evapotranspiração da cultura e o consequente tempo de irrigação. Esta condição não é oferecida pela UNESP, porém ela oferece todas as condições para a capacitação técnica e o uso dos dados para que seja eficiente o uso da água em todas as atividades econômicas.

E com a divulgação das Zonas Homogêneas de Evapotranspiração de Referência, amplia-se a potencialidade de se adotar o manejo da irrigação via atmosfera, através da simplificação do processo de obtenção do valor diário da evapotranspiração de referência, seja para o próprio manejo, ou como subsídio para o dimensionado adequado de sistemas de irrigação, pois se apresenta de forma fácil e direta os valores médios mensais e anual da ETo.

Segundo Ortega, Juan e Tarjuelo (2005), para o sucesso de um serviço de assessoramento ao irrigante (semelhante ao CIMIS), é necessário oferecer as informações e ferramentas úteis aos agricultores e à sociedade como um todo (benefício ambiental, segurança alimentar, etc.). Esses autores salientam que o problema não está apenas no desenvolvimento de técnicas mais refinadas e de novas práticas para aplicar a água com precisão para a cultura, de acordo com suas necessidades. Existe ainda uma grande lacuna entre a disponibilidade de técnicas para o uso eficaz da água e a sua adoção pelo irrigante.

Assim, testes experimentais e a publicação do mapa com as Zonas Homogêneas de Evapotranspiração de Referência (ETo), para o manejo adequado da irrigação, serão realizados, em diversos canais de comunicação, como próximas etapas deste trabalho.

## 5 CONCLUSÕES

Foram identificadas quatro Zonas Homogêneas de Evapotranspiração de Referência, sendo os valores estimados adequados como ferramenta alternativa para o manejo da irrigação em base histórica, simplificando o processo.

A Rede Agrometeorológica do Noroeste Paulista e o Canal CLIMA da UNESP Ilha Solteira desempenham papel fundamental para gestão eficiente dos recursos hídricos da agricultura irrigada da região.

Se o manejo da irrigação for baseado na evapotranspiração de referência diária, esta deve ser obtida na estação mais próxima da área irrigada.

Novos estudos devem ser feitos visando identificar a necessidade de incluir novas estações baseado na densidade de irrigação ou na Zona Homogênea 4.

Os efeitos financeiros da agricultura irrigada, medidos pelo Valor da Produção Agropecuária dos municípios, adicionados as taxas de crescimento superiores às registradas atualmente aumentará a pressão sobre os recursos hídricos e consequentemente aumentará a importância do monitoramento agroclimatológico na região.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**. 2015. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br>>. Acesso em: 10 jul. 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: informe 2013**. Brasília: ANA, 2014, 432 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). **Levantamento da agricultura irrigada por pivôs centrais no Brasil - ano 2014**. 2016. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br/metadados/>>. Acesso em: 10 jul. 2016.

ALBUQUERQUE, P. E. P. de. **Cultivo do milho: Manejo da Irrigação**. Embrapa Milho e Sorgo, 2010. Disponível em: <[http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/milho\\_6\\_ed/imanejo.htm](http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/milho_6_ed/imanejo.htm)>. Acesso em: 20 de jun. 2016.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 308 p. (FAO Irrigation and Drainage, 56).

ALVES, M.; BOTELHO, S. A.; PINTO, L. V. A.; POZZA, E. A.; OLIVEIRA, M. S.; FERREIRA, E.; ANDRADE, H. Variabilidade espacial de variáveis geobiofísicas nas nascentes da bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Cruz. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 5, p. 527-535, 2008.

AMENDOLA, E. C. **Evolução da agricultura irrigada por pivô central no noroeste paulista**. 2016. 51 f. TCC (Graduação) - Curso de Agronomia, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Ilha Solteira, 2016.

BERGAMASCHI, H.; MATZENAUER, R. **O milho e o clima**. Porto Alegre: Emater/RS-Ascar, 2014. 84 p.

BELLO-PINEDA, J.; HERNÁNDEZ-STEFANONI, J. L. Comparing the performance of two spatial interpolation methods for creating a digital bathymetric model of the Yucatan submerged platform. **Pan-American Journal of Aquatic Sciences**, v. 2, n. 3, p. 247-254, 2007.

BRASIL, UNESCO. **Ano Internacional de Cooperação pela água**. Brasília- DF, 2013. Disponível em: <[www.unesco.org](http://www.unesco.org)> Acesso em: 13/10/2015.

BRASIL. MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **A irrigação no Brasil: Situações e diretrizes**. Brasília: IICA, 2008. 132 p.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.5, n.1, p.89-97, 1997.

CASTRO, F. da S.; PEZZOPANE, J. E. M.; CECÍLIO, R. A.; PEZZOPANE, J. R. M.; XAVIER, A. C. Avaliação do desempenho dos diferentes métodos de interpoladores para parâmetros do balanço hídrico climatológico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 8, p. 871-880, 2010.

CHILDS, C. Interpolating surfaces in ArcGIS Spatial Analyst. **ArcUser**, Redlands, p. 32-35, jul./set. 2004.

CHRISTOFIDIS, D. **Recursos Hídricos e Irrigação no Brasil**. Brasília: CDS - UnB, 1999.

CONCEIÇÃO, M. A. F. **Sistema de Produção de Uva de Mesa do Norte de Minas Gerais: Manejo da Irrigação**. Embrapa Uva e Vinho, 2010. Disponível em: <<https://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Uva/MesaNorteMinas/irrigaca.htm>>. Acesso em: 20 de jun. 2016.

CRESSIE, N. A. C. **Statistics for Spatial Data**. New York: John Wiley, 1993.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Necessidades hídricas das culturas**. Trad. H. R. Gheyi, J. E. C. Metri, F. A. V. Damasceno. Campina Grande: UFPB, 1997. 204p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 24).

ECHING, S. Role of technology in irrigation advisory services: The CIMIS experience. In: **18th Congress and 53rd IEC meeting of the International Commission on Irrigation and Drainage (ICID)**. FAO/ICID International workshop on Irrigation Advisory Services and Participatory Extension Management. 2002.

ECHING, S.; MOELLENBERNDT, D. **CIMIS: Agricultural Resource Book**. Sacramento: Department Of Water Resources, 2002. 56 p.

ENGLISH, M. Irrigation advisory services for optimum use of limited water. In: **18th Congress and 53rd IEC meeting of the International Commission on Irrigation and Drainage (ICID)**. FAO/ICID International workshop on Irrigation Advisory Services and Participatory Extension Management. 2002.

FERERES, E.; SORIANO, M. A. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. Special issue on "Integrated approaches to sustain and improve plant production under drought stress". **Journal of Experimental Botany**, Lancaster, v. 58, p. 147-159, 2007.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). **Area equipped for irrigation**. 2012. Disponível em: <[http://www.fao.org/nr/water/aquastat/infographics/Irrigation\\_eng.pdf](http://www.fao.org/nr/water/aquastat/infographics/Irrigation_eng.pdf)>. Acesso em: 12 jul. 2016.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **Top 10 exporters of agricultural products**. 2013. Disponível em: <<http://faostat3.fao.org/>>. Acesso em: 04 jun. 2016.

GAMMA DESIGN SOFTWARE. **GS+**: Geostatistics for the Environmental Sciences. Gamma Design Software, Plainwell, Michigan USA, 2012. Disponível em: <<http://www.gammadesign.com/>>. Acesso em: 04 jun. 2016.

GARCEZ, L. N.; ALVAREZ, G. A. **Hidrologia**. 2. ed. São Paulo - SP: Editora Edgard Blücher, 1988.

GIANNINI, A., BAGNONI, V. Evolution of irrigation support services in Tuscany. In: **18th Congress and 53rd IEC meeting of the International Commission on Irrigation and Drainage (ICID)**. FAO/ICID International workshop on Irrigation Advisory Services and Participatory Extension Management. 2002.

HERNANDEZ, F. B. T. **Agricultura irrigada e atuação da UNESP no Oeste Paulista**. 1998. Disponível em: <<http://www.agr.feis.unesp.br/fernando.htm>>. Acesso em: 27 set. 2016.

HERNANDEZ, F. B. T. **UNESP Ilha Solteira usa a Internet para democratizar o conhecimento e a informação**. 2016. Disponível em: <<https://irrigacao.blogspot.com.br/2016/12/unesp-ilha-solteira-usa-internet-para.html>>. Acesso em: 28 dez. 2016.

HESS, T.M., KNOX, J.W. Irrigation Advisory Services: experiences in UK. In: **18th Congress and 53rd IEC meeting of the International Commission on Irrigation and Drainage (ICID)**. FAO/ICID International workshop on Irrigation Advisory Services and Participatory Extension Management. 2002.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Agropecuário 2006**. Rio de Janeiro: IBGE, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Estatísticas do Século XX**. Acessível em <<http://seculoxx.ibge.gov.br/>>. Rio de Janeiro: IBGE, 2006, 577 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA**: Dados de Previsão de Safra. 2016. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/prevsaf/>>. Acesso em: 04 jun. 2016.

INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA (IEA). **Estatística da produção paulista**. 2015. Disponível em: <<http://www.iea.sp.gov.br>>. Acesso em: 10 jul. 2016.

LEMO FILHO, L. C. A.; MELLO, C. R.; FARIA, M. A.; CARVALHO, L. G. Spatialtemporal analysis of water requirements of coffee crop in Minas Gerais State, Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 2, fev. 2010.

LIMA, J. E. F. W.; FERREIRA, R. S. A.; CHRISTOFIDIS, D. **Uso da irrigação no Brasil**. O estado das águas no Brasil. Agência Nacional de Energia Elétrica. 1999. CD-Rom

LIMA, L. A. **Pivô central**: história e características. 2010. Disponível em: <<https://irrigacao.blogspot.com.br/2010/02/pivo-central-historia-e-caracteristicas.html>>. Acesso em: 13 jul. 2016.

LIMA, S. C. R. V.; FRIZZONE, J. A.; SOUSA, A. E. C.; BELTRÃO JÚNIOR, J. A.; FERREIRA, R. P.; GARCIA, D. R. Aplicação da tecnologia da informação e a adoção pelo agricultor: a avaliação inicial do envio de mensagens pelo serviço de assessoramento ao irrigante. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 6, p. 314-328, 2012.

LIMA, S. C. R. V.; SOUZA, F.; FRIZZONE, J. A.; CAMARGO, D. C.; BELTRÃO JÚNIOR, J. A.; NASCIMENTO, A. K. S. Desempenho do sistema de assessoramento ao irrigante - S@I para a gestão da água em áreas irrigadas: benefícios aos irrigantes e ao distrito. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v.9, n.1, p.1 - 13, 2015.

LOBO, T. **Brasil exporta cerca de 112 trilhões de litros de água doce por ano**. O Globo, 2015. Disponível em: < <http://oglobo.globo.com>> Acesso em: 20/11/2015.

LORITE I. J.; GARCÍA-VILA M.; CARMONA M. A.; SANTOS C.; SORIANO M. A. Assessment of the Irrigation Advisory Services' Recommendations and Farmers' Irrigation Management: A Case Study in Southern Spain. **Water Resources Management**, v. 26, n. 8, p. 2397-2419, 2012.

MAGALHÃES, P. C.; DURÃES, F. O. M. **Fisiologia da produção do milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2006. 10p. Circular Técnica n.76.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação**: Princípios e métodos. 3. ed. Viçosa: UFV, 2009. 355 p.

MARDIKIS, M. G.; KALIVAS, D. P.; KOLLIAS, V. J. Comparison of interpolation methods for the prediction of reference evapotranspiration - An application in Greece. **Water Resources Management**, v. 19, n. 3, p. 251-278, 2005.

MELLO, C. R.; LIMA, J. M.; SILVA, A. M.; MELLO, J. M.; OLIVEIRA, M. S. Krigagem e inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 925-933, out. 2003.

MENDES, A. A. T. Irrigação: tecnologia e produtividade. In: **SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE FRUTICULTURA IRRIGADA**, 1998, Jales, SP.

OLIVEIRA, A. S. de; KUHN, D.; SILVA, G. P. **A irrigação e a relação solo-planta-atmosfera**. LK editora, 2006, 88p.

OLIVEIRA, J.B.; CAMARGO, M.N.; ROSSI, M. & CALDERANO FILHO, B. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo**: legenda expandida. Campinas, Instituto Agrônomo/EMBRAPA Solos. Campinas. 1999. 64p.

ORTEGA, J. F.; JUAN, J. A.; TARJUELO, J. M. Improving water management: The irrigation advisory service of Castilla-La Mancha (Spain). **Agricultural Water Management**, v.77, p.37-58, 2005.

PERRY, C.; STEDUTO, P.; ALLEN, R. G.; BURT, C. M. Increasing productivity in irrigated agriculture: Agronomic constraints and hydrological realities. **Agricultural Water Management**, v.96, p.1517-1524, 2009.

RAYNOL, F. Verdades e mitos sobre a água na agricultura. In: **XXI Ciência para a vida EMBRAPA: Agrossistemas e produção sustentável**. Brasília: Marina Artes Gráficas e Editora, 2015. p. 8-12. Disponível em: <<http://www.univasf.edu.br/~cpgea/files/noticias/49.pdf>>. Acesso em: 27 mai. 2016.

RAPASSI, R. M. A., TARSITANO, R. A., & PROENÇA, É. R. Produção de milho safrinha irrigado, no município de Pereira Barreto - SP: custos e lucratividade. In: **XXII Seminário Nacional do milho safrinha**. Dourados - MS: UFGD/EMBRAPA, 2013. p. 1-6.

REICHARDT, K. **A água nos sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1987, 188 p.

RIBEIRO, C. A. D.; PEZZOPANE, J. R. M.; PEZZOPANE, J. E. M.; LOOS, R. A.; XAVIER, A. C.; CECÍLIO, R. A.; NEVES, M. A. Delimitação de microrregiões agroclimáticas e suas relações com o potencial produtivo da cultura do Eucalipto. **Floresta**, v. 41, n. 4, p. 779-786, 2011.

ROLIM, G. S.; SENTELHAS, P. C.; BARBIERI, V. Planilhas no ambiente EXCEL TM para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 6, n. 1, p. 133-137, 1998.

SARTORI, A. A. C.; SILVA, A. F.; RAMOS, C. M. C.; ZIMBACK, C. R. L. Variabilidade temporal e mapeamento de dados climáticos de Botucatu-SP. **Irriga**, Botucatu, v. 15, n. 2, p. 131-139, abr. 2010.

SENTELHAS, P. C.; ANGELOCCI, L. R. **Balanço hídrico climatológico normal e sequencial de cultura e para manejo da irrigação**. Piracicaba, ESALQ/USP, 2009. (Aula nº 9. Disciplina LCE 306 - Meteorologia Agrícola)

SMITH, M.; MUNÓZ, G. Irrigation Advisory Services for effective water use: a review of experiences. In: **Workshop on Irrigation Advisory Services and Participatory Extension in Irrigation Management**. Montreal: FAO-ICID, 2002. Disponível em: <<http://www.fao.org/ag/agl/aglw/ias/docs/paper9.pdf>>. Acesso em: 20/09/2016.

SOJKA, R. E.; BJORNEBERG, D. L.; ENTRY, J. A. Irrigation: An historical perspective. In: LAL, R. (Ed.). **Encyclopedia of Soil Science**. Nova York: Marcel Dekker, 2002. p. 745-749.

SOUSA, M. B. A. de; MANTOVANI, E. C.; CORDEIRO, É. A.; SOARES, A. A.; SILVA, J. G. F. da. Análise do manejo da irrigação em sistemas por pivô central utilizados na cafeicultura irrigada no norte do Espírito Santo. In: MANTOVANI, E. C.; SOARES, A. R. **Irrigação do cafeeiro**: informações técnicas e coletâneas de trabalhos. Viçosa: Associação dos Engenheiros Agrícolas de Minas Gerais, UFV, 2003. p. 146-154. (Boletim técnico, 8).

SOUZA, A. P. de; CARVALHO, D. F. de; SILVA, L. B. D. da; ALMEIDA, F. T. de; ROCHA, H. S. Estimativas da evapotranspiração de referência em diferentes condições de nebulosidade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, p. 219-228, 2011.

THORNTON, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance**. Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, 1955. 104p. (Publications in Climatology, vol. VIII, n. 1)

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA. **Canal Clima da UNESP Ilha Solteira**. Ilha Solteira, 2016a. Disponível em: <<http://clima.feis.unesp.br/>>. Acesso em: 20 de jun. de 2016.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA. **Levantamento Pluviométrico na região noroeste paulista é irregular**. Ilha Solteira, 2016b. Disponível em: <[http://www.agr.feis.unesp.br/jornal\\_dia\\_a\\_dia\\_29\\_marco\\_2016.php](http://www.agr.feis.unesp.br/jornal_dia_a_dia_29_marco_2016.php)>. Acesso em: 20 de jun. de 2016.

VALMONT. **História**. 2015. Disponível em: <<http://www.valmont.com.br/sítionovo/Historia>>. Acesso em: 13 jul. 2016.

VILANOVA, M. R. N.; SIMÕES, S. J. C.; TRANNIN, I. C, B. Interpolação geoespacial da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) em regiões com escassez de dados: estudo de caso no Sul de Minas Gerais. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 7, n. 2, p. 179-194, 2012.