

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS**

**Faculdade de Meteorologia**

**Graduação em Meteorologia**



**Trabalho Conclusão de Curso**

**Influência das diferentes estimativas de Evapotranspiração Potencial no  
Balanço Hídrico (BH) e aplicação do BH para a cana-de-açúcar no Rio Grande  
do Sul**

**Larissa Silva Braga**

Pelotas, 2015

**LARISSA SILVA BRAGA**

**Influência das diferentes estimativas de Evapotranspiração Potencial no  
Balanço Hídrico (BH) e aplicação do BH para a cana-de-açúcar no Rio Grande  
do Sul**

Trabalho de Conclusão do Curso de  
Graduação em Meteorologia da Universidade  
Federal de Pelotas, como requisito parcial à  
obtenção do título de Bacharel em  
Meteorologia.

Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Luciana Barros Pinto

Co-Orientador: Prof. Dr. Santiago Vianna Cuadra

Pelotas, 2015

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas  
Catalogação na Publicação

B813i Braga, Larissa Silva

Influência das diferentes estimativas de evapotranspiração potencial no balanço hídrico (bh) e aplicação do bh para a cana-de-açúcar no rio grande do sul / Larissa Silva Braga ; Luciana Barros Pinto, Santiago Vianna Cuadra, orientadores. — Pelotas, 2015.

58 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Meteorologia) — Faculdade de Meteorologia, Universidade Federal de Pelotas, 2015.

1. Déficit hídrico. 2. Penman-monteith. 3. Evapotranspiração da cultura. I. Pinto, Luciana Barros, orient. II. Cuadra, Santiago Vianna, orient. III. Título.

CDD : 551.572

**Larissa Silva Braga**

**Influência das diferentes estimativas de Evapotranspiração Potencial no  
Balanço Hídrico (BH) e aplicação do BH para a cana-de-açúcar no Rio Grande  
do Sul**

**Trabalho de Conclusão de Curso, como requisito parcial, para obtenção do  
grau de Bacharel em Meteorologia, Faculdade de Meteorologia, Universidade  
Federal de Pelotas.**

**Data da Defesa: 15 de junho de 2015.**

**Banca Examinadora:**

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Luciana Barros Pinto (Orientadora). Doutora em Meteorologia  
Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa - MG.**

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Cláudia Rejane Jacondino de Campos. Doutora em Física da  
Atmosfera pela Université - Paul Sabatier - Toulouse III – França.**

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Graciela Redies Fischer. Doutora em Meteorologia Agrícola pela  
Universidade Federal de Viçosa - MG.**

## **Dedicatória**

Aos meus pais, minha irmã, e a toda minha família que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida. Mãe, seu cuidado e dedicação foi o que me deram esperança para seguir. Pai, sua presença significou segurança e certeza de que não estou sozinha nessa caminhada.

## **Agradecimentos**

Agradeço primeiramente à Deus, que permitiu que tudo isso acontecesse, por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades.

À Universidade Federal de Pelotas pela oportunidade de realizar o curso de Graduação, e a todos os professores da Faculdade Meteorologia por me proporcionar o conhecimento não apenas científico, mas a manifestação do caráter e afetividade da educação no processo de formação profissional, pelo que se dedicaram a mim, não somente por terem me ensinado, mas por terem me feito aprender. A palavra mestre, nunca fará justiça aos professores dedicados aos quais sem nominar terão os meus eternos agradecimentos.

A minha orientadora Luciana, pelo aprendizado e suporte no pouco tempo que lhe coube, pelas suas correções, por ter me acolhido nessa trajetória e não ter desistido de mim, me incentivado muito.

Ao Prof. Dr. Santiago Vianna Cuadra pela co-orientação, pela oportunidade e apoio na elaboração deste trabalho.

Agradeço também a empresa Embrapa pela oportunidade e o acolhimento durante a bolsa de pesquisa, e ao CNPq, por ter possibilitado e financiado esta bolsa.

Agradeço a minha mãe Maria Alice, por ser essa mulher heroína que me deu apoio, incentivo nas horas difíceis, de desânimo e cansaço.

Ao meu pai que apesar de todas as dificuldades me fortaleceu e, que para mim foi muito importante.

Obrigada a minha irmã Paola e minha sobrinha, que nos momentos de minha ausência dedicados ao estudo, sempre fizeram entender que o futuro é feito a partir da constante dedicação no presente.

Obrigada! Primos e tios pela preocupação e apoio valioso.

Aos amigos de inestimável valor que fiz durante a graduação e, que sempre levarei comigo, especialmente Patrícia, Taciane, Edeon e Lucas, pelas noites de estudos, angustias, nervosismos e muitas risadas, aos companheiros de trabalhos e irmãos na amizade que fizeram parte da minha formação, principalmente a família “Vila do Chaves” que vão continuar presentes em minha vida certamente.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

## Resumo

BRAGA, Larissa Silva. **Influência das diferentes estimativas de Evapotranspiração Potencial no Balanço Hídrico (BH) e aplicação do BH para a cana-de-açúcar no Rio Grande do Sul.** 2015. 58f Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Faculdade de Meteorologia. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

O Estado do Rio Grande do Sul (RS) apresenta a precipitação pluviométrica superior a evapotranspiração potencial (ETP), com um regime pluviométrico bem distribuído ao longo do ano, embora em termos sazonais, principalmente nos meses de verão, grande parte do RS, apresente valores negativos da diferença entre a precipitação e a ETP, representando déficit hídrico (DH). Este estudo apresenta as diferenças nas estimativas de ETP, avaliando a influência disso no Balanço hídrico (BH), e o BH para cultura da cana-de-açúcar no RS. Utilizou-se onze métodos para estimar a ETP mensal, no período de 1975 a 2004, sendo eles: Thornthwaite, Romanenko, Turc, Thornthwaite e Camargo (Th&CM), Linacre, Camargo, Jensen-Haise, Hargreaves e Samani, Penman, Priestley-Taylor e Penman-Monteith (PM). Para obtenção do balanço hídrico sequencial, em base mensal, aplicou-se o método de Thornthwaite e Mather (1955), com a evapotranspiração potencial estimada através dos métodos de Thornthwaite (TH), Thornthwaite e Camargo (Th&CM), Hargreaves e Samani (H&S), e Penman-Monteith (PM), e capacidade de água disponível no solo de 50 mm. Foi considerado como indicador de desempenho dos modelos de ETP o Erro Médio Absoluto (EMA), obtido entre os diversos métodos e o de PM, para seis municípios do RS: Bom Jesus, Iraí, Pelotas, Santa Maria, São Luiz Gonzaga e Uruguaiana. O método de Thornthwaite e Camargo foi o que apresentou menor EMA médio e, o de maior EMA o de Priestley-Taylor. O método que mais se aproximou do PM foi o método de Th&CM apresentando um melhor desempenho em quatro de seis estações, o que simplifica a estimativa de ETP para as localidades estudadas, uma vez que o método de Th&CM depende apenas a temperatura efetiva do local. As análises foram realizadas considerando-se o percentual de ocorrências de DH a partir do BH de cada método e para cada cidade. Em geral, as regiões que apresentaram menor/menor ocorrência de DH foram os municípios de Bom Jesus/Uruguaiana, localizada nas regiões noroeste/sudoeste. O BH, utilizando a ETP de PM, apresenta menores valores de DH durante todo o período estudado. Em contrapartida, o BH com o uso do método de H&S apresentam valores e frequências mais elevadas da DH para todos os municípios do RS.

Palavras-chave: Déficit hídrico, Penman-Monteith, evapotranspiração da cultura.



## Abstract

BRAGA, Larissa Silva. **Influence of uncertainty of the estimate of potential evapotranspiration and Analysis of Water Balance for sugarcane in Rio Grande do Sul** 2015. 59s. Work Completion of course (Graduation) - School of Meteorology. Federal University of Pelotas, Pelotas.

The State of Rio Grande do Sul (RS) shows the rainfall exceeds potential evapotranspiration (ETP), with rainfall well distributed throughout the year, although in seasonal terms, especially in the summer months, much of the RS, present negative values of the difference between precipitation and the ETP, representing water deficit (DH). This study shows the differences in the estimates of ETP, evaluating the influence that the water balance (BH) BH and the cultivation of sugarcane in the RS. We used eleven methods to estimate monthly ETP in the period 1975-2004, namely: Thornthwaite, Romanenko, Turc, Thornthwaite and Camargo (Th & CM), Linacre, Camargo, Jensen-Haise, Hargreaves and Samani, Penman, Priestley-Taylor and Penman-Monteith (PM). To obtain the sequential water balance on a monthly basis, we applied the Thornthwaite method and Mather (1955), with the potential evapotranspiration estimated by the methods of Thornthwaite (TH), Thornthwaite and Camargo (Th & CM), Hargreaves and Samani (H & S ) and Penman-Monteith (PM), and water holding capacity in the soil of 50 mm. Was considered as a performance indicator of ETP models the Middle Absolute Error (MPE), reached between the various methods and the PM for six municipalities in the RS: Bom Jesus, Iraí, Pelotas, Santa Maria, São Luiz Gonzaga and Uruguaiana. The method of Thornthwaite and Camargo showed the lowest average EMA and the highest EMA the Priestley-Taylor. The method that is closer to the PM was Th & CM method of presenting a better performance in four out of six stations, which simplifies ETP the estimate for the sites studied, since Th & CM method depends only on the effective temperature of the site. Analyses were performed considering the percentage of DH instances from BH of each method and for each city. In general, the regions had lower / higher occurrence of DH was the municipalities of Bom Jesus / Uruguaiana, located in the northwest / southwest regions. The BH using the ETP PM, DH has lower values throughout the study period. In contrast, the BH using the H & S method has values and higher frequencies of DH for all municipalities in the RS.

Keywords: Water deficit, Penman-Monteith, crop evapotranspiration.

## Lista de Figuras

Figura 1- Ciclo hidrológico global. ....	14
Figura 2- Diagrama esquemático do Balanço Hídrico .....	15
Figura 3 - A divisão da evapotranspiração em evaporação e transpiração durante o período de crescimento para uma cultura anual no campo. ....	20
Figura 4 - Alcances típicos esperados no Kc para os quatro estádios de crescimento. ....	27
Figura 5 - Zoneamento agroclimático para a cultura da cana-de-açúcar no Estado do Rio Grande do Sul, visando à produção de açúcar e álcool. ....	28
Figura 6 - Classificação dos fatores de produção vegetal que afetam direta e indiretamente os processos fisiológicos das plantas. Linhas cheias correspondem a uma ação mais efetiva do que as linhas interrompidas. ...	30
Figura 7- Localização das seis cidades utilizadas no estudo. ....	31
Figura 8 - Estimativas de evapotranspiração para as cidades de (a) Bom Jesus, (b) Iraí, (c) Pelotas, (d) São Luiz Gonzaga, (e) Santa Maria e (f) Uruguaiana pelos métodos de: Thornthwaite (TH), Thornthwaite&Camargo (TH&CM), Camargo (CM), Hargreaves&Samani (H&S), Romanenko (R.), Linacre (L.), Turc (Tu), Jensen-haise (J-H), Priestley-Taylor (Pr&Tay), Penman (PE) e Penman-Monteith (PE&Mont).....	43
Figura 9- Balanço Hídrico da cidade de Bom Jesus pelos métodos de: Thornthwaite(a), Thornthwaite&Camargo(b), Hargreaves&Samani(c), Penman-Monteith(d).....	46
Figura 10- Balanço Hídrico da cidade de Iraí pelos métodos de: Thornthwaite(a), Thornthwaite&Camargo(b), Hargreaves&Samani(c), Penman-Monteith(d). ....	46

Figura 11- Balanço Hídrico da cidade de Pelotas pelos métodos de: Thornthwaite(a), Thornthwaite&Camargo(b), Hargreaves&Samani(c), Penman-Monteith(d). .....	47
Figura 12- Balanço Hídrico da cidade de Santa Maria pelos métodos de: Thornthwaite(a), Thornthwaite&Camargo(b), Hargreaves&Samani(c), Penman-Monteith(d).....	47
Figura 13- Balanço Hídrico da cidade de São Luiz Gonzaga pelos métodos de: Thornthwaite(a), Thornthwaite&Camargo(b), Hargreaves&Samani(c), Penman-Monteith(d).....	48
Figura 14- Balanço Hídrico da cidade de Uruguaiana pelos métodos de: Thornthwaite(a), Thornthwaite&Camargo(b), Hargreaves&Samani(c), Penman-Monteith(d).....	48

## Lista de Tabelas

Tabela 1- Coordenadas geográficas e altitude das Estações Meteorológicas utilizadas neste estudo. ....	32
Tabela 2 – Valores de Kc para cana-de-açúcar. ....	40
Tabela 3- Valores de Kc ajustados para cada mês do cultivo da cana-de-açúcar. ...	41
Tabela 4 – Valores de erro médio absoluto (%) de cada método em relação ao método de Penman-Monteith, para Uruguaiana (URU). Bom Jesus (BJ), Pelotas (PEL), Santa Maria (SM), Iraí (IRAI) e São Luíz Gonzaga (SLG). .....	44
Tabela 5 - Percentual do déficit hídrico. ....	50

## Sumário

1.Introdução .....	12
2.Revisão de literatura.....	14
2.1. Ciclo hidrológico e Balanço Hídrico (BH) .....	14
2.2. Evapotranspiração .....	19
2.3. Balanço Hídrico no Rio Grande do Sul.....	24
2.4. Evapotranspiração da cultura (ETc) .....	25
2.5. Cana-de-açúcar no Rio Grande do Sul .....	27
3. Materiais e métodos .....	31
3.1. Estimativas de ETP .....	32
3.2. Balanço Hídrico .....	38
4. Resultados e Discussões .....	42
4.1. Comparação das estimativas de ETP .....	42
4.2. Balanço Hídrico Climatológico .....	44
4.3. Balanço Hídrico Sequencial (BHS).....	49
5. Conclusão .....	51
Referências .....	52

## Introdução

O Estado do Rio Grande do Sul apresenta, em termos médios anuais, a precipitação pluviométrica superior a evapotranspiração potencial, com um regime pluviométrico bem distribuído ao longo do ano. Entretanto, em termos sazonais, grande parte do Estado, principalmente na Metade Sul, apresenta valores negativos da diferença entre a precipitação e a evapotranspiração potencial, o que representa um déficit hídrico na região, principalmente nos meses de verão, crítico para as atividades agrícolas, que estão presentes inclusive nas médias históricas de produtividade do Estado (WREGE, 2011, GROSS, 2012). Apesar do problema ser mais efetivo na Metade Sul, outras regiões do Estado sofrem com secas recorrentes e, dependendo da intensidade, todas as áreas agrícolas podem ser afetadas (TEIXEIRA, 2013).

Uma das principais metodologias, provavelmente a mais amplamente empregada, para avaliação da disponibilidade hídrica para os diversos fins é o balanço hídrico climatológico (BHC) (AMORIM NETO, 1989; SENTELHAS, 1999; VAREJÃO-SILVA, 2006). O BHC expressa matematicamente, de forma simplificada, a relação solo-planta-atmosfera através, principalmente, do balanço entre a precipitação pluviométrica e evapotranspiração potencial (ETP), estando diretamente relacionados com as medidas ou estimativas destas.

Com relação à ETP, as incertezas estão associadas não só às estimativas e medições, mas também do método empregado em seu cálculo, pois existem diversas formulações, com ampla gama de complexidade, em função de diferentes variáveis climáticas. A variedade de métodos vai dos que consideram apenas a temperatura média do ar (método Thornthwaite), a outros que consideram uma gama maior de variáveis climáticas, como temperatura do ar, umidade relativa e saldo de radiação solar (método de Penman-Monteith - PM). Além disso, tratando-se

de culturas agrícolas, deve-se considerar a evapotranspiração da cultura (ETC), onde além dos fatores meteorológicos, a ETC também é em função do estágio fenológico da planta, fazendo com que a necessidade de água para seu desenvolvimento potencial, varie ao longo do ciclo (SCARDUA; ROSENFELD, 1987).

Sendo assim, uma melhor definição da disponibilidade hídrica de uma região gera impactos em diversas áreas, principalmente àquelas voltadas à agricultura, onde influencia diretamente na expansão e adaptabilidade de culturas agrícolas. Como exemplo, pode-se citar a cultura da cana-de-açúcar, que vem expandindo dentro do território brasileiro, que tem na disponibilidade hídrica o principal fator climático causador de variabilidade da produtividade, podendo influenciar nos níveis de sacarose da planta, alterando a qualidade da matéria-prima fornecida para as indústrias (LEITE, 2008).

Dentro deste contexto, o objetivo geral deste trabalho é avaliar a influência das incertezas da estimativa da ETP no BH para o RS e, avaliar o balanço hídrico para a cultura da cana-de-açúcar em diferentes regiões do Estado. Especificamente, pretende-se analisar o grau de incerteza das estimativas de ETP, com base na comparação destes diferentes modelos com os resultados obtidos pelo método de Penman-Monteith (padrão indicado pela FAO) sobre o RS; Avaliar o Balanço hídrico (BH) para cultura da cana de açúcar no RS, considerando diferentes métodos para o cálculo da ETP.

## Revisão de literatura

### 2.1. Ciclo hidrológico e Balanço Hídrico (BH)

A água existente em praticamente todo o planeta, na atmosfera, na superfície dos continentes, nos mares, oceanos e subsolo, encontra-se em permanente circulação, nos seus diferentes estados físicos, desenvolvendo um processo denominado ciclo hidrológico, conforme apresentado na figura 1 (SANTOS, 2001).

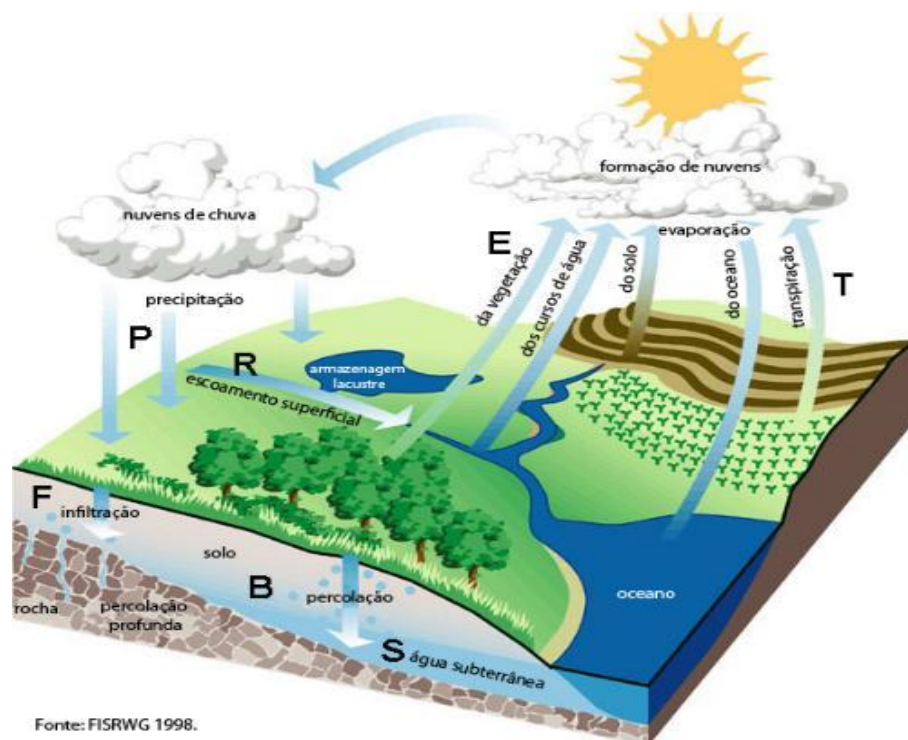


Figura 1- Ciclo hidrológico global.

Fonte: FISRWG, 1998.



O fornecimento natural de água ao solo é feito através das precipitações em forma de chuva, granizo, neve e orvalho que, ao chegar à superfície, parte desta água infiltra, ficando disponível dentro do solo e abastecendo os lençóis freáticos, outra parte escoar, abastecendo rios, lagos e oceanos. Parte da água disponível no solo evapora para a atmosfera, e outra é consumida pela vegetação, voltando para a atmosfera através da evapotranspiração (TUCCI, 1993).

Assim, o conceito de ciclo hidrológico pode ser traduzido quantitativamente sob a forma de uma relação matemática que representa a quantificação da água presente nas fases do ciclo, para um intervalo de tempo escolhido, denominada de balanço hídrico (BH) (SANTOS, 2001). O BH consiste em um método prático que contabiliza as entradas e as saídas de água no solo, que nada mais é do que o resultado da aplicação do princípio de conservação de massa em um volume de solo vegetado, através da precipitação (P), evaporação, evapotranspiração, escoamento superficial e percolação (PER) (PESSOA, 1985; TUCCI, 1993). Considerando-se isoladamente os processos acima e abaixo da superfície do solo é possível descrever o balanço hídrico como segue a figura 2.

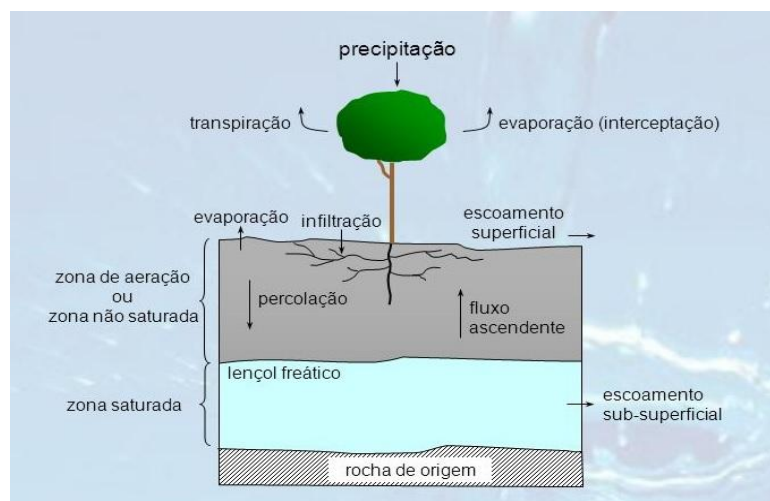


Figura 2- Diagrama esquemático do Balanço Hídrico

Fonte: CTEC, 2015

Na figura 2 considera-se somente o movimento vertical de água dentro do volume de solo analisado. O que entra neste sistema é apenas a água da precipitação. O que sai é resultado da evapotranspiração real e da água que percola abaixo do alcance do sistema radicular das plantas que ali se encontram.

Matematicamente o BH de uma área vegetada pode ser representado por (PEREIRA; CAMARGO, 1997; SILVA, 2010):

$$P + I = DP + Dq + ES + ET \quad \text{Eq. 1}$$

sendo:  $P$  a precipitação;  $I$  a irrigação;  $DP$  a drenagem profunda ou percolação;  $Dq$  a variação da umidade no solo;  $ES$  o escoamento superficial e  $ET$  a evapotranspiração. Em uma média de longo período pode-se admitir que  $Dq$ ,  $DP$  e  $I$  sejam constantes, de forma que flutuações dessas quantidades tornam-se insignificantes no BH, que pode ser simplificado para:

$$P = ET + ES \quad \text{Eq. 2}$$

A descrição de cada um dos componentes do BH é feita a seguir (TOMASELLA; ROSSATTO, 2005; SILVA, 2010):

- a. Precipitação ( $P$ ) é a forma principal pela qual a água retorna da atmosfera para a superfície, independente de seu estado físico, após os processos de evaporação e condensação, que depende do clima da região;
- b. Irrigação ( $I$ ) é a aplicação de água sobre o solo feita pelo homem para repor a umidade necessária na zona das raízes. Esta atividade que substitui a chuva favorece o crescimento das plantas, que é função do próprio BH, juntamente com os efeitos do clima, solo e tipo de planta;
- c. Drenagem profunda ou percolação ( $DP$ ) é o movimento de água livre contida no solo que escoar pela ação da gravidade. A água em excesso, que escorre ou que se perde por drenagem profunda, é aquela que vai reabastecer os mananciais de água, como os rios, lagos, açudes e também o lençol freático;
- d. Variação da umidade do solo ou drenagem lateral ( $Dq$ ) se dá por fenômenos de absorção e capilaridade, dessa forma o solo retém a umidade das chuvas que as plantas necessitam;
- e. Escoamento superficial ( $ES$ ) é a parte da água que escoar superficialmente, constituindo uma resposta rápida à precipitação e cessa pouco tempo depois dela.
- f. Evapotranspiração ( $ET$ ) é a quantidade de água transferida para a atmosfera pelos processos de evaporação da água do solo e transpiração das plantas.

O BH tem sido amplamente empregado na análise das condições climáticas/hídricas e, como uma das principais ferramentas de suporte ao zoneamento agrícola em diversas regiões do país (CAMARGO, 1986; STEINMETZ; FOREST, 1986; STEINMETZ, 1988; SEDIYAMA, 2001; ALMEIDA, 2013). No contexto agrônômico, o BH determina todos os ganhos e perdas que se verificam em um terreno com vegetação, de modo a estabelecer períodos com maior ou menor disponibilidade de água às plantas, em um determinado período de tempo.

A disponibilidade de água no solo é de fundamental importância sócio econômica, uma vez que determina desde o abastecimento de cidades ao tipo de cultura que uma região pode produzir. Um exemplo seria a capacidade agrícola de uma região onde, para um ótimo desenvolvimento de uma determinada cultura, é necessário o conhecimento prévio das condições climáticas e as características do solo da região, a fim de determinar se a planta terá a quantidade necessária de água nas diferentes fases do seu desenvolvimento (PESSOA, 1985).

Pelo exposto fica claro que o BH possui diversas aplicações possibilitando a obtenção de informações diferenciadas dependendo da periodicidade estabelecida para o estudo, podendo este ser calculado para várias escalas de tempo: diária, decimal, mensal, etc. Dentro deste contexto tem-se os seguintes tipos de BH proposto por Aguilar et al (1986); Silva e Reis (1990); Reis et al (1990); Costa et al (1998) e Silva (2010):

- i. Balanço Hídrico Climatológico ou Normal (BHC) – o qual é elaborado com valores de normais climatológicas, representando, portanto, uma estimativa do comportamento médio do regime edafoclimático de uma região. A expressão edafoclimático refere-se a características definidas através de fatores do meio ambiente tais como clima, relevo, temperatura, umidade do ar, radiação, tipo de solo, vento, composição da atmosfera e precipitação pluvial. Esse tipo de BH é um indicador climático da disponibilidade hídrica da região, por meio da variação sazonal das condições do BHC ao longo de um ano médio, ou seja, dos períodos com deficiências e excedentes hídricos. As informações fornecidas pelo BHC são de cunho climático e, portanto auxiliam no planejamento agrícola e servem de subsídio para a determinação da melhor época e tipo de manejo para a exploração agrícola;
- ii. Balanço Hídrico Sequencial (BHS) – é elaborado com dados de precipitação e evapotranspiração de um período (meses, semanas, dias) de um ano específico,

para uma determinada região. Esse tipo de balanço fornece a caracterização e a variação sazonal das condições do BH (deficiências e excedentes) ao longo do período em questão. Essas informações são de grande importância para as tomadas de decisão em práticas agrícolas tais como: plantio, colheita, irrigação, entre outros; e,

- iii. Balanço Hídrico de Cultivo – é específico de uma cultura e visa calcular o armazenamento de água no solo levando em consideração tanto o tipo de vegetação como a sua fase de crescimento e desenvolvimento.

Na prática, efetuar diretamente ou indiretamente a contabilidade hídrica de uma parcela de solo com vegetação não é uma atividade simples e, dependendo das condições do local, nem sempre é possível. Para isso existe uma segunda maneira de se conhecer essa contabilidade que é estimando esse valor por meio de modelos matemáticos, a fim de estabelecer comparações entre as condições reinantes em localidades distintas (AMORIM NETO, 1989). O modelo mais conhecido e utilizado foi o proposto por Charles Warren Thornthwaite, em 1948, que foi o primeiro a desenvolver um método simples para estimar o BH climatológico, usando valores mensais da temperatura do ar e do total pluviométrico, bem como a capacidade de armazenamento do solo (CAD), representa a capacidade de armazenamento útil do solo ou a máxima quantidade de água disponível para a vegetação. Nesse modelo simples, Thornthwaite considera o solo como um reservatório com CAD de 100 mm, e que toda água disposta ao solo tende à demanda evapotranspiratória, e a perda de água pelo solo é linear, ou seja, toda água requerida pela evaporação e transpiração da vegetação presente. Em 1955 esse método foi aperfeiçoado por John Russ Mather, passando a ser conhecido como Balanço Hídrico de Thornthwaite e Mather, no qual o CAD torna-se uma variável e é estabelecida em função de suas propriedades na camada explorada pelas raízes das plantas nele presente (MEDEIROS, 2002).

O balanço hídrico de Thornthwaite & Mather (1955) é uma das várias maneiras de se monitorar a variação do armazenamento de água no solo, através da contabilização do suprimento natural de água ao solo, pela chuva (P), e da demanda atmosférica, pela evapotranspiração potencial (ETP), e com um nível máximo de armazenamento ou capacidade de água disponível (CAD) apropriada ao estudo em questão. Este BH fornece estimativas da evapotranspiração real (ETR), da deficiência hídrica (DEF), do excedente hídrico (EXC) e do armazenamento de água

no solo (ARM). A capacidade de armazenamento de água no solo ou máxima água disponível (CAD) às plantas representa o limite de água entre a capacidade de campo ( $C_c$  – limite máximo de água no solo) e o ponto de murchamento ( $P_m$  – ponto a partir do qual uma planta que murcha não se recupera mais). A umidade do solo na  $C_c$  representa uma quantidade de água que pode ser mantida no solo contra a força da gravidade, sem haver drenagem. Desse limite até o  $P_m$ , a água só pode ser removida por ação direta da evaporação ou evapotranspiração das plantas. O armazenamento máximo admitido, portanto, é aquele volume que se situa entre estes dois limites, dentro de uma profundidade efetiva do solo. A CAD é função, portanto, da textura do solo e da profundidade das raízes das espécies vegetais que o cobre (PEREIRA, CAMARGO, 1997; SILVA, 2010).

## 2.2. Evapotranspiração

Evapotranspiração (ET) é a combinação de dois processos separados, por um lado à água perdida da superfície do solo por evaporação e, por outro a água perdida pela cultura através de transpiração. Em solos com cobertura vegetal é praticamente impossível separar o vapor d'água proveniente da evaporação do solo daquele originado da transpiração. Neste caso, a análise do aumento da umidade atmosférica é feita de forma conjunta, interligando os dois processos num processo único, denominado de evapotranspiração. Esta fração diminui à medida que a cultura cresce e desenvolve e o dossel sombreia cada vez mais a área de solo. Quando a cultura é pequena, água é predominantemente perdida por evaporação do solo, mas uma vez que a cultura se desenvolve bem e completa a cobertura do solo, a transpiração se torna o processo principal (FAO, 2006; ROSSATO, 2001). Para um melhor entendimento, vejamos a figura 3, onde, a evapotranspiração é dividida em evaporação e transpiração, e é relacionada em correspondência com a área foliar por unidade de superfície do solo (índice da área foliar - LAI). No plantio quase 100% da ET vem da evaporação, quanto o sombreamento da cultura se torna maior 90% da ET vêm de transpiração (Figura 3).

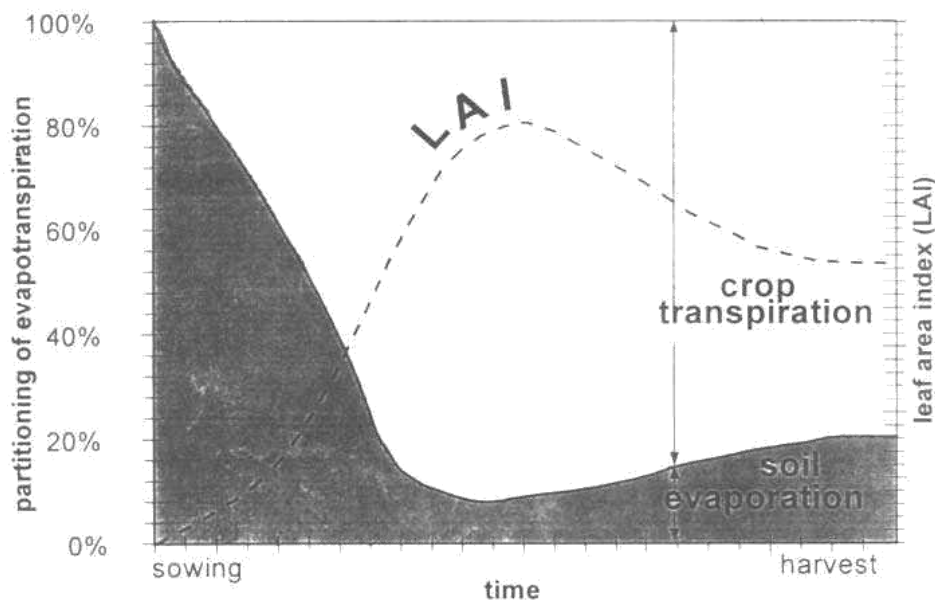


Figura 3 - A divisão da evapotranspiração em evaporação e transpiração durante o período de crescimento para uma cultura anual no campo.

Fonte: FAO, 2006.

Na literatura existem quatro conceitos para ET: potencial, real, de referência e da cultura (FERNANDES, 2010).

- Evapotranspiração potencial (ETP): esse conceito foi introduzido por Thornthwaite e é definida como a quantidade de água transpirada em um determinado espaço de tempo, a partir de uma vegetação rasteira e verde, cobrindo totalmente o solo, com altura uniforme e sem sofrer limitações nas condições hídricas (TANNER, 1960).
- Evapotranspiração real (ETR): é definida como a quantidade de água transferida para a atmosfera por evaporação e transpiração, nas condições reais ou existentes de fatores atmosféricos e umidade do solo (MATZENAUER, 1992). Assim, a ETR poderá se mostrar inferior e igual a potencial.
- Evapotranspiração da cultura (ETC): representa a quantidade de água que deve ser reposta ao solo para manter o crescimento e a produção em condições ideais, embora sua determinação esteja sujeita a muitos erros (ROSSATO, 2001).

Os métodos de estimativa da ET podem ser agrupados em cinco categorias, ou seja, (VIANELLO; ALVES, 1991; PEREIRA; CAMARGO, 1997):

- Métodos Empíricos – Resultam de correlações entre a ET, medida em condições padronizadas, e os elementos meteorológicos, medidos em postos também

padrões. Alguns desses métodos têm aplicação quase universal. Dentre estes métodos citam-se os do tanque classe A, detalhado em Reichardt (1987), de Thornthwaite (1948), de Thornthwaite modificado por Camargo, de Blaney-Criddle, de van Bavel, de Making, de Linacre, dentre outros, cujas limitações e aplicabilidades podem ser vistos em Stull (1988), Pereira (1989), Pereira e Camargo (1997) entre outras;

- ii. Método Aerodinâmico - Este é um método micrometeorológico, com base físico teórico da dinâmica dos fluidos e transporte turbulento, ou seja, considera que o escoamento atmosférico acima de uma superfície natural rugosa é predominantemente turbulento, com mistura contínua na camada de ar que interage com a superfície (LOCKWOOD, 1985).
- iii. Métodos de Balanço de Energia - O balanço de energia representa a contabilidade das interações dos diversos tipos de energia com a superfície. Em condições atmosféricas normais, o suprimento principal de energia para a superfície é dado pela radiação solar (HARTMANN, 1994). Dessa forma, o método do balanço de energia, para a determinação indireta do transporte vertical turbulento de vapor d'água para a atmosfera, por evaporação ou ET, fundamenta-se no princípio da conservação da energia aplicado aos diferentes fluxos energéticos que acontecem na superfície-fonte (SILVA; REIS, 1990). A principal dificuldade na utilização da aproximação do balanço de energia surge da distribuição de energia entre a transferência de calor sensível e latente para a atmosfera (LOCKWOOD, 1985). Entre os métodos de balanço de energia, destaca-se o da razão de Bowen, proposto por Bowen, em 1926 (ARYA, 1988) e o de Priestley e Taylor (PRIESTLEY; TAYLOR, 1972).
- iv. Métodos Combinados - O termo combinado deriva do fato de que as equações propostas associam os efeitos do balanço de energia à superfície e os termos de energia advectiva para estimar as perdas de água de superfícies cultivadas. Dentre os métodos combinados destaca-se o método de Penman, de Penman Modificado e o de Penman-Monteith (PENMAN, 1948; MONTEITH, 1973; MONTEITH, 1981).
- v. Método da Correlação dos Turbilhões - Método proposto para determinar a transferência vertical turbulenta de vapor d'água, calor e quantidade de movimento para a atmosfera, baseado em flutuações turbulentas de parâmetros microclimatológicos em torno de suas respectivas médias. No entanto, a

utilização do método de correlação de turbilhões é complexa, por exigir sensores eficientes e de resposta muito rápida; caso contrário, não serão capazes de detectar a passagem de vórtices de diferentes tamanhos (ARYA, 1988; SILVA; REIS, 1990).

Embora exista uma grande diversidade e disponibilidade de métodos para estimativa de ETP, neste estudo serão utilizados somente onze métodos, sendo eles:

- i. Método de Thornthwaite: baseado apenas na temperatura média do ar. Foi desenvolvido para condições de clima úmido e, por isso, normalmente apresenta sub-estimativa da ETP em condições de clima seco. Apesar dessa limitação, é um método bastante empregado com base em dados de evapotranspiração medidos e dados de temperatura média mensal para calcular o valor da ETP, isto é, a evapotranspiração potencial. O valor da ETP depende da temperatura média do ar conforme Medeiros (2002). Para o estado do Rio Grande do Sul os valores de ET obtidos a partir da equação de TH subestimam a ET durante todo o ano, sendo que os valores se afastam mais dos reais no outono e no inverno (THORNTHWAITE, 1948).
- ii. Método de Romanenko: É um método simples, sendo derivado de uma equação de evaporação com base na relação entre temperatura média  $T_m$  e umidades relativas do ar UR têm a equação de Romanenko (1961), conforme Xu (2002).
- iii. Método de Turc: Este método foi desenvolvido para o oeste europeu, onde a umidade do ar é maior que 50% (KASHYAP; PANDA, 2001). A equação descreve como obter os valores de evapotranspiração baseada na umidade relativa do ar em porcentagem, nebulosidade (relação  $n/N$ ), temperatura média mensal do ar em graus centígrados, latitude.
- iv. Método de Thornthwaite & Camargo: No método de Thornthwaite, porém adaptado por Camargo et al. (1999) utiliza-se uma temperatura efetiva ( $T_{ef}$ ), a temperatura calculada em função da temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido (umidade relativa do ar) e velocidade do ar que expressa a amplitude térmica local, ao invés da temperatura média do ar.
- v. Método de Linacre: Este método é simples e foi baseado em uma simplificação da metodologia de Penman-Monteith. A estimativa da evapotranspiração de referência é baseada em dados de temperatura do ponto de orvalho, temperatura média do ar, umidade relativa do ar e em função da latitude e



longitude (LINACRE, 1977). Os valores de evapotranspiração de referência pelo método de Evapotranspiração são obtidos pela equação ETP, pressupondo um albedo de 0,25 (LINACRE, 1977).

- vi. Método de Camargo: baseado no método de Thornthwaite, Camargo propôs um novo método, mais simples e com eficiência semelhante ao de Thornthwaite e Mather (1955). Essa metodologia tem uma vantagem a mais que é não necessitar da temperatura média anual normal. No entanto, considera a irradiância solar extraterrestre ( $Q_0$ ), a qual é fornecida por tabelas.
- vii. Método de Jensen-Haise: desenvolvido para regiões áridas e semiáridas, consiste em estimar evapotranspiração de referência apenas com os dados de radiação global, também conhecida como radiação solar, e temperatura média do ar.
- viii. Método Hargreaves & Samani: é utilizado quando não existem dados de radiação global solar, umidade relativa do ar e velocidade do vento, baseando-se apenas na temperatura média do ar e na amplitude térmica, que é a diferença entre a temperatura máxima e a temperatura mínima registradas num determinado período de tempo.
- ix. Método de Penman: é um dos mais empregados, cuja fórmula foi derivada assumindo proporcionalidade entre a evaporação da água e a evapotranspiração da grama sub-irrigada. Usando a relação entre os fluxos de calor sensível e latente, descrita por Bowen em 1926, e o poder evaporante do ar ( $E_a$ ) à sombra, Penman eliminou medidas de superfície, inexistentes em estações meteorológicas convencionais e considerou que a determinação do saldo de radiação ( $R_n$ ) é mais importante, principalmente quando a radiação incidente ( $R_g$ ) é medida e a emissão de ondas longas ( $R_l$ ) é estimada. Quando ambas são estimadas, devido ao erro relativo ser na mesma ordem de magnitude em nível diário, a precisão na determinação de  $R_n$  é maior.
- x. Método do Priestley-Taylor: é a mais interessante simplificação do método original de Penman. Considera que a ETP proveniente do termo aerodinâmico, ou seja, do poder evaporante do ar, é uma porcentagem da ETP condicionada pelo termo energético.
- xi. Método de Penman-Monteith: foi divulgado pela FAO (Food and Agriculture Organization) das Nações Unidas como método padrão para obtenção dos valores diários de  $E_{To}$ . Baseado no método original de Penman. O método de

PM, o mais adequado para estimar a evapotranspiração, considera que a ETP é proveniente dos termos energético e aerodinâmico, os quais são controlados pelas resistências ao transporte de vapor da superfície para a atmosfera. As resistências são denominadas de resistência da cobertura ( $r_s$ ) e resistência aerodinâmica ( $r_a$ ). Para a cultura padrão, o  $r_s$  adotado  $70 \text{ s.m}^{-1}$ .

### **2.3. Balanço Hídrico no Rio Grande do Sul**

O Estado do Rio Grande do Sul (RS) localiza-se na região mais meridional do Brasil, entre as latitudes de  $27^{\circ}05'S$  e  $33^{\circ}45'S$  e longitudes de  $49^{\circ}43'O$  e  $57^{\circ}39'O$ . Embora o Sul do Brasil esteja situado na zona subtropical, o inverno, na sua maior parte, é acentuado e apresenta grande amplitude térmica anual caracterizada por verões quentes e invernos frios, sendo influenciado fortemente por sistemas atmosféricos de latitudes médias e elevadas (MORENO, 1961).

De maio a agosto a temperatura média se mantém relativamente baixa por toda a área. Durante estes meses toda a região sente os efeitos típicos do inverno em função das sucessivas e intensas invasões de frentes polares que trazem, geralmente, abundantes chuvas sucedidas por massa polar, cuja participação na circulação atmosférica regional é, pelo menos, igual à participação dos sistemas tropicais, acompanhada de forte queda de temperatura que, comumente, atinge a níveis poucos superiores a  $0^{\circ}\text{C}$  e, não raras vezes, descem a valores negativos, tornando notável a ocorrência de geadas (NIMER, 1989).

Apesar da variabilidade espacial observada no RS, a distribuição da precipitação nas quatro estações do ano é bastante uniforme, apresentando, em média, 24% no verão, 25% no outono, 25% no inverno e 26% na primavera (BERLATO, 1992). O regime de temperatura deste Estado é influenciado pelas massas de ar Marítima Tropical (mT), Marítima Polar (mP) e Continental Tropical (cT) (ANDRADE, 2013). Normalmente não se acredita que nas regiões temperadas não existe calor, todavia nessa região a inclinação dos raios solares, em dezembro e janeiro, é muito pequena, pois o sol incide com inclinação semelhante ou menos do que no Equador, decorrendo daí que é comum a ocorrência de forte calor durante o verão, quando se registram temperaturas máximas em torno de  $30^{\circ}\text{C}$  em algumas localidades. No que diz respeito ao Inverno, em virtude do balizamento intertropical

da marcha zenital do Sol, esta estação torna-se, evidentemente, mais longa e mais fria à medida que o observador se afasta do Equador.

Segundo Garcias e Vargas (1998), na década de 1970 apareceram mudanças no regime de chuva na metade Sul do Brasil, e em 2001/2003 apresentou uma mudança de fase. As séries de vazões na bacia do rio Paraná apresentam uma importante não-estacionariedade entre os períodos anterior e posterior à década de 1970, com um incremento de vazão variando em cerca de 30%. Durante a seca ocorrida no Sul do Brasil no verão de 2004-2005, o total de chuva anual em 2005 nesta região superou a média no Estado de Santa Catarina, porém setores leste e noroeste do Rio Grande do Sul e litoral e sul do Paraná experimentaram quedas nos índices pluviométricos. Contudo, a região Sul passou por um período crítico de deficit de precipitação durante os meses de dezembro de 2004 a março de 2005. Neste período, o total acumulado de chuva esteve entre 100 mm e 500 mm abaixo da média histórica. Os maiores impactos do País foram observados no Rio Grande do Sul, que apresentou quadro de seca com prejuízos para a produção agrícola e pecuária, além de problemas de abastecimento para a população (MARENGO, 2001).

#### **2.4. Evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>)**

A evapotranspiração da cultura, sob condições padrão, denotado como ET<sub>c</sub>, é a evapotranspiração da cultura livre de doença, bem fertilizada, plantada em extensas áreas, sob condições de umidade do solo ótimas, e alcançando produção máxima sob determinadas condições climáticas. A quantidade de água exigida para compensar a perda por evapotranspiração no campo cultivado é definida como exigência de água da cultura. Embora os valores para evapotranspiração da cultura e exigência de água da cultura são idênticos, a exigência de água da cultura se refere à quantidade de água que precisa ser fornecida, enquanto que a evapotranspiração da cultura se refere à quantidade de água que está sendo perdida por evapotranspiração (FAO, 2006).

Diferenças na anatomia da folha, características dos estômatos, propriedades aerodinâmicas e albedo causam a diferença entre a evapotranspiração da cultura para a evapotranspiração da cultura de referência sob as mesmas condições climáticas. Devido a variações nas características da cultura ao longo de

sua estação de crescimento, ocorrem determinadas mudanças no coeficiente da cultura ( $K_c$ ) do plantio até a colheita.

O  $K_c$  integra o efeito das características que distinguem uma cultura de campo típica da cultura de referência grama, que tem um aspecto constante (altura uniforme) e uma cobertura do solo completa. Por conseguinte, culturas diferentes terão coeficientes ( $K_c$ ) diferentes. As características variáveis da cultura durante os estádios de desenvolvimento também afetam o coeficiente  $K_c$ . Finalmente, como a evaporação é uma parte integrada da evapotranspiração da cultura, condições que afetam a evaporação do solo também terão um efeito no  $K_c$  (FAO, 2006).

Sob condições úmidas e de vento calmo, o  $K_c$  se torna menos dependente das diferenças entre os componentes aerodinâmicos de  $ET_c$  e  $ETP$  e os valores de  $K_c$ , para “cobertura completa” do solo pelas culturas agrícolas, não ultrapassam a unidade por mais que aproximadamente 0,05. Isto porque a cobertura completa do solo pelas culturas agrícolas e a cultura de referência grama aparada (0,12 m de altura) ambas absorvem quase o máximo da radiação de onda curta que é a fonte de energia principal para a evaporação sob condições úmidas e de ventos fracos. Geralmente, os albedos,  $\alpha$ , são semelhantes para cobertura completa do solo das culturas agrícolas, inclusive a cultura de referência. Devido ao déficit de pressão do vapor ( $e_s - e_a$ ) ser pequeno sob condições úmidas, diferenças na  $ET$  causadas pela diferenças na resistência aerodinâmica,  $r_a$ , entre a cultura agrícola e a cultura de referência também é pequeno, especialmente com a velocidade do vento moderado (FAO, 2006).

Sob condições áridas, o efeito de diferenças em  $r_a$  entre a cultura agrícola e a cultura de referência grama na  $ET_c$  se torne mais pronunciado porque o termo ( $e_s - e_a$ ) pode ser relativamente grande. As magnitudes maiores do ( $e_s - e_a$ ) aumentam as diferenças no termo aerodinâmico no numerador da equação do método para a cultura e a cultura de referência. Consequentemente, o  $K_c$  será maior sob condições áridas quando a cultura agrícola tiver maior área foliar e aspereza devido à altura do que a cultura de referência grama. Na figura 4 ilustra a variação no  $K_c$  para culturas diferentes influenciado por fatores climático e de crescimento.

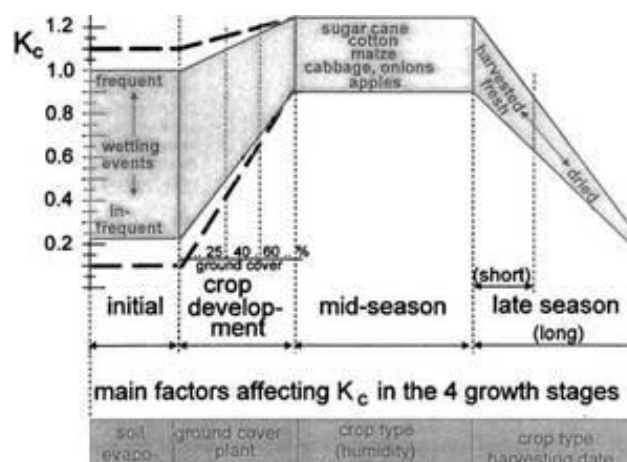


Figura 4 - Alcances típicos esperados no  $K_c$  para os quatro estádios de crescimento.

Fonte: FAO, 2006.

## 2.5. Cana-de-açúcar no Rio Grande do Sul

No Rio Grande do Sul, o cultivo da cana-de-açúcar foi introduzido em 1725, nos municípios de Torres, Osório e Santo Antônio da Patrulha. Hoje, metade da produção de cana-de-açúcar no RS concentra-se na região Noroeste, nas Missões e Médio Alto Uruguai, sendo os maiores produtores os municípios de Roque Gonzáles e Porto Xavier (SEPLAG, 2010). Em relação à produção nacional, o Rio Grande do Sul foi responsável por 48,5 mil toneladas na safra de 2009/2010, com uma produtividade de  $46.826 \text{ kg ha}^{-1}$  em uma área de aproximadamente 1,04 mil ha (CONAB, 2014). O cultivo de cana-de-açúcar no Rio Grande do Sul está mais voltado a atender as demandas da agricultura familiar visando alimentação animal e agroindústrias de subprodutos da cana-de-açúcar. De acordo com o zoneamento agroclimático (Figura 5) atualizado para a cultura da cana-de-açúcar no RS, a cultura pode ser uma alternativa viável para o Estado, sendo que não há restrições de solo e clima que possam restringir o cultivo desta gramínea nos municípios listados no documento (MALUF, 2008).

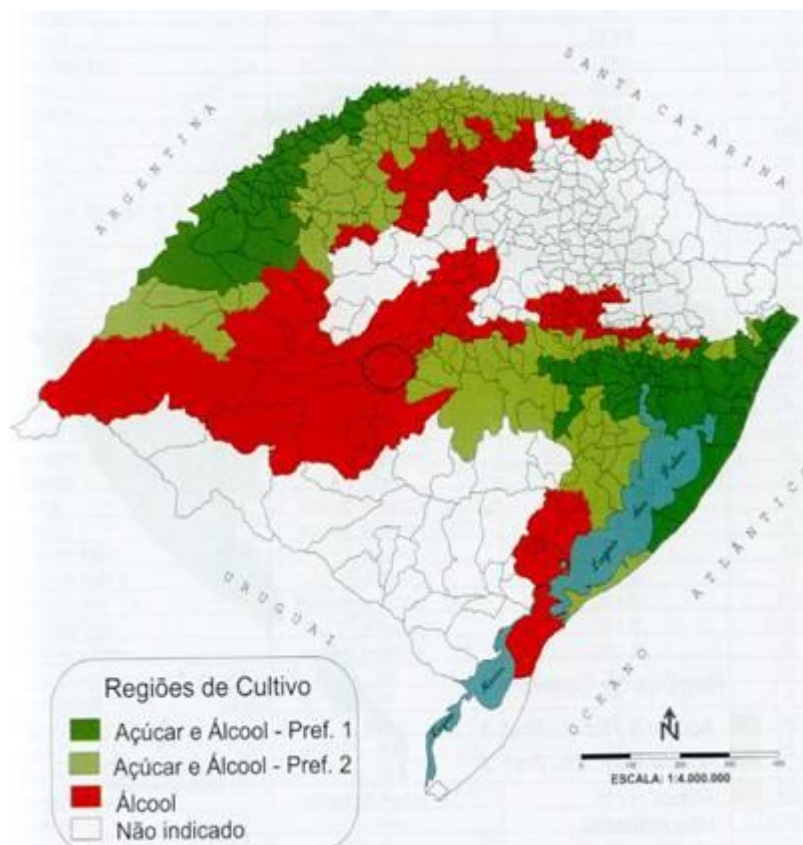


Figura 5 - Zoneamento agroclimático para a cultura da cana-de-açúcar no Estado do Rio Grande do Sul, visando à produção de açúcar e álcool.

Fonte: MALUF, 2008.

Há a possibilidade de ampliação do cultivo de cana-de-açúcar nas pequenas e médias propriedades gaúchas, sendo que investimentos em destilarias como a Cooperativa dos Produtores de Cana de Porto Xavier (Coopercana) já estão sendo feitos. O cultivo de cana-de-açúcar no Rio Grande do Sul dá a oportunidade para intensificar pesquisas com a cultura, especialmente no modo que se refere a caracterizar seu crescimento e desenvolvimento nas diferentes regiões, como por exemplo, a região Central do Rio Grande do Sul, já que estudos básicos são escassos e são importantes para definição de práticas de manejo visando altas produtividades em regiões subtropicais (STRECK, 2010).

Quanto ao manejo a cana-de-açúcar é dividida cana-planta e cana-soca. Define-se como cana-planta a cana que foi plantada e sofre o primeiro corte. Cana-soca é a denominação dada à cana a partir do primeiro corte. Quando a cana-de-açúcar é plantada no início de cada ano, cresce inicialmente sob condições de baixa umidade no solo e baixas temperaturas, será colhida após dezoito meses, esse

sistema de cultivo é denominado “cana-planta de ano e meio”. Após o primeiro corte (primeira colheita), nos dois sistemas anteriores as plantas são colhidas, aproximadamente, após um ano e a partir de então o sistema passa a ser denominado de “cana-soca” (KUVA, 1999). Após seu primeiro corte o sistema de cultivo também pode ser denominado de soqueira, como por exemplo, terceira soqueira (quarto corte), quarta soqueira (quinto corte) (WEBER, 2001). A cana-de-açúcar por ser uma planta perene, pode produzir economicamente entre quatro a seis anos (TOWNSEND, 2002).

Os principais componentes climáticos que controlam o crescimento, a produção e qualidade da cana são temperatura e umidade do ar. O crescimento da cana está intimamente ligado à temperatura, tendo relação com o nível de sacarose e até inibindo a brotação (no caso de temperatura do ar muito baixa). A deficiência hídrica do solo afeta a produtividade da cana, que quando não satisfatória, pode acarretar em um baixo desenvolvimento das raízes e baixo perfilhamento, resultando, portanto num baixo aproveitamento da água e nutrientes disponíveis (ROJAS; BARBIERI, 1999). Leite (2009) afirma que o clima do país permite o cultivo de cana-de-açúcar a altos rendimentos com pouca ou nenhuma irrigação.

O termo estresse hídrico geralmente é definido como um fator externo, que exerce uma influência desvantajosa sobre a planta, este conceito está intimamente relacionado ao de tolerância ao estresse, que é a aptidão da planta para enfrentar um ambiente desfavorável (TAIZ; ZEIGER, 2004).

Logo, deficiência hídrica pode ser definida como todo o conteúdo de água de um tecido ou célula que está abaixo do conteúdo de água mais alto exibido no estado de maior hidratação (TAIZ; ZEIGER, 2004). A deficiência hídrica é um dos fatores de estresse que causa maiores danos nos processos fisiológicos e metabólicos das plantas, acarretando em reduções na produtividade (PIMENTEL, 2004; TAIZ; ZEIGER, 2004). Esta diferença é observada por meio do valor do potencial de água ideal para as plantas, e ocorre mesmo dentro de uma espécie, entre variedades. Além disto, o estágio de desenvolvimento da planta em que ocorre o estresse também é crítico para a produtividade agrícola (PIMENTEL, 2004; INMAM-BAMBER; SMITH, 2005).

Magalhães (1987) cita que dos fatores ambientais é a temperatura, provavelmente, o de maior significância para o desempenho da cana. Temperaturas altas, geralmente, são bem toleradas pela cultura, desde que haja irrigação, ou umidade no solo. Porém, nas temperaturas baixas (menores que 21° C) a cultura

sofre diminuição na taxa de alongamento dos colmos e acúmulo de sacarose. Gheller (1999), citando Arias (1986) e Alexander (1973) escreve que os canavicultores perceberam que para o acúmulo de mais açúcar, as plantas de cana-de-açúcar deveriam retardar seu ritmo de crescimento, o que geralmente ocorria em condições naturais específicas de combinação de temperatura ambiente e umidade do solo. E, descreve que o processo de maturação fisiológica da cana-de-açúcar consiste em frear a taxa de desenvolvimento vegetativo, porém, sem afetar significativamente o processo fotossintético, de maneira que haja maior saldo de produtos fotossintetizados e transformados em açúcares para armazenamento nos tecidos da planta.

Castro (1999) Classifica os fatores de produção vegetal que afetam direta e indiretamente os processos fisiológicos das plantas de acordo com o esquema demonstrado na figura 6, a seguir:

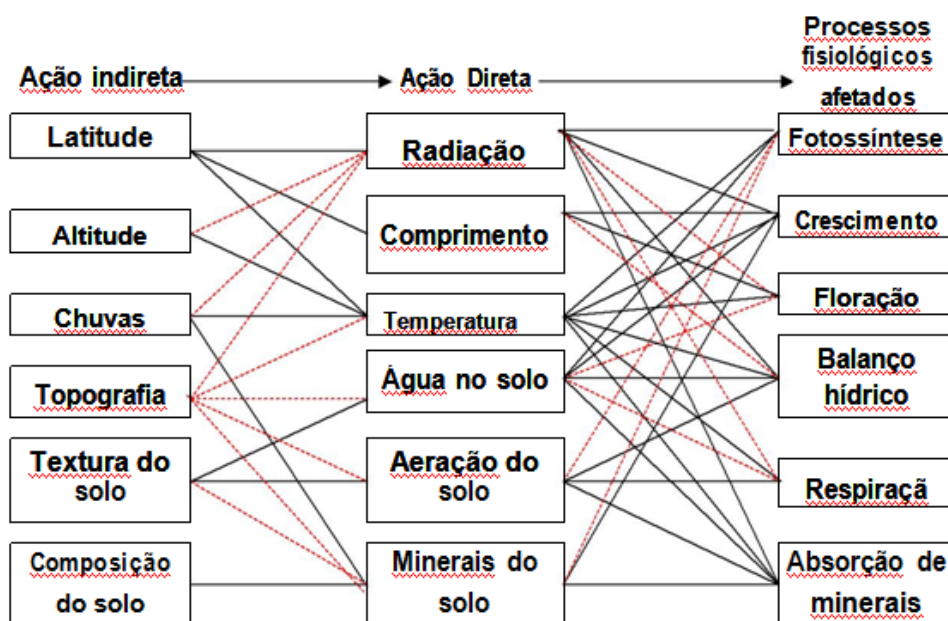


Figura 6 - Classificação dos fatores de produção vegetal que afetam direta e indiretamente os processos fisiológicos das plantas. Linhas cheias correspondem a uma ação mais efetiva do que as linhas interrompidas.

Fonte: CASTRO, 1999.



## Materiais e métodos

Para este trabalho foram consideradas seis cidades (Figura 7), sendo cada uma representativa de uma região do RS, da seguinte forma: Pelotas (Região Sul), Uruguiana (Região Sudoeste), Santa Maria (Região Central), São Luiz Gonzaga (Região Centro-Oeste), Iraí (Região Norte) e Bom Jesus (Região Nordeste). A distribuição espacial das seis estações meteorológicas é mostrada na figura 7 e na tabela 1.

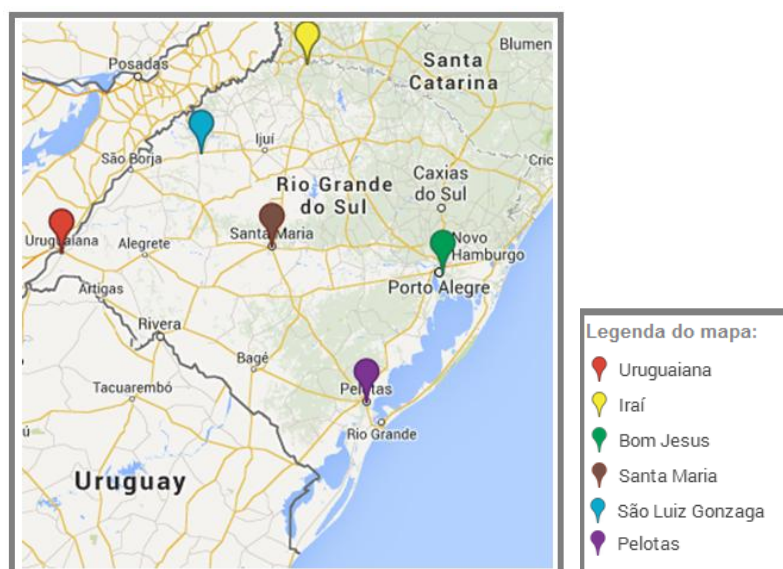


Figura 7- Localização das seis cidades utilizadas no estudo.

Fonte: GOOGLE MAPS, 2014.

Tabela 1- Coordenadas geográficas e altitude das Estações Meteorológicas utilizadas neste estudo.

<b>Estações</b>	<b>Latitude (°)</b>	<b>Longitude (°)</b>	<b>Altitude (m)</b>
Bom Jesus	28°40'	50°26'	1047
Irai	27°11'	53°14'	247
Santa Maria	29°42'	53°42'	95
São Luiz Gonzaga	28°40'	54°96'	1594,2
Pelotas	31°46'	52°20'	17
Uruguaiana	29°45'	57°05'	66

Com base nessas localidades, foram utilizados dados de precipitação (mm. dia<sup>-1</sup>), temperatura máxima e mínima (°C), umidade relativa (%), vento (m.s<sup>-1</sup>) e radiação solar incidente (Wm<sup>-2</sup>), obtido junto ao BDMEP (Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa) das estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2014), e para as análises do BH climático e sequencial, foram utilizados dos dados do modelo CRU (Climatic Research Unit), para o período de 1975 a 2004.

### 3.1. Estimativas de ETP

Para se determinar as incertezas associadas com as estimativas da ETP foram utilizados onze diferentes métodos para estimar a ETP, em função das diferentes forçantes , apresentados a seguir:

a) Método de Thorthwaite:

Se  $0 < T_a < 26,5^{\circ}\text{C}$

$$\text{ETP} = 16 (10 \text{ Tm}/I)^a \quad (\text{Eq. 1})$$

Se  $T_a \geq 26,5^{\circ}\text{C}$

$$\text{ETP} = -415,85 + 32,24 \text{ Tm} - 0,43 \text{ Tm}^2 \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

$$I = 12 (0,2 T_a)^{1,514}$$

$$a = 0,49239 + 1,7912 \cdot 10^{-2} I - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 6,75 \cdot 10^{-7} I^3$$

$$\text{ETP} = \text{ETp} \cdot \text{COR} \text{ (mm/mês)}$$

$$\text{COR} = N/12 * \text{NDP}/30$$

Sendo:

ETp = Evapotranspiração Potencial (mm/dia)

ETP= valor calculado pela Equação;

Ta = temperatura média anual normal;

I = índice de calor da região;

Ta = temperatura média anual normal;

Tm = temperatura mensal ( $T_i > 0^\circ\text{C}$ );

N = fotoperíodo do mês em questão,

NPD = Dias do período em questão.

b) Método de Romanenko:

$$\text{ETP} = 0,0018 * (25 + T_m)^2 * (100 - \text{UR}) \quad (\text{Eq. 3})$$

Sendo:

ETP = Evapotranspiração Potencial (mm/dia)

Tm= temperatura média mensal ( $^\circ\text{C}$ )

UR= umidade relativa do ar (%)

c) Método de Turc:

UR < 50%

$$a_t = 1 + ((50 - \text{UR}) / 70) \quad (\text{Eq. 4})$$

UR  $\geq$  50%

$$a_t = 1 \quad (\text{Eq. 5})$$

$$\text{ETP} = a_t * 0013 * [T_m / (T_m + 15)] * \{ [R_s / (0,02388 + 50)] / \lambda \} \quad (\text{Eq. 6})$$

Sendo:

a<sub>t</sub>= fator de umidade relativa

UR= umidade relativa do ar média mensal (%)

Tm= temperatura média mensal do ar ( $^\circ\text{C}$ )

ETP= evapotranspiração potencial (mm/dia)

R<sub>s</sub>= radiação solar total ( $\text{cal}/\text{cm}^2 \times \text{dia}$ )

d) Método de Thornthwaite & Camargo:

$(0 \leq T_{ef} < 26,5^\circ\text{C})$

$$ET_p = 16(10 \times T_{ef}/I)^a \quad (\text{Eq. 7})$$

$(T_{ef} \geq 26,5^\circ\text{C})$

$$ET_p = -415,85 + 32,24 T_{ef} - 0,43 T_{ef}^2 \quad (\text{Eq. 8})$$

Onde:

$$T_{ef} = 0,36 (3 T_{max} - T_{min})$$

$$I = 12 (0,2 T_a)^{1,514}$$

$T_a$  = temp. média anual normal

$$a = 0,49239 + 1,7912 \cdot 10^{-2} I - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 6,75 \cdot 10^{-7} I^3$$

$$ETP = ET_p * COR \text{ (mm/mês)} \quad (\text{Eq. 9})$$

Sendo:

$$COR = N/12 * NDP/30$$

$N$  = fotoperíodo do mês em questão

$NDP$  = dias do período em questão

e) Método de Linacre:

$$ET_p = \{[(T_m + 0,006 h) / (100 - f)] + 15(T_m - T_d)\} / (80 - T_m) \quad (\text{Eq. 10})$$

$$ETP = ET_p * NDP \quad (\text{Eq. 11})$$

Sendo:

$ETP$  = evapotranspiração potencial (mm/mês)

$T_m$  = temperatura média do ar ( $^\circ\text{C}$ )

$h$  = altitude (m)

$f$  = latitude ( $^\circ$ )

$T_d$  = temperatura do ponto de orvalho ( $^\circ\text{C}$ )

NDP = dias do período em questão

Para simplificar o cálculo de Td

$$(T - T_d) = 0,0023 h + 0,37 T + 0,53 (T_{\max} - T_{\min}) + 0,35 R - 10,9 \quad (\text{Eq. 12})$$

Onde:

T<sub>mim</sub> = temperatura mínima

T<sub>max</sub> = temperatura máxima

R = T<sub>min</sub> do mês mais quente

f) Método de Camargo:

$$ETP = 0,01 * Ra * T_m * NDP \quad (\text{Eq. 13})$$

Onde:

ETP = evapotranspiração potencial (mm/mês)

Ra = radiação solar extraterrestre (mm/d)

T<sub>m</sub> = Temperatura média (°C)

NDP = Número de dias do período

g) Método de Jensen-Haise.

$$ETP = [R_s (0,0252 T_m + 0,78)] * NDP \quad (\text{Eq. 14})$$

Onde:

ETP = evapotranspiração potencial (mm/dia)

R<sub>s</sub> = radiação global (mm/dia)

T<sub>m</sub> = temperatura média do ar (°C)

NDP = Número de dias do período

h) Método Hargreaves & Samani:.

$$ETP = 0,0023 * Ra * (T_{\max} - T_{\min})^{0,5} * (17,8 + T_m) * NDP \quad (\text{Eq. 15})$$

Onde:

ETP = evapotranspiração potencial (mm/dia)

Ra = irradiância solar extraterrestre (mm/d)

Tm = temperatura média (°C)

Tmin = temperatura mínima (°C)

Tmax = temperatura máxima (°C)

NDP = número de dias do período

i) Método de Penman (EToPE):

$$ETP = \{[(W * R_n) / 2,45] + [(1 - W) * E_a]\} * NDP \quad (\text{Eq. 16})$$

Sendo:

$$W = \Delta / (\Delta + \gamma)$$

$$\Delta = (4098 * E_s) / (T_m + 273,2)^2$$

$$\gamma = 0,000664742 * (P/10)$$

$$E_a = f(U) * DPV$$

$$f(U) = m * (a + b * U_2)$$

$$m = 6,43 \text{ MJm}^{-2}\text{d}^{-1}\text{kPa}$$

$$a = 1$$

$$b = 0,526 \text{ sm}^{-1}$$

$$E_a = E_s * (UR/100)$$

Onde:

ETP = evapotranspiração potencial (mm/dia)

W = fator de ponderação

Rn = saldo de radiação

Es = pressão de vapor de saturação

Ea = pressão de vapor atual

$\Delta$  = inclinação da curva de pressão de saturação, vapor e temperatura do ar

$\gamma$  = constante psicrométrica

Tm = temperatura média

P = pressão

DPV = déficit do vapor de saturação

NDP = número de dias do período

j) Método do Priestley-Taylor:

$$ETP = \{[(0,57 * W) * (Rn - G)] / 2,45\} * NDP \quad (\text{Eq. 17})$$

Sendo:

$$W = 0,407 + 0,0145 T \quad (\text{para } 0^\circ\text{C} < T < 16^\circ\text{C})$$

$$W = 0,483 + 0,01 T \quad (\text{para } T > 16^\circ\text{C})$$

$$\lambda = 2,45 \text{ MJ/kg}$$

Onde:

ETP = evapotranspiração potencial (mm/dia)

W = fator de ponderação

Rn = saldo de radiação (MJ/m<sup>2</sup>d)

G = Fluxo de calor no solo = 0,03 Rn (MJ/m<sup>2</sup>d)

NDP = número de dias do período

k) Método de Penman-Monteith (PM):

$$ETP = \{[(0,408 * \Delta) * (Rn - G)] + [\gamma * 900 / (T + 273) * U^2 * \Delta E]\} / [\Delta + \gamma * (1 + 0,34 * U^2)] \quad (\text{Eq. 18})$$

Sendo:

G = Fluxo de calor no solo = 0,03 Rn (MJ/m<sup>2</sup>d)

$\Delta E = E_s - E_a$

$$E_s = 0,611 * 10^{[(7,5 * T) / (237,3 + T)]}$$

$$E_a = (UR_{med} * e_s) / 100$$

$$UR_{med} = (UR_{max} + UR_{min}) / 2$$

$$T = (T_{max} + T_{min}) / 2$$

$$r_s = 70 \text{ s/m}$$

Onde:

ETP = evapotranspiração potencial (mm/dia)

$\Delta$  = inclinação da curva de pressão de saturação, vapor e temperatura do ar

$R_n$  = saldo de radiação ( $\text{MJ}/\text{m}^2\text{d}$ )

$G$  = Fluxo de calor no solo =  $0,03 R_n$  ( $\text{MJ}/\text{m}^2\text{d}$ )

$Y$  = constante psicrométrica

$T_m$  = temperatura média

$U$  = vento

$R_n$  = saldo de radiação

$E_s$  = pressão de vapor de saturação

$E_a$  = pressão de vapor atual

Com base nos dados do INMET, calculou-se a ETP média mensal para as diferentes localidades do RS, de 30 anos (1975 a 2004). Para comparação entre as estimativas de ETP, foi considerado como indicador de desempenho o Erro Médio Absoluto (EMA), obtido entre os vários métodos de ETP, calculados para cada mês de cada ano, e os valores obtidos pelo Método de Penman-Monteith, que foi adotado como valor de referência por ser o método indicado pela FAO.

### 3.2. Balanço Hídrico

Para obtenção do balanço hídrico climático, em bases mensais foi aplicado o método de Thornthwaite e Mather (T&M) (1955), que tem como finalidade monitorar a variação do armazenamento de água no solo, através da contabilização do suprimento natural de água ao solo, pela chuva ( $P$ ), e da demanda atmosférica, pela evapotranspiração potencial (ETP), e com um nível máximo de armazenamento ou capacidade de água disponível (CAD). As forçantes atmosféricas do modelo são a precipitação pluviométrica, ETP e o CAD. As principais variáveis de saída do modelo são a evapotranspiração real (ETR), a deficiência hídrica (DEF), o excedente hídrico (EXC) e o armazenamento de água no solo (ARM).

- i. O método de T&M, leva em consideração dois períodos distintos, com base na demanda hídrica ( $P-ETP$ ): Se  $P-ETP \geq 0$  (período de reposição de água no solo) esse valor deve ser somado ao ARM do período anterior e em função desse novo valor de ARM:

$$ARM_i = ARM_{i-1} + (P-ETP)_i \quad (\text{Eq.19})$$



E, o negativo acumulado (NAc), definido como o somatório da sequência de valores negativos de P - ETP, é calculado da seguinte forma:

$$\text{NAc} = \text{CAD} * \text{Ln ARM/CAD} \quad (\text{Eq.20})$$

- ii. Se P-ETP < 0 (período de retirada de água no solo) Sempre que houver valor de (P-ETP)<0, esse valor deve ser acumulado e em função dele se calcula o ARM, usando-se a seguinte expressão:

$$\text{ARM} = \text{CAD} * e^{-|\text{NAc}/\text{CAD}|} \quad (\text{Eq.21})$$

$$\text{Neg.Ac.}_i = \text{Neg.Ac.}_{i-1} + (\text{P-ETP})_i \quad (\text{Eq.22})$$

Os outros componentes do BH de T&M são:

Alteração de água armazenada no solo (ALT) que é obtida pela diferença entre o ARM do mês em questão e o ARM do mês anterior.

$$\text{ALT}_i = \text{ARM}_i - \text{ARM}_{i-1} \quad (\text{Eq.23})$$

A ETR, que representa a evapotranspiração real, aquela que realmente ocorre em função da disponibilidade de água no solo. Que leva em consideração duas situações distintas:

- quando P - ETP = 0  $\Rightarrow$  ETR = ETP. (Eq.24)

- quando ALT = 0  $\Rightarrow$  ETR = P + |ALT|. (Eq.25)

A deficiência hídrica (DEF), que é a falta de água no solo, sendo calculada por:

$$\text{DEF} = \text{ETP} - \text{ETR} \quad (\text{Eq.26})$$

Excedente hídrico (EXC), que é a quantidade de água que sobra no período chuvoso e se perde do volume de controle por percolação (drenagem profunda) e/ou escoamento superficial. Onde são consideradas duas situações:

- quando ARM < CAD  $\Rightarrow$  EXC = 0, (Eq.27)

- quando ARM = CAD  $\Rightarrow$  EXC = (P-ETP) - ALT. (Eq.28)

Para este trabalho, considerou-se o tipo de solo para todas as localidades como sendo o mesmo, tipo de solo 2, que são solos de textura média, com teor

mínimo de 15% de argila e menor do que 35%, nos quais diferença entre o percentual de areia e o percentual de argila seja menor do que 50, com o CAD de 50mm (MAPA, 2014).

O BH climatológico (BHC) foi calculado para cada uma das cidades e, considerando quatro diferentes métodos de ETP, selecionados com base nos diferentes conjuntos de dados considerados, sendo eles: Thornthwaite, Thornthwaite&Camargo, Hargreaves&Samani e Penman-Monteith. Embora tenham sido avaliados onze diferentes métodos, esses quatro foram escolhidos por englobarem desde a formulação baseada apenas na temperatura, como a mais complexa e indicada pela FAO.

Além da BHC, foi calculado o BH sequencial (BHS), para os 30 anos, de 1975 a 2004. Para isso, foram consideradas duas situações uma com a cultura da cana-de-açúcar, e a outra sem a cultura. Desta forma, calculou-se, para o BHS da cultura, a ETC para a cana-de-açúcar, também considerando os quatro métodos de ETP citados acima. Onde:

$$ETC = K_c * ETP \quad (\text{Eq.29})$$

O valor do  $K_c$  utilizado foi o definido por Doorernbos e Kassam (1979), conforme apresentado na tabela 2.

Tabela 2 – Valores de  $K_c$  para cana-de-açúcar.

<b>Período de desenvolvimento</b>	<b>Dias do ciclo</b>	<b>Coefficiente de cultura <math>K_c</math></b>
Do plantio até 0,25 de cobertura	30 - 60	0,40 - 0,60
De 0,25 a 0,50 de cobertura	30 - 40	0,75 - 0,85
De 0,50 a 0,75 de cobertura	15 - 25	0,90 - 1,00
De 0,75 à cobertura completa	45 - 55	1,00 - 1,20
Utilização máxima	180 - 330	1,05 - 1,30
Início da senescência	30 - 150	0,80 - 1,05
Maturação	30 - 60	0,60 - 0,75

Fonte: Doorernbos e Kassam (1979).

De acordo com a tabela 2, foi ajustado os coeficientes  $K_c$  selecionados para cada mês durante o ciclo da cana-de-açúcar no RS (Tabela 3).

Tabela 3- Valores de Kc ajustados para cada mês do cultivo da cana-de-açúcar.

Meses	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago
Kc	0,4	0,61	0,82	1,04	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1.08	0,92	0,75

## Resultados e Discussões

### 4.1. Comparação das estimativas de ETP

Pela análise sazonal das estimativas de ETP, para as seis regiões do RS (Figura 8), observou-se que todos os métodos analisados apresentam variação sazonal da ETP bem definida, com exceção do método de Linacre, que apresenta valor praticamente constante ao longo do ano em todas as regiões. Comparando o comportamento dos diferentes métodos dentro de cada cidade (Figura 8 a a f), nota-se que em todas os valores mais altos de ETP foram estimados pelo método de Jensen-Haise (J&H), nos meses mais quentes (novembro à março), e nos meses mais frios pelo de Hargreaves-Samani (H&S) (abril à outubro).

Isso pode estar ligado ao fato do método de J&H ser função apenas da radiação global e da temperatura média, já o método de H&S, inclui a variação entre temperatura máxima e mínima, o que pode gerar os maiores valores no inverno. Já os menores valores de ETP foram sempre os estimados pelo método de Priestley-Taylor (P&T), que considera o saldo de radiação, e não só a radiação solar global, além de temperatura média e fluxo de calor no solo.

Entre as cidades, observou-se que as regiões de Iraí (Figura 8b), Pelotas (Figura 8c), São Luíz Gonzaga (Figura 8d), Santa Maria (Figura 8e) e Uruguaiana (Figura 8e), apresentam sazonalidade bem definida em todos os métodos. A cidade de Bom Jesus (Figura 8a) é a que apresenta menores valores e menor variação sazonal da ETP.

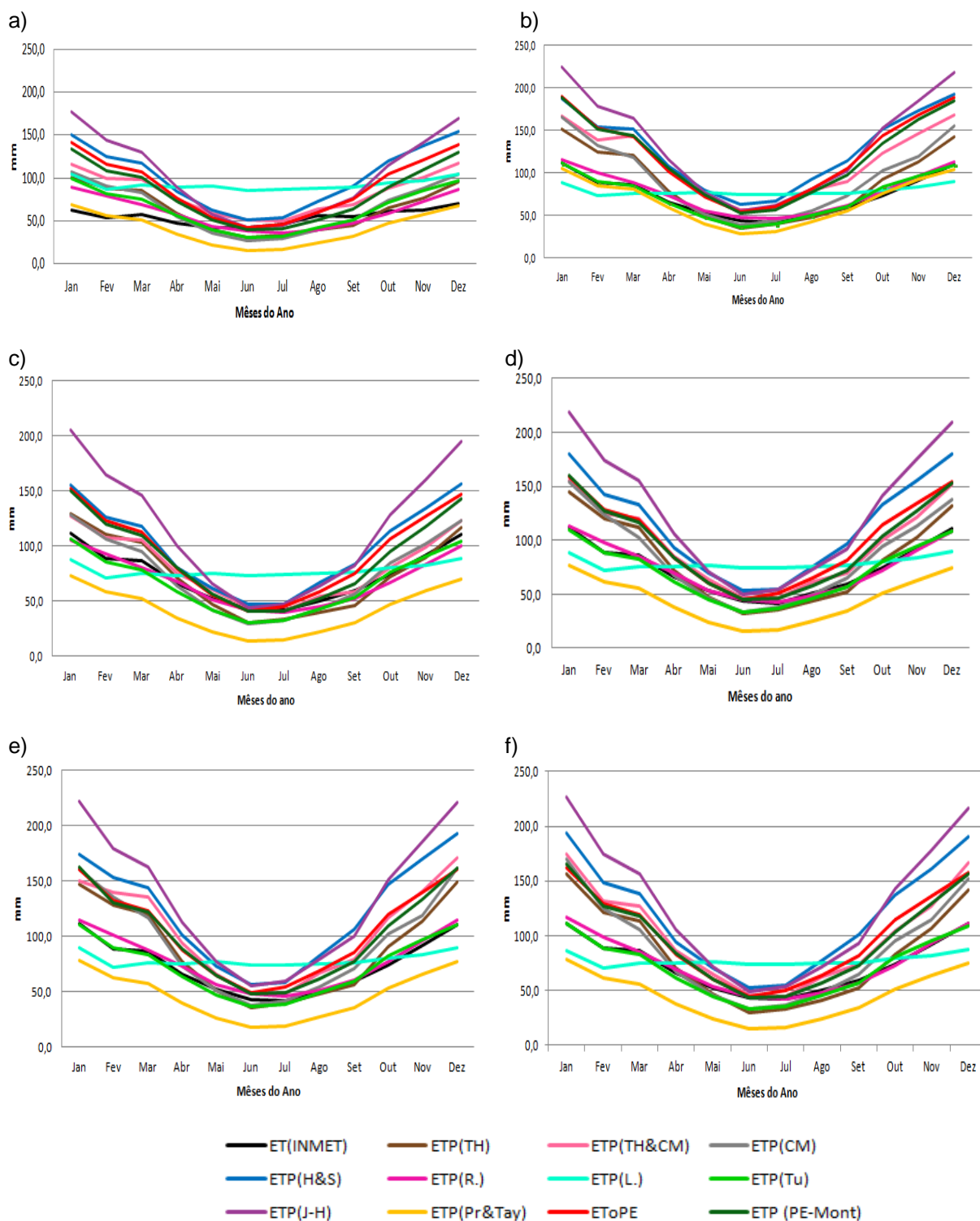


Figura 8 - Estimativas de evapotranspiração para as cidades de (a) Bom Jesus, (b) Iraí, (c) Pelotas, (d) São Luiz Gonzaga, (e) Santa Maria e (f) Uruguaiiana pelos métodos de: Thornthwaite (TH), Thornthwaite&Camargo (TH&CM), Camargo (CM), Hargreaves&Samani (H&S), Romanenko (R.), Linacre (L.), Turc (Tu), Jensen-haise (J-H), Priestley-Taylor (Pr&Tay), Penman (PE) e Penman-Monteith (PE&Mont).

Analisando as comparações entre os métodos com o de PM, o percentual do EMA, considerando o resultado de todos os modelos, foram de aproximadamente 22,98%, variando entre 5,86% e 144,26%, em Iraí pelo H&S e Linacre, respectivamente (Tabela 4). O método de Thornthwaite e Camargo (Th&C) foi o que apresentou menor EMA médio (8,31%) e, o que apresentou maior EMA médio foi o de Priestley-Taylor (Pr&Tay) (58,46%), o que indica que o Th&C aproxima-se mais do método de PM do que os outros, e o que tem maior variação é o de Pr&Tay (Tabela 4). Em relação às diferentes localidades estudadas, o método que mais se aproximou do PM foi o método de Thornthwaite e Camargo apresentando um melhor desempenho em quatro de seis estações (Tabela 4).

Tabela 4 – Valores de erro médio absoluto (%) de cada método em relação ao método de Penman-Monteith, para Uruguaiana (URU), Bom Jesus (BJ), Pelotas (PEL), Santa Maria (SM), Iraí (IRAI) e São Luís Gonzaga (SLG).

Cidades	EMA (%)									
	ETP (TH)	ETP (TH&CM)	ETP (CM)	ETP (H&S)	ETP (R.)	ETP (L.)	ETP (Tu)	ETP (J-H)	ETP (Pr&Tay)	ETP (EToPE)
URU	22,48	8,14	17,68	8,19	11,21	31,01	36,40	18,04	60,27	14,37
BJ	19,46	6,45	17,63	18,70	30,42	33,29	22,04	30,52	49,17	13,62
PEL	20,55	11,73	18,31	9,80	18,06	33,18	29,88	24,23	56,42	7,16
SM	21,32	8,27	18,28	10,19	16,50	32,03	32,04	22,53	57,44	7,19
IRAI	33,38	15,11	29,30	5,86	130,50	144,26	22,84	12,40	60,93	30,60
SLG	11,55	8,34	17,14	7,07	12,45	31,01	36,18	18,83	59,48	11,74
<b>Média</b>	20,94	8,31	17,98	9,00	17,28	32,61	30,96	20,68	58,46	12,68
<b>Média Geral</b>	22,98									

## 4.2. Balanço Hídrico Climatológico

O balanço hídrico climatológico, que foi calculado com base em quatro diferentes métodos de estimativa de ETP: Thornthwaite&Camargo, Hargreaves&Samani, Thornthwaite e Penman-Monteith, que foram escolhidos por englobarem diferentes variáveis em suas formulações, é apresentado nas figuras 9 a 14. Pode-se observar que cada método de ETP apresentou diferentes resultados para as componentes do BH, nas diversas cidades. A cidade de Bom Jesus (Figura 9) apresentou excedente hídrico (EXC) em todos os meses, com déficit (DEF) nos

meses de janeiro e dezembro pelo método de Penman-Monteith, que considera o transporte de vapor d'água da superfície para a atmosfera.

A cidade de Irai (Figura 10) apresentou DEF nos meses de janeiro e dezembro por todos os métodos, com maior estimativa pelos métodos Hargreaves&Samani (Figura 10c) e Penman-Monteith (Figura 10d). O DEF foi encontrado para o mesmo período de dezembro e janeiro para as cidades de Santa Maria (Figura 12), São Luiz Gonzaga (Figura 13) e Pelotas (Figura 11), mas que apresentou DEF também nos meses de abril a setembro pelo método de Hargreaves-Samani (Figura 11c). Uruguaiana (Figura 14) além de apresentar DEF em janeiro e dezembro em todos os métodos, pelo método de Hargreaves-Samani ocorreu DEF em fevereiro e em agosto (Figura 14c).

A partir das análises de BH, considerando a ETP calculada por diversos métodos (Figura 9 a 14), observou-se que nos meses mais quentes (DJFM) foram registrados menores volumes de excedente hídrico e a maior parte dos déficits hídricos. A cidade de Pelotas, no Sul do RS, destacou-se pelos menores valores de excedente hídrico ao longo de todo o ano (Figura 11). Já Santa Maria (Figura 12), apresentou altos índices pluviométricos e alta demanda evaporativa, superior à precipitação nos meses de janeiro e dezembro, causando déficit hídrico durante esses meses segundo alguns métodos. Por outro lado, os maiores volumes hídricos excedentes (em torno de 100 mm) estão concentrados na região nordeste do RS, especialmente nas cidades de São Luiz Gonzaga (Figura 13) e Uruguaiana (Figura 14). As regiões sul e noroeste do RS foram as que apresentaram os menores e os maiores valores de excesso hídrico, respectivamente.

O período frio (JAS) foi o que apresentou os maiores volumes de excedente hídrico, superiores a 150 mm (Figura 9 a 14). Neste período não há diferenças marcantes no RS com relação aos volumes de excedentes hídricos. Para o período de primavera (OND) também não há diferenças marcantes entre os municípios analisados com relação aos volumes de excedentes hídricos, que foram superiores a 120 mm em alguns meses. Pode-se observar que o comportamento sazonal do regime hídrico da Metade Sul do RS no período estudado foi caracterizado pela ocorrência de déficits e excessos hídricos.

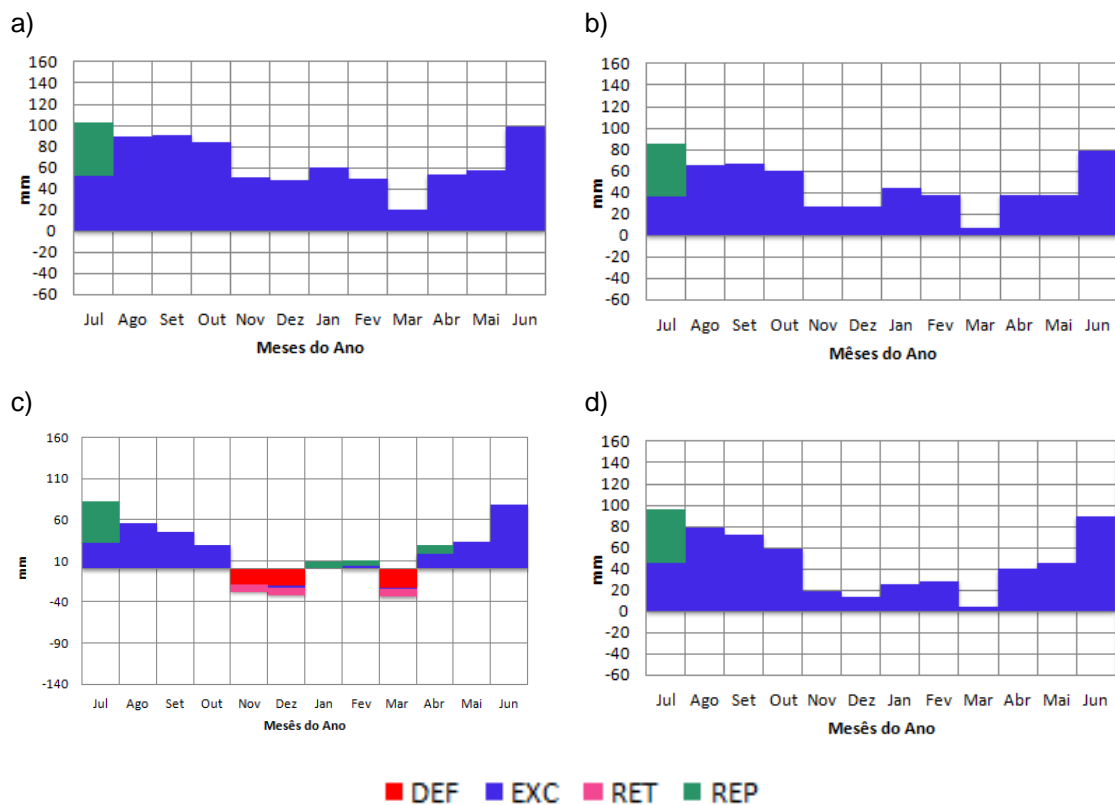


Figura 9- Balanço Hídrico da cidade de Bom Jesus pelos métodos de: Thornthwaite(a), Thornthwaite&Camargo(b), Hargreaves&Samani(c), Penman-Monteith(d).

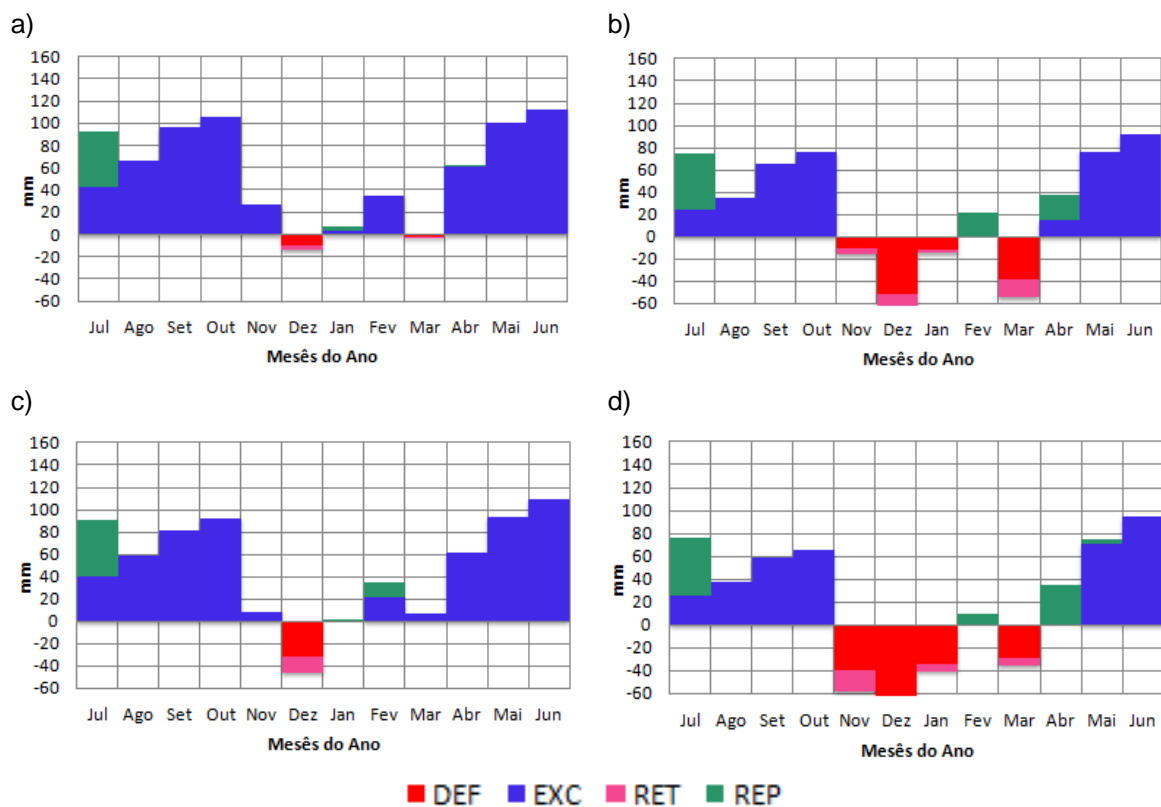


Figura 10- Balanço Hídrico da cidade de Iraí pelos métodos de: Thornthwaite(a), Thornthwaite&Camargo(b), Hargreaves&Samani(c), Penman-Monteith(d).



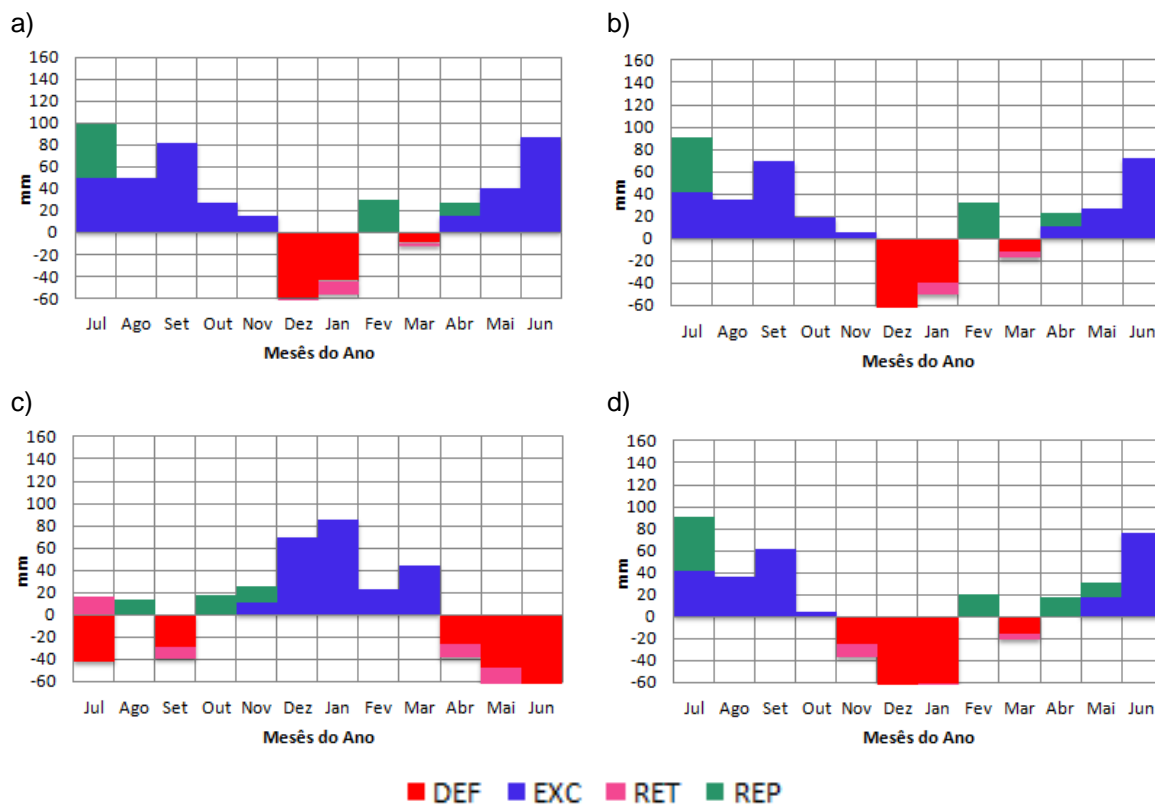


Figura 11- Balanço Hídrico da cidade de Pelotas pelos métodos de: Thornthwaite(a), Thornthwaite&Camargo(b), Hargreaves&Samani(c), Penman-Monteith(d).

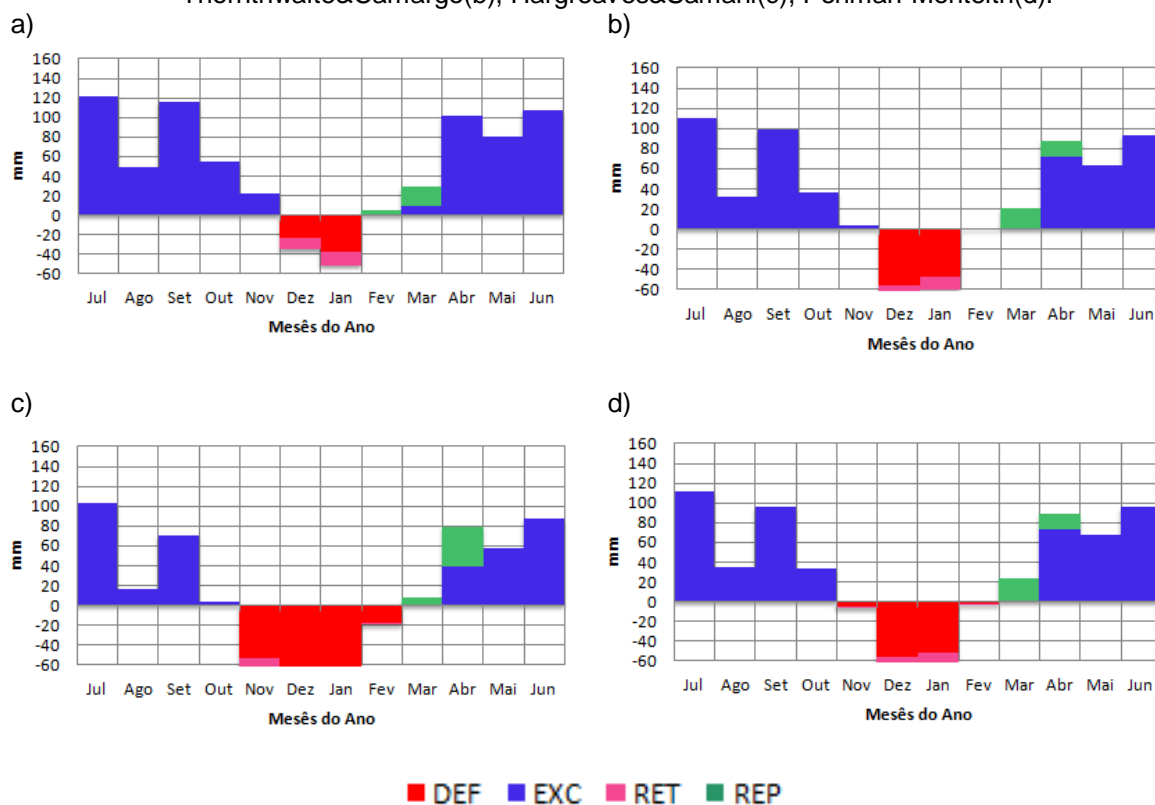


Figura 12- Balanço Hídrico da cidade de Santa Maria pelos métodos de: Thornthwaite(a), Thornthwaite&Camargo(b), Hargreaves&Samani(c), Penman-Monteith(d).

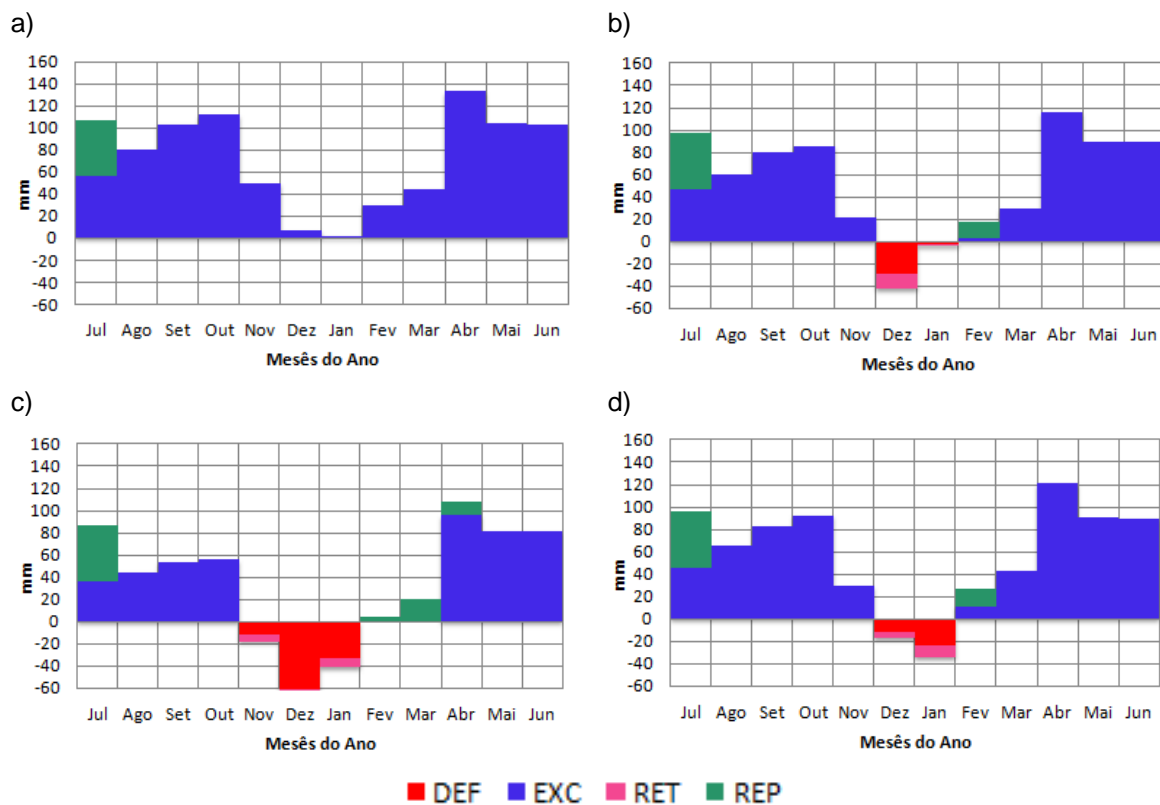


Figura 13- Balanço Hídrico da cidade de São Luiz Gonzaga pelos métodos de: Thornthwaite(a), Thornthwaite&Camargo(b), Hargreaves&Samani(c), Penman-Monteith(d).

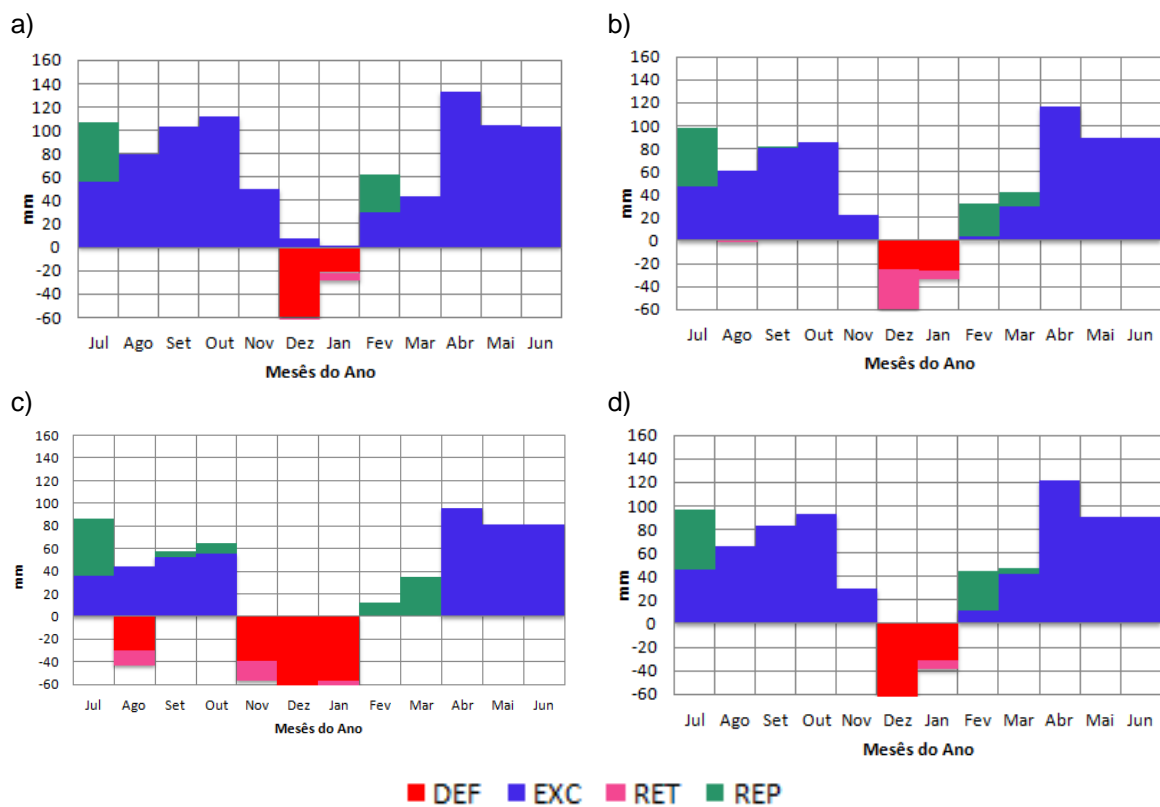


Figura 14- Balanço Hídrico da cidade de Uruguaiiana pelos métodos de: Thornthwaite(a), Thornthwaite&Camargo(b), Hargreaves&Samani(c), Penman-Monteith(d).

### 4.3. Balanço Hídrico Sequencial (BHS)

As análises foram realizadas considerando-se o percentual de ocorrências de deficiência hídrica (DH), a partir do BHS, considerando os métodos de ETP de Thornthwaite&Camargo, Hargreaves&Samani, Thornthwaite e Penman-Monteith, para cada uma das localidades de estudo, com e sem a cultura da cana-de-açúcar. Esses percentuais estão apresentados na tabela 5.

A região que apresentou menor ocorrência de DH foi à de Bom Jesus, localizada na região noroeste do RS, com frequência média de DH (entre os métodos) de 14%, sem considerar a cultura da cana (Tabela 5) e 12% considerando a cultura (Tabela 5).

A região de Irai, localizada na região norte, apresentou valores de 39% sem a cultura (Tabela 5) e 32% com a cultura de cana-de-açúcar (Tabela 5), ou seja, estima-se que em aproximadamente 32% do período ocorra algum nível de restrição hídrica no solo que tem a cultura plantada e 39% sem a cultura.

Pelotas, localizada na região sul, apresentou valores de 31% sem a cultura (Tabela 5) e 36% com a cultura de cana-de-açúcar (Tabela 5). Santa Maria localizada na região central apresentou valores de 29% sem a cultura (Tabela 5) e 27% com a cultura de cana-de-açúcar (Tabela 5). A região de São Luiz Gonzaga, região centro-oeste, apresentou valores de 29,6% sem a cultura (Tabela 5) e 29,4% com a cultura de cana-de-açúcar (Tabela 5).

E, a região de Uruguaiana, sudoeste do estado, apresentou os maiores valores de frequência de DH média (entre os métodos), com 45% sem a cultura (Tabela 5) e 38,8% com a cultura de cana-de-açúcar (Tabela 5). Ou seja, para região da fronteira oeste do estado estima-se que em aproximadamente 38% do período ocorra algum nível de restrição hídrica no solo que tem a cultura plantada e 45% sem a cultura.

Verificou-se também, que o BH utilizando a ETP de PM apresenta menores valores de DH durante todo o período estudado (Tabela 5). Em contrapartida, sem a cana-de-açúcar o método que apresentou menores valores foi o de TH. Verificou-se também que o BH com o uso do método de H&S apresentam valores e frequências mais elevadas da DH para todos os municípios do RS (Tabela 5).

Tabela 5 - Percentual do déficit hídrico.

<b>Deficit Hídrico em %</b>										
	<b>Sem a cultura</b>					<b>Com a cultura</b>				
<b>Cidades</b>	TH	H&S	TH&CM	PM	Média	TH	H&S	TH&CM	PM	Média
Bom Jesus	6,64	20,28	12,78	16,11	13,95	9,44	20,28	14,17	1,11	11,25
Iraí	25,28	42,22	36,11	41,67	36,32	27,78	41,39	37,22	19,44	31,46
Pelotas	25,83	38,6	30,28	32,78	31,87	26,11	39,44	33,89	38,06	34,38
Santa Maria	29,06	32,78	26,94	28,89	29,42	24,72	35,56	29,17	12,76	25,55
São Luiz	25,28	30,56	30,28	28,89	28,75	27,78	32,5	31,11	13,61	26,25
Uruguiana	32,5	52,78	43,33	47,78	44,10	32,78	48,33	43,33	28,06	38,13
Média geral	30,73					27,83				

## **Conclusão**

Existe diferença entre os modelos de estimativa da ETP. O método de Thorthwaite e Camargo, tem o melhor desempenho em quatro de seis estações, sendo o que mais se aproxima das estimativas pelo método de PM, que é o recomendado pela FAO para casos de zoneamento agrícola. O que simplifica a estimativa de ETP para as localidades estudadas uma vez que o método de Th&CM depende apenas da temperatura efetiva do local.

Todas as regiões do RS, apresentam tanto períodos de excesso como de déficit hídrico. Sendo que alguns métodos indicam a ocorrência de deficiência hídrica nos meses de dezembro e janeiro, principalmente nos municípios mais ao sul do estado.

As regiões apresentaram menor/maior ocorrência de DH foram as dos municípios de Bom Jesus/Uruguaiana, localizada nas regiões noroeste/sudoeste, ou seja para região da fronteira oeste do estado estima-se que em aproximadamente 38% do período ocorre algum nível de restrição hídrica considerando a cultura da cana-de-açúcar.

Verificou-se também que o BH utilizando a ETP de PM apresenta menores valores de DH durante todo o período estudado. Em contrapartida, o BH com o uso do método de H&S apresentam valores e frequências mais elevadas da DH para todos os municípios do RS.

## Referências

- AGUILAR, D. J.; KRUKER, R. J. M.; CALHEIROS, R. O.; et al. **Determinação da evapotranspiração potencial e balanço hídrico de região da Grande Dourados**. Dourados : EMBRAPA – UEPAE, p. 150, 1986.
- ALEXANDER, A.G. **Sugarcane physiology**. Amsterdam: Elsevier, p. 752, 1973.
- ALMEIDA, T.S.; CALIJURI, M.L.; PINTO, L.B. Zoneamento agro-climático da cana-de-açúcar para o estado de Minas Gerais com base em regressões múltiplas. **Revista Brasileira Meteorologia**, v. 28, n. 3, p. 352-355, 2013.
- AMORIM NETO, M. S. **Balanço hídrico segundo Thornthwaite & Mather**. Petrolina: EMBRAPA-CPATSA, 1989. 18 p. (EMBRAPA-CPATSA. Comunicado Técnico, 34).
- ANDRADE, C.L.T.; PAIXÃO, J.S.; STEIDLE NETO, A.J.; AMARAL, T.A.; PIMENTA, F.M.; GARCIA Y GARCIA, A.; MARIN, F.R.; SILVA, D.F. **Uma metodologia alternativa para o zoneamento de risco climático da cultura do milho**. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 2013. 48p, v.87.
- ARIAS, E. R. A. **Teste de escala conjunta na estimação de parâmetros genéticos em soja** (*Glycine max(L.) Merrill*). 1986. 86 f. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1986.
- ARYA, S. P. **Introduction to micrometeorology**. New York: Academic Press, 1988. 307p.
- BERLATO, M. A. As condições de precipitação pluvial no estado do Rio Grande do Sul e os impactos das estiagens na produção agrícola. In: Bergamaschi, H.; Berlato, M. A.; Fontana, D. C.; Cunha, G. R.; Santos, M. L. V. dos; Farias, J. R. B.; Barni, N. A. **Agrometeorologia aplicada à irrigação**, Porto Alegre: UFRGS, 1992. p.11-23.
- BERLATO, M. A.; MOLION, L. C. B. **Evaporação e Evapotranspiração**. Porto Alegre, IPAGRO: Secretaria de Agricultura, RS. Boletim Técnico, nº7, 95p, 1981.
- CAMARGO, A.P.; MARIN, F.R.; SENTELHAS, P.C.; PICINI, A.G. WESTCOT, D.W. Ajuste da equação de Thornthwaite para estimar a evapotranspiração potencial em

climas áridos e superúmidos, com base na amplitude térmica diária. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.7, n.2, p.251-257, 1999.

CAMARGO, M.B.P.; BRUNINI, O.; MIRANDA, M.A.C. Modelo agrometeorológico para estimativa da produtividade para a cultura da soja no Estado de São Paulo. **Bragantia**, v.45, n.2, p. 279-292, 1986.

COSTA, M. B. B. Agricultura moderna e sua crítica: uma saída em relação as vertentes da agricultura alternativa. In: SEMINÁRIO DE PESQUISA EM AGRICULTURA ALTERNATIVA, 1984, Londrina. Anais... Londrina: Fundação Instituto Agrônômico do Paraná (IAPAR), p. 68-91, 1987.

CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento). **Boletim de acompanhamento da safra brasileira de grãos**. v. 1, n.9, 2014.

COSTA J. P. R.; ELOI C. M. A.; MORAES J. C.; Avaliação do comportamento da evapotranspiração em área de floresta tropical úmida da Amazônia. **CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA**, Brasília, v.10. 1998.

CTEC-UFAL. Disponível em: <http://www.ctec.ufal.br/professor/crfj/> CTEC – UFAL.

Doorenbos, J. & Kassam, A.H. Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper .Rome, FAO n.33, 1979.

FAO Irrigation and Drainage Paper (Food and Agriculture Organization of the United Nations). **Crop Evapotranspiration**. n.56, 2006.

FERNANDES, J. D. F. S.; BRAZ, A. F.; MACHADO, L. S. S. X. PIMENTEL, E. S.; FARIAS, A. V. A.; CAMPOS, A. L. P. S. **Refrigeração utilizando pastilhas de efeito peltier**. **Holos**, v. 2, ano 26, 2010.

FISRWG. **Stream Corridor Restoration: Principles, Processes and Practices**. Federal Agencies of US gov't, 1998.

Garcia, O. N., Vargas, W. M., **Climatic Change**, n.38, 1998.

GHELLER, A. C. A. Fatores que afetam o desempenho de maturadores e reguladores de crescimento em cana-de-açúcar. In: Semana da cana-de-açúcar de piracicaba. Piracicaba, **Anais**. Piracicaba: Saccharum, p.16-19, 1999.

GOOGLE MAPS. Mapa do Rio Grande do Sul. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/place/Rio+Grande+do+Sul/@-30.4163413,-53.6677564,6z/data=!4m2!3m1!1s0x9504720c40b45803:0xad9fb3dbaf9f73de>>. Acessado em: 09 jun. 2014.

GROSS, J.A.; REIS, J.T.; SAUSEN, T.M. Avaliação socioeconômica dos municípios afetados pela estiagem no rio grande do sul de 2000 a 2010. Congresso Brasileiro Sobre Desastres Naturais. **Anais**, Rio Claro, SP, 2012.

HARTMANN, D. L. **Global Physical Climatology**. Academic Press. p. 411,1994.

IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA). Sistema IBGE de Recuperação Automática. Tabela 1613 - **Área plantada, área colhida, quantidade produzida e valor da produção da lavoura permanente**. Banco de dados agregados [on-line], 2013. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/tabela/listabl.asp?z=t&c=1613>>. Acesso em: 10 mai 2014.

INMAN-BAMBER, N. G., SMITH, D. M. Water relations in sugarcane and response to wate deficits. **Field Crops Research**, V. 92, p. 185-202, 2005.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <[www.inmet.gov.br/](http://www.inmet.gov.br/)>. Acesso em: 20 abr. 2014.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2013: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

KASHYAP, P. S.; PANDA, R. K. Evaluation of evapotranspiration estimation methods and development of crop-coefficients for potato crop in a sub-humid region. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 50, n. 1, p. 9-25, august, 2001.

KUVA, M., A. Efeito de períodos de controle e de convivência das plantas daninhas na cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum sp*) no Estado de São Paulo. **Livro**, São Paulo, 1999.

LAZZARI, M.R. Safra 2004/05 de grãos de verão do RS: produção e preços em baixa. **Indic. Econ. FEE**, Porto Alegre, Setembro, v.33, n.2, p.47-64, 2005.

LEITE, R. C. C.; Leal, M. R. L. V.; Cortez, L. S. B.; Griffin, W. M.; Scandiffio, M. I. G. Can Brazil replace 5% of the 2025 gasoline world demand with ethanol? **Energy**, v.34, n.5, p.655-661, 2009.

LEIVAS J. F.; BERLATO M. A.; FONTANA D. C. Risco de deficiência hídrica decendial na metade Sul do Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande/PB. v.10, n.2, p.397-407, 2006.

LINACRE, E. T. A simple formula for estimating evaporation rates in various climates, using temperature data alone. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 18, n. 6, p. 409-424, 1977.

LOCKWOOD, J. G. **World climatic systems**. Baltimore: Edward Arnold, 1985. 292p.

MAGALHÃES, A. R. Sustainable development: Climate and policy linkages. In Proceedings of the International Forum on Climate Prediction, Agriculture and Develoment, International Reserch Institute for Climate Prediction, Palisades, NY, P. 3-10, 1887.



MALUF, J. R. T. et al. Zoneamento agroclimático da cana-de-açúcar no Estado do Rio Grande do Sul, visando a produção de açúcar e álcool. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA. 15., 2007, Aracajú. **Anais XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia**. Aracajú, 2008.

MARENCO, J.; ROGERS, J. Cold front and polar air outbreaks in the Americas during: modern climate assessments and impacts, and some past climate evidences. In: Markgraf, v. (Ed). **Present and past inter-hemispheric climate linkages in the Americas and their societal effects**. New York Academic, p. 31-49, 2001.

MATZENAUER, R. Evapotranspiração de plantas cultivadas e coeficientes de cultura. In: BERGAMASCHI, H. **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre, p. 31, 1992.

MEDEIROS, A.T. **Estimativa da evapotranspiração de referencia a partir da equação de Penman-Monteih de medidas lisimétricas e de equações empíricas em Paraipaba, CE**. Tese de doutoramento (Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz) p.103, 2002.

MONTEITH, J. L. Evaporation and surface temperature. **Quartely Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 87, p. 159-170, 1981.

MONTEITH, J. L. **Principles of environmental physics**. London: Edward Arnold, 1973. 241p

MORENO, J. A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura, 1961. 42p.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE. Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. 2.ed, p. 421, 1989.

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proc. R. Soc. London**, v. 193, n. A, p. 120-146, 1948.

PEREIRA, A. R.; CAMARGO, A. P. An analysis of the criticism of Thornthwaite's equation for estimating potential evapotranspiration. **Agriculture Forest Meteorological**, v. 46, n. 1-2, p. 149-157, Apr. 1989.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA. N. A.; SEDIYAMA. G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.

PESSOA, N. S. Balanço Hídrico. **Boletim Técnico CATI**. Campinas, São Paulo, nº 190, 1985.

PIMENTEL, C. **A relação da planta com a água**. Seropédica: EDUR, p.191, 2004.

PORTO, R. L., FILHO, K. Z. **Introdução à Hidrologia – Ciclo Hidrológico e Balanço Hídrico**. São Paulo, p. 50, 2003.

PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly Weather Review**, v. 100, p. 81-92, 1972.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São paulo: manole, p. 188, 1987.

REIS, R.A.; GARCIA, R.; SILVA, D.J.; QUEIROZ, A.C.; FERREIRA, J.Q. Efeitos da aplicação de amônia anidra sobre a digestibilidade do feno de capim-braquiária (*Brachiaria decumbens* Stapf). **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.19, p.201-208, 1990.

ROJAS, J. S. D.; BARBIERI V. Modelo agrometeorológico de estimativa da produtividade da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.7, n.1, p.67-73, 1999.

ROMANENKO, V. A. **Computation of the autumn soil moisture using a universal relationship for a large area**. Kiev: Ukrainian Hydrometeorological Research Institute, p. 3, 1961.

ROSSATO, L. **Estimativa da capacidade de armazenamento de água no solo do Brasil. Dissertação de mestrado**. São José dos Campos: INPE, p. 145, 2001. (INPE-8915-TDI/809).

SANTOS, F. L. de B. dos. Levantamento da ictiofauna do estuário do rio Formoso (Pernambuco, Brasil) através da pesca de camboa. *Dissertação, Universidade Federal de Pernambuco*, p. 76p, 2001.

SEDIYAMA, G.C. ET AL. Zoneamento agroclimático do cafeeiro (*Coffea arábica* L.) para o estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n. 3, p. 501-509, 2001.

SENTELHAS, P.C.; PEREIRA, A.R.; MARIN, F.R.; ANGELOCCI, L.R.; ALFONSI, R.R.; CARAMORI, P.H.; SWART, S. **Balances Hídricos Climatológicos do Brasil - 500 balances hídricos de localidades brasileiras**. Piracicaba: ESALQ, 1999. P. 1-7.

Sedyama, G. C. et al. Zoneamento agroclimático do cafeeiro (*Coffea arábica* L.) para o estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n. 3, p.501-509, 2001

SILVA, M. V. **ANÁLISE SAZONAL DO REGIME HÍDRICO DO RIO GRANDE DO SUL NO PERÍODO DE 1977 A 2006: impacto de sistemas meteorológicos no regime hídrico do Estado em 2006**. Dissertação, Pelotas, 2010.

SILVA, M. A. V.; REIS, A. C. S. **Meteorologia**. Recife, p. 454, 1990.

STEINMETZ, S.; FOREST, F. **Caracterização das épocas de plantio mais apropriadas para o arroz de sequeiro no Estado de Goiás**. Goiânia: EMBRAPA-CNPAP. Circular Técnica, 1986. n. 22, p. 33.

STEINMETZ, S.; REYNIERS, F.N.; FOREST, F. **Caracterização do regime pluviométrico e do balanço hídrico do arroz de sequeiro em distintas regiões produtoras do Brasil**. Vol. I. Síntese e interpretação dos dados. Goiânia: EMBRAPA-CNPAP, Documentos, 1988. n.23, p. 59.

STRECK, N.A.; ALBERTO, C.M. Simulação do impacto da mudança climática sobre a água disponível do solo em agroecossistemas de trigo, soja e milho em Santa Maria, RS. **Ciência Rural**, Santa Maria, março-abril, v.36, n.2, p.424-433, 2006.

STULL, R. B. **An introduction to boundary layer meteorology**. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1988. 666p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. Porto Alegre: Artmed, p.719, 2004.

TANNER, C. B., PELTON, W. L. Potential evapotranspiration estimates by approximate energy balance method of Penman. **Journal of Geophysical Research**. Washington, v. 65, n. 10, p. 3391, 1960.

TASSI, R.; COLLISCHONN, W. Apostila de Hidrologia. **Instituto de Pesquisas Hidráulicas**. Rio Grande, 2008.

TEIXEIRA, C.F.A; DAMÉ,R,C,F; BACELAR,L,C,S; DA SILVA,G,M; COUTO,R,S..Intensidade da seca utilizando índices de precipitação. **Revista Ambiente e Água**, v.8, n.3, p.203-213, 2013.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. The water balance. **Publications in Climatology**. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 104 p, 1955.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geogr. Rev.**, v. 38, p. 55-94, 1948.

TOMASELLA, J.; ROSSATTO, R.. **Balanço Hídrico**. INPE-13140-PRE/8399, 2005 12p.

TOWNSEND, C., R. **Recomendações técnicas para o cultivo da cana-de-açúcar forrageira em Rondônia**, Embrapa, Rondônia, 2002.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Editora da Universidade, 2ª ed., p. 943, 1993.

VAREJÃO-SILVA, M.A. Meteorologia e Climatologia. **Versão Digital**, 2006. p. 449.

VARGAS, C. H.; GARCIA, F. N. J. **Comparison of ZnO thin films deposited by three different SILAR processes**. Microelectronics Journal. Pg. 1340-1350, Vol. 39, 2008.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa: UFV, Imprensa Universitária, 1991. 449p.

WEBER, J.B.; MILLER, C.T. Organic chemical movement over and through soil. In: SAWHNEY, B.L.; BROWN, K., eds. **Reactions and movement of organic chemicals in soil**. Madison: SSSA, p.305-334, 2001.

WREGGE, M.S.; STEINMETZ, S.; REISSER, C.J.; DE ALMEIDA, I.R. **Atlas climático da Região Sul do Brasil: Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2011. 336 p.

XU, C. **Hydrologic Models**. Uppsala University Department of Earth Sciences Hydrology, 2002, 165p.