

**DIEGO LEMOS COUTINHO**

**UTILIZAÇÃO DO MÉTODO GEOESTATÍSTICO NA AVALIAÇÃO DE  
REDES DE ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS COM BASE NA PRECISÃO DOS  
RESULTADOS DE BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO PROGRAMA  
DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA  
AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO  
ESPÍRITO SANTO, COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM  
ENGENHARIA AMBIENTAL.

ORIENTADOR: EDMILSON COSTA TEIXEIRA

CO-ORIENTADOR: JOSÉ GERALDO FERREIRA DA  
SILVA

**Vitória**

**2008**

**DIEGO LEMOS COUTINHO**

**UTILIZAÇÃO DO MÉTODO GEOESTATÍSTICO NA AVALIAÇÃO DE  
REDES DE ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS COM BASE NA PRECISÃO DOS  
RESULTADOS DE BALANÇO HÍDRICO CLIMATOLÓGICO**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisição parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Ambiental.

Aprovada em \_\_\_\_\_ de 2008.

**COMISSÃO EXAMINADORA**

---

PROF. DR. EDMILSON COSTA TEIXEIRA  
DEA / UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
ORIENTADOR

---

DR. JOSÉ GERALDO FERREIRA DA SILVA  
INCAPER  
CO-ORIENTADOR

---

PROF. DR. DANIEL RIGO  
DEA / UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
EXAMINADOR INTERNO

---

PROF<sup>a</sup>. DR<sup>a</sup>. JOÃO BATISTA DIAS DE PAIVA  
DHS / UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
EXAMINADOR EXTERNO

---

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por me abençoar sempre e me dar saúde física, mental e espiritual para seguir em todos os rumos da minha vida.

Ao professor e orientador Edmilson Costa Teixeira, pelo direcionamento e voto de confiança que me fez prosseguir com o trabalho até o fim.

Ao co-orientador José Geraldo Ferreira da Silva pelas contribuições.

À Marina pelas discussões, opiniões e todo apoio.

Às grandes amigas e companheiras de pesquisa, Joseany Trarbach e Gizella Igreja, por toda preocupação, incentivo e orientações.

Ao Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (Incaper) e à Aracruz Celulose pelo fornecimento dos dados meteorológicos.

Aos meus pais, Tião e Lourdes, pelo apoio incondicional e toda minha família, pela torcida e pelo apoio espiritual.

À Mari, pela presença, preocupação e compreensão de sempre.

Aos grandes amigos Patrike, Júlia, Robson, André, Péricles e Alex pela torcida e preocupação.

Ao meu primo e afilhado, Pedro Guilherme pelas orientações lingüísticas.

Aos amigos da CESAN, Sérgio Sant'anna, Cristiane, Juliana, Mariana, Cleide, Roberto de Carli, Luciano Auriemma e Márcia Azevedo, por todo incentivo, preocupação e compreensão.

Aos novos e os velhos amigos do LabGest, incluindo Dejanyne, Cristina, Danieli, Marcos Eugênio, Sirley, Andressa, Diogo, Kilcy, Marina, Angélica, Rubens, Priscila e Carlinha, por dividirem comigo cada dificuldade e alegria resultantes do desenvolvimento do trabalho.

---

## RESUMO

Na gestão de recursos hídricos, a agricultura tem papel muito representativo, pois a água é essencial devendo-se fazer seu melhor uso para obter a produção satisfatória e altos rendimentos de acordo com a demanda individual de cada cultura. O balanço hídrico climatológico de Thronthwaite-Mather (1955) é uma técnica de quantificação da disponibilidade hídrica no solo que é largamente utilizada para fins de planejamento agrícola. Considerando que este modelo relaciona as propriedades físico-hídricas do solo com os parâmetros de entrada e saída de água e que a variável de maior influencia no resultado é a precipitação, destaca-se a necessidade de utilizar informações de precipitação com grau de precisão aceitável, de acordo com o nível de precisão requerido. Para isso, as redes de monitoramento devem ser muito bem dimensionadas. A geoestatística além de ser uma excelente técnica de estimação, é uma ótima ferramenta utilizada no dimensionamento de rede de monitoramento. A associação destas duas técnicas torna-se bastante interessante, pois além de permitir o conhecimento espacial do balanço hídrico com seu respectivo nível de precisão, permite a avaliação da rede de monitoramento com base na precisão da disponibilidade hídrica. Este trabalho tem como objetivo a proposição de metodologia para a realização destas atividades. No trabalho, pôde-se confirmar que a precipitação é, sem dúvida, a variável de maior influencia nos resultados do balanço hídrico e que, para aplicação no modelo, o número de estações da rede de monitoramento de temperatura pode ser bem menor. Pôde-se concluir também, que uma rede de monitoramento dimensionada com base na precisão das estimativas de precipitação mensal também ofereceram boas medições com base na precisão das estimativas da disponibilidade hídrica, dada pela precipitação menos a evapotranspiração potencial. Os valores estimados do volume de armazenamento de água no solo calculados para diversos tipos de cultura / tipo de solo em uma região específica, mostraram-se uma ferramenta bastante útil para fins de planejamento agrícola e gestão de recursos hídricos, permitindo simular a implantação de diversas culturas, estudando sua viabilidade e garantindo o melhor uso da água.

---

## ABSTRACT

In the management of water resources, agriculture is very representative role, because water is essential should be doing its best use to obtain satisfactory production and high income in accordance with the demands of each culture. The water balance of Thornthwaite-Mather (1955) is a technique of quantification of water availability in soil that is rather used for agricultural planning. Whereas this model lists the physical properties of soil-water with the parameters of entry and exit of water and that the variable of greater influence in the result is the precipitation, there is a need to use information from precipitation with acceptable degree of accuracy, in accordance with the accuracy. To do so, the networks should be tracking very well designed. The geostatistics addition to being an excellent technique for estimation, is a great tool used in the sizing of network monitoring. The combination of these two techniques becomes quite interesting, as well as allowing the knowledge of the spatial water balance with their level of accuracy allows the evaluation of the network of tracking based on the accuracy of water availability. This paper aims at the proposition of methodology for the implementation of these activities. At work, was able to confirm that the precipitation is undoubtedly the variable of greater influence on the results of the water balance and that, to apply the model, the number of stations of the network of tracking temperature may be less. It was also concluded that a network of tracking optimized for the accuracy of estimates of monthly rainfall also offered good measurements based on the accuracy of estimates of water availability less precipitation given by the potential evapotranspiration. Even without the knowledge of its accuracy, the estimated volume of storage of water in the soil calculated for various types of crop / soil type in a specific sub-region, coupled with its spatial analysis, were an interesting tool for agricultural planning and management of water resources, simulate allowing the deployment of diverse cultures, studying its feasibility and ensuring the best use of water.

---

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	10
2. OBJETIVOS .....	13
2.1. OBJETIVO GERAL .....	13
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	15
3.1. ESTADO DA ARTE .....	15
3.2. BALANÇO HÍDRICO .....	16
3.2.1. Equação Fundamental .....	17
3.2.2. Método de Balanço Hídrico de Thornthwaite-Mather .....	18
3.3. GEOESTATÍSTICA .....	22
3.3.1. Variável Regionalizada .....	22
3.3.2. Hipóteses Consideradas .....	23
3.3.3. O Semivariograma .....	25
3.3.4. Modelos de Semivariograma .....	27
3.3.5. Isotropia e Anisotropia .....	28
3.3.6. Krigagem Ordinária .....	29
3.3.7. Validação Cruzada .....	31
4. MATERIAL E MÉTODOS .....	34
4.1. ÁREA DE ESTUDO .....	34
4.2. ANÁLISE E TRATAMENTO DOS DADOS .....	36
4.2.1. Dados Disponíveis .....	36
4.2.2. Preenchimento de Falhas .....	38
4.2.3. Cálculo da Evapotranspiração Potencial (ETP) pelo Modelo de Thornthwaite-Mather (1955) .....	38
4.3. MODELAGEM DO SEMIVARIOGRAMA E VALIDAÇÃO CRUZADA .....	39
4.4. ESTIMATIVAS PONTUAIS .....	39
4.4.1. Malha .....	40
4.4.2. Estimativas Pontuais .....	40
4.4.3. Confecção de Mapas .....	40
4.5. SELEÇÃO DAS CONFIGURAÇÕES ÓTIMAS .....	41
4.6. CÁLCULO DO ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO SOLO .....	42
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	45
5.1. ANÁLISE DOS DADOS .....	45
5.2. MODELAGEM E VALIDAÇÃO DOS SEMIVARIOGRAMAS .....	48
5.3. ESTIMATIVAS PONTUAIS .....	49
5.4. CONFIGURAÇÕES ÓTIMAS .....	63
5.5. ESTIMATIVAS DO ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO SOLO (ARM) .....	67
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	71
6.1. CONCLUSÕES .....	71
6.2. RECOMENDAÇÕES .....	72
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	74
8. ANEXOS .....	78
8.1. ANEXO 01 .....	78

---

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Configurações obtidas com a otimização da rede de monitoramento com base na precisão das estimativas de (P-ETP) <sub>10</sub> .....	66
<b>Tabela 2</b> – Configurações obtidas com a otimização da rede de monitoramento com base na precisão das estimativas de P <sub>10</sub> . ....	66

---

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Representação espacial do modelo de balanço hídrico em uma localização particular de um extrato de solo.....	18
<b>Figura 2</b> – Representação de semivariograma experimental. Fonte: Trarbach (2004). .....	26
<b>Figura 3</b> – Representação de um modelo de anisotropia geométrica. ....	28
<b>Figura 4</b> – Localização da Bacia do Rio São Mateus no mapa do estado do Espírito Santo.....	35
<b>Figura 5</b> – Rede de estações de monitoramento selecionadas no entorno da bacia do Rio São Mateus.....	36
<b>Figura 6</b> – Estimativas de $(P-ETP)_1$ médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de janeiro.....	51
<b>Figura 7</b> – Variância de Estimativas de krigagem de $(P-ETP)_1$ médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de janeiro.....	51
<b>Figura 8</b> – Estimativas de $(P-ETP)_2$ médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de fevereiro. ....	52
<b>Figura 9</b> – Variância de Estimativas de krigagem de $(P-ETP)_2$ médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de fevereiro. ....	52
<b>Figura 10</b> – Estimativas de $(P-ETP)_3$ médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de março. ....	53
<b>Figura 11</b> – Variância de Estimativas de krigagem de $(P-ETP)_3$ médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de março. ....	53
<b>Figura 12</b> – Estimativas de $(P-ETP)_4$ médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de abril.....	54
<b>Figura 13</b> – Variância de Estimativas de krigagem de $(P-ETP)_4$ médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de abril.....	54
<b>Figura 14</b> – Estimativas de $(P-ETP)_5$ médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de maio.....	55
<b>Figura 15</b> – Variância de Estimativas de krigagem de $(P-ETP)_5$ médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de maio.....	55
<b>Figura 16</b> – Estimativas de $(P-ETP)_6$ médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de junho. ....	56
<b>Figura 17</b> - Variância de Estimativas de krigagem de $(P-ETP)_6$ médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de junho.....	56
<b>Figura 18</b> – Estimativas de $(P-ETP)_7$ médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de julho.....	57
<b>Figura 19</b> – Variância de Estimativas de krigagem de $(P-ETP)_7$ médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de julho.....	57
<b>Figura 20</b> – Estimativas de $(P-ETP)_8$ médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de agosto.....	58
<b>Figura 21</b> – Variância de Estimativas de krigagem de $(P-ETP)_8$ médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de agosto.....	58
<b>Figura 22</b> – Estimativas de $(P-ETP)_9$ médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de setembro. ....	59
<b>Figura 23</b> – Variância de Estimativas de krigagem de $(P-ETP)_9$ médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de setembro. ....	59
<b>Figura 24</b> – Estimativas de $(P-ETP)_{10}$ médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de outubro. ....	60



---

<b>Figura 25</b> – Variância de Estimativas de krigagem de $(P-ETP)_{10}$ médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de outubro. ....	60
<b>Figura 26</b> – Estimativas de $(P-ETP)_{11}$ médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de novembro. ....	61
<b>Figura 27</b> – Variância de Estimativas de krigagem de $(P-ETP)_{11}$ médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de novembro. ....	61
<b>Figura 28</b> – Estimativas de $(P-ETP)_{12}$ médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de dezembro. ....	62
<b>Figura 29</b> – Variância de Estimativas de krigagem de $(P-ETP)_{12}$ médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de dezembro. ....	62
<b>Figura 30</b> - Configuração ótima obtida com base na precisão da estimativa média espacial de $(P-ETP)_{10}$ .....	65
<b>Figura 31</b> - Configuração ótima obtida com base na precisão da estimativa média espacial de $P_{10}$ . ....	65
<b>Figura 32</b> – Sub-área “A” fictícia utilizada na aplicação do modelo de balanço hídrico. ....	67

---

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1</b> – Média de precipitação total mensal e temperatura mensal média das 25 estações de monitoramento. ....	45
<b>Gráfico 2</b> – Disponibilidade Hídrica Mensal Média obtidas com 25 estações de monitoramento no entorno da Bacia do Rio São Mateus. ....	46
<b>Gráfico 3</b> – Box-plot das Médias Mensais de Precipitação (P) das 23 estações. ....	47
<b>Gráfico 4</b> – Box-plot das Médias Mensais de Evapotranspiração Potencial (ETP) das 23 estações. ....	47
<b>Gráfico 5</b> – Box-plot das Médias Mensais de (P-ETP) <sub>i</sub> das 25 estações. ....	48
<b>Gráfico 6</b> - Variâncias de estimativas referentes às configurações obtidas com a otimização da rede de monitoramento com base na precisão das estimativas médias de (P-ETP) <sub>10</sub> e P <sub>10</sub> . ....	63
<b>Gráfico 7</b> – Médias espaciais das estimativas pontuais de armazenamento de água no solo (ARM) em toda a área “A” para diferentes valores de CAD. ....	68

---

*CAPÍTULO 1*  
***INTRODUÇÃO***

---

## 1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso distribuído desigualmente na natureza e sua disponibilidade, uso e gerenciamento adequados são fundamentais para o futuro sustentável da humanidade. (TUNDISI, 2003)

De uma maneira geral, a água é essencial para a produção das culturas devendo-se fazer seu melhor uso para obter a produção satisfatória e altos rendimentos (DOORENBOS & KASSAM, 1979) dando atenção especial à sua demanda pelas culturas. Quando não satisfeitas as exigências, há reflexo direto na qualidade e quantidade da produção agrícola.

No Brasil e em especial no estado do Espírito Santo, a quantificação da disponibilidade hídrica para culturas assume particular importância em virtude de os déficits hídricos ao longo do ano constituírem uma séria limitação à produção e uma permanente fonte de risco agrícola em quase todo o estado, principalmente em áreas significativas cujas características climáticas se aproximam da semi-aridez.

O balanço hídrico climatológico de Thornthwaite-Mather é uma técnica de quantificação da disponibilidade hídrica no solo que é bastante útil para fins de planejamento agrícola envolvendo gestão de irrigação e, conseqüentemente, gestão de recursos hídricos. O modelo relaciona as propriedades físico-hídricas do solo com os parâmetros de entrada e saída de água utilizando basicamente parâmetros de precipitação, temperatura, tipo de solo e de cultura.

A água proveniente da atmosfera que atinge a superfície terrestre e a disponibilidade de precipitação numa bacia durante o ano são os fatores determinantes para quantificar, entre outros, a necessidade de irrigação e abastecimento de água. Assim, é fundamental a existência de redes de estações pluviométricas que ofereçam precisão satisfatória nas estimativas de precipitação.

Para isso, destaca-se a importância de redes de monitoramento dimensionadas em número e posicionamento adequados das estações.

A Geoestatística é um método que, diferente da estatística convencional, permite a análise das duas características fundamentais de fenômenos naturais: o aspecto aleatório e o aspecto espacial, possibilitando assim a análise dos valores observados conforme a posição espacial das amostras (TRARBACH, 2004).

---

Além da geoestatística ser apontada em diversos ramos da ciência como excelente técnica de estimação, trabalhos como de Brás & Rodriguez-Iturbe (1976), Pardo-Igúzquiza (1998), Trarbach (2004) e Igreja (2006) revelam a eficiência desta técnica também no dimensionamento de rede de monitoramento bem como na avaliação desta com base na precisão das estimativas representada.

Considerando a eficiência da geoestatística e a importância do balanço hídrico climatológico no planejamento agrícola e de redes de monitoramento bem dimensionadas, a associação destas duas técnicas torna-se bastante interessante, pois além de permitir o conhecimento espacial do balanço hídrico com seu respectivo nível de precisão, possibilita a avaliação da rede de monitoramento com base na precisão da disponibilidade hídrica.

---

*CAPÍTULO 2*

**OBJETIVOS**

---

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo a contribuição técnica e metodológica para a gestão de recursos hídricos mais especificamente para o planejamento agrícola, com a proposição de metodologia que utilize geoestatística na aplicação do modelo de balanço hídrico climatológico.

### 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a. Avaliação da configuração de rede de monitoramento de precipitação com base na precisão das estimativas da disponibilidade hídrica;
- b. Proposição de Metodologia que associe a geoestatística ao modelo de balanço hídrico climatológico de Thornthwaite-Mather (1955) como ferramenta para o cálculo de estimativa de armazenamento de água no solo para fins de planejamento hídrico, que possibilitem o estudo de viabilidade de implantação de determinado tipo de cultura em uma região;

---

*CAPÍTULO 3*  
***REVISÃO BIBLIOGRÁFICA***



---

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. ESTADO DA ARTE

A Geoestatística tem sido cada vez mais aplicada ao dimensionamento de redes. Isto foi e ainda vem sendo demonstrado em diversos trabalhos, como o de Bárdossi & Bogárdi (1983) que apresentou a metodologia de dimensionamento de redes de diversas variáveis ambientais, dentre elas, meteorológica, hidrológica, mineral e edáfica, através da Krigagem, visando analisar precisão de estimação e esforço de observação.

Segundo Trarbach (2004), vários pesquisadores tais como Brás & Rodriguez-Iturbe (1976), Bastin et al. (1984), Tabios & Salas (1985), Phillips, Dolph & Marks (1992), Bacchi & Kottegoda (1995), Pardo-Igúzquiza (1998), Holawe & Dutter (1999), Goovaerts (2000), vêm utilizando o método Geoestatístico para os estudos direcionados a redes pluviométricas.

No trabalho de Bastin et al. (1984), foi apresentada uma proposta de estimação da precipitação média utilizando a Krigagem como ferramenta, assim como demonstrado que esse método pode ser utilizado para a seleção de estações pluviométricas em uma bacia hidrográfica. Nesse trabalho, a variância de estimação da Krigagem ( $\sigma_E$ ) foi utilizada para selecionar as estações mais representativas da área de estudo.

Segundo Bacchi & Kottegoda (1995), que analisou além dos modelos de semivariograma teóricos, os efeitos meteorológicos e topográficos e escalas de agregação espaço temporal para o dimensionamento de redes e cálculo de precipitação média espacial, a análise pode ser ainda mais completa. Nesse trabalho foram examinados os semivariogramas empíricos e as técnicas de validação.

Associando a função objetivo  $(FO)$  com a Geoestatística, Pardo & Igúzquiza (1998) publicaram um estudo que apresenta metodologia muito útil para o dimensionamento de redes considerando precisão nas estimativas e custos envolvidos na implantação e operação de rede de monitoramento. Esta metodologia também foi aplicada por Igreja (2006) na rede de monitoramento no entorno da bacia do rio São Mateus localizado no norte do estado do Espírito Santo.

---

A geoestatística tem se mostrado uma técnica muito eficaz no dimensionamento de redes de estações pluviométricas, revelando a variância de estimativa da Krigagem ( $\sigma_E$ ) como um excelente parâmetro de representação e análise da precisão da estimativa.

Atualmente, a aplicabilidade e a utilização da geoestatística como metodologia de análise de dados no espaço ou no tempo está difundida em vários ramos da ciência, envolvendo áreas de ciências humanas, biológicas e exatas.

Além dos trabalhos já citados para o estudo da precipitação, segundo Diodato & Cecarelli (2006), diversos trabalhos tem utilizado a Geoestatística como método de previsão de parâmetros utilizados para cálculo de balanço hídrico destacando-se Martinez-Cob (1996), Dalezios (2002), Moges (2002), Szilagyi (2002) aplicados ao estudo de evapotranspiração, e Woods et al (1997), Oliveira and Maidment (1999), Hernández (2000), Carey & Woo (2001), Jetten (2003), Sankarasubramanian & Vogel (2003) e Leblois (2004) aplicados ao estudo de escoamento superficial.

### 3.2. BALANÇO HÍDRICO

A variação da armazenagem de água na planta é conseqüência da defasagem temporal entre sua absorção e perda na fase de vapor, que conduz ao desenvolvimento de déficits hídricos a curto e longo prazo. As variações de armazenagem e déficit hídrico da planta dependem de um conjunto de fatores que afetam a absorção e transpiração. Dentre os fatores que afetam a absorção temos os fatores ambientais (disponibilidade hídrica, temperatura, aeração e concentração de solução do solo) e os fatores da planta (sistema radicular). A extensão e a ramificação do sistema radicular variam enormemente entre as espécies com as diferentes condições físicas do solo. Já os fatores que afetam a transpiração são: 1) os fatores ambientais (a energia radiante, umidade do ar e do vento, temperatura do ar e disponibilidade hídrica) e 2) fatores das plantas (o tamanho e forma das folhas, bem como sua orientação e exposição, área e característica foliar, estrutura anatômica e relação área foliar/sistema radicular) (ANGELOCCI, 2002).

O conhecimento do armazenamento de água no solo disponível para determinada cultura pode ser estimado medindo-se a umidade do solo ou estimando esse valor

---

por meio de modelos que relacionam as propriedades físico-hídricas do solo com seus componentes de entrada e saída de água. Esses modelos são conhecidos como Balanço Hídrico.

### 3.2.1. Equação Fundamental

O balanço Hídrico relaciona a quantidade de cada componente do ciclo hidrológico de acordo com o extrato de solo estudado que constitui um volume de controle.

Segundo Righetto (1998) a equação fundamental do balanço hídrico pode ser dada por:

$$Q_E - Q_S = \Delta S \quad (01)$$

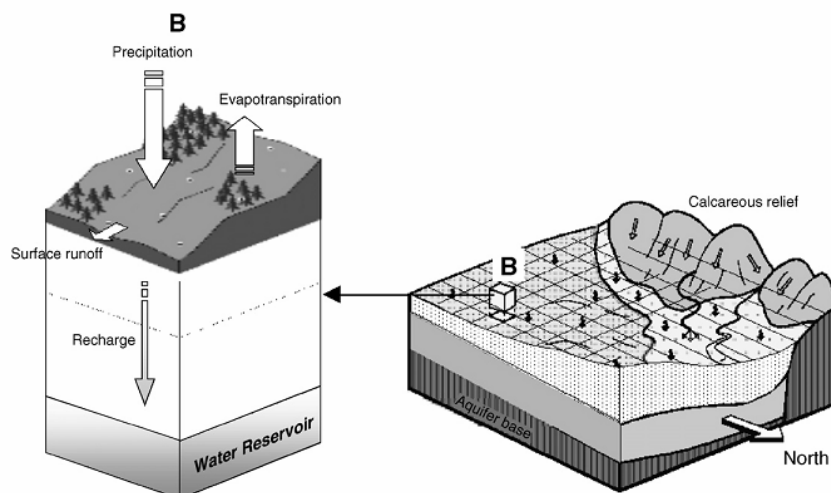
Onde  $Q_E$  é a vazão de entrada,  $Q_S$  a vazão de saída e  $\Delta S$  a variação de armazenamento de água no sistema.

De acordo com a figura 01, considerando uma localização particular de um extrato de solo e as hipóteses:

- somente a existência de fluxo vertical de água;
- a vazão de entrada do sistema proveniente da precipitação (P);
- a vazão de saída proveniente da evapotranspiração (ETR);
- qualquer excesso de água que infiltra no extrato de solo percola abaixo do sistema radicular da planta consistindo a recarga (R) do aquífero; e
- $Q_{ON}$  e  $Q_{OFF}$  são as vazões escoamento superficial de entrada e saída,

tem-se a seguinte formulação para o modelo de balanço hídrico:

$$P - ETR + (Q_{ON} - Q_{OFF}) - R = \Delta S \quad (02)$$



**Figura 1** – Representação espacial do modelo de balanço hídrico em uma localização particular de um extrato de solo.

**Fonte** – Diodato & Cecarelli (2006).

### 3.2.2. Método de Balanço Hídrico de Thornthwaite-Mather

Um dos modelos de Balanço Hídrico mais conhecido foi o proposto por Thornthwaite, em 1948, posteriormente modificado por Mather, em 1955, que ficou conhecido como “Balanço Hídrico de Thornthwaite-Mather”. A principal função deste balanço hídrico é servir como base para uma classificação climática (OMETTO, 1981).

Segundo Pereira (2005) o balanço hídrico climatológico foi desenvolvido por Thornthwaite & Mather para determinar o regime hídrico de um local, sem a necessidade de medidas diretas das condições do solo.

#### 3.2.2.1. Critérios Assumidos

Observando a equação 02 de balanço hídrico, e o modelo de Thornthwaite-Mather que desconsidera o escoamento superficial, tem-se a equação fundamental do modelo dada pela seguinte expressão:

$$P - ETR - R = \Delta S \quad (03)$$

---

### 3.2.2.2. Parâmetros Principais

Para aplicação do modelo de Thornthwaite-Mather (1955) é necessário no mínimo o conhecimento dos seguintes parâmetros:

#### (a) Precipitação ( $P$ )

A chuva é o tipo de precipitação mais importante para hidrologia e para a agricultura por se tratar de uma das principais fontes de abastecimento de água no solo.

Os dados de chuva para aplicação do modelo devem ser representados em “mm” através de estimativas dos totais mensais.

#### (b) Evapotranspiração Potencial ( $ETP$ )

Por definição a evaporação é a mudança da água do estado líquido para o estado de vapor e a transpiração é a evaporação que ocorre nas folhas das plantas através da abertura dos estômatos. Tem-se que a evapotranspiração é a soma dos dois parâmetros evaporação e transpiração.

Em outras palavras, a evapotranspiração é considerada como a perda de água por evaporação do solo e transpiração das plantas.

A Evapotranspiração potencial ( $ETP$ ) é a evaporação e transpiração, na unidade de tempo, de uma superfície extensa completamente coberta de vegetação de porte baixo e bem suprida de água de modo que não haja limitação alguma na disponibilidade hídrica para ocorrência do processo.

Evapotranspiração real ( $ETR$ ) é a evaporação e transpiração, nas condições reais (existentes) de fatores atmosféricos e umidade do solo. A evapotranspiração real é igual ou menor que a evapotranspiração potencial ( $ETR < ETP$ ).

O modelo de Thornthwaite-Mather (1955) apresenta a seguinte formulação para o cálculo da evapotranspiração potencial em um determinado mês  $i$ :

$$ETP_i = EP_i \cdot Corr \quad (04)$$

---

Onde Corr é uma unidade de correção de acordo com a latitude e o mês  $i$ , e  $EP_i$  é dada pela equação:

$$EP_i = 16 \left( 10 \frac{t_i}{I} \right)^a \quad (05)$$

Onde  $t_i$  é a temperatura média mensal ( $^{\circ}\text{C}$ ) e  $I$  e  $a$  são dados por:

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left( \frac{t_i}{5} \right)^{1,514} \quad (06)$$

$$a = 67,5 \times 10^{-8} I^3 - 7,71 \times 10^{-5} I^2 + 0,01791 \times I + 0,492 \quad (07)$$

### (c) Capacidade Máxima de Água Disponível no solo (CAD)

Segundo Souza (1989), o solo é o reservatório de água para plantas, aberto para a atmosfera e para os horizontes mais profundos do perfil.

O CAD é a máxima capacidade de armazenamento de água no solo e é função do tipo de solo, tipo de cultura, densidade de drenagem, etc.

Através do método de Thornthwaite (1948) o CAD pode ser calculado utilizando-se os valores da capacidade de campo, ponto de murcha permanente do solo e profundidade efetiva das raízes, de acordo com a equação 08.

$$CAD = \frac{(CC - PMP) \cdot D_A \cdot z}{10} \quad (08)$$

Onde:

- CAD é a capacidade máxima de água disponível (mm);
- CC é a umidade do solo à capacidade de campo (%peso);
- PMP é a umidade do solo ao ponto de murcha permanente (%peso);
- $D_A$  é a densidade aparente do solo ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );
- $z$  é a profundidade efetiva do sistema radicular da cultura (cm).

---

(d) Armazenamento de Água no Solo (ARM)

O Armazenamento de Água no Solo (ARM) é o volume de água que fica retido entre seus poros ao longo da zona radicular da planta estando disponível para esta em seu metabolismo.

Esta água está sujeita a ação de diversas forças, dentre as quais as mais importantes são:

- Tensão superficial, que é responsável pela atração entre as partículas de solo e as moléculas de água;
- Força gravitacional, responsável pela percolação da água;
- Força de sucção das raízes.

Quando o solo está saturado, a força gravitacional é a mais importante, pois predomina sobre as demais, puxando a água para baixo até que cessem os movimentos verticais. Neste instante, diz-se que o solo está à capacidade de campo.

A partir daí, até o ponto de murcha permanente, o caminho que a água irá tomar será definido pelo balanço entre as forças de tensão superficial e de sucção das raízes.

A força que retém a água no solo é inversamente proporcional à distância entre a molécula de água e a partícula de solo. Uma molécula de água mais próxima à partícula de solo é retida com mais força, enquanto uma mais distante pode ser retirada com facilidade. Assim, quanto mais seco estiver o solo, maior é a resistência à retirada de água.

O modelo de Thornthwaite-Mather (1955) considera esse aumento de resistência e propõe as equações 08 e 09 para determinar o teor de umidade do solo no mês  $i$  ( $ARM_i$ ) em condições de retirada de água do solo.

$$ARM_i = CAD.e^{\left(\frac{NegAc_i}{CAD}\right)} \quad (09)$$

$$Neg.Ac_i = \sum_{i=n}^i (P_i - ETP_i) \quad ,se (P_i - ETP_i) < 0 \quad (10)$$

sendo “n” o primeiro mês com  $(P_i - ETP_i)$  negativo.

---

### 3.3. GEOESTATÍSTICA

A Geoestatística é um método que, diferente da estatística convencional, permite a análise das duas características fundamentais de fenômenos naturais: o aspecto aleatório e o aspecto espacial, possibilitando assim a análise dos valores observados conforme a posição espacial das amostras (Trarbach, 2004). Essa dependência espacial não é considerada pela estatística clássica e pela maior parte dos métodos de interpolação.

Este método foi desenvolvido por Krige (1951) que, trabalhando com dados de concentração de ouro na África do Sul, concluiu que não conseguia encontrar sentido nas variâncias, se não levasse em conta a distância entre as amostras. Assim, baseado nas observações de Krige, Matheron (1963) desenvolveu a Teoria das Variáveis Regionalizadas que contém os fundamentos da Geoestatística.

Matheron (1963) define Variável Regionalizada como uma “função espacial numérica, que varia de um local para outro, com uma continuidade aparente e cuja variação não pode ser representada por uma função matemática simples”. Essa continuidade ou dependência espacial pode ser estimada através do semivariograma.

Utilizando o semivariograma para considerar a dependência espacial, a Geoestatística possui um método de interpolação capaz de estimar valores em qualquer posição dentro do campo, sem tendência e com variância mínima. Trata-se do método de Krigagem utilizado em diversos domínios das ciências da natureza.

#### 3.3.1. Variável Regionalizada

Pode-se interpretar a variável regionalizada  $z(x)$  como uma realização de uma função aleatória  $Z(x)$ . A função aleatória  $Z(x)$  é definida como um conjunto de variáveis aleatórias  $Z(x_i)$  em cada ponto  $x_i$  da área  $A$ :

$$Z(x) = \{X(x_i), \forall x \in A\} \quad (11)$$

As variáveis aleatórias  $Z(x_i)$  são correlacionadas e essa correlação depende do vetor  $h$  (módulo e direção) que separa dois pontos  $x_i$  e  $x_i+h$  e da natureza da variável considerada.



---

A teoria das variáveis regionalizadas pressupõe que a variação de uma variável pode ser expressa pela soma de três componentes: a) uma componente estrutural, associada a um valor médio constante ou a uma tendência constante; b) uma componente aleatória, espacialmente correlacionada; e c) um ruído aleatório ou erro residual.

Se  $x$  representa uma posição em uma, duas ou três dimensões, então o valor da variável  $Z$ , em  $x$ , é dada por:

$$Z(x) = m(x) + e(x) + e \quad (12)$$

onde:

- $m(x)$  é uma função determinística que descreve a componente estrutural de  $Z(x)$ ;
- $e(x)$  é um termo estocástico, que varia localmente e depende espacialmente de  $m(x)$ ;
- $e$  é um ruído aleatório não correlacionado, com distribuição normal com média zero e variância  $s$ .

Apesar da teoria das variáveis regionalizadas ter sido originada através de experiências com dados de solo, não está restrita somente a estes. Segundo Journel & Huijbregts (1978), quase todas as variáveis encontradas nas ciências naturais podem ser consideradas variáveis regionalizadas, incluindo como exemplos de outros campos de aplicação: precipitação densidade demográfica, precipitação, agricultura, etc.

### 3.3.2. Hipóteses Consideradas

Segundo Journel & Huijbregts (1978) existem hipóteses de estacionariedade de uma função aleatória  $Z(x_i)$  e pelo menos uma deve ser satisfeita antes de se fazer qualquer aplicação de geoestatística.

#### **1. Hipótese de Estacionariedade Intrínseca:**

a) a esperança  $E[Z(x)]$  existe e não depende do ponto  $x$ :

---


$$E[Z(x)] = m, \quad \forall x \in \mathfrak{R}^p \quad (13)$$

b) para todo  $h \in \mathfrak{R}^p$ , a variância da diferença  $[Z(x+h)-Z(x)]$  existe e não depende do ponto  $x$ :

$$Var[Z(x+h) - Z(x)] = E\{[Z(x+h) - Z(x)]^2\} = 2\gamma(h), \quad \forall x \in \mathfrak{R}^p \quad (14)$$

## 2. *Hipótese de Estacionariedade de Segunda Ordem:*

Uma outra hipótese, mais restrita que a estacionariedade intrínseca, é a *hipótese de estacionariedade de segunda ordem* (ou de covariância estacionária), apresentando as seguintes propriedades:

a) a esperança  $E[Z(x)]$  existe e não depende do ponto  $x$ :

$$E[Z(x)] = m, \quad \forall x \in \mathfrak{R}^p; \quad (15)$$

b) para cada par de variáveis aleatórias  $\{Z(x), Z(x+h)\}$  a função de covariância existe e depende apenas do vetor  $h \in \mathfrak{R}^p$ :

$$C(x, x+h) = E[Z(x+h)] = E[Z(x+h)Z(x)] - m^2 = C(h), \quad \forall x \in \mathfrak{R}^p \quad (16)$$

Um processo estocástico de covariância estacionária implica em estacionariedade da variância:

$$Var\{Z(x)\} = E\{[Z(x) - m]^2\} = C(0) \quad (17)$$

A hipótese intrínseca pode ser vista como a limitação da estacionariedade de segunda ordem (Journal & Huijbregts, 1978).

A hipótese de estacionariedade de ordem 2 implica na existência de uma variância finita dos valores medidos, a qual pode não ser atendida por determinados fenômenos físicos e naturais, como a concentração de ouro em minas da África do

---

Sul estudada por Krige (1951). Nessa situação é aplicada a *hipótese intrínseca* que não apresenta restrição quanto à existência de variância finita.

### 3.3.3. O Semivariograma

O Semivariograma é uma ferramenta que representa a correlação entre os dados, permitindo a representação quantitativa da variação de um fenômeno regionalizado no espaço.

Esta dependência entre os valores assumidos pelo processo estocástico  $Z(x)$  em dois pontos,  $x_i$  e  $x_i+h$ , dentro de uma área  $A$ , pode ser representada em função do semivariograma.

Considerando  $(x_i, x_i+h) \in \mathfrak{R}^p \times \mathfrak{R}^p$ , o semivariograma  $\gamma(x_i, x_i+h)$  do processo estocástico é definido por

$$2\gamma(x_i, x_i+h) = E \{Z(x_i) - Z(x_i+h)\}^2 \quad (18)$$

E a função de covariância  $C(x_i, x_i+h)$  definida como,

$$C(x_i, x_i+h) = E \{Z(x_i) Z(x_i+h)\} - m(x_i) m(x_i+h) \quad (19)$$

se a *hipótese de estacionaridade de ordem 2*, puder ser satisfeita, a covariância  $C(h)$  e o semivariograma são ferramentas equivalentes para caracterizar a dependência espacial. A relação entre eles é dada por

$$\gamma(h) = C(0) - C(h) \quad (20)$$

O semivariograma pode ser estimado através da seguinte equação:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i+h)]^2 \quad (21)$$

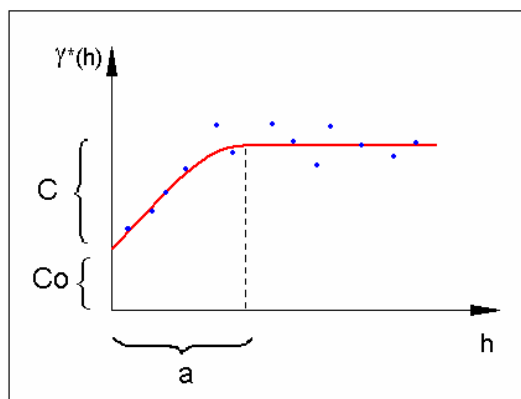
Onde  $N(h)$  é o número de pares experimentais  $[z(x_i), z(x_i+h)]$  separados pelo vetor  $h$ .

É esperado que observações mais próximas geograficamente tenham um comportamento mais semelhante entre si do que aquelas separadas por maiores distâncias. Desta maneira, espera-se que as diferenças  $\{Z(x_i) - Z(x_i+h)\}$  cresçam à medida que  $h$  cresce e, conseqüentemente, que  $\gamma(h)$  também cresça. Assim, através

---

de um gráfico  $\gamma^*(h) \times h$ , obtido com os dados experimentais, conforme exemplo na figura 02, define-se os seguintes parâmetros do semivariograma:

- *Sill ou Patamar (C)*: Geralmente, o semivariograma pára de crescer depois de uma certa distância e torna-se aproximadamente estável ao redor do valor limite. Este limite é denominado Sill.
- *Range ou Alcance (a)*: distância a qual o semivariograma atinge o patamar. A partir dela, as amostras não são mais consideradas correlacionadas espacialmente.
- *Efeito Pepita ( $C_0$ )*: valor da função do semivariograma para a distância igual a zero. Seria ideal que a função passasse pela origem. Entretanto, na prática, muitas vezes à medida que  $h$  tende para 0 (zero),  $\gamma(h)$  se aproxima de um valor positivo chamado Efeito Pepita ( $C_0$ ), que revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras. Parte desta descontinuidade pode ser também devida a erros de medição (Isaaks e Srivastava, 1989), mas é impossível quantificar se a maior contribuição provém dos erros de medição ou da variabilidade de pequena escala não captada pela amostragem.



**Figura 2**– Representação de semivariograma experimental. Fonte: Trarbach (2004).

**Fonte** – Trarbach (2004).

Muitas vezes, ao referir-se ao semivariograma, pode-se encontrar simplesmente a palavra variograma. Este prefixo *semi* diz respeito à constante  $\frac{1}{2}$  que faz parte da fórmula do semivariograma. Entretanto, quando se retira esta constante, os resultados finais não são alterados, e isto faz do variograma uma ferramenta equivalente ao semivariograma.

---

### 3.3.4. Modelos de Semivariograma

A partir da equação 20 do semivariograma experimental e do gráfico  $\gamma^*(h) \times h$ , deve-se ajustar uma função que represente bem esta ferramenta de correlação. Este passo é muito importante, pois se a escolha do modelo for inadequada, o método de estimação por krigagem será seriamente afetado.

Segue abaixo os modelos mais utilizados para o ajuste da função teórica de semivariograma. Ressalta-se que as funções apresentadas são para valores normalizados de  $\gamma^*(h)$  sendo necessária sua multiplicação pelo valor do sill (C) correspondente.

#### 1. Modelos com Patamar:

a) *Modelo esférico*: Esse modelo apresenta comportamento linear próximo à origem.

$$\gamma(r) = \begin{cases} \frac{3}{2} \frac{r}{a} - \frac{1}{2} \frac{r^3}{a^3}, & \forall r \in [0, a]; \forall r \geq a \\ 1 = sill & \end{cases}, \quad \text{Onde: } r = |h| \quad (22)$$

b) *Modelo exponencial*: Modelo com comportamento linear próximo à origem e cuja amplitude é  $3^a$

$$\gamma(r) = 1 - \exp(-3r/a) \quad (23)$$

c) *Modelo gaussiano*: Esse modelo apresenta comportamento parabólico próximo à origem, com amplitude efetiva  $a\sqrt{3}$ .

$$\gamma(r) = 1 - \exp(-3r^2/a^2) \quad (24)$$

#### 2. Modelos sem Patamar

Esses modelos apresentam dispersão espacial infinita, assim não tem variância finita e a covariância não pode ser definida. Tais modelos são representados da seguinte forma

$$\gamma(h) = C + Ah^B \quad \text{com } 0 < B < 2 \quad (25)$$

---

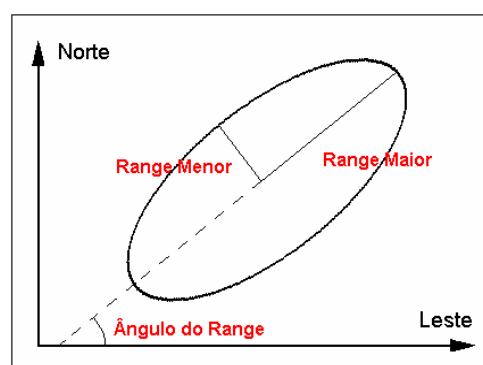
### 3.3.5. Isotropia e Anisotropia

Quando o semivariograma exibe o mesmo comportamento em todas as direções, ele é dito *isotrópico*. Nesse caso, apenas um semivariograma, chamado de não direcional, é suficiente para descrever a variabilidade da variável no campo.

Na análise dos semivariogramas experimentais, é possível verificar se as variáveis em estudo possuem a propriedade de *anisotropia*, isto é, a não homogeneidade das distribuições das variâncias em ângulos diferentes no espaço (Englund & Sparks, 1991).

Para a construção de um modelo *anisotrópico* é necessário que os valores de variograma experimental  $\gamma^*(h)$  sejam calculados e agrupados para diferentes direções de  $h$  (na prática, geralmente utiliza-se as direções de  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $135^\circ$  com tolerância de  $\pm 22,5^\circ$ ). Assim, através do gráfico  $\gamma^*(h) \times h$ , para cada direção define-se seus respectivos parâmetros.

Se a Anisotropia consistir em semivariogramas de mesmo modelo e Patamar (C), porém com Ranges (a) diferentes, então ela é denominada *Anisotropia Geométrica*. Essa espacialidade dos parâmetros é representada por uma Elipse com o *Range Maior*, *Range Menor* e *Ângulo em relação ao eixo x*. Através desta elipse, obtém-se o valor de range para qualquer direção desejada.



**Figura 3** – Representação de um modelo de anisotropia geométrica.

**Fonte** – Coutinho(2004).

---

Existe ainda um outro tipo de anisotropia em que os semivariogramas apresentam os mesmos Alcances (a) e diferentes Patamares (C). Neste caso, a anisotropia é denominada *Zonal*. Como a isotropia, a anisotropia zonal também é um caso menos freqüente nos fenômenos naturais. Também é possível encontrar combinações da anisotropia zonal e geométrica, denominada *anisotropia combinada*.

### 3.3.6. Krigagem Ordinária

O termo Krigagem é derivado do nome de Daniel G. Krige, cientista sul africano cujos trabalhos inspiraram Matheron. Esta técnica de Krigagem permite a estimativa de valores sem tendência para os locais onde estes não foram medidos, além do conhecimento da precisão associada a estas estimativas representadas pela variância de estimativa ( $\sigma_E$ ).

A Krigagem ordinária não requer o prévio conhecimento da média  $m$ . Segundo Journel & Huijbregts (1978), “a krigagem é uma técnica de estimação do melhor preditor linear não viciado de uma variável desconhecida”. Esse método baseia-se na posição de coleta dos dados, na continuidade espacial, na distancia entre os pontos, no número e qualidade dos dados em cada ponto.

#### 3.3.6.1. Krigagem Pontual

Para se fazer a estimativa em um único ponto de uma região de estudo através da krigagem ordinária, utiliza-se o *estimador pontual da Krigagem ordinária* dado por:

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i), \quad \text{com} \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (26)$$

Onde:

- $z(x_i)$  é o valor medido da variável de estudo  $Z(x)$  no ponto  $x_i$ ;
- $n$  é o número de valores medidos  $z(x_i)$ ;
- $\lambda_i$  são pesos atribuídos a cada valor medido de acordo com sua representatividade na estimação no ponto  $x_0$ .

Segundo Journel & Huijbregts (1978), minimizando a variância do erro (Var [Z<sub>x0</sub> - Z\*<sub>x0</sub>]) sob a condição de que  $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$ , os pesos  $\lambda_i$  são obtidos a partir do seguinte sistema de equações, denominado sistema de krigagem ordinária:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma(x_i, x_j) - \mu &= \gamma(x_i, x_0) \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j &= 1 \end{aligned} \quad \text{para } i = 1, \dots, n \quad (27)$$

Onde:

- $\gamma(x_i, x_j)$  e  $\gamma(x_i, x_0)$  são os valores dos semivariogramas entre os pontos  $x_i$  e  $x_j$  e entre os pontos  $x_i$  e  $x_0$ , respectivamente.
- $\mu$  é o multiplicador de Lagrange necessário para a minimização da variância do erro.

A variância de estimação da krigagem ordinária ( $\sigma_E$ ) é estimada pela expressão:

$$\sigma_E(x_0) = \mu + \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_i, x_0) \quad (28)$$

### 3.3.6.2. Krigagem Espacial Média

Segundo Journel & Huijbregts (1978) um estimador ótimo médio espacial de uma região delimitada pode ser obtido pelo conjunto de dados observados:

$$z^*(A) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (29)$$

Sendo  $z(x_i)$  o parâmetro medido na estação de coordenada  $(x_i, y_i)$  e os coeficientes  $\lambda_i$  a solução do sistema de Krigagem:

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j \gamma(x_i - x_j) + \mu = \frac{1}{|A|} \int_A \gamma(x_i, x_a) da \quad (30)$$

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad i = 1, \dots, n$$



Sendo  $\mu$  o parâmetro de Lagrange e  $n$  o número de estações. Para a implementação computacional, constrói-se uma grade com  $M$  elementos de área sobre a área de estudo. Estes elementos, numerados de  $N+1$  a  $N+M$ , são utilizados na aproximação numérica:

$$\frac{1}{|A|} \int_A \gamma(z_i, x_a) da \cong \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \gamma(z_i, z_{n+j}) \quad (31)$$

Esta aproximação obtida adotando uma função discreta do espaço  $A$ , a estimativa da precipitação média estimada da região de estudo fica:

$$z^*(A) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M z^*(x_{n+j}) \quad (32)$$

E a variância da estimação da média espacial fica:

$$\sigma_E(A) = \mu + \frac{1}{M} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \lambda_i \gamma(z_i, z_{N+j}) - \frac{1}{M^2} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M \gamma(z_{N+i}, z_{N+j}) \quad (33)$$

### 3.3.7. Validação Cruzada

Diante da tamanha importância da etapa de obtenção dos parâmetros do variograma, que constitui na construção do modelo de variabilidade propriamente dito, observa-se uma necessidade de verificar a fidelidade do modelo.

Conforme recomendado por Trarbach (2004), o ajuste inicial da função ao gráfico  $\gamma(h) \times h$  de semivariograma pode ser feito visualmente. Diante da subjetividade de tal procedimento, segundo Guimarães (2004), para este tipo de ajuste pode-se utilizar uma técnica chamada de Validação Cruzada para encontrar o modelo ideal de semivariograma.

“O processo de validação cruzada é bastante simples: remove-se um dado do conjunto de dados amostrais e estima-se o valor retirado utilizando-se apenas as amostras remanescentes. Têm-se, dessa forma, dois valores para o mesmo ponto, o real e o estimado” (ZIMBACK, 2003). Ou seja, tendo os dados observados nas estações medidas, retira-se uma estação e estima-se por krigagem o parâmetro estudado no local desta.

---

Uma vez que se tem o conjunto de  $N$  valores medidos e estimados através de um modelo ajustado,  $Z(x_i)$  e  $Z^*(x_i)$ , então pode-se definir o Erro Quadrático Médio (EQM) como:

$$EQM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [z(x_i) - z^*(x_i)]^2 \quad (34)$$

O EQM representa a fidelidade do modelo aos dados reais e o modelo que apresentar menor EQM será o modelo mais fiel à variabilidade do fenômeno.

Ressalta-se que, após a seleção do modelo, é necessária uma análise estatística dos resíduos, incluindo a realização de testes de correlação e normalidade, assim como análise visual de histograma.

---

*CAPÍTULO 4*  
***MATERIAL E MÉTODOS***

---

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

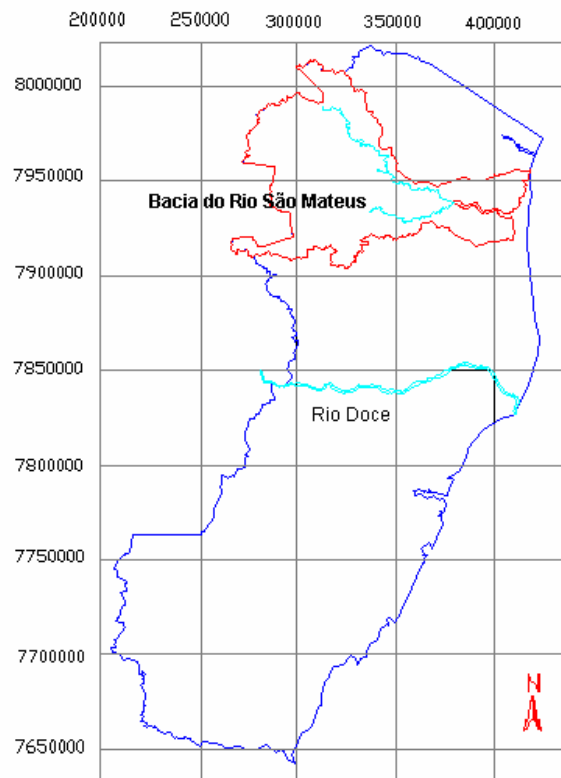
### 4.1. ÁREA DE ESTUDO

A área selecionada para a aplicação da metodologia é a bacia do rio São Mateus, localizada em sua quase totalidade ao norte do estado do Espírito Santo. Esta área foi escolhida por já ter sido utilizada em trabalhos anteriores semelhantes como os de Trarbach (2004) e Igreja (2006) possibilitando comparações e troca de experiências. Além disso, a região é contemplada com o monitoramento em uma rede de estações pluviométricas que possuem uma série histórica de medição de dados de 23 estações.

A região escolhida também torna-se muito interessante por apresentar um clima semi-árido e por ser destinada em grande parte à agricultura. Assim, ferramentas de gestão hídrica que envolvem planejamento agrícola tornam-se muito úteis.

A bacia compreende uma área de aproximadamente 7.590,25 km<sup>2</sup> localizada ao norte do estado do Espírito Santo conforme figura 04.

A região possui como cultura predominante o café, cana-de-açúcar e eucalipto e a população estimada para a região é um pouco maior do que 270.000 habitantes (IBGE, 2000).



**Figura 4** – Localização da Bacia do Rio São Mateus no mapa do estado do Espírito Santo.

**Fonte** – Trarbach (2004).

De acordo com Igreja (2006), a área de estudo apresenta basicamente três tipos de relevo:

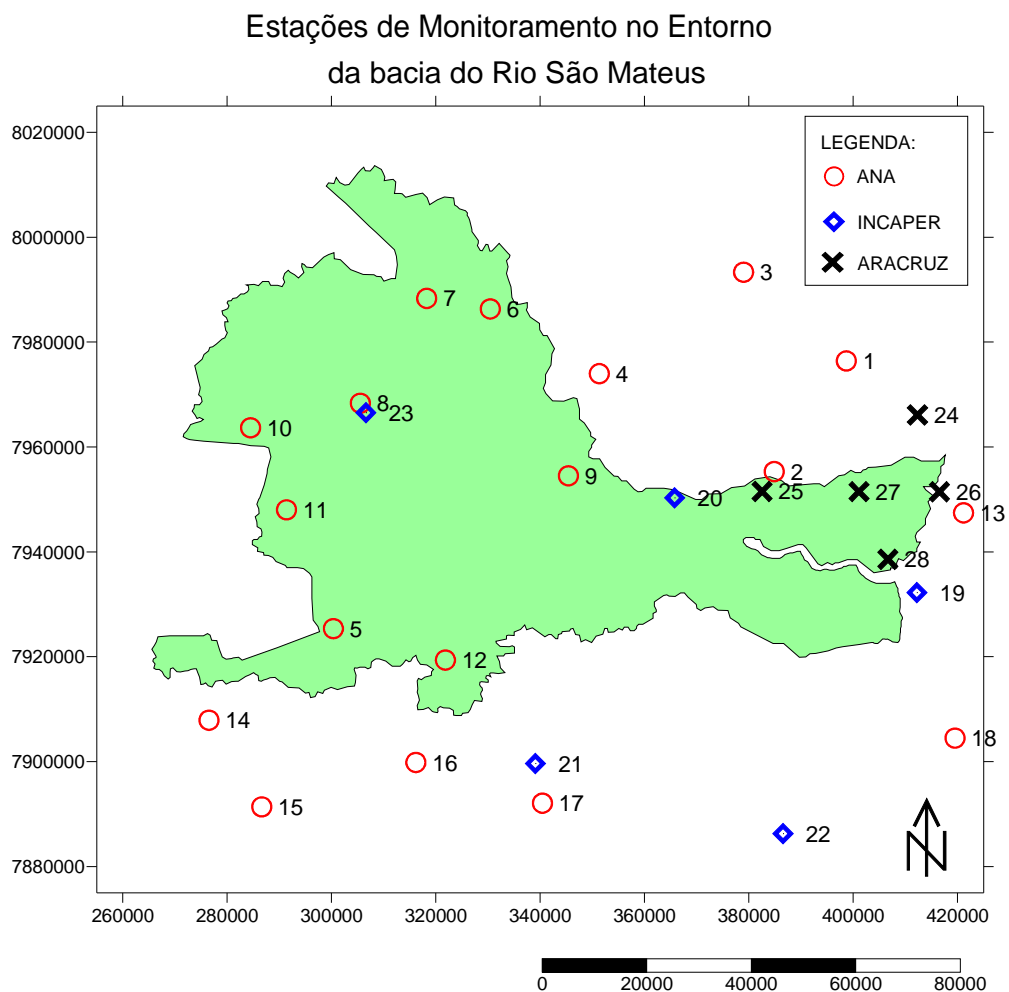
1. Litoral – Faixa retilínea ao longo do litoral, apresenta regiões inundáveis de topografia plana.
2. Tabuleiros – Região dos chapadões terciários que se aproximam do litoral, exceto em alguns trechos. Esses chapadões são levemente inclinados na direção litorânea, geralmente apresenta altitude em torno de 30 metros próximo à costa. No entanto podem alcançar altitudes de até 350 metros nas regiões de encontro com o cristalino.
3. Cristalino – As rochas deste complexo são bastante modeladas, tornando o relevo desta região acidentado. Apresenta uma região ondulada com altitudes variando em torno de 400 metros.

A temperatura da região varia de 25 a 30° C no verão e de 19 a 21° C no inverno e o clima predominante é o tropical, com verões úmidos e quentes e inverno ameno e pouco seco.

## 4.2. ANÁLISE E TRATAMENTO DOS DADOS

### 4.2.1. Dados Disponíveis

No desenvolvimento do trabalho, foram utilizados os dados climatológicos disponíveis de precipitação e temperatura com série histórica representativa. As estações de monitoramento utilizadas são gerenciadas pela Agência Nacional das Águas (ANA), Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (Incaper) e Aracruz Celulose conforme a figura 05.



**Figura 5** – Rede de estações de monitoramento selecionadas no entorno da bacia do Rio São Mateus.

---

Os dados de precipitação foram obtidos através das estações da ANA e Incaper, e os dados de temperatura através das estações do Incaper e da Aracruz Celulose.

As séries históricas dos dados disponíveis em cada estação são referentes a períodos distintos abrangendo desde 1986 a 2007. Assim, de modo a utilizar dados referentes à mesma época em todas as estações, as séries foram cruzadas e foi identificado o período em que houvesse dado em todas as estações. Foi identificado o período entre 1997 a 2005, totalizando 9 anos de série histórica após o preenchimento de algumas falhas.

Apesar desse período não constituir uma série representativa, o trabalho foi desenvolvido com o objetivo maior de aplicação da metodologia, salientando a necessidade de utilizar um período maior de dados.

#### *(a) Precipitação*

Os dados de precipitação utilizados no trabalho foram obtidos através das medições pontuais de 23 postos de monitoramento localizadas no entorno da bacia do rio São Mateus, que tinham medições no período de 9 anos (1997 a 2005). Ressalta-se que algumas estações possuíam dados desde a década de 50, mas que de modo a obter dados mais homogêneos, compatibilizando os dados de temperatura e precipitação, foram considerados somente os dados dos 09 anos comuns a todas as estações.

Dentre as estações utilizadas, dezoito (18) são monitoradas pela Agência Nacional das Águas (ANA) e que, inclusive, foram utilizadas nos trabalhos de Trarbach (2004) e Igreja (2006). As cinco (05) estações restantes são de responsabilidade do Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (Incaper) que disponibilizaram medições de precipitação e temperatura.

#### *(b) Temperatura*

Para a aplicação da metodologia proposta no presente trabalho é necessária a disponibilidade da temperatura média mensal nos pontos onde estão localizadas as 23 estações pluviométricas.

---

Uma vez que nos locais das estações monitoradas pela ANA não há medições de temperatura, estes valores foram estimados através da técnica de krigagem considerando que estas estimativas são medições confiáveis de temperatura no local.

Sabe-se que o ideal para um estudo de caso, é a disponibilidade de medição de precipitação e temperatura em todos os postos utilizados. Entretanto, diante da indisponibilidade de dados encontrada, os dados de temperatura foram estimados nos locais desejados com o objetivo principal de aplicação da metodologia.

Inicialmente, estavam disponíveis somente os dados de temperatura das 05 estações de monitoramento da Incaper. Posteriormente, com a disponibilidade dos dados de temperatura de mais 05 estações de monitoramento da Aracruz, pôde ser feita uma avaliação da influência deste aumento de precisão nos dados de temperatura.

#### 4.2.2. Preenchimento de Falhas

A série histórica de dados disponíveis definida conforme descrito anteriormente, apresentaram falhas, ou seja, ausência de dados.

O somatório do total mensal de cada mês só foi realizado para os meses que possuíam todas as suas medições diárias. Para os meses que não possuíam todas as medições diárias, seus valores totais mensais foram estimados através do método do inverso da distância.

#### 4.2.3. Cálculo da Evapotranspiração Potencial (ETP) pelo Modelo de Thornthwaite-Mather (1955)

Com base nos dados pontuais de médios mensais de temperatura, foi aplicado o modelo de Thornthwaite-Mather (1955), através das equações 04, 05, 06 e 07, para o cálculo da evapotranspiração potencial total mensal em cada estação de monitoramento.



---

Com os valores de evapotranspiração potencial total mensal médio  $ETP_i$  e precipitação total mensal média  $P_i$  foram calculados o parâmetro  $(P - ETP)_i$  total médio de cada mês  $i$ .

#### 4.3. MODELAGEM DO SEMIVARIOGRAMA E VALIDAÇÃO CRUZADA

O procedimento de modelagem dos semivariogramas foi realizado para cada mês com base nas médias mensais do parâmetro (P-ETP).

Este procedimento foi realizado conforme descrito no item 3.3.3 utilizando a equação 20 para montagem dos gráficos  $\gamma^*(h) \times h$  montados para vetores  $h$  nas direções  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $135^\circ$  com tolerância de  $22,5^\circ$ . Nesta etapa foi utilizado o programa de planilha eletrônica Microsoft Office Excel, versão 2003, escrito e produzido pela Microsoft.

Inicialmente, através de análise visual, os parâmetros de semivariograma ( $C_0$ ,  $C$  e  $a$ ) foram definidos. Posteriormente, esses parâmetros foram melhores selecionados através da aplicação da técnica de validação cruzada descrita no item 3.3.7.

A validação cruzada foi realizada com a utilização do programa *REDE-GEO* (COUTINHO, 2004) submetendo as funções ajustadas aos testes descritos e selecionando automaticamente o que apresentou menor erro quadrático médio (EQM), calculado através da equação 33.

Após a seleção dos parâmetros do semivariograma, através do mínimo EQM, foram feitas análises estatísticas dos erros entre os dados medidos e estimados. Esta etapa foi realizada através do Microsoft Office Excel 2003 e do software livre R, versão 2.7.1 (2008-06-23) desenvolvido pela "R Foundation for Statistical Computing".

#### 4.4. ESTIMATIVAS PONTUAIS

Para cada modelo mensal de semivariograma foram realizadas diversas estimativas pontuais em toda a área de estudo de modo a avaliar a distribuição espacial do parâmetro (P-ETP), bem como da variância de estimativa.

---

Este procedimento consiste na realização de estimativas pontuais através de Krigagem Ordinária em pontos dentro da área de estudo definidos de acordo com uma malha pré-definida que subdivide a área em diversos “pixels”.

#### 4.4.1. Malha

A malha utilizada no presente trabalho, foi a mesma adotada por Trarbach (2004) e Igreja (2006) subdividindo a área de estudo em 35 divisões na direção X e 24 divisões na direção Y, resultando “pixels” de 4.344,6 x 4.370,8 m.

Segundo Trarbach (2004), a malha foi definida avaliando o ganho de precisão na estimativa, de acordo com o refinamento da malha, em relação ao esforço computacional realizado.

#### 4.4.2. Estimativas Pontuais

As estimativas pontuais foram realizadas em cada ponto da malha pré-definida através da técnica de krigagem. Conforme descrito em 3.3.6.1, resolvendo-se o sistema de equações (27), são obtidos os pesos e o multiplicador de Lagrange para cada estimativa de P-ETP e da sua respectiva variância de estimativa  $\sigma_E(x_i)$  no ponto  $x_i$ , dadas pelas fórmulas 26 e 28 respectivamente.

Esse procedimento foi realizado com a utilização do programa *REDE-GEO* desenvolvido por Coutinho (2004).

#### 4.4.3. Confeccção de Mapas

Com as estimativas pontuais distribuídas em toda a área de estudo, foram gerados os mapas de modo a representar espacialmente os parâmetros estimados. Esta etapa foi realizada através do programa “Golden Software Surfer 8.0”.

---

#### 4.5. SELEÇÃO DAS CONFIGURAÇÕES ÓTIMAS

Sabendo que a configuração da rede é um dos fatores mais importantes para o ganho de precisão, destaca-se a necessidade de otimização das redes existentes, rearranjando, adicionando ou até mesmo retirando estações de forma que estas confirmem às medições o maior grau de precisão possível em relação ao número de estações.

Informando as médias dos dados medidos nas estações, do semivariograma, e da malha, através do *REDE-GEO*, determinou-se o melhor subgrupo de  $n$  estações dentre as 23 existentes.

Selecionando-se  $n$  estações, dentre as 23 existentes, é possível formar inúmeros sub-grupos de  $n$  estações que formam configurações distintas. No presente trabalho, calculou-se para todas as possíveis combinações de  $n$  estações, as médias das variâncias de estimativa da região  $\sigma_E(A)$  através das equações 30, 32 e 33. O subgrupo de  $n$  estações que apresentou a menor média de variância de estimativa na região, foi identificado como o que forma a melhor configuração no que diz respeito à precisão da estimativa. Ou seja, a configuração ótima de  $n$  estações.

Utilizando este procedimento, foram obtidas as configurações ótimas para subgrupos de  $n$  estações e seus respectivos valores de  $\sigma_E(A)$ , atribuindo a  $n$  valores de 1 a 23. Esses resultados foram representados em um gráfico  $\sigma_E(A)$  x N° de Estações onde é possível avaliar o número e a configuração ideal de estações, de acordo com a necessidade de precisão da informação.

De modo a comparar as configurações ótimas obtidas com base na precisão das estimativas de  $P_i$  e  $(P-ETP)_i$ , o procedimento acima foi realizado para as duas variáveis de estudo. Por tratar-se do último mês do período de seca e apresentar o menor negativo acumulado de  $(P-ETP)_i$  denominado NegAc, foram utilizados os dados mensais  $P_{10}$  e  $(P-ETP)_{10}$  referentes a outubro.

---

#### 4.6. CÁLCULO DO ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO SOLO

Considerando os critérios assumidos pelo modelo de Thornthwaite-Mather (1955) e com as estimativas pontuais de  $(P - ETP)_i$  mensais para todos os meses  $i$ , o modelo de Balanço Hídrico Climatológico foi aplicado conforme item 3.2.2.

O modelo foi aplicado em uma sub-região “A”, pertencente à bacia do rio São Mateus, delimitada de modo a representar uma área destinada à agricultura. Trabalhou-se com essa sub-região com o objetivo de estimar a disponibilidade hídrica na área delimitada, permitindo a identificação de tipos de cultura que seriam viáveis na região em função de sua profundidade radicular.

A região definida está compreendida entre as coordenadas geográficas UTM , Datum SAD69: A(298750m,7948750m); B(321250m,7948750m); B(321250m ,7971250m); C(298750m,7971250m). Esta região contempla os municípios de Água Doce do Norte, Ecoporanga, Vila Pavão e Barra de São Francisco.

O solo da sub-região de estudo é caracterizado como latossolo amarelo, latossolo vermelho-amarelo e argilossolo amarelo (IBGE, 2008).

A atividade agrícola na região é predominantemente voltada para o cultivo de café, cana-de-açúcar, fruticultura incluindo banana, coco, goiaba, mamão, manga e maracujá. É comum também observar na região o cultivo de eucalipto.

De modo a simular o plantio de diversos tipos de cultura na área, considerou-se a Capacidade Máxima de Armazenamento de Água no Solo (CAD) uniforme em toda a área “A”, função do tipo de solo / tipo de cultura, de acordo com a equação 08. Considerando o tipo de solo da região e o tipo de cultura predominante, com profundidades radiculares variando em média de 50cm a 200cm, tem-se os seguintes valores estimados:

- Café CAD=59mm;
- Cana-de-açúcar: CAD=83mm;
- Eucalipto: CAD=236mm;

Para a realização desta etapa, foi desenvolvido um programa computacional, em linguagem de programação Pascal 6.0, capaz de extrair os dados mensais dos diversos arquivos de dados gerados pelo REDE-GEO e calcular os valores de

---

Negativo Acumulado (NegAc), Armazenamento de Água no Solo (ARM) e Alteração do Volume de Água no Solo (ALT) para cada “pixel” da malha.

De modo a contemplar uma faixa considerável que permita a simulação de diversos tipos de cultura para a região, o procedimento foi realizado para valores de CAD de 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200, 225, e 250. Esta etapa tem com objetivo simular a distribuição espacial do armazenamento de água no solo para diversos tipos de cultura servindo como ferramenta para o planejamento agrícola.

---

*CAPÍTULO 5*  
***RESULTADOS E DISCUSSÕES***

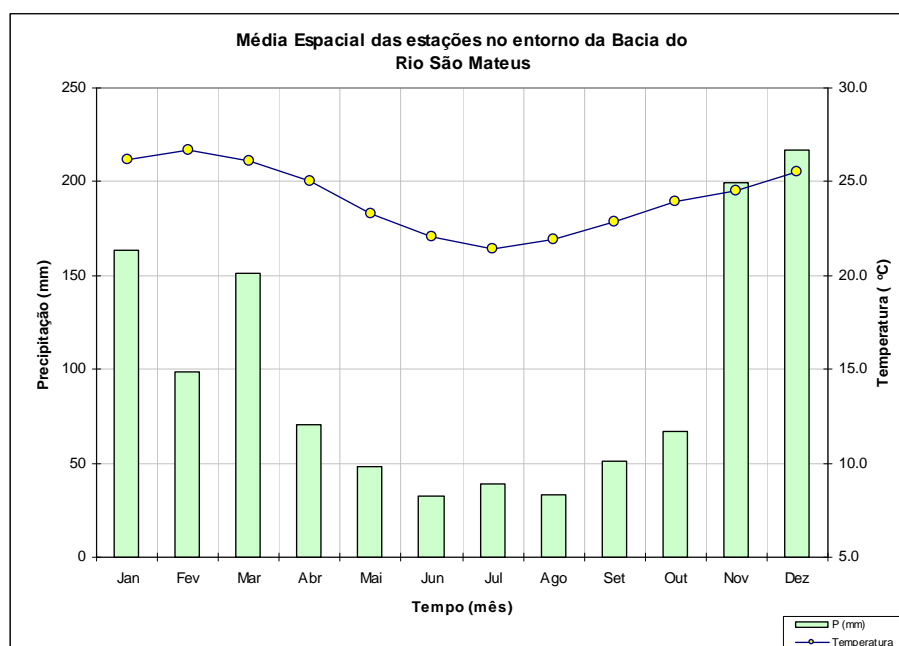
---

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1. ANÁLISE DOS DADOS

A figura 05 apresenta um mapa com a localização das estações de monitoramento utilizadas no presente trabalho. Cabe observar que existem estações de monitoramento localizadas muito próximas com destaque para as estações 8 e 23 que quase se sobrepõem. Acredita-se que as duas estações tenham representatividades muito parecidas no fenômeno de precipitação.

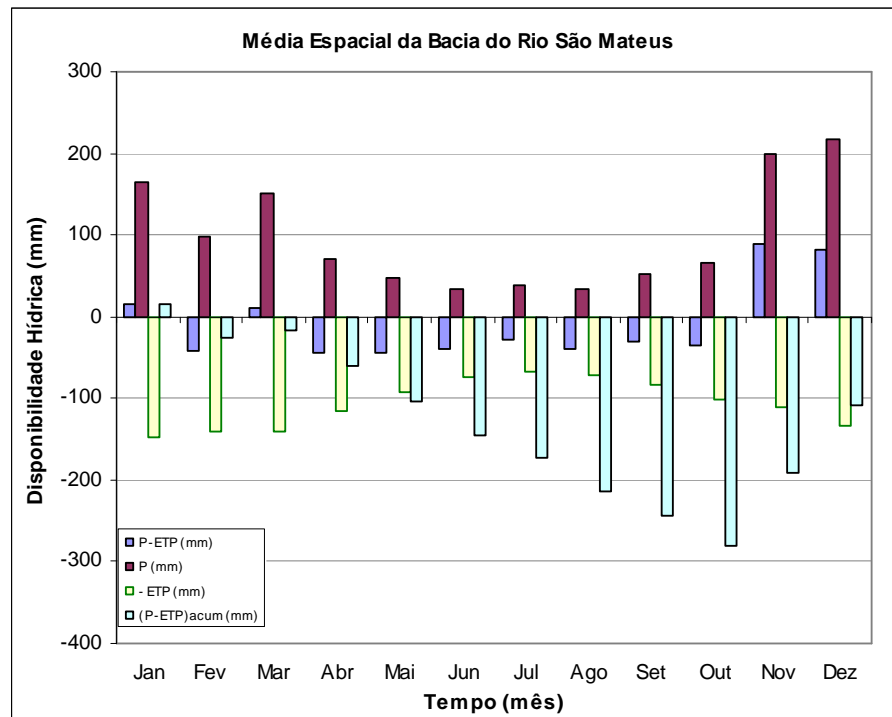
Os dados de temperatura foram estimados conforme item 4.2.1, e segue abaixo no gráfico 01 as médias espaciais dos valores médios mensais de temperatura e precipitação considerando as 23 estações de monitoramento.



**Gráfico 1** – Média de precipitação total mensal e temperatura mensal média das 25 estações de monitoramento.

No gráfico 01, é possível perceber a influência da sazonalidade ao longo do ano caracterizando os períodos de abril a outubro como seco e novembro a março como chuvoso.

De modo a analisar preliminarmente os dados de disponibilidade hídrica na região, o gráfico 02 apresenta estimativa espacial média dos referidos parâmetros obtidos através de média aritmética dos dados das estações. Destaca-se o valor negativo de  $(P - ETP)_i$  no mês de fevereiro, mesmo sendo caracterizado como chuvoso.

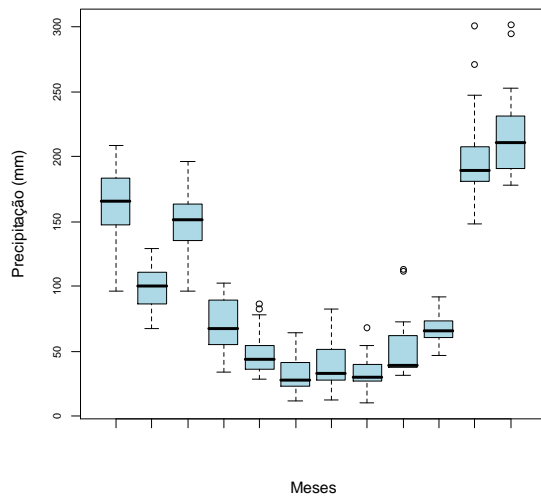


**Gráfico 2** – Disponibilidade Hídrica Mensal Média obtidas com 25 estações de monitoramento no entorno da Bacia do Rio São Mateus.

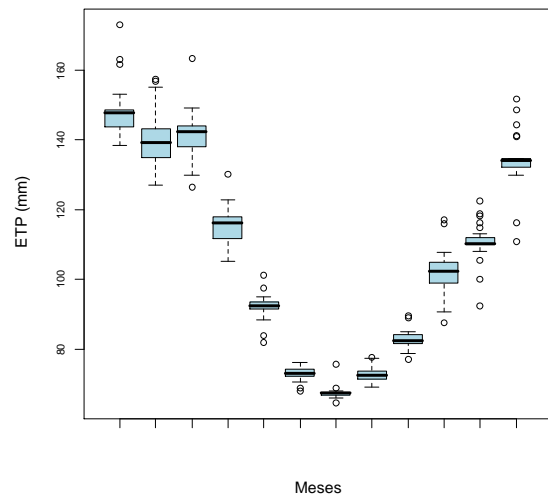
Os gráficos 03 e 04 foram obtidos através das médias mensais obtidas em cada estação de monitoramento com o objetivo de avaliar o comportamento espacial das variáveis de estudo. É possível identificar visualmente um comportamento próximo da normalidade.

Observa-se também que as amplitudes dos dados de precipitação de cada mês são maiores que as amplitudes dos dados de evapotranspiração potencial. Isso mostra que a variabilidade espacial dos dados de precipitação é muito maior que a dos dados de evapotranspiração.





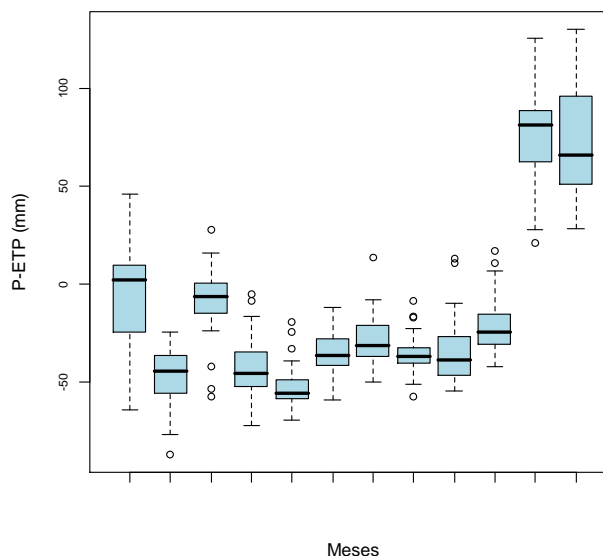
**Gráfico 3** – Box-plot das Médias Mensais de Precipitação (P) das 23 estações.



**Gráfico 4** – Box-plot das Médias Mensais de Evapotranspiração Potencial (ETP) das 23 estações.

Conforme descrito em 4.2.1, utilizando inicialmente somente os dados de temperatura de 05 estações, e posteriormente os dados de 10 estações, foi feita uma avaliação da influência deste aumento de precisão no resultados da estimativa de P-ETP. Não foram observadas alterações significativas nas estimativas de P-ETP. Uma vez que a variabilidade espacial da temperatura é muito menor que a da precipitação, as estimativas de ETP não constituem fator considerável na precisão do resultado da estimativa de P-ETP.

Analisando o gráfico 05 de “box-plot” de  $(P - ETP)_i$  é possível identificar uma simetria razoável das distribuições mensais com alguns “out-liers”.



**Gráfico 5** – Box-plot das Médias Mensais de (P-ETP)<sub>i</sub> das 25 estações.

De acordo com o teste de Shapiro-Wilk realizado para os dados de cada mês, foi observada a não normalidade dos dados de março, maio, setembro e outubro considerando 5% de nível de significância para rejeição da hipótese nula. Esses meses foram os que apresentaram distribuições com maior assimetria e/ou maior número de “out-liers”.

## 5.2. MODELAGEM E VALIDAÇÃO DOS SEMIVARIOGRAMAS

Através da metodologia descrita no item 4.3 os modelos dos semivariogramas mensais foram construídos e validados através da Validação Cruzada. Para cada mês, foram definidos Range Maior, Range Menor, Sill, e tipo de função de semivariograma.

Todos os modelos apresentaram anisotropia geométrica, e o modelo que melhor se ajustou aos dados foi o do tipo esférico.

Analisando os resultados da validação cruzada e os gráficos  $\gamma^*(h) \times h$  montados para vetores  $h$  nas direções  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  e  $135^\circ$ , observou-se que os ajustes visuais em determinadas direções nem sempre são os que conferem menor erro quadrático médio (EQM). Isso se deve ao fato de que estes modelos são anisotrópicos

---

bidimensionais, e representam, em um único modelo, a variabilidade do fenômeno no espaço integrando todas as direções. Essas funções de semivariogramas foram construídas de modo a representar a variabilidade em todas as direções com menor erro possível.

No anexo 01, encontra-se a análise dos erros obtidos entre os valores de P-ETP observados e os estimados com cada modelo. Observa-se que não há tendências e que a distribuição aproxima-se da normalidade.

Nos testes estatísticos realizados nos resíduos, todos os modelos apresentaram resultados satisfatórios dentro da faixa de significância aceitável. Pode-se afirmar dentro das faixas de probabilidade específicas dos resultados de cada teste que:

1. Há correlação entre os valores observados e estimados de  $(P-ETP)_i$ ;
2. Não há correlação entre os valores estimados e os resíduos de  $(P-ETP)_i$ ;
3. Os resíduos de  $(P-ETP)_i$  apresentam distribuição normal;

De acordo com o mês observa-se que os patamares dos modelos apresentaram variação significativa (300 a 1500).

Os maiores patamares encontraram-se nos meses mais chuvosos onde ocorre uma maior variabilidade com destaque para novembro, dezembro e janeiro. Esse é um indicativo de que, devido à maior variabilidade espacial, a precipitação tem maior influência no modelo de semivariograma de  $(P-ETP)_i$  do que a evapotranspiração potencial.

### 5.3. ESTIMATIVAS PONTUAIS

De acordo com o item 4.4, foram feitas as estimativas pontuais  $z^*(x_o)$  de  $(P - ETP)_i$  para todos os meses  $i$  com o objetivo de avaliar a distribuição espacial das estimativas, bem como as suas respectivas variâncias de estimação  $\sigma_E^*(x_o)$ .

É possível identificar que os valores das estimativas de  $(P - ETP)_i$  negativos ocorrem no mês de fevereiro e no período de abril a outubro, assumindo uma coloração azul. Nos demais meses observou-se valores positivos de disponibilidade hídrica, assumindo colorações entre o verde, amarelo e vermelho. Afirma-se que as

---

estimativas acompanharam a tendência sazonal das médias medidas, conforme mostrado no gráfico 01.

Nas figuras 06 a 29 que apresentam os mapas de estimativas por krigagem ordinária, a variância de estimação está representada através do desvio padrão para possibilitar uma melhor comparação entre os níveis de precisão de cada mês.

De modo geral, pode-se afirmar que, nos meses de maio, junho, julho, agosto, setembro e outubro, a maior parte da região apresentou valores de desvio padrão máximos de 10mm, assumindo uma coloração do azul claro a escuro. Nos demais meses, observou-se, de modo geral na região, valores de desvio padrão acima de 10mm, assumindo uma coloração do azul claro ao marrom.

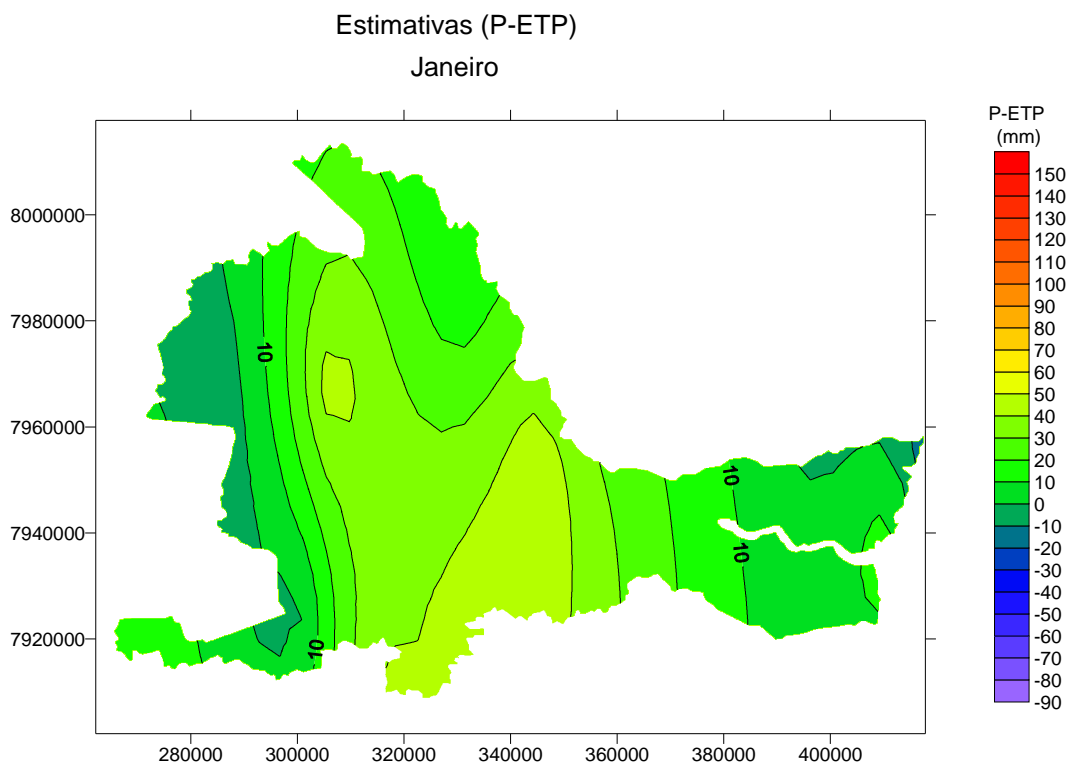
Observa-se que os valores mais altos deste parâmetro foram observados nos meses mais chuvosos, caracterizando uma baixa precisão devido à alta variabilidade espacial dos dados mensais de  $(P - ETP)_i$ , representada pelos patamares dos semivariogramas mensais.

Em contrapartida, os valores menores foram observados nos meses mais secos caracterizando menor variabilidade espacial do parâmetro estudado.

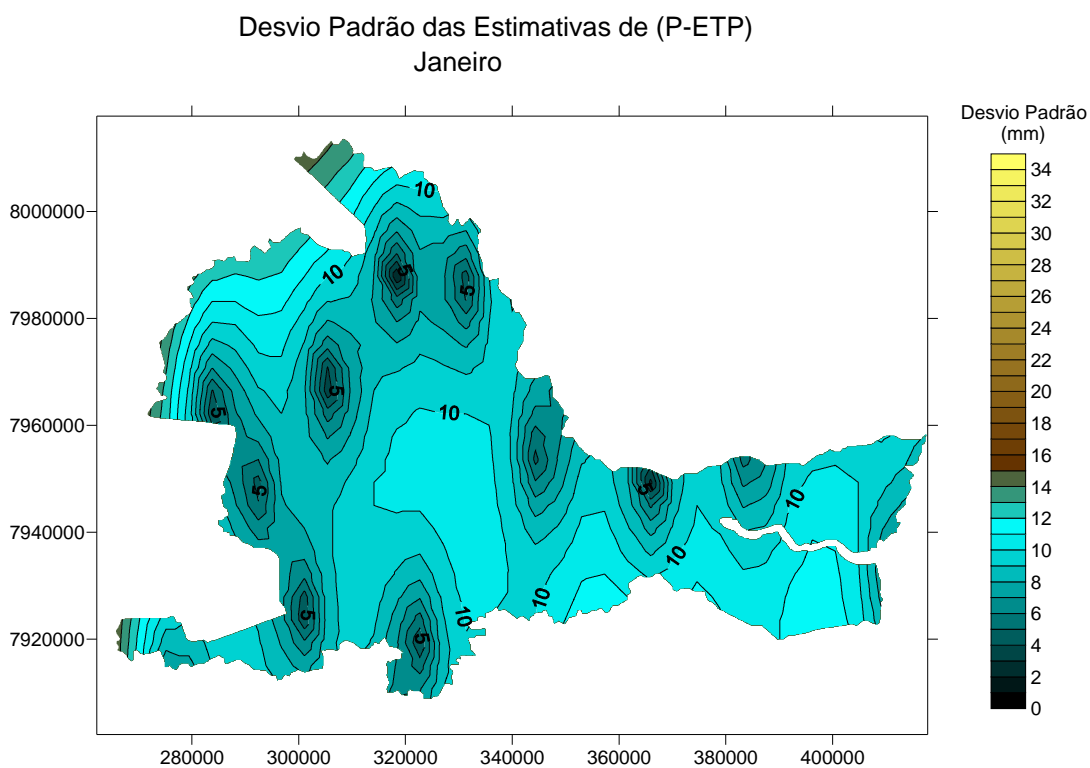
Segundo Journel & Huijbregts (1978) o intervalo de confiança de 95% está compreendido entre  $z^*(x_o) \pm 2\sqrt{\sigma^*_E(x_o)}$  ou seja, está próximo à estimativa em mais ou menos o dobro do desvio padrão de estimativa. Nas regiões em que as estimativas  $z^*(x_o)$  estão em torno de zero, o intervalo de confiança pode atingir valores positivos ou negativos, dificultando a caracterização da disponibilidade hídrica como déficit ou excedente hídrico.

Pode-se afirmar que a maior parte dos meses apresentou mapas de desvio padrão com coloração mais azulada significando valores em torno de 10 mm. Isso caracteriza um intervalo de confiança de 95% compreendido entre  $z^*(x_o) \pm 20mm$ .

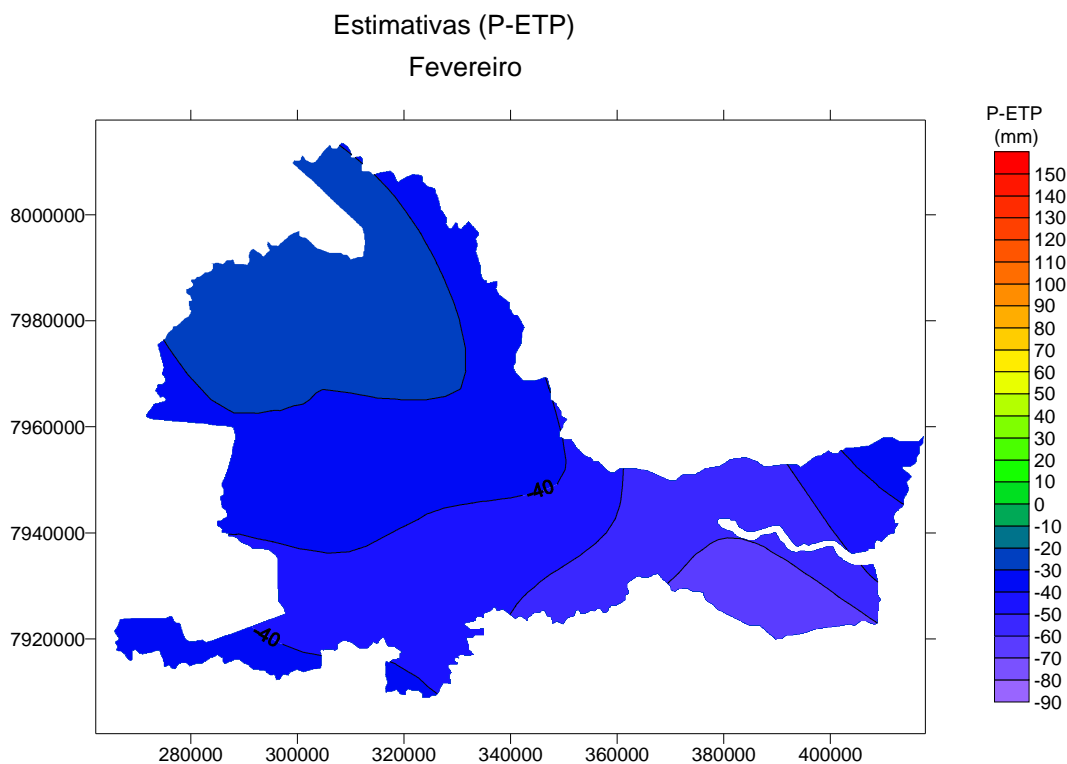
Considerando esse nível de precisão como uma informação mensal isolada, pode-se afirmar que não é um erro de estimação muito significativo, mas considerando sua utilização nos cálculos de balanço hídrico onde são feitos somatórios de estimativas de vários meses, há uma propagação de incertezas que pode gerar erros significativos.



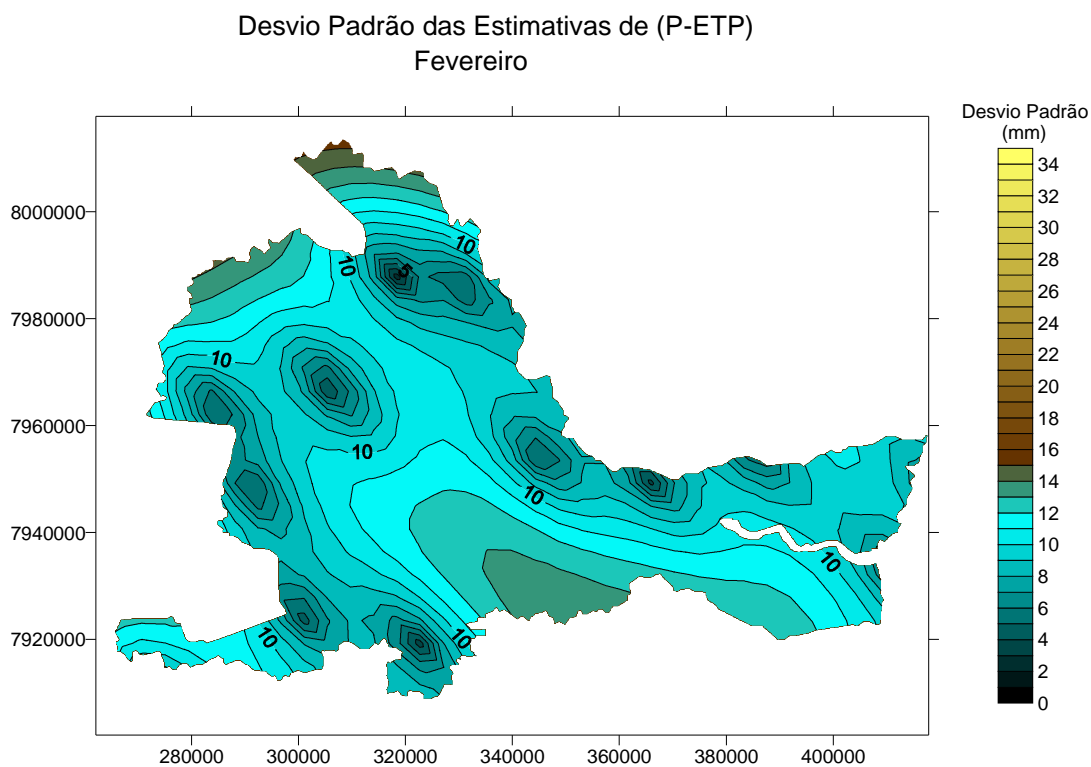
**Figura 6** – Estimativas de  $(P-ETP)_1$  médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de janeiro.



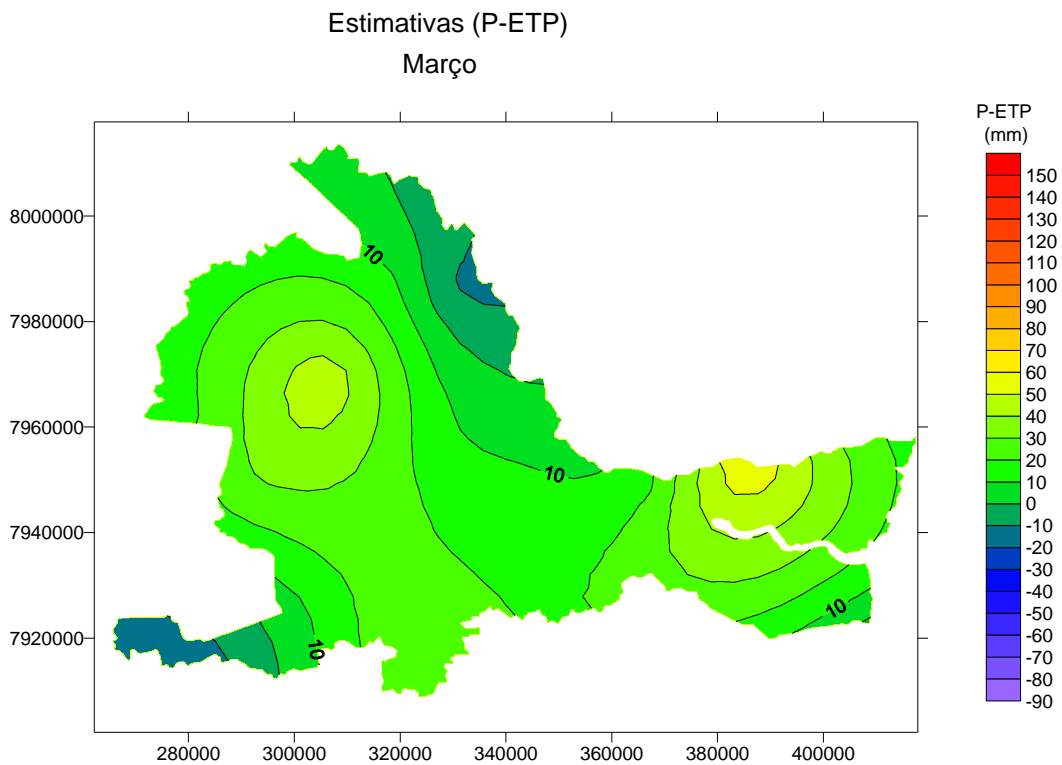
**Figura 7** – Variância de Estimativas de krigagem de  $(P-ETP)_1$  médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de janeiro.



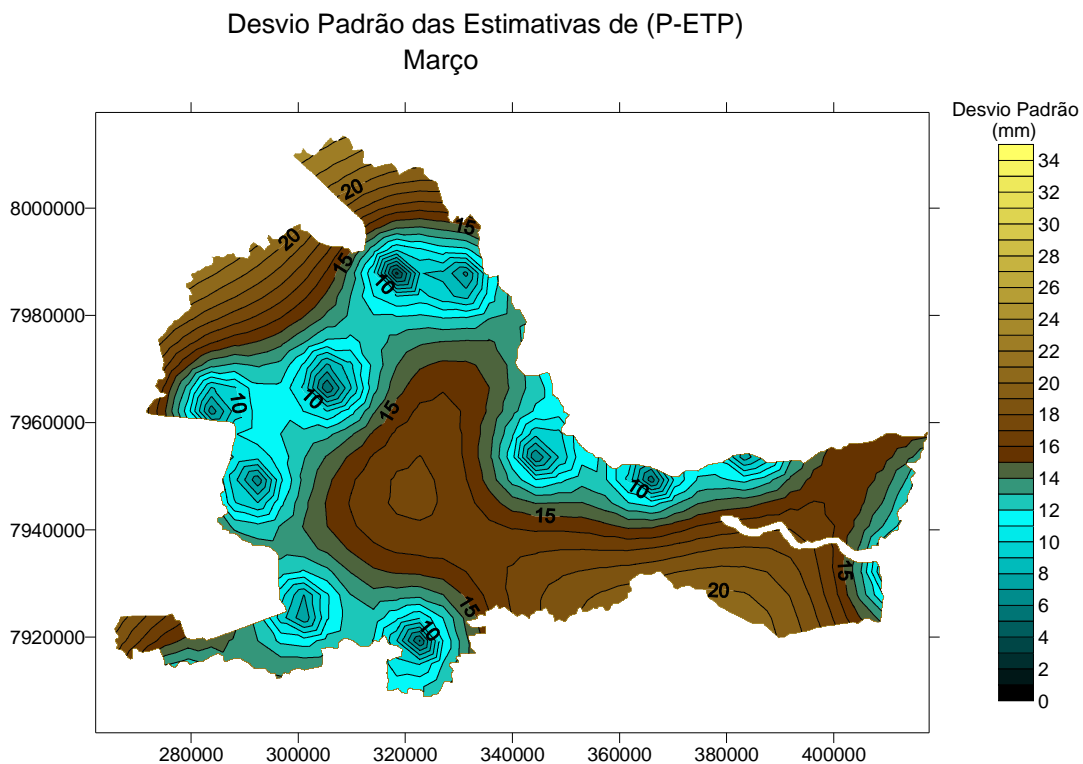
**Figura 8** – Estimativas de  $(P-ETP)_2$  médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de fevereiro.



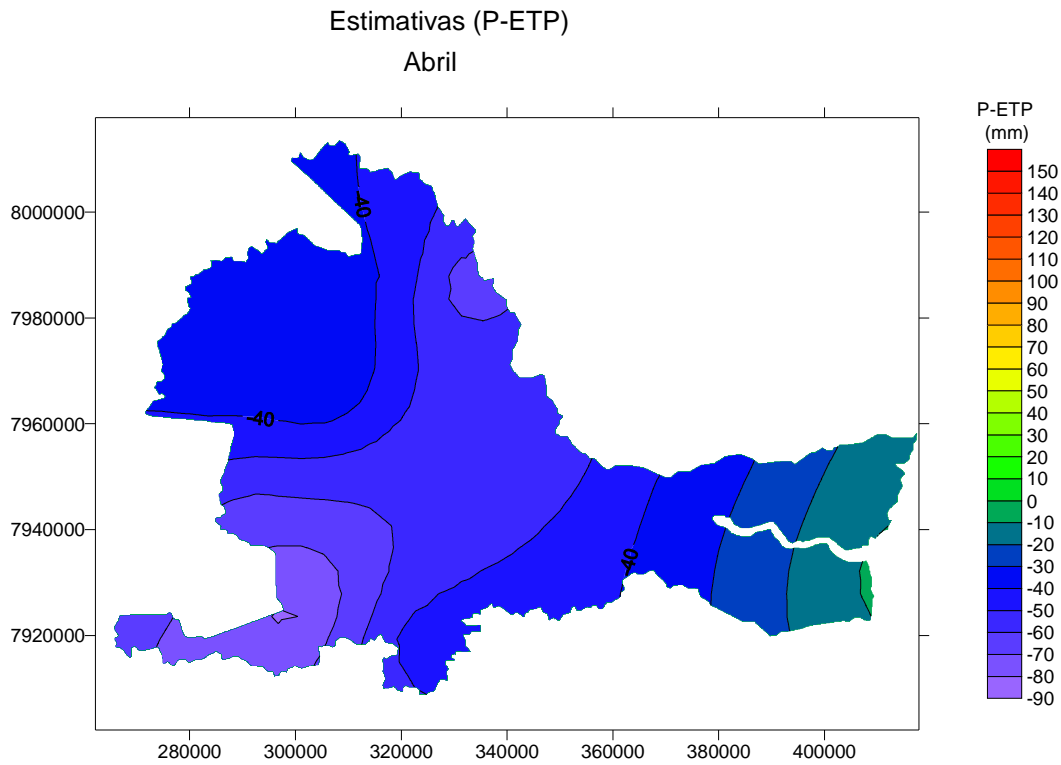
**Figura 9** – Variância de Estimativas de krigagem de  $(P-ETP)_2$  médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de fevereiro.



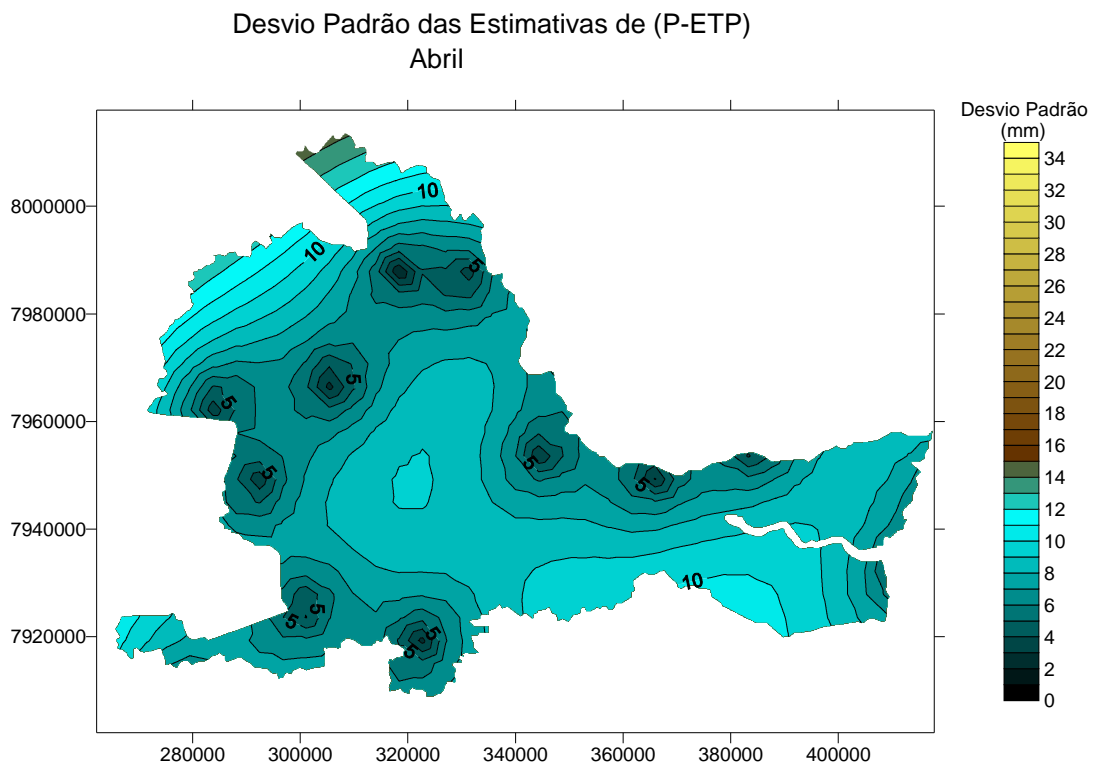
**Figura 10** – Estimativas de  $(P-ETP)_3$  médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de março.



**Figura 11** – Variância de Estimativas de krigagem de  $(P-ETP)_3$  médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de março.

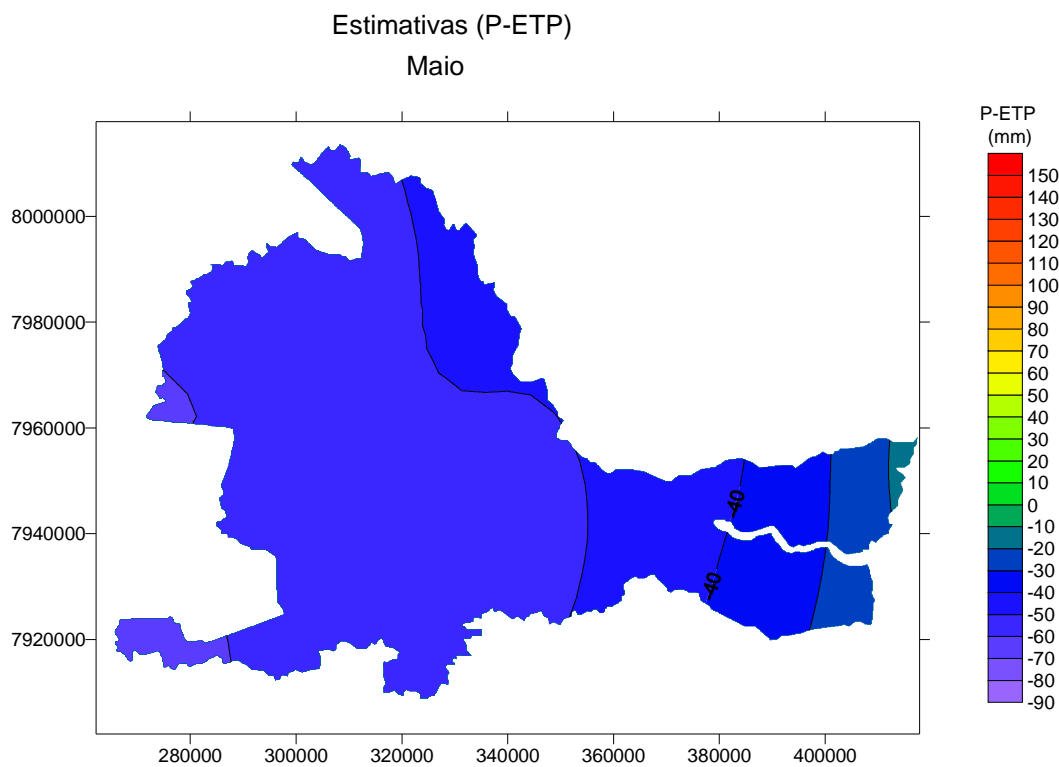


**Figura 12** – Estimativas de  $(P-ETP)_4$  médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de abril.

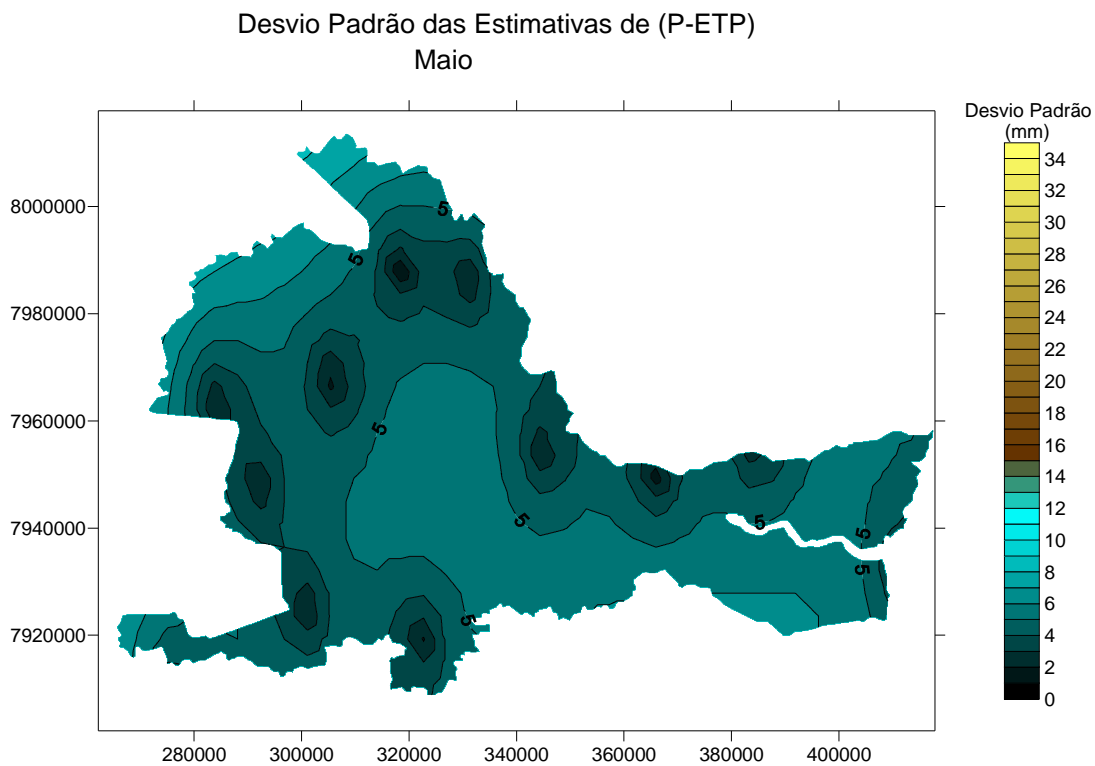


**Figura 13** – Variância de Estimativas de krigagem de  $(P-ETP)_4$  médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de abril.

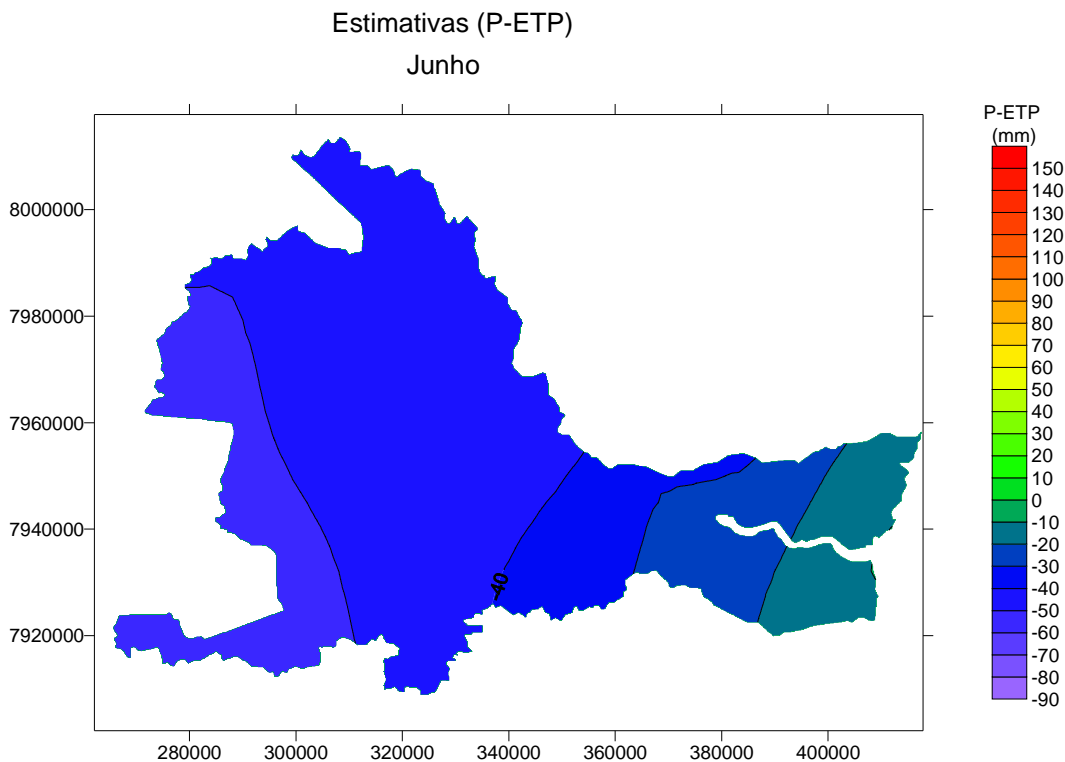




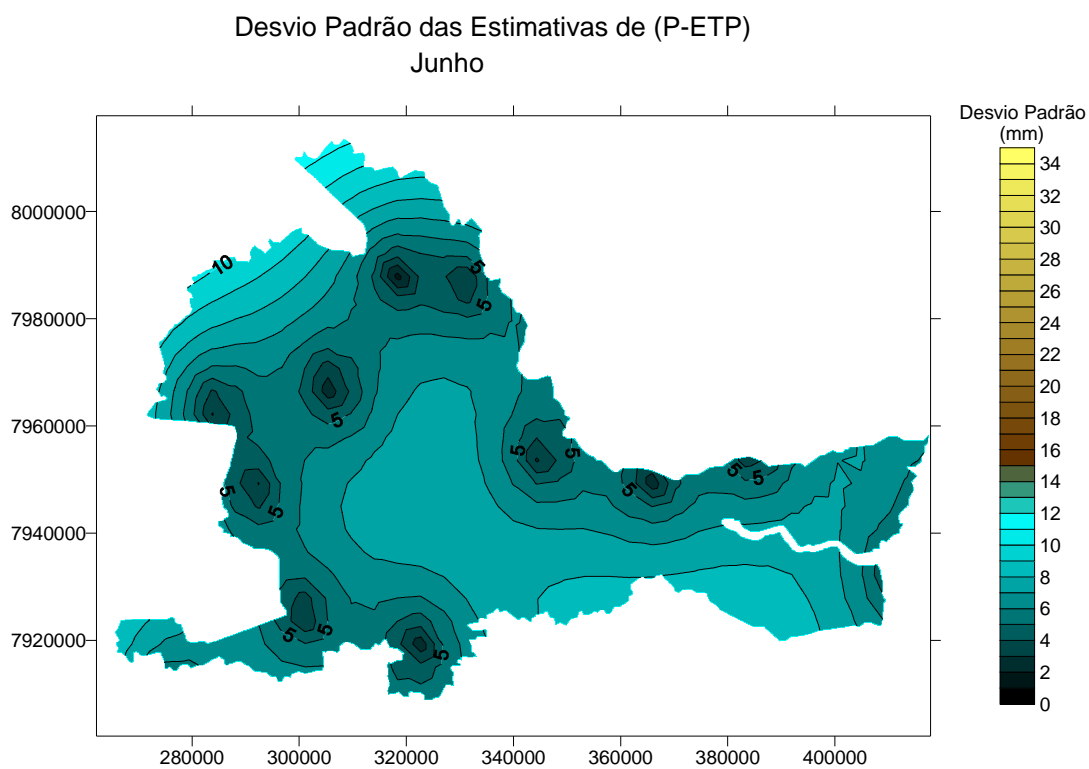
**Figura 14** – Estimativas de  $(P-ETP)_5$  médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de maio.



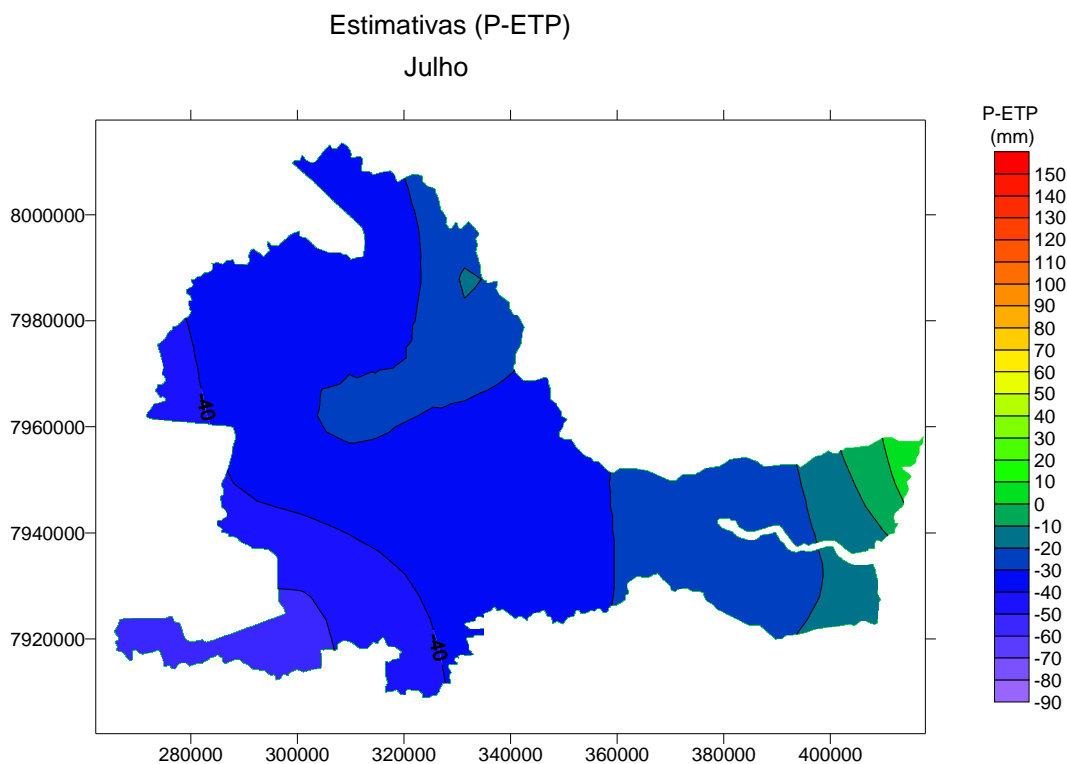
**Figura 15** – Variância de Estimativas de krigagem de  $(P-ETP)_5$  médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de maio.



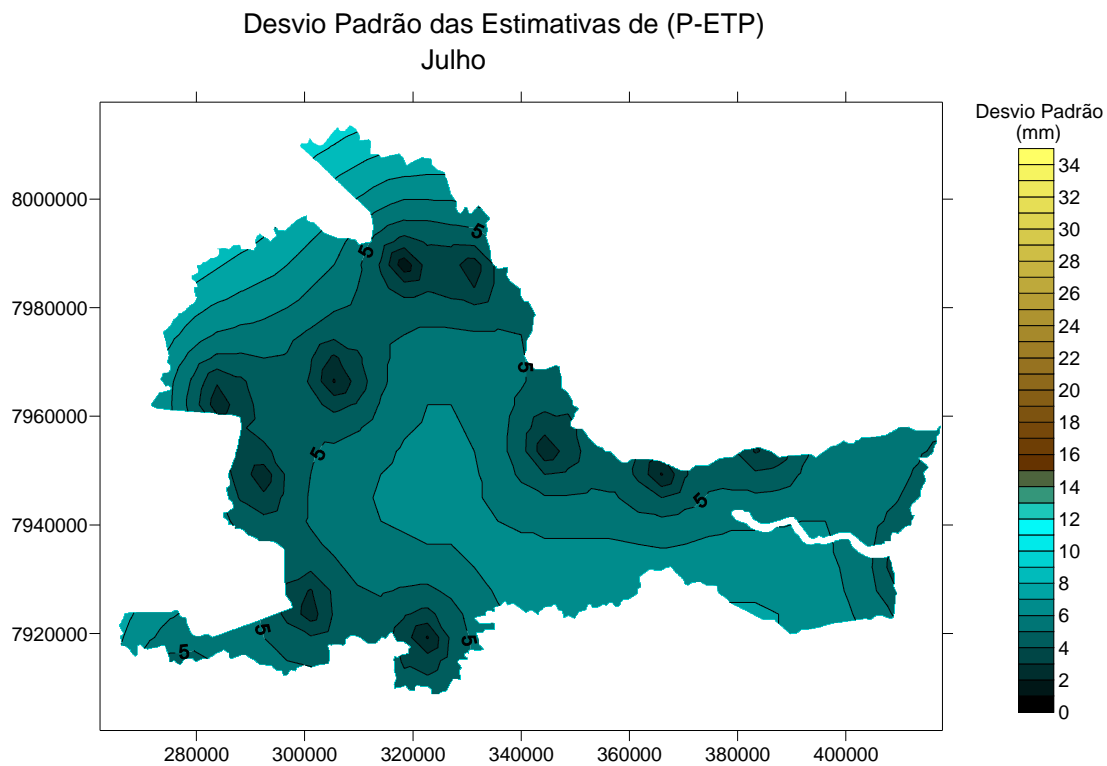
**Figura 16** – Estimativas de  $(P-ETP)_6$  médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de junho.



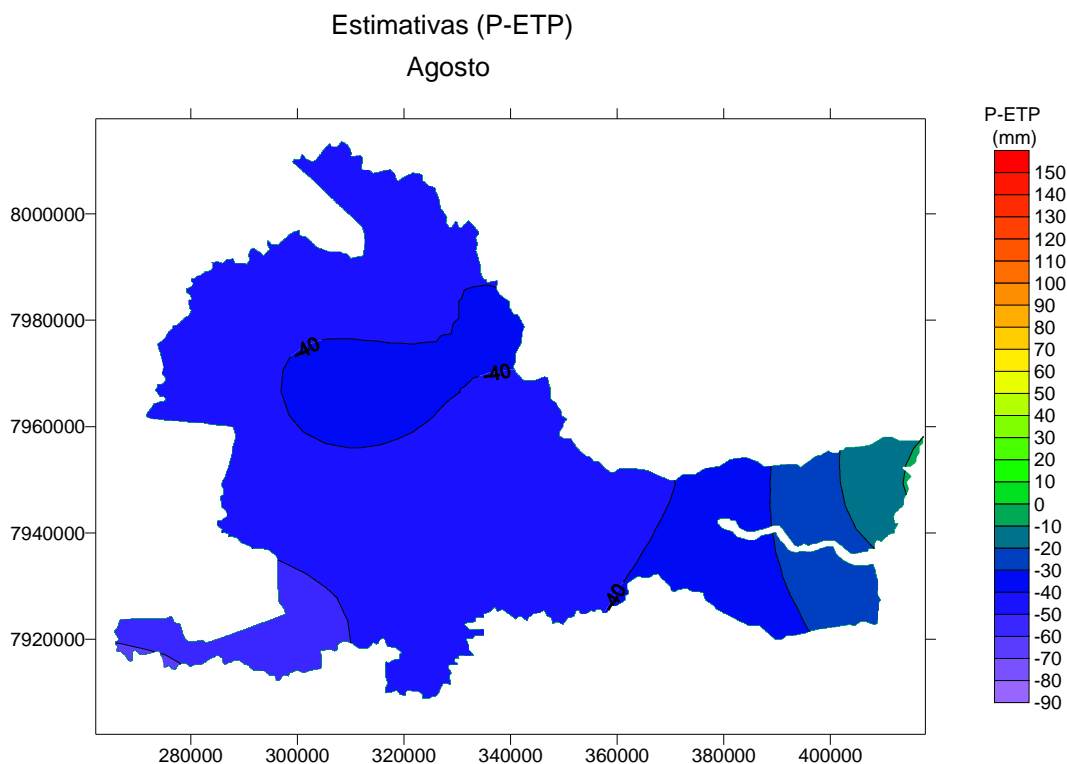
**Figura 17** - Variância de Estimativas de krigagem de  $(P-ETP)_6$  médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de junho.



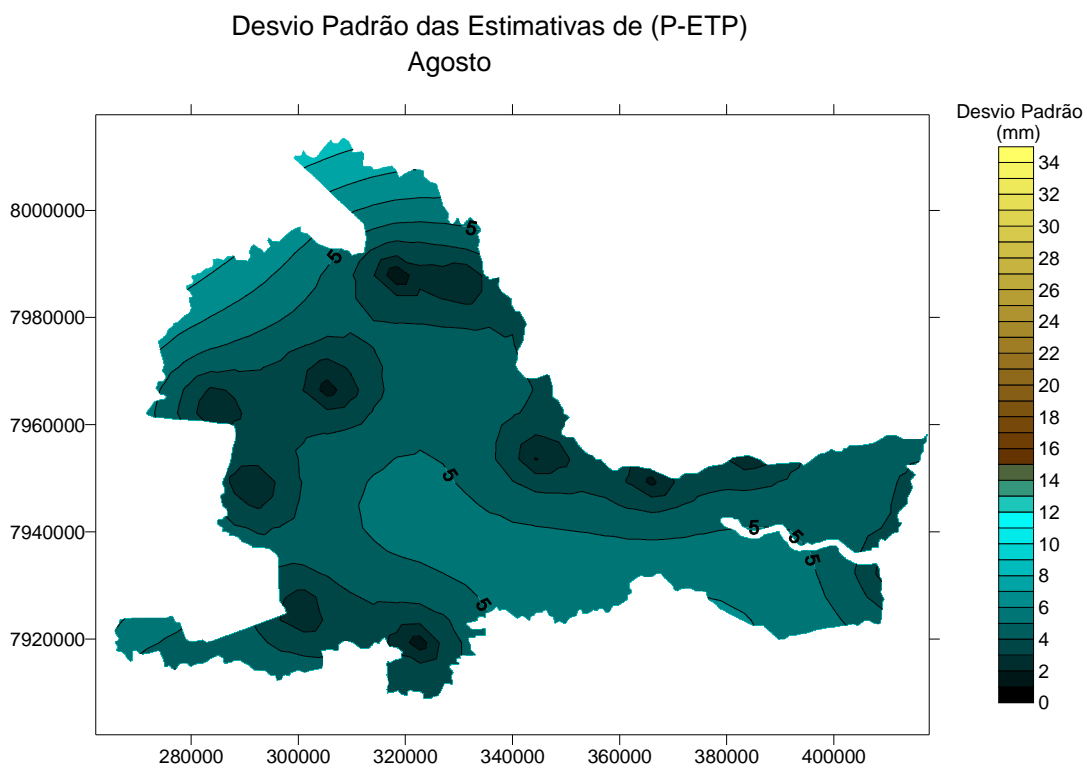
**Figura 18** – Estimativas de  $(P-ETP)_7$  médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de julho.



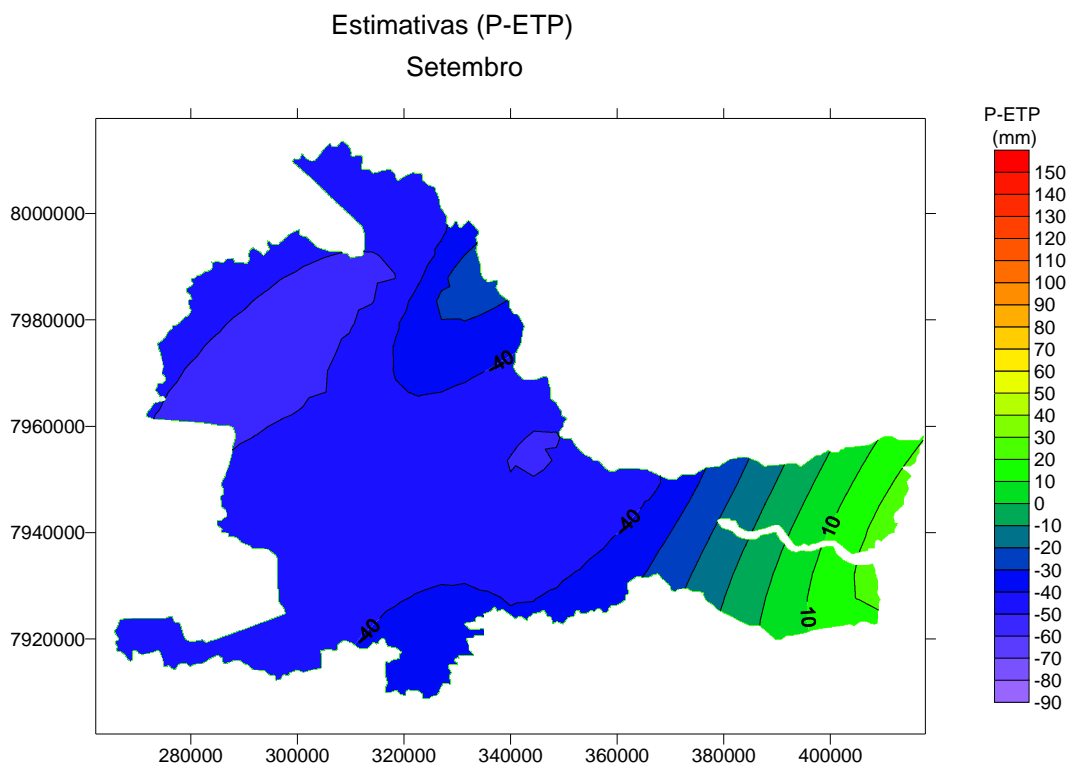
**Figura 19** – Variância de Estimativas de krigagem de  $(P-ETP)_7$  médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de julho.



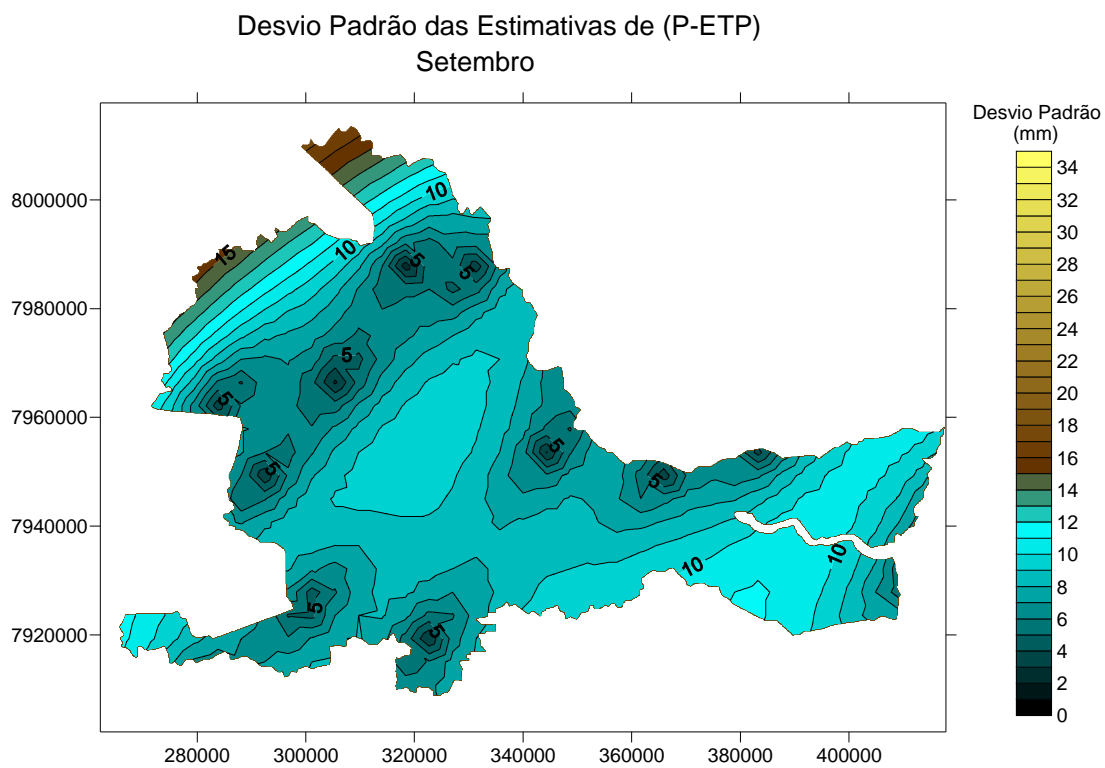
**Figura 20** – Estimativas de  $(P-ETP)_8$  médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de agosto.



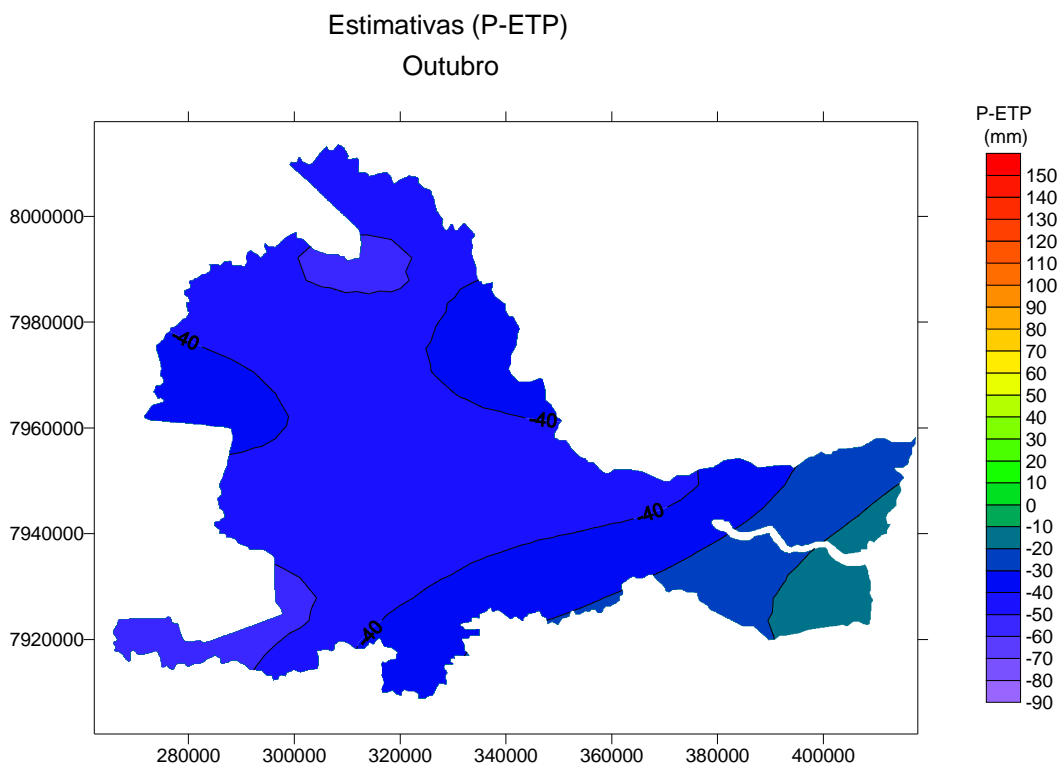
**Figura 21** – Variância de Estimativas de krigagem de  $(P-ETP)_8$  médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de agosto.



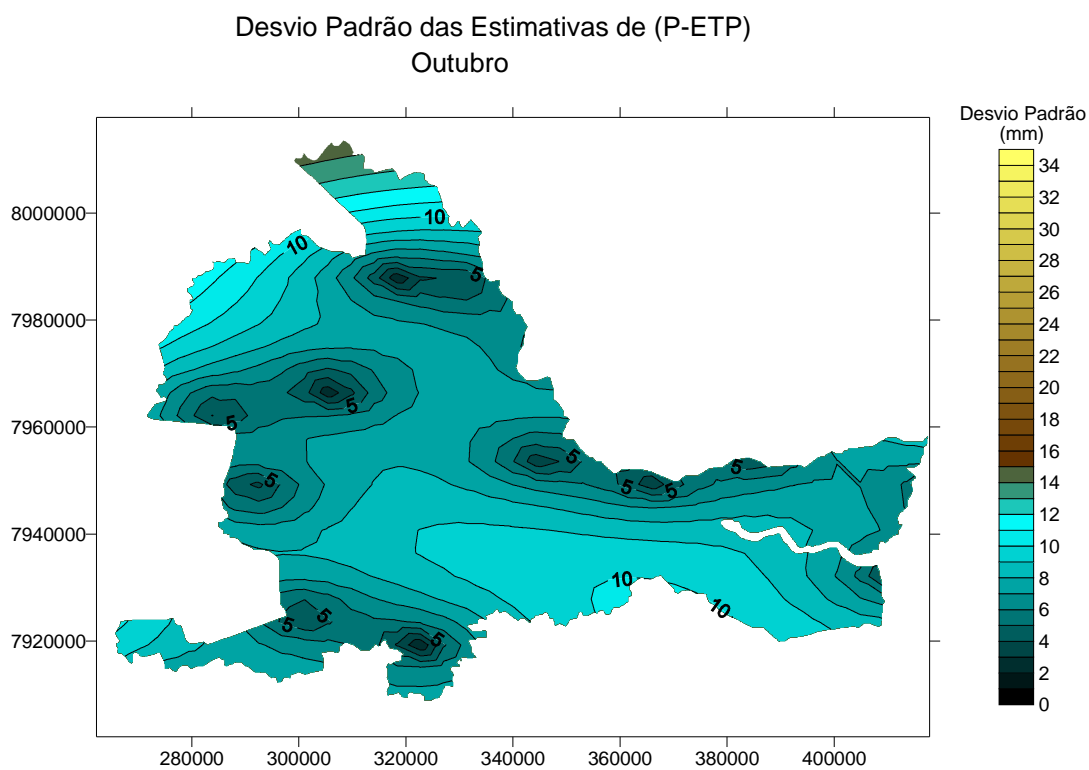
**Figura 22** – Estimativas de  $(P-ETP)_9$  médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de setembro.



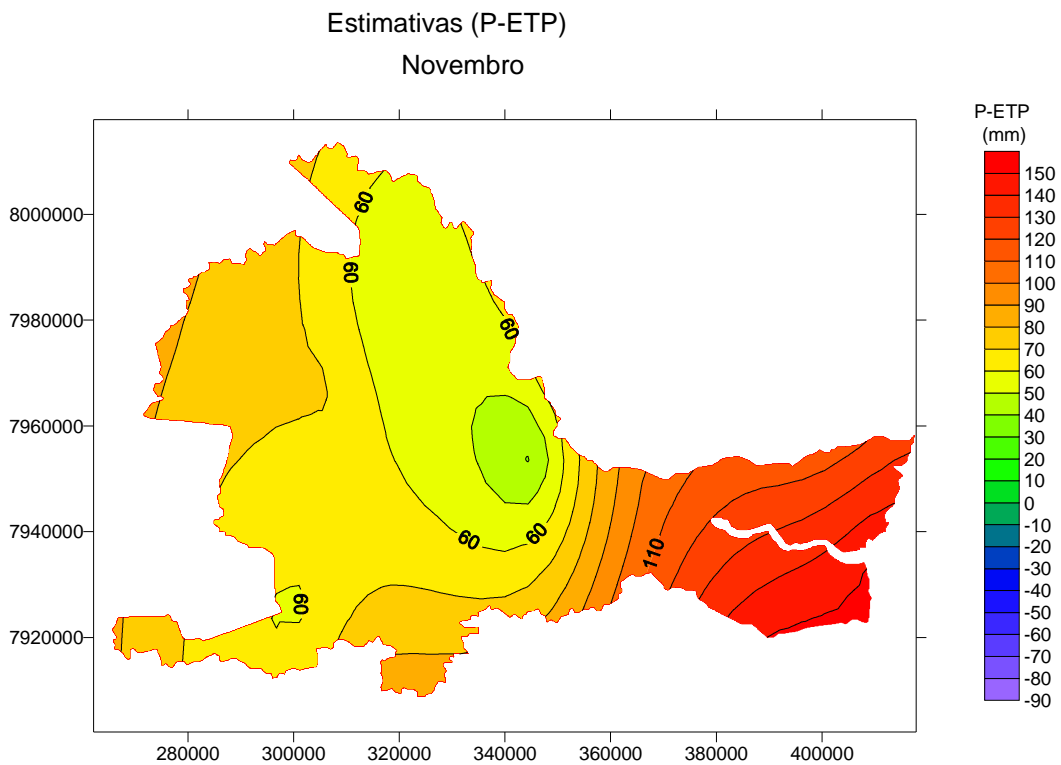
**Figura 23** – Variância de Estimativas de krigagem de  $(P-ETP)_9$  médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de setembro.



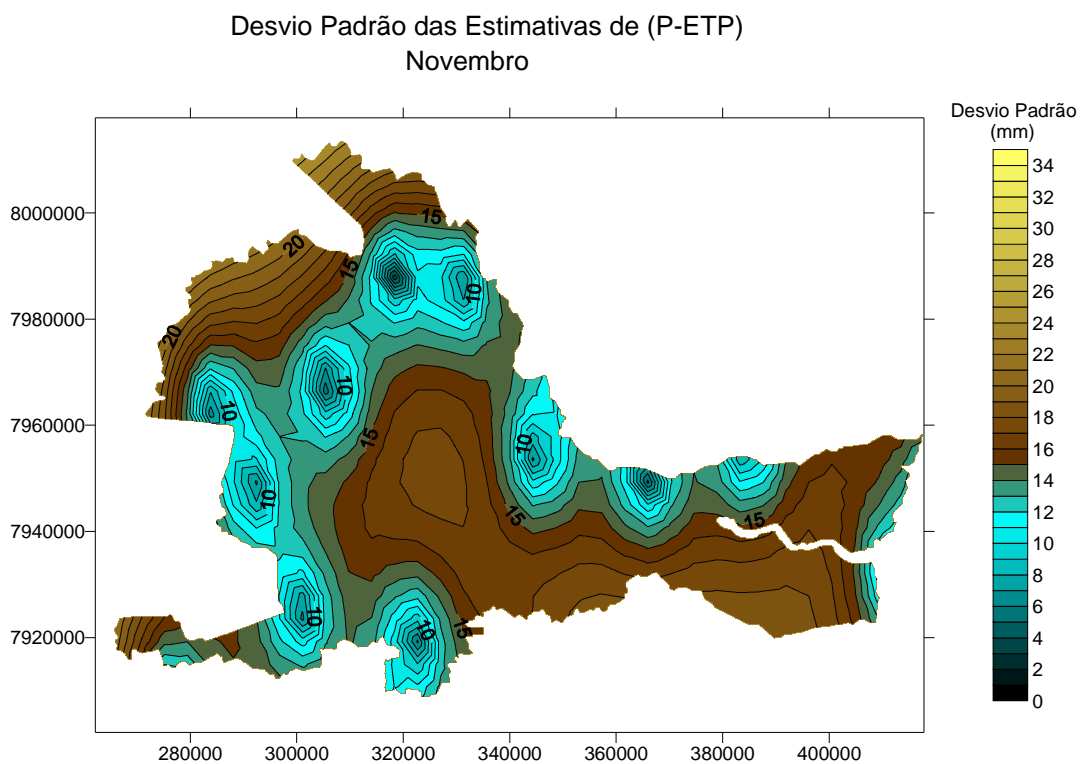
**Figura 24** – Estimativas de  $(P-ETP)_{10}$  médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de outubro.



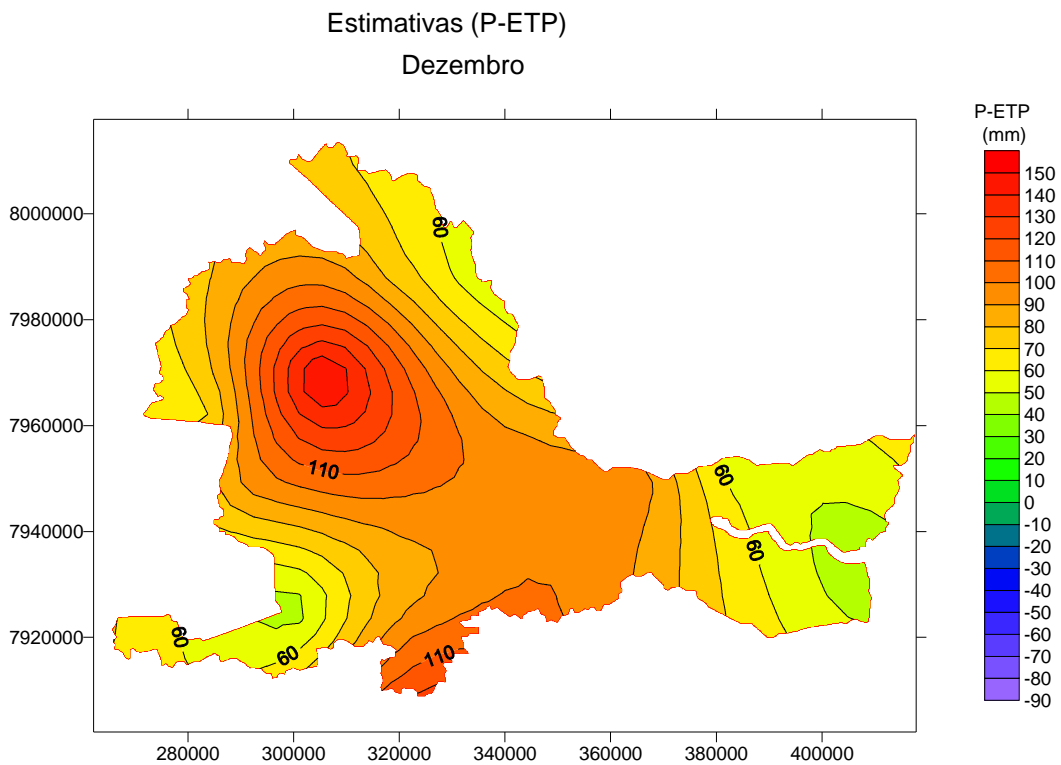
**Figura 25** – Variância de Estimativas de krigagem de  $(P-ETP)_{10}$  médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de outubro.



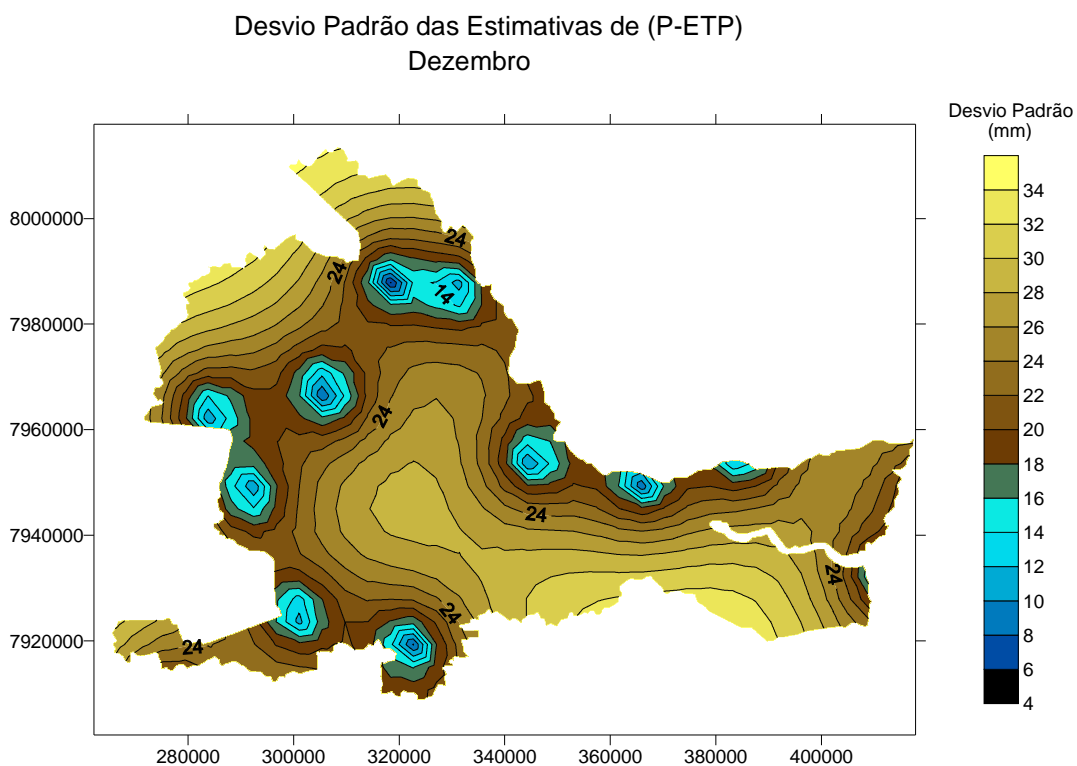
**Figura 26** – Estimativas de  $(P-ETP)_{11}$  médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de novembro.



**Figura 27** – Variância de Estimativas de krigagem de  $(P-ETP)_{11}$  médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de novembro.



**Figura 28** – Estimativas de  $(P-ETP)_{12}$  médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de dezembro.



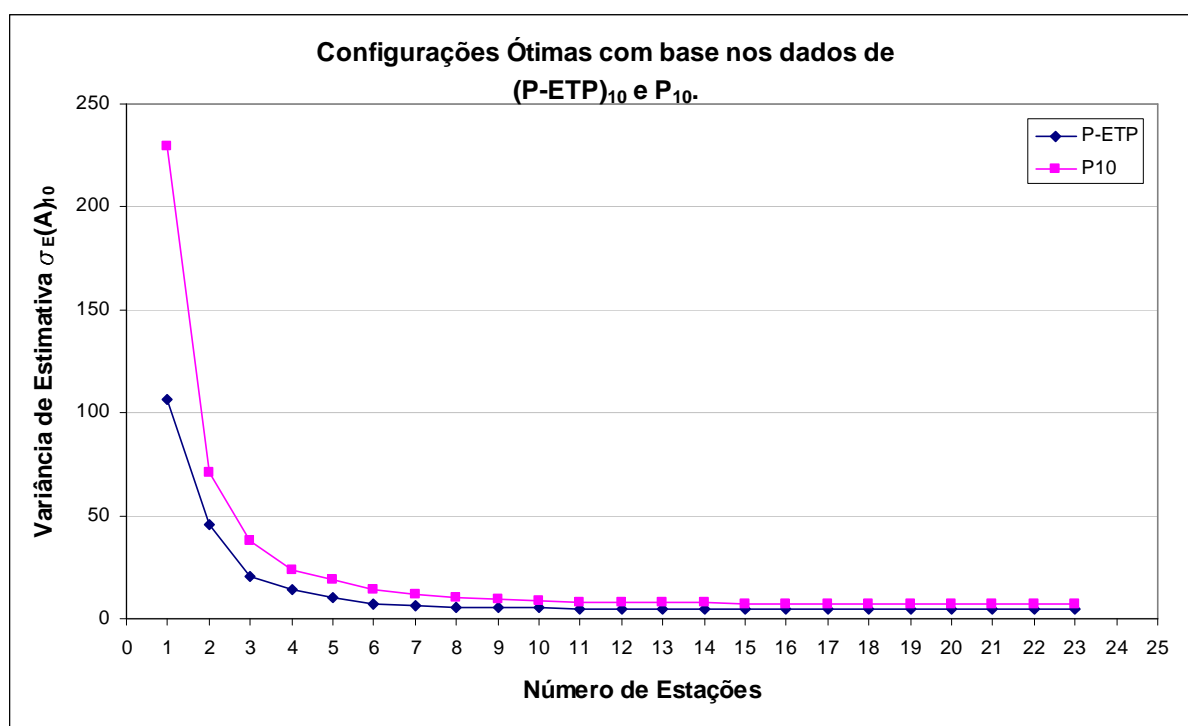
**Figura 29** – Variância de Estimativas de krigagem de  $(P-ETP)_{12}$  médio mensal na bacia do Rio São Mateus referente ao mês de dezembro.



#### 5.4. CONFIGURAÇÕES ÓTIMAS

Conforme descrito no item 4.5, foram selecionadas as configurações ótimas de subgrupos de estações com base na precisão das estimativas de  $P_{10}$  e  $(P - ETP)_{10}$  referentes ao mês de outubro. Foram selecionados os subgrupos que melhor representam o fenômeno em termos de precisão da estimativa da média mensal de outubro.

O gráfico 06 apresenta as variâncias de estimativa referentes às configurações obtidas com a otimização dos dados de  $(P - ETP)_{10}$  e  $P_{10}$  com base na precisão das estimativas.



**Gráfico 6** - Variâncias de estimativas referentes às configurações obtidas com a otimização da rede de monitoramento com base na precisão das estimativas médias de  $(P - ETP)_{10}$  e  $P_{10}$ .

Com o aumento do número de estações, há um decréscimo na variância de estimativa  $\sigma^*_E(A)_{10}$  e conseqüentemente um acréscimo de precisão nas estimativas.

Pode-se observar que o comportamento das duas curvas é bastante semelhante, indicando que as duas variáveis possuem níveis de precisão muito próximos. Isso

---

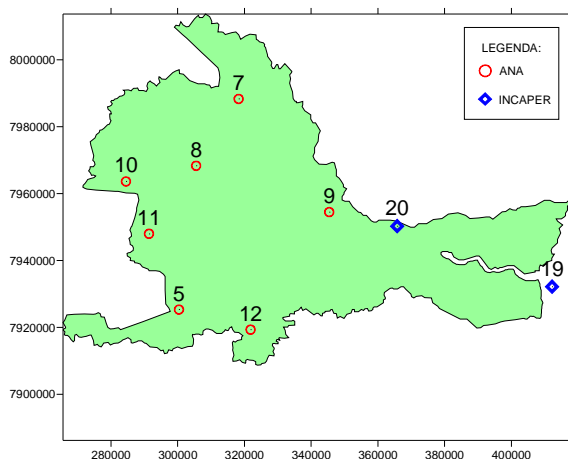
ocorre devido ao fato de a precipitação ter maior influência na distribuição espacial dos dados de P-ETP quando comparada com a evapotranspiração.

Sabe-se que quanto maior o número de estações, maior a precisão da estimativa, e consequentemente, os custos envolvidos na obtenção de informações também são maiores. Essa análise da relação precisão X número de estações pode ser muito útil no remanejamento de redes de monitoramento, seja excluindo ou adicionando novos postos.

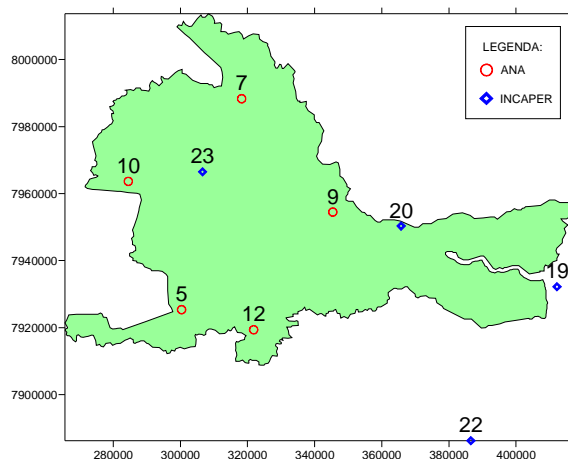
Com base no gráfico 06, a definição da configuração ideal deve ser feita de acordo com a precisão da informação desejada. Deve-se identificar o intervalo de confiança  $z^*(x_o) \pm 2\sqrt{\sigma^*_{E}(x_o)}$  que atenda a necessidade de precisão estabelecida, de acordo com a utilização da informação.

Tendo-se necessidade de estimar a disponibilidade hídrica P-ETP média na bacia do rio São Mateus no mês de outubro, pode-se definir o número de estações da configuração ótima em torno de nove (09). Para esta configuração tem-se,  $\sigma^*_{E}(x_o) = 2,33mm$ , resultando num intervalo de confiança de 4,66mm em torno da média. Este valor pode ser considerado relativamente baixo para o fim a que será destinado.

De modo a comparar as configurações ótimas para estimativa de  $P_{10}$  e  $(P-ETP)_{10}$ , estão representados nas figuras 30 e 31, os resultados obtidos para subgrupos de nove estações dentre as 23 existentes.



**Figura 30** - Configuração ótima obtida com base na precisão da estimativa média espacial de  $(P-ETP)_{10}$ .



**Figura 31** - Configuração ótima obtida com base na precisão da estimativa média espacial de  $P_{10}$ .

É possível identificar a grande semelhança entre estas, uma vez que quase todas as estações coincidem. Na figura 07, a estação 8 foi substituída pela 23 e a estação 22 foi substituída pela 11. A rigor, isso significa que as estações 23 e 22 representam melhor o fenômeno de precipitação em relação às estações 8 e 11 respectivamente.

Apesar da diferença nas configurações, considerando que as estações 8 e 23 estão muito próximas geograficamente, pode-se considerar que estas influenciam na precisão das estimativas médias quase que igualmente.

As tabelas 1 e 2, apresentam as configurações ótimas das variáveis de estudo  $P_{10}$  e  $P-ETP_{10}$ . As estações presentes nos quadros pintados de cinzas são as estações que coincidiram comparando-se as configurações para o mesmo número de estações.

A partir de subgrupos de 7 estações, é possível identificar a grande semelhança das configurações ótimas. Ressalta-se que as estações 08 e 23 sempre se confundem na otimização. Isso mostra que as configurações das redes ótimas para a medição de  $P_{10}$ , também representa muito bem a estimativa de  $(P-ETP)_{10}$ . Isso, mais uma vez, pode ser explicado pela baixa variabilidade espacial do fenômeno de temperatura e conseqüentemente, de ETP.

Nº de Estações	Configurações Ótimas P-ETP(10)																						
1	9																						
2	12	23																					
3	8	12	20																				
4	7	11	12	20																			
5	5	7	19	20	23																		
6	7	11	12	19	20	23																	
7	7	8	9	11	12	19	20																
8	5	7	8	9	11	12	19	20															
9	5	7	8	9	10	11	12	19	20														
10	4	5	7	8	9	10	11	12	19	20													
11	5	6	7	8	9	10	11	12	13	19	20												
12	5	6	7	8	9	10	11	12	13	19	20	21											
13	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	19	20	21										
14	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	19	20	21	23									
15	2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	19	20	21	23								
16	2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	18	19	20	21	23							
17	1	2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	18	19	20	21	23						
18	1	2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	18	19	20	21	23					
19	1	2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	18	19	20	21	23				
20	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	18	19	20	21	23			
21	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	18	19	20	21	22	23		
22	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	18	19	20	21	22	23	
23	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23

**Tabela 1** – Configurações obtidas com a otimização da rede de monitoramento com base na precisão das estimativas de (P-ETP)10.

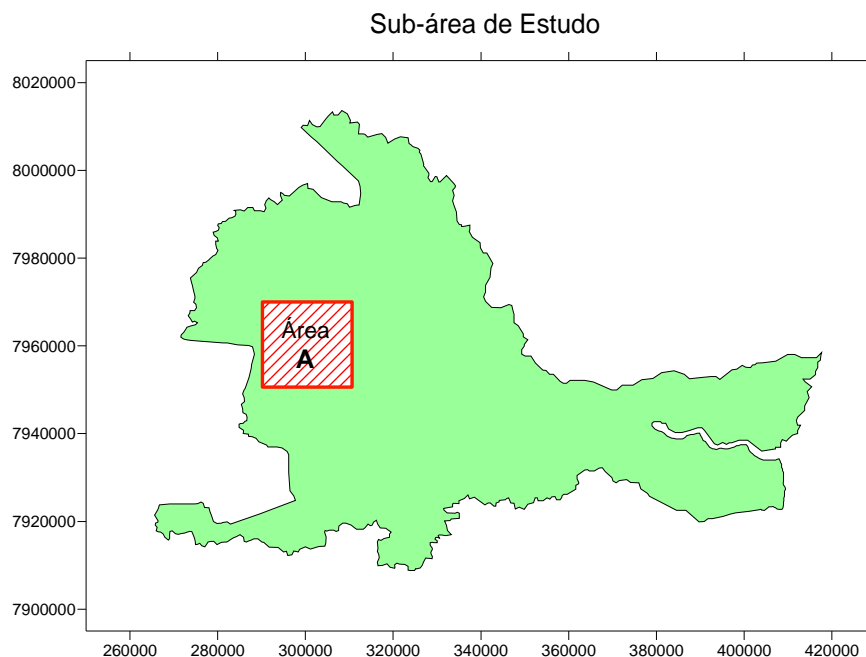
Nº de Estações	Configurações Ótimas P(10)																						
1	23																						
2	9	11																					
3	8	12	20																				
4	2	9	11	23																			
5	2	8	9	10	12																		
6	6	9	10	12	19	23																	
7	7	9	10	12	19	20	23																
8	5	7	9	10	12	19	20	23															
9	5	7	9	10	12	19	20	22	23														
10	2	5	7	9	10	12	19	20	22	23													
11	2	5	6	7	9	10	12	19	20	22	23												
12	2	5	6	7	9	10	12	18	19	20	22	23											
13	2	5	6	7	9	10	11	12	18	19	20	22	23										
14	2	5	6	7	9	10	11	12	14	18	19	20	22	23									
15	2	5	6	7	8	9	10	11	12	14	18	19	20	22	23								
16	2	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	18	19	20	22	23							
17	2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	18	19	20	22	23						
18	2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	18	19	20	21	22	23					
19	2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	16	18	19	20	21	22	23				
20	2	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	16	17	18	19	20	21	22	23			
21	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	16	17	18	19	20	21	22	23		
22	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	
23	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23

**Tabela 2** – Configurações obtidas com a otimização da rede de monitoramento com base na precisão das estimativas de P<sub>10</sub>.

---

## 5.5. ESTIMATIVAS DO ARMAZENAMENTO DE ÁGUA NO SOLO (ARM)

Conforme descrito no item 4.6, o balanço hídrico climatológico foi aplicado a uma sub-região fictícia representada na figura 32 abaixo.

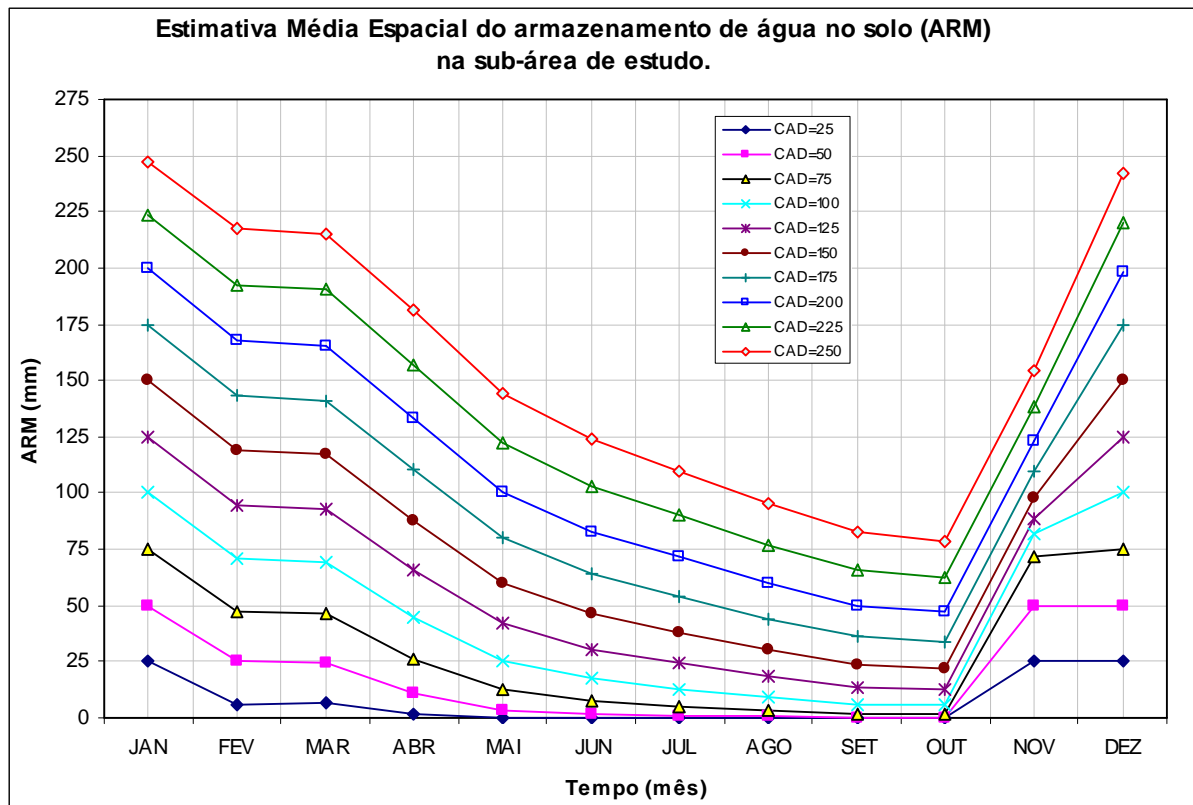


**Figura 32** – Sub-área “A” fictícia utilizada na aplicação do modelo de balanço hídrico.

O gráfico 08 apresenta as médias espaciais das estimativas pontuais de armazenamento de água no solo (ARM) em toda a área “A” para diferentes valores de CAD.

No gráfico 08, é possível identificar que o mês que apresenta o menor ARM é outubro, caracterizado anteriormente como o último mês do período seco. Isso já era esperado, pois este mês apresenta o maior negativo acumulado de P-ETP (NegAc).

Os valores de ARM obtidos com CAD menores ou iguais a 75 mm, apresentaram valores praticamente nulos no período de seca. Isso ocorre, pois para valores de CAD baixos, o solo não cria reserva de água para suprir a demanda hídrica na época de seca. Desta forma, as culturas que caracterizem CAD abaixo de 75 mm na região, seriam inviáveis sem irrigação.



**Gráfico 7** – Médias espaciais das estimativas pontuais de armazenamento de água no solo (ARM) em toda a área “A” para diferentes valores de CAD.

As curvas referentes aos CAD's iguais a 25 e 50 mm entre os meses de novembro e dezembro apresentaram comportamento horizontal. Isso significa que houve excedente hídrico, ou seja, a disponibilidade de água foi maior do que a capacidade de armazenamento do solo.

Conforme esperado, os valores mais altos de ARM ocorreram nos meses mais chuvosos, podendo-se observar para CAD's de 225 e 250 mm que os volumes de armazenamento de água no solo (ARM's) não atingiram o CAD, chegando à capacidade de campo. Isso ocorre, pois a disponibilidade hídrica foi menor do que a capacidade de armazenamento do solo.

No gráfico 07 é possível comparar com o volume de água disponível no solo (ARM) com a necessidade hídrica das culturas a serem simuladas na região. É possível estudar sua viabilidade de implantação, prevendo a necessidade ou não de irrigação bem como uma estimativa de seu consumo de água.

---

Ressalta-se que estes são valores médios na região, e que o gráfico 07 não consiste numa ferramenta destinada ao processo produtivo agrícola, e sim numa ferramenta de gestão de recursos hídricos, que permite simular a implantação de determinadas culturas, estudando sua viabilidade e garantindo o melhor uso da água.



*CAPÍTULO 6*

**CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**





---

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho utilizou a técnica de geoestatística para aplicação do modelo de balanço hídrico na bacia do rio São Mateus onde foram feitas:

- Modelagens da disponibilidade hídrica média mensal  $(P - ETP)_i$ ;
- Avaliações de variabilidade espacial de  $(P - ETP)_i$  ao longo dos meses, bem como seus respectivos níveis de precisão;
- Análise da configuração ótima da rede com base na precisão das estimativas de  $(P - ETP)_i$  médios mensais, e também comparação com a configuração ótima obtida com base na precisão das estimativas de  $P_i$  médios mensais.
- Estimativa do volume de armazenamento de água no solo em uma sub-área "A".

Este trabalho gerou conclusões que apontaram à necessidade de desenvolvimento de outros estudos apresentados como forma de recomendação de trabalhos futuros.

### 6.1. CONCLUSÕES

As conclusões e recomendações do desenvolvimento do trabalho são apresentadas a seguir:

- Na aplicação da técnica de Validação Cruzada, os resultados apresentaram tendências próximas do esperado, acompanhando a sazonalidade prevista. Isso indica que, o método de estimativa apresenta coerência.
- Através da análise dos semivariogramas mensais, pode-se afirmar que a rede de estações de monitoramento de temperatura não necessita do mesmo nível de precisão que a de precipitação, para a aplicação do modelo de Thornthwaite-Mather (1955), pois a precipitação tem influência muito maior nos resultados.
- A rede de monitoramento otimizada com base na precisão das estimativas de precipitação mensal também ofereceram a boa medição com base na precisão das estimativas da disponibilidade hídrica  $(P - ETP)_i$ .
- A análise da relação precisão X número de estações pode ser muito útil no remanejamento de redes de monitoramento, seja excluindo ou adicionando

---

novos postos, e as redes de monitoramento devem ser otimizadas de acordo com a precisão requerida para a utilização da informação.

- As estimativas dos valores médios de  $ARM_i$  calculados para uma região específica, para diversos valores de CAD, constitui-se uma ferramenta útil para fins de planejamento agrícola e gestão de recursos hídricos, permitindo simular a implantação de diversas culturas, estudando sua viabilidade e garantindo o melhor uso da água.

## 6.2. RECOMENDAÇÕES

- Recomenda-se o desenvolvimento de estudos que identifiquem melhores formas de modelagens de semivariograma de modo que elimine a subjetividade do ajuste de curvas pelo método visual associado à validação cruzada;
- Estudos que avaliem a propagação das variâncias de estimativas no cálculo do volume de armazenamento do solo, bem como técnicas de estimativa que reduzam estas incertezas.

---

*CAPÍTULO 7*  
***REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS***

---

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANGELOCCI, L. R. Água na planta e trocas gasosas/energéticas com a atmosfera: Introdução ao tratamento biofísico. Piracicaba: o autor, 2002. 272p.

BACCHI, B. & KOTTEGODA, N. T. Identification and calibration of spatial correlation patterns of rainfall. *Journal of Hydrology*, v. 165, p. 311-348, 1995.

BÁRDOSSI, A. & BOGÁRDI, I. Network design for the spatial estimation of environmental variables. *Applied Mathematics and Computation*, v. 12, p. 339-385, 1983.

BASTIN et al. Optimal estimation of the average areal rainfall and optimal selection of rain gauge locations. *Water Resources Research*, v. 20, n. 4, p. 463-470, 1984.

BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. (1993). Precipitação, In: Tucci, C. E. M. (org.): Hidrologia: Ciência e Aplicação, 2ª ed., Editora da Universidade, p. 177-241.

BRAS, R. L. & RODRIGUEZ-ITURBE, I. Network design for the estimation of areal mean of rainfall events. *Water Resources Research*, v. 12, n. 6, p. 1185-1195, 1976.

COUTINHO, D.L. (2004). "Uso do Método Geoestatístico como ferramenta de dimensionamento de redes pluviométricas com base em dados de precipitação média total anual de longo termo". Projeto de Iniciação Científica – Departamento de Hidráulica e Saneamento, Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

DIODATO, N., CECARELLI, M., 2006. Computacional uncertainty analysis of recharge in catchment. *Ecological Informatics* 1, 377-389.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Yield response to water. Rome: FAO, 1979. 193 p. (FAO. Irrigation and Drainage, 33).

ENGLUND, E. & SPARKS, A. GEO-EAS User's guide. Las Vegas: Environmental Monitoring Systems Laboratory, 1991.

GOOVAERTS, P. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of Hydrology*, n. 228, p. 113-129, 2000.

---

GUIMARÃES, E.C. (2004). Geoestatística Básica e Aplicada. FAMAT/UFU Uberlândia-MG, 77 p.

HOLAWE, F. & DUTTER, R. Geostatistical study of precipitation series in Austria: time and space. *Journal of Hydrology*, n. 219, p. 70-82, 1999.

IGREJA, G. (2006). “Aplicação do Método Geoestatístico no Dimensionamento de Redes Pluviométricas Considerando a Precisão da Estimativa e o Custo de Operação e Manutenção das Estações de Monitoramento”. In: Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, UFES.

INFORZATO, R.; ALVAREZ, R. Distribuição do sistema radicular da cana-de-açúcar va. 290, em solo tipo terra-roxa legítima. *Bragantia*, v.16, p.1-13, 1957.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Mapas Interativos. Mapa de Solos. Disponível em: <<http://mapas.ibge.gov.br/solos/viewer.htm>>. Acesso em: 25 nov. 2008.

JOURNEL, A. G. & HUIJBREGTS, C. J. Mining Geostatistics. London : Academic Press, 1978.

KRIGE, D.G. (1951). “A statistical approach to some basic mine evaluation problems on the witwatersrand”. *J. Chem. Metall. Min. Soc. S. Afri.*, Johannesburg, v. 52, pp. 151 – 163.

MATHERON, G. (1963). “Principles of geostatistics”. *Econ. Geology*, v. 58, pp. 1246 – 1266.

OMETTO, J. C. Bioclimatologia Vegetal. São Paulo: Agronômico Ceres. 440p. 1981.

PARDO-IGÚZQUIZA, E. Optimal selection of number and location of rainfall gauges for areal rainfall estimation using geostatistics and simulated annealing. *Journal of Hydrology*, v. 210, p. 206-220, 1998.

PEREIRA, A. R. “Simplificando o Balanço Hídrico de Trodnthwaite-Mather”. *Bragantia*, Campinas, v.64, n.2, p.311-313, 2005.

---

PHILLIPS, D. L.; DOLPH, J. & MARKS, D. A comparison of geostatistical procedures for spatial analysis of precipitation in mountainous terrain. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 58, p. 119-141, 1992.

RIGHETTO, A. M. (1998). *Hidrologia e Recursos Hídricos*, Edusp, São Carlos, 819 p.

SOUZA, L. D. (1989) “Estimativas e utilização da capacidade de campo”. 126p. Dissertação (Mestrado em agronomia) – Escola superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba.

TABIOS, G. Q. & SALAS, J. D. A comparative analysis of techniques for spatial interpolation of precipitation. *Water Resources Bulletin*, v. 21, n. 03, p. 365-380, 1985.

THORNTHWAITE, C.W. & MATHER, J.R. The water balance. Centerton, Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, 1955. 104p. (Publication in *Climatology*, v.10, n. 3)

TRARBACH, J. (2004). “Aplicação do Método Geoestatístico para Avaliação da Precisão de Redes Pluviométricas na Estimativa de Precipitação Média Total Anual e Sazonal Numa área”. In: Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, UFES.

TUNDISI, J. G. *A água no século XXI: Enfrentando a escassez* 2.ed. São carlos: RiMa, 2003, 248p.

ZIMBACK, C.R.L. (2003). *Apostila de Geoestatística*. FCA/UNESP Botucatu-SP, 25 p.

---

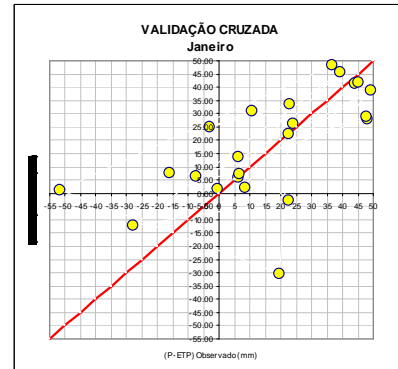
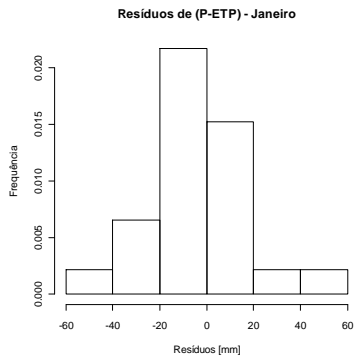
*CAPÍTULO 8*

***ANEXOS***

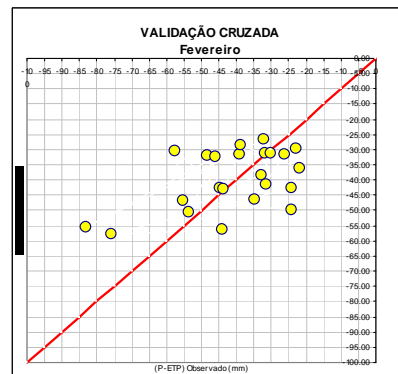
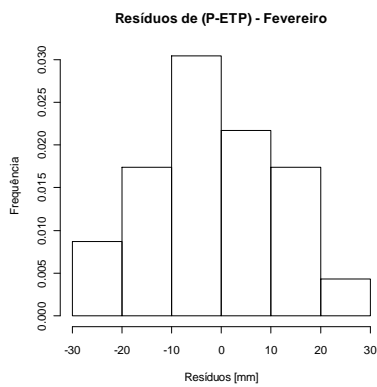
## 8. ANEXOS

### 8.1. ANEXO 01

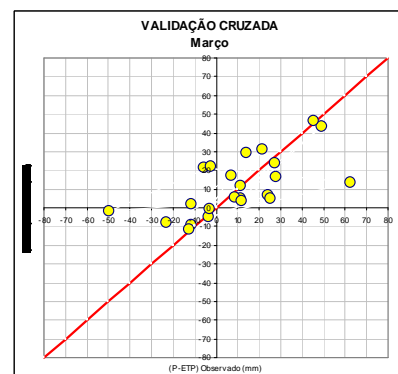
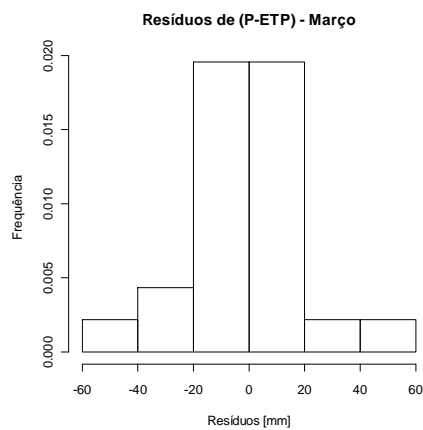
#### Janeiro



#### Fevereiro

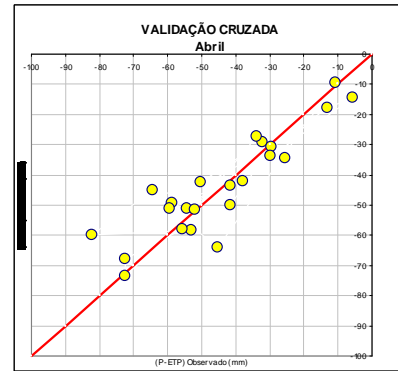
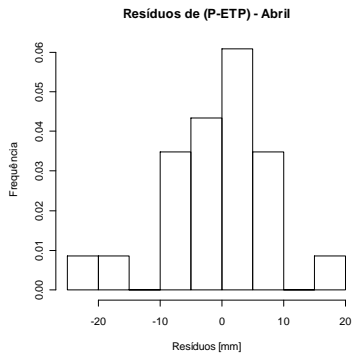


#### Março

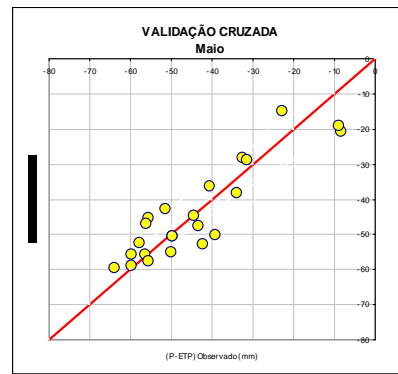
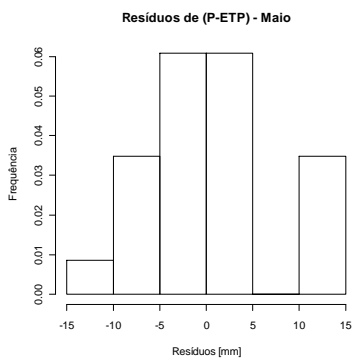




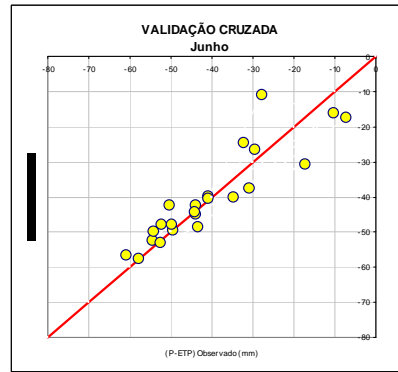
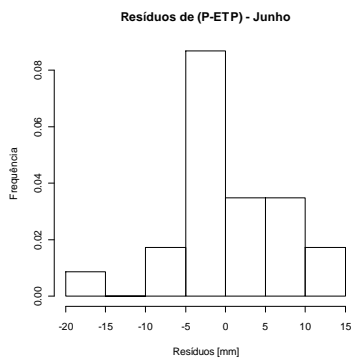
## Abril



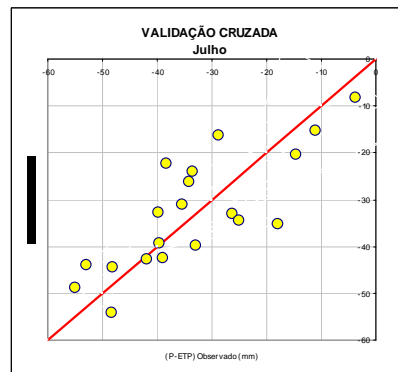
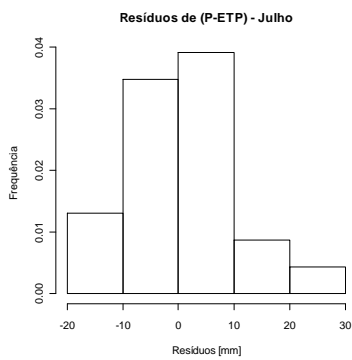
## Maio



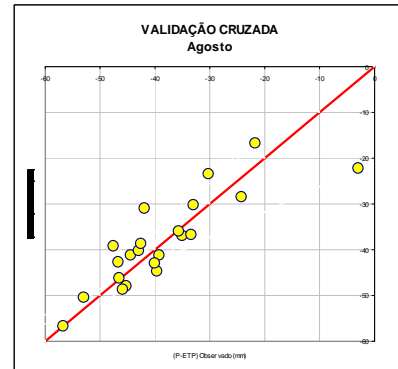
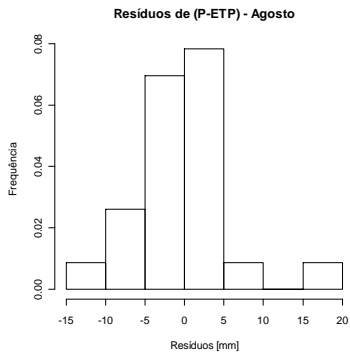
## Junho



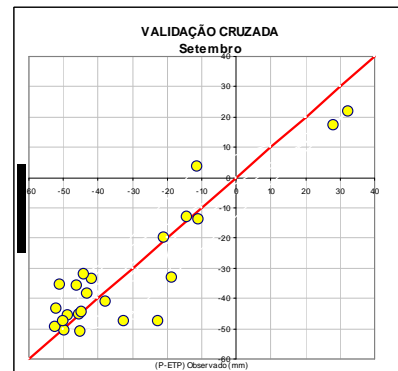
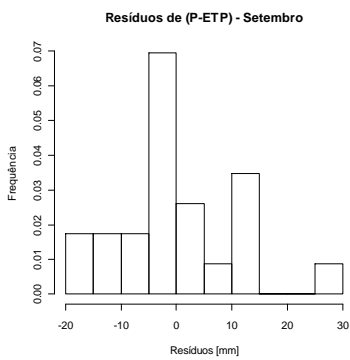
## Julho



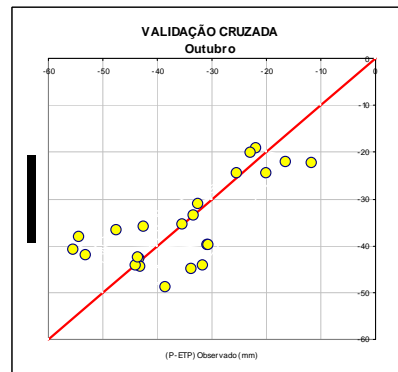
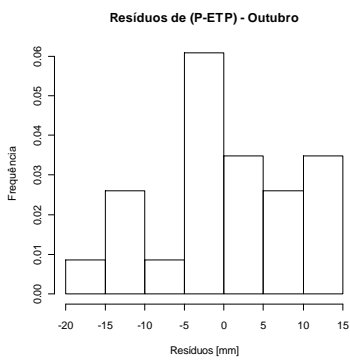
## Agosto



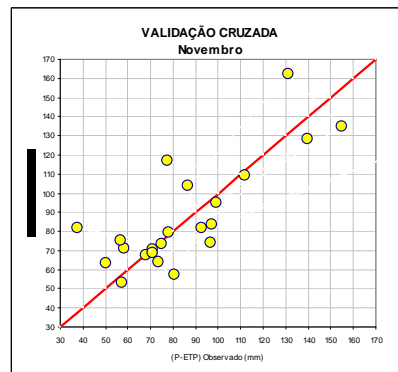
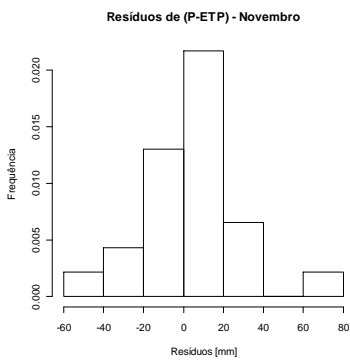
## Setembro



## Outubro



## Novembro



# Dezembro

