

# Análise da distribuição espacial da precipitação na bacia do rio Pajeú em Pernambuco segundo método geoestatístico

**MSc. João H. P. de B. Salgueiro**  
CPRM / Serviço Geológico do Brasil -  
Superintendência Regional de Recife  
j.salgueiro@re.cprm.gov.br

**Profa. Dra. Suzana M. G. L. Montenegro**  
Universidade Federal de Pernambuco-  
UFPE em Recife  
suzanam@ufpe.br

## Resumo

Considerando a importância da água e a necessidade de se conhecer os locais de suas maiores ocorrências, para o eficiente gerenciamento dos recursos hídricos, este artigo analisou a distribuição espacial da precipitação na bacia do rio Pajeú, no Estado de Pernambuco, situado no Nordeste do Brasil. Para isto, utilizou o método geoestatístico de krigagem, a partir das séries pluviométricas medidas na bacia. A elaboração dos mapas de interpolação e estimativa dos erros constituiu as principais ferramentas para esta análise. A relação da precipitação com a geomorfologia da bacia contribuiu para relevantes resultados, inclusive a demonstração dos atuais conhecimentos por método preciso.

**Palavras-chave:** *Precipitação média. Distribuição espacial, Interpolação geoestatística.*

## Abstract

Considering the importance of water and the need for knowing the places of high rainfall rates, aimed for an efficient water resources management, this paper deals with the analysis of the space distribution of the long term average annual rainfall in the Pajeú River Basin (Pernambuco State). The geostatistic and the kriging method were used, based on observed rainfall series in the basin. Interpolation maps were performed, and also calculation of the estimates errors. The actual knowledge of the rainfall pattern has been confirmed in the area.

**Keywords:** *Average precipitation. Spatial distribution. Geostatistical interpolation*

## 1 Introdução

A água é um bem insubstituível à manutenção da vida e a sua circulação na Terra ocorre sob um processo natural conhecido como ciclo hidrológico. A precipitação é a fase deste ciclo responsável pelo transporte das águas da atmosfera à superfície terrestre. O conhecimento quantitativo da sua variabilidade espacial sobre as regiões, ou bacias hidrográficas, deve ser entendido como imprescindível ao eficiente planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos. No caso da escassez prolongada, geralmente imposta pelas longas estiagens, os órgãos gestores têm recorrido às ações prioritárias que visam à mitigação do cenário, utilizando medidas alternativas de suprimentos, algumas vezes em avançados estágios de calamidades, principalmente nos locais onde o clima é seco. Por outro lado, os excessos dos volumes precipitados historicamente, revelaram situações de sinistros, com constatações de graves prejuízos à vida e ao patrimônio público e privado.

Por se tratar de um fenômeno natural aleatório, a distribuição espacial da precipitação não se repete exatamente a cada período anual sob o aspecto quantitativo, embora aponte, com certo grau de certeza, os locais onde se deve esperar que chova mais ou menos. Por outro lado, os locais onde ocorrem as disponibilidades hídricas nem sempre são os que no momento demandam maiores consumos emergenciais. Para isto, a Engenharia Hidrológica desenvolve modelos que visam aperfeiçoar as tomadas de decisão para o controle mais eficaz do manejo hídrico. Sendo assim, este conhecimento passa então a constituir uma ferramenta importante, desde que utilizadas séries pluviométricas com qualidade e densidade que atendam aos limites satisfatórios, métodos de interpolação de precisão comprovada, e, finalmente, uso de programas computacionais avançados.

Diante deste contexto, este artigo analisou a distribuição espacial da precipitação média de longo período em toda a bacia hidrográfica do rio Pajeú, localizada no Estado de Pernambuco, a partir da elaboração do mapa de interpolação e estimativas dos erros, baseado nas séries históricas geradas pela Rede Hidroclimática da Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste – SUDENE.

## 2 Fundamentação teórica

A geoestatística dispõe de interpoladores eficientes, capazes de estimar valores de variáveis em pontos que não foram amostrados. Pode então consagrar-se uma ferramenta poderosa para gerar com precisão superfícies

interpoladas, uma vez que permite conhecer os resíduos dos erros. A sua aplicação pode ser de grande valia, desde que as variáveis utilizadas satisfaçam às condições que determinam uma “variável regionalizada”, e que, entre outras exigências, tenham uma estacionaridade estatística de segunda ordem e dependência espacial entre os pontos medidos, inferida através de funções semivariográficas. Estas funções estimam a dependência espacial através do modelo experimental expresso na Eq.(1). A Figura 1 apresenta o modelo típico de um semivariograma.

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

Em que:

$\gamma^*(h)$  caracteriza a dependência espacial;

$Z(x_i), Z(x_i + h)$  são pares de valores medidos em locais afastados entre si da distância “h”;

$N(h)$  é o número desses pares para cada “h”.

Os valores das diferenças  $Z(x_i) - Z(x_i + h)$ , em geral, decrescem à medida que a distância “h” diminui. Assim,  $\gamma^*(h)$  aumenta com “h” e se anula quando  $h = 0$ , conforme a Eq.(1). Entretanto, quando “h” tende para zero,  $\gamma^*(h)$  se aproxima de um valor positivo chamado “efeito pepita” ( $C_0$ ), como mostra o modelo de semivariograma típico contido na Fig. 1. Este valor revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras, e pode ser atribuído em parte aos erros de medição ou efeitos de escala. O crescimento do  $\gamma^*(h)$  em função de “h” ocorre até um certo limite máximo no qual se estabiliza, tomando a denominação de “patamar” ( $C+C_0$ ). Essa distância “h”, pela qual  $\gamma^*(h)$  atinge o patamar, é o alcance (a), o qual assume a distância limite de dependência espacial.

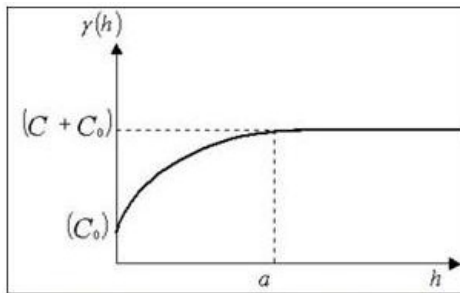


Figura 1: Modelo de semivariograma típico - fonte: (Salgueiro, 2005)

Os semivariogramas podem apresentar três classificações diferentes a partir da relação contida na expressão da Eq.(2), de acordo com os seus graus de dependência espacial. Esta expressão pode resultar em valores percentuais inferiores a 25%, entre 25 e 75%, e superiores a 75%, para “r”. Estes intervalos enquadram os semivariogramas nas classificações de forte, moderada e fraca dependência espacial, conforme Cambardella *et al.* (1994).

$$r = \frac{C_0}{C + C_0} \times 100 \% \tag{2}$$

O semivariograma é chamado isotrópico quando é idêntico em todas as direções e anisotrópico quando há variações de comportamento em diferentes direções. Também é dito experimental, quando obtido a partir das amostras colhidas no campo, e teórico, após o ajuste do semivariograma experimental a um modelo conhecido. Os modelos mais usados para estes ajustamentos são: esférico, exponencial e gaussiano. Para definição do ajuste torna-se necessário que vários modelos sejam testados. Para a escolha do melhor semivariograma teórico é preciso que todos os erros sejam avaliados em um processo denominado validação cruzada, conforme a Tab. (1).

**Tabela 1:** Critérios para escolha do semivariograma teórico através da validação cruzada

Estimativas de erros	Valores ideais
Erro médio	Valores pequenos
Erro médio quadrático	Valores pequenos e próximos dos erros médios padrões
Erro padrão médio	Valores pequenos e próximos dos erros médios quadráticos
Erro médio normalizado	Valores próximos de 0 (zero)
Erro médio quadrático normalizado	Valores próximos de 1 (um)

No caso de amostra que apresente tendência espacial, esta pode ser representada por uma expressão matemática e ser removida dos dados. Após a remoção, a análise geoestatística é efetuada nos resíduos. Após a análise, a tendência é novamente adicionada aos dados para continuidade do processo desejado.

A krigagem é um método geoestatístico de interpolação utilizado para estimar valores distribuídos no espaço a partir de valores adjacentes, enquanto considerados como interdependentes pelo semivariograma. Sua utilização serve para previsão de uma variável regionalizada dentro de um determinado campo geométrico, através de um procedimento exato de interpolação que leva em conta todos os valores observados. O método fornece, além dos valores estimados, o erro associado a tal estimação, o que o distingue das demais metodologias.

As informações a partir do semivariograma são usadas para encontrar os pesos ótimos a serem associados às amostras. O método utiliza também a dependência espacial entre os pontos vizinhos expressos no semivariograma, para estimar valores em qualquer posição dentro do campo, sem tendência e com variância mínima. Essas duas últimas características fazem de kriging um interpolador ótimo. Trata-se de uma série de técnicas de análises de regressão que procuram minimizar a variância estimada a partir de um modelo prévio que leva em conta a dependência espacial entre os dados distribuídos no espaço.

Entre outros tipos de métodos geoestatísticos, a krigagem pode ser dividida em: ordinária, simples e universal. Na krigagem ordinária, a estimativa de uma variável regionalizada pode ser efetuada sem o conhecimento da média. A expressão da Eq.(3) define matematicamente este interpolador:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i), \text{ com } \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1: \quad (3)$$

Em que:

$Z^*(x_0)$  são valores estimados para qualquer local  $x_0$ ;

$N$  é o número de valores medidos;

$\lambda_i$  são os pesos associados a cada valor medido,  $Z(x_i)$ .

### 3 Revisão da literatura

Oliveira e Chaudrhy (1995) abordaram o problema da estimativa de isoietas com base em dados pluviométricos, utilizando os métodos geoestatísticos de kriging e co-kriging. A partir desta abordagem foi possível comparar estes métodos, considerando o efeito da orografia na precipitação da Bacia do Rio Camanducáia em São Paulo, local onde se desenvolveu o trabalho. A influência orográfica foi detectada através de um estudo preliminar que envolveu a dependência da precipitação em relação às altitudes dos postos selecionados

Ferreira Filho *et al.* (2000) aplicaram a metodologia kriging à rede pluviométrica do Estado do Ceará. Para isso foi necessário dividirem a área do Estado em três partes, quer sejam: Serra do Ibiapaba, Litoral e Interior. Os autores enfatizaram a importância da precipitação como variável necessária ao estudo dos recursos hídricos, ressaltando que, para o efetivo monitoramento dessa variável, seriam imprescindíveis a instalação, operação e manutenção dos pluviômetros.

Gomes e Silans (2000), considerando que a precipitação nas bacias hidrográficas do Nordeste do Brasil apresenta uma grande variabilidade espacial, investigaram o efeito desta variabilidade sobre o cálculo da precipitação média na Bacia do Rio Gramame, localizada no Litoral paraibano, onde a densidade de pluviômetros é bastante elevada. Os autores tiveram como objetivo comparar o cálculo do valor médio da precipitação com diversos métodos, sendo esses: o método dos polígonos de Thiessen; o método da interpolação pelo inverso do quadrado da distância; o método de Shepard e o método da krigagem ordinária.

Almeida *et al.* (2004) efetuaram análise da variabilidade espacial da precipitação anual média na Bacia do Rio Ipanema em Pernambuco, utilizando metodologia geoestatística. Foi incluído também na avaliação o processo de formação de chuvas visto através da distribuição espacial dos coeficientes de irregularidade. Os autores afirmaram que a geoestatística se revela uma forte ferramenta de análise espacial, que ainda permite a compreensão e distribuição de confiabilidade, do processo de espacialização da variável.

Salgueiro e Montenegro (2004) analisaram a variabilidade espacial da precipitação média e seus padrões de ocorrências na Bacia do Rio Ipojuca, em Pernambuco. Os autores utilizaram, para análise, a metodologia geoestatística de krigagem ordinária. As precipitações médias e os coeficientes de irregularidade meteorológica foram mapeados através das isolinhas, identificando as maiores ocorrências de precipitações e os tipos frontais, convectivos e orográficos. O processo foi considerado anisotrópico e os erros de estimativas para as duas variáveis foram calculados.

Salgueiro *et al.* (2006) comprovaram o atual conhecimento sobre o comportamento pluviométrico em Pernambuco através da análise da variabilidade espacial das precipitações máximas e seus padrões frontais, orográficos e convectivos em relação aos diversos patamares altimétricos do Estado, como a Baixada litorânea, o Planalto da Borborema e a Depressão sertaneja. Para isto, utilizaram as séries pluviométricas da Rede

Hydroclimática da SUDENE, o interpolador Geoestatístico kriging e o *software ArcGis 8.3*. O método forneceu os mapas de isolinhas e as estimativas de erros resultantes das interpolações.

Salgueiro *et al.* (2007) avaliaram a Rede Pluviométrica Básica Nacional, operada no Estado de Pernambuco pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM, instituição responsável pelo Serviço Geológico do Brasil, utilizando como variável a precipitação anual máxima na análise da configuração espacial das estações. Como metodologia adotou a geoestatística, através do interpolador kriging. No estudo foi discutida a aplicação das recomendações da Organização Mundial de Meteorologia – OMM para densidades mínimas. Em seguida, analisou seu enquadramento no Programa de Redes Compartilhadas da Agência Nacional de águas – ANA, previsto para todas as Unidades Federativas do Brasil.

#### 4 Localização e características fisiográficas

A área de estudo encontra-se localizada entre as latitudes: 07° 16' 20" S e 08° 56' 01" S e longitudes 36° 59' 00" W e 38° 57' 45" W, totalmente inserida no Estado de Pernambuco, especificamente nas mesorregiões do Sertão Pernambucano e do São Francisco, envolvendo as microrregiões do Pajeú, em sua totalidade, e parte do Sertão do Moxotó, do Salgueiro e de Itaparica. Considerando a divisão do Estado em Unidades de planejamentos hídricos, a bacia do Pajeú representa a UP9, que se destaca por ser a maior Unidade, com 16.685,63 km<sup>2</sup> e ocupação de 16,97% da área do Estado. A Figura 2 mostra a localização geográfica da bacia em relação ao Estado de Pernambuco.

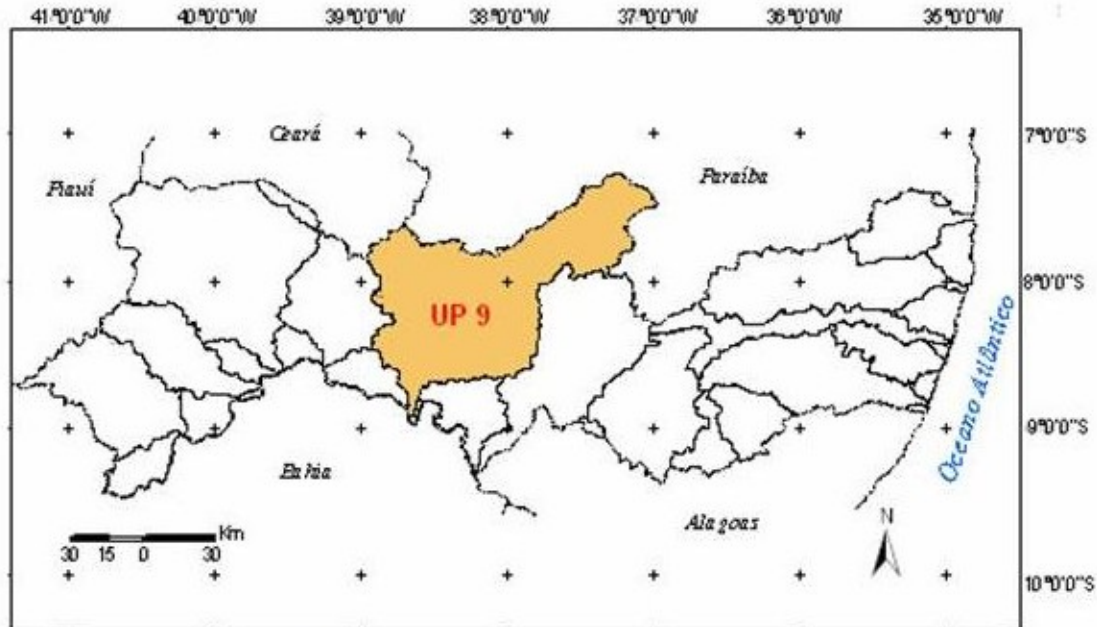
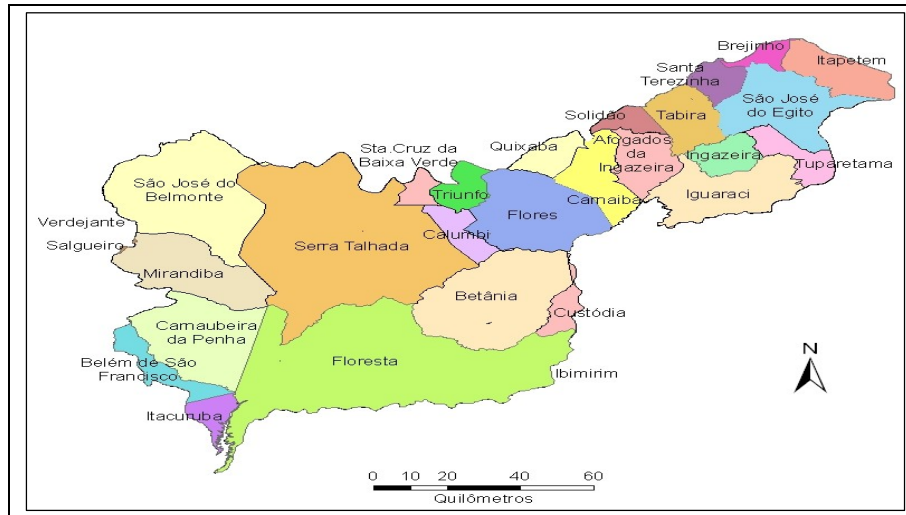


Figura 2: Localização geográfica da bacia do rio Pajeú (Fonte: gerada no ArcGis 9)

A divisão político-administrativa abrange um total de 27 municípios, sendo eles: Carnaíba, Carnaubeira da Penha, Floresta, Igaraci, Itacuruba, Mirandiba, São José do Belmonte, Afogados da Ingazeira, Betânia, Brejinho, Calumbi, Flores, Ingazeira, Itapetim, Quixabá, Santa Cruz da Baixa Verde, Santa Terezinha, São José do Egito, Serra Talhada, Solidão, Tabira, Triunfo, Tuparetama, Belém do São Francisco, Custódia, Ibibimirim e Salgueiro, sendo os quatro últimos com sedes municipais fora da bacia. A Figura 3 apresenta a divisão municipal da bacia do Pajeú.

O rio Pajeú nasce a uma altitude aproximada de 800m, na serra da Balança, divisor dos Estados de Pernambuco e Paraíba, no município de Brejinho, localizado no norte da bacia. O seu curso principal toma a direção nordeste-sudoeste, em seguida aponta para o sul, no sentido do rio São Francisco, especificamente no lago de Itaparica, onde deságua. Neste trajeto o rio percorre aproximadamente 353 km. Sua rede de drenagem é bastante densa, embora seu regime fluvial seja intermitente.

Quanto à formação geológica, observa-se a predominância de rochas cristalinas na proporção de 86,3%, enquanto 11,7% representam depósitos sedimentares e o restante pertence aos solos aluviais. O relevo divide-se entre planos e ondulados, com vegetação arbustiva e abórea em sua maior parte.



**Figura 3:** Divisão municipal da bacia do Pajeú (Fonte: gerada no ArcGis 9)

De um modo geral, o Sertão de Pernambuco é caracterizado pelo clima semi-árido, onde os índices pluviométricos anuais são considerados baixos, tanto no lado norte, onde se pode observar maiores altitudes e umidades, como no sul, região mais seca e caracterizada pela planície do rio São Francisco. Segundo SECTMA (1997), no setor norte do Sertão, os totais anuais de precipitação oscilam em torno de 600 mm, com alguns núcleos isolados chegando a 800mm. No setor sul do Sertão, os valores anuais são inferiores a 600 mm, com algumas áreas atingindo valores inferiores a 500mm, sendo que no Sertão do São Francisco os valores médios chegam apenas a 400mm/ano.

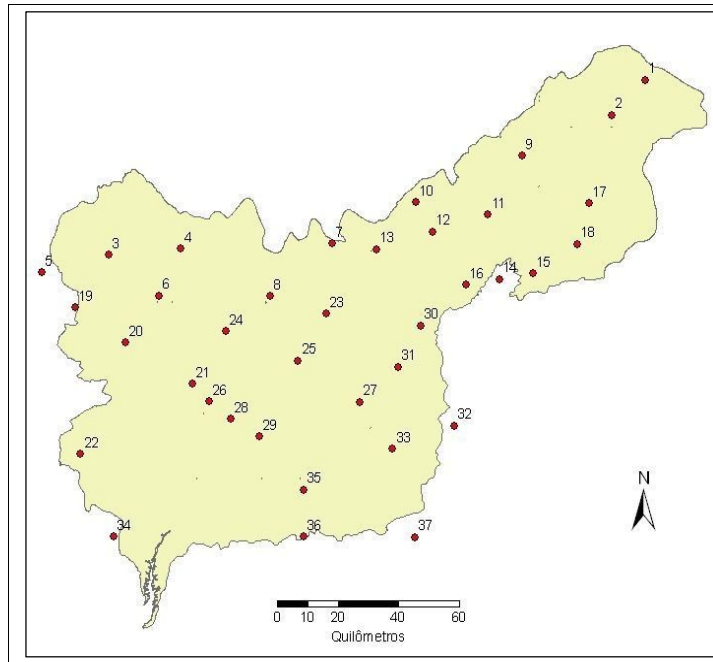
No norte da bacia do Pajeú encontra-se o município de Triunfo, que se destaca por possuir um microclima bastante peculiar, com temperaturas amenas e boa distribuição de chuvas ao longo do ano, influenciado pela elevada altitude que chega a 1.100m em relação ao nível do mar. Esta situação faz de Triunfo o local onde mais se desenvolve a atividade agropecuária do Sertão (WIKIPÉDIA, 2008).

O principal sistema de produção das chuvas do Sertão é a Zona de Convergência Intertropical – ZCIT, que atua durante os meses de dezembro a maio, com máximos de precipitação durante fevereiro e março. A variabilidade espacial e temporal da precipitação submete a produção agropecuária a níveis de incertezas bastante altos, uma vez que o uso e ocupação do solo da bacia consistem na predominância desta atividade.

## 5 Materiais e métodos

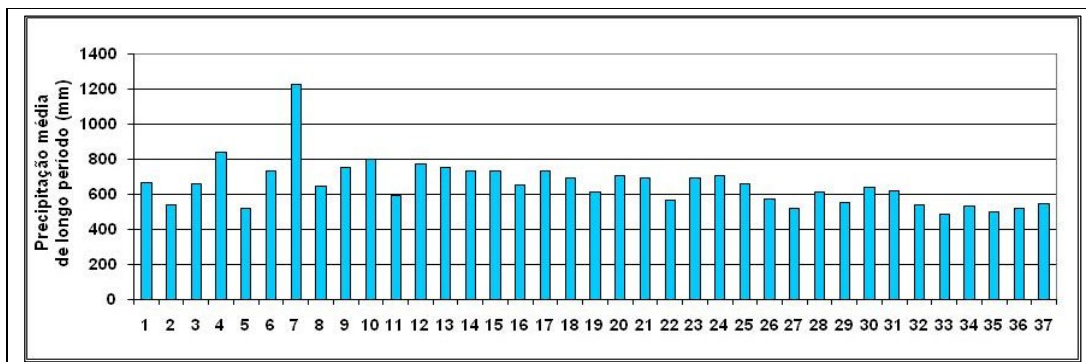
O banco de dados utilizado teve origem nas séries pluviométricas referentes ao Estado de Pernambuco, publicadas pela SUDENE no ano de 1990 para toda a região Nordeste. Como primeira etapa do processo seletivo das séries, extraiu-se as estações pluviométricas localizadas na bacia do Pajeú e nos municípios vizinhos, onde foram escolhidas as séries históricas de longos períodos e melhores qualidades, inseridas entre os anos de 1963 a 1985.

Após a plotagem das estações, utilizando o *software ArcGis 9*, foi possível executar a composição do banco de dados definitivo, perfazendo um total de 37 estações. Como critério, considerou-se algumas estações pertencentes às bacias vizinhas, que se localizaram muito próximas aos limites. Com este procedimento, foi possível elaborar o mapa da rede pluviométrica, definida para ser utilizada na análise da distribuição espacial da precipitação média na bacia do Pajeú, objeto deste artigo, como mostra a Fig.4.



**Figura 4:** Configuração espacial da Rede pluviométrica da SUDENE operada na bacia do Pajeú (Fonte: gerada no ArcGis 9)

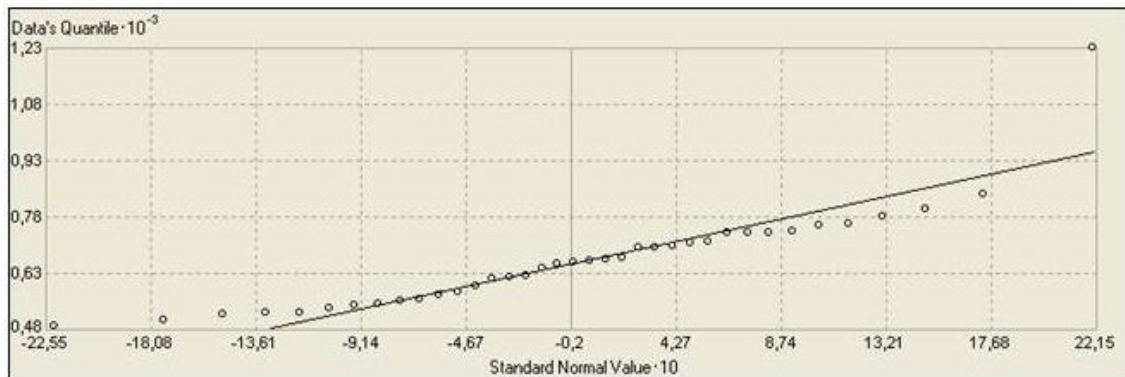
Estabelecida a configuração da rede para a análise desejada, as posições das estações foram identificadas com numeração de 1 a 37 mostradas no mapa da Fig.4. Sendo assim, a relação destas estações e seus respectivos municípios, ficou da seguinte forma: 1-Itapetim (Itapetim), 2-São José do Egito (São José do Egito), 3-São José do Belmonte (São José do Belmonte), 4-Caiçara (Serra Talhada), 5-Verdejante (Verdejante), 6-Bom Nome (São José do Belmonte), 7-Triunfo (Triunfo), 8-Serra Talhada (Serra Talhada), 9-Tabira (Tabira), 10-Quixabá (Carnaíba), 11-Afogados da Ingazeira (Afogados da Ingazeira), 12-Carnaíba (Carnaíba), 13-Flores (Flores), 14-Quitimbu (Custódia), 15-Irajai (Iguaraci), 16-Fátima (Flores), 17-Jardim (Tuparetama), 18-Jabitaca (Iguaraci), 19-Carnaubeira (Mirandiba), 20-Mirandiba (Mirandiba), 21-Serrinha (Mirandiba), 22-Carnaubeiras (Floresta), 23-Varzinha (Serra Talhada), 24-Quixabá (Serra Talhada), 25-Tauapiranga (Serra Talhada), 26-Malhada de Areia (Serra Talhada), 27-Betânia (Betânia), 28-Carqueja (Floresta), 29-Santa Paula (Floresta), 30-Sítio dos Nunes (Flores), 31-Cachoeira do Leite (Betânia), 32-Caiçara (Custódia), 33-Jacaré (Floresta), 34-Angicos (Belém de São Francisco), 35-Airi (Floresta), 36-Olho D'água (Petrolândia), e 37-Alexandre (Inajá). Para visualização dos valores médios precipitados em cada estação uma destas estações foi elaborado um hietograma das precipitações médias, conforme a Fig.5.



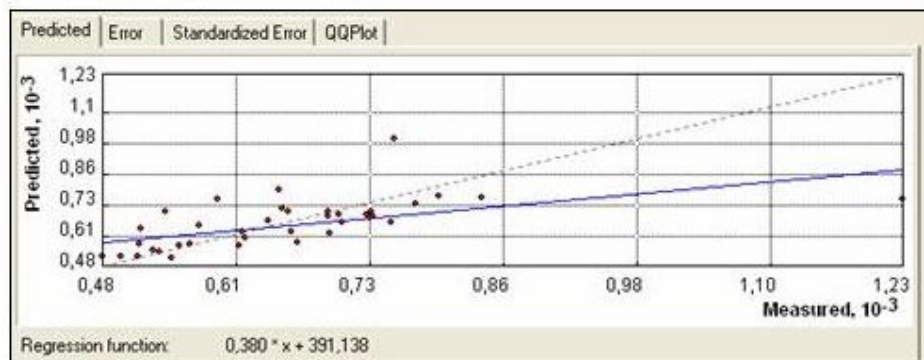
**Figura 5:** Hietograma das precipitações anuais médias na bacia do Pajeú (Fonte: gerada no *Excel*)

Após a definição do banco de dados e da configuração da rede pluviométrica a ser utilizada, a planilha foi convertida ao formato *Acces*, para, em seguida, ser vinculada ao programa computacional *ArcGis 9*. Este programa foi escolhido para execução do mapeamento das superfícies interpoladas, exibindo as isolinhas delineadas pela variável em estudo, segundo o método adotado.

A análise estatística da variável foi realizada com recursos deste programa. Foi então testado o ajuste da distribuição de freqüências à distribuição normal e log-normal, sendo a seleção do melhor ajuste feita por análise visual, a qual resultou na manutenção da distribuição normal. Esse teste do ajuste à distribuição normal, ou sua transformação logarítmica, é necessário quando se pretende aplicar metodologia geoestatística (JOHNSTON *et al.*, 2001). A Figura 6 apresenta a distribuição normal da variável e a Fig.7 a regressão linear entre os valores medidos e estimados da precipitação média em cada estação pluviométrica. Os valores determinados para as tendências centrais e outros parâmetros estatísticos importantes à análise estão esboçados na Tab.(2).



**Figura 6:** Distribuição normal da precipitação média (Fonte: gerada no *ArcGis 9*)



**Figura 7:** Regressão linear entre valores medidos e estimados (Fonte: gerada no *ArcGis 9*)

**Tabela 2:** Estatísticas obtidas na distribuição normal das freqüências

Parâmetros estatísticos	Valores (mm)
Máxima	1227,6
Mínima	484,00
Média	657,88
Mediana	657,80
Desvio padrão	133,77
Variância	17894,41
Curtose	9,89
Assimetria	2,03

Os gráficos das Fig. 5, 6 e 7, (hietograma, distribuição normal e regressão linear), mostraram simultaneamente um mesmo ponto estatisticamente disperso do conjunto analisado. Este ponto refere-se ao pluviômetro indicado na posição 7 da Fig. 4 e 5.

Durante a investigação sobre a existência de tendência espacial na variável estudada, com recursos do próprio *software* utilizado, foi detectada suave tendência, embora não tenha sido necessário sua remoção, segundo os resultados das sucessivas validações cruzadas.

Para execução das interpolações adotou-se a técnica de krigagem ordinária, a partir da inferência de sua estrutura de correlação espacial. Com o intuito de investigar a influência da direção na estrutura de correlação, analisou-se a existência de anisotropia, cujo ângulo de 278,9° foi otimizado pelo *software*, tomando o norte como referência.

O semivariograma experimental foi testado a partir dos ajustamentos aos semivariogramas: esférico, exponencial e gaussiano, tendo o modelo exponencial apresentado o melhor ajuste. A avaliação dos erros resultantes da validação cruzada foi o critério da escolha. O grau de dependência espacial foi analisado segundo Cambardella *et al.* ( 1994).

Todas as informações referentes à aplicação da metodologia constituíram o relatório de parâmetros e validação cruzada. Foi então confeccionado o mapa de interpolação dos pontos de medição, associado a uma legenda auxiliar para identificação e quantificação da precipitação média. Com o mesmo procedimento, foi também elaborado o mapa das estimativas dos erros resultantes das interpolações. Estes mapas proporcionaram a análise desejada, discussões importantes sobre a influência da altitude no comportamento da precipitação, além da identificação de microclima existente na bacia. Esta relação foi ilustrada a partir da imagem do relevo, gerada através de dados de radar (SRTM, 2006). Nesta imagem foi traçado um perfil altimétrico que permitiu o detalhamento do relevo entre o pico da bacia do Pajeú e sua foz.

## 6 Resultados e discussões

Os elementos processados na metodologia serão apresentados da seguinte forma: o semivariograma ajustado ao modelo teórico na Fig.8; o relatório dos parâmetros utilizados e suas validações cruzadas na Tab.3; o mapa das superfícies interpoladas na Fig.9; o mapa das estimativas de erros de interpolação na Fig.10; e o mapa do relevo e perfil altimétrico na Fig.11.

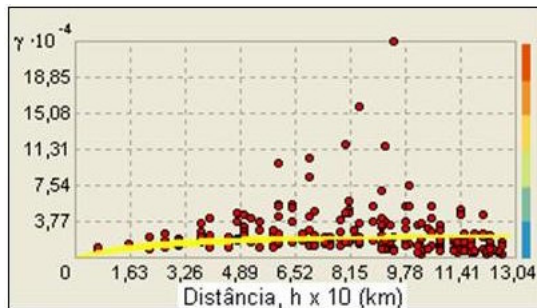
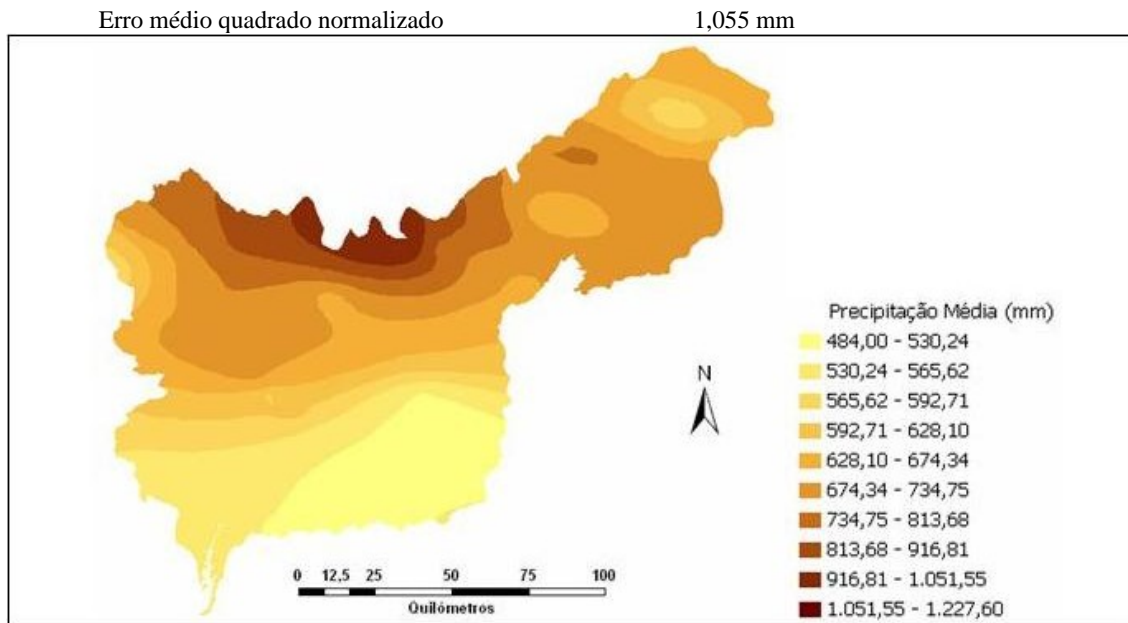


Figura 8: Ajustamento ao semivariograma exponencial (Fonte: gerada no ArcGis 9)

Tabela 3: Relatório dos parâmetros e validação cruzada

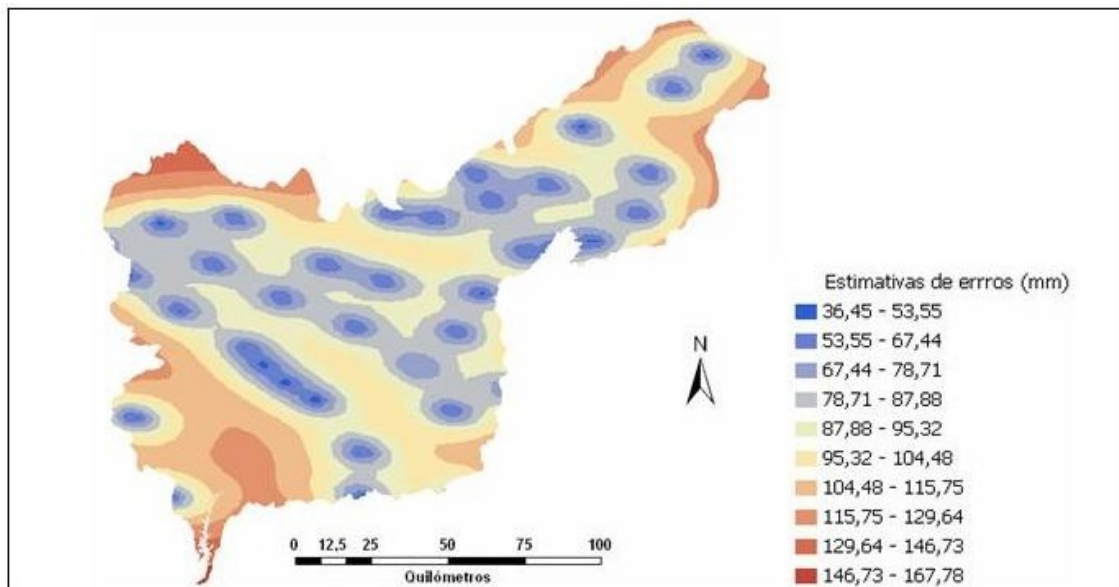
Transformação estatística	Normal
Remoção de tendência	Sem remoção
Direção	278,9° N – anisotrópica
Modelo do semivariograma teórico	Exponencial
Alcance máximo (a)	127,43 km
Alcance mínimo (a)	63,06 km
Patamar (C + C <sub>0</sub> )	677,63 mm <sup>2</sup>
Efeito Pepita (C <sub>0</sub> )	22047 mm <sup>2</sup>
Dependência espacial [C <sub>0</sub> / (C + C <sub>0</sub> )] x 100 %	3,07 % (forte)
Validação cruzada	
Erro médio	-0,2922 mm
Erro médio quadrático	107,7 mm
Erro médio padrão	108,9 mm
Erro médio normalizado	-0,001404 mm





**Figura 9:** Mapa da distribuição espacial da precipitação média na bacia do Pajeú (Fonte: gerada no ArcGis 9)

O mapa das superfícies interpoladas da Fig.9 mostrou que o Norte da bacia é mais úmido que o Sul, comprovando o conhecimento válido para todo o Sertão de Pernambuco. Tal conhecimento afirma que a mesorregião do Sertão do São Francisco é a parte mais seca do Estado. Esta região é caracterizada por uma planície que margeia o lado esquerdo deste rio, limite com o Estado da Bahia, onde são constatados os menores índices pluviométricos. Já na mesorregião do Sertão pernambucano, localizado ao norte, o relevo é bastante ondulado à medida que se aproxima das divisões estaduais com a Paraíba e o Ceará, os quais também coincidem com divisores de bacias hidrográficas, caracterizados por serras e chapadas de grandes elevações. Nestas áreas, os índices pluviométricos são maiores em relação à região do São Francisco. Neste caso, os sistemas de circulação meteorológica predominantes, responsáveis pela produção de chuvas na região, são influenciados pelas elevações altimétricas a se precipitarem. A este fenômeno dá-se o nome de efeito orográfico.



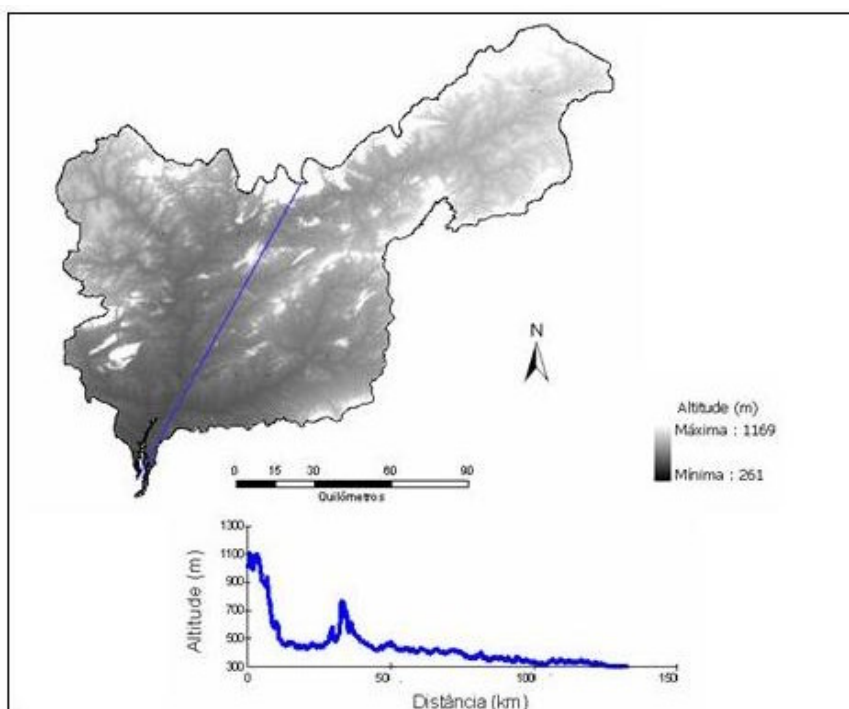
**Figura 10:** Mapa das estimativas de erros de interpolação (Fonte: gerada no ArcGis 9)

O mapa das estimativas dos erros da Fig.10 permitiu uma avaliação dos seus valores relativos e localizações através da escala fornecida, segundo as indicações em cores e valores, ambos definidos para cada intervalo de isolinhas. Observou-se então os maiores erros nas áreas de baixas densidades pluviométricas, conseqüentemente

as menores distâncias entre as estações. O método considerou um alcance mínimo de 63,06 km e máximo de 127,43 km, para a estrutura de correlação espacial em estudo, considerada forte por Cambardella *et al.* (1994).

Considerando os municípios com áreas totalmente pertencentes à bacia do Pajeú, o município de Floresta foi apontado pelas interpolações como o mais localizado nas regiões mais secas da bacia, seguido de Carnaubeira da Penha e Betânia. Observou-se também que estes três municípios situaram-se no mais baixo patamar altimétrico da bacia. Por conseguinte, o município de Triunfo representou o maior índice pluviométrico, local onde se constatou o ponto culminante da bacia, sob o ponto de vista altimétrico. Este município é caracterizado por chuvas em grande parte do ano e armazenamento nos reservatórios em longos períodos, que, associados às temperaturas amenas e vegetação verde, faz desta região um dos microclimas de Pernambuco, por se localizar em pleno Sertão, cujas características fisiográficas são bastante adversas.

Foi por estes motivos que a estação pluviométrica de Triunfo assumiu a posição 7 no mapa da Fig.4. Nas análises estatísticas este ponto identificou uma dispersão anômala que poderia ser confundida como erro de medições, caso não existisse o prévio conhecimento climático da região. Esta interpretação fica estatisticamente notória quando se analisa o gráfico da distribuição normal e a regressão linear entre os pontos medidos e estimados mostrados nas Fig. 6 e 7, conjuntamente com o hietograma da Fig.5.



**Figura 11:** Imagem do relevo e Perfil altimétrico (Fonte: gerada no ArcGis 9)

Para ilustração da discussão, a Fig.11 apresentou uma imagem da bacia e sua escala altimétrica, onde se pode visualizar a variabilidade do relevo e a rede de drenagem. Ainda na mesma figura foi definido um perfil do relevo, traçado entre o município de Triunfo, local onde se constatou as maiores precipitações, e Floresta, especificamente na desembocadura do rio Pajeú, onde os índices pluviométricos foram os mais baixos, comprovando assim a influência da altitude sobre o comportamento da precipitação.

Segundo o processo anisotrópico analisado na metodologia, a direção em que predomina o fenômeno da precipitação na bacia é de 278,9° em relação ao norte, ângulo otimizado pelo *software* durante a validação cruzada. Isto significa dizer que representa a direção de 8,9° com referência ao leste. Nesta região observa-se a predominância da ZCIT, em relação aos outros sistemas de circulação vindos do leste.

Salgueiro *et al.* (2006) analisaram as precipitações máximas sobre as diversas altitudes de Pernambuco e concluíram que a influência direcional ocorria a 35,8° em relação ao leste. Salgueiro (2005) analisou a variabilidade espacial da precipitação média na bacia do rio Ipojuca, e constatou um ângulo de 35,9° também em relação ao leste. Em todos os estudos foi verificada a direção Nordeste / Noroeste para definição do fenômeno anisotrópico em suas respectivas áreas de pesquisa. Em ambos os casos, as regiões estudadas pelos autores têm formas territoriais alongadas, com início no Sertão, até o Litoral, envolvendo diferentes situações climáticas, além de serem cortadas transversalmente pelas obstruções topográficas do Planalto da Borborema, que, entre outros motivos, devem justificar as diferenças direcionais da precipitação quando se analisa isoladamente uma bacia totalmente inserida no Sertão do Estado.

## 7 Conclusões e recomendações

A geoestatística, através do seu interpolador kriging, mostrou ser uma ferramenta bastante segura, capaz de auxiliar o planejamento e o gerenciamento dos recursos hídricos, por conseguir localizar e quantificar a distribuição espacial da precipitação com suficiente precisão, além de identificar os erros de estimativas das interpolações.

A experiência comprovou a existência da influência das altitudes em relação aos valores precipitados, em uma região ou uma bacia hidrográfica.

A Geoestatística dispõe de outro interpolador denominado co-kriging. Este permite uma análise simultânea de duas ou mais variáveis. Sendo assim, fica possível analisar a variabilidade espacial da precipitação, considerando a influência da altitude. Recomenda-se a continuidade da pesquisa para comparação da eficiência dos métodos.

A predominância da direção em que o fenômeno natural da precipitação atravessa a bacia do rio Pajeú é Nordeste / Noroeste, segundo o ângulo otimizado pelo método kriging.

O mapa de estimativas dos erros demonstrou que, no período estudado, a bacia do rio Pajeú requeria uma rede pluviométrica mais adensada, tratando-se de análise da dependência espacial dos pontos amostrados. Concluiu-se, então, que quanto maior o número destes pontos, melhor deverá ser a estrutura de correlação espacial.

A Geoestatística pode auxiliar o planejamento e acompanhamento do desenvolvimento operacional das redes pluviométricas, segundo análises periódicas de eficiência, na distribuição espacial das estações pluviométricas. Recomenda-se associar a este tipo de análise a utilização dos coeficientes de irregularidade meteorológica como variável, para delinear locais vulneráveis às chuvas convectivas e, conseqüentemente, a necessidade de adensamento das redes.

A identificação dos níveis das isolinhas nos municípios confirmou o atual conhecimento climático do Estado de Pernambuco, contido no Plano Estadual de Recursos Hídricos e em outros documentos.

## Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do Serviço Geológico do Brasil – CPRM e da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE.

## Referências

ALMEIDA, T. A. *et al.* Análise da variabilidade espacial da precipitação na bacia do rio Ipanema em Pernambuco. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 7., 2004, São Luís. *Anais...* São Luís: ABRH, 2004. CD-ROM.

BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. Precipitação. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). *Hidrologia: ciência e aplicação*. Porto Alegre: UFRGS/ABRH/EDUSP, 1993. p. 177-200.

CAMBARDELLA, C. A. *et al.* Fieldscale variability of soils properties in central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, v. 58, p. 1501-1511, 1994.

FERREIRA FILHO, W. M.; NOGUEIRA, L. A. A.; BEMFEITO, C. J. S. Aplicação da metodologia kriging à pluviometria do estado do Ceará. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 5., 2000, Natal. *Anais...* Natal: ABRH, 2000. CD-ROM.

GOMES, R. S.; SILANS, A. M. B. P. Comparação de diversos métodos de cálculo da precipitação média sobre uma bacia hidrográfica. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 5, 2000, Natal. *Anais...* Natal: ABRH, 2000. CD-ROM.

JOHNSTON, K. *et al.* *Using ArcGis geostatistical analyst*. New York: Esri. 2001. 300 p.

OLIVEIRA, J. N.; CHAUDRHY, F. H. Uso de métodos geoestatísticos na determinação de isoietas a partir de dados pluviométricos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 11., 1995, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABRH, 1995. p. 091-097.

PERNAMBUCO. Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente. *Atlas de bacias hidrográficas de Pernambuco*. Recife, 2006. p. 90-91.

PERNAMBUCO. Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente. *Plano estadual de recursos hídricos do estado de Pernambuco*. Recife, 1997. v.1, Pt. II e III.

SALGUEIRO, J. H. P. B. *Avaliação de rede pluviométrica e análise de variabilidade espacial de precipitação: estudo de caso na bacia do rio Ipojuca em Pernambuco*. 2005. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005.

SALGUEIRO, J. H. P. B.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Geoestatística aplicada à variabilidade espacial e padrões de precipitação na bacia do rio Ipojuca em Pernambuco. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 7., 2004, São Luís. *Anais...* São Luís: ABRH, 2004. CD-ROM.

SALGUEIRO, J. H. P. B.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MOURA, G. B. A. As precipitações máximas e seus tipos de ocorrências sobre as diversas altitudes de Pernambuco: uma abordagem geoestatística do atual conhecimento em Pernambuco. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 8., 2006, Gravatá. *Anais...* Gravatá: ABRH, 2006. CD-ROM.

SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION. Disponível em: <<http://www.jpl.nasa.gov/srtm>>. Acesso em: 24 jul. 2006.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudo de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. *Tópicos em ciências do solo*. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 2000. p.1-54.

WIKIPÉDIA. *Microrregião do Vale do Pajeú*. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org>>. Acesso em: 18 jan.2008.

## **SOBRE OS AUTORES**

### **João Hipólito Paiva de Britto Salgueiro**

Engenheiro Civil pela Universidade de Pernambuco – UPE, Mestre em Engenharia Civil na área de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, pela Universidade Federal de Pernambuco – UFPE e, atualmente, Engenheiro Hidrólogo na Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM (Serviço Geológico do Brasil), na Superintendência Regional de Recife.

### **Suzana Maria Gigo Lima Montenegro**

Engenheira Civil pela Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, Mestre em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos – USP, Ph. D. em Engenharia de Recursos Hídricos pela University of Newcastle Upon Tyne (Inglaterra), Professora Associada do Departamento de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia e Geociências – CTG da UFPE.