

DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS PRECIPITAÇÕES CONVECTIVAS NA REGIÃO METROPOLITANA DA CIDADE DE RECIFE EM PERNAMBUCO - BRASIL

João H. P. de B. Salgueiro¹

Suzana M. G. L. Montenegro²

Fábio A. da Costa¹

Leidjane M. M. de Oliveira³

¹ Eng.Hidrólogo da CPRM; Av. Sul, 2291, Afogados, Recife; PE; Brasil; CEP: 50750-011; E-mail: joao.salgueiro@cprm.gov.br; fabio.araujo@cprm.gov.br

² Profª Associado da UFPE; Av.Acadêmico Hélio Ramos s/n; Recife; PE; Brasil; CEP: 50670-901; E-mail: suzanam@ufpe.br

³ Doutoranda em Engenharia Civil – Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos da UFPE; Av.Acadêmico Hélio Ramos s/n; Recife; PE; Brasil; CEP: 50670-901; E-mail: leidjaneoliveira@hotmail.com

ABSTRACT – Scientific research on natural disasters have escalated across the planet. This is due the frequency and magnitude with which the phenomena are occurring. Heavy rains have been of concern due to it is sudden destruction power, mainly floods and landslides in urban areas. The characteristics of convective storms may favor the occurrence of heavy rain. This article has identified areas of Metropolitan Recife – RMR which were more vulnerable to the occurrence of convective storms. For that, weather irregularity coefficients were obtained from the rainfall time series, and next steps in the RMR, in a given period of observation. Geostatistics was used to interpolat surface for identifying the areas most vulnerable to convective rain.

Palavras chaves: Chuvas convectivas; chuvas intensas; desastres naturais

INTRODUÇÃO

O comportamento das chuvas extremas máximas, ou simplesmente chuvas intensas, sempre foi alvo constante de investigações no âmbito das pesquisas científicas. Entretanto, as possíveis alterações nos regimes hidrológicos provocados pelas mudanças climáticas estimularam o aprofundamento dos estudos desenvolvidos nessa área, por suas implicações com o complexo cenário dos desastres naturais. São chuvas de elevadas intensidades precipitadas em curtas durações, caracterizadas pelo seu súbito poder de destruição, algumas vezes com registros de prejuízos ao patrimônio público, privado, e perdas de vidas humanas.

Pfafstetter (1982) estudou as chuvas intensas no Brasil oferecendo grande contribuição aos projetos de drenagens urbanas e rurais e controle de enchentes. Llamas (1993) examinou com detalhe os eventos meteorológicos dominantes e percebeu que as tormentas intensas eram associadas às circulações convectivas. Diaz (1995) afirmou que as chuvas do tipo convectivas se formavam com a ascensão de ar que foi fortemente esquentado *in situ*, próprios de áreas com grandes insolações e umidades. O autor afirma que o ar quente, úmido e instável ascende formando nuvens do tipo cúmulos, de grande desenvolvimento vertical, para produzir chuvas intensas de pouca duração, e que a alta intensidade das chuvas convectivas origina calamidades em zonas urbanas e rurais. Nas zonas urbanas causam deslizamentos em áreas instáveis e problema na circulação do transito. Nas rurais, a perda de solos impede o aproveitamento efetivo das atividades agrícolas. Mendonça & Oliveira (2007) explicaram que a forma da nuvem é determinada pela intensidade com que ocorrem os movimentos ascensionais, bem como seu alcance vertical. As nuvens de desenvolvimento vertical, também classificadas como nuvens baixas, são aquelas geradas pelos movimentos convectivos que formam nuvens do tipo cúmulos, que quando acrescidas e incorporadas, podem trazer chuvas pesadas acompanhadas de relâmpagos e outros efeitos meteorológicos típicos das

regiões. Especificamente aplicado aos centros urbanos, Teza & Baptista, (2005) afirmaram que a elevação da temperatura nas áreas centrais urbanas conhecidas como ilhas de calor facilita a ascensão do ar. O aumento da temperatura é influenciado pelas ações antrópicas, causadas pelas edificações, ruas, avenidas, pontes, viadutos e outras séries de construções, que fazem aumentar significativamente a irradiação de calor para a atmosfera, conforme os diferentes padrões de reflectibilidade ou albedo, que vem a depender dos materiais empregados na construção civil.

Outros estudos também merecem ser citados, como o de Almeida *et al.* (2004), realizado na bacia do rio Ipanema em Pernambuco, onde o processo de formação de chuvas através da distribuição espacial dos coeficientes de irregularidade foi analisado. A comprovação do atual conhecimento sobre a pluviometria em Pernambuco, através da análise da variabilidade espacial das precipitações máximas, foi efetuado por (Salgueiro *et al.*, 2006). Os mesmos autores, dando sequência aos estudos, prosseguiram em Salgueiro *et al.* (2008), destacando a bacia do rio Capibaribe pela necessidade de controle mais contínuo dos níveis dos seus rios, devido as grandes variações sazonais e suas consequências danosas. Foi então analisado a distribuição espacial da precipitação média e seus tipos de ocorrências. No ano seguinte, Salgueiro *et al.* (2009) entenderam que os riscos dos frequentes desastres naturais na RMR, como as inundações nas planícies e os deslizamentos de encostas, são, na maioria das vezes, causados pelos excessos de precipitações sazonais. Investigaram, então, o mês de maior precipitação utilizando séries pluviométricas e em seguida mapearam as precipitações máximas. Foram identificadas as áreas vulneráveis às maiores precipitações no mês de junho, causadoras desses desastres. Também se considera importante para a RMR o trabalho realizado por Pfaltgraff (2007), ressaltando a longa convivência de parte da população com os deslizamentos dos morros, registrando mortos e feridos ao longo das décadas de 1980 e 1990. O autor comprovou perante o poder público a necessidade de se criar ferramentas para identificação das áreas naturalmente suscetíveis aos deslizamentos.

Com vista a reduzir os impactos dos desastres naturais decorrentes das chuvas intensas e outros eventos meteorológicos, muitos países já começaram a repensar suas atividades de intervenção estrutural e não estrutural de defesa, inclusive o Brasil. Entre outras medidas, a implantação de um sistema de alerta à população desenvolvida a partir de tecnologias avançadas, onde a informação em tempo real é tratada como marco imprescindível ao sistema, foi uma alternativa quase que obrigatória.

Considerando que a formação das chuvas intensas pode ser influenciada pelas circulações convectivas e favorecer os desastres naturais, este artigo identificou as áreas da Região Metropolitana do Recife – RMR, que se mostraram vulneráveis às ocorrências de circulações convectivas. Na RMR os meses chuvosos se concentram entre abril a julho. É nesse período que ocorrem os deslizamentos de encostas nas áreas topograficamente mais altas; as inundações fluviais nas calhas maiores dos rios e canais; e as áreas alagadas em superfícies pavimentadas, estas duas últimas nas regiões de planície.

METODOLOGIA

A metodologia utilizou o Critério das características meteorológicas dominantes em uma região, determinadas pelos Coeficientes de irregularidades meteorológicas, obtidos a partir das séries pluviométricas temporais medidas dentro e próximas à RMR, em um determinado período de observação. Com o auxílio da ferramenta Geoestatística, especificamente o método de interpolação de Krigagem ordinária, foi possível criar um mapa de superfície com isolinhas, para identificação do grau de vulnerabilidade às precipitações convectivas.

Critério das características meteorológicas dominantes em uma região

As precipitações podem ser classificadas em três tipos: *chuvas frontais*, caracterizadas por média intensidade, grande duração e grandes áreas de ocorrências; *convectivas*, por grande intensidade, pequena duração e pequenas áreas, e *orográficas*, com pequena intensidade, grande duração, em pequenas áreas localizadas próximas às elevações topográficas. Neste caso, as elevações constituem obstruções responsáveis pela antecipação de parte da precipitação que não conseguem ultrapassá-las. No lado montante dessas elevações ocorre ascendência de vento úmido que se resfria ao subir na atmosfera formando nuvens e produzindo chuvas, já na parte jusante, o vento descendente seco e frio, impede a formação de nuvens, e consequentemente há falta de chuvas.

O critério das características meteorológicas dominantes em uma região foi elaborado para planejar as redes pluviométricas e é bastante usado para verificação das suas eficiências. Consiste em examinar com detalhe os eventos meteorológicos dominantes. Nos regimes pluviométricos dominantes comumente se destacam as chuvas provocadas por tormentas frontais, ou tormentas intensas associadas às circulações convectivas.

Com o objetivo de analisar o regime dominante pode-se então introduzir a concepção de coeficiente de irregularidade meteorológica, para considerar a preponderância de processos irregulares (precipitação convectiva) sobre a regularidade meteorológica (precipitação frontal). Este coeficiente é definido como sendo a relação entre a precipitação anual máxima e a mínima durante um período longo de observações,

conforme a expressão (1). Quanto maior for este coeficiente, mais irregular será o regime de chuvas. Esse coeficiente pode ser considerado alto se obtido acima de 3, segundo Llamas (1993).

$$ci = \frac{\rho_{\max}}{\rho_{\min}} \quad (1)$$

onde: ρ_{\max} é a precipitação máxima e ρ_{\min} precipitação mínima.

Método Geoestatístico de Krigagem

A Geoestatística dispõe de interpoladores eficientes capazes de estimar valores em pontos que não foram amostrados. Constituiu-se uma ferramenta poderosa para mapear com segurança as 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 também uma estacionaridade estatística de segunda ordem e dependência espacial entre os pontos medidos, inferida através de semivariograma. Esta função, denominada de semivariograma, estima a dependência espacial através da expressão (2):

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

Onde $\gamma^*(h)$ caracteriza a dependência espacial, $Z(x_i)$, $Z(x_i + h)$ são pares de valores medidos em locais afastados entre si da distância “h”, e $N(h)$, 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. A figura 1 apresenta o modelo geral de um semivariograma.

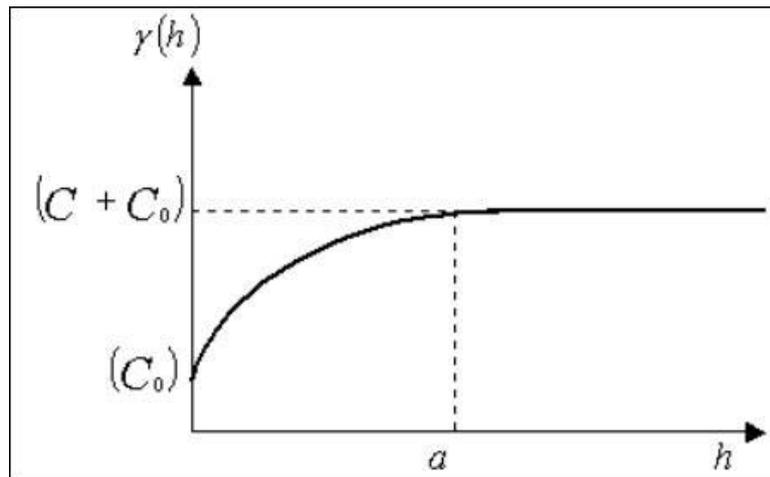


Figura 1 - Modelo típico do semivariograma (Salgueiro, 2005).

Assim, $\gamma^*(h)$ aumenta com “h” e se anula quando $h = 0$, conforme a expressão (1). Entretanto, quando “h” tende para zero, $\gamma^*(h)$ se aproxima de um valor positivo chamado “efeito pepita” (C_0). 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.

Os semivariogramas podem assumir três classificações diferentes a partir da relação contida na expressão (3), de acordo com o grau de dependência espacial que assumam. 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).

$$r = \left[\frac{C_0}{C + C_0} \right] \times 100\% \quad (3)$$

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 observações da variável, e teórico, após o ajuste do modelo ao semivariograma experimental. Os teóricos mais usados são os modelos esférico, exponencial e gaussiano. Para definição do ajuste do modelo teórico a ser usado torna-se necessário que todos estes modelos sejam testados. Como critério básico para a escolha é preciso que os erros sejam avaliados, constituindo-se um processo denominado validação cruzada. Para isto, o erro médio deve apresentar pequeno valor, o quadrático aproximar-se do padrão, o normalizado tender para 0 (zero) e o quadrático normalizado para 1 (um).

A krigagem é um método de interpolação geoestatística 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 dos demais algoritmos disponíveis. 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 (4) define matematicamente este interpolador:

$$Z^*(\chi_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(X_i), \text{ com } \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1, \text{ onde:} \quad (4)$$

$Z^*(\chi_0)$ são valores estimados para qualquer local χ_0 ;

N é o número de valores medidos;

λ_i são os pesos associado a cada valor medido, $Z(X_i)$.

Localização e caracterizações fisiográficas

A RMR situa-se numa faixa de 80 km de comprimento ao longo da costa do Estado de Pernambuco, no extremo Nordeste do Brasil, e ocupa 2,62% da área do Estado (Pfaltgraff, 2007). Localizada às margens do oceano Atlântico a RMR é conhecida também como “A Grande Recife”. É a segunda maior aglomeração urbana do Nordeste e a sexta do Brasil, superada pelas Regiões Metropolitanas de São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte, Porto Alegre e Salvador.

Com o objetivo de estimular o desenvolvimento das cidades localizadas nos arredores da cidade do Recife, capital do Estado de Pernambuco, a RMR foi criada pelo Governo Federal, através da Lei Complementar Federal 14/73 de 8 de junho de 1973. Esta medida não se limitou apenas ao Recife e sim a todas as grandes capitais brasileiras. Originalmente os 14 municípios que compuseram a RMR foram: Recife, Jaboatão dos Guararapes, Olinda, Paulista, Abreu e Lima, Igarassu, Camaragibe, Cabo de Santo Agostinho, Araçoiaba, Ilha de Itamaracá, Ipojuca, Moreno, Itapissuma e São Lourenço da Mata. Na RMR reside uma população de 3.787.667 habitantes, distribuídos em uma área de 2.768.454 km², ocupadas pelos 14 (quatorze) municípios que os integram, representando uma densidade demográfica de 1.361,37 habitantes / km², conforme IBGE (2009). Do ponto de vista socioeconômico, o Índice de Desenvolvimento Humano Médio – IDHM é de 0,780 (PNUD, 2007), o Produto Bruto Interno – PIB de R\$ 41.006.963,00 e a Renda Per capita igual a R\$ 10,950 (IBGE, 2007).

As condições climáticas nessa região implicam em invernos severos com ocorrência de elevados índices pluviométricos, o que deflagra aumento da erosão nas encostas ocupadas, eventos de deslizamentos de barreiras, alagamentos e inundações em partes baixas. O relevo da RMR é composto por quatro tipos de formações: a planície costeira, a qual margeia o recorte de todo o litoral da região; os tabuleiros costeiros encontrados basicamente ao norte, representando as formações barreiras, com níveis que vão de 30 a 100 m, podendo atingir até 200 m ao oeste; as colinas, ou colinas dissecadas, encontradas na parte oeste, juntas aos morros com elevações de 30 a 300 m, aumentando de leste para oeste; os morros, com domínio no extremo oeste juntamente com serras baixas, com cotas que chegam a 424 m. A Figura 2 apresenta o relevo da RMR.

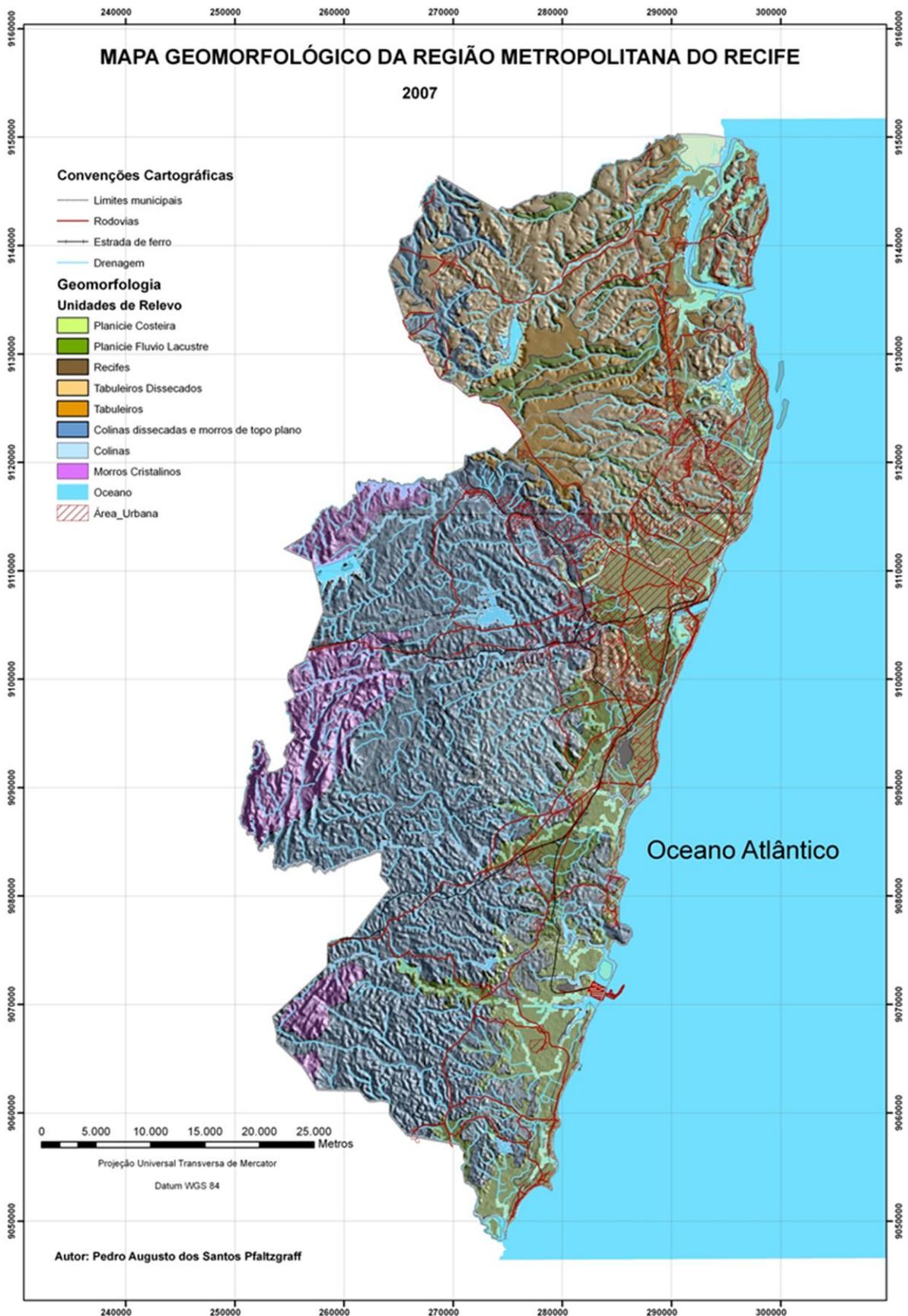


Figura 2 – Morfologia da Região Metropolitana do Recife (Pfaltzgraff, 2007).

Elaboração do banco de dados

Para obtenção dos dados pluviométricos foram consultados os dois maiores acervos produzidos no Estado de Pernambuco. O banco de dados do Instituto de Tecnologia de Pernambuco - ITEP e a *HIDROWEB*. As séries pluviométricas do segundo banco são produzidas pela Rede Hidrometeorológica Básica Nacional, operada Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais/Serviço Geológico do Brasil – CPRM/SGB em parceria com a Agência Nacional de Água – ANA.

Foram selecionadas estações inseridas na RMR e/ou nas suas proximidades, suficientemente qualificadas e quantificadas, de modo a garantir resultados consistentes à pesquisa. Após avaliação realizada no acervo dos dados disponíveis, selecionaram-se 9 estações da Rede pluviométrica do Estado e mais 8 da Rede Nacional, perfazendo um total de 17 estações.

Como critério para a escolha das séries pluviométricas históricas, tentou-se aproveitar o maior número das séries que contivessem períodos de observações comuns e contínuos. O critério estabelecido resultou, porém, na redução inevitável do período determinado para o estudo, uma vez que parte delas apresentou lacunas, incorrendo na necessidade de alguns trechos delas serem descartados. Findado o processo de escolha, o período em estudo foi então fixado de janeiro de 1994 a dezembro de 2007. As séries de dados escolhidas foram consistidas segundo o programa computacional *HIDROPLU 4.1*.

Mediante o "Critério das características meteorológicas dominantes em uma região" (Llamas, 1993), os coeficientes de irregularidade meteorológica foram obtidos. A distribuição espacial foi avaliada como auxílio do mapa elaborado para este fim, conforme a Figura 3. Este mapa georreferenciou as posições das estações escolhidas do ponto de vista espacial, utilizando para esta análise preliminar o programa *ARC GIS 9.3*. A Figura 4 ilustra graficamente os coeficientes de irregularidade meteorológica por estação em consonância com o mapa da configuração espacial da Figura 3, as quais serão utilizados nas interpolações. Diante das ações realizadas finalmente foi possível elaborar o banco de dados.

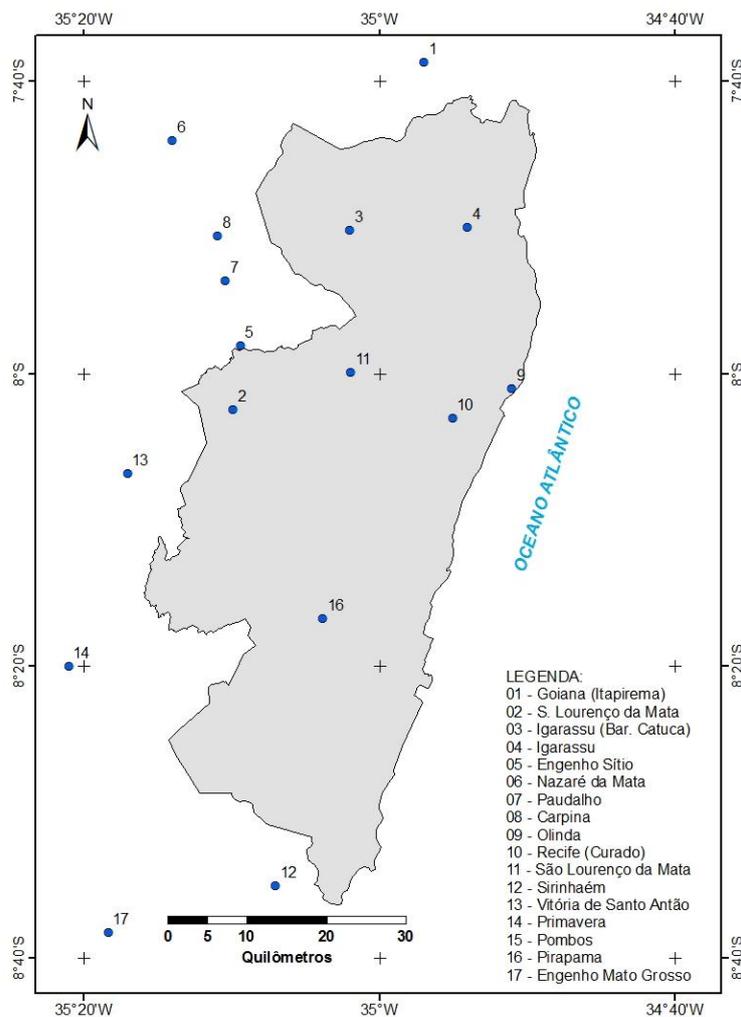


Figura 3 – Configuração espacial da rede pluviométrica.

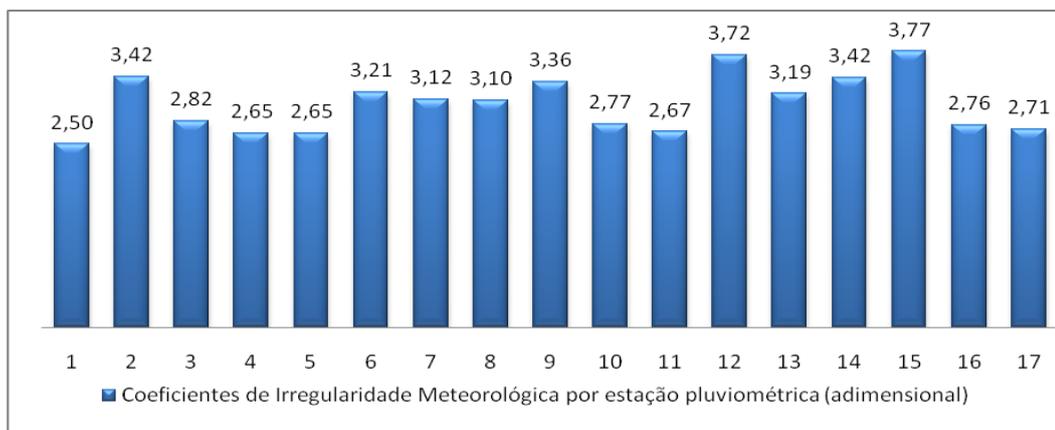


Figura 4 – Coeficientes de irregularidade meteorológica.

Análise estatística

Dispondo dos recursos oferecidos pelo *ARCGIS 9.3* para análise estatística, foi testado o ajuste da distribuição de freqüências à distribuição normal e log-normal, sendo a seleção do melhor ajuste feita por análise visual, mantendo-se a distribuição normal para os coeficientes de Irregularidade Meteorológica. Esse teste do ajuste à distribuição normal, ou sua transformação logarítmica, é necessário quando se pretende aplicar metodologia Geoestatística, segundo Johnston *et al.* (2001). A Figura 5 apresenta o gráfico cartesiano da distribuição estatística normal para a série de Coeficientes de Irregularidade Meteorológica do período estudado na RMR. Em seguida foram determinados os valores das tendências centrais e outros parâmetros estatísticos importantes à análise, conforme a Tabela 1.

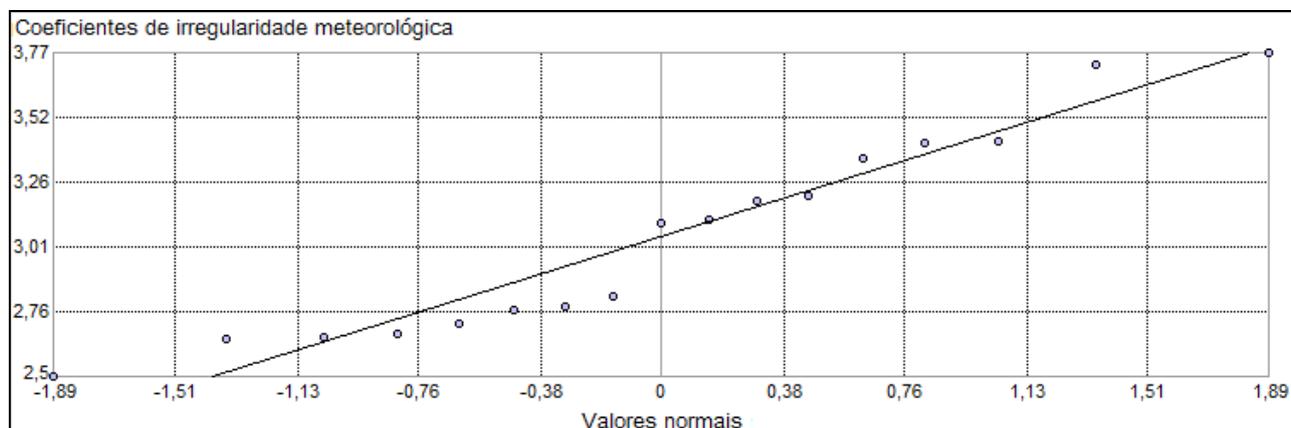


Figura 5 – Análise da distribuição normal da frequência dos coeficientes de Irregularidades Meteorológica.

Tabela 1 – Parâmetros estatísticos da variável coeficiente de irregularidade meteorológica.

Nº de pontos	17
Mínima	2,50
Máxima	3,77
Média	3,05
Desvio padrão	0,39
Variância	0,15
1º Quartil	2,70
Mediana	3,10
3º Quartil	3,37
Curtose	1,97
Assimetria	0,40

Aplicação da técnica de Krigagem

Para interpolação dos valores dos Coeficientes de Irregularidade Meteorológica obtidos nas estações pluviométricas da RMR, adotou-se a metodologia Geoestatística utilizando a técnica de Krigagem ordinária, a partir das inferências de sua estrutura de correlação espacial. O processo de anisotropia foi testado com o intuito de investigar a existência de influências direcionais relacionadas aos sistemas meteorológicos produtores de chuvas. Porém, o processo foi imediatamente descartado, uma vez que o teste acrescentou um aumento nos erros dos resultados analisados sobre a estrutura de correlação espacial, durante as sucessivas investigações nas validações cruzada. Todo o processo de análise até a elaboração do mapa final das superfícies interpoladas foi utilizado o programa *ARCGIS 9.3*.

Os coeficientes estudados tiveram seu semivariograma experimental testado, a partir dos ajustamentos aos semivariogramas teóricos: esférico, exponencial e gaussiano, tendo o modelo exponencial apresentado o melhor ajuste. A Figura 6 mostra o semivariograma teórico ajustado. A avaliação dos erros resultantes da validação cruzada foi o critério da escolha. Os graus de dependência espacial das variáveis foram analisados segundo Cambardella *et al.* (1994). Todas as informações referentes à aplicação da metodologia constituíram o relatório de parâmetros e validação cruzada. Finalmente, foi elaborado um mapa com a superfície interpolada, o qual permitiu a análise das faixas das isolinhas sobre os municípios e áreas geográficas da RMR, objeto deste artigo.

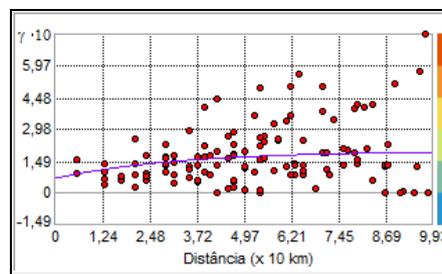


Figura 6 – Ajustamento do semivariograma teórico exponencial.

Salgueiro *et al.*, (2010) analisaram as precipitações máximas mensais do mês mais chuvoso na RMR e elaboraram o mapa da superfície interpolada como mostra a Figura 7, aqui exibida para análise comparativa, uma vez que comungam o mesmo período de observação.

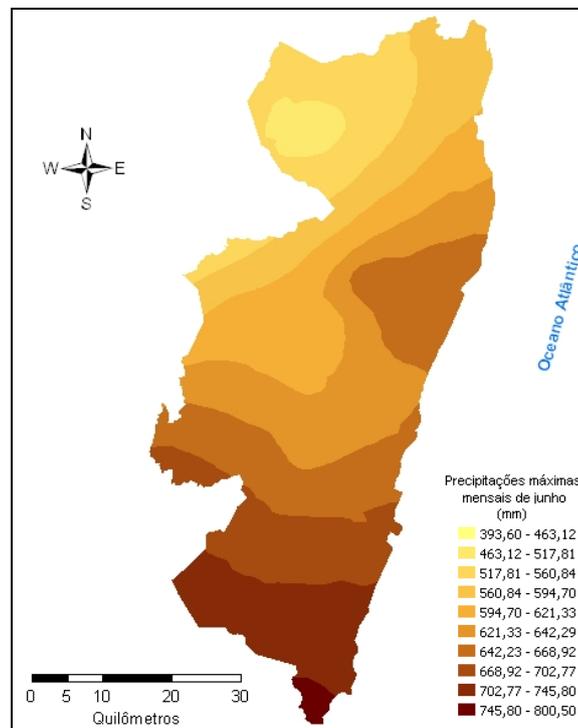


Figura 7 – Precipitações máximas mensais de junho no período de 1998 a 2007. (Salgueiro *et al.*, 2010).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 2 apresenta o banco de dados de entrada para o processo de interpolação das superfícies que identificaram as regiões vulneráveis às chuvas convectivas. O descarte de séries incompletas durante a seleção das estações, não só diminuiu o período de observação fixado para pesquisa, como também resultou na redução da densidade no interior da RMR, como mostrado na Figura 3. Com isto, algumas estações mais distantes foram mantidas para assegurar pelo menos 17 estações, onde o mínimo recomendado para metodologia Geoestatística seria de 30 pontos, dito por Landim (1998) e mínimo de 10 pontos permitidos para utilização do software adotado, em Johnston *et al.* (2001).

Tabela 2 – Banco de dados da Rede pluviométrica.

Posição	Estações pluviométricas	Código	Coordenadas (Graus)		*Coeficiente	Instituição
			Latitude	Longitude	Irregularidade	
1	Itapirema - Goiana	28	-7,6442	-34,9489	2,50	ITEP
2	Barragem. Tapacurá - S. Lourenço da Mata	267	-8,0403	-35,1653	3,42	ITEP
3	Barragem Catucá - Igarassu	269	-7,8364	-35,0336	2,82	ITEP
4	Igarassu	734011	-7,8333	-34,9000	2,65	ITEP
5	Engenho Sítio - Chã de Alegria	735050	-7,9681	-35,1567	2,65	ANA/CPRM
6	Nazaré da Mata	735062	-7,7333	-35,2333	3,21	ITEP
7	Paudalho	735066	-7,8942	-35,1733	3,12	ANA/CPRM
8	Carpina	735157	-7,8428	-35,1825	3,10	ANA/CPRM
9	Olinda	834001	-8,0167	-34,8500	3,36	ITEP
10	Recife (Curado)	834007	-8,0500	-34,9167	2,77	ITEP
11	São Lourenço da Mata	835048	-7,9986	-35,0319	2,67	ANA/CPRM
12	Sirinhaém	835050	-8,5833	-35,1167	3,72	ITEP
13	Vitória de Santo Antão	835068	-8,1136	-35,2839	3,19	ANA/CPRM
14	Primavera	835128	-8,3333	-35,3500	3,42	ITEP
15	Pombos	835137	-8,1408	-35,3997	3,77	ANA/CPRM
16	Pirapama - Cabo de S. Agostinho	835138	-8,2792	-35,0633	2,76	ANA/CPRM
17	Engenho Mato Grosso - Rio Formoso/Sirinhaém	835140	-8,6375	-35,3056	2,71	ANA/CPRM

* Coeficientes de Irregularidade meteorológica (adimensional).

A apresentação gráfica dos valores dos coeficientes de irregularidade meteorológica na Figura 4, variando de 2,50 a 3,77, demonstra as poucas variações dentro do intervalo, ou a ausência significativa de anomalias. Isto foi comprovado pelos baixos valores para o desvio padrão (0,39) e a variância (0,15), obtidos nas análises estatísticas da Tabela 1. Na análise de frequência proposta pela distribuição normal da variável na Figura 6, é possível visualizar as dispersões existentes nas ocorrências dos valores obtidos para os coeficientes.

Durante os sucessivos testes de validação cruzada, propostos para a análise do comportamento direcional, investigando possível ocorrência de anisotropia nas irregularidades meteorológica da RMR, comprovou-se que, embora esses comportamentos sejam evidentes nos processos pluviométricos, com relação aos sistemas circulatórios de produção de chuvas, não se verifica para esses Coeficientes, mesmo sendo obtidos a partir de valores representativos das chuvas ocorridas na mesma região. O monitoramento dos erros foi o recurso utilizado.

Salgueiro *et al.* (2010) concluíram que os sistemas meteorológicos atuantes na RMR nos meses de junho, adentram o continente na direção nordeste, formando um ângulo de aproximadamente 36,2° com o leste. A estrutura de correlação espacial mostrou-se moderada, assumindo o intervalo entre 25 e 75% segundo Cambardella *et al.* (1994). Os elementos usados na metodologia estão relacionados no Relatório dos parâmetros mostrado na Tabela 3. A Figura 8 mostra o mapa da superfície interpolada.

Tabela 3 – Relatório dos parâmetros e validação cruzada das variáveis.

Método geoestatístico	Kriging
Programa computacional	ARCGIS 9.3
Variável	Coef. de Irregularidade Meteorológica
Transformação estatística	Normal
Direção	Isotrópica
Modelo do semivariograma teórico	Exponencial
Alcance máximo (a)	98,11 km
Patamar (C + C ₀)	0,13028 mm ²
Efeito Pepita (C ₀)	0,066717 mm ²
Dependência espacial $[C_0 / (C + C_0)] \times 100\%$	50,24 % (Moderada)
Validação cruzada:	
Erro médio	- 0,003315 mm
Erro médio quadrático	0,4189 mm
Erro médio padrão	0,3716 mm
Erro médio normalizado	- 0,01246 mm
Erro médio quadrado normalizado	1,091 mm

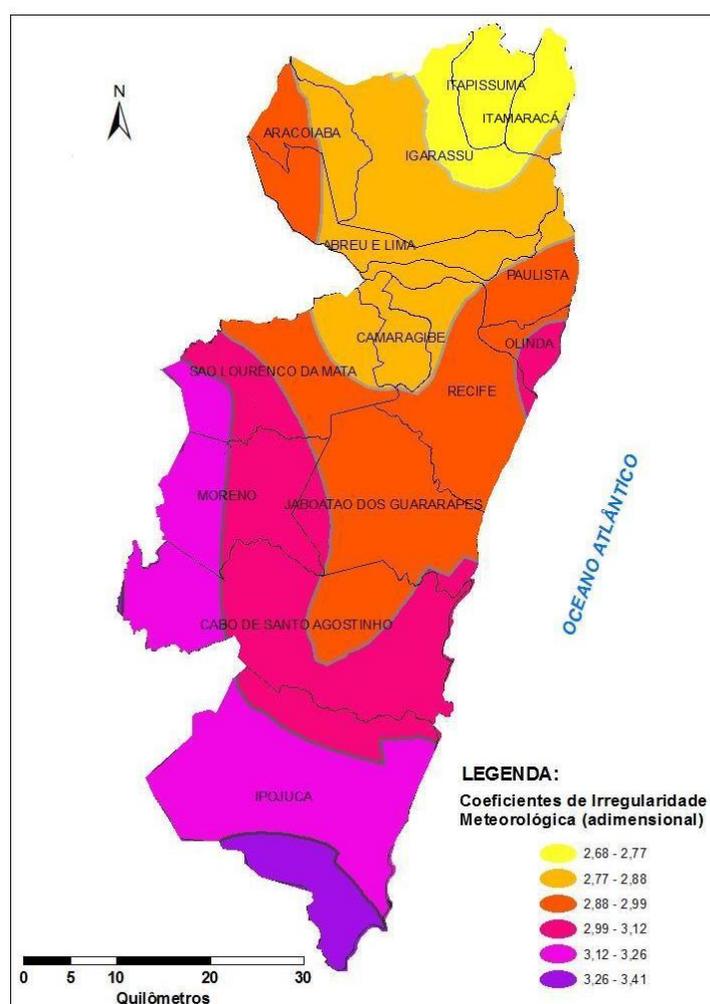


Figura 8 – Mapa da superfície de interpolação dos coeficientes de irregularidade meteorológica.

Segundo Llamas (1992), quanto maior o Coeficiente de irregularidade meteorológica, mais irregular será o regime de chuvas. Esse coeficiente pode ser considerado alto se obtido acima de 3. De um modo geral, na RMR os coeficientes variaram de 2,68 a 3,41 (Figura 8), e as isolinhas mostraram que as irregularidades meteorológicas crescem na direção sul e oeste, e decrescem para o norte, com exceção da mancha localizada na parte urbana do litoral norte de Recife e município de Olinda, cujos coeficientes ultrapassaram 3, valores considerado alto.

A cidade do Recife é pioneira em ocorrência de desastres naturais, por abrigar o maior pólo urbano e populacional da RMR, seguida de Jaboatão dos Guararapes e Olinda. Em suas sedes municipais, durante os meses chuvosos, a certeza das ocorrências desses desastres com base nas frequências dos anos anteriores, é o argumento suficiente para ajudar às intervenções prévias das Defesas civis, tanto municipais como do Estado, reduzindo ou anulando os prejuízos materiais e óbitos.

O espaço formado pelas duas faixas compostas pelos coeficientes de 2,88 a 3,12 compreende todas as sedes municipais dos municípios de Recife, Olinda Paulista, Jaboatão dos Guararapes, Moreno e Cabo de Santo Agostinho. Nesta área estão contidos os principais focos de inundações, alagamentos e deslizamento de encostas de áreas urbanas. A exceção foi feita ao município de Camaragibe que, embora não tenha aparecido no espaço analisado, existem registros de desabamentos de barreiras em região com morros. Provavelmente a desagregação desse município aos demais dessas faixas ocorreu por falta de posto pluviométrico mais próximo, ou por ter sido considerado pouco seletivo para atender os critérios da pesquisa.

Nas faixas correspondentes aos municípios do norte da RMR, onde as chuvas se mostraram mais regulares, como: Abreu e Lima, Igarassu, Araçoiaba, Itapissuma, e Itamaracá, os registros confirmam ausência histórica de grandes tragédias. Na parte sul e oeste dos municípios de São Lourenço da Mata, Cabo de Santo Agostinho e Ipojuca, onde ocorrem as maiores irregularidades meteorológicas, as regiões delimitadas são de ocupação rurais, exceto o município de Ipojuca, que periodicamente recebe transbordamento fluvial de pequeno porte, sem muitos prejuízos significativos.

Por serem os coeficientes de irregularidade obtidos a partir da razão matemática entre a precipitação máxima e a mínima, com a máxima sempre ocupando o numerador da fração, a comparação com o mapa das precipitações máximas elaborado por Salgueiro *et al.* (2010) foi coerente, validando assim os resultados da distribuição espacial da irregularidade das chuvas na RMR, obtidas para identificação das circulações convectivas nesta pesquisa.

CONCLUSÕES

- As precipitações na RMR podem ser consideradas regulares uma vez que os seus valores apresentarem baixa excedência acima 3, limite estipulado para identificação das condições de irregularidades, segundo a literatura utilizada;

- De um modo geral as circulações convectivas atuam na RMR em sentido crescente para o sul e oeste e, decrescente para o norte. Exceção se faz às sedes municipais de Recife e Olinda que sofrem significada elevação;

- As regularidades e irregularidades das precipitações produzidas pelos sistemas de circulação meteorológica atuantes sobre a RMR são isotrópicas, embora os sistemas produtores de chuvas, em sua maior parte, adentrem a costa litorânea no sentido nordeste/sudoeste;

- Recomenda-se que no futuro esta pesquisa seja repetida quando existirem dados pluviométricos disponíveis com séries contínuas de longos períodos e uma densidade pelo menos recomendável pela Organização Mundial de Meteorologia - OMM das Nações Unidas;

- A identificação das áreas de circulação convectiva da RMR, como vulneráveis às chuvas intensas e conseqüentemente aos desastres naturais, obtidas a partir da utilização de metodologia precisa e software avançado, pode contribuir para a atuação dos órgãos gestores de recursos hídricos e defesas civis, tanto municipais como estadual.

AGRADECIMENTOS

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

BIBLIOGRAFIA

- ALMEIDA, T. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; MONTENEGRO, A. A. A.; OLIVEIRA, O. F. (2004). *Análise da Variabilidade Espacial da Precipitação na Bacia do Rio Ipanema, Pernambuco*, in Anais do VII Simpósio de Recursos hídricos do Nordeste, ABRH, São Luis. CD-ROM.
- ANJOS, R. J (1998). *Aguaceiro em Recife: uma climatologia de 36 anos*, in Anais do X Congresso Brasileiro de Meteorologia e VIII Congresso da Flismet, Brasília - DF.
- BERTONI, J. C. & TUCCI, C. E. M. (1993). *Precipitação* in. TUCCI, C. E. M. Org. *Hidrologia: Ciência e Aplicação*, UFRGS, ABRH, Porto Alegre-RS, Cap 5, p177-200.
- CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F., KORNOPKA, A. E. (1994). *Fieldscale Variability of Soils Properties in Central Iowa Soils*. Soil. Sci. Soc. Am. J. V.58, p1501 – 1511.
- DIAZ, J. M. G. (1995). *Meteorologia*. Universidade Central de Venezuela. Consejo de desarrollo Científico y Humanista. Cap. X, p247. Carácas,1995.
- HIDROWEB, 2010. Agência Nacional de Águas. Disponível website em: <http://www.ana.gov.br>, em 02/06/2011.
- ITEP, 2010. Instituto de Tecnologia de Pernambuco. Disponível website em: <http://www.itep.pe.gov.br>, em 02/06/2011.
- IBGE, 2007. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível website em: <http://www.ibge.gov.br>, em 10/06/2009.
- JOHNSTON, K.; VER HOEF, J. M.; KRIVORUCHKO, K.; LUCAS, N. (2001). *Using ArcGis Geoestatistical Analyst*. Esri New York – USA, 300p.
- LANDIM, P. M. B. (1998). *Análise Estatística de Dados Geológicos*. UNESP, Rio Claro, p156-183.
- LLAMAS, J. (1993). *Curso-Seminário sobre el Manejo de Datos Hidrológicos para Redes y Diseños*. Université de Laval, Québec – Canadá, p1-4.
- MENDONÇA, F. & OLIVEIRA, I. M. D. (2007). *Climatología – Noções básicas e Climas do Brasil*. São Paulo. P65 a 73.
- PFALTGRAFF, P. A. S. (2007). *Mapa de Suscetibilidade a deslizamento na Região Metropolitana do Recife*. Tese de Doutorado, UFPE, Recife – PE, 151p.
- PFAFSTETTER (1982). *Chuvas Intensas do Brasil*. DNOS. Rio de Janeiro – RJ.
- PNUD (2007). *Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento*. Disponível on-line em: <http://www.pnud.org.br/atlas/>, 05/10/2004.

- SALGUEIRO, J. H. P. B. & MONTENEGRO, S. M. G. L. (2004). *Geoestatística Aplicada à Variabilidade Espacial e Padrões de Precipitação na Bacia do Rio Ipojuca em Pernambuco*. in Anais do VII Simpósio de Recursos hídricos do Nordeste, ABRH, São Luis. CD ROM
- SALGUEIRO, J. H. P. B. (2005). *Avaliação de Rede Pluviométrica e Análise de Variabilidade Espacial de Precipitação: Estudo de Caso na bacia do rio Ipojuca em Pernambuco*. Dissertação de Mestrado, UFPE, Recife – PE, 124p.
- SALGUEIRO, J. H. P. B.; MONTENEGRO, S. M. G. L. & MOURA, G. B. A (2006). *As Precipitações Máximas e seus Tipos de Ocorrências Sobre as Diversas Altitudes de Pernambuco: uma abordagem Geoestatística do atual conhecimento em Pernambuco*. In Anais do VIII Simpósio de Recursos hídricos do Nordeste, ABRH, Gravatá-PE, CD-ROM.
- SALGUEIRO, J. H. P. B.; MONTENEGRO, S. M. G. L. SILVA, F. B.; FRANÇA, M. S.(2008). *Estudo da Distribuição Espacial da Precipitação e seus Tipos de Ocorrências na Bacia do Rio Capibaribe em Pernambuco*. In IX Simpósio de recursos Hídricos do Nordeste, ABRH, Salvador BA, CD-ROM.
- SALGUEIRO, J. H. P. B. & MONTENEGRO, S. M. G. L. (2009). Análise da distribuição espacial da precipitação por ano hidrológico no estado do rio grande do norte: uma abordagem geoestatística dos quadrimestres mais críticos. In Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH, Mato Grosso do Sul, CD ROM.
- SALGUEIRO, J. H. P. B. & MONTENEGRO, S. M. G. L. (2010). *Análise Espacial das Precipitações Extremas Máximas Ocorridas no Mês de Maio Pluviosidade na Região Metropolitana do Recife: uma abordagem sobre as chuvas intensas e os desastres naturais*. In Anais do X Simpósio de Recursos hídricos do Nordeste, ABRH, Fortaleza. CD ROM
- TEZA, C. T. V. & BAPTISTA, G. M. M. (2005). *Identificação do Fenômeno Ilhas Urbanas de calor pó meio de ASTER 08 – Kímetic Temperature (III): Metrôpoles brasileiras*. In Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia – GO, INPE, p3911-3918.
- VIEIRA, S. R. (2000). *Geoestatística em Estudo de Variabilidade Espacial do Solo*. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H. & SCHAEFER, C. E. G. R., eds. *Tópicos em Ciências do Solo*. Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, Viçosa-MG, V 1, p1-54.