ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgf>

Análise espacial da precipitação e possíveis fatores que contribuem para sua espacialização em Recife-PE

Rafael Silva dos Anjos¹, Lucas Suassuna de Albuquerque Wanderley², Ranyére Silva Nóbrega³

¹ Doutorado em Geografia, Universidade Federal de Pernambuco, Av. Prof. Moraes Rego, 1235, Cidade Universitária Recife – PE. anjos.rsa@gmail.com (autor correspondente). ² Doutorado em Geografia, Universidade Federal de Pernambuco, Av. Prof. Moraes Rego, 1235, Cidade Universitária Recife – PE. Prof. do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Alagoas, Rod. Eng. Joaquim Gonçalves, Dom Constantino, Penedo-AL. lucassaw.13@gmail.com. ³ Prof. Dr. do Programa de Pós-graduação em Geografia da Universidade Federal de Pernambuco. ranyere.nobrega@ufpe.br.

Artigo recebido em 23/07/2019 e aceito em 09/01/2020

RESUMO

A distribuição espaço-temporal da precipitação está relacionada a uma interação complexa entre os fatores geográficos. Dentre esses fatores, podem-se destacar o relevo, direção predominante dos ventos, declividade, orientação das encostas, vegetação, urbanização, dentre outras condicionantes que podem atuar de acordo com a escala de análise e o sistema atmosférico atuante. Partindo desse pressuposto, o município de Recife possui particularidades que favorece uma distribuição espacial das chuvas de maneira desigual, levantando alguns questionamentos acerca dos fatores geográficos que interferem nessa variabilidade espacial. Levando em consideração essas afirmações, o objetivo do presente trabalho foi avaliar quais os fatores geográficos podem interferir na distribuição espacial das chuvas em Recife, de acordo com médias anuais de precipitação. Os dados de precipitação utilizados foram do Centro de Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMANDEN) e as ferramentas utilizadas foram softwares de geoprocessamento, assim como programas de modelagem de fluxo dos ventos. Os resultados apresentaram que condicionantes como o relevo, direção predominante dos ventos, orientação das encostas, tipos de chuvas são alguns dos condicionantes, dentre os apresentados nessa pesquisa, que apresentaram correlações espaciais com a variabilidade da precipitação. Além disso, a modelagem do fluxo de ar, permitiu identificar as áreas de maior advecção e a pressão do ar sobre as encostas, possibilitando a correlação dessas variáveis com a distribuição espacial das chuvas. palavras-chave: conforto térmico, ciclovias, temperatura efetiva.

Palavras-chaves: chuvas, modelagem, relevo, ventos.

Spatial analysis of precipitation and possible factors that contribute to its spatialization in Recife-PE

ABSTRACT

The spatial and temporal distribution of precipitation is related to complex interaction between geographic factors. Among these factors, we can highlight the relief, winds direction, slope, aspect, vegetation, urbanization and other conditions that it can act according to the scale of analysis and the atmospheric system. The municipality of Recife has particularities that it enable a high spatial and temporal rainfall variability, raising some questions about the geographic factors that interfere in this variability. Thus, this study aims to evaluate which geographic factors can to interfere in the spatial distribution of rainfall in Recife, according to annual average precipitation. The precipitation data used were from the National Center for Natural Disaster Monitoring and Alerting (CEMANDEN) and the tools used were geoprocessing softwares, as well as wind flow modeling programs. The results showed that conditions such as relief, predominant direction of the winds, aspect, rainfall types are some of the factors that it was analyzed in this present study that presented spatial correlations with variability of rainfall. In addition, the airflow modeling it allowed to identify areas of higher advection and air pressure on the slopes, it allowing the correlation of these variables with the spatial distribution of rainfall. Keywords: rain, modelling, relief, wind.

Introdução

A precipitação é elemento essencial nos estudos climáticos e ambientais, tendo importância nas mais variadas atividades humanas. Dinku et al. (2007) afirmaram que ela pode ser um recurso crucial para a agricultura ou para o planejamento urbano. Porém, a sua distribuição sobre a superfície terrestre é muito mais complexa que a insolação ou a temperatura do ar. Sendo assim, o padrão de

distribuição das chuvas sobre o globo depende de diversos fatores, tais como a topografia, a distância de grandes corpos hídricos e a direção e caráter das massas de ar predominantes (Ayoade, 2010).

Segundo Collischonn (2006) a precipitação pode ser considerada a variável do ciclo hidrológico que apresenta a maior variabilidade espacial, sendo esta dependente, na

maioria dos casos, dos postos pluviométricos para sua representação.

O município de Recife, capital de Pernambuco, Brasil, possui particularidades geográficas que podem interferir na distribuição espacial das chuvas em topo escala. Nesse contexto, a alta variabilidade espacial da precipitação sugere que a distribuição dessa variável, no espaço urbano da cidade, esteja relacionada a fatores como a topografia, direção dos ventos, tipos de chuvas atuantes, orientação das vertentes e a vegetação. Essa variabilidade aumenta a complexidade das variações espaço-temporais dos elementos climáticos dentro do território do município e demanda um reconhecimento do comportamento das chuvas. .

Concomitante, a cidade apresenta suscetibilidade aos eventos extremos de precipitação, que, de acordo com Wanderley, et al. (2018) apresentam elevada de recorrência. Ademais, tais eventos pluviométricos estão relacionados à ocorrência de alagamentos, inundações e a escorregamentos de terra, os quais representam riscos diante na vulnerabilidade socioeconômica verificada no contexto urbano da cidade (Girão et al., 2006; Cavalcanti, 2012; Rocha e Schuler 2016)

Compreender como esses fatores climáticos atuam e influenciam a variação espacial das chuvas, permite uma gestão de risco mais eficiente frente aos impactos ocasionados pela precipitação dentro do espaço urbano, como deslizamento de terra, alagamentos e inundações. Além disso, será possível estimar a precipitação, para áreas onde a disponibilidade de dados pluviométricos é comprometida.

Diante do pressuposto acima, o objetivo desse trabalho é analisar os padrões de variação espaço-temporal da precipitação em Recife e investigar quais os principais fatores que interferem na sua distribuição espacial.

Referencial teórico

Processos formadores das chuvas e os fatores geográficos relacionados

Para a formação de nuvens e precipitação, a atmosfera deve estar saturada com umidade. Essa saturação na atmosfera depende das variações e interação entre a temperatura e pressão. Existem duas formas principais de saturar a atmosfera de umidade: adicionar umidade no ar ou, diminuir a temperatura do ar (Schroeder e Buck, 1970).

A ascensão do ar é o princípio básico para resfriar uma parcela de ar por meio do resfriamento adiabático. Essa elevação do ar pode ocorrer por meio do aquecimento da superfície, provocando a

convecção do ar, ou também por meio da orografia, que dependendo da orientação dos ventos forçam a elevação da massa de ar para altitudes mais elevadas. Esse fator contribui para que as encostas a barlavento tenham precipitações maiores que as encostas a sotavento. Apesar da consideração desses fatores isoladamente, podemos ter a interação entre esses condicionantes. Ou seja, as nuvens *cumulus* podem ser formadas com a atuação do aquecimento da superfície, orografia e convergência de ventos ao mesmo tempo (Schroeder e Buck, 1970).

O processo básico de formação de nuvens é determinado por vários fatores dinâmicos: movimentos verticais, fluxos de advecção e turbulência de calor e vapor de água. Com a ascensão do ar em áreas de baixa pressão, em níveis fixos, a temperatura do ar diminui e a umidade relativa aumenta com o tempo, aproximando o vapor de água do nível de saturação. Alcançado esse patamar de saturação, o ar nos níveis mais elevados forma as nuvens, aumentando o tamanho das gotículas sob a influência da condensação. Esse processo culmina na formação da nuvem de precipitação. O tipo e a intensidade da precipitação vão variar de acordo com a estratificação termal é observada próxima ao nível de condensação quando o nível de saturação é alcançado (Shiklomanov, 2009).

Algumas teorias para formação das chuvas são discutidas ao longo do tempo. Dentre elas, destaca-se a Teoria de Bergeron-Findeisen e a Teoria da Coalescência. A primeira teoria afirma que os cristais de gelos dentro da nuvem tornam-se pesados demais para serem mantidos na mesma, ocasionando a precipitação. Esses cristais de gelo irão derreter, caso a temperatura próximo à superfície terrestre estiver alta, no entanto, se a superfície estiver com a temperatura próxima do nível de congelamento os cristais de gelo cairão em forma de granizo. No caso da Teoria da Coalescência, é afirmado que as gotas de água maiores dentro das nuvens caem e absorvem as gotas menores ao longo do seu percurso. Julga-se que esse processo é responsável pelo crescimento mais rápido das gotas de água, se comparadas com o processo de condensação (Ayoade, 2010).

Nesse sentido, as diferenças espaciais da precipitação estão relacionadas as variadas interações entre os fatores geográficos e como elas se distribuem no espaço geográfico. Com o objetivo de identificar quais os fatores geográficos interferem na distribuição espacial das chuvas na Baía de Ilha Grande – RJ, Soares et al. (2014) verificou que a interação do sistema atmosférico atuante, relevo e distância do litoral favorecem ou inibem o acúmulo de quantidades precipitadas.

No caso do Nordeste Brasileiro, Nimer (1989) afirma que a interação de fatores que influenciam na distribuição das chuvas é bastante complexa. Para ele, a relação entre os sistemas atmosféricos atuantes com alguns fatores estáticos, determina a variação significativa da precipitação. Dentre esses fatores estáticos, o autor considera que a altitude e as linhas gerais do relevo, podem contribuir para concentração da precipitação, principalmente se as orientações das vertentes forem de encontro com as correntes de ar.

Além disso, as particularidades dos núcleos de condensação para formação das chuvas, segundo Nimer (1989), levantam a relação da poluição de áreas urbanizadas – que emitem mais partículas para atmosfera – com maiores quantidades precipitada, se comparadas com áreas de uma atmosfera menos poluída.

Sob uma análise da topo-escala, Landsberg (1981) afirma que os efeitos da urbanização podem afetar a precipitação pela combinação complexa de determinados fatores. Dentre eles, a existência de zonas de maior temperatura – provocada pelo aquecimento dos materiais das edificações – favorecem os processos convectivos e, consequentemente a formação da precipitação nessas áreas. Além desse fator, a presença de aerossóis favorece a condensação das nuvens, já que partículas suspensas na atmosfera se comportam como núcleos de condensação. Apesar dessas considerações, Landsberg (1981) ressalta a complexidade das interações desses fatores, ressaltando que apenas os efeitos da urbanização não seriam suficientes para explicar anomalias espaciais de precipitação.

Sistemas atmosféricos atuantes em Recife

Os controles climáticos regionais estão associados, em primeira ordem, aos centros de ação climáticos e de maneira secundária aos fatores climáticos locais (como relevo, maritimidade e continentalidade). Os regimes pluviométricos do Nordeste Brasileiro estão relacionados às variações energéticas desses centros de ação climáticos, os quais estão condicionados à expansão ou contração em decorrência da variação sazonal do gradiente térmico latitudinal (Molion e Bernardo, 2002; Ferreira e Melo, 2005).

Um dos sistemas atuantes em Recife são os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN). Esse sistema é caracterizado por uma divergência na área imediatamente abaixo dos fluxos subsidentes das altas camadas da atmosfera, gerando convergência nas bordas do sistema. Por essa razão, quando posicionado sobre o continente no NEB, o VCAN ocasiona tipos de tempo distintos:

estabilidade em sua área central e instabilidade nas bordas do sistema. As chuvas associadas a esse sistema atmosférico tendem a ser concentradas no tempo e no espaço, produzidas por nuvens do tipo cumulonimbus, as quais geram trovoadas e até precipitação de granizo (Kousky e Gan, 1981; Reboita et al., 2010).

No litoral oriental do NEB, o que abrange todo o litoral pernambucano, as precipitações de outono-inverno são moduladas por Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL) que se propagam do oceano em direção ao continente. A gênese dos DOLs está relacionada a perturbações barométricas, no campo de propagação dos alísios, geradas pela ZCIT ou por frentes frias que atingem menores latitudes. Essas ondas atmosféricas favorecem a convecção na área do cavado, onde ocorrem preferencialmente as precipitações mais intensas (Molion e Bernardo, 2002; Machado et al., 2012; Neves et al., 2016).

A convecção modulada pelos DOL's pode ser intensificada pela atuação das brisas ao alcançarem a região litorânea. Albuquerque et al. (2013) constataram que as chuvas na cidade do Recife possuem maior frequência entre 6 e 7h da manhã. Esse padrão horário da precipitação é explicado pela convergência da brisa terrestre com os alísios de sudeste nas primeiras horas da manhã, intensificando o efeito da convecção ocasionada pelos DOL's.

Um dos sistemas que atuam em Recife é a Brisa marítima e brisa terrestre. Esses sistemas são resultantes do gradiente térmico e, consequentemente de pressão, entre as superfícies terrestres e marítimas. As chuvas desses sistemas possuem curta duração (Ferreira e Melo, 2005).

Apesar do extenso conhecimento a respeito da influência da circulação atmosférica regional na distribuição temporal e espacial das chuvas no setor oriental da Região Nordeste do Brasil, o comportamento das chuvas na escala do microclima urbano do Recife ainda demanda investigações.

Material e métodos

Área de estudo

A área de estudo compreende o município de Recife (capital de Pernambuco). A sua altitude varia do nível do mar (0 metros) até 120 metros, aproximadamente. De acordo com a série histórica dos dados meteorológicos obtidos no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), a direção predominante dos ventos é sudeste (Figura 1).

Figura 1. Mapa hipsométrico de Recife e seus municípios limítrofes com a direção predominante dos ventos.

Segundo os dados do INMET, a normal climatológica possui média de precipitação de 2.300 mm anuais e temperatura média anual de 25,9° C (INMET, 2017).

Dados utilizados e série histórica

Os dados de precipitação utilizados foram do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Nacionais (CEMADEN), disponibilizados através do seu banco de dados no link: www.cemaden.gov.br/mapainterativo. A série histórica dos dados mensais compreende o período janeiro de 2015 a dezembro de 2018, uma vez que a boa distribuição espacial dos postos pluviométricos, só era visível a partir de 2015. A utilização dos dados do CEMADEN devido a disponibilização de dados de precipitação oriundos

de vários postos pluviométricos bem distribuídos espacialmente no município de Recife.

As estações pluviométricas utilizadas abrangeram todo o município de Recife e os municípios que estão no seu entorno, para que o processo de interpolação dos dados tivesse melhores resultados ao reduzir o efeito de borda.

As estações foram distribuídas espacialmente de acordo com as características particulares de cada local (Figura 2), necessitando de segurança para o aparelho e de locais onde não houvessem barreiras artificiais, ou naturais, que dificultassem a coleta dos dados.

Figura 2. Distribuição espacial dos postos pluviométricos.

Os dados de altimetria foram utilizados do modelo digital de elevação *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) com o propósito de serem analisados conjuntamente com os dados de precipitação, no intuito de identificar possíveis relações entre as variáveis climáticas e topográficas.

Para fazer a relação das chuvas com a vegetação, foi necessário extrair o NDVI da imagem do satélite Sentinel-2 do dia 05 de setembro de 2016. O Sentinel-2 possui 13 bandas: 4 com resolução espacial de 10 metros, 6 bandas com 20 metros, e 3 bandas com resolução espacial de 60 metros (ESA, 2017). Para a presente pesquisa foi utilizado a seguinte equação para o NDVI:

$$\text{Eq.1} \quad (B8 - B4) / (B8 + B4)$$

Na qual o B8 é o Infravermelho Próximo e B4 o Vermelho, ambos com resolução de 10 metros.

Metodologia

Foram interpolados os dados mensais de precipitação e as médias anuais dos anos de 2015, 2016, 2017 e 2018. Para esse procedimento foi utilizado o software ArcGis 10.2, com licença do Grupo de Pesquisas TROPOCLIMA. O método de interpolação utilizado foi o Inverso da Distância Ponderada (IDW), pois foi o que obteve o melhor resultado geoestatístico através análise da validação cruzada quando confrontado com outros interpoladores como a Krigagem e o Trend.

Para relacionar os mapas de precipitação com a altitude foi necessária a elaboração cartográfica no ArcScene, de modo que fossem apresentadas toda a visualização no modo 3D.

Para gerar o modelo de fluxo de ventos em Recife, a partir da topografia, o software *Flow Design*, do *AutoDesk*, foi utilizado. Esse software, embora tenha aplicações nas áreas de arquitetura, pode ser utilizado para modelagens climatológicas, desde que conhecida a direção predominante dos ventos na região a ser estudada. No presente estudo

foi considerada a direção predominante dos ventos SE, pois, foi a direção que predominou ao longo dos anos estudados, segundo os dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Para correlação da quantidade precipitada com a altitude, diferença de altitude e reflectância num raio de 2km do posto pluviométrico, foi necessária a utilização de uma regressão linear simples, seguindo a seguinte equação:

$$Y = a + BX + e$$

Em que x é a variável que busca explicar y ; y é variável dependente a ser prevista; a e B são parâmetros de distribuição; e seria o erro de medida.

Resultados e discussão

Análise descritiva da precipitação anual em Recife, de 2015 a 2018

Ao ser analisada a média anual entre os anos de 2015 e 2018 da precipitação em Recife, percebe-se que a variação espacial é bastante acentuada (Figura 3). Dentro do município, existe uma diferença de aproximadamente 400 mm de precipitação anuais, com a área mais chuvosa apresentando aproximadamente 1.900 mm e a menos chuvosa, 1.400 mm. Evidencia, nesse sentido, que alguns fatores podem atuar na distribuição espacial da quantidade precipitada em microescala.

Figura 3. Média anual da precipitação entre os anos de 2015 e 2018.

Um padrão espacial nessa distribuição a ser destacado é o aumento gradual da precipitação no sentido SE-NO. Se forem considerados os outros municípios representados no mapa, percebe-se que há uma região com concentração da chuva, que abrange, além de Recife, os municípios de Camaragibe e Jaboatão. Por outro lado, uma das áreas com menor quantidade precipitada concentra-se próximos ao litoral.

Essas variações podem ser detalhadas a partir da observação da quantidade precipitada por postos pluviométricos em Recife entre os anos de 2015 e 2018 (Quadro 1). Ao serem analisadas as duas estações mais chuvosas de Recife a partir da

média dos três anos (2015, 2016, 2017 e 2018), verifica-se que as mesmas estão localizadas em bairros próximos (Várzea e Córrego do Jenipapo). Essas estações pluviométricas, de modo geral, registraram as maiores precipitações nos quatro anos de observação.

Por outro lado, as estações com menores registros de precipitação estão mais próximas do litoral (Areias, Dois Unidos, Pina e Campina do Barreto). Exceto no ano de 2017, as menores quantidades precipitadas localizaram-se no bairro do Pina.

Quadro 1. Precipitação anual por postos pluviométricos em Recife, com variações de cores do mais chuvoso (verde) para o mais seco (vermelho) entre os anos de 2015 e 2018.

BAIRRO	2015	2016	2017	2018	MÉDIA
Córrego Jenipapo	1905,76	1779,7	2213,23	1622,68	1966,23
Várzea	1870	1720,05	2031,51	1629,68	1873,85
Casa Forte	1806	1590	1979	1450	1791,67
San Martin	1610,76	1431,35	1874,21	1550,05	1638,77
Areias	1613,2	1318,8	1904,2	1517,6	1612,07
Dois Unidos	1709,57	1287,21	1779,62	1566,35	1592,13
Pina	1412,84	1353,96	1760,26	1264,78	1509,02
Campina do Barreto	1472,92	1446,41	1603,51	1293,29	1507,61

Além dessa variação espacial da precipitação por ano, existiu uma diferenciação da quantidade precipitada ao longo dos anos. De modo geral, o ano que foram registradas as maiores quantidades precipitadas nas estações foi 2017, enquanto o que registrou as menores foi no ano de 2018. É importante ressaltar que os anos mais secos das estações pluviométricas não foram os mesmos, sendo ora em 2018, ora em 2016. Isso evidencia que na análise dos anos mais secos, não existe um padrão para todas as estações, o que não aconteceu com o ano mais chuvoso de todas as estações, que foi em 2017.

Um dos fatores a serem considerados sobre essa variação espacial é que as maiores diferenças entre os postos localizados em Recife, apresentaram, no mínimo, 536 mm, no ano mais chuvoso (2017); enquanto nos anos que apresentaram as menores precipitações, a diferença

foi de aproximadamente 300 mm. Tal fato, já levanta a importância de se mapear a precipitação, pois algumas áreas suscetíveis a deslizamentos podem ser potencializadas de acordo com a quantidade precipitada naquele local (Modesto e Nunes, 1996).

Análise espacial e estatística dos possíveis fatores que contribuíram na distribuição espacial da precipitação

Devido ao fato dos ventos alísios de sudeste terem sido predominantes nos anos estudados, as nuvens, em baixos níveis, também teriam essa direção de deslocamento. Com a configuração espacial do relevo formando uma planície em boa parte do território recifense, as nuvens poderiam ter sido barradas nas encostas situadas na porção oeste e noroeste de Recife.

Nesse sentido, as maiores quantidades precipitadas, ficariam próximas das encostas cujas

orientações das vertentes seriam voltadas para sudeste, devido ao efeito topográfico sobre a convecção atmosférica em baixos níveis.

Essa correlação espacial foi identificada na Baía da Ilha Grande, no Rio de Janeiro, onde as maiores precipitações eram maiores a barlavento das encostas fluminenses (Soares et al., 2014). Por isso, essas correlações entre o relevo e a chuvas podem facilitar no processo de interpolação dos dados, principalmente quando há ausência de dados pluviométricos, pois com a utilização da geoestatística, essas correlações poderiam ser utilizadas como parâmetros para a interpolação das chuvas (Goovaerts, 2000).

Dependendo do sistema atmosférico atuante, a direção dos ventos pode ser alterada, resultando em outras configurações espaciais da chuva. Partindo desse contexto, Forgiarini et al. (2014) identificaram que a direção dos ventos interferia na distribuição espacial da quantidade precipitada, de maneira que não existia um padrão nas orientações de barlavento e sotavento.

No caso presente, entre 2015 e 2018, foram predominantemente ventos de sudeste nos eventos que foram registradas precipitações em Recife o que favorece uma visualização mais clara da relação entre as orientações das encostas com a distribuição das chuvas.

Para verificar essa correlação, uma representação em três dimensões da rugosidade do relevo foi relacionada às chuvas anuais e a orientação predominante dos ventos. Algumas particularidades são apresentadas no mapa, dentre

elas, a tendência nos quatro anos das maiores quantidades precipitadas situarem a oeste do município do Recife (Figura 4).

É importante ressaltar que as maiores quantidades precipitadas no oeste recifense, podem potencializar os efeitos de inundação mesmo em áreas próximas do mar, visto que toda a água precipitada nas porções mais elevadas ao oeste tende a drenar e escoar seu fluxo em direção aos bairros mais a leste do Recife. Esses processos entre relevo, precipitação e drenagem já foram abordados por Correa e Galvani (2018) na bacia do Rio Piquiri, no estado do Paraná.

É essa configuração espacial do relevo que poderá ser fundamental na distribuição espacial das chuvas. Como a linha de costa do estado de Pernambuco é perpendicular à direção predominante dos ventos (SE), é provável que as nuvens carregadas, ao chegarem na costa recifense, façam seu trajeto aumentando a sua intensidade a medida que as rugosidades do relevo forcem a uma maior turbulência do ar. Por meio do levantamento dessa hipótese, justifica-se o fato das maiores quantidades precipitadas – mesmo em anos mais secos – concentrarem-se próximos das encostas localizadas ao oeste do município. Essas concentrações das chuvas foram maiores na zona oeste e norte de Recife devido à concentração do fluxo de umidade, tanto de modo convectivo, como advectivo.

Figura 4. Visualização em 3D das médias anuais de precipitação associadas ao relevo e a direção dos ventos e o transecto utilizado no perfil.

Analisando a orientação do perfil traçado no sentido sudeste-noroeste (mesma direção predominante dos ventos) percebe-se que as maiores precipitações estão próximas a primeira encosta com desnível acentuado, com cotas

máximas de aproximadamente 100 metros de altitude em relação ao nível do mar (Figura 5).

Figura 5. Visualização em 3D das médias anuais de precipitação associadas ao relevo e a direção dos ventos e o transecto utilizado no perfil.

A partir da análise do perfil, fica evidente que nas proximidades das encostas, a precipitação foi maior em todos os anos, ao mesmo tempo que a sotavento das encostas houve uma diminuição da precipitação. Com os mesmos procedimentos metodológicos, Correa e Galvani (2018) traçaram um perfil da altitude e a precipitação e identificaram que a precipitação tende a aumentar à medida que vai aumentando a altimetria. O que difere os resultados dessa pesquisa dos que foram

encontrados pelos autores, é que a escala de análise dos autores mencionados abrangeu uma área bem maior e com uma amplitude altimétrica de 1.000 metros. Por isso, uma das particularidades do presente estudo é que mesmo que a altitude no município de Recife possua uma amplitude de, aproximadamente 100 metros, ainda é identificada uma correlação espacial com a quantidade precipitada.

Figura 6. Linha de tendência e correlação entre a altitude em relação ao nível do mar dos postos pluviométricos e a média anual precipitada, de 2015 a 2018.

Diante dessa discussão, é possível que haja algum processo convectivo forçado promovido pela topografia de Recife, mesmo que a altitude não seja considerável. É válido salientar que a análise por meio da regressão linear entre a altitude e a precipitação (Figura 6), as correlações estatísticas não apresentaram correlações consideráveis. Soares et al. (2014) e Liu e Shen (2008) identificaram, no entanto, que as maiores quantidades precipitadas tendem a ocorrer próximo aos sopés das encostas, sendo ainda regiões de baixa altitude e leve declividade. Destarte, a apresentação dos resultados por meio de perfis,

facilita a identificação das áreas onde houveram maiores turbulências e ascendência dos ventos – que no caso presente foi próximo as encostas das vertentes – assim como no reconhecimento das áreas a sotavento das encostas.

Como proposta de aproximação do conceito de sopé das encostas e precipitação, para análise, foram considerados a diferença de altitude, em um raio de 2 km do posto pluviométrico, e a média da quantidade precipitada (Figura 7). Partindo dessa análise, as correlações foram mais evidentes que a altitude.

Figura 7. Linha de tendência e correlação entre a diferença de altitude num raio de 2km da estação pluviométrica e a média anual precipitada, de 2015 a 2018.

Correlacionando essa possível ascendência do ar, e consequentemente maior desenvolvimento vertical das nuvens, com a modelagem dos ventos

sobre o relevo de Recife, foi possível identificar uma concentração, no sentido horizontal, do fluxo dos ventos próximo ao bairro da Várzea (Figura 8).

Figura 8. Modelagem espacial do fluxo horizontal dos ventos de acordo com a topografia. Em destaque, postos pluviométricos utilizados.

Esse fato corrobora as análises anteriores, reforçando a existência de uma maior densidade do fluxo dos ventos devido à forma do relevo promover um afunilamento e, consequentemente, um maior adensamento da umidade na zona oeste do sítio urbano, provavelmente potencializando em casos onde a velocidade dos ventos seja aumentada, de acordo com alguns sistemas atmosféricos advectivos. É importante destacar que por ser apenas uma modelagem gerada por um software específico para análise do fluxo de ventos para construção civil, os resultados podem apresentar algumas limitações no que concerne à ausência do sistema de projeção cartográfica.

Todavia, a utilização de ferramentas de modelagens de fluxo de ventos permite que se conheça com maior nível de detalhes as variações espaciais e a dinâmica envolvida na interação entre a morfologia urbana e a direção dos ventos, de modo que possa auxiliar como complemento para os estudos climáticos (Koss et al., 2018).

A partir desse pressuposto, considera-se que os ventos podem ter uma característica bastante relevante na distribuição espacial das chuvas. Nesse sentido, a sua influência na formação da precipitação em Recife, pode estar associada a movimentos verticais (por meio de processos convectivos forçados) e horizontais (adensamento do fluxo no oeste de Recife). A relação do fluxo dos ventos como parâmetro para analisar as variações espaciais da precipitação na Austrália já tinha sido apresentada por Connor e Bonell (1998).

Com a modelagem da pressão dos ventos exercidas sobre as encostas (Figura 9), percebe-se que os impactos dos ventos são maiores nas vertentes que possuem orientação para sudeste. No bairro da Várzea, um dos que possuem maiores

quantidades precipitadas, apresenta um forte impacto nas encostas existentes no bairro, podendo evidenciar que o processo de modelagem pode facilitar na interpretação das vertentes que tendem a receber mais umidade. No entanto, é perceptível que as encostas mais próximas do litoral não apresentaram as maiores quantidades precipitadas, podendo inferir que os processos advectivos – que inclui a convergência advectiva na porção oeste de Recife – pode também estar relacionada a esses fatores.

É válido salientar que alguns estudos demonstram que o litoral de Pernambuco possui maior percentual de chuvas estratiformes quando comparado com áreas semiáridas do interior pernambucano (Anjos et al., 2013). Lins et al. (2018) identificaram que em Recife, a chuva estratiforme é mais frequente que as chuvas convectivas, principalmente nos meses mais chuvosos (maio-julho). Com essa predominância, significa que as nuvens carregadas são mais fáceis de serem delineadas pelo relevo já que as chuvas estratiformes são caracterizadas por terem um desenvolvimento vertical menos acentuado do que a precipitação convectiva (Gonçalves, 2006).

Ademais, a estrutura vertical da massa de ar associada aos ventos alísios de sudeste apresenta características particulares que favorecem uma influência topográfica, mesmo em desníveis modestos, como os observados no sítio urbano do Recife. A baixa inversão dos alísios (Correa, 2010) favorece o desenvolvimento de nuvens “quentes” do tipo estratiformes, com limitado desenvolvimento vertical. Esse tipo de nebulosidade apresenta maior resposta de deslocamento com a circulação em baixos níveis.

Enquanto a variação da precipitação possui uma inversão de tendência de intensidade – aproximadamente na metade do transecto – não existem variações significativas da vegetação. Além disso, se forem observados todos os mapas de precipitação apresentados nesse estudo, percebe-se que as áreas com maior vegetação tendem a aumentar nos municípios mais distantes do litoral (Figura 10). No caso presente, embora os

municípios de Camaragibe, oeste de Paulista e Abreu e Lima possuam maiores proporções de áreas com vegetação, os mesmos não registram as maiores quantidades precipitadas nas médias anuais, se comparadas com as áreas mais chuvosas de Recife.

Figura 9. Modelagem da pressão dos ventos sobre as encostas em Recife-PE e a velocidade dos ventos a partir das cores dos vetores.

Figura 10. Modelagem da pressão dos ventos sobre as encostas em Recife-PE e a velocidade dos ventos a partir das cores dos vetores.

Outro fato a ser destacado é que as áreas com maiores manchas urbanas não apresentaram as maiores quantidades precipitadas. Tais fatos podem apresentar que as áreas urbanizadas não tenderão a apresentar maiores quantidades precipitadas em todos os casos, contrapondo a ideia de Landsberg (1981) sobre essa questão, onde o mesmo afirma que a presença de áreas urbanizadas favorece a formação das chuvas. Alguns estudos sugerem que, por meio de modelagens, as áreas urbanizadas favorecem os processos convectivos, favorecendo a formação das chuvas, como mostraram Souza et al. (2017).

Todavia, os resultados presentes podem levantar o fato de que os processos formadores das chuvas podem dar-se de maneira diferenciada de acordo com os fatores atuantes em cada área

estudada, já que os resultados não apresentaram uma relação de manchas urbanas com maiores quantidades precipitadas.

Corroborando tais afirmativas, ao observar a Figura 11, observa-se que as correlações estatísticas entre a vegetação no entorno do posto pluviométrico e a quantidade precipitada são menores que a diferença de altitude num raio de 2 km do posto pluviométrico. É válido ressaltar que tais correlações estatísticas foram mais claras que a altitude, inferindo que o último não seja tão efetivo como os outros, no caso de Recife.

Partindo desse pressuposto, cada área estudada poderá ter níveis de interações entre os fatores que influenciam nas chuvas de maneira complexa e diferenciada, ressaltando a importância de um estudo minucioso.

Figura 11 - Linha de tendência e correlação entre a média da reflectância do NDVI num raio de 2km da estação pluviométrica e a média anual precipitada, de 2015 a 2018.

De toda forma, não se pode negar veementemente a relação da vegetação com maiores quantidades precipitadas, porém, essa relação pode evidenciar uma participação não tão efetiva, se comparado com outros fatores, como: proximidade das vertentes, orientação das encostas, direção predominante dos ventos e os tipos de chuvas atuantes.

Uma das hipóteses para que a vegetação não influencia tanto na distribuição espacial das chuvas está relacionada às características dos fluxos de umidade da área estudada. Silveira et al., (2017) afirmam que a influência da evapotranspiração na formação da precipitação é mais intensa onde o fluxo de vapor d'água é fraco. Nesse sentido, alguns estudos mostram que a reciclagem da precipitação em áreas tropicais é de aproximadamente 20%, evidenciando que a maior parte da precipitação é formada por processos que não estão atrelados a escalas locais (Nóbrega et al., 2005). Todavia, a relação pode se dar de forma indireta: alguns modelos levantaram a hipótese de que áreas com maior presença de vegetação não ter um retorno com maiores quantidades precipitadas, é devido a perda do vapor d'água por processos advectivos e, consequentemente, as maiores quantidades precipitadas ficarem distante dessas áreas (Dekker et al., 2007).

Conclusões

Ao serem analisadas as médias anuais da precipitação de 2015 a 2018 foi verificado que as mesmas possuem variações significativas espacialmente, assim como ao longo dos anos.

Quando cruzadas as informações de relevo, direção dos ventos e médias anuais de precipitação percebe-se que as maiores precipitações tendem a ocorrer próximos as encostas, principalmente as que tinham uma orientação perpendicular à direção predominante dos ventos. Desse modo, infere-se que as junções desses fatores podem contribuir para um direcionamento das nuvens carregadas, promovendo um adensamento de fluxo de umidade e maiores turbulências próximo de áreas de encostas. Corrobora-se a essa afirmativa, quando analisado o perfil através do transecto, onde as precipitações tendem a aumentar a medida que se aproximam das encostas de áreas mais elevadas, ao mesmo tempo que nas áreas a sotavento, a precipitação tende a diminuir.

Esse fato pode estar relacionado à predominância das chuvas estratiformes na época chuvosa em Recife, já que por não possuir um desenvolvimento vertical acentuado, as mesmas podem atingir níveis mais baixos da atmosfera e, consequentemente, serem direcionadas conforme a configuração do relevo.

Com a modelagem dos ventos, foi possível verificar que os fluxos horizontais não encontram muitas dificuldades ao longo da planície flúvio-marinha recifense, no entanto, existe um afunilamento ou canalização do fluxo com maior convergência nas áreas situadas no oeste do município. Esse fato pode explicar que além do movimento ascendente do ar promovido pela variação de altitude, o adensamento do fluxo no sentido horizontal pode promover uma convergência do ar na região oeste de Recife.

Quando comparado com as áreas de vegetação com as médias anuais de precipitação foi verificado que embora as maiores quantidades precipitadas também coincidirem com as áreas de maior vegetação, as regiões com maior reflectância de áreas verdes nos municípios limítrofes com Recife não registraram as maiores quantidades precipitadas.

Referências

- Ayoade, J. O., 2010. Introdução à climatologia para os trópicos, 14 ed. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro.
- Albuquerque, R.D., Dantas, C.E.O., Araújo, E.L., Vasconcelos, T.L., 2013. Distribuição temporal das precipitações no município do Recife. *Revista Brasileira de Geografia Física* [online] 6. Disponível <https://doi.org/10.26848/rbfg.v6.2.p245-252>. Acesso: 01 abr. 2020.
- Anjos, R. S.; Nóbrega, R. S., Araújo, F. E., Rocha Filho, G. B. R., 2016. Spatial distribution of rain types in Pernambuco with the usage of Remote Sensing. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing* [online] 6. Disponível: <https://doi.org/10.5935/2237-2202.20160016>. Acesso: 20 mar. 2020.
- Cavalcanti, R. M. S., 2012. Indicadores geomorfológicos, riscos e o planejamento urbano: uma apreciação teórica integradora para a cidade do Recife-PE. Tese (Doutorado). Recife, UFPE.
- Collischonn, B., 2006. Uso de precipitação estimada pelo satélite TRMM em modelo hidrológico distribuído. Dissertação de Mestrado. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Correa, M. G., Galvani, E., 2016. Évaluation de L'effet Orographique dans le Bassin Versant Du Piquiri – Paraná/Brésil. Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Lausanne (Besançon), Associação Internacional de Climatologia 29, 211-216.
- Connor, G. J., Bonell, M., 1998. Air mass and dynamic parameters affecting trade wind precipitation on the Northeast Queensland Tropical Coast. *Journal International of Climatology* [online] 18. Disponível: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(1998100\)18:12%3C1357::AID-JOC317%3E3.0.CO;2-Z1357-1372](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(1998100)18:12%3C1357::AID-JOC317%3E3.0.CO;2-Z1357-1372). Acesso: 20 set. 2019.
- Dekker, S. C., Rietkerk, M., Bierkens, M. P., 2007. Coupling microscale vegetation–soil water and macroscale vegetation–precipitation feedbacks in semiarid ecosystems. *Journal Global Change Biology* [online] 13. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01327.x>. Acesso: 24 mar. 2020.
- Dinku, T., Ceccato, P., Grover-Kopec, E., Lemma, L., Connor, S. J., Ropellewski, C. F., 2007. Validation of satellite rainfall products over East Africa's complex topography. *Journal International Journal of Remote Sensing* [online] 28. Disponível: <https://doi.org/10.1080/01431160600954688>. Acesso: 20 mar. 2020.
- ESA. Missions. 2018 Disponível em: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2/overview>. Acesso: 13 jan. 2018.
- Ferreira, A.G., Mello, N.G.S., 2005. Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a Região Nordeste do Brasil e a influência dos oceanos Pacífico e Atlântico no clima da região. *Revista Brasileira de Climatologia* [online] 1. Disponível: 10.5380/abclima.v1i1.25215. Acesso: 02 abr. 2020.
- Forgiarini, R.; Vendrusculo, D. S., Rizzi, E. S., 2014. Análise de chuvas orográficas no centro do estado do Rio Grande do Sul. *Revista Ciência e Natura*, Santa Maria [online] 36. Disponível: <http://dx.doi.org/10.5380/abclim.a.v13i0.33431>. Acesso 16 set. 2019.
- Girão, O; Correa, A.C.B., Guerra, A.J.T., 2008. Influência da climatologia rítmica sobre as áreas de risco: o caso da Região Metropolitana do Recife para os anos de 2000 e 2001. *Revista de Geografia (UFPE)* 24, 238 – 263.
- Gonçalves, A. F., 2006. Meteorologia Prática, 1 ed. Oficina de Textos, São Paulo.
- Goovaerts, P., 2000. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of Hydrology*. [online] 228. Disponível: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00144-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00144-X). Acesso 23 mar. 2019.
- INMET. Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa, 2019. Disponível: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>. Acesso: 02 jan. 2018.
- Kousky, V. E., Gan, M. A., 1981. Upper tropospheric cyclonic vortices in the tropical South Atlantic. *Journal Tellus* [online] 36. Disponível: <https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1981.tb01780.x>. Acesso: 18 out. 2019.
- Koss, H., Jensen, L. B., Nielsen, T. A. S. Quantitative and creative design tools for urban design in cold and windy climates. Disponível: http://orbit.dtu.dk/files/92288512/artek_2014_holger_og_lotte_final_1.pdf. Acesso: 01 mai. 2018.
- Landsberg, M. E., 1981 The urban climate, 1 ed. Academia Press, New York.
- Lins, T. M. P., Nóbrega, R.S., Anjos, R. S., França, L. M. A., Pereira, J. A. S., 2013

- Tipologia da precipitação no município de Recife utilizando o satélite TRMM. Congresso Brasileiro de Meteorologia 1, 1- 5.
- Liu, R., Shen, Z., 2008. Temporal-spatial variation and the influence factors of precipitation in Sichuan Province, China. *Journal Front. Biol* [online] 3. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s11515-008-0031-0>. Acesso: 01 out. 2019.
- Machado, C.C.C., Nóbrega, R.S., Oliveira, T.H., Alves, K.M.A., 2012. Distúrbio Ondulatório de Leste como condicionante a eventos extremos de precipitação em Pernambuco. *Revista Brasileira de Climatologia* 11, 146-188.
- Modesto, R. P, Nunes, L. H., 1996. Pluviometria e problemas ambientais no município do Guarujá. *Revista do Departamento de Geografia* 10, 59-71.
- Molion, L.C.B., Bernardo, S.O., 2002. Uma revisão da dinâmica das chuvas no Nordeste Brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia* 17, 1-10.
- Nóbrega, R.S., Cavalcanti, E.P., Souza, E.P., 2005. Reciclagem de vapor d'água sobre a América do Sul utilizando reanálises do NCEP-NCAR. *Revista Brasileira de Meteorologia* 20, 253-262.
- Neves, D.J.D., Alcantara, C.R., Souza, E.P., 2016. Estudo de caso de um Distúrbio Ondulatório de Leste sobre o Estado do Rio Grande do Norte – Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia* 31, 490-505.
- Nimer, E., 1989. *Climatologia do Brasil*, 2 ed. IBGE, Rio de Janeiro.
- Reboita, M.S., Gan, M.A., Rocha, R.P., Ambrizzi T., 2010. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia* 25, 185-204.
- Rocha, A.P., Schuler, C.A., 2016. Avaliação espaço-temporal da suscetibilidade a movimentos de massa utilizando ortofotocartas e modelagem espacial multicritério na dinâmica de áreas de risco nas microrregiões do Jordão e Ibura, Recife-PE. *Revista Brasileira de Cartografia* 68, 1747-1770.
- Schroeder, M. J., Buck, C. C., 1970. *Fire Weather: a guide for application of meteorological information to forest fire control operations*. Salt Lake City: University of Utah. Clouds and precipitation Department of Agriculture Forest Service 1, 144- 165.
- Shiklomanov, Y. A., 2009. *Hydrological Cycle – Vol II. Formation of Precipitation* 1 ed. Eolss, Oxford.
- Soares, F. S., Francisco, C. N., Senna, M. C. A., 2014. Distribuição Espaço-Temporal Da Precipitação na Região Hidrográfica da Baía da Ilha Grande – RJ. *Revista Brasileira de Meteorologia*. 29, 125 – 138.
- Souza, C. V. F., Rangel, R. H. O., Cataldi, M., 2017. Avaliação Numérica da Influência da Urbanização no Regime de Convecção e nos Padrões de Precipitação da Região Metropolitana de São Paulo. *Revista Brasileira de Meteorologia*. 32, 495-508.
- Silveira, L. G. T. et al., 2017. Reciclagem de Precipitação e Desflorestamento na Amazônia: Um Estudo de Modelagem Numérica. *Revista Brasileira de Meteorologia*. 32, 417-432.
- Wanderley, L.S.A., Nóbrega, R.S., Moreira, A.B., Anjos, R.S., Almeida, C.A.P., 2018. As chuvas na cidade do Recife: uma climatologia de extremos. *Revista Brasileira de Climatologia*. 22, 149-164.