



ISSN: 2525-815X

Journal of Environmental Analysis and Progress

Journal homepage: www.jeap.ufrpe.br/

10.24221/jeap.4.1.2019.2147.031-047



Entropia pluviométrica na grande metrópole Recife-PE, Brasil

Pluviometric entropy in the great metropolis Recife-PE, Brazil

Raimundo Mainar de Medeiros^a

^a Faculdade Ademar Rosado-FAR, Rua Prof. José Amável, n. 357, Cabral, Teresina-PI. CEP: 64000-550. E-mail: mainarmedeiros@gmail.com.

ARTICLE INFO

Recebido 20 Set 2018

Aceito 17 Jan 2019

Publicado 22 Jan 2019

ABSTRACT

Entropy is a thermodynamic quantity usually associated with the degree of disorder, measuring part of the energy that can not be transformed into work. The study aimed to analyze the fluctuations in the daily, monthly and annual patterns of rainfall occurrence and to discuss its water availability, emphasizing the entropy procedure, the rainfall precipitation in the dry and rainy period and their respective standard deviations of entropy and precipitation in the period 1962-2015, making it possible to understand the characteristics of the rains in the studied area. Fault fills, homogenization and consistency were performed based on the criterion of analyzing for those continuous series after their fills. The daily precipitation data used was provided by the National Meteorological Institute. In the Great Metropolis of Recife in the periods of La Niña does not influence the precipitous indexes. The standard deviation of the annual entropy changes uniformly to the entropy values, showing a small oscillation of its data around the mean values. The entropy technique is an appropriate tool for expressing data fluctuations around the mean than the conventional deviation technique.

Keywords: Basic statistics, energy disorder, daily and annual precipitation variability.

RESUMO

Entropia é uma grandeza termodinâmica em regra associada ao grau de desordem, medindo parte da energia que não pode ser transformada em trabalho. O estudo objetivou analisar as oscilações dos padrões diários, mensais e anuais de ocorrência pluviais e debater acerca da sua disponibilidade hídrica, ressaltando o procedimento da entropia, da precipitação no período seco e chuvoso e dos seus respectivos desvios padrão da entropia e da precipitação no período 1962-2015, possibilitando compreender as características das chuvas na área estudada. Efetuaram-se preenchimentos de falhas, homogeneização e consistência com base no critério de analisar para aquelas séries contínuas após seus preenchimentos. Os dados diários de precipitação utilizados foram fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia. Na Grande Metrópole de Recife nos períodos de La Niña não causa influência nos índices de precipitação. O desvio-padrão da entropia anual varia uniformemente aos valores de entropia, mostrando pequena oscilação de seus dados em torno dos valores médios. A técnica da entropia se constitui em ferramenta apropriada para expressar as flutuações de dados em torno da média do que a técnica convencional do desvio.

Palavras-Chave: Estatísticas básicas, desordem energética, variabilidade diária e anual da precipitação.

Introdução

Entropia é uma grandeza termodinâmica em regra associada ao grau de desordem, medindo parte da energia que não pode ser transformada em trabalho, inicialmente utilizado por Clausius, em 1850. É função de estado cujo valor cresce

durante processo natural em sistema fechado, esta grandeza permite definir a segunda Lei da Termodinâmica, portanto, o processo oferecer de forma natural em único sentido. A entropia relaciona-se com o número de arranjos de mesma energia que um dado sistema pode assumir, pois

quanto maior o número de configurações, maior a entropia. Por esta razão, a entropia é geralmente associada ao conceito subjetivo de desordem, envolvendo as diferentes possibilidades de configurações energéticas. A noção de desordem, embora útil e muito comum, pode ser imprecisa e incompleta em muitos casos.

Clausius (1865) mostrou que a entropia para todo o universo e o estado mais simples de energia, como se destacam as leis fundamentais do universo, correspondentes as duas leis da teoria mecânica do calor onde a energia do universo é constante e a entropia do universo tende para um máximo. Nussenzweig (1981) afirma que a entropia do universo nunca decresce: não é afetada por processos reversíveis e cresce em processos irreversíveis.

A Entropia de Shannon (1948a), também conhecida como Teoria da Informação, surgiu nos anos 40, denominada de Teoria Matemática da Comunicação. A sua motivação assentava no problema das comunicações com segurança, concentrou-se, inicialmente, no estudo da estrutura matemática genérica e nas propriedades dos sistemas de comunicação com segurança. Na sequência desse estudo Shannon (1948a) o autor ainda estabeleceu um modelo de sistema de comunicação genérico e formalizou os conceitos de medida de informação, capacidade de transferência de informação sobre um canal e de codificação Shannon (1948b). Conforme este mesmo autor, a entropia pode ser calculada se a função distribuição de probabilidade ou função densidade de probabilidade (FDP) da variável aleatória for dada de forma discreta ou contínua, usando-se a teoria de informação da entropia, definida por Shannon (1949). De acordo com essa teoria, a incerteza de uma variável ou a incerteza de sua distribuição de probabilidade é o valor esperado negativo do logaritmo da FDP da variável.

Outra forma de classificação da imagem recorrendo à entropia de acordo com Shannon (1921) reside na comparação dos resultados com valores conhecidos, baseando-se no princípio que áreas semelhantes contém um grau de informação semelhante.

Nicolas Sadi Carnot havia apresentado os conceitos de um ciclo térmico ideal, que se tornariam as bases da Segunda Lei da Termodinâmica. Essa implica em um sistema, que ao passar por algum processo em direção ao estado de equilíbrio, tende a aumentar sua entropia (Mattos & Veiga, 2002; Moreira et al, 2003; Passos, 2003). Por se inserir em uma temática mais abrangente - Teoria Geral dos Sistemas (Zdenkovic & Scheidegger, 1989a), suas

aplicações se difundiram por diversas áreas do conhecimento.

Contudo a utilização de entropia nas imagens assenta essencialmente em técnicas de segmentação. O sistema de caracterização que se pretende implementar assenta na classificação de imagens RGB, usando a informação presente nas cores, para classificar áreas como naturais ou artificiais (Wong, 1989; Albuquerque, 2008).

A teoria da entropia, por sua vez, parece ter inaugurado uma nova abordagem para a compreensão de fenômenos das mais diversas áreas. Isso pode ser verificado pela influência exercida na Física, Genética, Química e na própria Matemática e Estatística de onde se originou (Verdú, 1999).

Lambert (2006) mostrou que a teoria da entropia é um assunto mais temido na química universitária básica, devido a sua complexidade em compreender seus princípios básicos. Segundo Zmoramo et al. (2006), as dificuldades residem na falta de correspondência entre os modelos macroscópico e os modelos científicos.

Para entender o conceito informacional da entropia, deve-se considerar um conjunto de n elementos, sendo a incerteza da ocorrência de um deles considerada como a situação na qual não se conhece qual deles ocorrerão (Singh, 1997). Com base no conhecimento de um único evento, a incerteza poderá ser maior ou menor; por exemplo, o número total de eventos n é uma parte da informação e o número desses eventos com probabilidade diferente de zero é outra parte da informação (Belo Filho, 2010).

Nem mesmo a ciência é livre de contestações e subversões, é só olharmos para o desaparecimento do determinismo científico para o surgimento de uma época de maior iluminismo científico, Pontes (2016) fez uma extensão referência em seu texto as observações de Blumenfeld (1981), sobre abaixamento da entropia geral nas organizações celulares para formação de moléculas complexas que dão origem a vida como a conhecemos, chegando a afirmar que a formação de estruturas biológicas é feita sobre tudo, livre de um custo termodinâmico considerável.

A informação de entropia coube no contexto de probabilidades, e não necessariamente em teorias físicas como Termodinâmica ou Mecânica Estatística. Desta forma, sua presença foi assegurada pelos métodos estatísticos e não pelos conceitos mecânicos da teoria, de acordo com Lima et al. (2004).

Araújo (2017) estudou a entropia na construção de softwares na inteligência artificial e na árvore de decisão, levando em consideração os

parâmetros do ambiente: aspecto do céu; vento; temperatura e umidade e demonstrou a significância da entropia no referido estudo devido a sua variabilidade atmosférica.

Ferreira et al. (2018) analisaram a variabilidade espacial da dinâmica da chuva em escala mensal no estado de Pernambuco, utilizando o método entropia de permutação. Este método foi desenvolvido como uma medida da complexidade de séries temporais, considerando as correlações temporais entre os valores da série utilizando uma representação simbólica baseada nas comparações dos valores consecutivos. Os resultados mostraram que os valores da entropia diminuem com a distância do litoral, indicando maior variabilidade e menor previsibilidade das chuvas mensais nas regiões da zona da Mata e Agreste e menor variabilidade e maior previsibilidade das chuvas mensais nas regiões do Sertão Pernambucano.

Uma avaliação de complexidade natural para séries temporais, chamada entropia de permutação, foram desenvolvidas por Bandt et al. (2002). Ao contrário das entropias clássicas, este método considerou as correlações temporais entre valores da série, mapeando, e a série original, em uma sequência simbólica, foi baseada na ordenação relativa dos valores consecutivos. As propriedades da entropia de permutação possibilitam diferenciar entre a dinâmica estocástica e a dinâmica determinística dos processos geradores das séries temporais (Riedl et al., 2013).

Recentemente a entropia de permutação foi utilizada em estudos hidrológicos para classificar o regime hidrológico (Lange et al., 2013; Serinaldi et al., 2014) e para detectar as mudanças abruptas em séries temporais da vazão causadas pelos fatores naturais e antrópicos (Fan, 2013).

A entropia de permutação foi utilizada em estudos relacionados à fisiologia (Nicolaou & Georgiou, 2012; Ferlazzo, 2014), engenharia (Yan et al., 2012), geofísica (Consolini et al., 2014), hidrologia (Fan, 2013; Serinaldi, Zunino & Rosso, 2014) nos estudos das finanças (Bariviera, 2015) e em estudos de sistemas caóticos em conformidade com Rosso (2013).

Pineda (2006) afirma que a entropia é um estado dinâmico que varia em função do estado inicial de organização da matéria e do tempo, caracterizando assim um processo irreversível.

Morais et al. (2010) mostraram que a análise de sistemas a partir da visão da Segunda Lei é convenientemente realizada em termos da propriedade entropia. Entropia, assim como energia, constitui conceito abstrato e devido a sua

relevância estudaram o seu importante papel nas análises termodinâmicas. Concluíram que a transferência de energia da entropia acompanha o fluxo de calor e o fluxo de massa, além de ser uma propriedade extensiva, a entropia não pode ser conservada.

A contribuição da variabilidade da entropia é uma teoria moderna do conhecimento que vem sendo aplicada em diversas áreas da ciência, tais como em hidrologia, de acordo com Singh & Rajagopal (1987), para a matemática, segundo Dragomir et al. (2000), na economia, conforme Kaberger et al. (2001), na ecologia, de acordo com Ricotta (2001), na climatologia, por Kawachi et al. (2001), e na medicina, de acordo com Montañó et al. (2001).

A aplicação direta da teoria da entropia a dados observados de chuva pode quantificar suas irregularidades. Por exemplo, Al-Zahrani & Husain (1998) utilizaram a teoria da informação de Shannon para otimizar e detectar irregularidades em uma rede hidrometeorológica, localizada no sudeste da Arábia Saudita.

A aplicação da teoria da entropia para delimitação de zonas de chuva e consequente avaliação dos recursos hídricos em grande escala tem sido bastante utilizada (Harmancioglu et al., 1992; Harmancioglu & Singh, 1998). Nessa linha de pesquisa, Husain (1989) aplicou uma metodologia baseada na teoria da entropia para selecionar o número ótimo de estações em uma extensa rede de postos e identificar regiões com máxima informação hidrológica.

Chapman (1986) fez uso do conceito de entropia condicional para comparar a eficiência de modelos hidrológicos. A aplicação potencial de entropia em pesquisas cuja abordagem contemplava o estudo dos recursos hídricos foi apresentada por Rajagopal et al. (1987). Não obstante, Sonuga (1976), ao estudar a modelagem de chuva-vazão, descreveu a 39 aplicação do princípio de entropia e observou que essa técnica pode ser utilizada quando a disponibilidade de dados é mínima.

Saco et al. (2010) analisaram a possível ligação entre a variabilidade da entropia e as épocas de rápidas mudanças climáticas. Os quantificadores da entropia evidenciaram que existem ciclos de, aproximadamente, 200 anos durante o Holoceno classificado como antigo e médio. Nesses ciclos, os autores encontraram uma tendência de aumento da entropia durante os períodos mais longos que pode estar associada à aridez dos trópicos baixos.

A técnica de dimensionamento de postos pluviométricos levando como base a teoria da entropia é outra aplicação que pode e deve ser ainda

bastante explorada no segmento de recursos hídricos nos Estados. Nessa perspectiva, cita-se Moulin (2005), em cujo estudo buscou descobrir um número ótimo de estações dentro de uma rede de 18 postos pluviométricos localizados no Estado do Espírito Santo. A partir do princípio de maximização da informação, os estudos mostraram que somente 15 estações eram suficientes para representar aquela rede. Os resultados obtidos pelo modelo estocástico foram expressos nas 41 formas de mapas de entropia, onde podem ser observados os intervalos correspondentes ao grau de incerteza da precipitação, identificando regiões ou áreas com maior ou menor entropia.

Assis et al. (2013) citam que o Sertão de Pernambuco é caracterizado pela grande anormalidade das precipitações pluviométricas e expõem que o principal período chuvoso ocorre entre os meses de janeiro a abril, através dos vestígios das frentes frias, na atuação dos vórtices ciclônicos de ar superior (VCAS) e na zona de convergência intertropical (ZCIT), sendo os sistemas causadores de chuvas. Segundo Hallal (2007), um dos fatores que determinam a taxa e a quantidade de precipitação pluvial é o teor de umidade contido na massa de ar.

Viana (2010) afirma que, nos dias atuais, é perceptível o valor das pesquisas que envolvem estudos de clima e de suas consequências(?) na aplicação em diversas atividades humanas, como agropecuária, repesamento de água, economia, comércio, geração de energia, lazer, que dependem dos dados e informações cada vez mais concisos sobre chuvas, secas, temporais e eventos extremos, com informações de médio e longo prazo, apresentando confiabilidade e consistência.

Almeida (2001) afirma que a precipitação é o elemento meteorológico que apresenta maior variabilidade espaço temporal, tanto em quantidade quanto em distribuição mensal e anual, comparada ao valor observado e/ou esperado, de um local para outro e/ou dentro da própria região.

Silva et al. (2003) demonstraram que as oscilações pluviométricas são máximas em regiões tropicais; este máximo ocorre em parte da região Nordeste do Brasil (NEB), quando os sistemas atmosféricos, como: Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), sistemas frontais (SF), brisas de leste (BL), vórtices ciclônicos de ar superior (VCAR) e Vórtices Ciclone do Atlântico Sul (VCAS) encontram-se em atividade.

Lacerda et al. (2016) mostraram que, para a região Nordeste do Brasil (NEB) particularmente no estado de Pernambuco, muitas áreas estão vulneráveis aos processos de

desertificação, com variabilidade de clima e eventos extremos como: secas severas, chuvas intensas e torrenciais, em curtos intervalos de tempo.

A disponibilidade natural de água na região Semiárida do Brasil é caracterizada por uma distribuição de chuvas bastante irregular, baixos índices de pluviosidade e longos períodos de estiagem, de acordo com Nys et al. (2014) e Hastenrath (2012). Os longos períodos de estiagem, influenciados pelo El Niño (Hastenrath, 2012; Cavalcanti, 2012), ocasionam danos irreparáveis à população da região, em especial àqueles que retiram seu sustento da atividade agrícola, em especial a agricultura familiar (Rodriguez et al., 2015). Os diferentes sistemas de circulação atmosférica que atuam nessa região tornam a climatologia complexa, refletindo em uma grande variabilidade climática, considerando as chuvas, com eventos de precipitação, variando no tempo e no espaço (Silva, 2004).

Kawachi et al. (2001) utilizaram o conceito de entropia para avaliar o grau de variabilidade da precipitação pluvial no Japão e obtiveram mapas de disponibilidade hídrica, os quais permitiram avaliar sua distribuição na parte continental do Japão. Ainda em conformidade com estes autores, que afirmam que com os dados pontuais de chuva média climatológica anual e da entropia relativa é possível obter as classes de sazonalidade para determinada região.

Guedes et al. (2010) utilizaram-se da teoria da informação da entropia de Shannon e aplicaram a análise de agrupamento, métricas para representar a aleatoriedade da intensidade e da ocorrência da chuva mensal; usaram essas métricas para avaliar a disponibilidade potencial de recursos hídricos na região Nordeste do Brasil.

Uma amostra pequena de dados reflete, muitas vezes, a dificuldade na análise da distribuição de probabilidade da variável por métodos convencionais. Sendo assim, pode-se amenizar esse tipo de problema por meio do uso da teoria da entropia, a qual é capaz de determinar distribuições de probabilidade menos parciais com pequenas amostras de dados. Essa característica da entropia é particularmente importante, principalmente em estudos onde a escassez de dados é grande, conforme Sousa et al. (2012).

Liu et al. (2010) empregaram a teoria da entropia cruzada com o intuito de analisar séries temporais de taxas de câmbio em países asiáticos, verificando o nível de sincronia entre duas séries temporais. Para as cidades de Cingapura, Tailândia e Taiwan, os valores da entropia cruzada, após a crise das moedas asiáticas, foram superiores aos mesmos valores observados no

período anterior à crise. Para estes autores, a entropia cruzada é bastante eficiente na descrição da correlação entre séries temporais.

Segundo Ortolani et al. (1987), dentre os elementos do clima, a precipitação pluviométrica é o fator que mais influência na produtividade agrícola, principalmente em se tratando de regiões tropicais, tais como o nordeste do Brasil.

Silva et al. (2003) utilizaram-se dos dados diários de precipitação e de temperatura média diária, de Campina Grande, PB, para avaliar a variabilidade espacial e temporal, com base na teoria da entropia. Os resultados evidenciaram que a entropia é alta em locais com intensa precipitação, e baixa quando ocorrem, nesses locais, baixos índices pluviométricos; conseqüentemente, nos períodos chuvosos, a entropia é alta e, nos períodos de estiagem, é mínima. Evidenciaram, ainda, que qualquer série temporal de entropia decresce exponencialmente com o aumento do seu desvio-padrão.

Melo et al. (2016) avaliaram a teoria da entropia, a qual produz padrões espaciais e possibilita compreender as características das chuvas na área da cidade de Cabaceiras-PB. Observou-se que o desvio padrão da entropia anual variou uniformemente com os valores de entropia, em torno dos valores médios.

Segundo Atkins (2014), a terceira lei da termodinâmica diz que a entropia de todos os cristais perfeitos é zero na temperatura absoluta.

De acordo com Castellan (2014), S é a entropia do terceiro princípio, ou a temperatura do sólido em T e p , onde C_p é positivo, logo a integral é positiva e S é o menor valor possível para a entropia, quando $T=0$. Ainda, segundo este autor, se for um sólido que apresente uma transição para uma estrutura cristalina, a entropia de transição na temperatura de equilíbrio deve ser incluída. Deve-se fazer uma varredura desde o zero absoluto até a temperatura de interesse para entropias com as capacidades caloríficas das substâncias em vários estados de agregação.

Medeiros et al. (2015) analisaram a série pluviométrica (1930-2010) do município de Teresina-PI, com base na teoria da entropia, que é capaz de produzir padrões espaciais que possibilitam compreender melhor as características das chuvas na área estudada. O desvio-padrão da entropia anual variou uniformemente quanto aos valores de entropia, mostrando pequena oscilação de seus dados em torno dos valores médios. A variabilidade dos padrões de ocorrência de precipitação no município de Teresina é maior nos períodos de La Niña do que nos períodos de EL Niño, com valores de entropia anual oscilando entre 2,68 bits

(mínimo) e 6,47 bits (máximo), com um valor médio de 5,39 bits.

A incerteza será quantificada pela entropia, levando-se em conta todos os tipos de informações disponíveis, e representada pela distribuição de probabilidade da variável controlada. Interpretando um conjunto composto por n elementos e se considerando p_i como a probabilidade de encontrar o sistema no i -ésimo microestado, a entropia de Shannon é igual à entropia da mecânica estatística, conforme Silva et al. (2003).

Segundo Gleiser (2016), de forma lógica e natural, todos os organismos vivos necessitam de certa forma, capturar certa quantidade de energia externa e transformá-la em “energia interna”, que fomentará a manutenção de seu metabolismo vital, atribuída à figura da alimentação.

Moulin (2005) afirma que os dados de precipitação são importantes à medida que podem se tornar fundamentais para diversas atividades humanas, a exemplo da geração de energia elétrica, navegação fluvial, sistemas de irrigação, exploração de aquíferos e prevenção de erosão hídrica, em obras de engenharia, tais como: pontes, viadutos, portos e obras para dispersão de poluentes em corpos de água, também na ocupação do solo no tocante às áreas inundáveis e no suprimento de água para cidades e complexos industriais.

A água funciona como fator de desenvolvimento, sendo utilizada para inúmeros usos diretamente relacionados à economia regional, interregional, nacional e internacional. Os múltiplos usos da água aceleram-se em todas as regiões, continentes e países, aumentando à medida que as atividades econômicas se diversificam e as necessidades por este recurso natural crescem para atingir níveis de sustentação, compatíveis com as pressões da sociedade de consumo, da produção industrial e agropecuária, de acordo com a afirmativa de Tundisi (2003).

Uma amostra pequena de dados reflete, muitas vezes, a dificuldade na análise da distribuição de probabilidade da variável por métodos convencionais. Sendo assim, pode-se amenizar esse tipo de problema por meio do uso da teoria da entropia, a qual é capaz de determinar distribuições de probabilidade parciais com pequenas amostras de dados. Essa característica da entropia é particularmente importante, principalmente em estudos onde a escassez de dados é grande, de acordo com a explanação de Sousa et al. (2012).

Oleques et al. (2018) objetivando a identificação de eventos climáticos na cidade de Bagé-RS, a partir de registros de precipitação

pluvial no período 1970 a 2016, realizaram uma análise espectral da distribuição tempo-frequência da série. Tal análise ajusta a resolução do espectrograma por estimativas locais da curtose, generalizada por estatística de alta ordem - *High-Order Statistics* (HOS). Objetivando melhor caracterizar os trechos onde as incertezas são mais relevantes, cálculos do grau de entropia foram avaliados. Os resultados são apresentados via densidade espectral de potência do sinal, espectrograma e perfil de curtose, relativos aos registros da série pluvial, mostrando-se eficientes no reconhecimento dos padrões climáticos avaliados. Além disso, especificações sobre a mudança no regime de chuvas foram observadas, identificando períodos mais secos no clima da região na década de 80.

Souza (2011) mostrou que é razoável apresentar a hipótese de que a aplicação da teoria da entropia de Shannon será capaz de delimitar os recursos hídricos no Estado da Paraíba. Em conformidade com este autor, o conceito pode ser utilizado em diversas áreas do conhecimento, conforme Souza et al. (2012), que avaliaram o grau de incerteza do padrão de distribuição das chuvas no estado da Paraíba. Estes autores afirmaram que a entropia é uma ferramenta eficaz para representar a variabilidade dos dados em torno da média.

A entropia relativa e o índice de sazonalidade podem afetar a dinâmica do crescimento da vegetação. Segundo Souza et al. (2016), o crescimento da caatinga responde, tanto ao total de chuva, como também à distribuição da chuva ao longo do ano (sazonalidade).

Tarsitani et al. (1996) mostraram que nenhuma fórmula estatística, relacionando um conceito indefinido como entropia, com outro conceito indefinido como desordem, irá ajudar em um melhor entendimento do conceito de entropia.

Segundo Reis et al. (2012), o conceito da entropia estatística surge fornecendo uma medida do grau de desordem de um dado sistema, para uma crítica ao uso do termo desordem.

Dionísio et al. (2006) afirmam que, de acordo com “o princípio da entropia máxima e mínima na informação, é possível encontrar a distribuição de probabilidade que mais se ajusta aos dados”, na qual é minimizado o uso inadvertido de qualquer tipo de informação que não a explicitamente disponível, podendo ser encarado como um ramo da inferência estatística (MAASOUMI, 1993).

Hemery et al. (1986) mostraram que os modelos econômicos clássicos não incluem a energia (entropia) explicitamente entre os fatores de produção, embora façam referência marginal

aos parâmetros energéticos (intensidade energética, custos da energia, etc.). Entretanto, existe uma correlação praticamente linear entre o produto de uma nação industrializada e o uso da energia. Mesmo para economias pré-industriais, alguma correlação existe, como mostra a coincidência dos surtos de crescimento econômico com a introdução de novos conversores energéticos.

Alvim (1996) demonstrou que a avaliação correta da influência da energia (entropia) na produção talvez seja dificultada pelo uso de energia não comercial (resíduos agrícolas e industriais, lenha catada, estrume de gado, etc.), principalmente nos países de menor renda, bem como pelo controle exercido pelos governos sobre os preços da energia, o que constitui reconhecimento tácito da sua importância estratégica. Na atualidade, assistimos ao esforço mundial para manter o preço do petróleo em nível compatível com a estabilidade da economia e, em passado recente, vimos a perturbação causada pelos dois choques dos preços do petróleo que resultaram, inclusive, em frustração do plano brasileiro de desenvolvimento.

Ayres (1998) afirma que o termo entropia é muito usado, porém pouco estudado. Na interpretação econométrica, Golan (2002) considera que a entropia sobre um sistema econômico é uma medida da ignorância que o pesquisador quer saber sobre valores momentâneos que representam à essência da população em análise. Allegrini et al. (2003) criticaram o uso e o propósito da entropia como medida de desordem, apontando problemas de subjetividade. Com efeito, o conceito de ordem e desordem dificulta sua definição e depende de questões que são extraídas do sistema. Contudo, a subjetividade entra no modelo no momento em que se escolhe a definição que se quer usar, que dê sustento às questões de interesse. Bais et al. (2005) foram mais além e quando questionaram se a entropia é um atributo subjetivo no domínio do observador ou, se pelo contrário, seja uma propriedade intrínseca do sistema físico.

Segundo Skamarock (2005), o WRF é dividido, basicamente, em dois núcleos: *Nonhydrostatic Mesoscale Model* (NMM) e o *Advanced Research WRF* (ARW); neste estudo foi utilizado o último núcleo citado. O núcleo ARW é caracterizado por utilizar como equações governantes as formas fluxos das equações termodinâmicas e o *momentum* (velocidade de massas acopladas) com conservação de massa. As variáveis prognósticas são *momentum*, entropia seca (temperatura potencial de massas acopladas), geopotencial e coluna de massa (pressão

hidrostática em superfície). A grade numérica horizontal segue o esquema de Arakawa-C, o vertical de Lorentz e a discretização vertical possui coordenadas ETA. O método de integração temporal segue a formulação de Euler (Skamarock, 2005).

Objetiva-se analisar as flutuabilidades das amostras diários, mensais e anuais de ocorrência de chuva na grande metrópole Recife e debater suas disponibilidades hídricas, ressaltando a metodologia da entropia pluviométrica do período

seco e chuvoso e dos seus respectivos desvios padrões da entropia, no período 1962-2015.

Material e Métodos

Recife limita-se, ao norte, com as cidades de Olinda e Paulista, ao sul, com o município de Jaboatão dos Guararapes, a oeste, com São Lourenço da Mata e Camaragibe, e a leste, com o Oceano Atlântico. Localizada na latitude 08°01'S, longitude 34°51'W, com altitude média de 72 metros, em relação ao nível do mar (Figura 1).

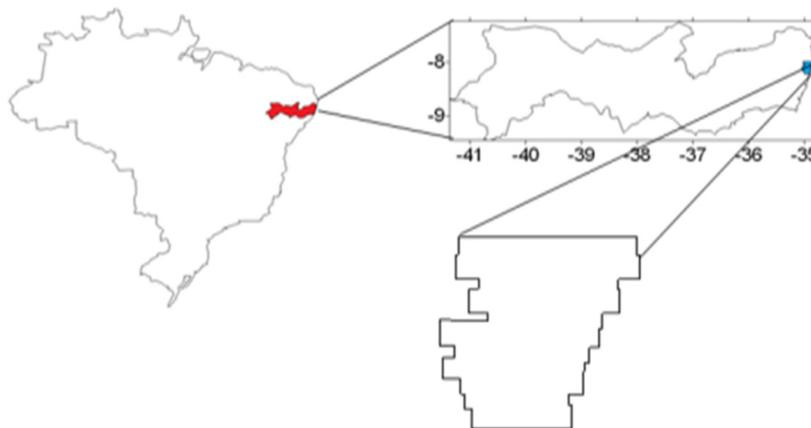


Figura 1. Localização do município de Recife-PE. Fonte: Medeiros (2018).

Os sistemas atmosféricos, que contribuem com a precipitação do Recife, são os Distúrbios Ondulatórios de Leste, Brisas Marítimas e Terrestres, Ondas de Leste, ventos alísios de sudeste, Zona da Convergência Intertropical (ZCIT). As formações dos sistemas de Vórtices Ciclones de Altos Níveis (VCAS) quando de suas formações nos meses de fevereiro a abril e com suas bordas sobre o NEB, em especial acima do estado do Pernambuco aumenta a cobertura de nuvem e provocam chuvas de alta intensidade e curto intervalo de tempo, causando prejuízo às comunidades como alagamento, enchentes, inundações e ao setor socioeconômico e agropecuário. As fortes chuvas que ocorrem no período chuvoso são influenciadas pelos sistemas atmosféricos transientes, no período seco a precipitação registrada é causada pelas contribuições locais formando nuvem seguida de precipitações isoladas.

Utilizaram-se as séries diárias de precipitação da metrópole Recife-PE, no período compreendido entre 1962-2015. Nestas séries realizaram-se preenchimentos de falhas, homogeneização e consistência, analisando apenas aquelas séries contínuas após seus preenchimentos. Os dados diários de precipitação pluvial utilizados foram coletados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 1962-2015).

Os cálculos da entropia foram realizados em planilhas eletrônicas e aplicaram-se as equações apresentadas a seguir.

Cálculo da entropia marginal da precipitação

A teoria da entropia serve de base para melhor compreender ou aumentar o grau de informações sobre um sistema, o que se refere à incidência ou não de fenômenos a ele relacionados.

A teoria da entropia foi utilizada neste estudo para analisar a variabilidade da precipitação e obter a delimitação dos recursos hídricos na região.

A sequência de dados diários de chuva em cada ano foi descrita pela distribuição de probabilidade de ocorrência de precipitação e o valor médio da entropia anual foi obtido para cada posto por meio da entropia da informação de Shannon.

A entropia foi considerada como a estimativa da incerteza da ocorrência de um determinado evento em um processo aleatório discreto, que foi obtida pela Equação 1 (Shannon, 1948):

$$H = -k \sum P_i \log P_i \quad \text{Eq.(1)}$$

onde P_i é o resultado da probabilidade da i -ésima variável aleatória discreta, k é uma constante positiva, cujo valor depende das unidades

utilizadas, e H é a entropia da variável aleatória. Assumindo a constante k , como unidade de estimativa, igual a 1 e a base do logaritmo 2, a Equação 1 pode ser simplificada na Equação 2:

$$H = -\sum_{i=1}^n P_i \log_2 P_i \quad \text{Eq.(2)}$$

onde H é obtido em “bit”, como unidade de medida da entropia, e n é o número possível de eventos da variável aleatória discreta. A unidade de entropia pode ser bit para a base 2, napiers ou nats para a base neperiana e hartley para a base 10. Utilizou-se a unidade bit para entropia, que significa dígito binário, ou seja, a menor unidade na notação numérica binária que pode assumir o valor 0 ou 1.

Se todos os P_i 's são iguais, isto é, $P_i = 1/n$, então a entropia é $H = \log_2 n$. Assim, H é uma função monotonamente crescente em n . Para um dado n , H é máximo quando todos os P_i 's são iguais. Ao contrário, H é mínimo e igual a zero quando todos os P_i 's, exceto um, é zero. Isso significa que todo resultado da variável aleatória é sempre o mesmo e, portanto, um dos P_i 's torna-se unitário. Assim, o valor da entropia, varia dentro do intervalo de zero a $\log_2 n$, de acordo com a forma da distribuição de probabilidade dos P_i 's. O valor da entropia decresce com o aumento do número de contraste e aumenta com o decréscimo desse número. Visto dessa maneira, a entropia pode ser considerada como uma estimativa funcional da incerteza associada à distribuição de probabilidade.

Para cada série histórica de precipitação de um ano, está sendo admitido que r_i representa a precipitação diária correspondente ao i -ésimo dia do ano. Por exemplo, valores diários de precipitação de 1 de janeiro e 31 de dezembro para o mesmo ano podem ser expressos por r_1 e r_{365} , respectivamente. Assim, a precipitação total durante um ano não bissexto R é expressa pelo somatório dos valores diários, variando de $i = 1$ até $i = 365$, pode ser representada pela Equação 3:

$$R = \sum r_j \quad \text{Eq.(3)}$$

onde os valores de r_i podem ser zero para alguns dias e diferentes de zero para outros. As séries de precipitação formadas por r_1, r_2, \dots, r_n podem ser fixadas como a frequência de ocorrência acumulada de chuvas para 1, 2, ..., n -ésimo dia do ano, respectivamente. Assim, a frequência relativa da precipitação (P_i) será obtida dividindo-se r_i pelo tamanho total da amostra (R), aplicando a Equação 4:

$$P_i = r_i/R \quad \text{Eq.(4)}$$

A frequência relativa (P_i) é fixada como uma probabilidade do total da precipitação no i -ésimo dia, e, portanto, sua distribuição de ocorrência representa a característica probabilística da partição temporal da precipitação ao longo do ano, sendo a ocorrência da incerteza da precipitação, aplicando a Equação 5.

$$H = -\sum_{i=1}^n \frac{r_i}{R} \log_2 \left(\frac{r_i}{R} \right) \quad \text{Eq.(5)}$$

O valor de H é independente da ordem sequencial de r_i na série temporal; assume o valor zero quando R ocorre apenas uma vez no ano e o valor máximo ($\log_2 n$) quando R ocorre em todos os dias do ano. Logo, a entropia aproxima-se do seu valor máximo quanto mais uniforme for sua distribuição, isto é, quando os dados da série apresentam pouca variabilidade temporal. Assim, H pode ser uma estimativa da variabilidade da precipitação no sentido de escala. Quando as séries anuais de precipitação para n anos estão disponíveis, em um mesmo posto pluviométrico, a melhor estimativa da entropia daquele posto pode ser obtida através da média aritmética de seus valores anuais e expressa pela Equação 6:

$$\bar{H} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H \quad \text{Eq.(6)}$$

onde \bar{H} é a entropia média e n o número de anos que foram utilizados no cálculo de H . O ganho de uma informação resulta no decréscimo da entropia, e vice-versa. A entropia torna-se zero quando existe certeza absoluta da ocorrência de certo evento, ou estatisticamente, quando todas as probabilidades de um conjunto, exceto uma, é zero.

Resultados

Os dados pluviométricos diários para o município Recife, no período de 1962 a 2015, foram utilizados na análise da entropia da precipitação anual. Para tanto se agrupou os dados diários em mensais e os converteram-se nos valores anuais com a finalidade de mostrar as suas variabilidades climatológicas, que estão representados na Figura 2, registrando-se irregularidade dos totais anuais precipitados. Os menores índices pluviométricos registrados ocorreram nos anos de 1962, 1968, 1993 e 1998. Os anos com maior incidência de chuvas foram 1987, 2001 e 2011. A precipitação anual do período é de 2.204,8 mm.

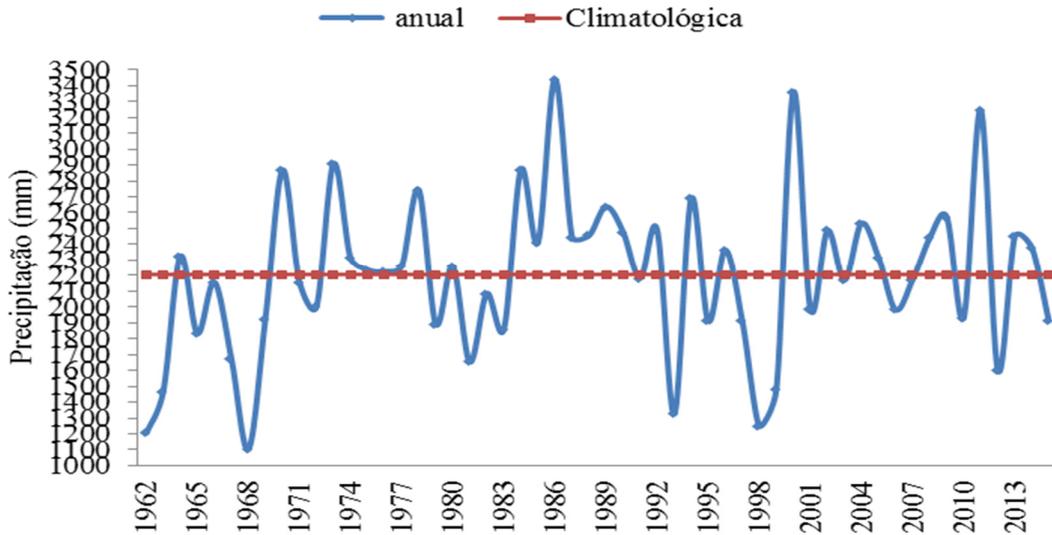


Figura 2. Precipitação anual e climatológica em Recife-PE para o período de 1962-2015. Fonte: Medeiros (2018).

As flutuações anuais dos desvios padrão normalizadas da precipitação do período de 1962-2015 estão representadas na Figura 3. As altas flutuações dos desvios negativos ocorreram nos anos de 1968, 1981, 1993, 1998, 1999 e 2012 (representados pela cor vermelha). Os desvios

positivos de maiores fluatubilidades estão registrados nos anos 1964, 1970, 1973, 1984, 1986, 2000 e 2009, com destaque para a cor verde. A cor azul apresenta valores intermediários aos desvios positivos e negativos.

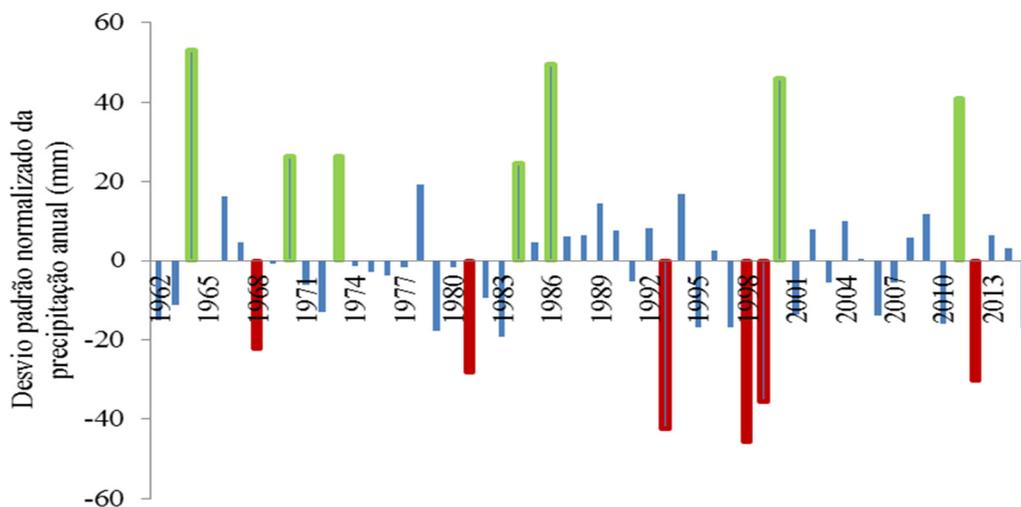


Figura 3. Desvio padrão normalizado da precipitação anual em Recife-PE para o período de 1962-2015. Fonte: Medeiros (2018).

A incerteza pode ser quantificada pela entropia, levando-se em conta todos os tipos de informações disponíveis, e representada pela distribuição de probabilidade da variável controlada. Interpretando um conjunto composto por n elementos e se considerando π como a probabilidade de encontrar o sistema no n ésimo microestado, a entropia de Shannon é igual à entropia da mecânica estatística, conforme afirmaram Silva et al. (2003).

A técnica de entropia é mais eficiente que a técnica convencional da variância para detectar a desordem dos dados em torno da média, de acordo com Maruyama et al. (2005).

A Figura 4 exibe o curso anual da entropia da precipitação do período de 1962 a 2015. Destaca-se comportamento irregular na flutuação da entropia anual no decorrer do período estudado, os anos de 1962, 1967, 1981, 1993, 2000, 2006 e 2015 com baixas incidências de entropia, os anos

1964, 1987, 1999 e 2005 como os de maiores flutuabilidade da entropia. Observa-se que a entropia sofre redução de seus valores quando

ocorrem menores registros pluviométricos, confirmando deste modo a variabilidade da ocorrência de chuvas na área de estudo.

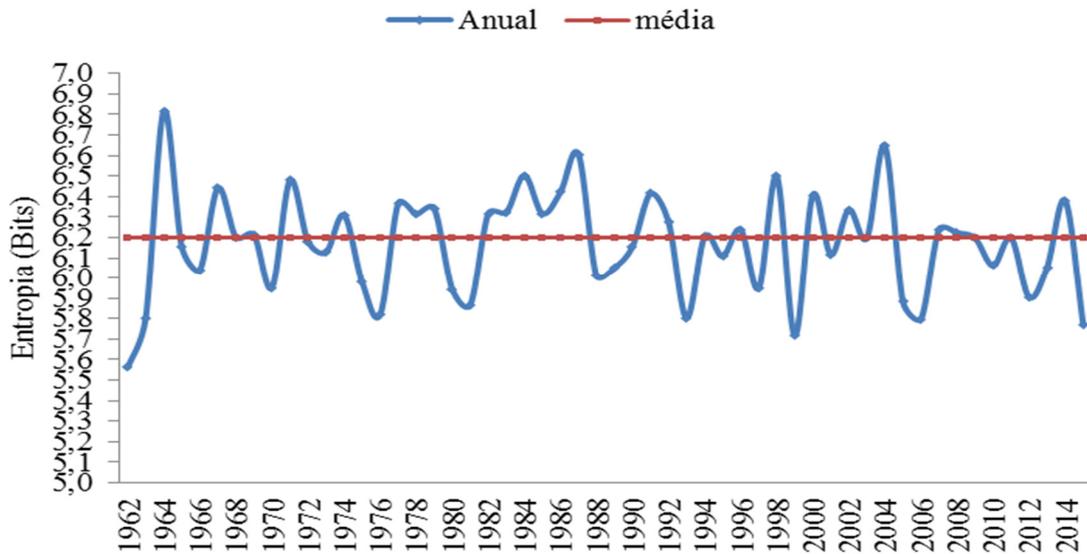


Figura 4. Entropia anual da precipitação pluvial em Recife-PE do período de 1962-2015. Fonte: Medeiros (2018).

A variabilidade do desvio padrão da entropia anual, representada na Figura 5, demonstra quanto é irregular a sua distribuição no período estudado. Destacam-se os anos de 1977, 1981, 1994, 2000, 2007 e 2013, com os maiores desvios registrados. Os menores desvios padrão

foram registrados nos anos 1964, 1984, 1988, 1995 e 2008. Estas flutuabilidades estão relacionadas aos fatores climáticos predominantes que atuaram nos referidos anos em destaque tais como ocorrência de veranico, chuvas intensas em curtos intervalos de tempo.

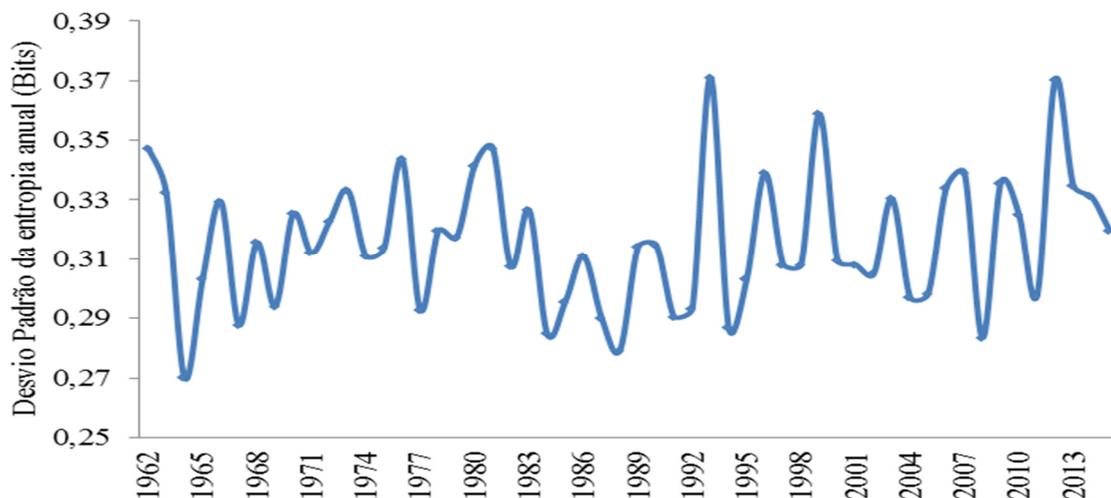


Figura 5. Desvio-padrão da entropia anual em Recife-PE do período de 1962-2015. Fonte: Medeiros (2018).

A Tabela 1 mostra alguns parâmetros estatísticos básicos da entropia e da precipitação, com base em totais diários e anuais de precipitação. O percentual da média se refere ao percentual do parâmetro analisado, representado pelo desvio-padrão. Assim, observa-se que a média da entropia calculada, com base em valores diários de precipitação (7,02 bits), é inferior àquele obtido

com a utilização dos dados anuais (6,2 bits). As Figuras 4 e 5 demonstram os valores da entropia e do desvio-padrão da entropia os quais apresentam padrão de comportamento diferente, sendo o percentual anual da média o de menor representatividade. Segundo Maruyama et al. (2005), a técnica da entropia é mais eficiente para detectar a desordem dos dados em torno da média

do que o método convencional da variância. Essa ideia está evidenciada, pois o desvio-padrão da entropia, enquanto medida de variabilidade dos

dados, se comporta inversamente ao desvio-padrão da precipitação.

Tabela 1. Parâmetros estatísticos da entropia e da precipitação com base em totais diários e anuais de precipitação em Recife, para o período 1962 - 2015. Fonte: Medeiros (2018).

Parâmetros estatísticos	Entropia diária		Precipitação anual	
	bits		mm	
Média	7,02		6,2	2.204,8
Desvio-padrão	0,84		0,069	509,1
Percentual da média	55,3		0,016	55,3

Kagan et al. (1973) mostraram que, quando a entropia de uma variável aleatória é maximizada, sob a restrição de que a variância e a média são conhecidas para uma série de valores da variável, a função densidade de probabilidade para essa série reduz-se a uma distribuição normal. Isso implicitamente significa que o uso da variância é limitado para o caso da distribuição ser a normal.

A Figura 6 exibe o desvio-padrão da entropia diária, com valores reduzidos, com

exceção do período 1984-1988, e os anos de 1964, 1994 e 2008, os quais apresentaram valor do desvio padrão oscilando entre 0,27 e 0,27 bits. Os anos de 1993, 2000 e 2012 registram as maiores oscilações da entropia anual, com flutuações entre 0,36 e 0,37 bits. Portanto, a entropia aproxima-se do seu valor mínimo à medida que houver menos uniformidade de sua distribuição, isto é, quando os dados da série apresentarem variabilidade temporal.

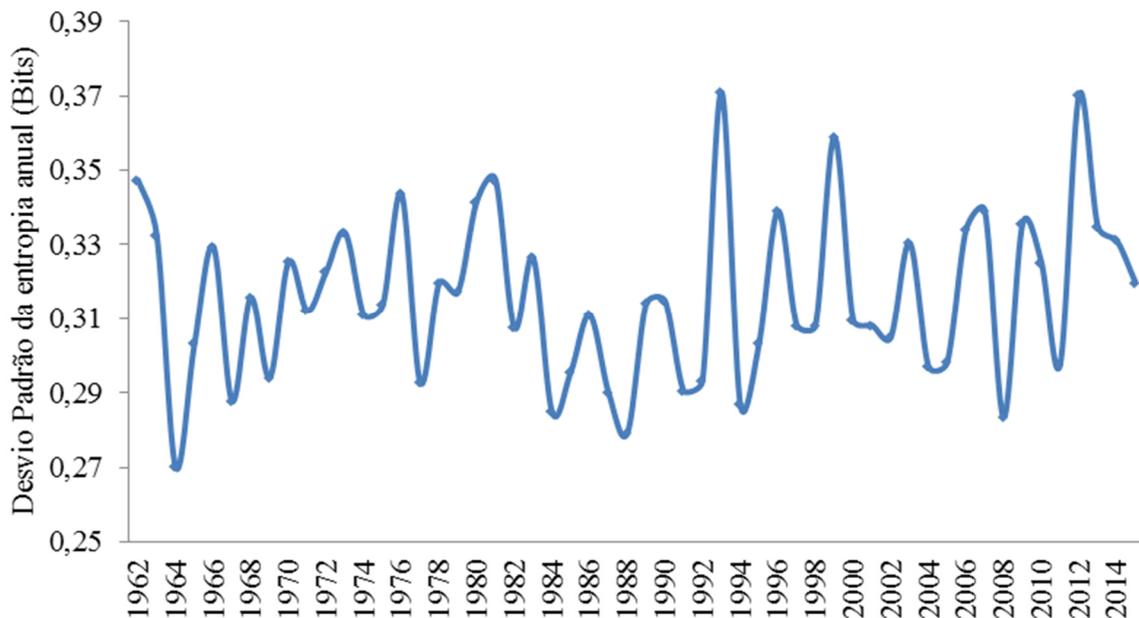


Figura 6. Desvio-padrão da entropia diária para Recife-PE (1962-2015). Fonte: Medeiros (2018).

A Figura 7 mostra a correlação entre o desvio padrão da entropia diária e o desvio padrão da entropia anual. Destaca-se um relacionamento positivo entre os valores diários e anuais de entropia. O coeficiente de determinação entre esses desvios foi de 93% e a curva foi ajustada a uma função linear.

De acordo com Silva (2014), séries temporais com baixa entropia indicam baixa variabilidade e a possibilidade de aplicação de técnicas computacionais para a previsão dos mesmos; enquanto séries com entropia elevada possuem dados com distribuição irregular e séries constantes possuem entropia nula.

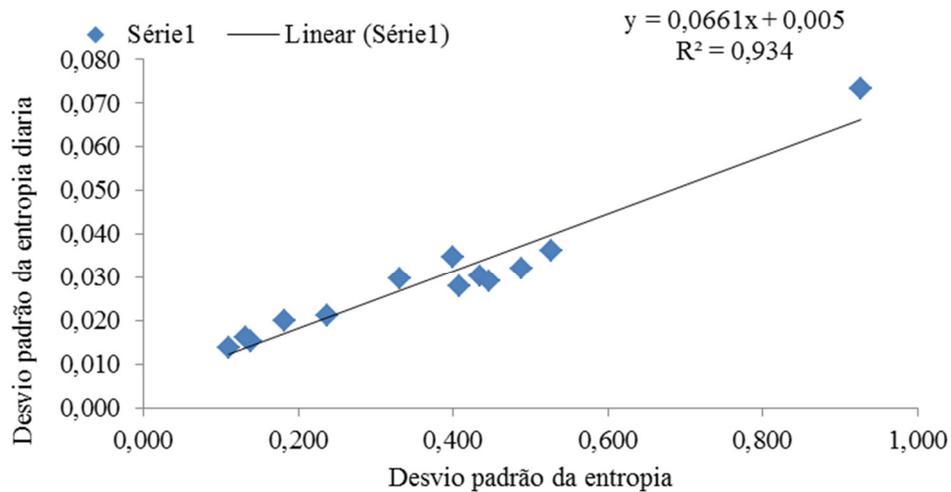


Figura 7. Correlação entre valores diários e anuais de entropia em Recife-PE (1962-2015). Fonte: Medeiros (2018).

Bussab et al. (1990) afirmam que o critério utilizado para detectar homogeneidade dentro do grupo e heterogeneidade entre os grupos é o da soma dos quadrados residual baseado na Análise de Variância da entropia. Assim, quanto menor for esse valor, mais homogêneos serão os elementos dentro de cada grupo e melhor será a partição.

A interrelação do coeficiente de variações diárias e anuais de entropia é mostrada na Figura 8.

Observa-se uma correlação crescente e variância explicada próxima aos 98%, sendo a curva ajustada a uma função linear.

Os resultados mostram que a entropia diária, associada à ocorrência de chuva nesse curto período, não apresenta um mesmo padrão que o observado em escala anual.

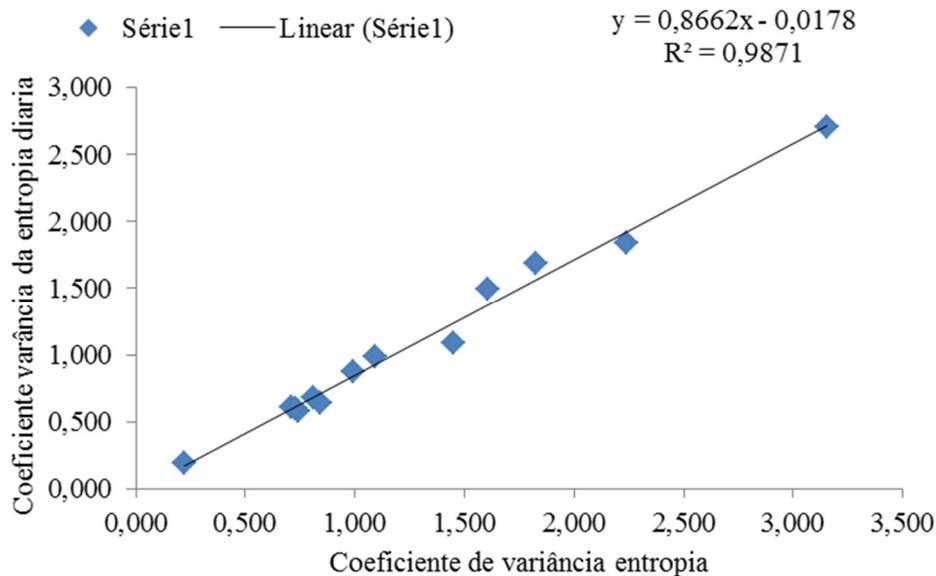


Figura 8. Relacionamento entre variância explicada diária e anual da entropia da precipitação em Recife-PE (1962-2015). Fonte: Medeiros (2018).

A correlação entre valores anuais de precipitação e entropia anual é mostrada na Figura 9. A análise da figura exhibe o padrão de relacionamento entre essas variáveis ajustadas a uma função exponencial. É possível observar que, em escala anual, a entropia se apresenta como uma

medida de confiabilidade da probabilidade de incidência (ou não) de precipitação, explicando 61,7% da série.

Esses resultados conferem com aqueles obtidos por Belo Filho (2010), quando encontrou CV da precipitação anual em localidades do Estado

do Ceará variando entre 28,8 e 41%. Ressalta-se, entretanto, que a variabilidade intra-anual da precipitação é mais elevada que a anual, conforme

resultados obtidos por Silva et al. (2011), com valores de CV variando de 84 a 243% para o Estado da Paraíba.

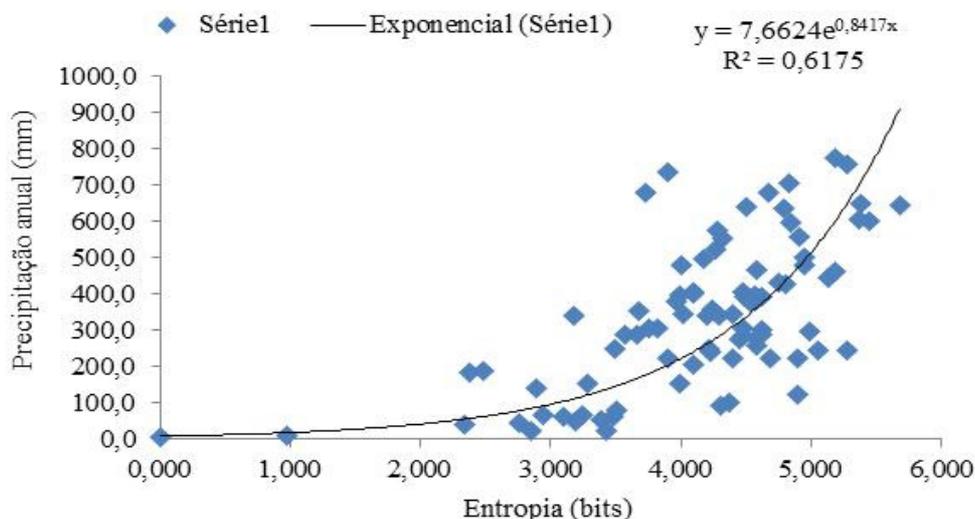


Figura 9. Relacionamento entre entropia anual e precipitação anual em Recife-PE (1962-2015). Fonte: Medeiros (2018).

Conclusão

Na Grande Metrópole Recife, os períodos de La Niña(o) não causam influência nos seus índices de precipitação.

O desvio-padrão da entropia anual varia uniformemente com os valores de entropia, mostrando uma pequena oscilação de seus dados em torno dos valores médios.

A técnica da entropia se constitui em ferramenta apropriada para expressar a variabilidade de dados em torno da média, em comparação com a técnica convencional do desvio-padrão.

Referências

ALBUQUERQUE, M. P. D.; ESQUEF, I. A. 2008. Image Segmentation using nonextensive relative entropy, pp. 477–483. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4839118> xi, 5, 21.

ALLEGRI, P.; GUINTOLLI, M.; GRIGOLLINI, P.; WEST, B.J. 2003. From knowledge, knowability and the search for objective randomness to a new vision of complexity. arXiv:cond-mat/0310646 v.1.

ALMEIDA, H. A. 2001. Probabilidade de ocorrência de chuva no Sudeste da Bahia. Ilhéus, CEPLAC/CEPEC. Boletim Técnico n. 182, 32p.

AL-ZAHRANI, M.; HUSAIN, T. 1998. An algorithm for designing a precipitation network in

the south-western region of Saudi Arabia. *Journal of Hydrology*, v. 205, n. 3/4, p. 205-216.

ALVIM, C. F. (1996). *Brasil: o crescimento possível*. Editora Bertrand. p.212.

ARAÚJO, J. M. F. R. 2017. Inteligência artificial e árvore de decisão utilizando-se da entropia. Departamento de Sistema e Informativa. Universidade Federal de Campina Grande. 18p.

ASSIS, J. M. O.; SILVA, R. F.; SOUSA, W. S.; IRMÃO, R. A.; CORREIA, A. M. 2013. Tendências Climáticas Observadas no Período Chuvoso no Sertão de Pernambuco. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 6, n. 2, p. 211-222.

ATKINS, P.; PAULA, J. 2014. *Físico-química*. trad. Edilson Clemente da Silva... [et al.]. 9ª. ed. LTC: Rio de Janeiro. v.1.

AYRES, R. U. 1998. Eco-thermodynamics: economics and the second law. *Ecological Economics*, v. 26, p. 189-209.

BAIS, F. A.; FARMER, J. D. 2005. The physics information theory on in the light of thermodynamics, statistical mechanics and nonlinear dynamics.

BANDT, C.; POMPE, B. 2002. Permutation entropy: a natural complexity measure for time

- series. *Physical Review Letters*, APS, v. 88, n. 17, p. 174102-1-174102-4.
- BARIVIERA, A. F. 2015. Permutation entropy in information theory tour through different interest rate maturities: the libor case. *Phil. Trans. R. Soc. A*, v. 373, 20150119.
- BELO FILHO, A. F. 2010. A teoria da entropia aplicada no estudo da precipitação pluvial e da vazão fluvial no nordeste do Brasil. 53f. (Tese de Doutorado). Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.
- BUSSAB, W. O.; MIAZAK, E. S.; ANDRADE, D. F. 1990. Introdução à análise de agrupamentos. *Simpósio Brasileiro de Probabilidade e Estatística*, IME-USP, São Paulo, 105p.
- CASTELLAN, G. W. 2014. Fundamentos de físico-química. Rio de Janeiro: LTC.
- CAVALCANTI, I. F. A. 2012. Large scale and synoptic features associated with extreme precipitation over South America: A review and case studies for the first decade of the 21st century. *Atmospheric Research*, v. 118, p. 27-40.
- CHAPMAN, T. G. 1986. Entropy as a measure of hydrologic data uncertainty a model performance. *Journal Hydrology*, v. 85, p. 111-126.
- CLAUSIUS, R. E. 1896. Ueber Verschiedene für die anwendung bequemere formen der hauptgleichungen der mechanischen wärmetheorie. *Annalen der physik und Chemie*, v. 125, p. 353.
- CONSOLINI, G.; MICHELIS, P. 2014. Permutation entropy analysis of complex magnetospheric dynamics. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 115, p. 25-31.
- DRAGOMIR, S. S.; SCHOLZ, M. L.; SUNDE, J. 2000. Some upper bounds for relative entropy an application. *An International Journal Computers and Mathematics with Applications*, v. 39, p. 9-100.
- FAN, J. 2013. Detecting abrupt change of stream flow at Lintong station of Wei river. *Mathematical Problems in Engineering*, Hindawi Publishing Corporation, v. 2013, 9p.
- FERLAZZO, E. 2014. Permutation entropy of scalp EEG: A tool to investigate epilepsies: Suggestions from absence epilepsies. *Clinical Neurophysiology*, v. 125, n. 1, p. 13-20.
- FERREIRA, D. V. S.; SILVA, A. S. A.; STOSIC, T.; MENEZES, R. S. C.; IRMÃO, R. A.; SOUZA, W. S. 2018. Análise da variabilidade espaço temporal da chuva mensal no estado de Pernambuco utilizando o método entropia de permutação. *Rev. Bras. Biom.*, v. 36, n. 2, p. 276-289.
- GLEISER, M. 2016. Universo eterno, vida eterna? Para se adaptar ao aumento de entropia, a vida terá que mudar. *Brasil Escola*. Disponível em: <http://Brasilecola.uol.com.br/fisica/a-lei-hubble-expansão-universo.htm>. Acesso em: 18 de julho de 2016.
- GOLAN, A. 2002. Information and entropy econometrics Editor's View. *Journal of Econometrics*, v. 107, p. 1-15.
- GUEDES, R. V. S.; SOUZA, S. S.; SOUSA, F. A. S. 2010. Uso da entropia e da análise de agrupamento na avaliação da disponibilidade potencial de recursos hídricos do Nordeste do Brasil. *Revista Ambiente & Água*, v. 5, n. 2, p. 175-187.
- HALLAL, M. O. C. 2007. Análise da variabilidade de indicadores climáticos para a precipitação pluvial no Rio Grande do Sul. Pelotas: UFPEL. 122f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.
- HARMANCIOGLU, N. B.; SINGH, V. P. 1998. Entropy in environmental and water resources. In: HERSCHY, R. W.; FAIRBRIDGE, R. W. (Eds.). *Encyclopedia of Hydrology and Water Resources*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 225-241.
- HARMANCIOGLU, N. B.; SINGH, V. P.; ALPASLAN, N. 1992. Versatile uses of the entropy concept in water resources. In: SINGH, V. P.; FIORENTINO, M. (Eds.). *Entropy and Energy Dissipation in Water Resources*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 91-117.
- HASTENRATH, S. 2012. Exploring the climate problems of Brazil's Nordeste of the entropy: a review. *Climatic Change*, v. 112, n. 2, p. 243-251.
- HEMERY, D.; DEBIE, J.; DELÉAGE, J. 1986. "Les servitudes de la puissance: une histoire de l'énergie" *Flamarion*. 89p.

- HUSAIN, T. 1989. Entropy in hydrologic uncertainty measure and network design. *Water Resources Bulletin*, v. 25, n. 3, p. 527-534.
- INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. 2016. Normal climatológica (1962-2015). Brasília, DF.
- KABERGER, T.; MANSSON, B. 2001. Entropy and economic processes – physics perspectives. *Ecological Economics*, v. 36, p. 65-179.
- KAGAN, A. M.; LINNIK, YU. V.; RAO, C. R. 1973. Characterization problems in mathematical statistics and entropy. New York: Wiley, pp. 408-410.
- KAWACHI, T.; MARUYAMA, T.; SINGH, V. P. 2001. Rainfall entropy delineation of water resources zones in Japan. *Journal of Hydrology*, v. 246, p. 36-44.
- LACERDA, F. F.; NOBRE, P.; SOBRAL, M. C. M.; LOPES, G. M. B.; ASSAD, E. D. 2016. Tendência do Clima do Semiárido Frente as Perspectivas das Mudanças Climáticas Globais; O Caso de Araripina, Pernambuco. *Revista do Departamento de Geografia*, v. 31, p. 132-141.
- LAMBERT, F. L. 2006. A modern view of entropy. *Chemistry*, v. 15, n. 1, p. 13-21.
- LANGE, H.; ROSSO, O. A.; HAUHS, M. Ordinal pattern and statistical complexity analysis of daily stream flow time series entropy. *The European Physical Journal Special Topics*, v. 222, n. 2, p. 535-552.
- LIMA, B. N. B.; CIOLETTI, L. M.; CUNHA, M. O. T.; BRAGA, G. A. 2004. Entropia: introdução à teoria Matemática da (des)Informação. Minicurso apresentado na II Bienal da SBM, Universidade Federal da Bahia, UFBA, Salvador.
- LIU, L. Z.; QIAN, X. Y.; LUA, H. Y. 2010. Cross-sample entropy of foreign exchange time series. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 389, n. 21, p. 4785-4792.
- MAASOUMI, E.; RACINE, J. 2002. Entropy and predictability of stocks market returns. In: *Journal of Econometrics*, v. 107, p. 291-312.
- MARUYAMA, T.; KAWACHI, M. T.; SINGH, V. P. 2005. Entropy-based assessment and clustering of potential water resources availability. *Journal of Hydrology*, v. 309, n. 1-4, p. 104-113.
- MATTOS, R. S.; VEIGA, A. 2002. Otimização de entropia: Implementação Computacional dos Princípios Maxent e Minxent. *Pesquisa Operacional*, v. 22, n. 1, p. 37-59.
- MEDEIROS, R. M.; SILVA, V. P. R.; GOMES FILHO, M. F. 2015. Aplicação da teoria da entropia no estudo da precipitação pluvial em Teresina-PI. *Revista de Geografia*, v. 32, n. 2, p. 206-218.
- MELO, V. S.; MEDEIROS, R. M. 2016. Entropia da precipitação pluvial no município de Cabaceiras-PB, Brasil. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v. 10, n. 5, p. 952-964.
- MONTAÑO, M. A. J.; EBELING, W.; POHL, T.; RAPP, P. E. 2001. Entropy and complexity of finite sequences as fluctuating quantities. *BioSystems*, v. 64, n. 103, p. 23-32.
- MORAIS, A. A. B.; FÉ, D. C.; OLIVEIRA, F. E. M.; NETO, S. K. 2010. Fenômenos de Transporte, Entropia. Universidade Federal Rural do Semiárido Campus de angicos. 19p.
- MOREIRA, C. V. R.; FERREIRA, O. C.; ANTÔNIO JUNIOR, P. P. M. 2003. Aplicação da Termodinâmica para a Avaliação do Equilíbrio das Redes Fluviais - a Bacia do Rio Santo Antônio. *Economia & Energia*, v. 36, janeiro-fevereiro, 14p. Disponível em: <https://ecen.com/eee36/termodinamc.htm>. Acesso em: 22 nov.
- MOULIN, G. D. 2005. Técnicas de entropia e de geoestatística no dimensionamento de redes pluviométricas. Dissertação (Mestre em Engenharia Ambiental), Universidade Federal do Espírito Santo. 132p.
- NICOLAOU, N.; GEORGIOU, J. 2012. Detection of epileptic electroencephalogram based on permutation entropy and support vector machines. *Expert Systems with Applications*, v. 39, n. 1, p. 202-209.
- NYS, E. D.; ENGLE, N. 2014. Living with the semi-arid and proactive drought management in Northeast Brazil: a new perspective. Washington, DC: World Bank Group. Disponível em: <http://www.worldbank.org/pt/country/brazil/brief/brazil-publications-agua-brasil-series-water>.
- NUSSENZVEIG, M. H. 1981. Curso de Física Básica. v. 2, São Paulo, Edgar Blucher.

- OLEQUES, N.; KALAS, F. A.; FERREIRA, V. L. D.; DIAS, F. L. 2018. Aplicação da análise de Fourier local e da teoria da entropia no estudo do regime de chuvas na região de Bagé-RS. *Revista Mundi Engenharia, Tecnologia e Gestão*, v. 3, n. 2, p. 76-87.
- ORTOLANI, A. A.; CAMARGO, M. B. P. 1987. Influência dos fatores climáticos na produção. *Ecofisiologia da Produção Agrícola*. Piracicaba: Potafos, 249p.
- PASSOS, J. C. 2003. Carnot e a segunda lei da termodinâmica. *Revista de Ensino de Engenharia - ABENGE*, pp. 01-10. Disponível em: http://www.diaadiaeducacao.pr.gov.br/portals/cadernospde/pdebusca/producoes_pde/2014/2014_unicentro_fis_pdp_robson_lima_oliveira.pdf. Acesso em: out/2017.
- PINEDA, J. O. C. 2006. A entropia segundo Claude Shannon: o desenvolvimento do conceito fundamental da teoria da informação. Dissertação apresentada para obtenção do grau de mestre. Pontifícia Universidade Católica, 124p.
- PONTES, J. 2015. Determinism, chaos, self-organization and entropy. *Anais da Academia Brasileira de Ciências Rio de Janeiro*.
- RAJAGOPAL, A. K.; TEITLER, S.; SINGH, V. P. 1987. Some new perspectives on maximum entropy techniques in water resources research. In: SINGH, V. P. (Ed.). *Hydrologic Frequency Modeling*. Dordrecht: D. Reijel Publishing, v. 1, n. 1, p. 247-366.
- REIS, M. C.; BASSI, A. B. M. 2012. A segunda lei da termodinâmica e a entropia. *Quim. Nova*, v. 35, n. 5, p. 1057-1061.
- RIEDL, M.; MULLER, A.; WESSEL, N. 2013. Practical considerations of permutation entropy. *The European Physical Journal Special Topics*, v. 222, n. 2, p. 249-262.
- RICOTTA, C. 2001. Bridging the gap between ecological diversity indices and measures of biodiversity with Shannon's entropy: comment to Izák and Papp. *Ecological Modeling*, n. 46, p. 1-3.
- RODRIGUEZ, R. D. G.; SINGH, V. P.; PRUSKI, F. F.; CALEGARIO, A. T. 2015. Using entropy theory to improve the definition of homogeneous regions in the semi-arid region of Brazil. *Hydrological Sciences Journal*, v. 7, p. 2096-2109.
- ROSSO, O. 2013. Characterization of chaotic maps using the permutation bandt-pompe probability distribution. *The European Physical Journal B*, v. 86, n. 4, p. 1-13.
- SACO, P. M.; CARPI, L. C.; FIGLIOLA, A.; SERRANO, E.; ROSSO, O. A. 2010. Entropy analysis of the dynamics of El Niño/Southern Oscillation during the Holocene. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 189, n. 1, p. 5022-5027.
- SERINALDI, F.; ZUNINO, L.; ROSSO, O. A. 2014. Complexity {entropy analysis of daily stream ow time series in the continental United States. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, v. 28, n. 7, p. 1685-1708,
- SHANNON, C. E. 1948. A Mathematical Theory of Communication, entropy. *Bell System Technical Journal*, v. 27, p. 379-423.
- SHANNON, C. E. 1948. The mathematical theory of communications. I and II *Bell System Tech. Journal, Computers*.
- SHANNON, C. E. 1949. Communication theory of secrecy systems. *Bell System Technical Journal*, v. 28-4, p. 656-715.
- SHANNON, E. D. E. E.; RODRIGUES, L. L. C. A. D.; FRANÇA, V. O.; RODA, A. 1921. Classificação de imagens baseada na entropia de Shannon. pp. 26-29.
- SILVA, V. P. R. 2004. Entropy on climate variability in Northeast of Brazil. *Journal of Arid Environments*, v. 58, n. 4, p. 575-596.
- SILVA, V. P. R.; CAVALCANTI, E. P.; NASCIMENTO, M. G.; CAMPOS, J. H. P. 2003. Use of entropy theory in analysis of rainfall and air temperature. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.7, n. 2, p. 269-274.
- SILVA, V. P. R.; PEREIRA, E. R. R.; AZEVEDO, P. V.; SOUSA, F. A. S.; SOUSA, I. F. 2011. Análise da pluviometria e dias chuvosos e suas entropias na região Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, n. 2, p. 131-138.
- SILVA, V. P. R.; CAVALCANTI, E. P.; NASCIMENTO, M. G.; CAMPOS, J. H. B. C. 2003. Análises da precipitação pluvial no Estado da Paraíba com base na teoria da entropia. *Revista*

- Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 7, n. 2, p. 269-274.
- SILVA, J. R. S. 2014. Avaliação de autocorrelações e complexidade de Séries temporais climáticas no Brasil. Tese (Doutorado em Biometria e Estatística Aplicada), Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife. 114p.
- SKAMAROCK, W. C.; KLEMP, J. B.; DUDHIA, J.; GILL, D. O.; BARKER, D. M.; WANG, W.; POWERS, J. G. 2005. A description of the advanced research WRF version 2 (No. NCAR/TN-468+ STR). National Center For Atmospheric Research Boulder Co Mesoscale and Microscale Meteorology Div..
- SINGH, V. P. 1997. The use of entropy in hydrology and water resources. Hydrological Processes, v. 11, n. 1, p. 587-626.
- SINGH, V. P.; RAJAGOPAL, A. K. 1987. Some recent advances in application of the principle of maximum entropy (POME) in hydrology. IAHS, v. 194, p. 353-364.
- SONUGA, J. O. 1976. Entropy principle applied to the rainfall-runoff process. Journal of Hydrology, v. 30, n. 1, p. 81-94.
- SOUSA, E. P.; SILVA, V. P. R.; CAMPOS, J. H. B. C.; OLIVEIRA, S. D. 2012. A Teoria da Entropia na Análise da Precipitação no Estado da Paraíba. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 5, n. 2, p. 386-399.
- SOUSA, R. F.; MOTTA, J. D.; GONZAGA, E. N.; FERNANDES, M. F.; SANTOS, M. J. 2013. Aptidão agrícola do Assentamento Venâncio Tomé de Araújo para a Cultura do Sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench). Revista de Biologia e Ciências da Terra, v. 3, n. 2, p. 55-75.
- SOUZA, R.; FENG, X.; ANTONINO, A.; MONTENEGRO, S.; SOUZA, E.; PORPORATO, A. 2016. Vegetation response to rainfall seasonality and interannual variability in tropical dry forests. Hydrological Processes, v. 30, n. 20, p. 3583-3595.
- SOUSA, E. P.; SILVA, V. P. R. 2010. A Teoria da Entropia na precipitação no Estado da Paraíba. Revista de Geografia, v. 3, n. 3, p. 366-376.
- SUDENE. 1990. Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. Dados pluviométricos mensais do Nordeste – Série pluviometria 5. Estado da Paraíba. Recife.
- TUNDISI, J. G. 2003. Recursos Hídricos. Multiciência: Revista Interdisciplinar dos Centros e Núcleos da Unicamp. Instituto Internacional de Ecologia, São Carlos. Disponível em: <http://www.multiciencia.unicamp.br>. Acesso em: 05 mar.
- VERDÚ, S.; MCLAUGHLIN, S. 1999. (Orgs.). Information Theory in entropy principle– 50 Years of Discovery. Nova Iorque, Willey - IEEE Computer Society.
- VIANA, P. C. 2010. Estimativa e espacialização das temperaturas do ar mínimas, médias e máximas com base em um modelo digital de elevação para o Estado do Ceará. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Graduação em Tecnologia em Irrigação e Drenagem, Instituto Federal de Educação e Ciência Tecnologia, Campus Iguatu-CE.
- ZDENKOVIC, L. M.; SCHEIDEGGER, E. A. 1989. Entropy of Landscapes. Zeitschrift Fur Geomorphologie, N. F., v. 33, n. 3, p. 361-371.
- ZAMORANO, R. O.; GIBBS, H. M.; MAIO, L. E.; VIAU, J. E. 2016. Evaluación de um modelo didáctico analógico para El Aprendizaje de energia interna e temperatura. Revista Eureka sobre Enseñaza e Divulgacion das Las Ciências. pp. 57-67.
- YAN, R.; LIU, Y.; GAO, R. X. 2012. Permutation entropy: a nonlinear statistical measure for status characterization of rotary machines. Mechanical Systems and Signal Processing, v. 29, p. 474-484.
- WONG, A. K. C.; SAHOO, P. 1989. A gray-level threshold selection method based on maximum entropy principle, Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, v. 19, n. 4, p. 866-871.