



O clima no Domínio Semiárido da Caatinga nordestina brasileira

Riclaudio da Silva Santos¹ - Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-5219-8002>

Daniel Rodrigues de Lira² - Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-9559-2480>

Lucas Costa de Souza Cavalcanti³ - Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-9096-138X>

Josefa Eliane Santana de Siqueira Pinto⁴ - Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1072-1974>

¹ Secretaria de Educação e Esportes de Pernambuco, Recife, PE, Brasil*

² Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil**

³ Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil***

⁴ Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, Brasil****

Artigo recebido em 23/11/2024 e aceito em 15/05/2025

RESUMO

O Semiárido Brasileiro é uma região que estabelece forte ligação com os fatores climáticos, desde o seu processo de ocupação e ainda nas atividades antrópicas desenvolvidas hodiernamente. A distribuição das chuvas é de grande importância para a vida do sujeito sertanejo até os dias atuais. Neste sentido, o presente artigo tem como propósito apresentar um constructo dos sistemas atmosféricos atuantes no Domínio Semiárido da Caatinga (DSC), demonstrando suas particularidades no espaço e no tempo, dentro de um contexto regional de semiaridez. Esses sistemas são apresentados em diferentes escalas de atuação, desde os sistemas de macroescala (escala sinótica), passando pelos de mesoescala, alcançando a microescala e as diferenciações na paisagem. Destacando ainda a configuração temporal da pluviosidade e sua variabilidade intra-anual e interanual. O objetivo derradeiro é reconhecer as particularidades e variações internas do clima semiárido presente na área de estudo.

Palavras-chave: domínio semiárido brasileiro; sistemas atmosféricos; precipitações pluviais; caatinga nordestina brasileira.

The climate in the Semi-arid Domain of the brazilian northeastern Caatinga

ABSTRACT

The Brazilian semi-arid is a region that has a strong connection with climatic factors, from the time it was first occupied to the anthropogenic activities carried out today. The distribution of rainfall is of great importance to the life of the sertanejo to this day. With this in mind, the purpose of this article is to present a construct of the atmospheric

* Doutor em Geografia, Professor da Rede estadual de Ensino de Pernambuco - SEEP. E-mail: riclaudio.silva@gmail.com

** Doutor em Geografia, Professor do Programa de Pós-graduação em Geografia - UFPE. E-mail: daniel.rlira@ufpe.br

*** Doutor em Geografia, Professor do Programa de Pós-graduação em Geografia - UFPE. E-mail: lucas.cavalcanti@ufpe.br

**** Doutora em Geografia e Professora do Programa de Pós-graduação em Geografia - UFS. E-mail: j.eliane@academico.ufs.br



systems operating in the Semi-Arid Domain of the Caatinga (DSC), demonstrating their particularities in space and time, within a regional context of semi-aridity. These systems are presented at different scales of action, from macro-scale systems (synoptic scale) to mesoscale systems, reaching the micro-scale and differentiations in the landscape. It also highlights the temporal configuration of rainfall and its intra-annual and inter-annual variability. The ultimate goal is to recognize the particularities and internal variations of the semi-arid climate present in the study area.

Keywords: brazilian semiarid domain; atmospheric systems; rainfall; brazilian northeastern caatinga.

El clima en el Dominio Semiárido de la Caatinga nororiental brasileña

RÉSUMÉ

El semiárido brasileño es una región que tiene una fuerte conexión con los factores climáticos, desde la época de su ocupación hasta las actividades antropogénicas desarrolladas en la actualidad. La distribución de las precipitaciones es de gran importancia para la vida del pueblo sertanejo hasta nuestros días. Con esto en mente, el objetivo de este artículo es presentar una construcción de los sistemas atmosféricos que operan en el Dominio Semiárido de la Caatinga (DSC), demostrando sus particularidades en el espacio y en el tiempo, dentro de un contexto regional de semiáridéz. Estos sistemas se presentan en diferentes escalas de acción, desde los sistemas de macroescala (escala sinóptica) a los sistemas de mesoescala, llegando a la microescala y a las diferenciaciones en el paisaje. También se hace hincapié en la configuración temporal de las precipitaciones y su variabilidad intraanual e interanual. El objetivo final es reconocer las particularidades y variaciones internas del clima semiárido presente en la zona de estudio.

Palabras clave: dominio semiárido brasileño; sistemas stmosféricos; precipitaciones; caatinga nordeste brasileña.

INTRODUÇÃO

A Caatinga configura-se enquanto uma vegetação com grande variabilidade sazonal, onde a dinâmica da vegetação da região Nordeste está relacionada à variabilidade dos fenômenos meteorológicos que atuam na região Nordeste do Brasil (Braga et al., 2003). Neste sentido, o espaço de análise abrange o Domínio Semiárido da Caatinga Nordestina Brasileira, relacionando o clima semiárido com a fitofisionomia da Caatinga

O presente artigo tem por objetivo dar continuidade as questões discutidas em Santos (2024), destacando a configuração espacial e temporal do clima no Domínio Semiárido da Caatinga (DSC), organizando e ampliando informações a respeito do clima na região semiárida do Nordeste do Brasil.

A singularidade dos sertões no Nordeste Brasileiro está concentrada em um conjunto compacto de características: climático, hidrológico e ecológico. Esses fatores se manifestam em uma área geográfica de 720 mil quilômetros quadrados, que abriga aproximadamente 28 milhões de pessoas. Na prática, as características do Nordeste seco são centradas no clima semiárido da região, que é muito quente e apresenta secas sazonais,

influenciando de forma significativa o ambiente das águas, o ecossistema das caatingas e as condições socioeconômicas dos habitantes dos sertões (Ab'Sáber, 2003).

Os diversos sistemas atmosféricos que atuam na região supracitada já foram, e continuam sendo investigados por cientistas de diversas áreas, desde a Meteorologia, a Climatologia, a Geografia, entre outros campos das ciências da terra (Cavalcanti, 1982; Pinto, 1999; Barry e Chorley, 2009; Ahrens, 2015; Moraes e Gan, 2016; Monteiro, 2022). Entretanto, a complexidade do tema demanda constante atualização, a partir das novas informações que surgem com o avanço da tecnologia e metodologias de pesquisa, assim como novas formas de sistematizar e organizar o conhecimento previamente produzido.

A ausência de estratégias eficazes para conhecer e se adaptar às mudanças climáticas pode levar ao surgimento de problemas graves e irreparáveis, que seriam muito mais difíceis de resolver no futuro. A inação diante desses desafios não só intensifica os impactos negativos, mas também compromete a capacidade de mitigar e se preparar para os eventos adversos. Além disso, a ideia de combate a seca, que além de ineficaz, promove estruturas de dominação locais, deve ser superada, buscando um entendimento mais completo do clima e suas dinâmicas naturais, visando uma relação homem-meio adequada (Dos Santos et al., 2023).

Os avanços científicos, de cunho teórico e metodológico permitem análises dos fenômenos climáticos cada vez mais complexos. Sendo um desafio transformar essa complexidade em algo simples por meio de um processo de redutibilidade. O fenômeno climático, mesmo apresentando grande número de desordens é, em macro-escala, um sistema organizado. Entendendo que desordem não é antagônico do significado de ordem (Barbosa, 2022).

É importante ressaltar que os modelos teóricos apresentados sobre os sistemas atmosféricos são elaborados com o objetivo de facilitar o entendimento desses mecanismos, principalmente com sentido didático/educacional, entretanto, a atmosfera real é complexa. A superfície da Terra formada por oceanos, continentes, e diferenças de temperatura, gera particularidades na distribuição dos ventos. Além disso, a variação sazonal da temperatura fortalece ou enfraquece a potência desses sistemas.

Os agentes atmosféricos que sistematizam as chuvas no Domínio Semiárido da Caatinga (DSC) se organizam em mecanismos com complexos arranjos espaço-temporais. A atuação desses sistemas no semiárido gera determinado condicionamento no desenvolvimento da vegetação, na produção agrícola, e

consequentemente, na dinâmica das paisagens. A variabilidade das chuvas se dá em distintas distribuições espaciais (ao longo do espaço, em diversas escalas), assim como temporais (ao longo do tempo, com variabilidade intra-anual e interanual).

Fica evidenciado então que mesmo se tratando de uma região semiárida, a mesma apresenta particularidades climáticas internas. E tratar das questões que envolvem o clima do Semiárido Brasileiro somente pela sua característica de semiaridez, não responde as demandas reais para o desenvolvimento desta região.

Desta forma, é necessário enriquecer o conhecimento acadêmico sobre o clima semiárido, assim como fornecer subsídios valiosos para a gestão sustentável dos recursos naturais, aspectos cruciais para a adaptação e resiliência das comunidades locais, que possuem características climáticas particulares, frente aos desafios ambientais do futuro.

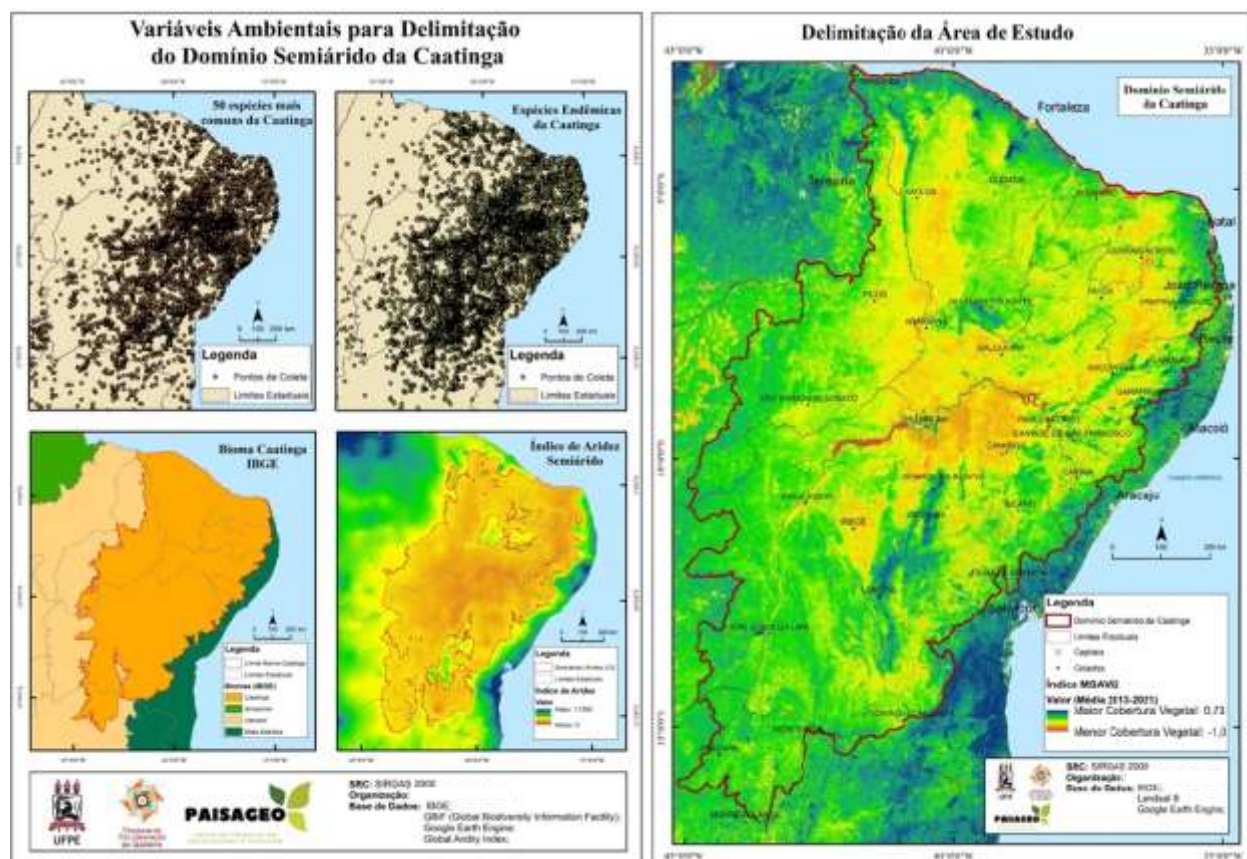
ÁREA DE ESTUDO

Para chegar na delimitação da área de estudo foram levadas em consideração 4 (quatro) informações ambientais. A primeira é a delimitação do Bioma Caatinga feita pelo IBGE (2019). A segunda é o limite do índice de aridez definido para ambientes semiáridos (0,5) do Global Aridity Index (Global-AI). A terceira são as informações a respeito da coleta de espécies de plantas da caatinga disponíveis no Global Biodiversity Information Facility (GBIF). E a quarta são os dados fornecidos pelo índice MSAVI2 (Modified Soil-adjusted Vegetation Index 2 – Índice de Vegetação Ajustado ao Solo Modificado 2), elaborados para a região em questão. Os detalhes metodológicos para delimitação do DSC podem ser observados em Santos (2024).

A partir desse conjunto de informações apresentadas têm-se o Domínio Semiárido da Caatinga (Figura 1), levando em consideração os limites reais das variáveis ambientais. Essa proposta leva em consideração diretamente as 4 informações citadas, e indiretamente contém um vasto conjunto de variáveis ambientais que foram utilizadas pelo IBGE para construir o limite do Bioma Caatinga, que, por sua vez, leva em consideração informações climáticas, litológicas, geomorfológicas, e pedológicas, assim como os dados do Índice de Aridez Global, formados por um amplo conjunto de variáveis climáticas.

Essa delimitação permite então englobar o conjunto das paisagens que compõem os ambientes do Nordeste do Brasil relacionando o clima semiárido com a fitofisionomia da Caatinga.

Figura 1 - Informações utilizadas para delimitação e localização da área de estudo, o Domínio Semiárido da Caatinga.



Fonte: Adaptado de Santos (2024).

DIFERENTES ESCALAS DE ATUAÇÃO DOS SISTEMAS ATMOSFÉRICOS NO DOMÍNIO SEMIÁRIDO DA CAATINGA

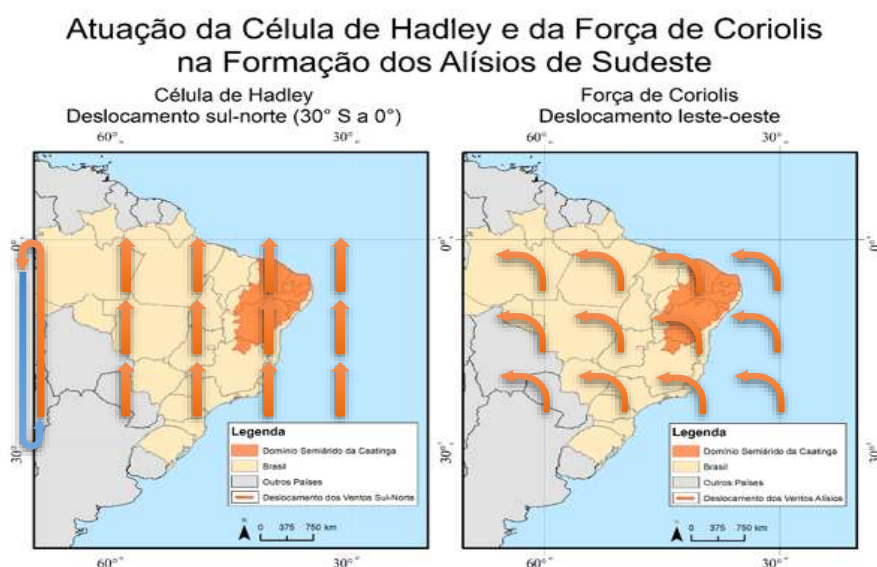
Os agentes atmosféricos que sistematizam as chuvas no Domínio Semiárido da Caatinga (DSC) se organizam em mecanismos com complexos arranjos espaço-temporais. A atuação desses sistemas no semiárido gera determinado condicionamento no desenvolvimento da vegetação, e consequentemente, na dinâmica das paisagens e das atividades antrópicas, principalmente agrícolas. A variabilidade das chuvas se dá em distintas escalas, que ocorrem de forma simultânea e interferindo umas nas outras.

Sistemas de Macroescala (escala sinótica)

Entre os sistemas de macroescala (escala sinótica) pode-se destacar a Circulação das células de Hadley e Walker, a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), o El Niño-Oscilação Sul (ENOS), o Dipolo de Temperatura da Superfície do Mar (TSM), os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCANs), e as Frentes Frias (FF).

No caso da região onde está inserido o DSC, a célula de Hadley atua movendo os ventos de superfícies do Trópico de Capricórnio em direção a Linha do Equador, posteriormente esses ventos ascendem, e a partir daí, ao alcançar determinadas altitudes, se resfriam e descem a superfície (subsidência). Esse movimento de sul para norte dos ventos é somado ao efeito de coriolis, gerado a partir do movimento de rotação do planeta. No caso da região tropical do hemisfério sul, onde o DSC está inserido, a deflexão desse movimento de rotação adiciona um movimento de leste a oeste aos ventos, a esses dá-se o nome de alísios de sudeste, também chamados de *trade winds* (Ahrens, 2015). Essa movimentação simplificada pode ser observada na figura a seguir (Figura 2).

Figura 2 – Formação dos Alísios de Sudeste



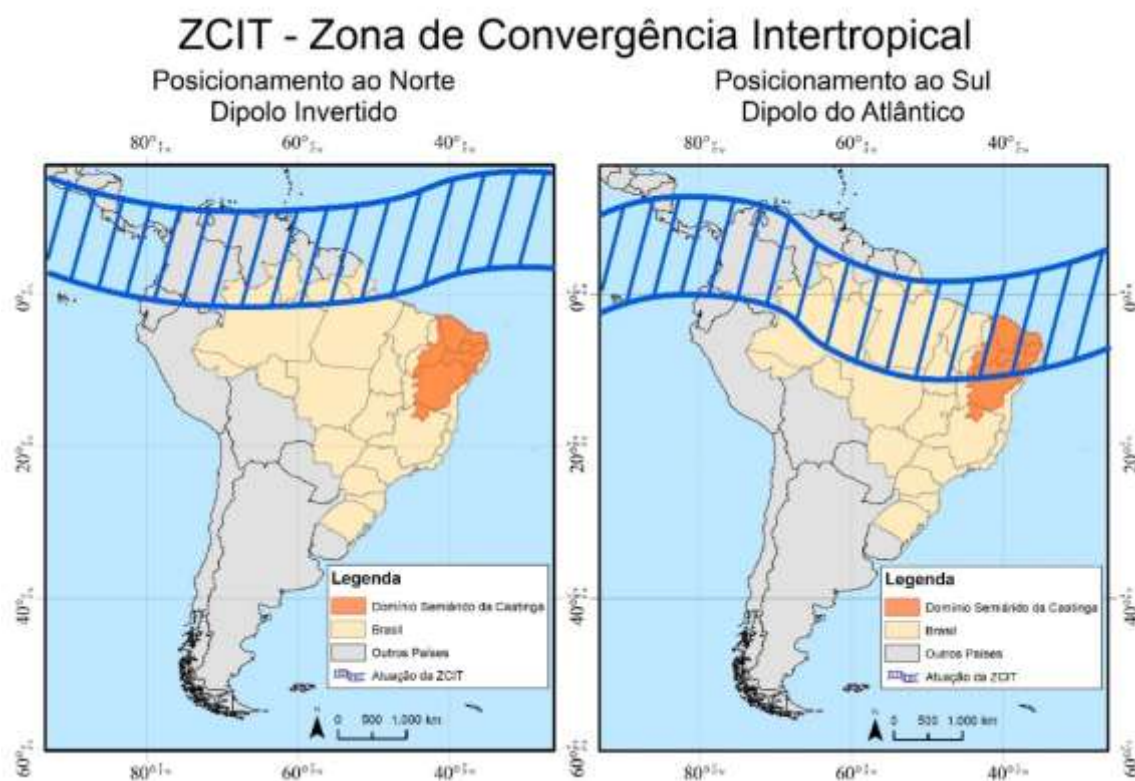
Fonte: Adaptado de Santos (2024).

A convergência dos ventos alísios de sudeste, juntamente com os ventos alísios de nordeste do hemisfério norte, propicia o surgimento de nuvens com grande desenvolvimento vertical, que se prolongam até a alta troposfera. Essa faixa de alta nebulosidade é reconhecida como Zona de Convergência Intertropical (ZCIT). Esse sistema atmosférico tem destaque na faixa equatorial em todo o globo, gerando grandes volumes de chuvas em direção aos trópicos.

No caso específico do Domínio Semiárido da Caatinga a ZCIT está relacionada a importantes regimes de chuvas em sua porção setentrional, concentradas principalmente no período de março a abril. Apesar de predominante ação na porção mais ao norte do SAB, a ZCIT pode alcançar latitudes mais ao sul, levando chuvas até o paralelo 8°S em eventos extremos, e raros, relacionados às variações da Temperatura de Superfície do Mar (TSM).

O Dipolo de TSM abrange a diferença entre as anomalias da bacia norte e bacia sul do Oceano Atlântico. Quando ocorrem anomalias positivas no Atlântico Norte e negativas no Atlântico Sul (Dipolo Invertido), observa-se um deslocamento mais ao norte da ZCIT, e uma condição desfavorável a presença de nuvens, e consequentemente de chuvas, no DSC. No cenário oposto, quando o ocorrem anomalias negativas no Atlântico Norte e positivas no Atlântico Sul (Dipolo do Atlântico), observa-se um deslocamento mais ao sul da ZCIT, com condições favoráveis para o surgimento de nuvens e maior regime de chuvas no DSC (Monteiro, 2022). Esta dinâmica pode ser observada, de maneira simplificada, na Figura 3.

Figura 3 – Área de atuação da ZCIT.



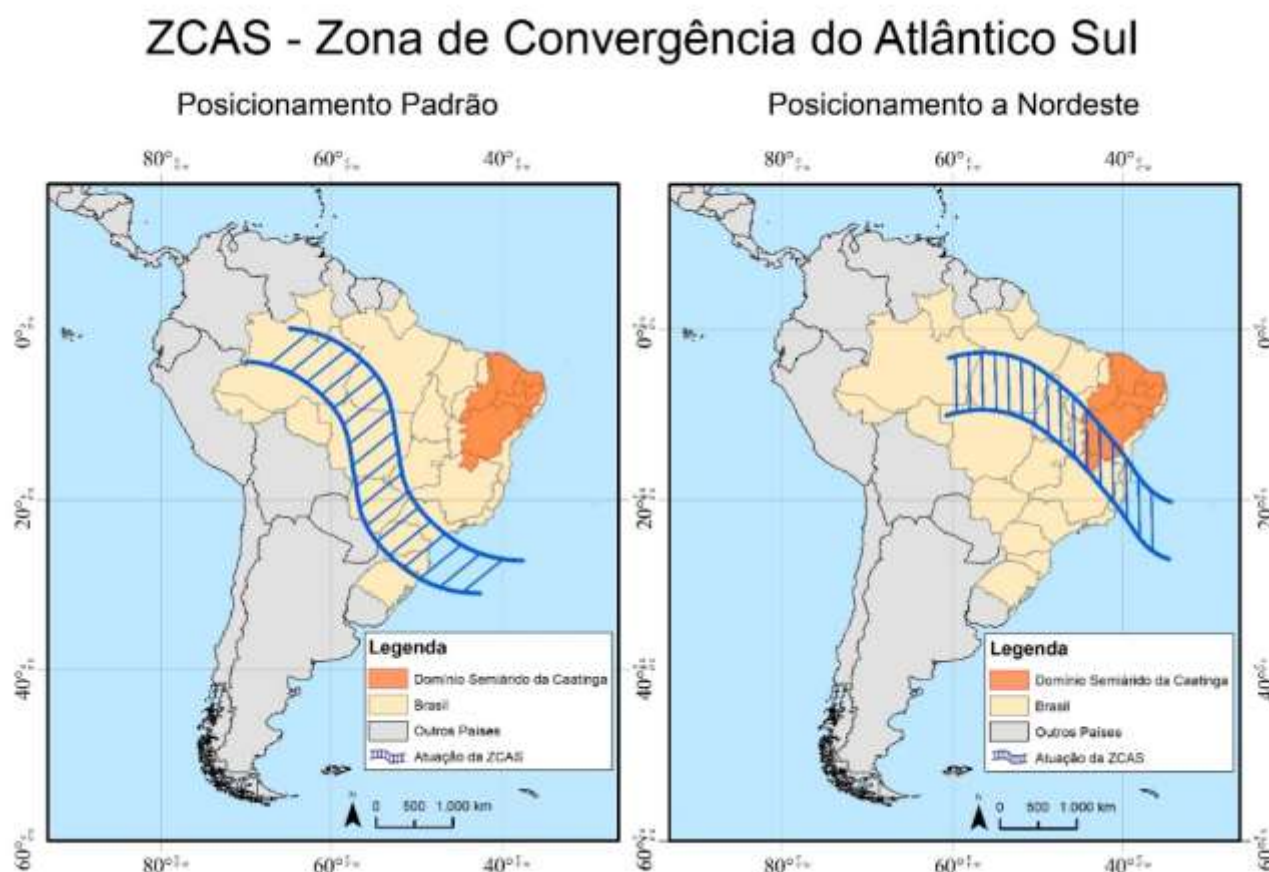
Fonte: Adaptado de Santos (2024).

Enquanto a ZCIT tem maior atuação na porção setentrional do Domínio Semiárido da Caatinga, a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) pode atuar na região centro-meridional deste conjunto de paisagens semiáridas. A ZCAS é uma banda de nebulosidade semiestacionária com orientação noroeste-sudeste que ocorre deste a Amazônia até o Sudeste brasileiro, podendo chegar até o Atlântico Tropical. A formação desse corredor de umidade está relacionada ainda com a presença da Alta da Bolívia (sistema de alta pressão), um cavado entre o Nordeste do Brasil e o Oceano Atlântico (que por vezes pode formar um VCAN), e a presença da Frente Fria no Oceano Atlântico Sul. Esse conjunto de sistemas fornecem a condição ideal para a formação da ZCAS (Monteiro, 2022).

Todavia, esse sistema pode influenciar o Nordeste do Brasil, quando flutuações de maior abrangência espacial permitem o deslocamento para leste da ZCAS, desencadeando chuvas no DSC. Nos ambientes

influenciados por esse sistema, predominam maiores precipitações no mês de dezembro (final da primavera e início do verão). A área de atuação da ZCAS pode ser observada na Figura 4.

Figura 4 – Área de atuação da ZCAS.



Fonte:

Adaptado de Santos (2024).

Outro importante mecanismo que interfere na ocorrência de chuvas para a área em discussão, caracterizado como um fenômeno de escala global, é o El Niño Oscilação Sul (ENOS). A oscilação do ENOS está associada às fases de circulação da Célula de Walker, e a variação da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) sobre o Pacífico Meridional e o Pacífico Ocidental (Barry e Chorley, 2009). O clima da região discutida neste trabalho é fortemente influenciado pela ocorrência dos eventos de El Niño, associado a ocorrência de secas rigorosas. As características básicas do ENOS podem ser observadas na figura a seguir (Figura 5).

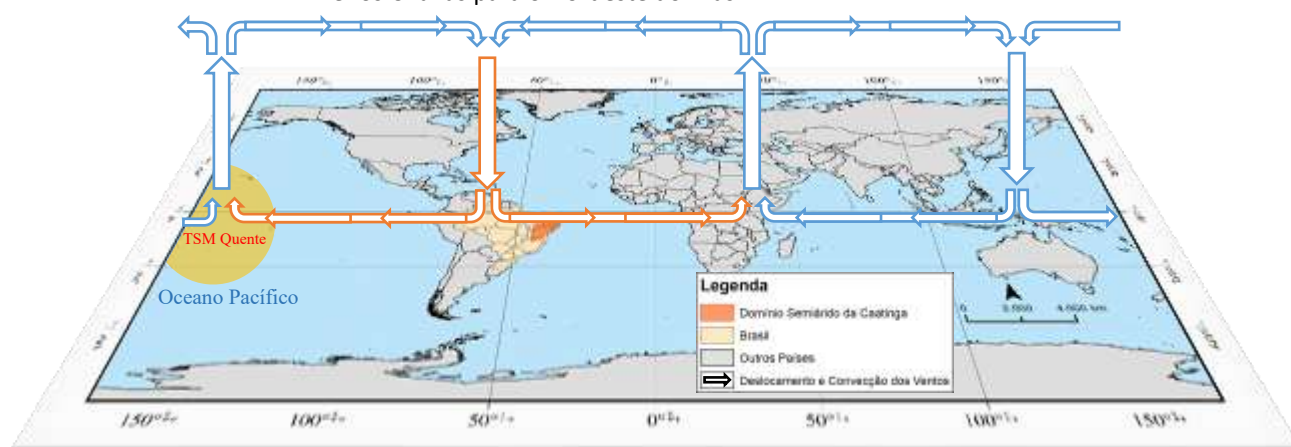
Figura 5 – Características do El Niño Oscilação Sul – ENOS.

El Niño Oscilação Sul - ENOS

Célula de Walker em condições de El Niño e La Niña
e a ocorrências de chuva no Domínio Semiárido da Caatinga

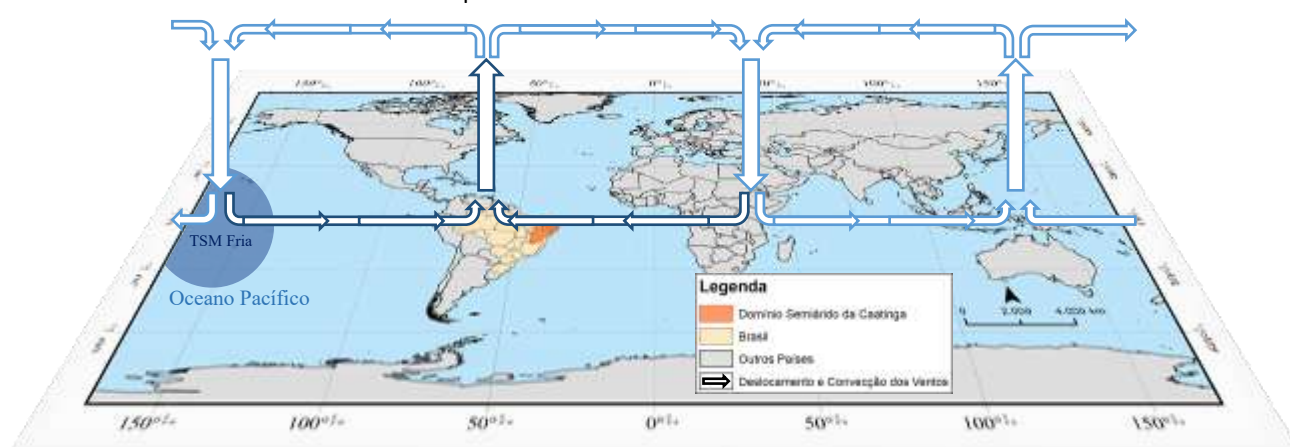
Cenário de El Niño

- TSM Quentes sobre o Pacífico;
- Ramo Descendente da Célula de Walker sobre a porção Setentrional do Brasil;
- Inibe a Atividade Convectiva no Semiárido Brasileiro;
- Menos Chuvas para o Nordeste do Brasil.



Cenário de La Niña

- TSM Frias sobre o Pacífico;
- Ramo Ascendente da Célula de Walker sobre a porção Setentrional do Brasil;
- Favorece a Atividade Convectiva no Semiárido Brasileiro;
- Mais Chuvas para o Nordeste do Brasil.



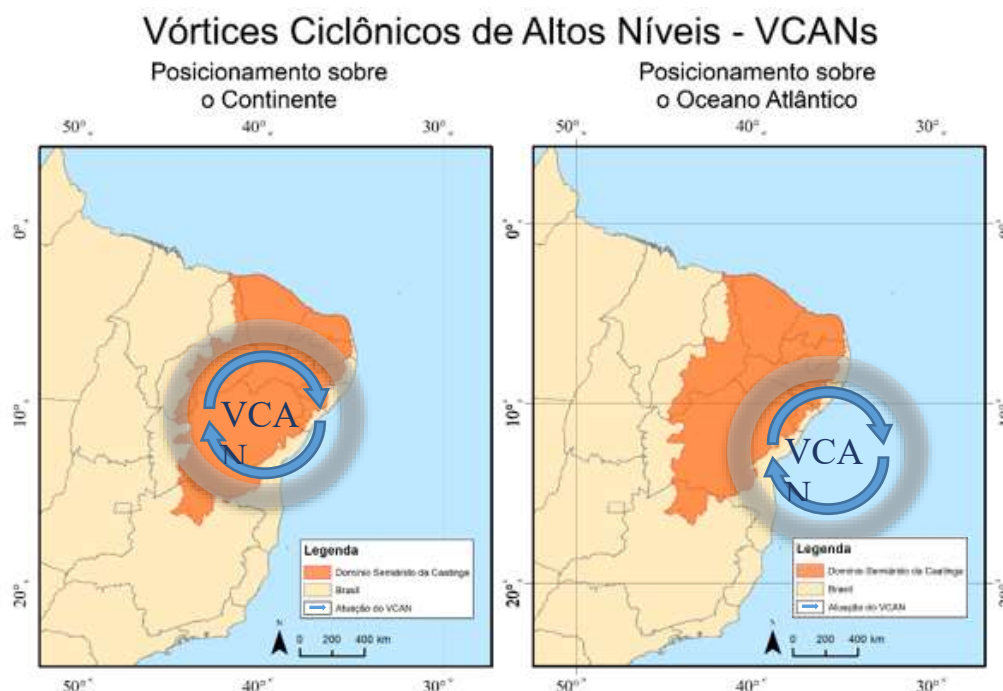
Fonte: Adaptado de Santos (2024).

Como mostrado na figura, o El Niño é um episódio que ocorre quando estão presentes anomalias quentes de TSM no Oceano Pacífico, nesse cenário há uma maior convecção nesta área, gerando um ramo ascendente da Célula de Walker, e um consequente ramo descendente sobre o Brasil setentrional, isso dificulta a convecção e formação de chuvas sobre o Nordeste do Brasil. Inversamente, quando ocorre um resfriamento abaixo da média da TSM da mesma porção do Pacífico, têm-se um ramo ascendente da Célula de Walker na porção setentrional do Brasil, favorecendo a convecção e formação de nuvens no Nordeste brasileiro. Enquanto a ocorrência de El Niño está associada a presença de secas, o cenário oposto de La Niña está associado a uma maior oferta de precipitações.

Outro mecanismo já citado, que também é importante para a formação de nebulosidade do SAB são os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCANs), sistemas quase estacionários caracterizados por uma área com ar descendente, que não permite a formação de nuvens em seu núcleo. Há a dificuldade formação de nuvens no núcleo do VCAN, entretanto, é facilitada em sua borda. Sendo assim, o seu posicionamento em relação ao Domínio Semiárido da Caatinga é o que irá favorecer ou dificultar a ocorrência de chuvas.

O posicionamento do VCAN sobre o DSC dificulta a formação de nuvens nessa região, em contrapartida, quando o centro do mesmo se encontra sobre o Oceano Atlântico e sua borda sobre o continente, as nuvens de chuvas são formadas sobre essa periferia do vórtice. Em alguns casos, o posicionamento continental do VCAN pode favorecer a formação de nuvens em sua periferia em determinadas regiões do DSC, como pode ser observado na figura a seguir (Figura 6).

Figura 6 – Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis.



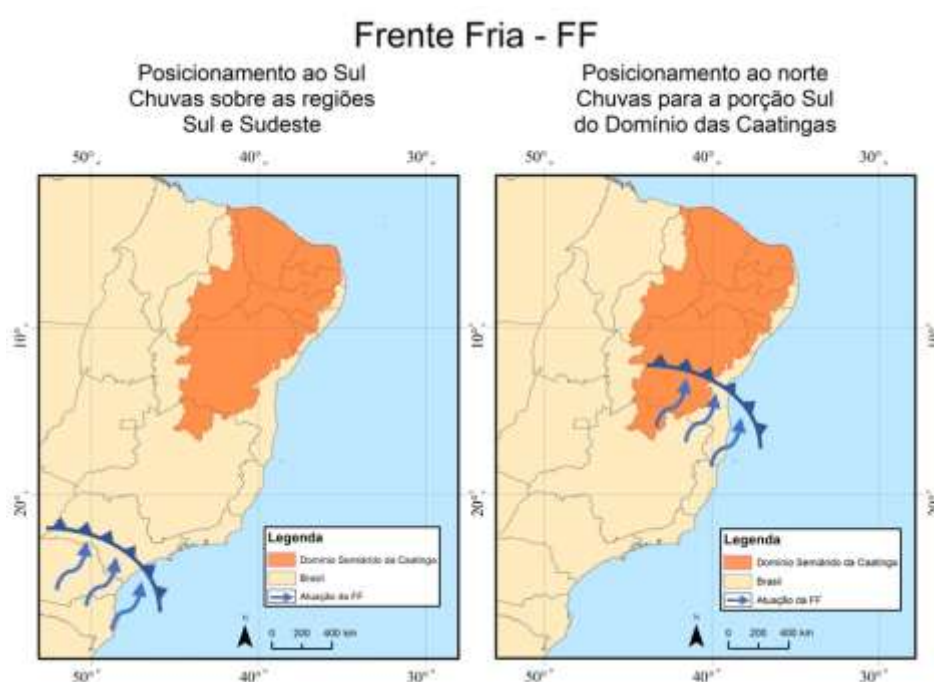
Fonte: Adaptado de Santos (2024).

O verão e a primavera são os períodos de maior ocorrência dos VCANs, principalmente em janeiro. O VCAN pode ainda interagir com outros sistemas, tendo importante papel no deslocamento da ZCAS para o Semiárido Brasileiro, como já citado. Além disso, se relaciona com o avanço da Frente Fria, e a circulação da Alta da Bolívia, a junção desses sistemas permite a intensificação do Cavado em Altos Níveis (CAN) fortalecendo-o e contribuindo para que o mesmo adquira uma circulação fechada, formando o VCAN propriamente dito (Monteiro, 2022).

A maioria dos VCANs sobre o DSC apresentam um ciclo de vida relativamente curto, a maioria dura apenas entre 2 a 4 dias, em alguns casos mais raros podem perdurar por 11 dias. Como já citado, a ocorrência desses vórtices predomina nas estações quentes, são nessas estações que a distância percorrida também é maior, frequentemente percorrendo 2000 km durante seu ciclo, podendo chegar a 6000 km em casos raros (Morais e Gan, 2016).

Outro importante sistema para o Domínio Semiárido da Caatinga são as Frentes Frias (FF), compostas por uma área de confluência entre uma massa de ar frio e uma massa de ar quente. Nesse processo a massa de ar frio faz com que o ar quente e úmido suba, formando nuvens de chuva. Normalmente esse sistema afeta a região sul e sudeste do Brasil, entretanto, o mesmo pode deslocar-se mais ao norte, atingindo a região nordeste, como pode ser observado na figura a seguir (Figura 7). No caso do DSC, esse sistema afeta a sua porção sul, gerando chuvas principalmente durante os meses de novembro a fevereiro.

Figura 7 – Atuação da Frente Fria.



Fonte: Adaptado de Santos (2024).

Sistemas de Mesoescala

Entre aqueles de mesoescala destacam-se os Complexos Convectivos de Mesoescala (CCMs), as Linhas de Instabilidade (LIs), e os Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOLs).

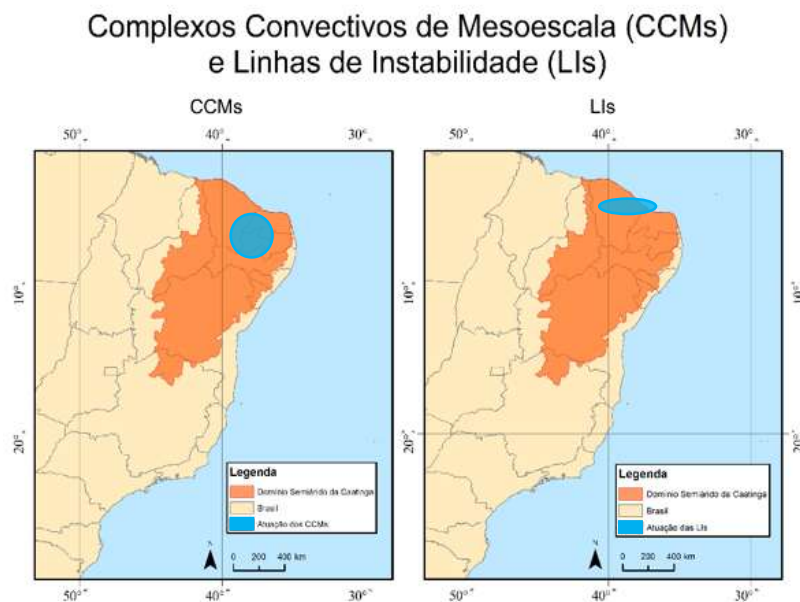
Os Complexos Convectivos de Mesoescala (CCMs) são formados por uma densa camada de nuvens cúmulos nimbos cobertas por cirros. Esses sistemas geralmente causam chuvas intensas e de curta duração, por vezes relacionado a condições locais de relevo elevado, temperatura ou pressão atmosférica. São classificados

a partir da sua extensão em torno de 100.000 km², e sua duração, superior a seis horas. Quando não ocorrem estas condições o sistema pode ser classificado como um Sistema Convectivo de Mesoescala - SCM (Monteiro, 2022).

As Linhas de Instabilidade (LIs), por sua vez, são uma banda de nebulosidade linear com convecção profunda, podendo ser contínua ou não. Sendo consideradas como um tipo particular de Sistema Convectivo de Mesoescala – SCM. Normalmente as LIs apresentam sua configuração completa por volta das 21h00, horário de maior atividade convectiva. Esse período coincide com a penetração da brisa marítima para o interior do continente, em resposta ao aquecimento do continente durante o período diurno. Assim, a circulação de brisa marítima e o aquecimento solar são mecanismos de iniciação da LI (Oliveira, 2017).

Devido a associação desses sistemas convectivos de mesoescala com perturbações nos ventos alísios assim como pela influência da ZCIT (Cavalcanti, 1982), os mesmos favorecem acumulados de precipitação pluvial principalmente nas áreas mais próximas do litoral do Nordeste brasileiro.

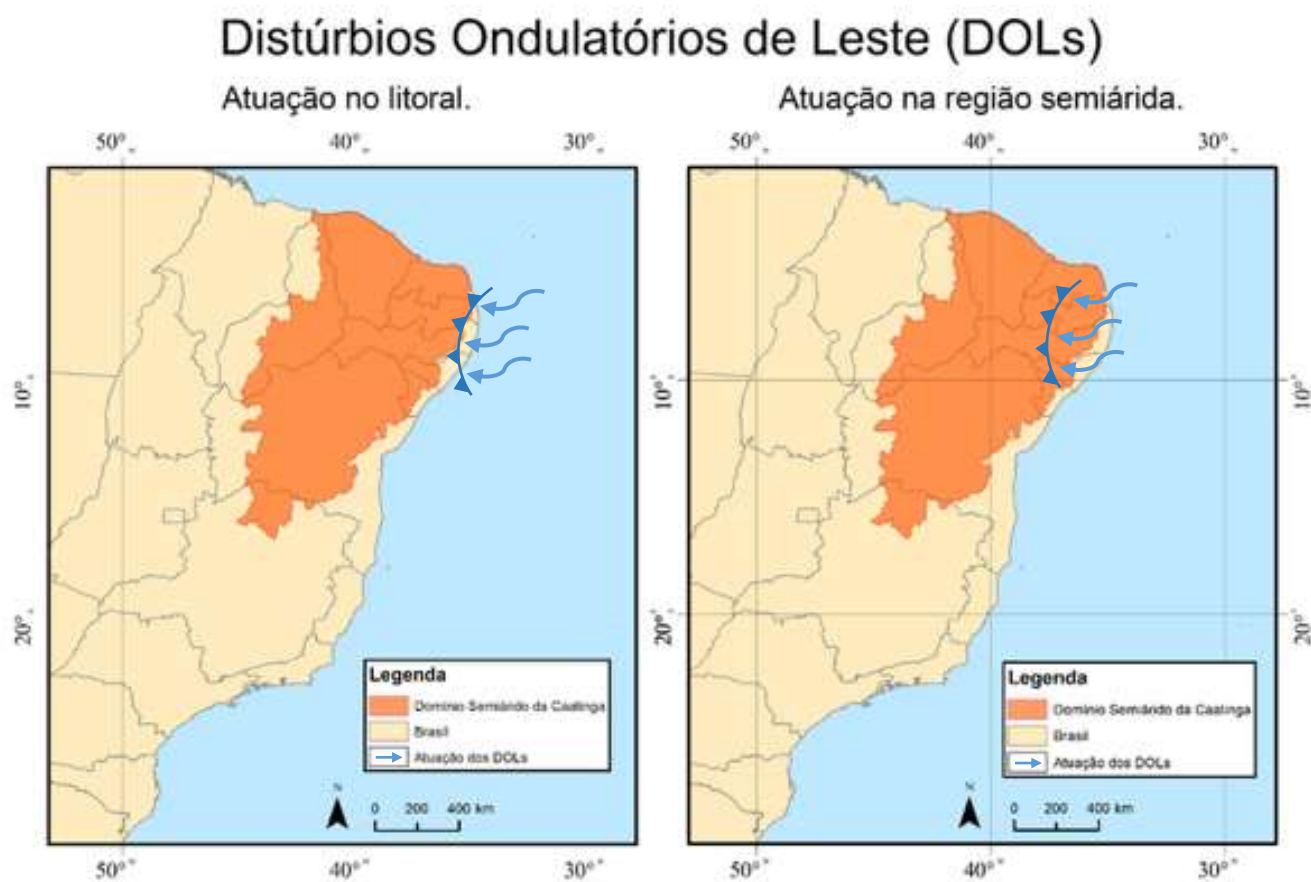
Figura 8 - Atuação dos Complexos Convectivos de Mesoescala e Linhas de Instabilidade.



Os Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOLs), também conhecidos como Ondas de Leste (Figura xx), são formações de nuvens associadas aos ventos alísios com deslocamento de leste a oeste. Esses acumulados de nebulosidade são importantes não apenas para o litoral do nordeste, mas também podem atuar na porção semiárida dessa região. Gomes (2012), ao analisar o padrão de ocorrência dos DOLs em um período de 21 anos, constatou que os mesmos se concentram entre os litorais dos estados de Alagoas e Rio Grande do Norte, principalmente entre os meses de março a agosto. No caso do semiárido mais próximo a costa leste observa-se uma influência nas precipitações ocorridas entre os meses de maio a agosto.

O autor citado no parágrafo anterior demonstra ainda que os DOLs são responsáveis por um acréscimo de 16% na precipitação pluvial durante a estação úmida e 4% durante a estação seca. E os principais sistemas atmosféricos associados a formação dos DOLs são a ZCIT, VCAN, Frentes Frias (FF) e conglomerados convectivos provenientes do oeste da África (AF). Os DOLs estão associados ainda há interação entre sistemas: AF com FF, AF com a ZCIT, AF com VCAN, e ZCIT com FF.

Figura 9 – Atuação dos Distúrbios Ondulatórios de Leste.



Fonte: Adaptado de Santos (2024).

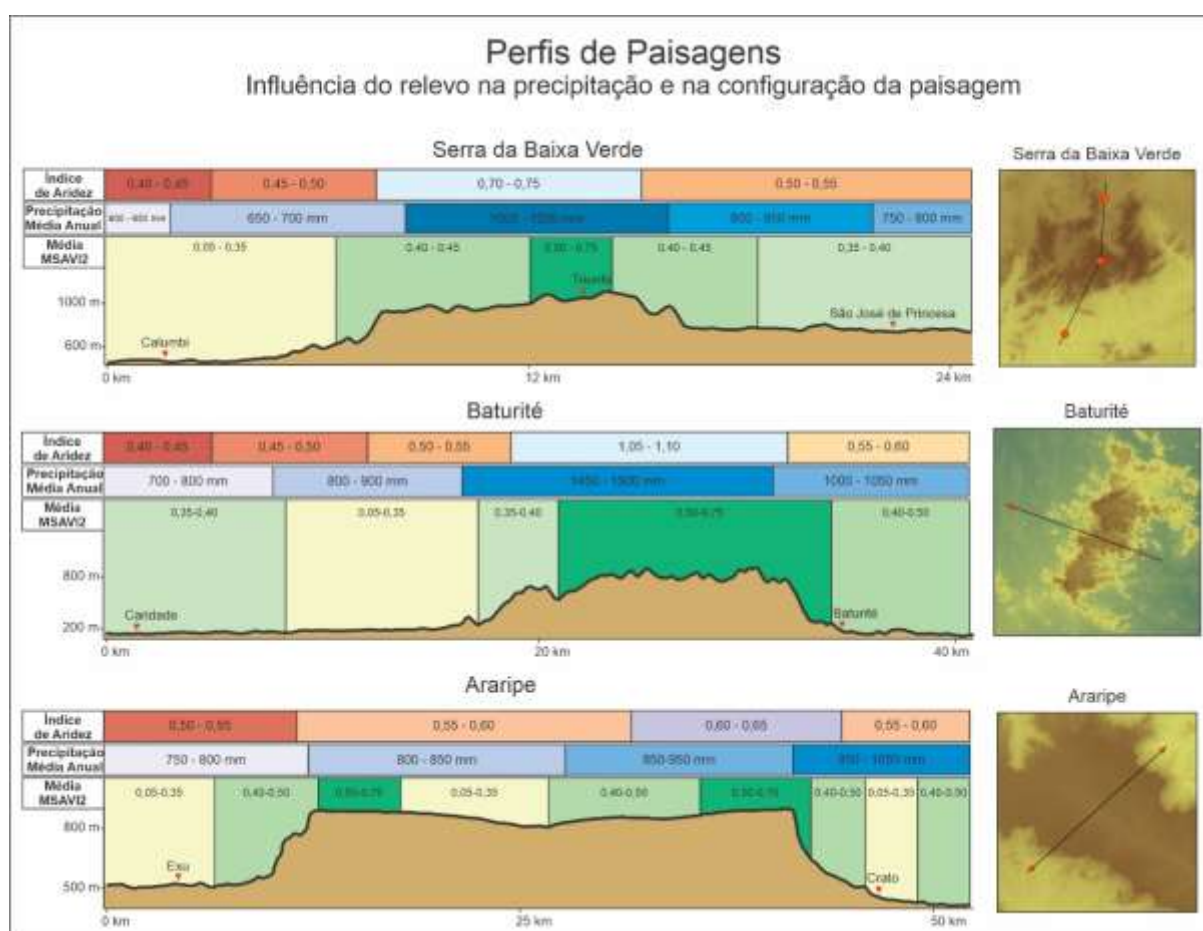
Sistemas de Microescala

Os sistemas de microescala estão relacionados à diferença de altitude (chuvas orográficas) e posição do relevo (vertentes a barlavento ou sotavento). Sendo importante entender que estes sistemas estão sujeitos aos outros já citados, de escalas superiores, atuando de forma simultânea. Fatores como efeitos orográficos influenciam a formação de nuvens e a atividade convectiva, especialmente na ZCAS e em regiões costeiras. O contraste entre continente e oceano afeta a intensidade dos ventos e da atividade convectiva (Satyamurty e Rosa, 2020).

A diferença de altitude (chuvas orográficas) e posição do relevo (vertentes a barlavento ou sotavento) também são importantes fatores que interferem na quantidade de precipitação pluvial em diversas áreas do Domínio Semiárido da Caatinga. Na figura seguinte (Figura 10) podem ser observados perfis de paisagens que

demonstram a interferência do relevo na quantidade de precipitação, e consequentemente na configuração dos elementos que formam a paisagem.

Figura 10 – Perfis de Paisagens.



Fonte: Adaptado de Santos (2024).

Ao observar os perfis da imagem anterior, que demonstram uma relação entre a altitude com o índice de aridez, a precipitação pluvial média anual, e o valor médio do índice de vegetação MSAVI2, em algumas áreas elevadas do Domínio Semiárido da Caatinga, é possível constatar a diferença na pluviosidade média anual nas áreas mais elevadas em relação às áreas vizinhas.

Essa diferenciação na pluviosidade média anual causada pelo gradiente de altitude recebe o nome de chuvas orográficas, essas ocorrem quando o ar úmido é forçado a subir sobre uma elevação topográfica, como

uma serra, e à medida que o ar se eleva, ele se resfria e se condensa, formando nuvens e, ocasionalmente, chuvas. Por exemplo, no perfil da Serra da Baixa Verde, nota-se uma precipitação média anual entre 1000 e 1050 mm, enquanto as áreas adjacentes possuem uma média de 650 a 850 mm. Consequentemente, essa diferenciação das áreas elevadas também irá refletir no índice de aridez, e na densidade da vegetação (Média MSAVI2).

Par além da relação entre altitude do relevo e pluviosidade, percebe-se também que algumas vertentes possuem uma maior quantidade de chuvas que outras. Por exemplo, no perfil referente ao Maciço do Baturité, a vertente a leste possui uma precipitação pluvial média anual entre 1000 a 1050 mm, e na vertente oposta, uma média de 800 a 900 mm.

No perfil do Araripe, na vertente a nordeste, nas localidades do município do Crato-CE, a pluviosidade média anual varia entre 950 a 1050 mm, em contrapartida, na vertente a sudoeste, nas localidades do município de Exu-PE, varia entre 750 a 800 mm.

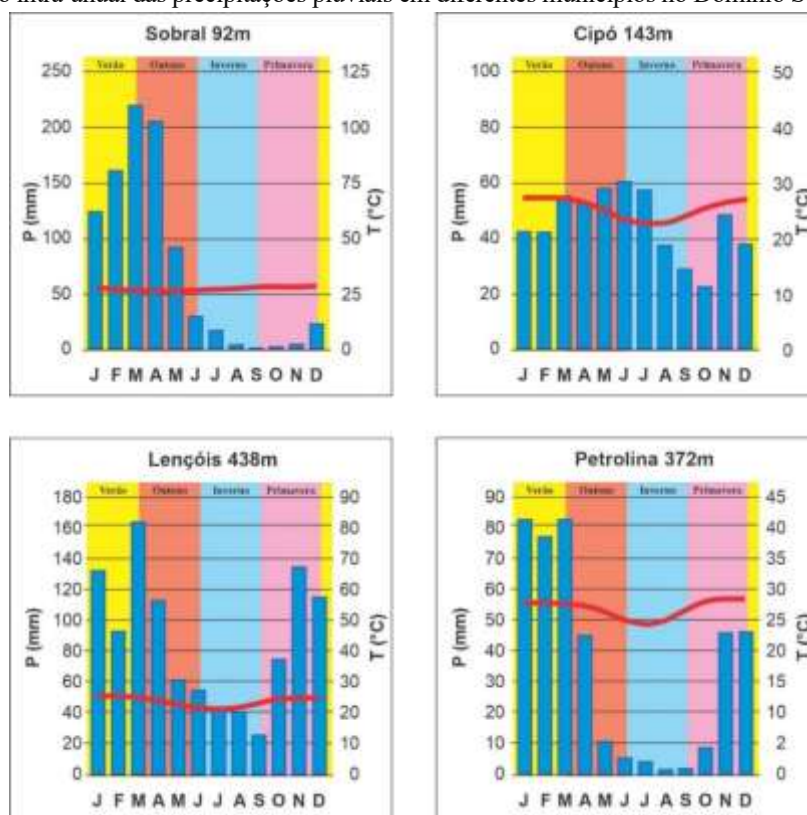
A diferença de maior ou menor quantidade de chuva se dá pela posição das vertentes em relação aos ventos predominantes. A vertente a barlavento recebe uma maior quantidade de umidade atmosférica, os ventos úmidos carregam consigo a umidade do oceano e formam chuvas quando se elevam sobre a vertente. Em contrapartida, a vertente a sotavento é a encosta voltada para a direção oposta à dos ventos predominantes, e consequentemente apresenta um ambiente mais seco e uma vegetação mais rala, essa configuração também recebe o nome de “sombra de chuva”.

VARIAÇÕES TEMPORAIS DAS PRECIPITAÇÕES PLUVIAIS: VARIABILIDADE INTRA-ANUAL E INTERANUAL

Esses sistemas também apresentam variabilidade temporal, seja de ordem intra-anual, ao longo dos meses, que determina os meses de chuva ao longo de um ano, assim como a variação interanual, que trata da variação ao longo dos anos, representada por anos secos e anos úmidos.

As variações intra-anuais, tratando de ambientes semiáridos, são caracterizadas pela concentração de precipitação pluvial em poucos meses do ano, intercalados por períodos prolongados de estiagem. Nos exemplos da figura a seguir (Figura 11) são apresentados quatro climogramas em diferentes municípios, cada um apresentando diferentes contextos pluviais durante os meses (e estações) do ano.

Figura 11 - Variação intra-anual das precipitações pluviais em diferentes municípios no Domínio Semiárido da Caatinga.



Fonte: Adaptado de Santos (2024).

O climograma referente a cidade de Sobral-CE apresenta um período de maior precipitação pluvial entre março e abril, configurando forte ocorrência de chuvas no final do verão e início do outono, alcançando 220 mm. E em contrapartida, um período seco entre o inverno e a primavera. Por sua vez, o climograma referente à cidade de Cipó-BA apresenta um período de maior pluviosidade entre março e julho, configurando maior ocorrência de chuvas no final do outono e início do inverno, alcançando 60 mm. E em contrapartida, um período mais seco ocorre entre o final do inverno e início da primavera.

Lençóis-BA apresenta um período de maior pluviosidade entre novembro a abril, configurando forte ocorrência de chuvas no final da primavera e início do verão assim como no final do verão e início do outono, alcançando 164 mm mensais em março. Em contrapartida, um período seco ocorre no final do outono e durante o inverno. Já a cidade de Petrolina-PE possui o período de maior precipitação pluvial entre janeiro e março, configurando chuvas de verão, atingindo 83 mm mensais. Já o período seco ocorre entre os meses de março a outubro (final do outono até o início da primavera).

Esses diferentes contextos de variação intra-anual das chuvas são de extrema importância para a agricultura em ambientes semiáridos. Como foi possível observar a partir dos climogramas, essa região caracteriza-se pela concentração de chuvas em poucos meses do ano, intercalados por períodos prolongados de estiagem, o que torna o armazenamento de água essencial para a sobrevivência das plantas durante a seca. A disponibilidade de água no solo afeta diretamente o crescimento e o desenvolvimento das plantas, influenciando na produtividade das culturas e sobrevivência das comunidades rurais.

Se tratando das variações interanuais (variação em diferentes anos), a área em questão também apresenta alteração na precipitação pluvial a depender dos sistemas atmosféricos atuantes e sua intensidade, entre eles, cabe destaque para o ENOS Oscilação Sul.

De acordo com Caviedes (2001), um evento de El Niño tem 61% de probabilidade de gerar uma seca no Nordeste do Brasil. Esse valor é suficiente para sugerir uma relação entre a ocorrência deste evento e ocorrência da seca, entretanto, o pensamento inverso, em prever uma ocorrência de El Niño, a partir de uma seca no Nordeste do Brasil, é de apenas 38%. O autor supracitado destaca assim que nem todos os mecanismos climáticos que geram as secas estão ligados aos eventos de El Niño, porém, o grande número de ocorrências simultâneas entre esses eventos demonstra a relação entre eles.

Na tabela a seguir é apresentada a precipitação pluvial total anual, para os anos de 2015 (ocorrência de El Niño) e 2020 (ocorrência de La Niña), de alguns municípios inseridos no Domínio Semiárido da Caatinga, em comparativo com as Normais Climatológicas para os anos de 1991-2020.

Tabela 1 - Pluviosidade Anual (mm) de municípios no Domínio Semiárido da Caatinga, sob influência do El Niño e da La Niña.

Município	Influência El Niño (2015)	Normais Climatológicas (1991-2020)	Influência La Niña (2020)
Arco Verde (PE)	431,2	614,2	620,8
Cabrobó (PE)	241,4	484,2	566,6
Irecê (BA)	283,2	557	830,4
Lençóis (BA)	748	1057,7	1655,8
Patos (PB)	491	679,1	882,4
Petrolina (PE)	185	419	486,6
Piripiri (PI)	671,2	1409,1	1561

Fonte: INMET, dados anuais 2015 e 2020 e normais climatológicas 1991-2020, adaptado pelos autores.

Como é evidente ao observar o quadro, em anos de ocorrência de El Niño os municípios apresentam uma precipitação anual inferior do observado nas normais climatológicas, e em contrapartida, nos anos onde há a atuação da La Niña a precipitação é superior à média estimada para essas localidades.

Essa alteração nos níveis de precipitação provocada pelo El Niño interfere diretamente na capacidade de produção agrícola. Ao passar por períodos de chuva abaixo do normal, é recomendado para a minimização de impactos, racionalizar o uso de água e utilizar a irrigação de forma adequada, de preferência no período noturno, utilizar culturas com sistemas radiais mais profundos e mais resistentes, procurar manter uma boa cobertura de solo e evitar a compactação do solo (Cunha et al., 2011).

VARIAÇÕES ESPACIAIS DAS PRECIPITAÇÕES PLUVIAIS

As diferentes configurações de precipitação pluvial presentes dentro do DSC, os dados das normais climatológicas do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), para os anos de 1981-2010 e 1991-2020, demonstram que esse conjunto de paisagens possui uma grande diversidade climática dentro do seu contexto de semiaridez. Apesar do Semiárido Brasileiro ser delimitado oficialmente pela precipitação pluvial média anual inferior a 800 mm, entre outras variáveis, é possível encontrar áreas com pluviosidade maior em seu interior, assim como outras com ocorrência de chuvas consideravelmente inferior.

Salvaguardando algumas exceções, têm-se um adensamento das precipitações conforme se aproxima das regiões litorâneas, principalmente em ambientes de transição entre a Caatinga e o Bioma de Mata Atlântica, com destaque para a porção leste do Semiárido Brasileiro.

Dentro do DSC é possível encontrar um núcleo com menos pluviosidade média anual na região de Petrolina-PE indo em direção ao município de Piauí-BA e a região de Rodelas-BA. Também está presente um núcleo de baixa pluviosidade no sertão do Cariri, na Paraíba. Por vezes essas áreas com baixo regime de chuvas corresponde aos núcleos de desertificação do Semiárido Brasileiro.

Entre os núcleos de desertificação cabe destaque para: Núcleo de Gilbués, no Piauí; Núcleo de Irauçuba, no Ceará; Núcleo do Seridó, no Rio Grande do Norte e Paraíba; Núcleo de Cabrobó, em Pernambuco. Esses núcleos são especialmente preocupantes porque, ao contrário das áreas naturalmente semiáridas, que possuem

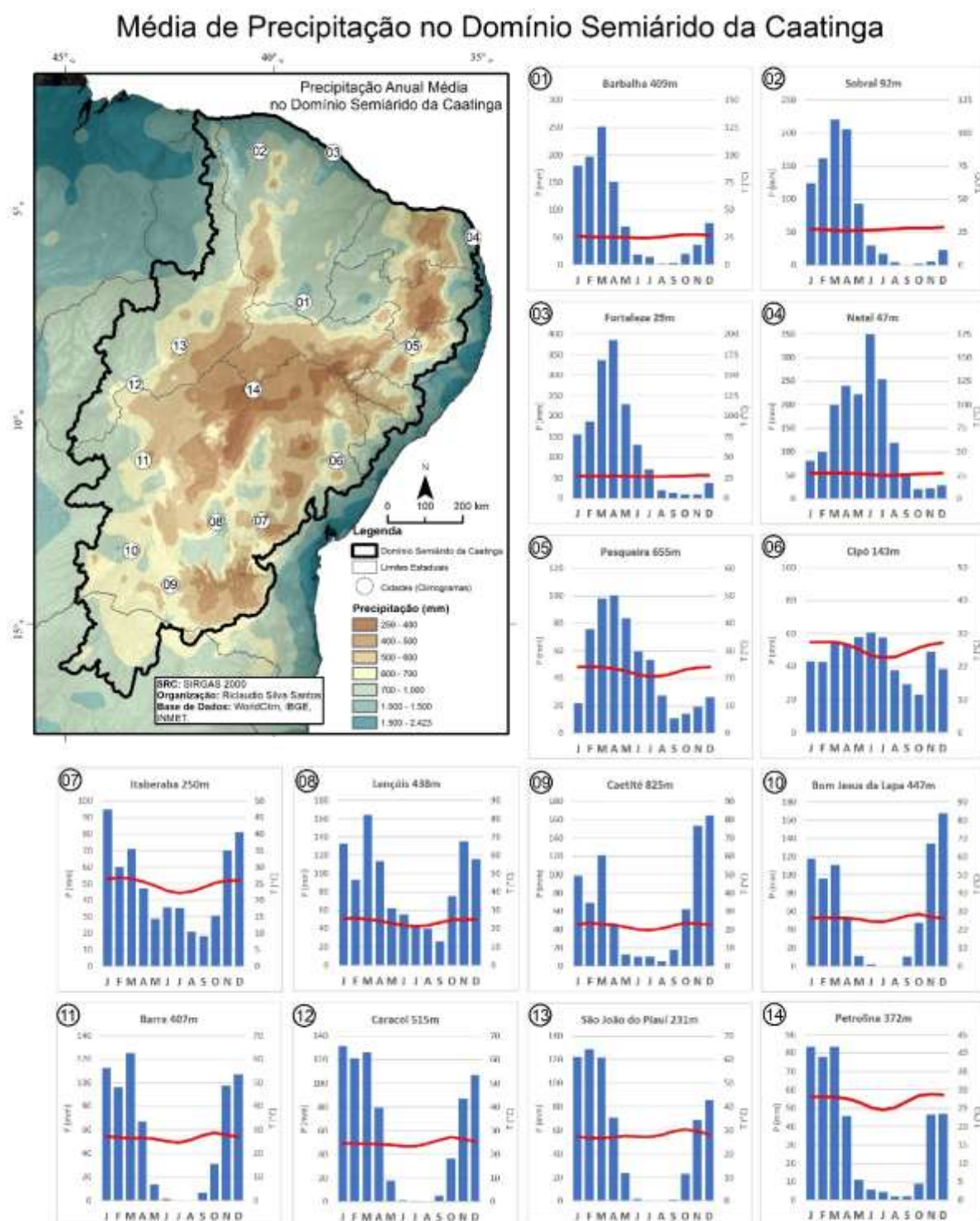
ecossistemas adaptados às condições locais, as regiões de desertificação perdem a capacidade de sustentar a biodiversidade e as atividades econômicas tradicionais, como a agricultura e a pecuária de subsistência. Isso leva a um ciclo vicioso de empobrecimento do solo, diminuição da cobertura vegetal e aumento da vulnerabilidade às secas, impactando negativamente a vida das populações locais.

No sentido oposto, também estão presentes áreas de maior precipitação dentro do contexto de semiaridez, como são os casos dos brejos de altitude, por exemplo, à porção a barlavento do Araripe ou à Serra da Baixa Verde, atingindo mais de 1000 mm de precipitação média anual.

Em síntese, o Semiárido Brasileiro, embora definido por um regime de chuvas reduzido, apresenta variações significativas em sua precipitação, o que reflete uma diversidade climática substancial em diferentes pontos, evidenciando zonas de maior umidade em meio ao contexto árido.

Essas características podem ser observadas na figura a seguir (Figura 12), onde são apresentados a precipitação pluvial anual média e os climogramas de diferentes regiões do Domínio Semiárido da Caatinga.

Figura 12 – Variabilidade espacial das Precipitações Pluviais no Domínio Semiárido da Caatinga.



Fonte: Adaptado de Santos (2024).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do apanhado de informações sobre a dinâmica climática do Domínio Semiárido da Caatinga, foi possível observar como esse ambiente apresenta uma complexidade multiescalar da distribuição da pluviosidade, com variações no espaço e no tempo.

Em macroescala, a interação entre a Célula de Hadley e a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) resulta em importantes padrões de precipitação, com a ZCIT proporcionando chuvas significativas no Norte do Semiárido durante períodos específicos do ano. A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCANs) também desempenham papéis importantes, influenciando a quantidade e a distribuição das chuvas, particularmente em suas respectivas áreas de atuação.

Entre os sistemas atmosféricos atuantes, o El Niño Oscilação Sul (ENOS) se destaca pela capacidade de alteração da dinâmica climática observada para o ambiente semiárido estudado, seja pela intensificação dos períodos de estiagem e secas, ou no sentido inverso, pela atuação da La Niña, com a ampliação da pluviosidade. Sendo importante a realização de mais pesquisas na análise da interferência desse sistema na agricultura do semiárido.

Por outro lado, em mesoescala e microescala, sistemas como Complexos Convectivos de Mesoescala (CCMs), Linhas de Instabilidade (LIs) e Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOLs) adicionam complexidade ao padrão de precipitação no semiárido. Esses sistemas podem gerar chuvas intensas e localizadas, com os DOLs contribuindo significativamente para a umidade na região litorânea e semiárida do Nordeste. A topografia local também exerce uma influência crucial, com as chuvas orográficas resultantes da elevação do relevo provocando variações significativas na pluviosidade entre vertentes a barlavento e sotavento. Dessa forma, a combinação de fatores atmosféricos e geográficos molda a distribuição e intensidade das chuvas no Domínio Semiárido da Caatinga, demonstrando a complexidade dos mecanismos que afetam a região.

Apesar da definição oficial de semiárido ser uma precipitação média anual inferior a 800 mm, o DSC apresenta áreas com pluviometria superior a este limite, como os brejos de altitude nas serras do Araripe e da Baixa Verde, onde os índices de precipitação podem ultrapassar 1000 mm anuais. Em contraste, existem zonas com precipitações muito abaixo da média, como a região de Petrolina-PE e a sertão do Cariri, na Paraíba, que frequentemente enfrentam condições de seca mais severa e estão associadas a núcleos de desertificação, atingindo precipitações médias anuais entre 259 a 400 mm.

Cabe destacar como essa variabilidade climática impacta diretamente a vida das populações que habitam a região. A irregularidade das chuvas e a presença de núcleos de desertificação afetam a agricultura, o abastecimento hídrico e a segurança alimentar, exigindo adaptações por parte dos agricultores, como a utilização de técnicas de convivência com o Semiárido, como a captação de água de chuva, o plantio em curvas de nível e sistemas de agroflorestas.

Fica evidente que os componentes climáticos das paisagens semiáridas do Nordeste do Brasil apresentam uma variação interna complexa e dinâmica, necessitando de uma análise para além da identificação da semiaridez.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento de Ciências Geográficas da UFPE pelo uso de suas instalações e ambientes, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de Doutorado ao primeiro autor.

REFERÊNCIAS

AB'SÁBER, Aziz Nacib. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. Ateliê editorial, 2003.

AHRENS, C. D. **Meteorology today: an introduction to weather, climate, and the environment**. Cengage Learning Canada Inc, 2015.

BARBOSA, João Paulo Macieira. **Pensando a climatologia geográfica por meio da filosofia da ciência: clima, complexidade e ciência pós-normal na construção de uma consciência do clima**. 2022. 1 recurso online (190 p.) Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências, Campinas, SP. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12733/4737>. Acesso em: 11 set. 2024.

BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J. **Atmosfera, tempo e clima**. Bookman Editora, 2009.

BRAGA, C. C.; BRITO, J. D.; SANSIGOLO, C. A.; RAO, T. V. R. Tempo de resposta da vegetação às variabilidades sazonais da precipitação no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 11, n. 1, p. 149-157, 2003.

CAVALCANTI, I. F. A. **Um estudo sobre interações entre sistemas de circulação de escala sinótica e circulações locais**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1982.

CAVIEDES, C. N. **El Niño in History: Storming Through the Ages**. University Press of Florida, 2001.
CUNHA, G. R.; PIRES, J. L. F.; DALMAGO, G. A.; SANTI, A.; PASINATO, A.; SILVA, A. A. G.; ASSAD, E. D.; ROSA, C. M. El Niño/La Niña: oscilação sul e seus impactos na agricultura brasileira: fatos, especulações e aplicações. **Plantio Direto**, v. 20, n. 121, p. 18-22, jan./fev. 2011.

DOS SANTOS, Yonara Claudia et al. Enfrentamento aos riscos das mudanças climáticas no semiárido brasileiro: a adaptação climática como uma nova agenda governamental. **Revista de Gestão dos Países de Língua Portuguesa**, v. 22, n. 1, p. 46-66, 2023.

GOMES, H. B. **Distúrbios ondulatórios de leste no nordeste brasileiro: climatologia e modelagem numérica**. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

IBGE. Biomas e sistema costeiro-marinho do Brasil: compatível com a escala 1:250 000 / IBGE, **Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais**. - Rio de Janeiro: IBGE. 2019. 168 p. - (Relatórios metodológicos, ISSN 0101-2843; v. 45). ISBN 978-85-240-4510-3. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101676.pdf>. Acesso em: jun. 2024.

MONTEIRO, J. B. A influência de teleconexões e sistemas meteorológicos produtores de precipitação no semiárido nordestino. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 01, p. 312-332, 2022.

MORAIS, M. D. C. de; GAN, M. A. **Vórtices ciclônicos em altos níveis sobre o Nordeste do Brasil**. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - CPTEC/INPE, São Paulo, Brasil, 2016.

OLIVEIRA, F. P. de. **Processos convectivos na iniciação de linhas de instabilidade na costa norte do Brasil**. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017.

PINTO, J. E. S. de S. **Os reflexos da seca no Estado de Sergipe**. São Cristóvão: Editora do NPGeo/UFS, 1999.

SANTOS, R. S. **Domínio semiárido da caatinga: uma proposta tipológica e regional através da cartografia de paisagem**. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2024.

SATYAMURTY, P.; ROSA, M. B. Synoptic climatology of tropical and subtropical South America and adjoining seas as inferred from Geostationary Operational Environmental Satellite imagery. **International Journal of Climatology**, v. 40, n. 1, p. 378-399, 2020.