

DESCRIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS FENÔMENOS ATMOSFÉRICOS MAIS FREQUENTES NO TERRITÓRIO BRASILEIRO

Elaborado por: Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Centro Estadual de Pesquisa em Sensoriamento Remoto e Meteorologia
Laboratório de Meteorologia e Qualidade do Ar

**Rita de Cássia Marques Alves
Ludmila Pochmann de Souza
Ricardo Antonio Mollmann
Bruno Dias Rodrigues**

Para:
Deutsche Gesellschaft für
Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Julho/2015



Por meio da:



Título: DESCRIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS FENÔMENOS ATMOSFÉRICOS MAIS FREQUENTES NO TERRITÓRIO BRASILEIRO

Elaborado por: Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Centro Estadual de Pesquisa em Sensoriamento Remoto e Meteorologia
Laboratório de Meteorologia e Qualidade do Ar

**Autores: Rita de Cássia Marques Alves
Ludmila Pochmann de Souza
Ricardo Antonio Mollmann
Bruno Dias Rodrigues**

Para: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

Programa: Programa Energia Brasileiro-Alemão

No do Programa: 2007.2189.4-001.00

Coordenação: Roberto Castro (GIZ),
Juarez Lopes ([Empresa de Pesquisa Energética])

Julho/2015

Informações Legais

1. Todas as indicações, dados e resultados deste estudo foram compilados e cuidadosamente revisados pelo(s) autor(es). No entanto, erros com relação ao conteúdo não podem ser evitados. Consequentemente, nem a GIZ ou o(s) autor(es) podem ser responsabilizados por qualquer reivindicação, perda ou prejuízo direto ou indireto resultante do uso ou confiança depositada sobre as informações contidas neste estudo, ou direta ou indiretamente resultante dos erros, imprecisões ou omissões de informações neste estudo.
2. A duplicação ou reprodução de todo ou partes do estudo (incluindo a transferência de dados para sistemas de armazenamento de mídia) e distribuição para fins não comerciais é permitida, desde que a GIZ seja citada como fonte da informação. Para outros usos comerciais, incluindo duplicação, reprodução ou distribuição de todo ou partes deste estudo, é necessário o consentimento escrito da GIZ.

Conteúdo

1. NOÇÕES BÁSICAS DA CIRCULAÇÃO GERAL DA ATMOSFERA	1
1.1 Circulação Geral da Atmosfera	1
1.1.1 Célula Tropical (célula de Hadley)	2
1.1.2 Célula das Latitudes Médias	2
1.1.3 Célula Polar	2
1.2 Circulação Média a Superfície	4
2. DESCRIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS FENÔMENOS ATMOSFÉRICOS	5
2.1 Noções Gerais dos Sistemas Atmosféricos atuantes na América do Sul	5
2.1.1 Análise dos Sistemas Atmosféricos em Altos e Baixos Níveis da Atmosfera da América do Sul:	5
2.2 Regime de Precipitação na América do Sul	12
3. CLASSIFICAÇÃO DOS PRINCIPAIS SISTEMAS ATMOSFÉRICOS	18
3.1 Sistemas de Grande Escala	18
3.1.1 Escoamento em Altos Níveis	21
3.1.2 Perturbações Atmosféricas	27
3.2 Sistemas de Mesoescala	31
3.3 Sistemas de Escala Global	34
3.4 Interação Entre Escalas	36
4. PRECIPITAÇÃO, VENTO, INSOLAÇÃO e NEBULOSIDADE MENSAL	39
5. ESTUDO DE CASO – NORDESTE E SUL	57
6. ESTUDO DE CASO - EXEMPLOS DE MODELAGEM	62
7. SUGESTÕES	75

Lista de Figuras

Figura 1 – Circulação Geral da terra sem rotação	1
Figura 2 – Circulação Geral idealizada no modelo de três células	2
Figura 3 – Circulação Geral da Atmosfera.	3
Figura 4 – (a) Distribuição idealizada da zona de pressão; (b) “Quebra” da distorção pela distribuição dos continentes.	4
Figura 5 – Circulação Geral da Atmosfera e os grandes sistemas de vento	5
Figura 6 .(a, b) – Sistemas Atmosféricos e as suas respectivas localizações na Baixa e Alta Troposfera.	6
Figura 7 – Siglas correspondentes aos principais Sistemas atmosféricos na Baixa e Alta Troposfera	6
Figura 8 – Massas de ar que exercem influência no clima do Brasil	7
Figura 9 - Ilustração das Massas de ar que atuam no Brasil	8
Figura 10 – Mapa de pressão média ao nível do mar, para elucidar a localização média dos Anticiclones que atuam nos oceanos Pacífico Sul e Atlântico Sul	10
Figura 11 – Precipitação média anual (mm) calculada entre 1961-1990 com base em análises diárias de precipitação no Brasil.	14
Figura 12 – Vento média anual (m/s) calculada entre 1961-1990 com base em análises diárias de vento no Brasil.	15
Figura 13 – Insolação média anual (horas) calculada entre 1961-1990 com base em análises diárias de insolação no Brasil.	16
Figura 14 – Nebulosidade média anual (décimos) calculada entre 1961-1990 com base em análises diárias de nebulosidade no Brasil.	17
Figura 15 (a,b) – Representação de um SF em uma carta Sinótica em superfície e em uma imagem de Satélite do canal infravermelho	19
Figura 16 - Principais centros de ação atuantes no Brasil e na AS	20
Figura 17 - Posição média e variabilidade para o inverno e verão dos JST (a) e JP (b)	22
Figura 18 - (a) Representação de um VCAN no litoral do NEB; (b) Imagem de Satélite identificando um VCAN	23
Figura 19 - Posicionamento de um VCAN em uma carta sinótica no nível de 500hPa sobre a região Sul do Brasil	24
Figura 20 - Representação da AB no nível de 250hPa	25
Figura 21 - Representação esquemática do escoamento e do transporte de umidade do JBN em 850hPa.	26
Figura 22 - Transporte horizontal de umidade específica gerado pelo modelo de mesoescala em 850hPa	27

Figura 23 - Demonstração do Comportamento da ZCIT nos meses de Janeiro e Julho	28
Figura 24 - Representação da ZCIT através de imagens de Satélite	28
Figura 25 - Representação da ZCAs através de imagens de Satélite	29
Figura 26 - Representação da ZCAS em uma carta sinótica de Superfície	30
Figura 27 -Representação dos DOLs na imagem do satélite do canal IR	30
Figura 28 -Representação das Brisas marítima e terrestre	33
Figura 29 – Ilustração brisas (a) vale-montanha e (b) montanha-vale	33
Figura 30 - Ilustração das condições Normais de TSM	34
Figura 31 – Ilustração das condições de El Niño	35
Figura 32 - Ilustração das condições de Lã Ninã	35
Figura 33 – Escalas dos movimentos atmosféricos	39
Figura 34 - Climatologia de precipitação acumulada mensal no Brasil de 1961-1990	42
Figura 35 - Climatologia de vento mensal no Brasil de 1961-1990	45
Figura 36 - Climatologia de insolação total mensal no Brasil de 1961-1990	48
Figura 37 - Climatologia de nebulosidade mensal no Brasil de 1961-1990	51
Figura 38 - Sistemas Atuantes na região Nordeste do Brasil em Altos níveis da atmosfera	53
Figura 39 - Sistemas Atuantes na região Nordeste do Brasil em Baixos níveis da atmosfera	53
Figura 40 - Sistemas que podem ser identificados por imagens de satélite na região Sul do Brasil	54
Figura 41 - Sistemas Atuantes na região Sul do Brasil em Altos níveis da atmosfera	55
Figura 42 - Sistemas Atuantes na região Sul do Brasil em Baixos níveis da atmosfera	56
Figura 43 - Sistemas que podem ser identificados por imagens de satélite na região Sul do Brasil	56
Figura 44 - Áreas com potencial energético no Sul do Brasil	58
Figura 45 - Áreas com potencial energético no Nordeste do Brasil	58
Figura 46 - Precipitação Mensal Acumulada (mm), normais climatológicas (1961-1990)	60
Figura 47 – Insolação Total Mensal (horas), normais climatológicas (1961-1990)	61
Figura 48 – Velocidade do Vento Mensal (m/s), normais climatológicas (1961-1990)	62
Figura 49 – Representação da grade de Arakawa-C	63
Figura 50 Figura 50 - Ilustração da coordenada vertical η	64
Figura 51 - Localização geográfica dos domínios configurados no modelo WRF	65
Figura 52 (a,b,c,d,e) - Radiação solar (W/m^2), dia 16/11/2014, resolução espacial 10km	67

Figura 53 (a,b,c,d,e) - Velocidade e direção do vento, dia 16/11/2014, resolução espacial 10km	68
Figura 54 (a,b,c,d,e) - Precipitação (mm), dia 16/11/2014, resolução espacial 10km	69
Figura 55 (a,b,c,d,e) - Radiação Solar (W/m^2), dia 16/11/2014, resolução espacial 5km – NE	70
Figura 56 (a,b,c,d,e) – Velocidade (m/s) e direção do vento, dia 16/11/2014, resolução espacial 5km – NE	71
Figura 57 (a,b,c,d,e) - Precipitação acumulada (mm) dia 16/11/2014, resolução espacial 5km-NE	72
Figura 58(a,b,c,d,e) - Radiação Solar (W/m^2), dia 16/11/2014, resolução espacial 5km – SUL	73
Figura 59(a,b,c,d,e) – Velocidade (m/s) e direção do vento, dia 16/11/2014, resolução espacial 5km – SUL	74

1. NOÇÕES BÁSICAS DA CIRCULAÇÃO GERAL DA ATMOSFERA

1.1 Circulação Geral da Atmosfera

A estrutura média da circulação geral é de grande importância para a transferência meridional de energia. Um dos primeiros modelos clássicos da circulação geral é devido a George Hadley, que em 1735, sugeriu que sobre a Terra sem rotação, o movimento do ar teria a forma de uma grande célula de convecção em cada Hemisfério, conforme esquematizado na Figura 1 (Hadley, 1735).

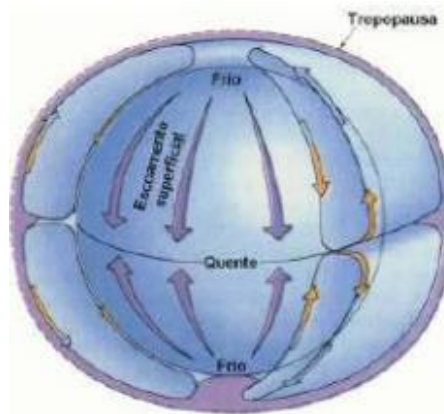


Figura 1 – Circulação Geral da terra sem rotação.

Fonte: Proclira

Como a Terra tem movimento de rotação em torno de si própria, o eixo de rotação é inclinado sobre o plano da órbita, e a proporção continental é maior no hemisfério norte do que no Hemisfério Sul, com isso o padrão de circulação é muito mais complexo.

Assim, em 1856 William Ferrel aperfeiçoou o modelo de Hadley, introduzindo o primeiro modelo Tricelular, que foi melhorado por Tor Bergeron em 1928 e por Carl-Gustav Rossby em 1941. No modelo proposto por C.G.Rossby, admite-se que a pressão a superfície do globo se distribui zonalmente, ao longo dos paralelos, havendo faixas alternadas de baixas e altas pressões, aproximadamente simétricas em relação ao equador térmico.

Associadas a esta distribuição de pressão, existem três células convectivas de circulação meridional em ambos os hemisférios (Figura 2). Sendo elas a célula tropical (também denominada de célula de Hadley), a célula de das latitudes médias (célula de Ferrel) e a célula polar.



Figura 2 – Circulação Geral idealizada no modelo de três células

Fonte: Proclira

1.1.1 Célula Tropical (célula de Hadley) – Nas latitudes baixas, o movimento do ar é, devido ao aquecimento, ascendente sobre o Equador, dirigindo-se no sentido dos pólos nos níveis superiores da atmosfera; sobre as latitudes subtropicais o ar arrefecido subside, retornando para o Equador à superfície. Esta circulação forma a célula convectiva que domina os climas tropical e subtropical. O ramo descendente da célula de Hadley está associado aos grandes centros permanentes de altas pressões subtropicais (anticlones subtropicais), de que são exemplo o anticiclone dos Açores e o anticiclone do Pacífico. Nesta célula, a rotação do globo determina ventos de oeste em altitude e ventos de leste à superfície (ventos alísios).

1.1.2 Célula das Latitudes Médias (célula de Ferrel) – É uma célula de circulação atmosférica média nas latitudes extratropicais, reconhecida por Ferrel no século XIX. Nesta célula, o ar move-se para os pólos e para leste junto à superfície, e no sentido do Equador e para oeste em altitude, fechando-se a circulação por subsidência nos subtrópicos.

1.1.3 Célula Polar - Nesta célula, o ar sobe, diverge, e desloca-se em altitude para os pólos. Uma vez sobre os pólos, o ar arrefecido desce, dando origem a altas pressões à superfície nas regiões polares; nestas regiões, o ar diverge para fora dos centros de altas pressões e retorna para sul, fechando a circulação celular. Na célula polar, à superfície, os ventos estão dirigidos para Oeste e em altitude para Leste. O modelo de circulação Tri-celular está associado ao seguinte modelo de distribuição de pressão à superfície (Figura 3):

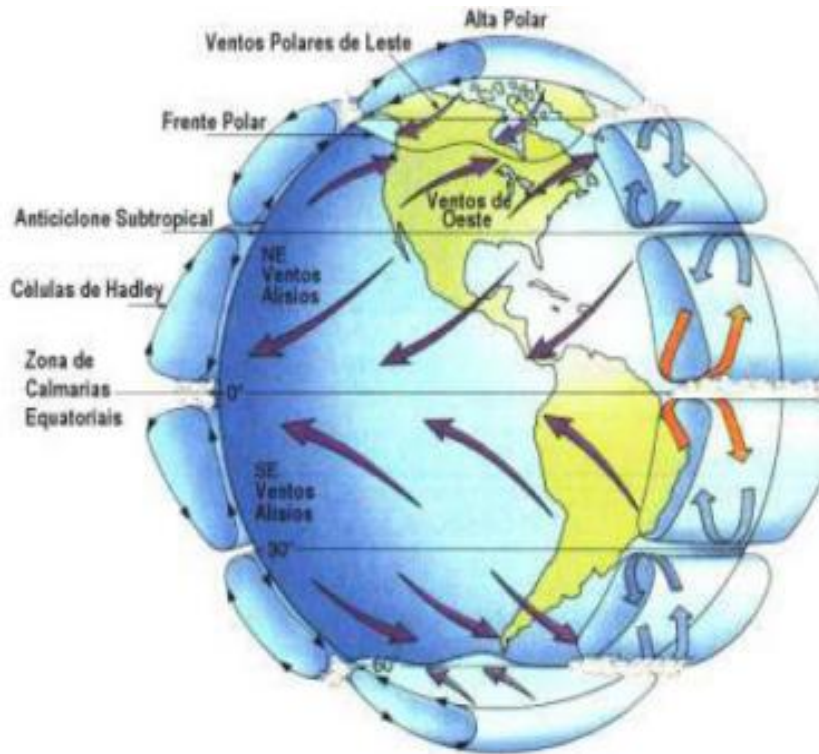


Figura 3 – Circulação Geral da Atmosfera.

Fonte:Proclira

O modelo de três células é útil, mas é muito simplificado e idealizado, descreve apenas a circulação atmosférica, simétrica em relação ao eixo de rotação, ou axialmente simétrica, independente da longitude. No entanto, o modelo fornece um bom ponto de partida para descrever as características principais da circulação atmosférica de larga escala.

O modelo das três células é uma idealização; na realidade os ventos que não são estacionários, e as regiões de Altas/Baixas pressões não são contínuas, implicando variações importantes da circulação atmosférica com a longitude (Figura 4).

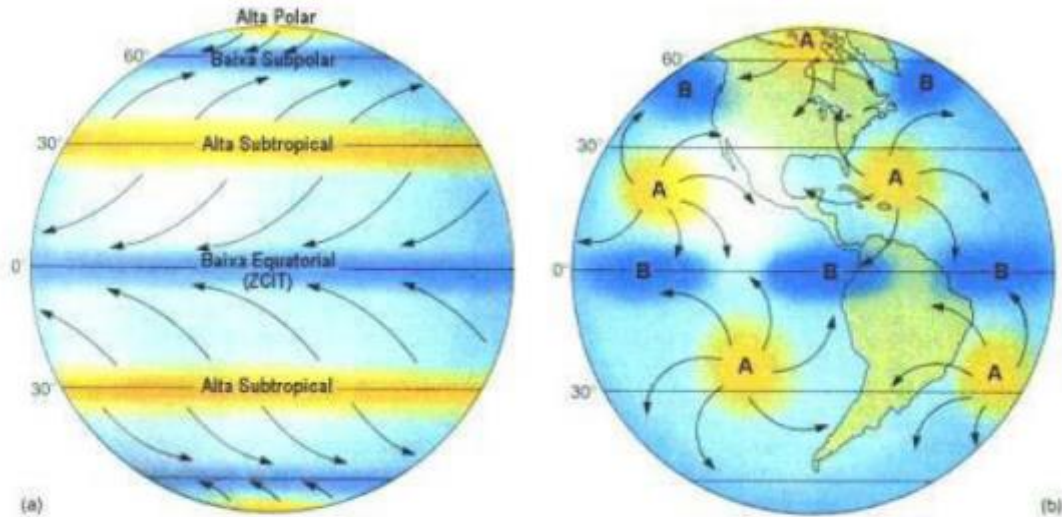


Figura 4 – (a) Distribuição idealizada da zona de pressão; (b) “Quebra” da distorção pela distribuição dos continentes.

Fonte: Proclira

1.2 Circulação Média a Superfície

Devido ao efeito da força de Coriolis, que desvia o movimento para direita (esquerda) no Hemisfério Norte (Hemisfério Sul), a circulação meridional nas três células é alterada. Surgem então, três tipos de ventos característicos à superfície: os Ventos Alísios nos Trópicos, os ventos predominantes de Oeste nas Latitudes Médias e os ventos Polares de Este.

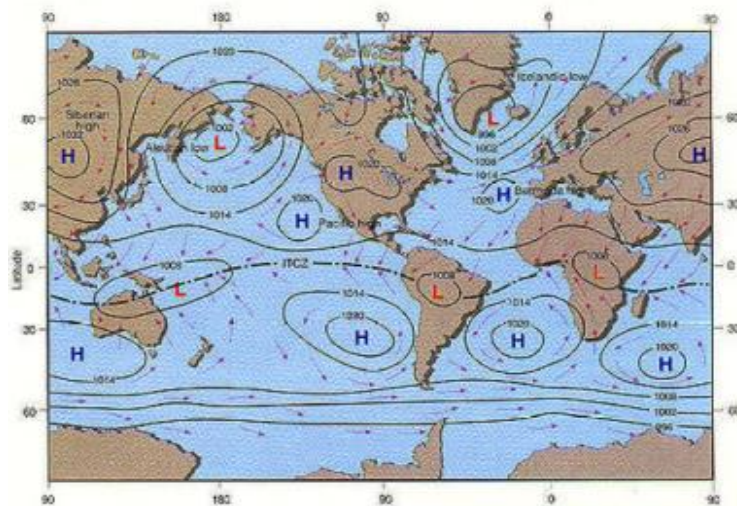


Figura 5 – Circulação Geral da Atmosfera e os grandes sistemas de vento.

Fonte: Proclira

2. DESCRIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS FENÔMENOS ATMOSFÉRICOS

2.1 Noções Gerais dos Sistemas Atmosféricos atuantes na América do Sul

O clima de qualquer região é determinado em grande parte pela circulação geral da atmosfera. Essa circulação, resulta do aquecimento diferencial do globo pela radiação solar, da distribuição assimétrica de oceanos e continentes e também das características topográficas sobre os continentes. Padrões de circulação gerados na atmosfera redistribuem calor, umidade e momentum (quantidade de movimento) por todo o globo. No entanto, essa redistribuição não é homogênea, agindo algumas vezes no sentido de diminuir as variações regionais dos elementos climáticos, tais como, temperatura e precipitação, as quais, têm enorme influência nas atividades humanas (Climanálise, 1986).

2.1.1 Análise dos Sistemas Atmosféricos em Altos e Baixos Níveis da Atmosfera da América do Sul:

Devido ao aquecimento diferencial do globo pela radiação solar e por sua posição latitudinal, a América do Sul (AS) é atravessada pelas principais zonas de pressão atuantes no Hemisfério Sul. Desde a região equatorial, local de convergência (baixas pressões) relacionada aos ventos alísios, passando pelas altas subtropicais individualizadas em duas amplas células semi fixas e permanentes sobre os oceanos até as baixas polares (Figura 6a), no que se refere a Baixa Troposfera. No nível denominado como Alta Troposfera, tem-se diversos sistemas, como por exemplo: o Jato Subtropical, Jato Polar, Alta da Bolívia, entre outros (Figura 6b).

Além dos sistemas acima citados, a movimentação das massas de ar que atuam sobre a América do Sul (AS) (Figura 8 – Massas de ar verão e inverno), também são importantes para definição das condições de tempo no continente.

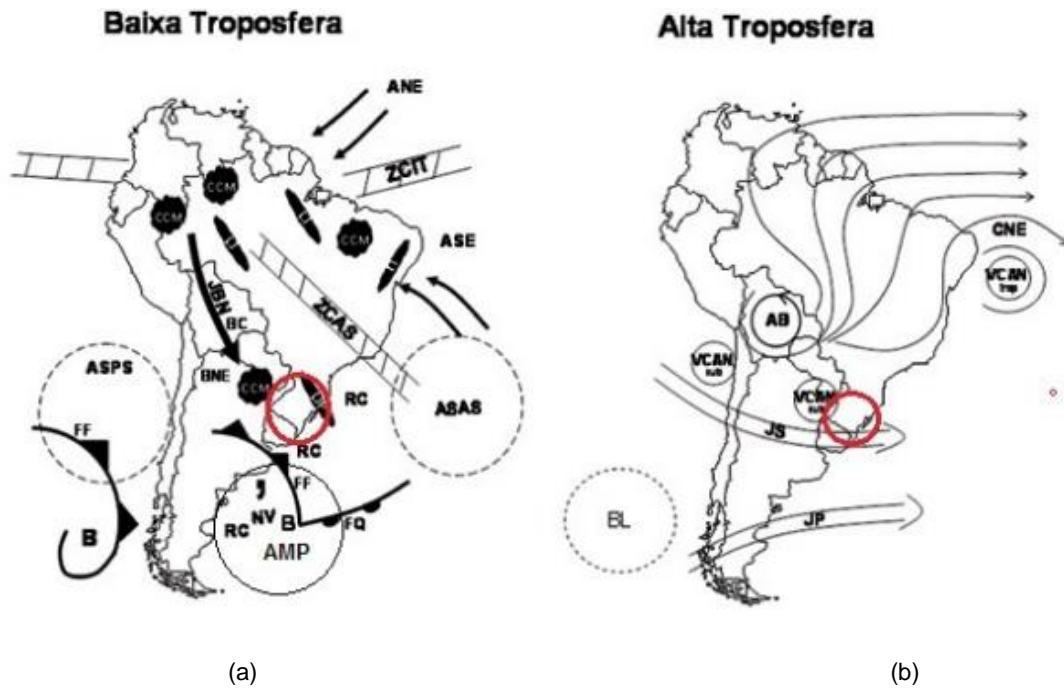


Figura 6.(a, b) – Sistemas Atmosféricos e as suas respectivas localizações na Baixa e Alta Troposfera.

Fonte: Satyamurty et al.,1998.

Baixa Troposfera	Alta troposfera
ANE – ventos alísios de nordeste	AB – alta da Bolívia
ASE – ventos alísios de sudeste	BL – região de bloqueios atmosféricos
ASAS – anticiclone subtropical do Atlântico Sul	CNE – cavado do nordeste do Brasil
ASPS – anticiclone subtropical do Pacífico Sul	JS – jato subtropical
AMP – anticiclone migratório polar	JP – jato polar
B – baixa pressão	VCAN sub – vórtices ciclônicos de altos níveis subtropicais
BC – baixa do Chaco (região de baixas térmicas)	VCAN trop – vórtices ciclônicos de altos níveis tropicais
BNE – regiões de baixas térmicas no noroeste argentino	
CCM – complexo convectivo de mesoescala	
FF – frente fria	
FQ – frente quente	
JBN – jato de baixos níveis a leste dos Andes	
LI – linha de instabilidade tropical	
LIP – linha de instabilidade pré-frontal	
NV – nuvem vírgula	
RC – regiões ciclogênicas	
ZCAS – zona de convergência do Atlântico Sul	
ZCIT – zona de convergência intertropical	

Figura 7 – Siglas correspondentes aos principais Sistemas atmosféricos na Baixa e Alta Troposfera.

Fonte: Satyamurty et al.,1998.

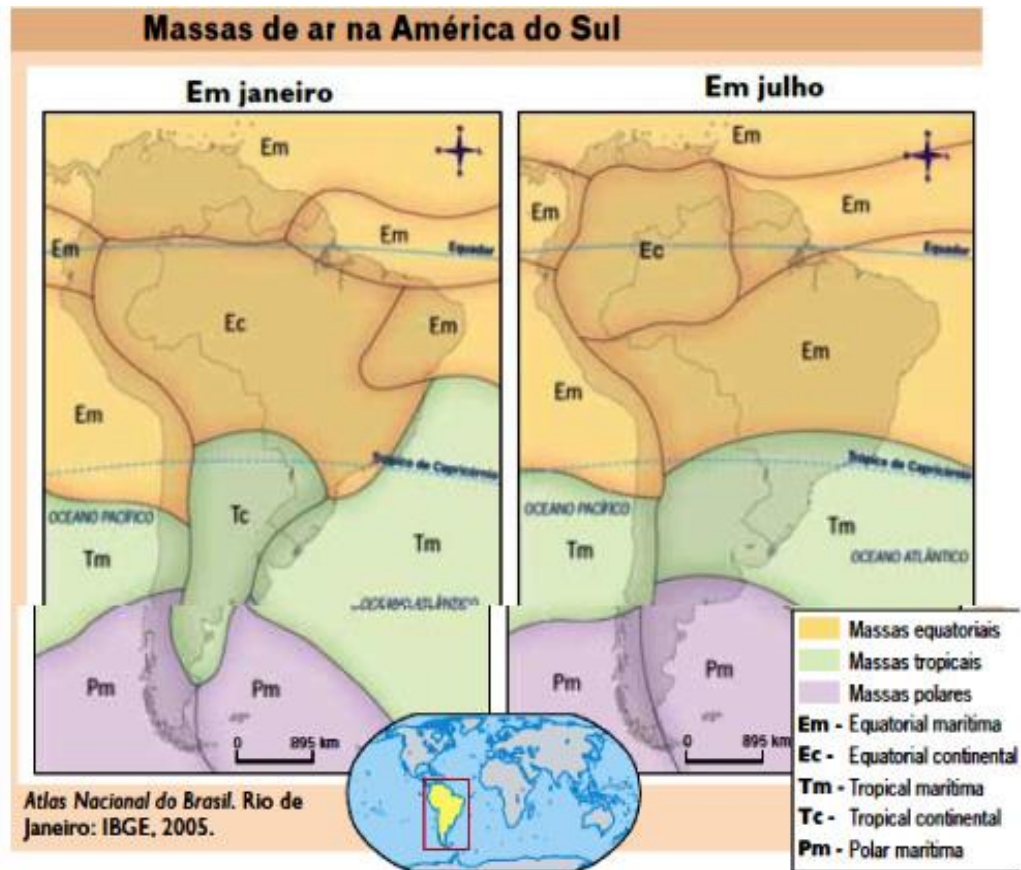


Figura 8 – Massas de ar que exercem influência no clima do Brasil.

Fonte: IBGE 2005

As massas de ar são definidas como grandes porções horizontais de ar, com propriedades termodinâmicas (temperatura e umidade) homogêneas, adquiridas na região de origem (Figura 9) (Palmén e Newton, 1969).

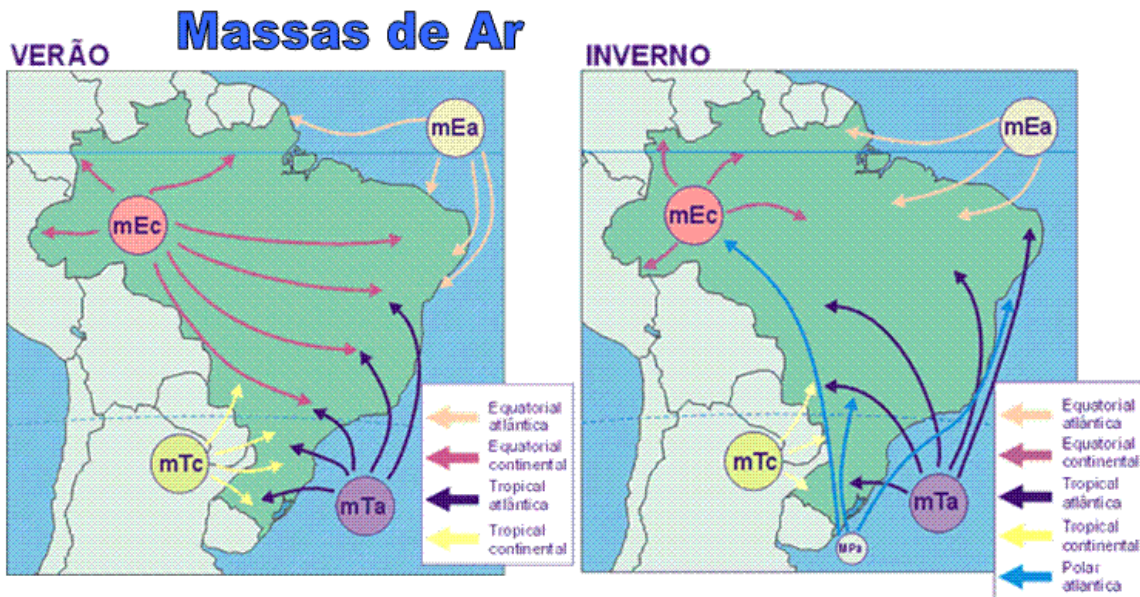


Figura 9 - Ilustração das Massas de ar que atuam no Brasil.

O sistema de classificação das massas de ar mais utilizado é baseado nas propriedades térmicas da superfície sobre a qual elas se desenvolvem, denominadas tropical e polar. As características de umidade são representadas pelos termos continental e marítima, correspondendo ao ar seco e úmido, respectivamente.

A seguir na tabela 1 podemos ver as massas de ar que atuam na América do Sul e os locais onde são originadas.

Tabela 1 - Massas de ar que atuam no Brasil.

Massas de ar	Local de Formação	Atuação
<i>Massa Equatorial Continental(cE)</i>	Região Amazônica	Sul da Amazônia no verão; Retraí-se no Inverno;
<i>Massa Equatorial Marítima(mE)</i>	Oceano Atlântico e Pacífico	Desloca-se latitudinalmente ao longo do ano, atingindo latitudes de até 8°S no verão; no inverno retorna ao HS.
<i>Massa Tropical Continental(cT)</i>	Associada a Baixa do Chaco	Sul e Centro-Oeste do Brasil.
<i>Massa Tropical Marítima(mT)</i>	Oceanos Atlântico e Pacífico, associada aos Anticiclones do Atlântico Sul e do Pacífico Sul.	Sul, Sudeste e Nordeste.
<i>Massa Polar Marítima(mP)</i>	Região subantártica	Sul do Brasil.

Outro fator determinante para o clima da AS, é que ao longo de sua costa oeste fica a Cordilheira dos Andes, que é a maior cadeia de montanhas do mundo (em comprimento). Possuindo aproximadamente oito mil quilômetros de extensão. Estendendo-se de Norte ao Sul da AS, margeando o grande corredor de terras baixas do centro do continente, bem como, a floresta Amazônica. Exercendo forte influência no comportamento climático desta porção oeste do continente Sul-americano.

Ocorre que, anticiclones quase estacionários localizados nos oceanos Pacífico Sul e Atlântico Sul (figura 10), são as principais fontes de energia para o deslocamento das massas de ar tropicais e marítimas. Classificam-se como quase estacionários em função das variações sazonais de temperatura, ora se afastando, ora se aproximando-se do continente.

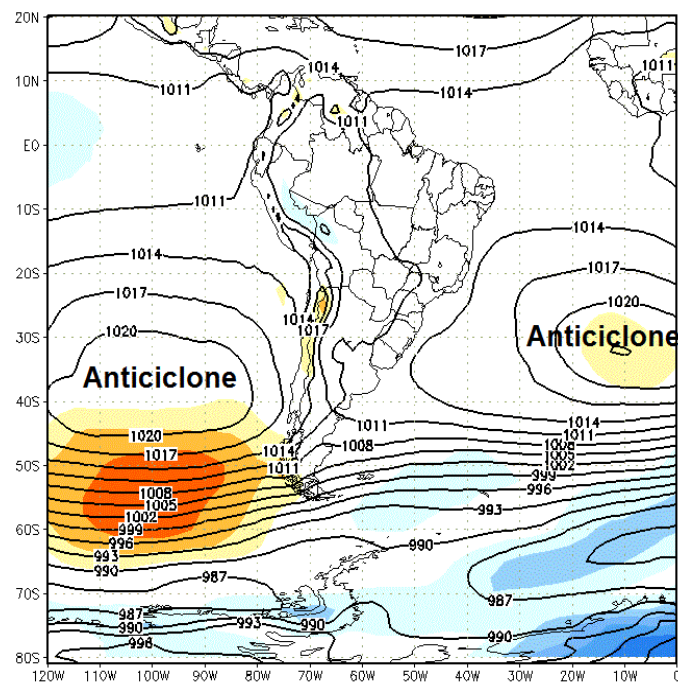


Figura 10 – Mapa de pressão média ao nível do mar, para elucidar a localização média dos Anticiclones que atuam nos oceanos Pacífico Sul e Atlântico Sul.

Fonte: CPTEC/INPE

O anticiclone do Atlântico Sul, desempenha um papel importante sobre o clima do Brasil, uma vez que encontra maior facilidade de penetração. O que já não ocorre com escoamento do Anticiclone do Pacífico, que acaba sendo barrado pela Cordilheira dos Andes. A barreira topográfica impede o avanço das massas tropicais do Pacífico em direção ao interior do Brasil (NIMER,1989). Entretanto, o continente pode

eventualmente ser invadido por massas polares, oriundas do oceano Pacífico, que atuam mais precisamente em regiões serranas da Argentina.

Outro fator importante é a Baixa ou Depressão do Chaco, uma vez que no verão sofre um incremento devido ao aquecimento no continente, propiciando aquecimento nos níveis inferiores da troposfera (cerca de 1500m). Explica-se tal acontecimento pelo centro de Baixa Pressão se localizar entre os anticiclones, os quais prevalecem tanto no inverno quanto no verão. Devido a origem dinâmica, o centro de Baixa pressão, possui mobilidade, mas sua posição média reside sobre a região do Chaco, nos limites Brasil-Bolívia.

Já na região equatorial da AS em decorrência a convergência dos ventos alísios de nordeste no HN e os de sudeste no HS, dar-se ênfase a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), considerada como principal fator gerador de precipitação sobre a região central do globo terrestre. Esse sistema é visualizado como uma banda de nuvens convectivas que se deslocam de leste para oeste ao longo da região equatorial. E o ar úmido que é transportado pela ZCIT do oceano Atlântico, chega até a Amazônia e em decorrência da barreira topográfica montanhosa, mantêm-se úmido e desloca-se em direção ao sul do continente paralelo à Cordilheira dos Andes (CAVALCANTI, et al., 2009).

Esse escoamento para o sul é então chamado de Jato de baixos Níveis (JBN), e tem características de ventos fortes a uma altura de mais ou menos 1500 m de altura (850 mb). E acaba influenciando outros dois grandes sistemas. O primeiro é a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), constituída por uma zona de convergência alongada, desenvolvida sobre o continente sul-americano na troposfera inferior, responsável por uma intensa convecção. A ZCAS pode ser identificada na composição de imagens de satélite, como uma fenda de nebulosidade com orientação Noroeste-Sudeste, se estende desde o Sul da região amazônica em direção ao Sudeste do Brasil, até parte da região central do Atlântico Sul (VUILLE et al., 1998; SATYAMURTY et al., 1998; KOUSKY apud ROCHA & GANDU, 2002).

E o segundo em regiões como a do Paraguai, o Norte da Argentina e o Sul do Brasil, em que o transporte de calor e umidade ocasionam súbito desenvolvimento dos Complexos Convectivos de Mesoescala (CCMs – Figura 1a), no período de novembro a abril (VELASCO & FRISCH, 1987).

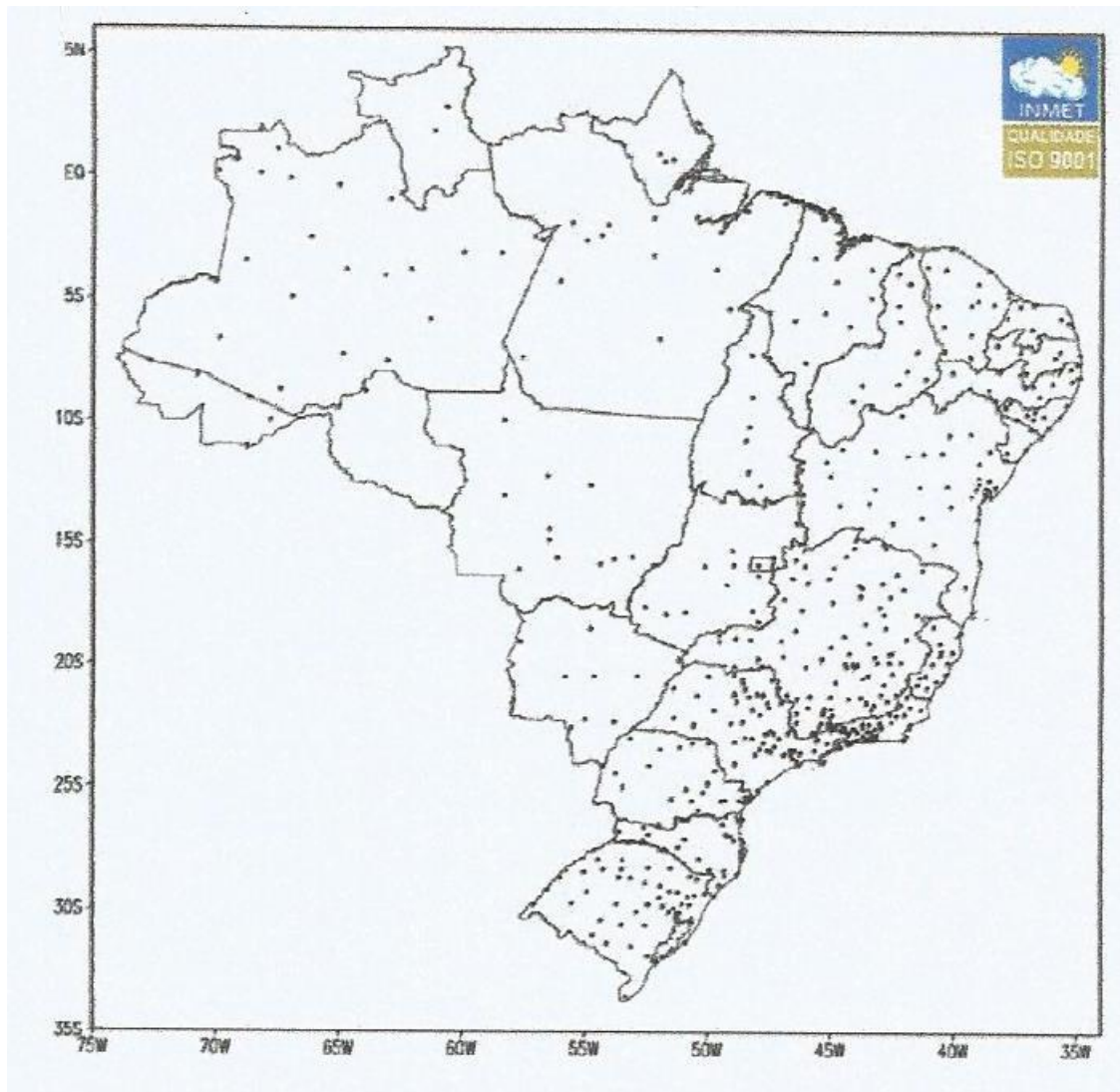
Em altos níveis da troposfera sobre a AS, surge um sistema fechado de circulação anticiclônica, chamado de Alta da Bolívia, com atuação no período do verão, este sistema tem sua dinâmica acoplada à Baixa do Chaco (Figura 1b).

A passagem de frentes frias, são consideradas como o evento mais comum do tempo atmosférico sobre a AS. Sua profunda penetração é uma das indicações das fortes interações que ocorrem entre os trópicos e as médias latitudes no Sul do continente, são responsáveis por grande parte da chuva no Norte da Argentina, Uruguai, Paraguai, Sul, Sudoeste, Sudeste e Centro-Oeste do Brasil, além da Bolívia e Sul do Peru. Associado ao deslocamento das frentes frias tem-se os ciclones extratropicais, estes possuem dois centros de máxima atividade ciclônica sobre a AS; o primeiro sobre o Uruguai e o segundo sobre a costa Sudeste da Argentina (GAN & RAO, 1991; SINCLAIR,1994).

Enfim, sabe-se que ter um conhecimento inicial da dinâmica destes sistemas é importante para uma análise detalhada das características de tempo e clima existentes nas diferentes regiões do Brasil.

2.2 Regime de Precipitação, Vento, Insolação e Nebulosidade - Brasil

Neste tópico uma discussão em relação a climatologia das médias anuais de precipitação, vento, insolação e nebulosidade será apresentada. Os dados meteorológicos utilizados, são médias históricas compreendidas no período de primeiro de janeiro de 1961 a 31 de dezembro de 1990, correspondentes a 394 estações meteorológicas de superfície do INMET. O mapa 1 ilustra a distribuição espacial das estações meteorológicas, os dados apresentados estão publicados e encontram-se disponíveis (Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990:INMET, 2009).



Mapa 1: Distribuição espacial das 394 estações meteorológicas utilizadas para calcular as normais climatológicas para o período de 1961-1990.

- **Precipitação:** a região Noroeste do Brasil é considerada a mais chuvosa, essa região, inclui grande parte da bacia Amazônica e apresenta volumes de precipitação média variando entre 2450 e 3450 mm/ano. Em contrapartida, as áreas mais secas do continente estão situadas na região nordeste do Brasil, com precipitações inferiores a 450mm/ano, no norte do estado da Bahia (Figura 11).

Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990 Precipitação acumulada mensal e anual (mm)

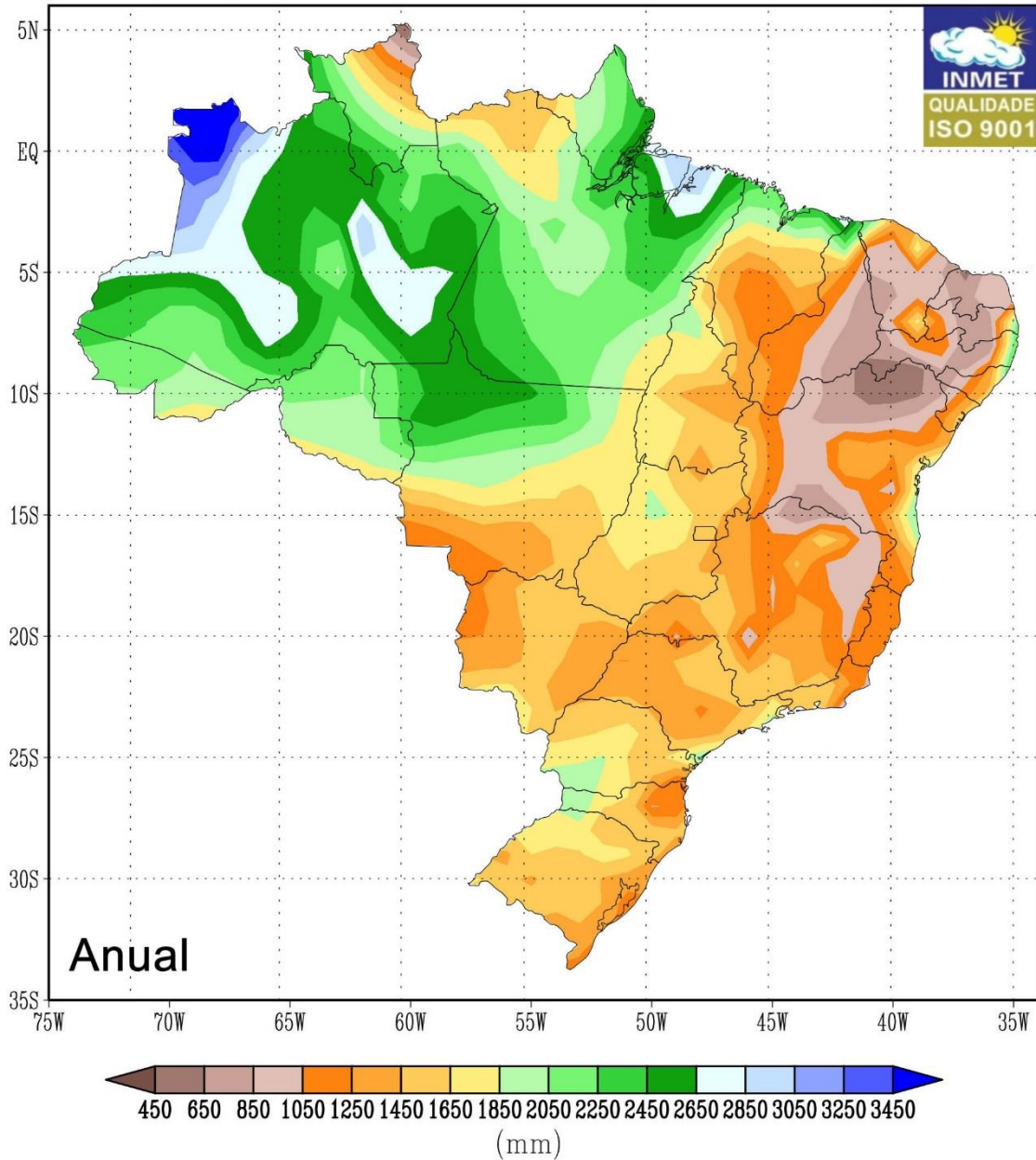


Figura 11 – Precipitação média anual (mm) calculada entre 1961-1990 com base em análises diárias de precipitação no Brasil.

Fonte: INMET (2009).

- **Vento:** Em relação a climatologia do vento, o litoral da região Nordeste do Brasil é onde os ventos tem maior intensidade, obtendo valores médios da ordem de 5,5 m/s, seguido do litoral Norte e Sul do Brasil, com valores médios variando entre 2,5 e 3,5 m/s (Figura 12).

Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990 Vento a 10 metros

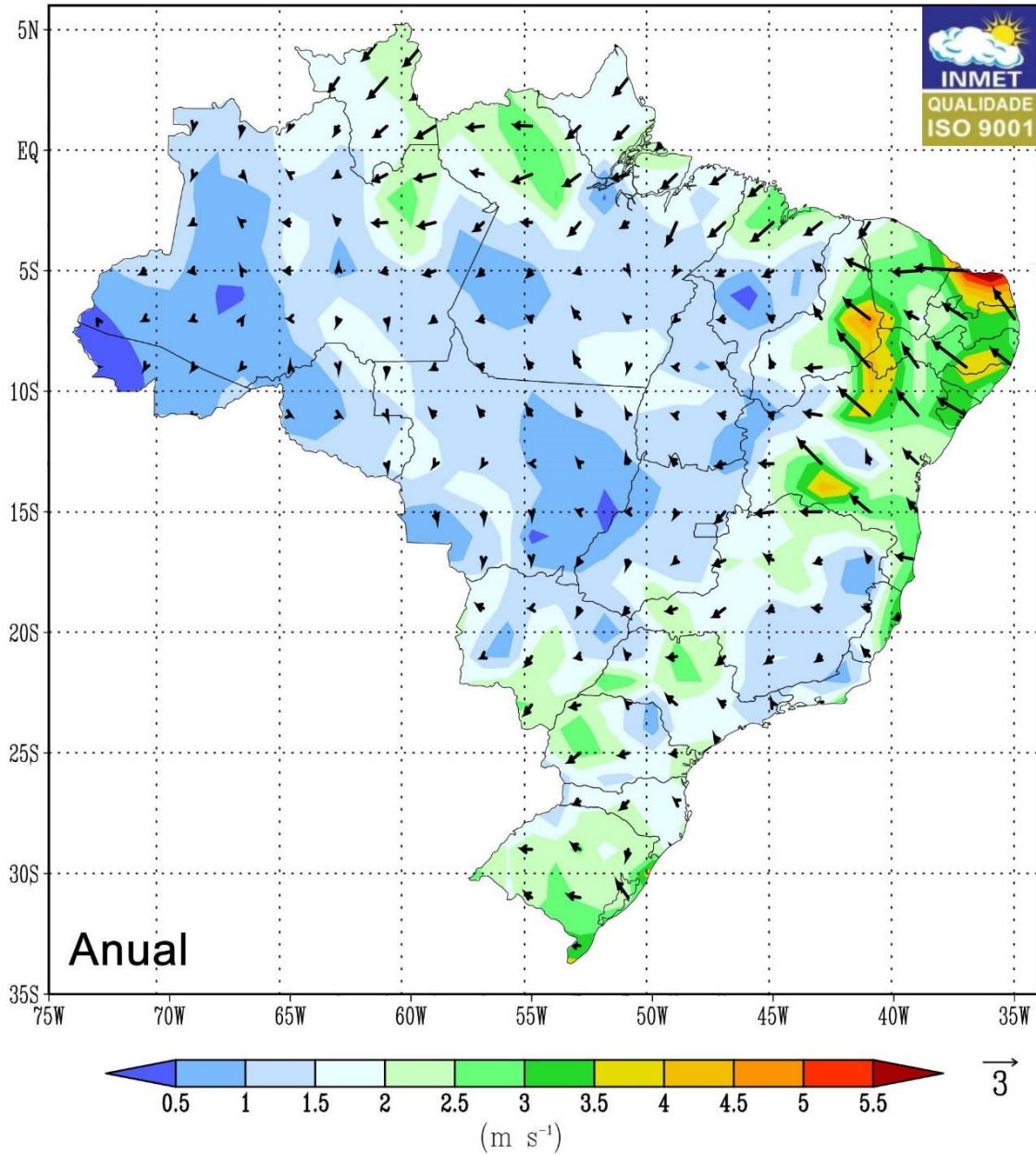


Figura 12 – Vento média anual (m/s) calculada entre 1961-1990 com base em análises diárias de vento no Brasil.

Fonte: INMET (2009).

- **Insolação:** Em relação a climatologia da insolação total, conforme a figura 13, na região Nordeste do Brasil são observados os maiores valores desta variável, acompanhada da região central e sudeste, obtendo valores médios da ordem de 2600

a 3000 horas/ano, seguido de algumas áreas do Sul, com valores médios de 2200 e 2800 horas/ano (Figura 13).

Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990 Insolação Total (horas)

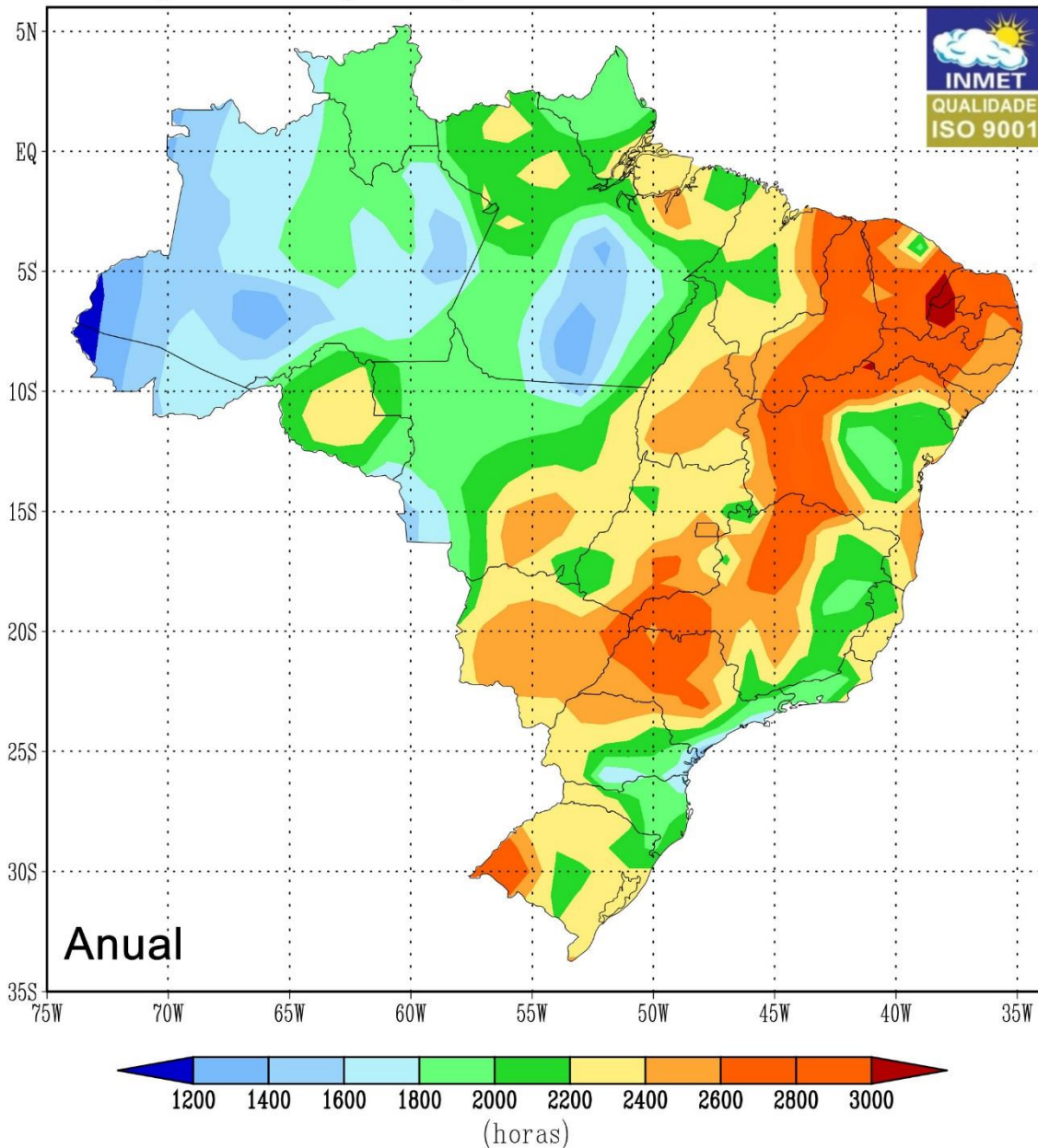


Figura 13 – Insolação média anual (horas) calculada entre 1961-1990 com base em análises diárias de insolação no Brasil.

Fonte: INMET (2009).

- **Nebulosidade:** de acordo com as normais climatológicas, a região Noroeste do Brasil apresenta os maiores valores (08-09 decimos de nebulosidade) (Figura 14), fato este que converge com as figuras 11 e 13, referente as precipitações e insolação.

Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990 Nebulosidade (décimos)

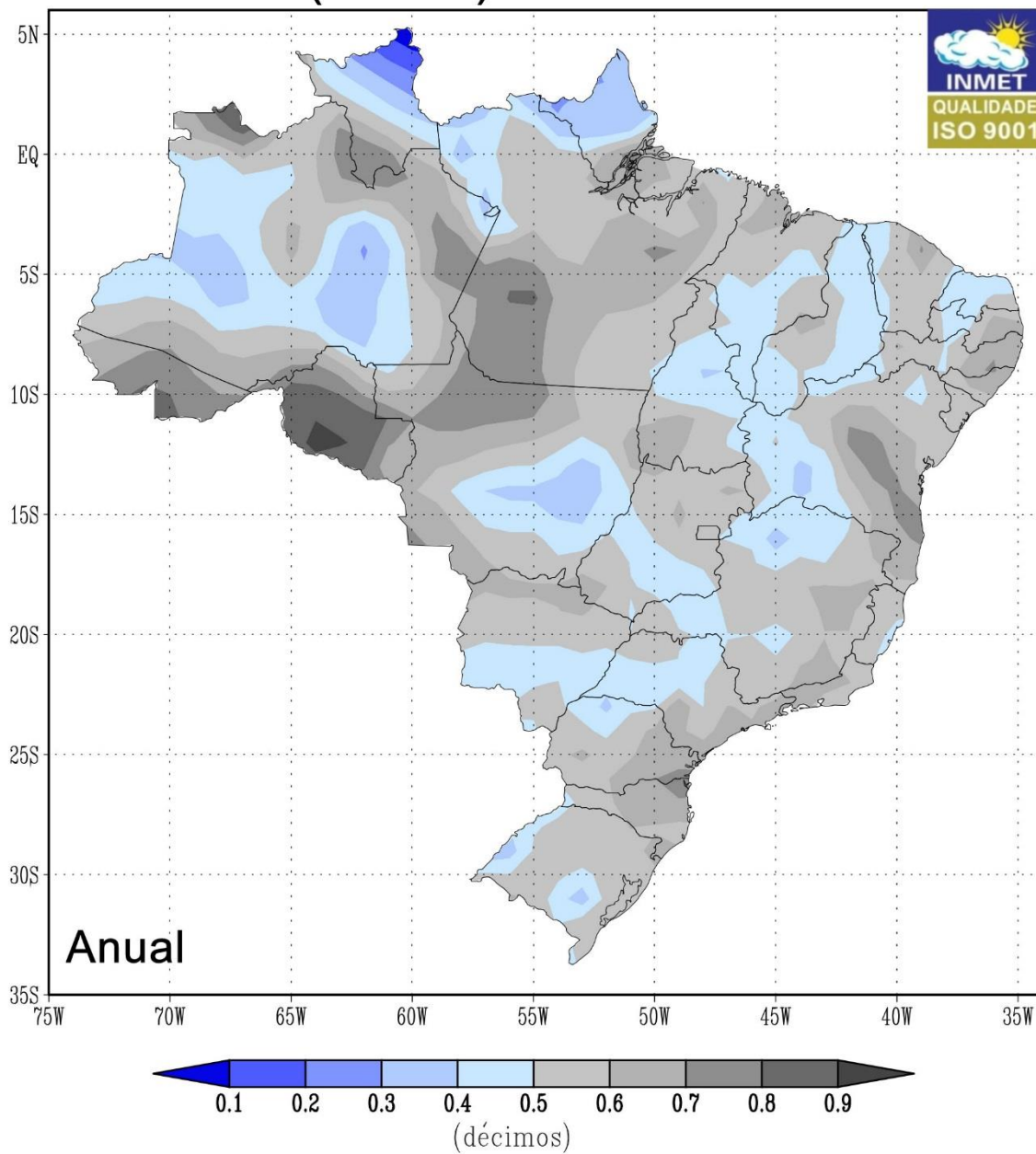


Figura 14 – Nebulosidade média anual (décimos) calculada entre 1961-1990 com base em análises diárias de nebulosidade no Brasil.

Fonte: INMET (2009).

3. CLASSIFICAÇÃO DOS PRINCIPAIS SISTEMAS ATMOSFÉRICOS

O Brasil apresenta grande extensão latitudinal e longitudinal com grandes contrastes relacionados a ocupação e tipo de solo, tipo de vegetação e topografia.

Para se ter uma visão de escala sinótica do assunto, é conveniente que se classifique os sistemas atuantes em função de subdivisão geográfica regional: Norte, Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e Sul.

Os principais mecanismos físicos que controlam o clima no Brasil são a **ZCIT (Zona de Convergência Intertropical)** que possui uma grande variabilidade espaço-temporal, decisiva nas condições de tempo e clima; os **Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCANs)** que atuam na vizinhança do Nordeste do Brasil; a **ZCAS (Zona de Convergência do Atlântico Sul)**; **Alta da Bolívia(AB) AB** ; **Anticiclone do Atlântico Sul e do Pacífico Sul**; **Baixa do Chaco**; **Altas Pressões Polares**; **Baixas Pressões Equatoriais**; **Jatos de Altos Níveis**, dentre eles **Jato Subtropical e Jato Polar**; **Massas de ar**. Tais mecanismos serão descritos a seguir.

3.1 Sistemas Atmosféricos de Grande Escala

Os fenômenos meteorológicos que mais afetam o tempo no dia a dia, encontram-se na chamada GRANDE ESCALA. Esses sistemas têm dimensões maiores que algumas centenas de quilômetros e duração da ordem de um dia a meses. Nela se enquadram os furacões, as frentes frias, os ciclones e anticiclones, e as "ondas longas associada aos ventos de oeste". Esses fenômenos têm também um importante papel na determinação das características climáticas e sazonais nas diversas regiões do globo. A seguir encontra-se uma descrição dos fenômenos de grande escala.

- Frentes e Sistemas Frontais

As frentes são definidas como a região de transição entre duas massas de ar com propriedades físicas distintas, as regiões sul e sudeste do Brasil são consideradas, como frontogenéticas, ou seja, regiões onde as frentes podem formar-se ou intensificar-se. O encontro de duas frentes (quente e fria) é chamado de sistema frontal. Um sistema frontal clássico é geralmente composto de frente fria, frente quente e um centro de baixa pressão na superfície chamado ciclone. Um sistema como este está representado abaixo na Figura 15 (a). Na imagem realçada de satélite GOES-13 [Figura 15 (b)] é possível observar a instabilidade relacionada a frente sobre os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina.

No verão, as frentes frias, ao se formarem no sul do país, podem eventualmente associar-se a um sistema de baixa pressão em superfície sobre o Paraguai, conhecido como a Baixa do Chaco, e se intensificar. No inverno, nota-se um contraste térmico entre duas massas separadas pela zona frontal no interior do continente (Lemos e Calbete, 1996).

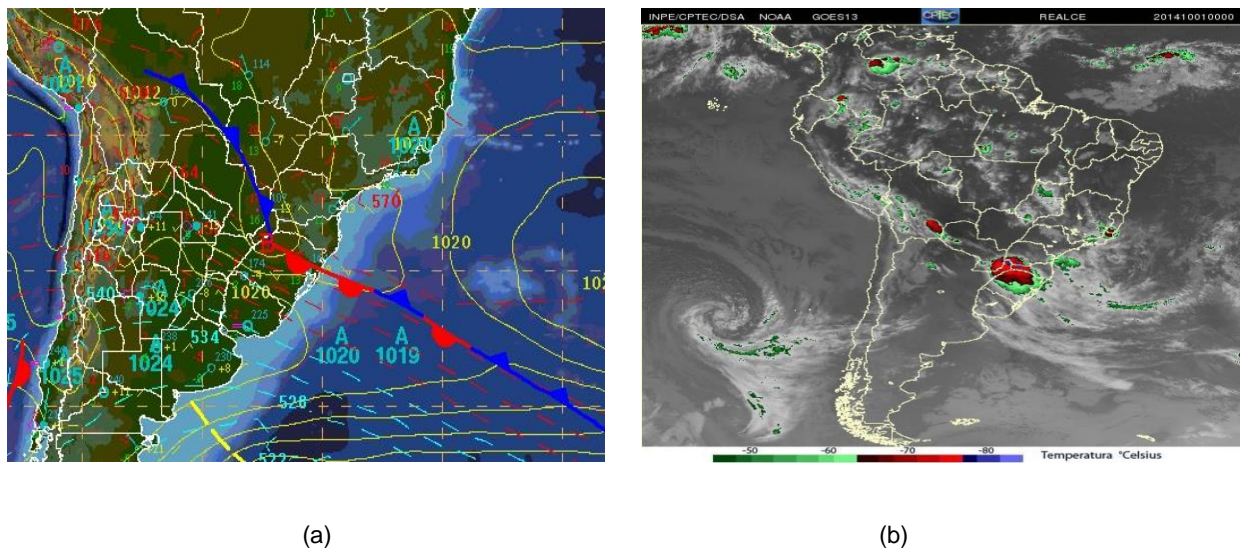


Figura 15 (a,b) – Representação de um SF em uma carta Sinótica em superfície e em uma imagem de Satélite do canal infravermelho.

Fonte: CPTEC/INPE

Os sistemas frontais atuam durante todo o ano sobre o Brasil, com maior ocorrência nas latitudes mais altas, com maior frequência no período compreendido entre os meses de abril a novembro.

- Centros de Ação

Os centros de ação correspondem as extensas zonas de Alta ou Baixa Pressão atmosférica (origem dos movimentos atmosféricos).

Existem dois tipos de centros: Centro de ação positivo – Alta pressão; Centro de ação negativo – Baixa pressão (Figura 16). Quanto ao seu tamanho, possuem dimensão horizontal, que vão de centenas a milhares de quilômetros e dimensão vertical, estas podem ir de centenas de metros até aproximadamente 15km.

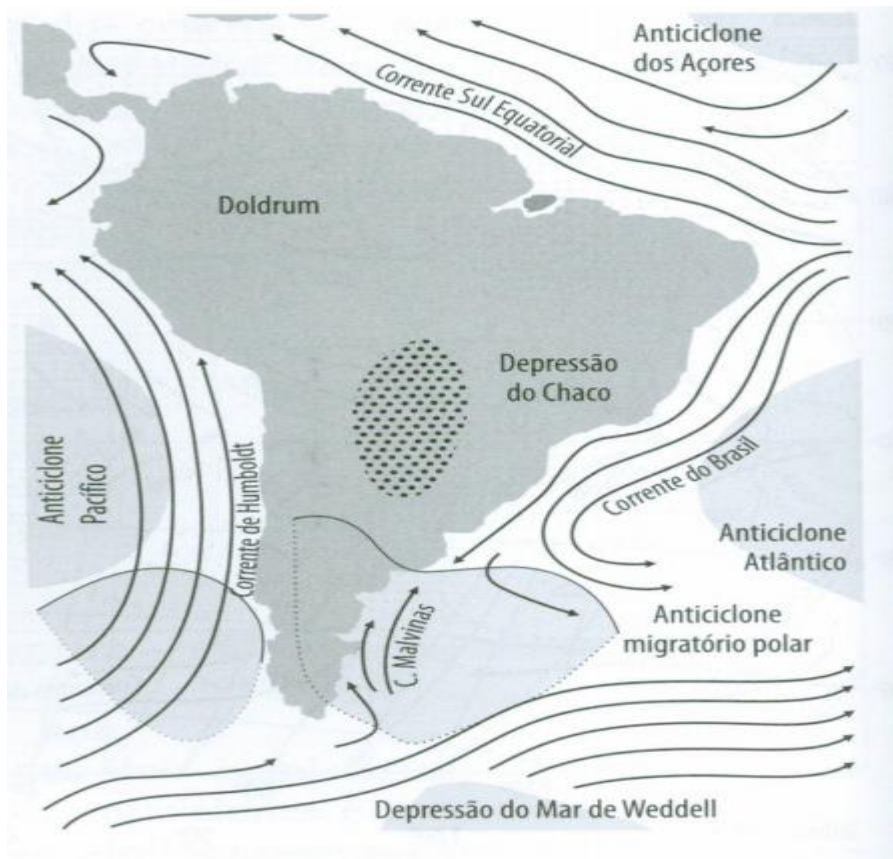


Figura 16 - Principais centros de ação atuantes no Brasil e na AS.
fonte: Danni-Oliveira, 1999, adaptado de Monteiro 1973

Centros de ação positivos

- Anticiclone dos Açores

Influenciam na América do Sul (Solstício de verão);

Afetam mais o norte e Nordeste da América do Sul.

- Anticiclone da Amazônia

Considera-se que mesmo sendo uma região de baixa pressão, a baixa Amazônica produz e exporta massas de ar.

- Anticiclone Semi-Permanente do Atlântico Sul

Grande influência no Brasil;

Apresenta variação sazonal (Verão - Mais próxima ao continente /Inverno – mais afastada do continente).

- Anticiclone Migratório Polar

Atuação no Extremo Sul da América do Sul (atinge 30°S no inverno e 60° no verão);

Centros de Ação negativos

- Depressão do Chaco ou Baixa do Chaco

Temperatura aumenta sobre os continentes no verão, formando um centro de baixa pressão (baixa térmica).

- Baixa Extratropical

Atua na faixa de latitude de 60° e apesar de afetar a dinâmica atmosférica, possui pouca influência na América do Sul.

3.1.1 Escoamento em Altos Níveis

- Jato Polar e Subtropical

A corrente de jato tem origem entre as massas de ar frio e as massas de ar quente, é caracterizada por um escoamento do vento zonal de oeste e atinge valores máximos de velocidade, ocasionado pela existência de gradientes meridionais de temperatura próximo à tropopausa (Palmén e Newton, 1969). Existem dois tipos de correntes de jato: o **Jato Subtropical (JST)** e o **Jato Polar ou da frente polar (JP)**. O JST (Figura 17a) é relativamente constante em sua posição, geralmente acima dos 13.000 m, na faixa de latitude que vai de 20° a 40°S. Por outro lado, o JP (Figura 17b) é altamente variável em sua posição dia a dia sobre uma ampla faixa de latitudes médias e subtropicais, oscilando entre 30° e 70° S, encontra-se entre 8.000 e 10.000 m de altitude.

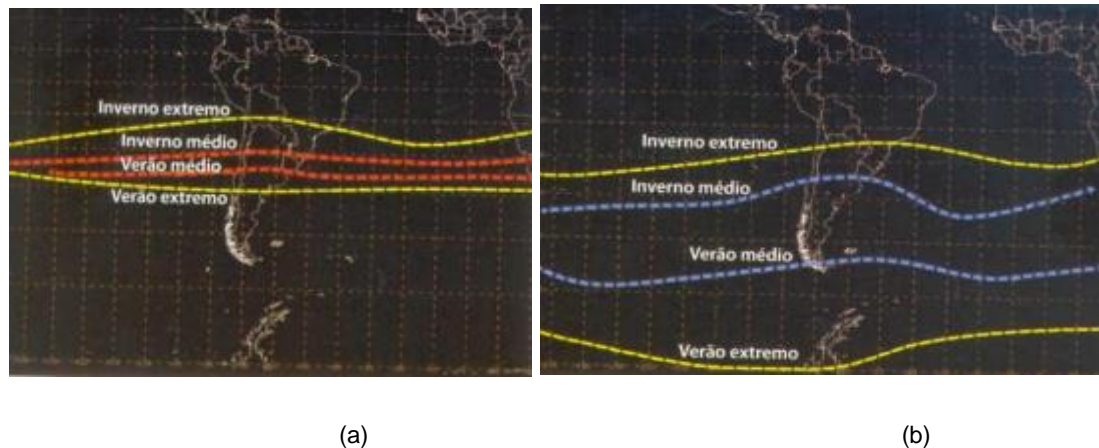


Figura 17 - Posição média e variabilidade para o inverno e verão dos JST (a) e JP (b). Linhas em amarelo indicam as posições extremas e as posições médias são dadas em vermelho (JST) e azul (JP).
fonte:IAG/USP

- Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis (VCANs)

Um dos principais sistemas meteorológicos que provoca alterações no tempo da região Nordeste do Brasil é o vórtice ciclônico da alta troposfera. Esse sistema, origina-se sobre o Oceano Atlântico entre a faixa de 20°W-45°W e 0°-28°S e quando penetra no Brasil produz tempo bom na região sul e central do Nordeste e chuvas no setor norte do Nordeste (Gan e Kousky, 1986). Os vórtices deslocam-se lentamente do oceano para o continente e vice-versa.

Os VCANs que atuam no NEB são observados nas estações de primavera, verão e outono, com máxima frequência no mês de janeiro. A vida média desse sistema pode variar de algumas horas até mais de duas semanas. Esses vórtices ciclônicos são caracterizados por um movimento descendente de ar frio e seco no seu centro e um movimento ascendente de ar quente e úmido na sua periferia, dependendo de sua intensidade e permanência, causam sérios problemas locais e regionais. Ao se deslocar para oeste sobre a Região Nordeste, este sistema com o centro sobre o interior do continente, inibe as precipitações e impede o deslocamento dos sistemas frontais para o litoral do nordeste, causando precipitações persistentes sobre a Região Sudeste. A figura 18 ilustra a representação do VCAN na Região Nordeste.

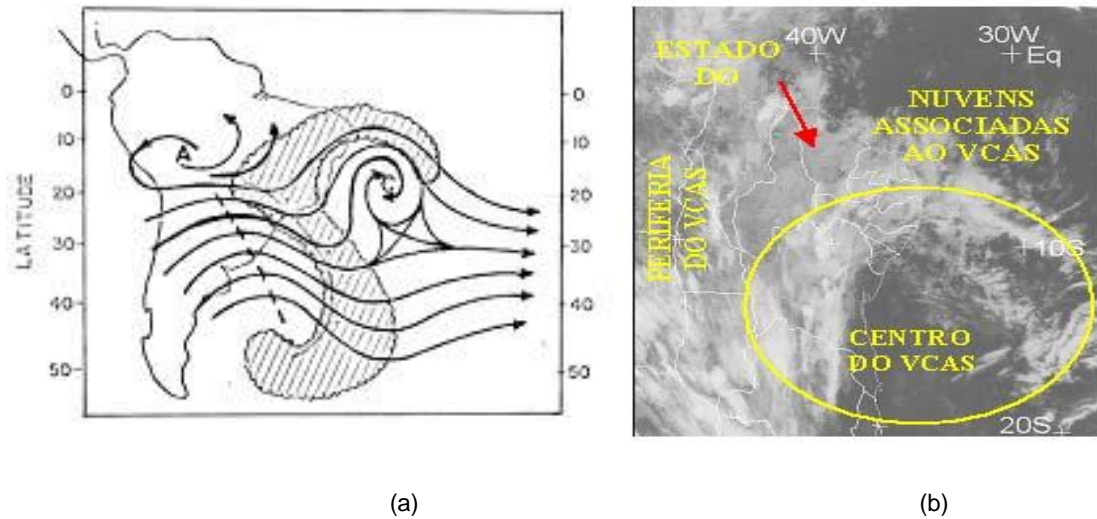


Figura 18 - (a) Representação de um VCAN no litoral do NEB; (b) Imagem de Satélite identificando um VCAN.

fonte: Funceme

- Vórtices ciclônicos em altos níveis de origem subtropical

Os VCANs (Figura 19) de origem subtropical possuem características sinóticas semelhantes ao citado anteriormente, com atuação nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil, por períodos de 1 ou 2 dias, provocam chuvas e ventos fortes.

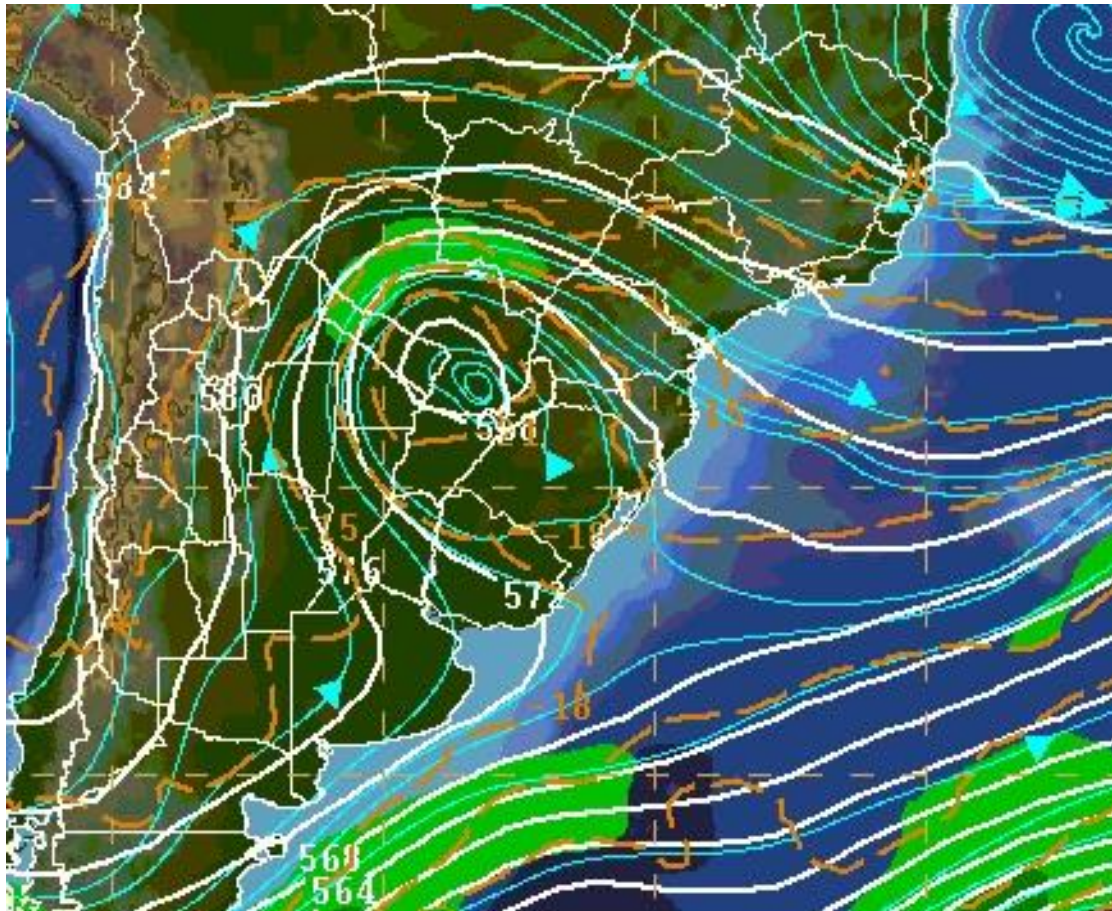


Figura 19 - Posicionamento de um VCAN em uma carta sinótica no nível de 500hPa sobre a região Sul do Brasil.

fonte: CPTEC/INPE

- *Alta da Bolívia (AB)*

É um anticiclone que ocorre na alta troposfera, no período de verão, sobre a América do Sul. Para entender a variabilidade na posição e intensidade da AB (Figura 20) é necessário perceber a interação que ela tem com outros sistemas sinóticos que agem na AS, durante o verão.

Entre o inverno e o verão a circulação da alta troposfera na AS se modifica de predominantemente zonal para meridional. O anticiclone se estabelece com centro no Altiplano Boliviano apenas durante o verão, para depois se deslocar para dentro do continente. Durante o outono, o anticiclone na alta troposfera se desloca em direção ao Oceano Atlântico, desaparecendo completamente no inverno e ressurgindo na primavera com centro na Amazônia.

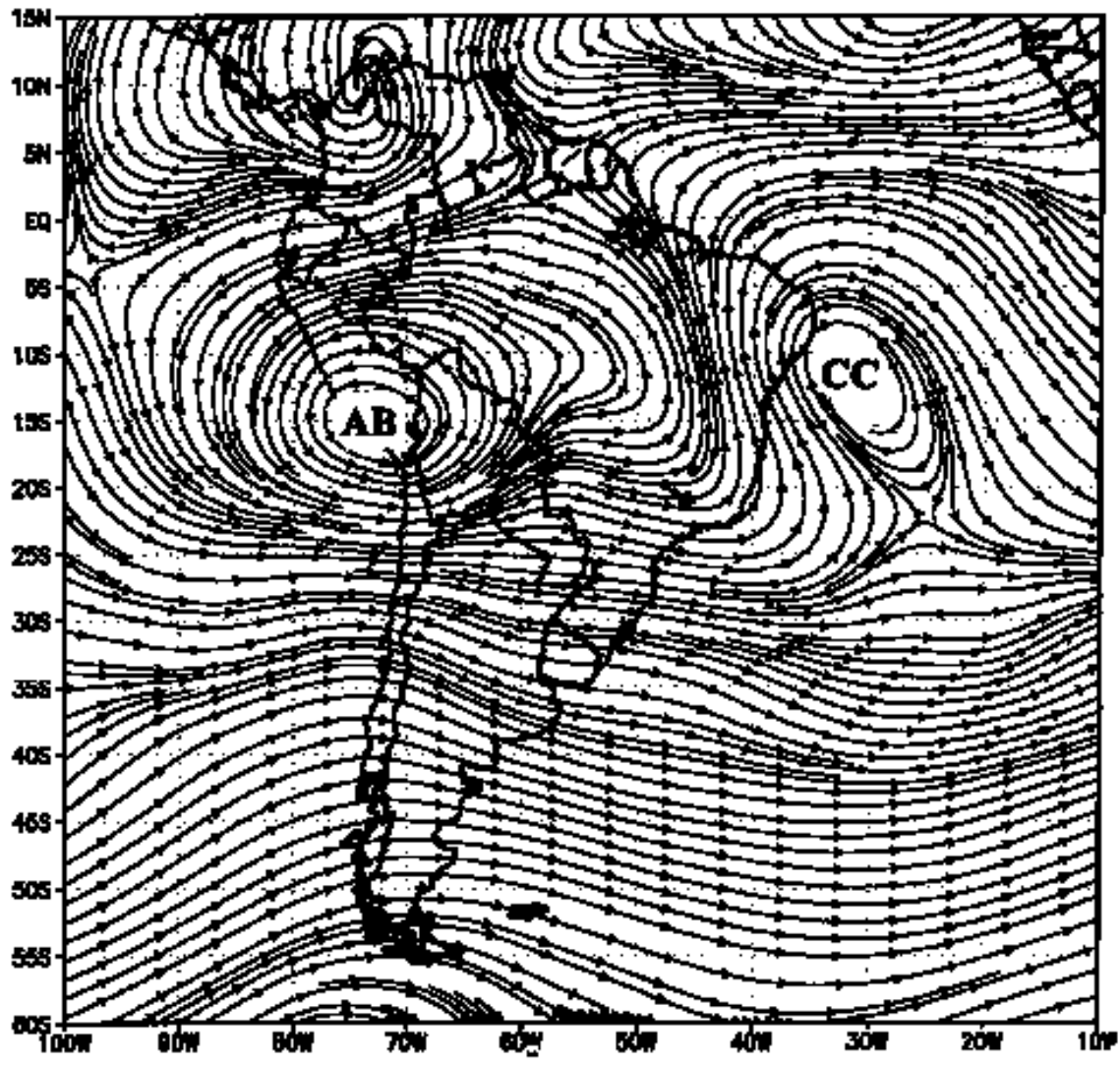


Figura 20 - Representação da AB no nível de 250hPa.

fonte: Climanálise, (CPTEC/INPE)

- Jatos de Baixos Níveis ao longo dos Andes (JBNs)

Os Jatos de Baixos Níveis (JBN - Figura 21) são fortes fluxos observados na baixa atmosfera ao longo de cadeias montanhosas, com ventos de velocidade máxima em torno de 2.000 metros. Ocorre ao lado leste das regiões com topografias elevadas e são associados ao movimento de grande escala, cobrem extensas áreas, como as Montanhas Rochosas nos EUA e os Andes na AS. Ambas as cadeias montanhosas estendem-se das regiões tropicais até as altas latitudes, bloqueando a circulação em baixos níveis no sentido zonal e provocando a canalização do vento.

Na AS são conhecidos como Jato de Baixos Níveis da AS (JBNAS), sendo um componente do sistema de monção da AS, que transporta umidade da Bacia

Amazônica, para a Bacia Paraná-Prata, afeta o tempo e o clima no leste dos Andes. Estes sistemas podem alterar, por meio do transporte de umidade, as condições de tempo, gerando fortes enchentes e tempestades.

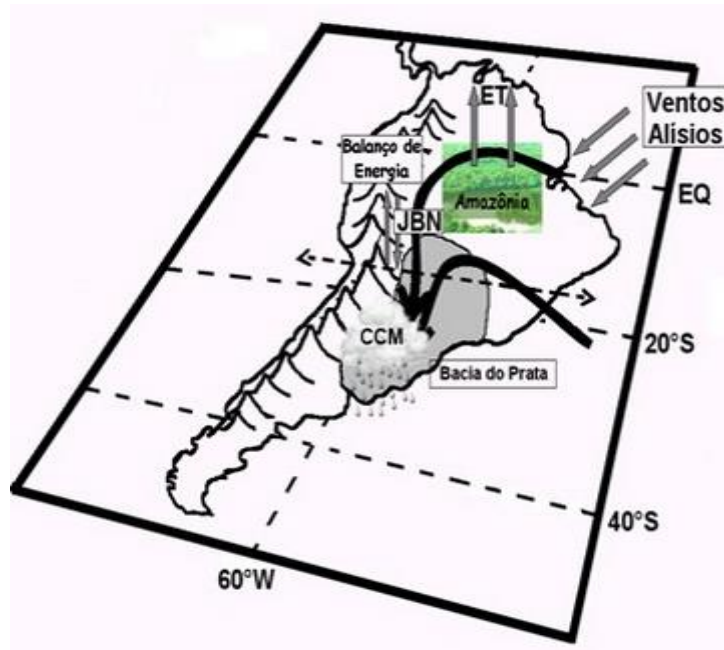


Figura 21 - Representação esquemática do escoamento e do transporte de umidade do JBN em 850hPa.

fonte:CPTE/INPE

O JBN (Figura 22) transporta a umidade oriunda do fluxo dos ventos alísios, passando sobre a região da Amazônia (onde pode adquirir mais umidade devido à evapotranspiração da floresta), sofrendo mudanças em relação a sua direção devido à barreira topográfica, se deslocando paralelo aos Andes em direção Sul/Sudeste do Brasil e Norte da Argentina.

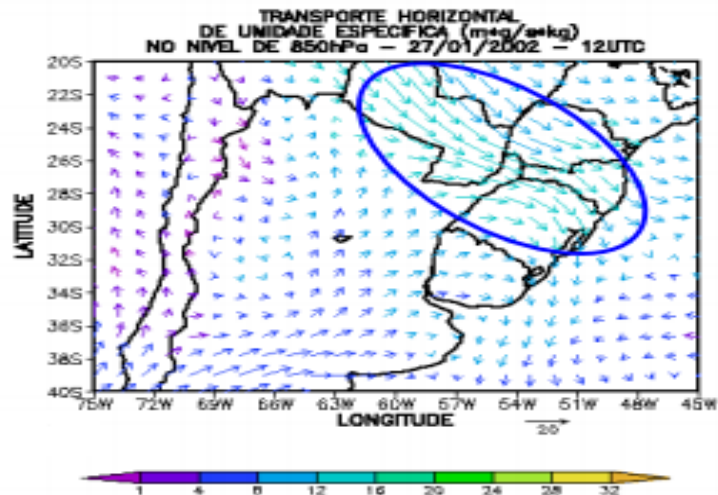


Figura 22 - Transporte horizontal de umidade específica gerado pelo modelo de mesoescala para o nível de 850hPa.

3.1.2 Perturbações Atmosféricas

- Zona de Convergência Intertropical (ZCIT)

A ZCIT (Figura 23) é um dos mais importantes sistemas meteorológicos atuando nos trópicos. Devido à sua estrutura física, a ZCIT tem se mostrado decisiva na caracterização das diferentes condições de tempo e de clima em diversas áreas da Região Tropical. A ZCIT está inserida em uma área onde ocorre a interação de características atmosféricas e oceânicas: i) zona de confluência dos Alísios (ZCA); ii) zona do cavado equatorial; iii) zona de máxima temperatura da superfície do mar; iv) zona de máxima convergência de massa; e v) zona da banda de máxima cobertura de nuvens convectivas, todas interagindo próximas à faixa equatorial. Apesar dessa interação, estas características podem não se apresentar ao mesmo tempo, sobre a mesma latitude. O conjunto de características associadas à ZCIT possui um deslocamento norte-sul ao longo do ano.

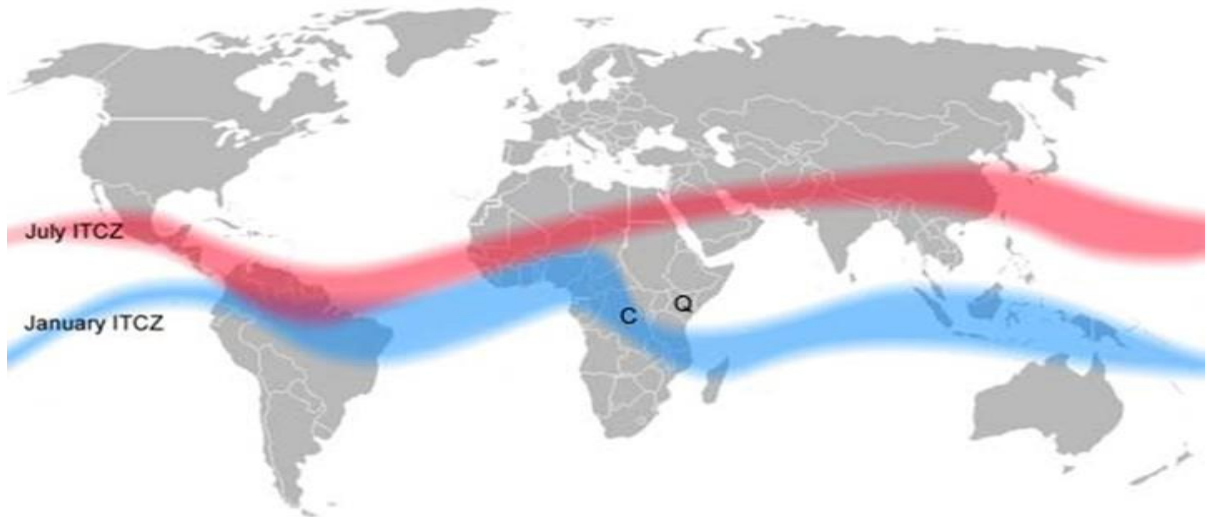


Figura 23 - Demonstração do Comportamento da ZCIT nos meses de Janeiro e Julho.

Fonte: Adaptado Wikipédia

A ZCIT (Figura 24) é o fator mais importante na determinação de quão abundante ou deficiente serão as chuvas no setor Norte do Nordeste do Brasil, oscilando entre os dois hemisférios (HN/HS) sazonalmente. Os principais meses de atuação desse sistema ocorrem entre Fevereiro e Maio.

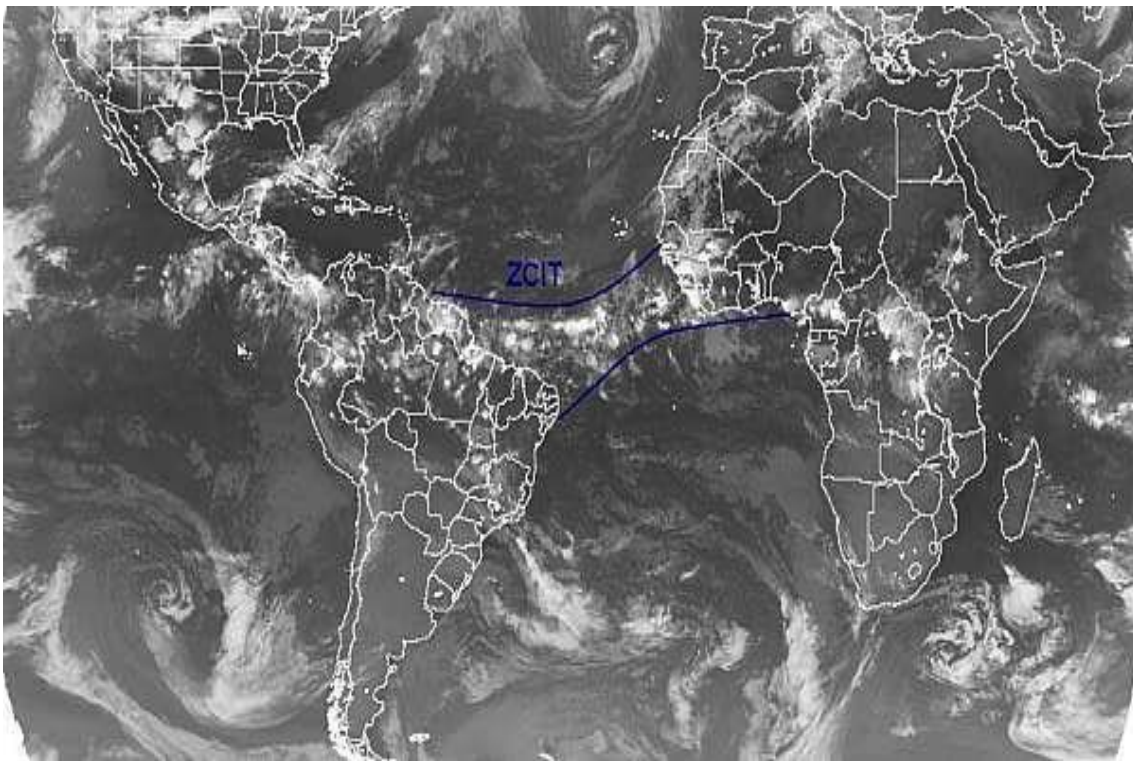


Figura 24 - Representação da ZCIT através de imagens de Satélite.

Fonte: CPTEC/INPE

- Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS)

A ZCAS (Figuras 25-26) é caracterizada como uma banda persistente de precipitação e nebulosidade orientada no sentido noroeste-sudeste, ocorre entre os meses de outubro a março, se estende desde o sul da Amazônia até o Atlântico Sul-Central.

Uma característica marcante desse sistema é a sua persistência, podem causar enchentes e deslizamentos de encostas em algumas regiões, ou se enfraquecer e inibir durante alguns dias a convecção.

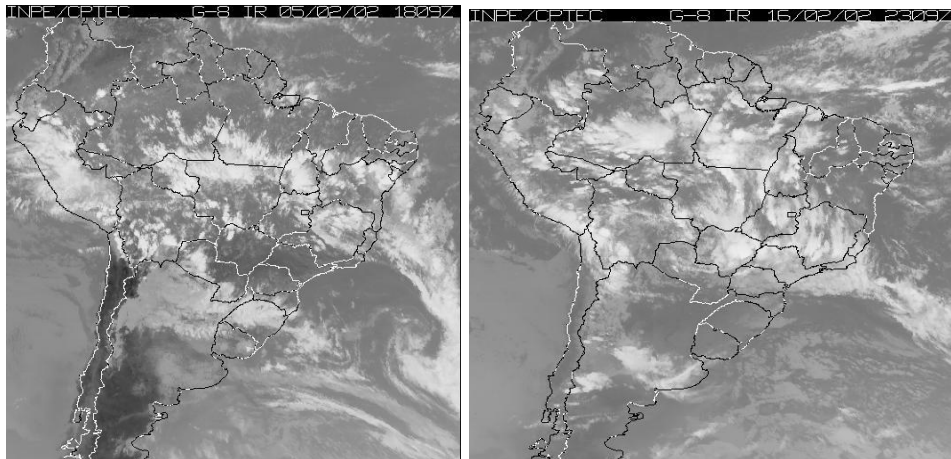


Figura 25 - Representação da ZCAS através de imagens de Satélite.

Fonte: CPTEC/INPE

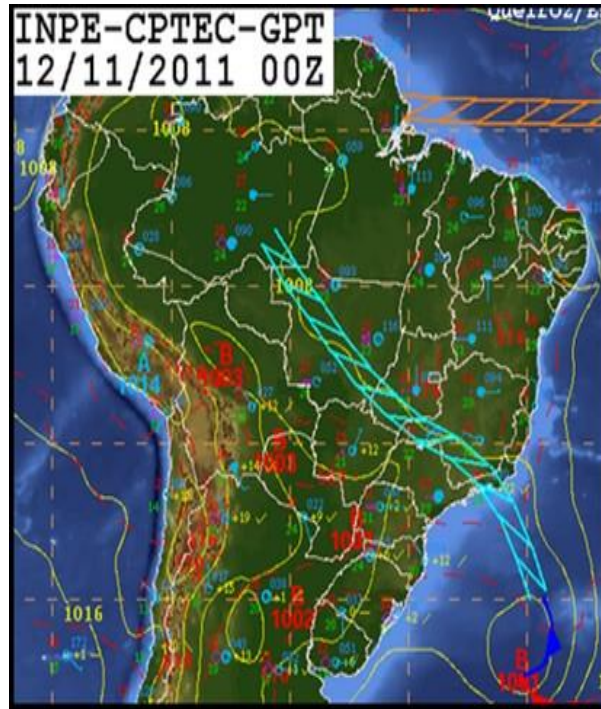


Figura 26 - Representação da ZCAS em uma carta sinótica de Superfície.

Fonte: CPTEC/INPE

- Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOLs)

O DOL é um outro fator de importância no regime de chuvas. Formam-se a partir de distúrbios no campo de pressão e vento (Figura 27), ocorrendo o ano inteiro, sendo mais frequentes em períodos de La Niña e nos meses de Junho, Julho e Agosto.

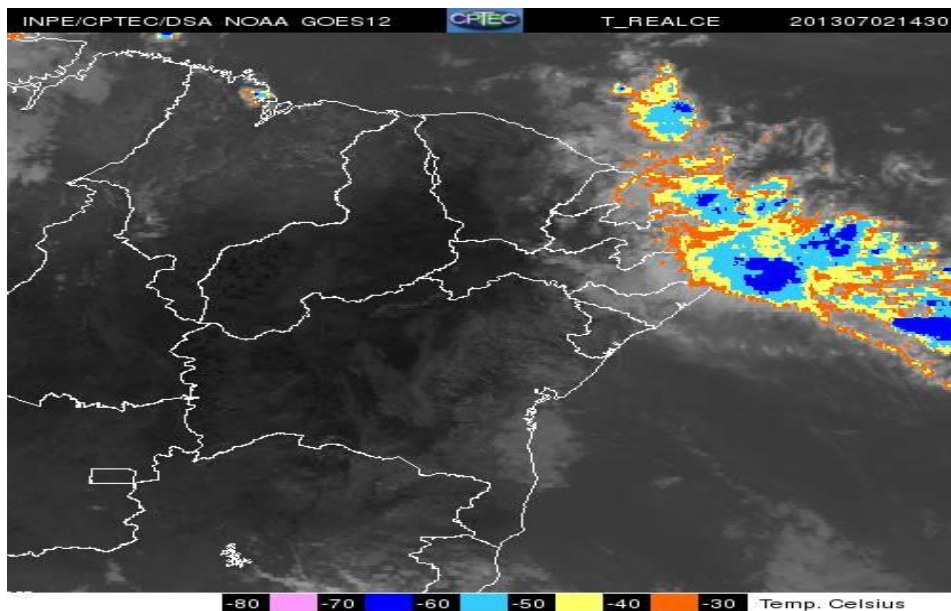


Figura 27 -Representação dos DOLs na imagem do satélite do canal IR.

3.2 Sistemas de Mesoescala

. Os fenômenos nessa escala, tem dimensões espaciais da ordem de 1 Km até cerca de 100 Km. A duração característica é da ordem de 1 hora a 1 dia. Nessa categoria estão enquadrados, por exemplo, os tornados, tempestades isoladas, linhas de instabilidade, conjuntos ou sistemas de nuvens, "ilhas de calor", além da brisa marítima-terrestre e de vale-montanha. Esses sistemas são muito importantes para o conhecimento regional do tempo, e estão muito ligados às características geográficas da região (montanhas, proximidade de oceano ou lagos, florestas, cidades, etc.). A seguir uma descrição sucinta dos principais fenômenos de mesoescala.

- Complexos Convectivos de Mesoescala no Brasil (CCMs)

Os complexos convectivos de mesoescala foram definidos por Maddox em 1980, com base nas características físicas observadas em imagens de satélite no canal infravermelho. Segundo o autor, para um sistema ser classificado como CCM, algumas condições devem ser satisfeitas (tabela 2).

Tabela 2 - Critérios e características físicas dos CCMs.

CRITÉRIOS	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS
<i>TAMANHO</i>	Temperaturas no canal Infravermelho menores que 32° C em uma área de 100.000 km ² , na região mais interna da nuvem deve apresentar temperaturas menores que -52° C numa área de 50.000 km ² .
<i>FORMA</i>	Formato Circular e Excentricidade maior que 0,7.
<i>TEMPO DE VIDA</i>	Superior a 6 horas.

O período de maior ocorrência dos CCMs é no verão, entre as latitudes de 15° e 30°S. A maior parte dos CCMs, que ocorrem nesta faixa de latitudes, tem um ciclo de vida típico, com início à noite ou de madrugada, chegando à sua máxima extensão durante a manhã e dissipando-se por volta do meio dia. Esse ciclo de vida revela uma forte dependência da situação geográfica do início dos sistemas, relacionada com a

topografia: a cadeia de montanhas dos Andes a oeste, o vale dos rios Paraguai e Paraná e, mais a leste a Serra do Mar. A circulação noturna, característica de vales, seria um dissipador das primeiras nuvens. Em contrapartida, grande parte dos CCMs se formam em associação com um fluxo de ar quente e úmido oriundo da Amazônia, muitas vezes na forma de jato de ar, com velocidade intensa a aproximadamente 2.000 m acima do nível do mar.

- Brisas Marítima e Terrestre

Quanto a questão do vento em menor escala, alguns fatores influenciam diretamente sua intensidade e deslocamento, como por exemplo: vegetação, relevo e obstáculos. Essas condições de superfície modificam seu comportamento, visto que, ele pode ser freado ou acelerado, ocasionando uma variação horizontal em sua velocidade. Alguns dos principais fatores que influenciam no regime dos ventos são (Dutra, et al., 2009):

- Variação da velocidade com a altura;
- Rugosidade do terreno, que é caracterizada pela vegetação, utilização da terra e construções;
- Presença de obstáculos nas redondezas;
- Relevo que pode causar efeito de aceleração ou desaceleração no escoamento do ar;
- Variações sazonais na distribuição de radiação recebida na superfície da Terra, resultando em variações sazonais na intensidade e duração dos ventos.

As brisas (marítimas e terrestres) são exemplos de circulações locais, podem ocorrer desde a micro até a mesoescala. Resultam do aquecimento e resfriamento diferenciais que se estabelecem entre terra e água, em função das diferentes capacidades de refletir, absorver e emitir o calor recebido do Sol, inerentes a cada tipo de superfície. O aquecimento do continente durante o dia se dá mais rapidamente que o do oceano, fazendo com que o ar se desloque da região de alta pressão atmosférica e menor temperatura (oceano) para baixa pressão e maior temperatura (continente). Já no período noturno devido ao fato do oceano ter uma maior capacidade calorífica o processo é invertido, ou seja, o oceano retém mais calor que o continente fazendo com que a direção da brisa passe a ser do continente para o oceano em superfície. Estas circulações do ar, representadas nas Fig.28 (a) e 28 (b) também ocorrem sobre leitos de rios, lagos e demais corpos d'água que possuam uma extensão territorial para o desenvolvimento deste processo (ATKINSON, 1981).

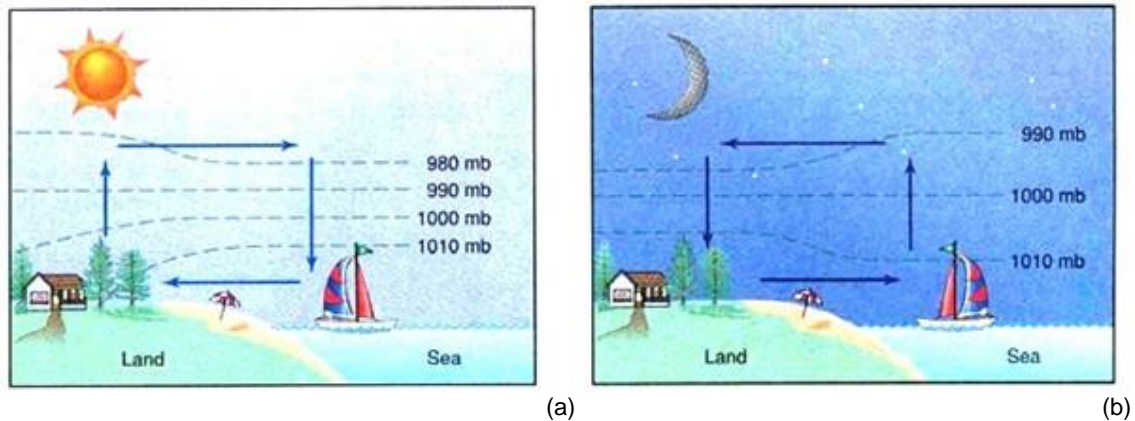


Figura 28 -Representação das Brisas marítima e terrestre.

Fonte: Moran et al.,1997.

- Brisas de Vale Montanha

Em regiões montanhosas, as encostas mais inclinadas e as partes mais estreitas dos vales, são aquecidas pelo sol de forma mais intensa que as vastas superfícies dos vales ou os picos. Estas condições conduzem a brisas de vale durante o dia e brisas de montanha durante a noite [Fig.29 (a) e (b)].

O ar em movimento ascendente é substituído pelo ar dos vales ou dos planaltos, com menor declive. Assim, o vento durante o dia surge habitualmente das partes mais baixas e sem declive, obrigando o ar a subir (Brisa de Vale). Durante a noite, o ar frio desce sobre as encostas para o vale. A brisa segue o percurso no sentido oposto. Vem das montanhas e dirige-se para o vale (Brisa de Montanha). Tal como nas brisas marítimas e terrestres, o ar que se move junto ao solo e ascende, em determinado período de tempo, tem que retornar e descer novamente.

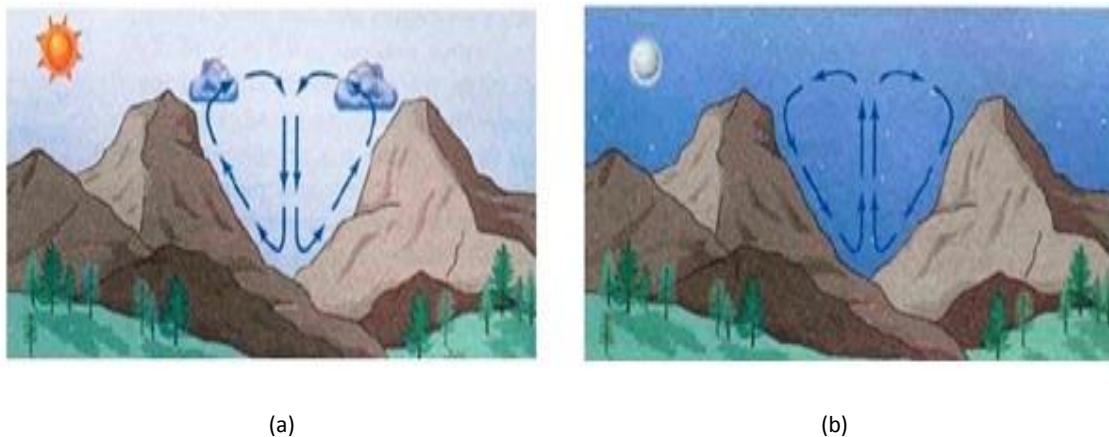


Figura 29 – Ilustração brisas (a) vale-montanha e (b) montanha-vale.

Fonte: Moran et al., 1997.

3.3 Sistemas de Escala Global

- El Niño-Oscilação Sul (ENOS)

O fenômeno ENOS, inclui as características oceânicas-atmosféricas, associadas ao aquecimento anormal do Oceano Pacífico Tropical. O ENOS, ou El Niño Oscilação Sul representa de forma mais genérica um fenômeno de interação atmosfera-oceano, associado a alterações dos padrões normais da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) e dos ventos alísios na região do Pacífico Equatorial, entre a Costa Peruana e no Pacífico oeste próximo à Austrália.

Além de índices baseados nos valores da TSM no Oceano Pacífico equatorial, o fenômeno ENOS pode ser também quantificado pelo Índice de Oscilação Sul (IOS), sendo esse representado pela diferença de Pressão ao Nível do Mar (PNM) entre o oceano Pacífico Central (Taiti) e o oceano Pacífico do Oeste (Darwin/Austrália). Valores negativos e positivos da IOS são indicadores da ocorrência do El Niño e La Niña respectivamente.

Em condições normais (Figura 30), as águas superficiais são relativamente mais frias no Pacífico Equatorial Leste, junto à costa oeste da América do Sul, e relativamente mais aquecidas no Pacífico Equatorial Oeste, próximo à costa australiana e região da Indonésia. Os ventos alísios sopram de Leste para Oeste, favorecendo a ressurgência próximo à costa oeste da América do Sul.

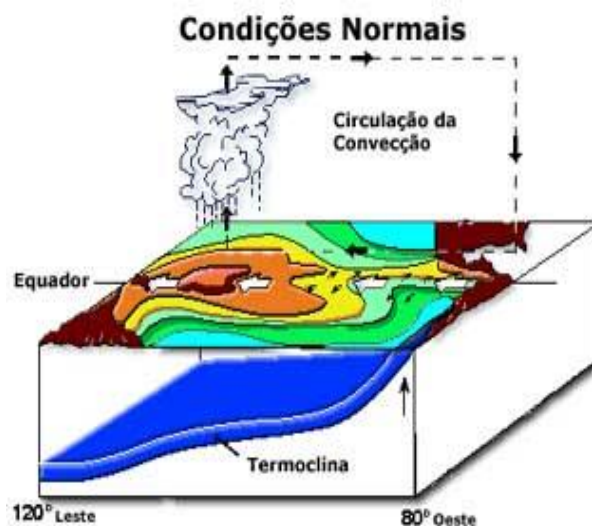


Figura 30 - Ilustração das condições Normais de TSM.

Fonte CPTEC/INPE

As condições que indicam a presença do Fenômeno El Niño (Figura 31) estão relacionadas ao enfraquecimento dos Ventos Alísios e o aumento da TSM no oceano Pacífico Equatorial Leste.

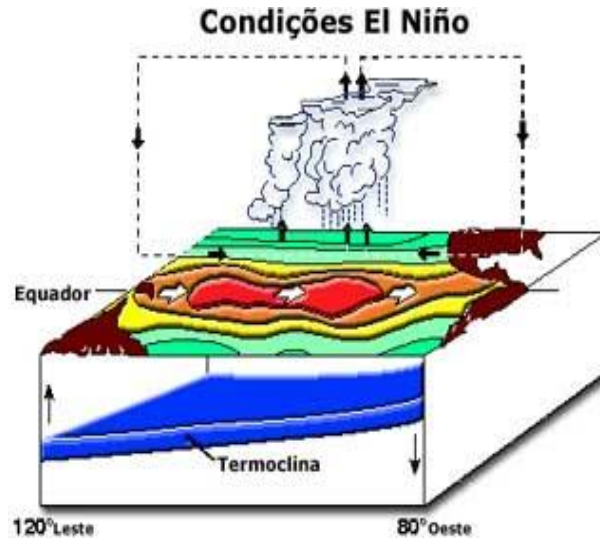


Figura 31 – Ilustração das condições de El Niño.

Fonte CPTEC/INPE

As condições que indicam a presença do Fenômeno La Niña (Figura 32) estão associadas à intensificação dos ventos alísios e a diminuição da TSM no Pacífico Equatorial Leste. As águas adjacentes à costa oeste da América do Sul tornam-se ainda mais frias devido à intensificação do movimento de ressurgência.

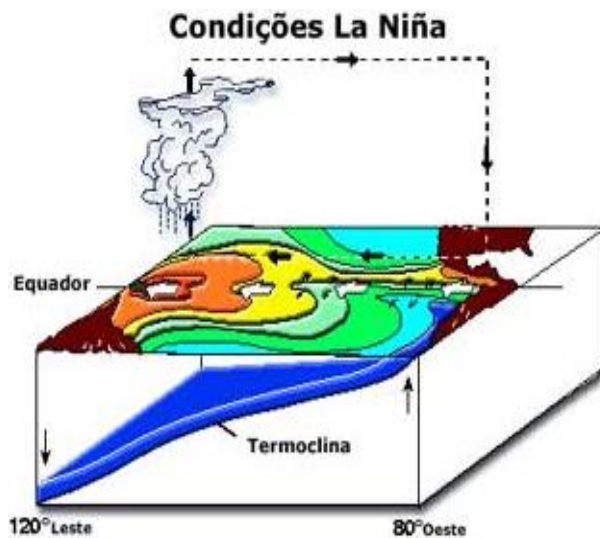


Figura 32 - Ilustração das condições de Lã Ninã.

Fonte CPTEC/INPE

- Temperatura da Superfície do Mar (TSM) - Oceano Atlântico Tropical

O fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS) sobre o Pacífico Equatorial, e o gradiente meridional de anomalias da TSM sobre o Atlântico Tropical, modulam conjuntamente uma grande parte da variância interanual do clima sobre a América do Sul. A combinação das circulações atmosféricas induzidas pelas distribuições espaciais de TSM sobre os oceanos Pacífico Equatorial e Atlântico Tropical, afetam o posicionamento latitudinal da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) sobre o oceano Atlântico, influenciando desta forma a distribuição da pluviometria sobre a bacia do Atlântico e Norte da América do Sul. No entanto, embora a variabilidade interanual das TSM e ventos sobre o Atlântico Tropical seja significativamente menor do que aquela observada sobre o Pacífico Equatorial, essas variáveis têm profunda influência na variabilidade climática sobre a América do Sul, principalmente sobre a Região Nordeste do Brasil (Hastenrath, 1984; Nobre and Shukla, 1996).

3.4 Interação Entre Escalas

Os fenômenos nas diferentes escalas são interdependentes. Assim, um determinado sistema meteorológico numa escala, normalmente só ocorre se certas condições numa escala maior são atingidas e vice-versa. Entretanto, essa separação dos fenômenos em escalas facilita bastante a determinação das causas principais de um fenômeno em particular.

Por exemplo, ondas longas de oeste (sistemas de grande escala – global) influenciam frentes e centros de baixa e alta pressão em superfície (escala sinótica). Conseqüentemente as frentes e os sistemas de pressão geram furacões e tempestades tropicais (dependendo do tamanho podem ser tanto de escala sinótica como de mesoescala). Brisas (mesoescala) geram precipitações locais.

Analisando inversamente, pequenos turbilhões (microescala) geram turbulência. Vórtices turbulentos geram movimento do ar (brisa), estes podem servir como forçante termodinâmica para intensificar um sistema de baixa pressão formando regiões ciclogênicas, as quais resultam na formação de ciclones e posteriormente movimentos maiores como a corrente de Jato de Baixos Níveis e assim por diante.

Além disso, a precipitação numa determinada região pode afetar as condições de tempo em outras regiões. Essas interações também são chamadas de teleconexões, baseadas em três processos físicos principais: as ondas atmosféricas, a continuidade

de massa e a mudança de fase da água, da fase gasosa para a fase líquida e/ou sólida (CAVALCANTI et al., 2009).

A tabela a seguir ilustra a intensidade e o tempo de atuação dos principais sistemas que ocorrem no território brasileiro.

Tabela 3 – Características dos principais fenômenos atmosféricos que ocorrem no Brasil.

SISTEMA METEOROLÓGICO	TIPO	REGIÕES DE INFLUÊNCIA	EFEITO NA PRECIPITAÇÃO	EFEITO NO VENTO	EFEITO NA RADIAÇÃO	PERIODICIDADE	PRINCIPAIS MESES DE OCORRÊNCIA
ZCIT - Zona de Convergência Intertropical -	Grande Escala	Região Nordeste do Brasil	Chuvvas Intensas	Menores valores de velocidade do vento	Menores valores de radiação	Vários dias, podendo alcançar longas distâncias	Fevereiro a Maio.
Anticiclone Subtropical Atlântico sul	Grande Escala	Região Nordeste, Sudeste.	- Ausência de chuvas - Contribui para o transporte de umidade para continente, favorecendo precipitação no verão.	- Ventos no quadrante Leste - Ventos mais fortes a Leste do sistema.	- Períodos de veranico - Dias de céu claro.	Vários dias e possui maior ocorrência no inverno	Verão e Inverno.
Alta da Bolívia	Grande Escala	Todas as regiões (Norte, Nordeste)	Poucas chuvas.	Ventos fracos.	Maior atividade convectiva;	Vários dias.	Verão
CCM – Complexo Convectivo Mesoescala	Mesoescala	Todas as regiões	Chuvvas intensas e rápidas.	Ventos fortes inicialmente a passagem do sistema.	Nebulosidad e, sem radiação.	Horas.	Principalmente no verão

SF - Sistema Frontal	Grande Escala	Sul, Sudeste e parte do NEB.	Chuvas	Inicialmente ventos fortes; Após a passagem, ventos fracos.	Sem valores de radiação	Dias a semanas	Ao longo do ano.
LI - Linha de Instabilidade	Mesoescala	Norte e Nordeste	Chuvas fortes e rápidas	Ventos moderados	Sem radiação.	Horas. Formação no final da tarde, início da noite.	Ao longo do ano.
VCAN sub - Vórtices Ciclônicos Altos Níveis	Mesoescala	Sul e Sudeste	Sem chuvas	Ventos mais intensos em superfície	Sem radiação	Dias a Semanas	Qualquer época do ano.
VCAN trop. - Vórtices Ciclônicos Altos Níveis Tropicais	Mesoescala	Nordeste	Chuvas	Ventos mais intensos em superfície	Sem radiação	Dias a Semanas	Primavera, Verão e Outono.
ZCAS - zona de Convergência do Atlântico Sul	Grande Escala	Sul da Amazônia até Sudeste do Brasil	Chuvas intensas	Ventos Moderados e Fortes	Sem radiação	Dias	Verão
Brisas Marítima e Terrestre	Escala Local	Regiões litorâneas	Chuvas rápidas	Ventos Moderados	Períodos sem radiação	Horas	Qualquer época do ano (depende da região)
ZCOU - Zona de convergência do Atlântico Sul	Grande Escala	Sul da Amazônia até Sudeste do Brasil	Chuvas intensas	Ventos Moderados e Fortes	Sem radiação	Dias	Verão

A escala de um determinado fenômeno meteorológico, refere-se às suas dimensões espaço/temporal "típicos". As escalas dos movimentos atmosféricos podem

ser classificadas, a grosso modo, conforme a Figura 33. Existem outras classificações mais precisas e detalhadas, entretanto essa figura dá uma boa noção dessa divisão.



Figura 33 – Escalas dos movimentos atmosféricos.

(Fonte: IAG/USP)

A menor escala que tem importância meteorológica é a chamada MICROESCALA. Os fenômenos que ocorrem nessa escala espacial, tem dimensões variando entre 1 metro a 1 Km, e duração da ordem de 1 segundo até cerca de 1 hora. Nessa categoria estão as nuvens, quando consideradas individualmente, e fenômenos de “turbulência”, que são bastante afetados pelas características da superfície, tais como, as trocas de calor e umidade entre o solo e os primeiros metros mais baixos da atmosfera. Na microescala estuda-se, por exemplo, os processos de formação de gotas de nuvem e de chuva, a dispersão de poluentes, e as interações no sistema solo-plantas-atmosfera. A escala seguinte na classificação é a MESOESCALA, com dimensões espaciais da ordem de 1 Km até cerca de 100 Km e duração temporal da ordem de 1 hora a 1 dia. Os fenômenos meteorológicos que mais afetam o tempo no dia a dia, encontram-se na chamada GRANDE ESCALA, os fenômenos dessa escala têm dimensões maiores que algumas centenas de quilômetros e duração da ordem de um dia a meses.

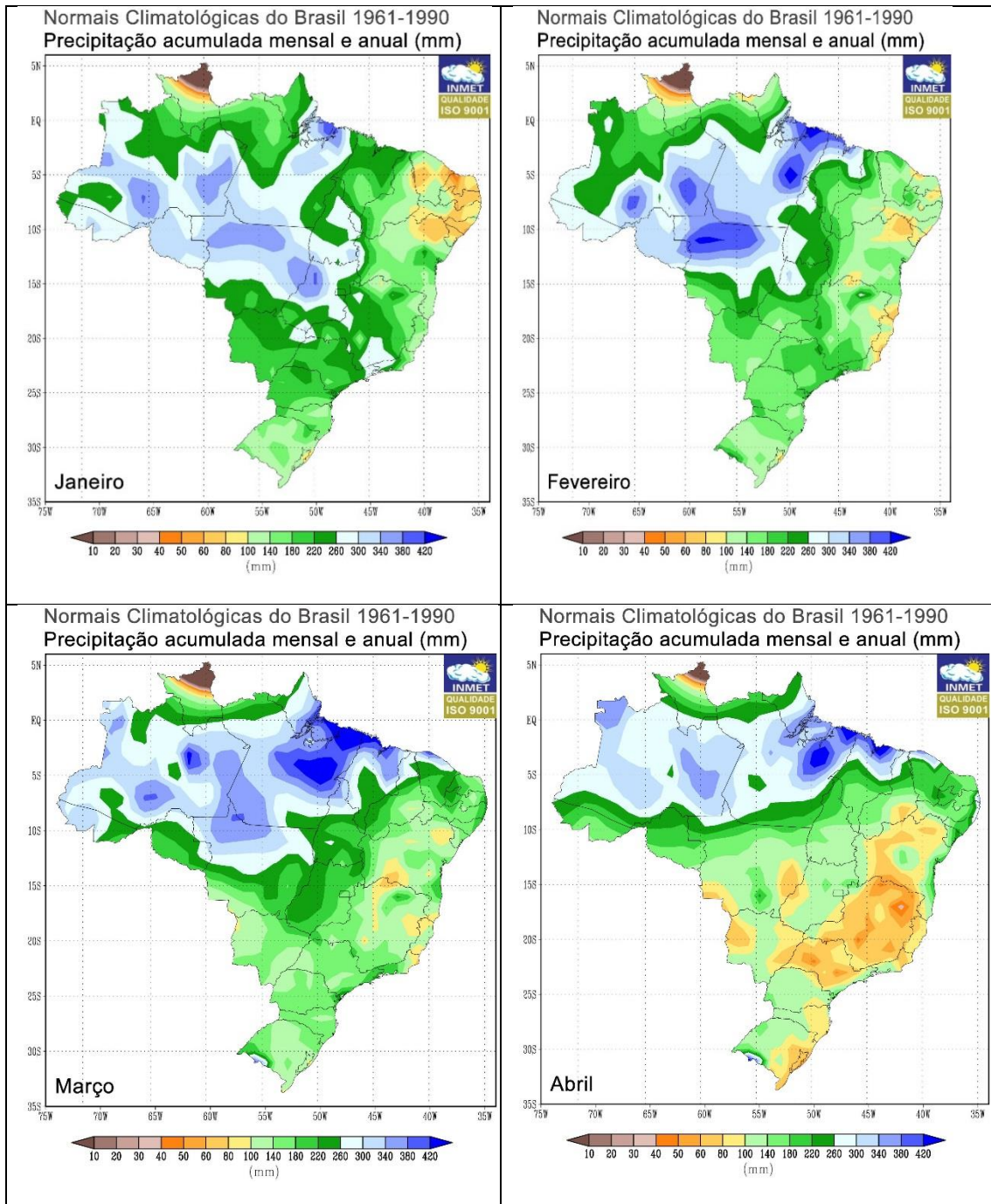
4. PRECIPITAÇÃO, VENTO, INSOLAÇÃO E NEBULOSIDADE MENSAL

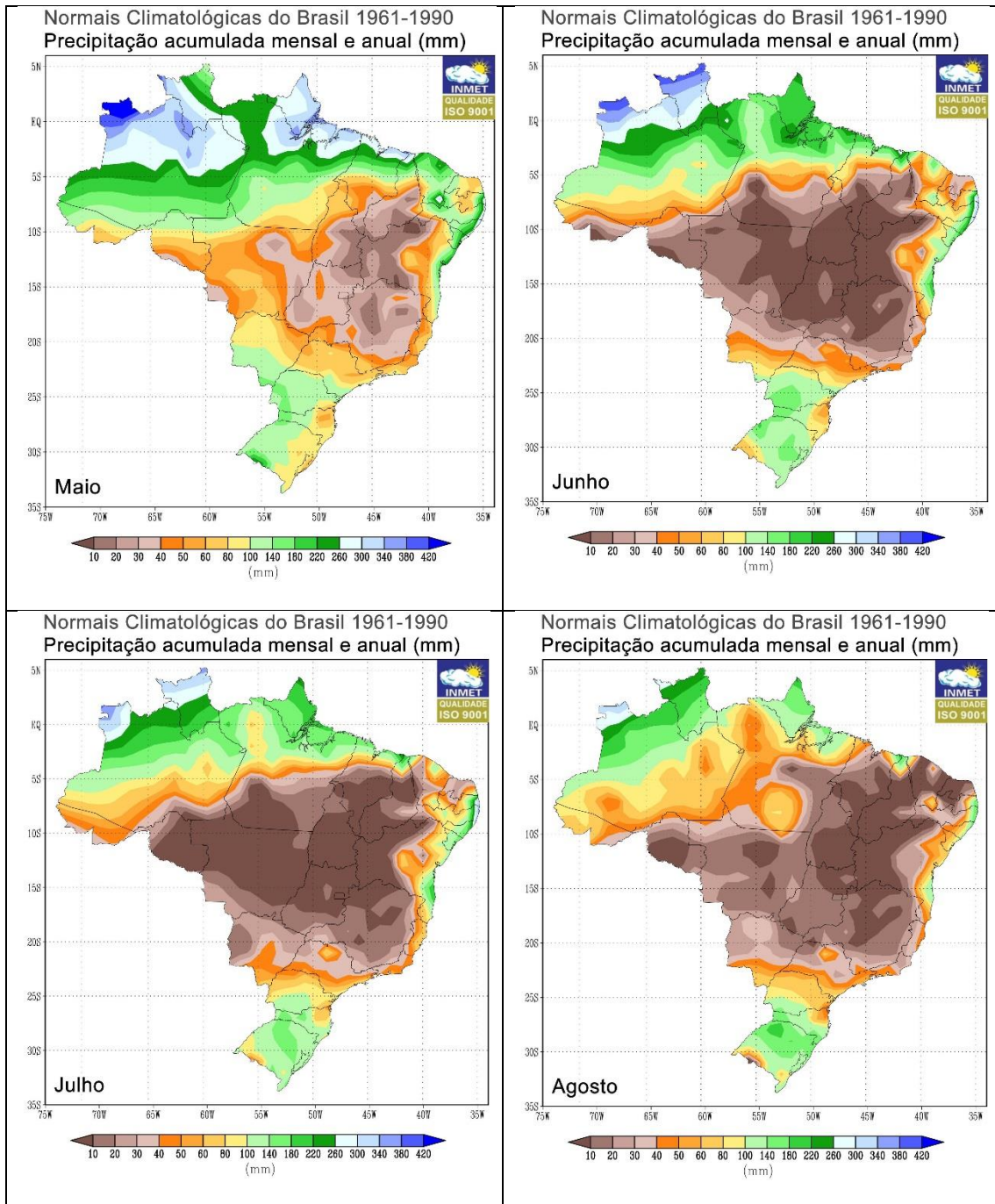
O Brasil, por ser um país de grande extensão territorial, possui diferenciados regimes de precipitação, vento, insolação e nebulosidade, ocasionando uma variedade de clima, com distintas características regionais.

A seguir encontra-se a climatologia (1961-1990) mensal, para as variáveis de interesse, tal conjunto de informações é baseado nas observações meteorológicas realizadas,

diariamente, às 12, 18 e 24 UTC3, na Rede de Observações de Superfície do INMET, os mapas a seguir referem-se a publicação do Instituto Nacional de Meteorologia, 2009.

Inicialmente encontram-se os mapas climatológicos mensais de precipitação acumulada (mm).





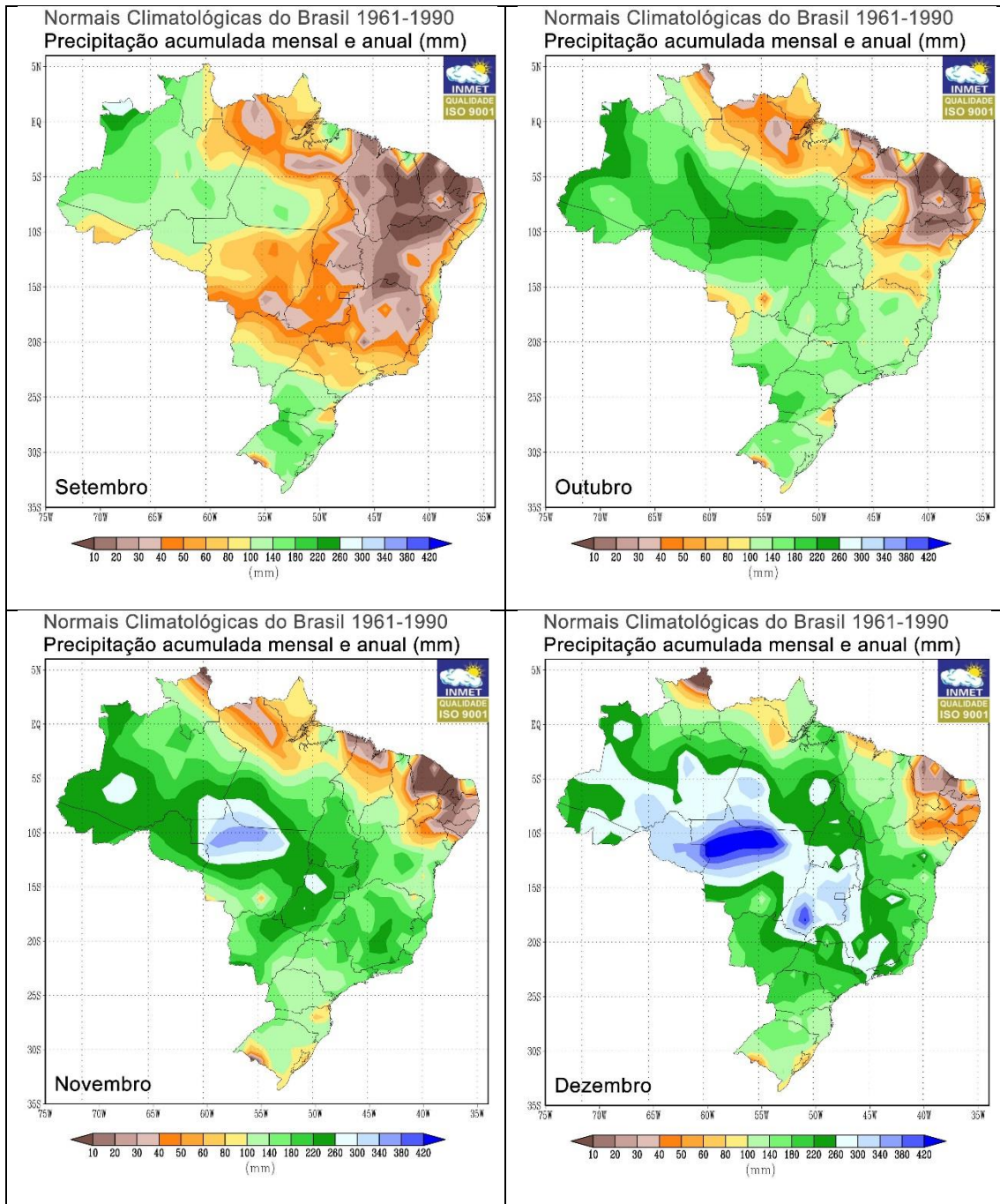
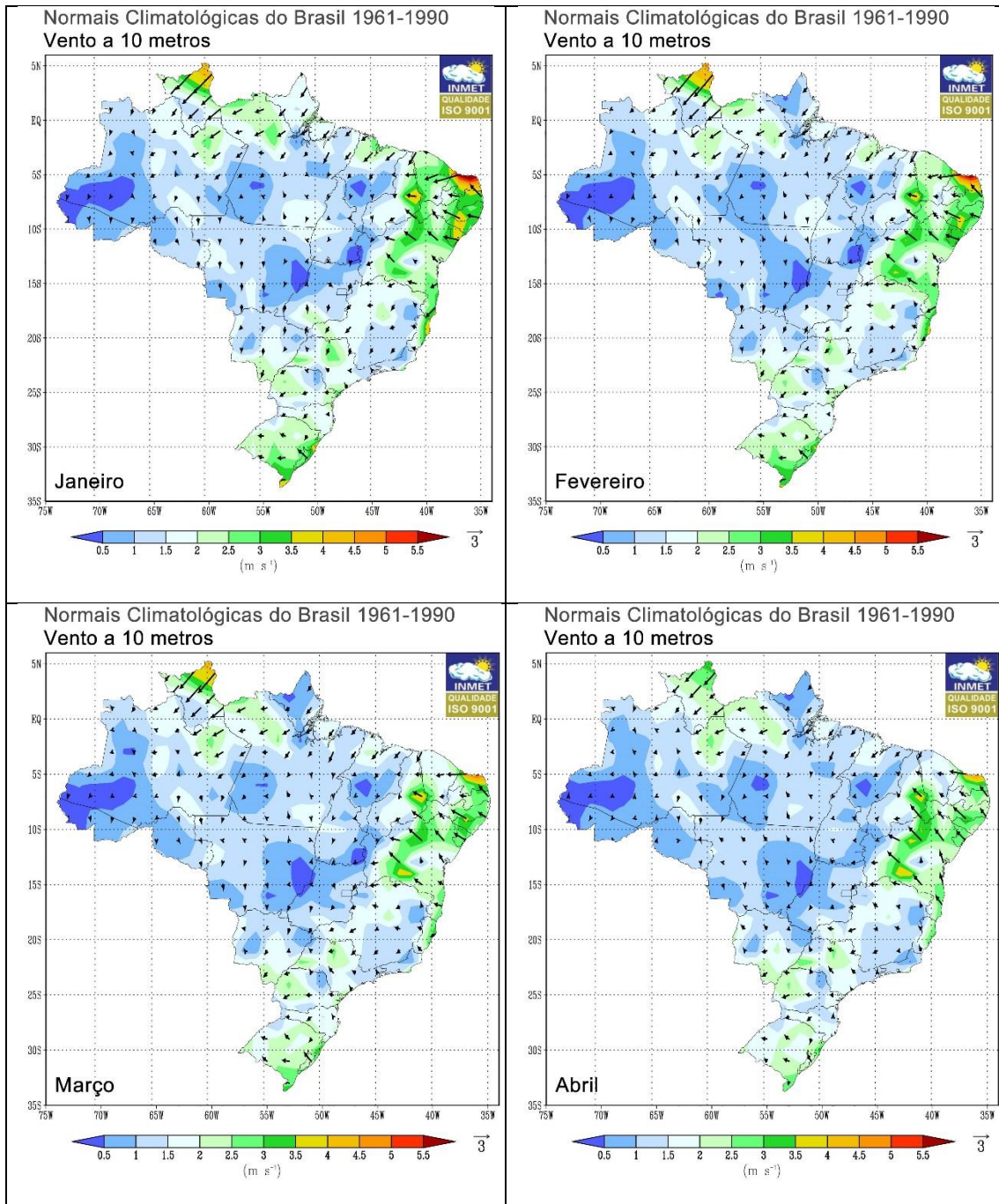
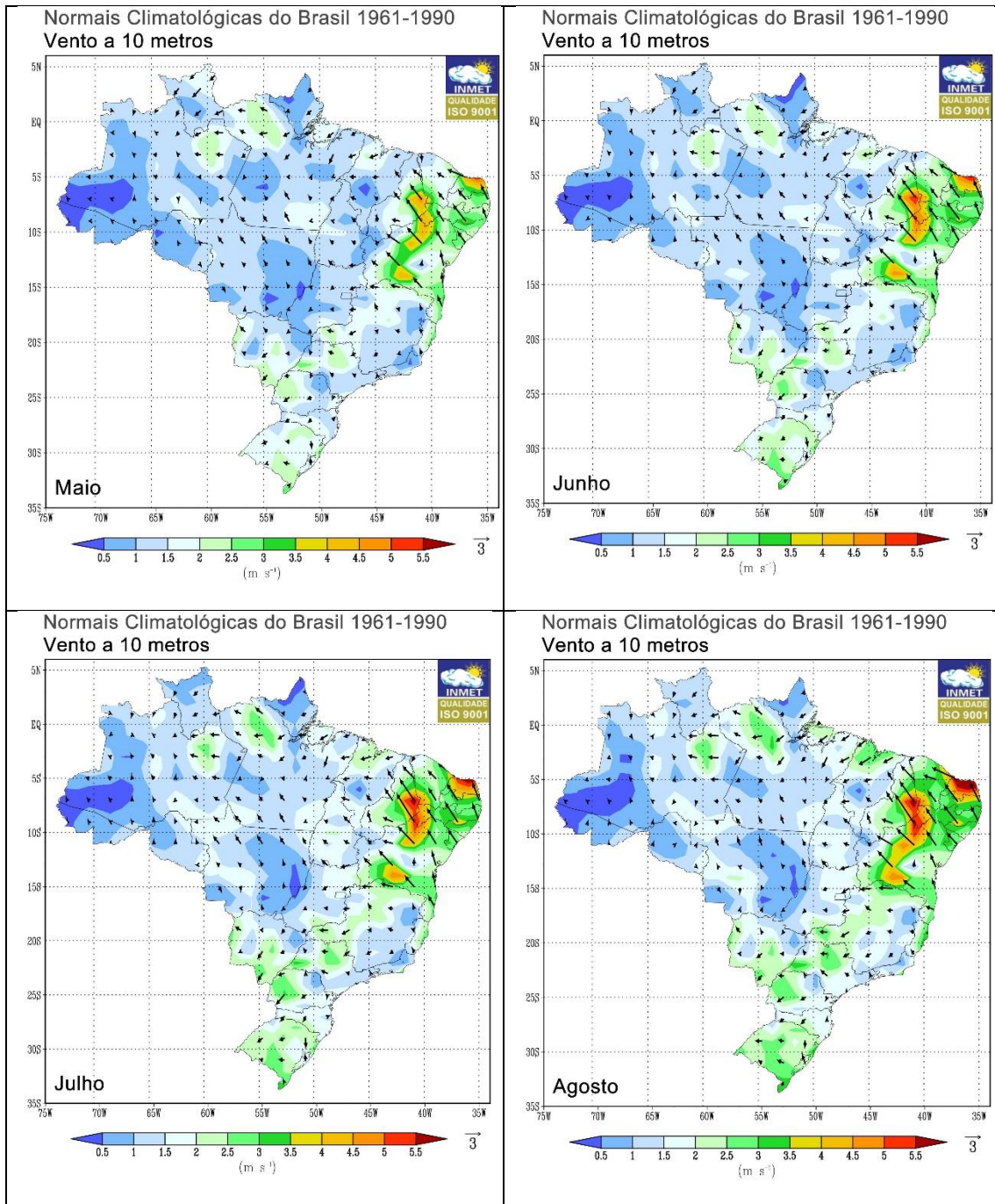


Figura 34 - Climatologia de precipitação acumulada mensal no Brasil de 1961-1990.

Fonte: INMET

O termo **vento** pode ser definido como o deslocamento do ar provocado pela diferença de pressão entre duas regiões. As figuras a seguir ilustram a climatologia mensal da direção e a intensidade dos ventos, em todas as regiões do Brasil.





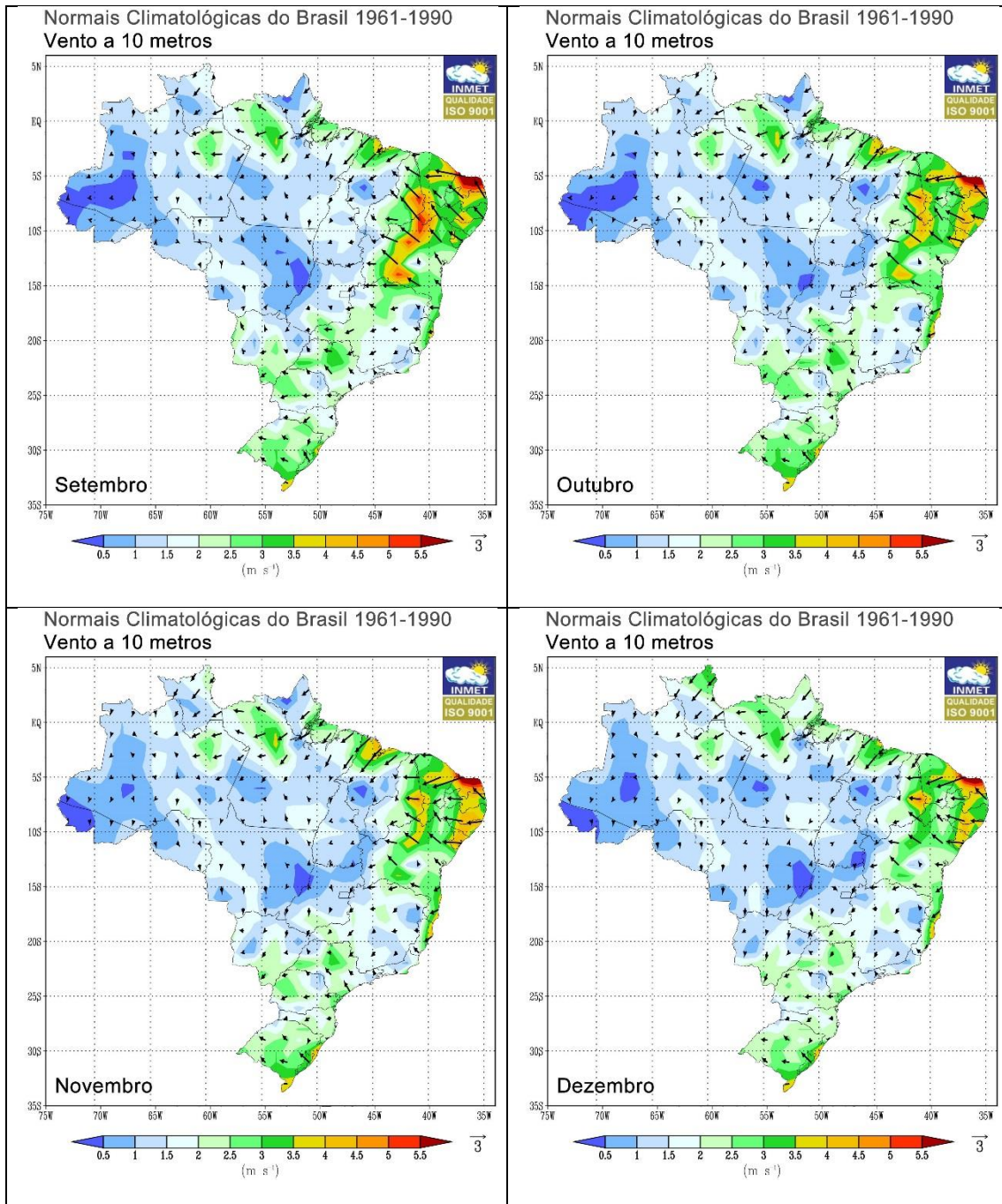
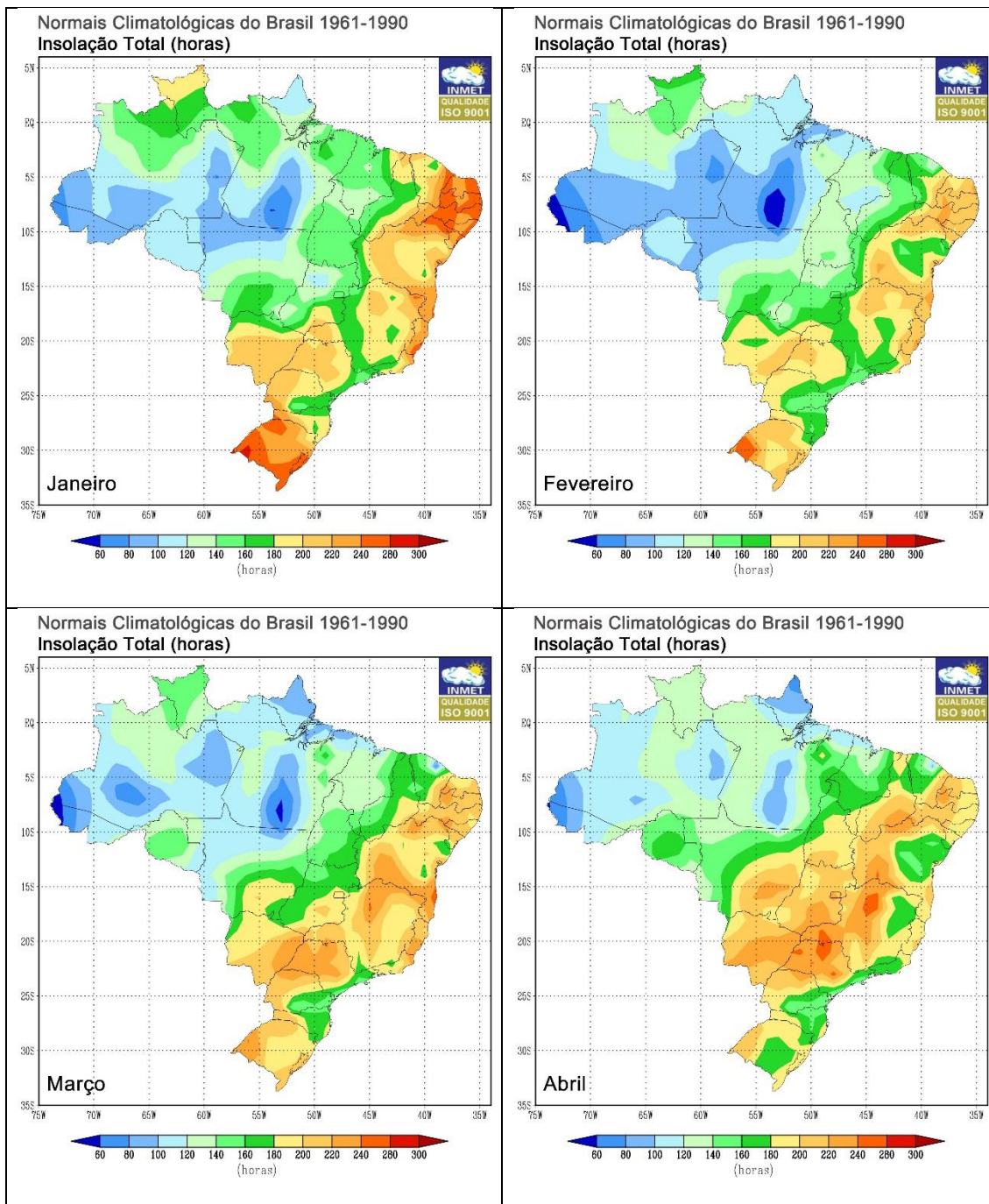
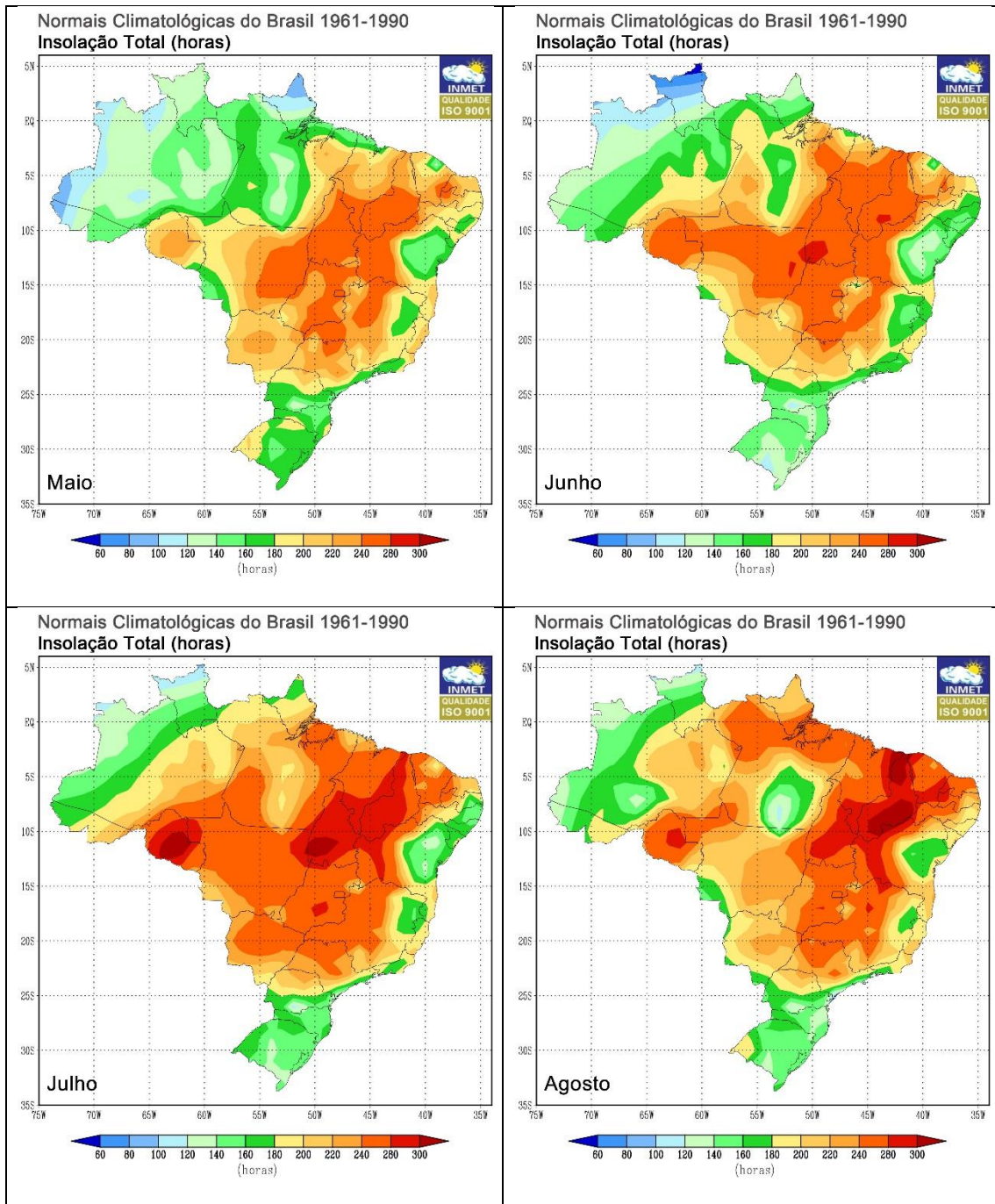


Figura 35 - Climatologia de vento mensal no Brasil de 1961-1990.

Fonte: INMET

A insolação pode ser definida, como número de horas nas quais o disco solar é visível para um observador situado na superfície terrestre, em um local onde o horizonte está livre. Pode ser definida também como o intervalo total de tempo (entre o nascimento e o ocaso do sol) em que o disco solar não esteve oculto por nuvens ou fenômenos atmosféricos de qualquer natureza. A seguir encontra-se a climatologia mensal da insolação total em horas/mês.





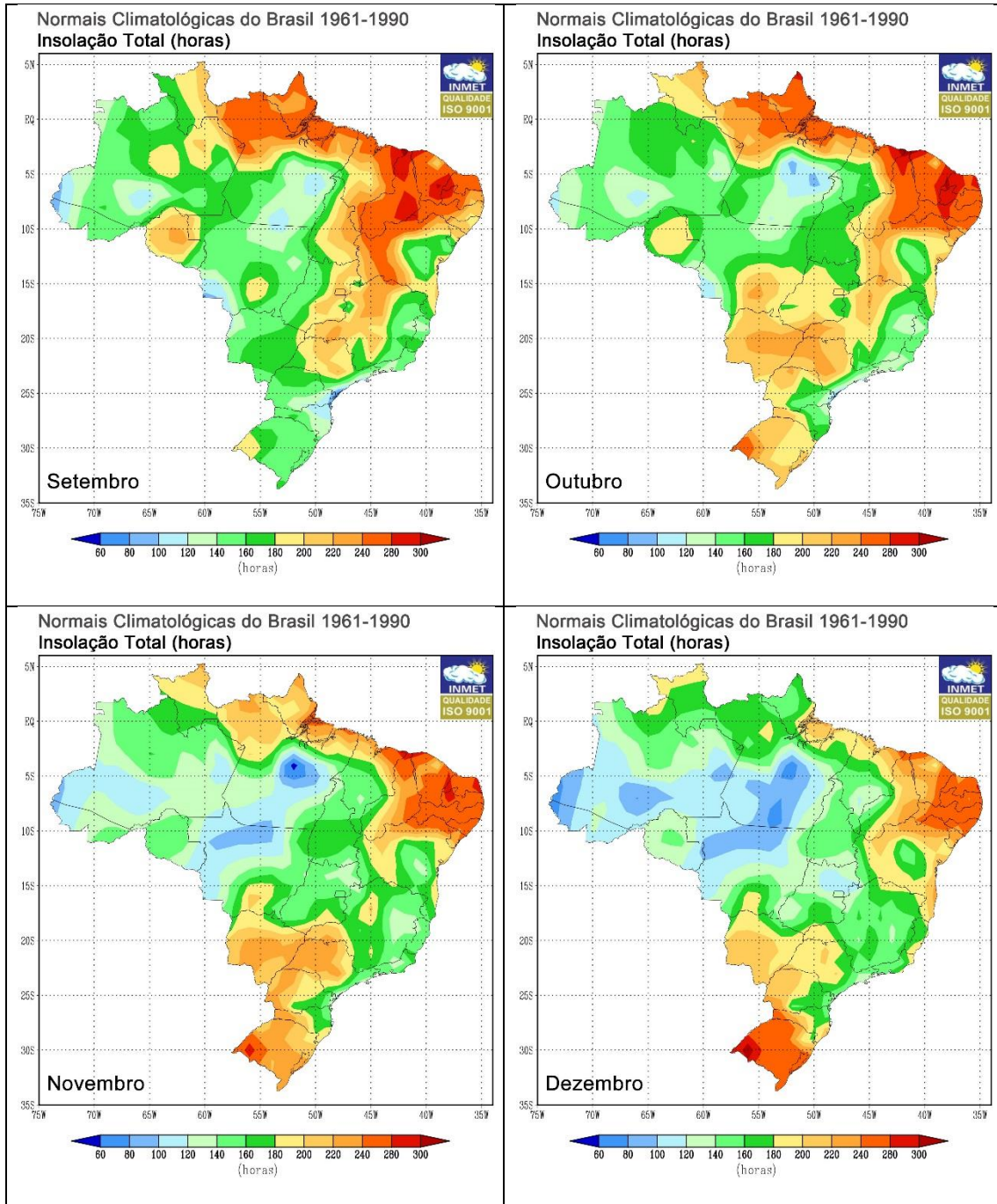
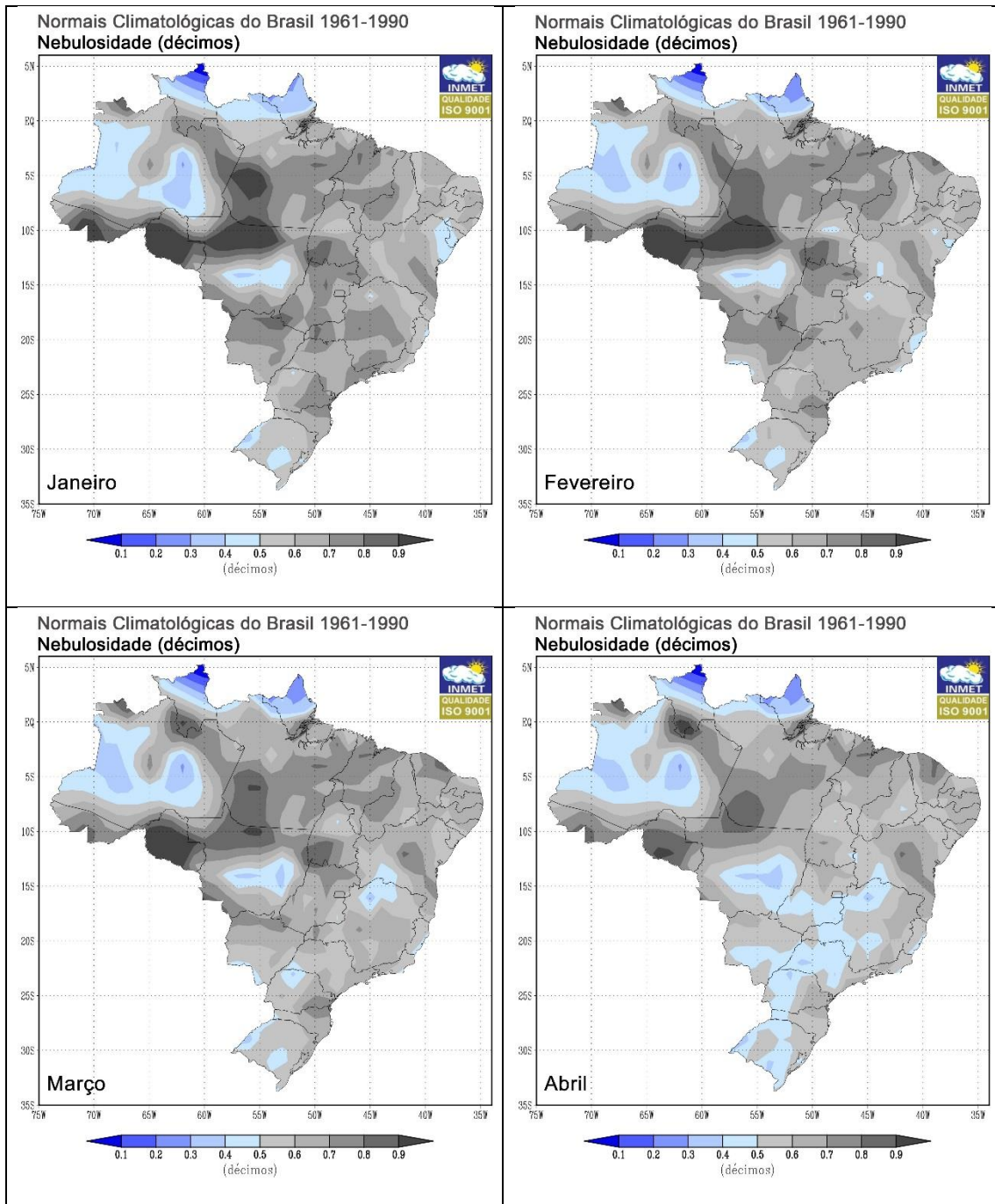
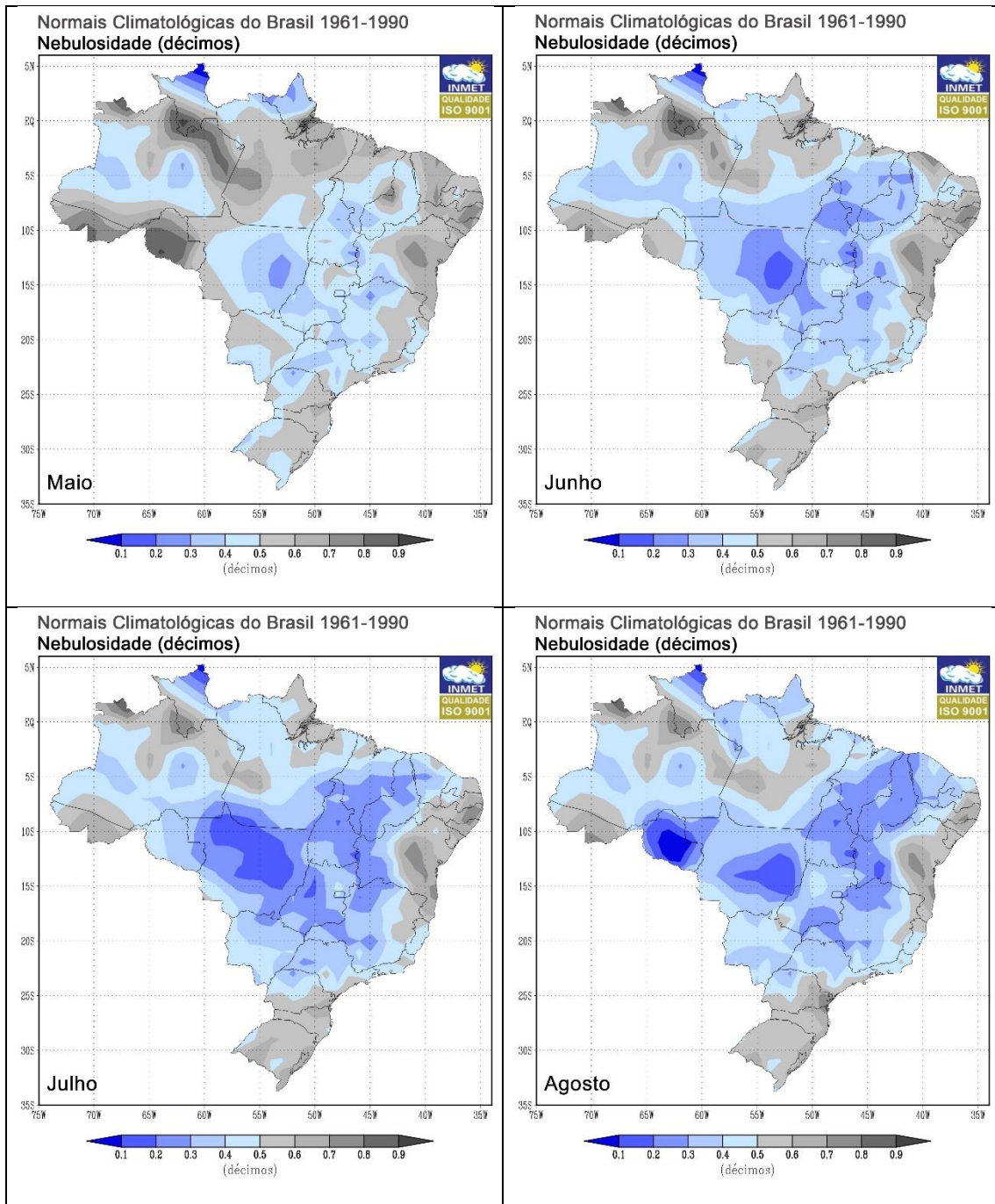


Figura 36 - Climatologia de insolação total mensal no Brasil de 1961-1990.

Fonte: INMET

Nebulosidade é definida como a fração do céu que se apresenta coberta por nuvens no momento da observação. É expressa em décimos de céu coberto. As figuras a seguir mostram a distribuição da nebulosidade no território brasileiro.





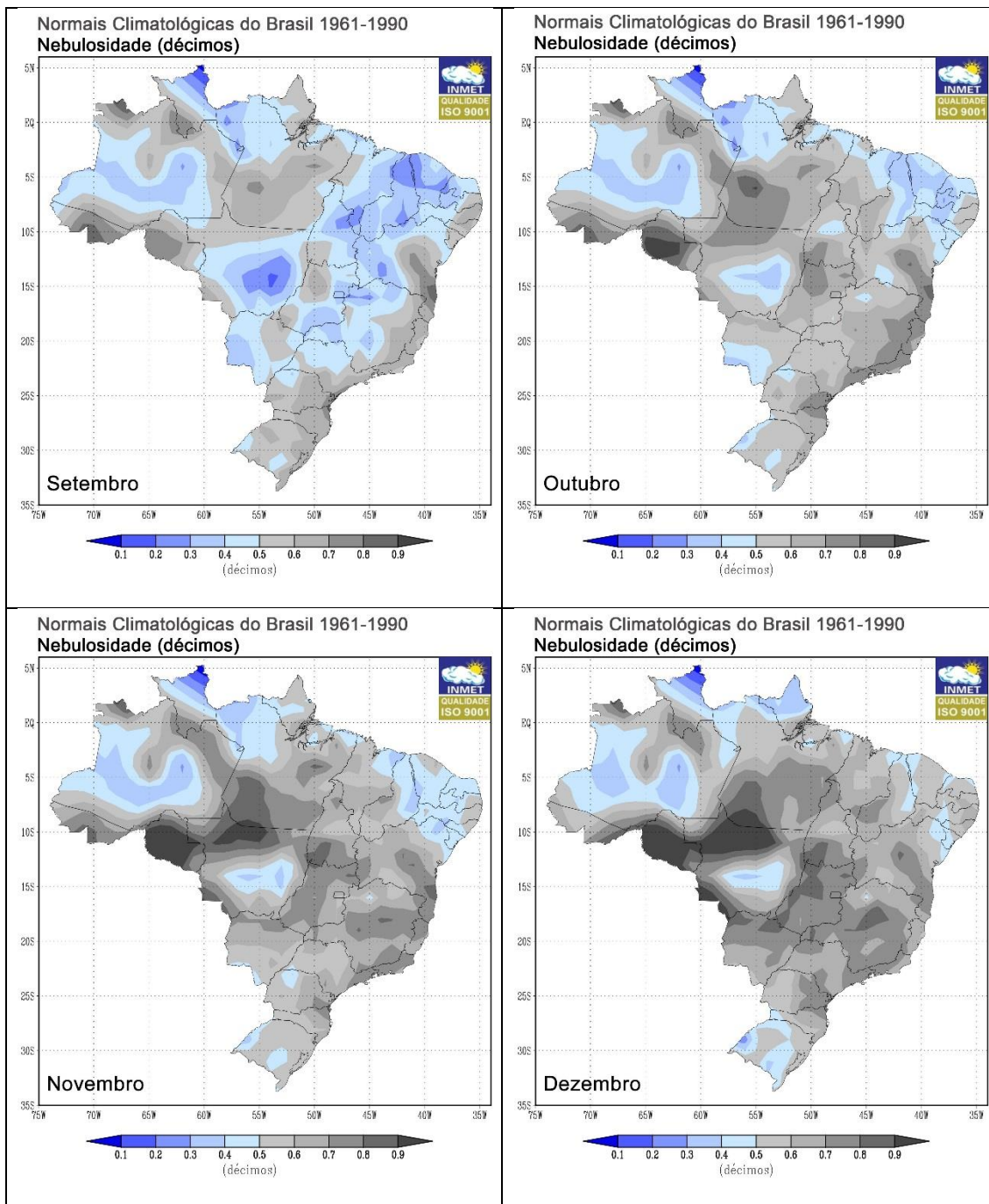


Figura 37 - Climatologia de nebulosidade mensal no Brasil de 1961-1990.

Fonte: INMET

Discussão:**- Região Norte:**

Entre todas as regiões do Brasil, a região Norte apresenta o maior total pluviométrico em praticamente todos os meses do ano, conforme a figura 34, atingindo valores mensais de 420 mm/mês, tendo como consequência baixos valores de insolação e altos valores de nebulosidade, conforme apresentam as figuras 36 e 37. Os ventos nesta região de modo geral são fracos em praticamente todos os estados, com exceção do estado do Amapá (figura 35).

- Região Nordeste

O regime de chuvas sobre o Nordeste (NE) possui uma alta variabilidade climática, isto é verificado desde o clima semi-árido no interior da região, com precipitação acumulada inferior a 10 mm/mês, até o clima chuvoso, observado principalmente na costa leste da Região, com precipitação acumulada mensal superior a 200 mm/mês (figura 34). As variações interanuais das chuvas no leste do NE podem ser atribuídas às anomalias na posição e intensidade da ZCIT, causadas por anomalias positivas na temperatura da superfície do mar do Atlântico Sul e pela ocorrência do El Niño no Pacífico Equatorial.

Em relação a variável vento (figura 35), a região Nordeste tem ventos intensos, chegando a valores médios entre 3 e 5,5 m/s, em praticamente todos os meses do ano. Cabe salientar a importância da variação sazonal dos ventos, que está relacionada à posição do sistema de alta pressão subtropical do Atlântico Sul. Segundo Hastenrath e Lamb (1977) a alta subtropical começa a se intensificar nas estações frias alcançando seu máximo valor em julho. O estudo dos ventos sobre o Atlântico Sul realizado por Servain e Lukas (1990) mostra que os ventos na costa do nordeste são de leste/nordeste no começo do ano e de sudeste durante o período de abril a julho, o que coincide com a época chuvosa no leste da região. Portanto, durante a estação chuvosa de outono/inverno sobre o leste do NE, os ventos sopram perpendiculares à costa, de sudeste. Estes ventos parecem favorecer a ocorrência da zona de convergência noturna associada à brisa terrestre. Além disso, outro sistema bastante importante que favorece as chuvas na região é a presença do vórtice ciclônico em altos níveis, cuja circulação ciclônica fechada possui o centro mais frio que sua periferia. Segundo Gan (1982) os vórtices são observados nos meses de setembro a abril, tendo maior frequência em janeiro. Eles favorecem as chuvas no norte e nordeste da região e céu claro na parte sul e central da região durante estes meses.

A variável insolação (figura 36) e visibilidade (figura 37) são bem distribuídas ao longo do ano. Os totais de insolação chegam a valores máximos de 300 horas nos meses de julho, agosto, setembro e outubro, o mesmo ocorrendo para a visibilidade.

Os principais Sistemas e Fenômenos atuantes na região são: 1) Eventos de El Niño-Oscilação Sul (ENOS); 2) Temperatura da Superfície do Mar (TSM) na bacia do oceano Atlântico, Ventos Alísios; 3) Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) sobre o oceano Atlântico; 4) Sistemas Frontais; 5) Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN); 6) Perturbações Ondulatórias dos Alísios (POAs); 7) Linhas de Instabilidade (LI); 8) Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM); e os Sistemas Locais, Brisas Marítima e Terrestre; 10) Brisa Marítima e Terrestre; 11) Brisa Vale/Montanha.

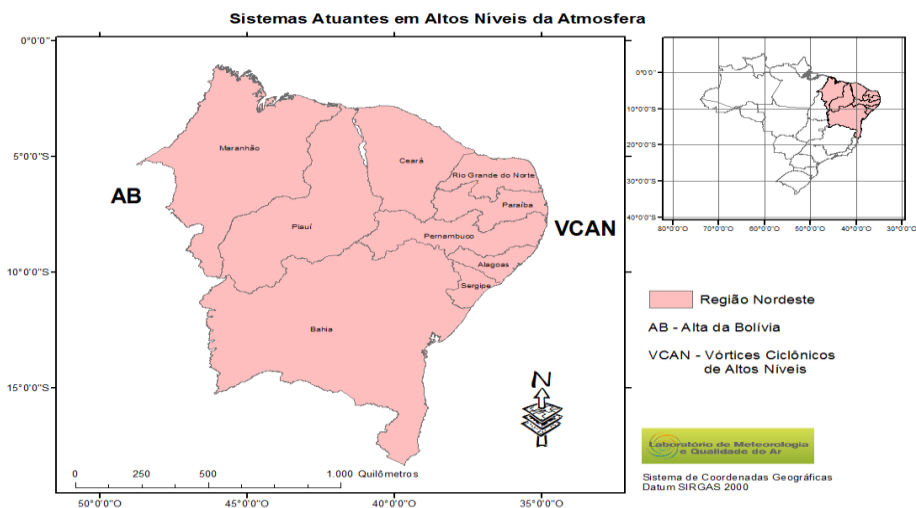


Figura 38 - Sistemas Atuantes na região Nordeste do Brasil em Altos níveis da atmosfera.

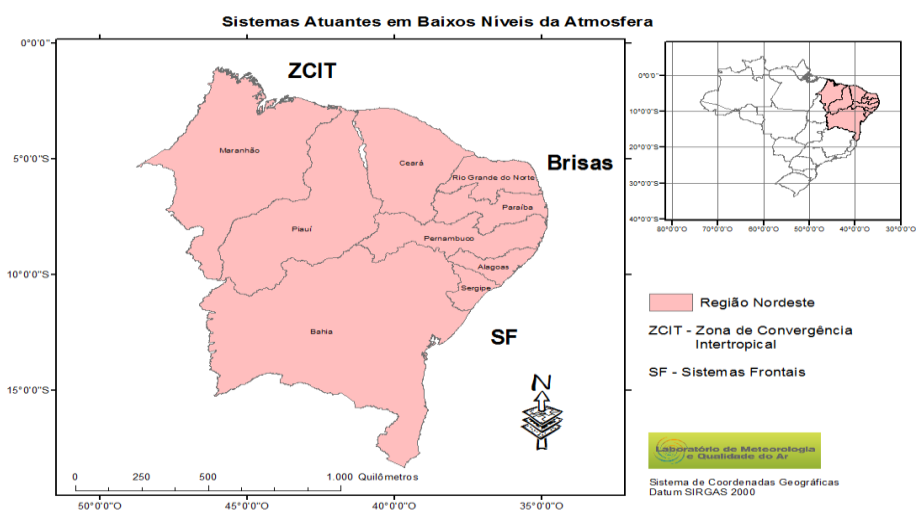


Figura 39 - Sistemas Atuantes na região Nordeste do Brasil em Baixos níveis da atmosfera.

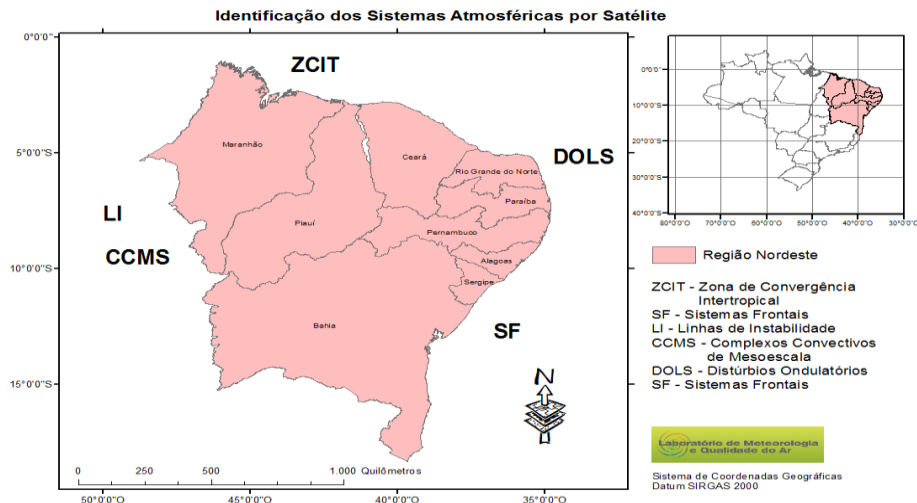


Figura 40 - Sistemas que podem ser identificados por imagens de satélite na região Sul do Brasil.

- Região Sul

A distribuição anual das chuvas sobre o sul do Brasil ocorre de maneira bem uniforme. Ao longo de quase todo seu território os meses considerados mais secos são os meses de abril e maio, no restante dos meses a média mensal da precipitação não tem muita variação (140 – 200mm), somente algumas áreas encontram-se fora desse limite pluviométrico (figura 34). Entre os mais importantes fenômenos atmosféricos que ocorrem no Sul, podemos citar a passagem de sistemas frontais sobre a região, que são responsáveis por grande parte dos totais pluviométricos registrados, bem como pelos valores mais baixos dos totais mensais de insolação e visibilidade.

A relação entre anomalias positivas de precipitação e a ocorrência do fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS) foi confirmada através de vários estudos observacionais, identificando relações diferenciadas entre os eventos ENOS e a precipitação no sul do Brasil no inverno (anomalias positivas de precipitação) e verão (anomalias negativas de precipitação).

Sistemas Convectivos de Mesoescala (SCM) também são responsáveis por grandes totais de precipitação sobre esta Região, assim como no sul das Regiões Sudeste e Centro-Oeste (CUSTÓDIO e HERDIES, 1994). Alguns trabalhos, como os de Machado et al. (1992), Miller e Fritsch (1991), Guedes e Silva Dias (1985) e Madox (1983) mostram a dinâmica dos SCM, suas relações com a circulação geral, acoplamentos com jatos de baixos e altos níveis e relações orográficas. Guedes et al. (1994) trataram da trajetória dos SCM, sendo que durante o inverno do HS, estes sistemas apresentam um deslocamento mais zonal, ao contrário do verão no HS, onde

o deslocamento torna-se de SO-NE, comparativamente percorrendo uma distância maior que no inverno.

A ocorrência de ciclogêneses e frontogêneses sobre o Sul do Brasil também é um fator preponderante na determinação da climatologia da precipitação e temperatura desta região. Estudos estatísticos (GAN e RAO, 1991) mostram que a maior frequência de ciclogêneses ocorre sobre o Uruguai durante o inverno do HS. Em média, ocorrem cerca de 60 ciclogêneses sobre a Região Sul a cada ano.

De acordo com o Climanálise (1986) e outros estudos, a precipitação na Região Sul está associada com: 1) sistemas frontais que se deslocam do Pacífico, passam pela Argentina e seguem para o nordeste do Brasil; 2) ciclones e frentes frias que se desenvolvem devido à presença de vórtices ciclônicos ou cavados em altos níveis sobre a costa oeste da América do Sul vindos do Pacífico; 3) Complexos Convectivos de Mesoescala CCM; 4) sistemas ciclônicos em níveis médios conhecidos como vírgula invertida e 5) bloqueios atmosféricos. Além disso, há atuação de sistemas de circulações locais (brisas) e a influência indireta da Zona de Convergência do Atlântico Sul, uma vez que este sistema apesar de atuar climatologicamente sobre o sudeste do Brasil pode gerar movimentos subsidentes intensos no Sul; e os **Jatos de Altos Níveis**.

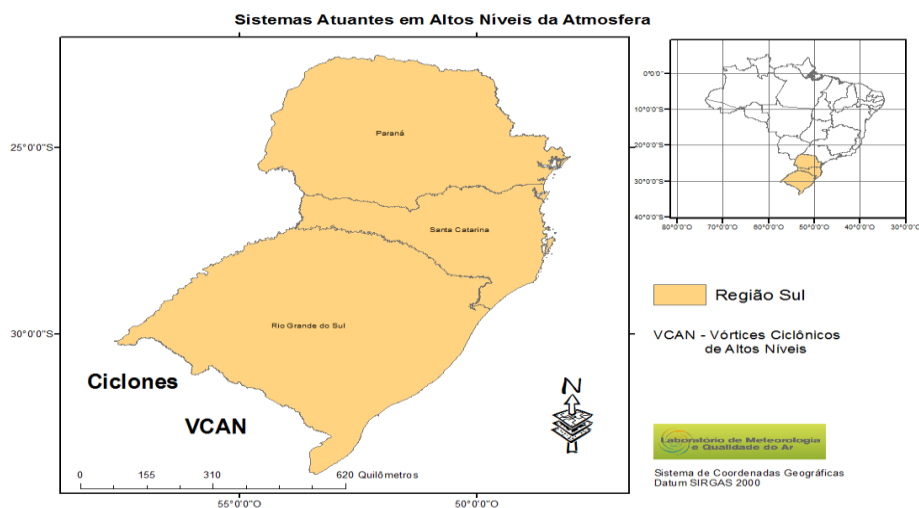


Figura 41 - Sistemas Atuantes na região Sul do Brasil em Altos níveis da atmosfera.

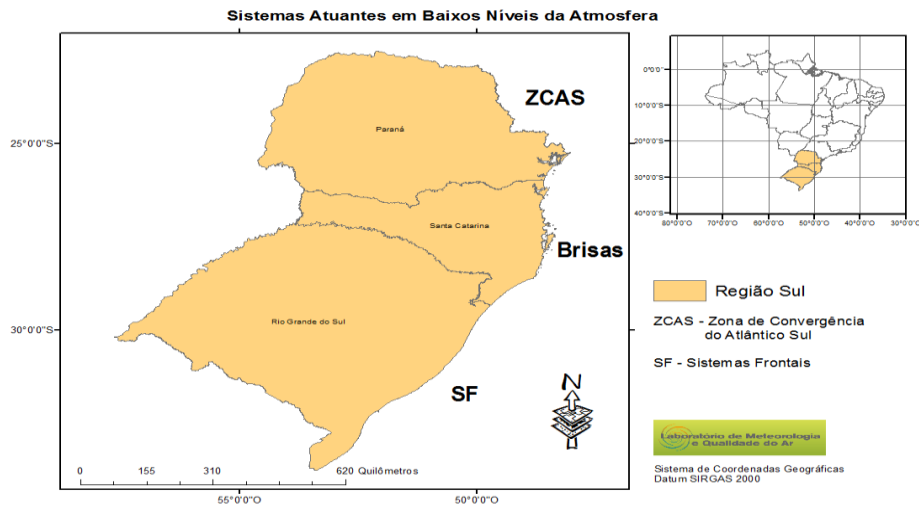


Figura 42 - Sistemas Atuantes na região Sul do Brasil em Baixos níveis da atmosfera.

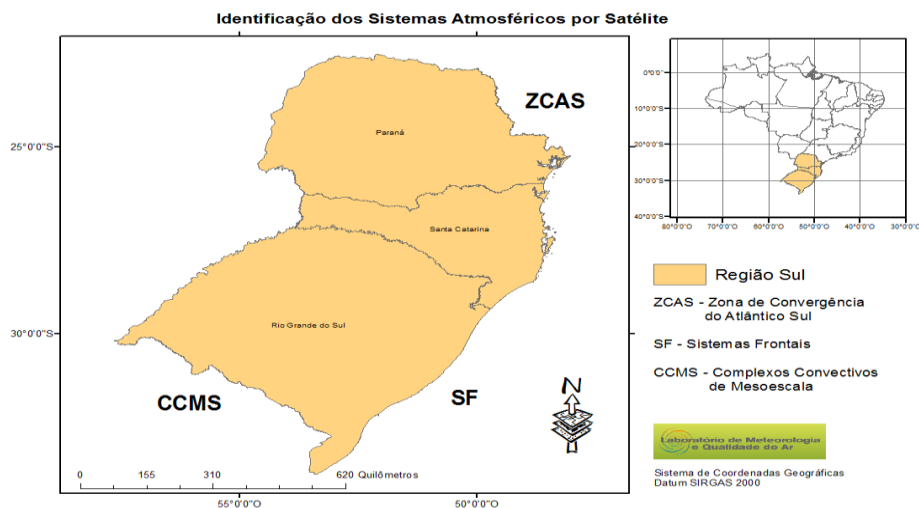


Figura 43 - Sistemas que podem ser identificados por imagens de satélite na região Sul do Brasil.

- Regiões Sudeste e Centro-Oeste:

Devido localização latitudinal, as regiões do Sudeste e do Centro-Oeste, são caracterizadas por ser regiões de transição entre o clima quente de latitudes baixas e o clima mesotérmico do tipo temperado de latitudes médias (NIMER, 1979). O sul das Regiões Sudeste e Centro-Oeste é afetado pela maioria dos sistemas sinóticos que atingem o sul do país, com algumas diferenças em termos de intensidade e sazonalidade do sistema.

Vórtices ciclônicos em altos níveis, oriundos da região do Pacífico, organizam-se com intensa convecção associada à instabilidade causada pelo jato subtropical. Linhas de instabilidade pré-frontal, formadas a partir da associação de fatores dinâmicos

de grande escala e características de meso-escala, são responsáveis por intensa precipitação na região, segundo Cavalcanti et al. (1982).

Sobre a Região Centro-Oeste, a Alta da Bolívia, gerada a partir do forte aquecimento convectivo (liberação de calor latente) da atmosfera durante os meses de verão do HS, é considerada como um sistema típico semi-estacionário. Uma situação estacionária da circulação de grande escala em latitudes médias pode influenciar diretamente na precipitação e temperatura sobre o Sudeste, caso a região esteja ou não sendo afetada por sistemas associados ao escoamento ondulatório da atmosfera. Esse tipo de situação é denominado de bloqueio e afeta, além do Sudeste, também a Região Sul do Brasil.

Além dos sistemas citados anteriormente, a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) é um dos principais fenômenos que influenciam no regime de chuvas dessas Regiões, já que da banda de nebulosidade e chuvas permanecem semi-estacionárias por vários dias seguidos.

Nas regiões serranas, localizadas na parte leste do Sudeste, são registrados os extremos mínimos de temperatura durante o inverno do HS, enquanto que as temperaturas mais elevadas são observadas no estado de Mato Grosso, na região do Brasil Central. Essa região é caracterizada pela presença de intensa atividade convectiva nos meses de maior aquecimento radiativo, gerando um forte gradiente térmico no limite das Regiões Sudeste e Centro-Oeste. Este gradiente é resultado do deslocamento das massas frias de altas latitudes, que afetam principalmente os estados do Sudeste e o Mato Grosso do Sul, nessas regiões a precipitação é distribuída uniformemente, a média anual acumulada tem variação entre 1500 e 2000 mm.

Dois núcleos máximos de precipitação são registrados na região do Brasil Central e no litoral da Região Sudeste, enquanto que no norte de Minas Gerais, verifica-se uma relativa escassez de chuvas ao longo do ano.

5. ESTUDO DE CASO – NORDESTE E SUL

A seguir encontra-se um estudo de caso, considerando quatro estações meteorológicas de superfície, duas no Nordeste e outras duas no Sul do Brasil. Com este estudo de caso é possível ter um exemplo de futuros estudos que podem ser realizados no Brasil, considerando estações meteorológicas de superfície.

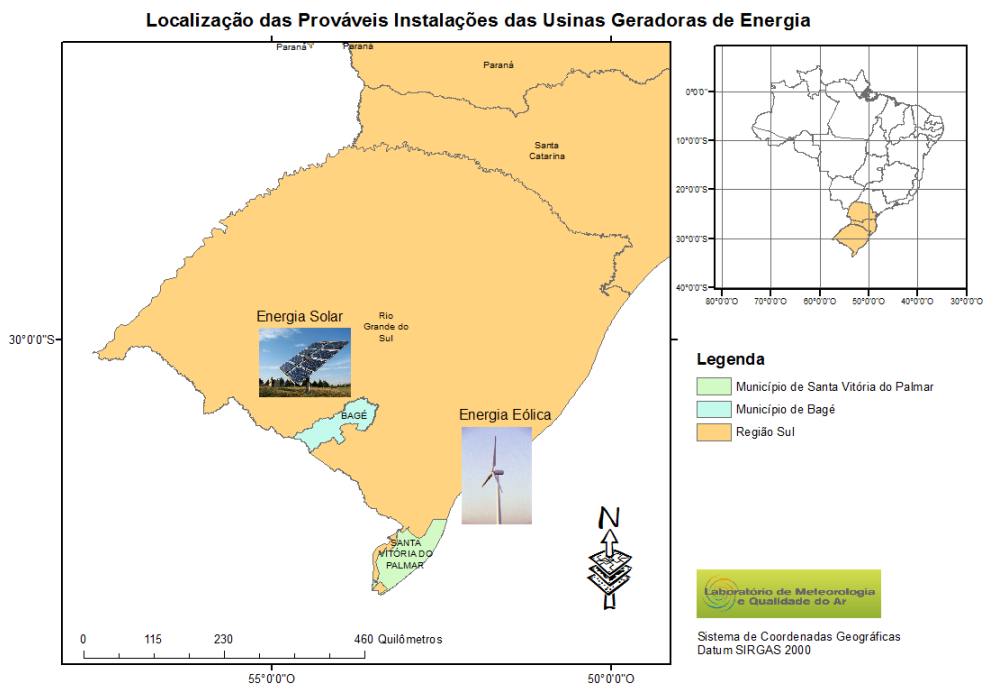


Figura 44 - Áreas com potencial energético no Sul do Brasil.

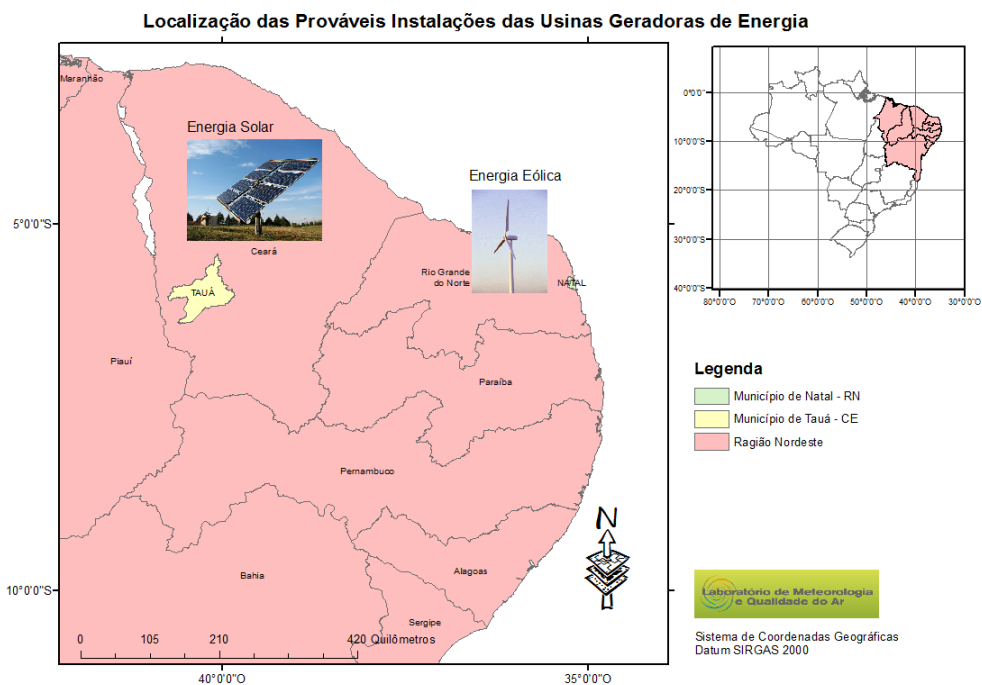


Figura 45 - Áreas com potencial energético no Nordeste do Brasil.

Nas Figuras 46 a 48 são apresentadas as médias climatológicas mensais de precipitação total, insolação total e velocidade média do vento (a 10 m de altura), caracterizando as diferenças locais entre os municípios de Bagé e Santa Vitória do Palmar, no estado do Rio Grande do Sul e entre os municípios de Natal, localizada no estado do Rio Grande do Norte e Tauá, no estado Ceará.

Através das variações temporais dos dados de precipitação, vento e radiação, é possível ter um indicativo do potencial solar, eólico e hídrico desses locais.

No extremo meridional do Brasil, de clima subtropical, as estações são bem definidas ao longo do ano, com grande influência de sistemas extratropicais (massas e frentes polares) e intertropicais. Em Santa Vitória do Palmar/RS, a precipitação pluvial total, média de 30 anos (1961 a 1990) é de, aproximadamente, 1.228 mm anuais. Mensalmente (Figura 46), a precipitação pluvial total ao longo do ano, oscila em torno de 102 mm, sendo a menor precipitação pluvial registrada no mês de abril (68 mm) e a maior no mês de julho (136 mm). Em Bagé/RS, a precipitação total, média no período (1984 a 2013) é de, aproximadamente, 1.299 mm anuais. Mensalmente (Figura 46), a precipitação acumulada mensal total ao longo do ano, oscila em torno de 108 mm, sendo a menor precipitação pluvial registrada no mês de abril (83 mm) e a maior no mês de julho (136 mm).

Contrastantemente, em Natal/RN, no Nordeste do Brasil, onde o clima tropical litorâneo úmido abrange, praticamente, toda a costa, a precipitação total, média de 30 anos (1961 a 1990) é de, aproximadamente, 1.465 mm anuais. Mensalmente (Figura 47), a precipitação total ao longo do ano, oscila em torno de 122 mm, mas diferentemente do sul do Brasil, com grande variação entre os meses. Climatologicamente, a maior precipitação pluvial ocorre em abril (264 mm), sendo maior que 200 mm entre abril e junho. Já no período de setembro a fevereiro a precipitação pluvial é menor que 100 mm, atingindo um valor mínimo de 14 mm, em novembro. Em Tauá/CE, região de clima tropical semi-árido, a precipitação pluvial total, média no período de 1961-1990 é de apenas 715 mm/ano. Mensalmente, a precipitação total ao longo do ano, oscila em torno de 59 mm, sendo que em mais da metade do ano (junho a dezembro) a precipitação pluvial é menor que 50 mm, atingindo, um valor mínimo de 4,0 mm, em novembro. Já a maior precipitação pluvial ocorre no mês de abril (194 mm).

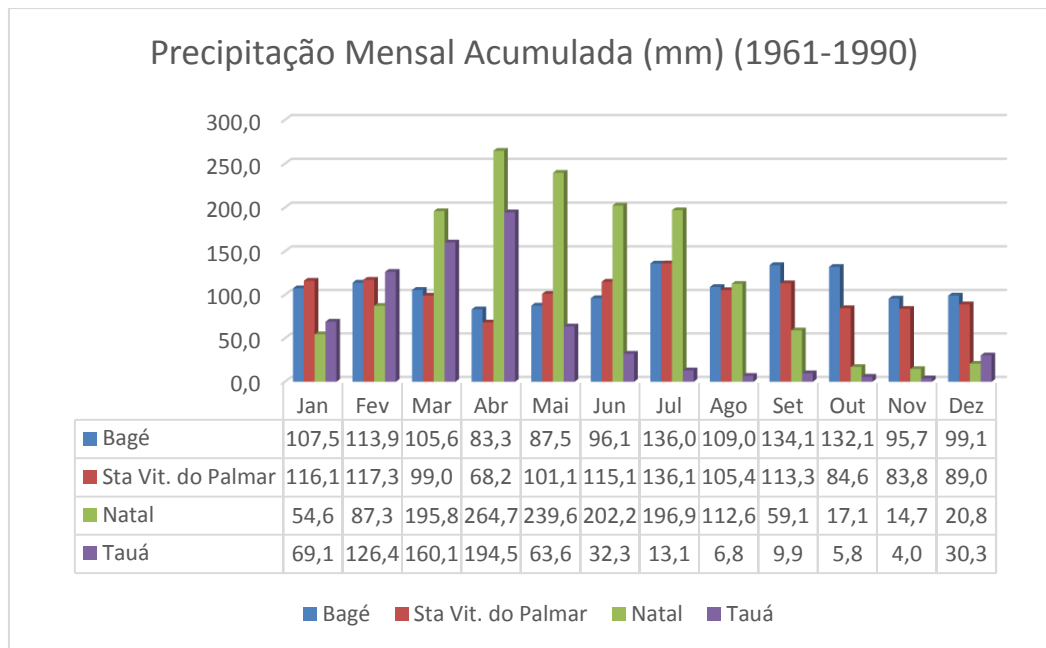


Figura 46 - Precipitação Mensal Acumulada (mm), normais climatológicas (1961-1990).

A insolação total, média para o município de Bagé/RS no período 1961-1990, é de aproximadamente, 2.181 horas por ano. Na análise mensal (Figura 47), a insolação total, ao longo do ano, varia em torno de 181 horas de brilho solar, sendo maior que 200 horas nos meses de outubro a janeiro, e menor em junho (115 horas). No município de Santa Vitória do Palmar/RS a insolação total anual no período é de aproximadamente 2.397 horas por ano. Na análise mensal (Figura 47), a insolação total, ao longo do ano, oscila em torno de 199 horas de brilho solar, sendo maior que 200 horas nos meses de outubro a março, e menor em junho (143 horas).

Na região Nordeste, para o município de Natal, a insolação total no período 1961-1990, é de aproximadamente, 2.968 horas por ano. Na análise mensal (Figura 47), a insolação total, ao longo do ano, tem variação em torno de 247 horas de brilho solar, com menor variação ao longo do ano, se comparada ao sul do Brasil. O maior número de horas de brilho solar ocorre em novembro (300 horas) e o menor em abril (194 horas). Coerentemente, já que estes são, respectivamente, os meses de menor e maior precipitação pluvial em Natal/RN. A insolação total no município de Tauá/CE, para o período 1961-1990 é de aproximadamente, 2.515 horas por ano. Em relação a análise mensal (Figura 47), a insolação total média ao longo do ano, varia em torno de 209 horas de brilho solar, sendo maior que 200 horas em um período diferente e mais longo do que no sul do Brasil, de maio a dezembro. O menor número de horas de brilho solar, climatologicamente, ocorre em março (148 horas).

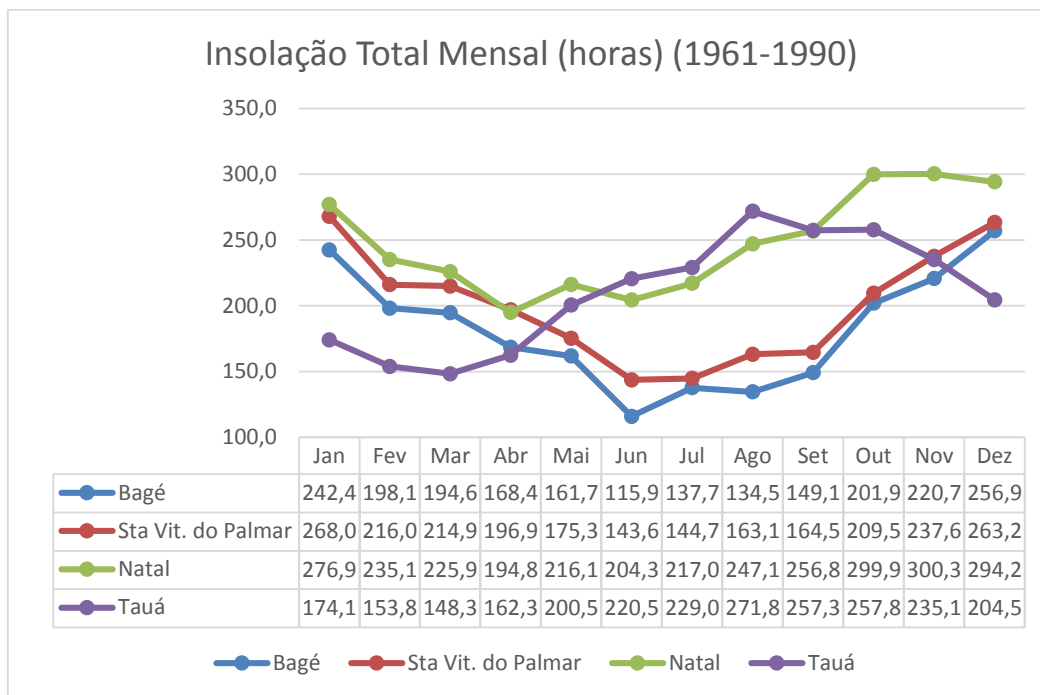


Figura 47 – Insolação Total Mensal (horas), normais climatológicas (1961-1990).

Com relação à velocidade média do vento a 10m de altura, no município de Bagé/RS, a variação média mensal é de 2,7 m/s. As menores velocidades ocorrem no mês de maio, sendo de aproximadamente 2,11 m/s e os maiores valores ocorrem no mês de novembro sendo da ordem de 3,11 m/s (Figura 48). No município de Santa Vitória do Palmar/RS, a variação média mensal para o período de estudo é de 3,4 m/s. As menores velocidades médias ocorrem no mês de maio, com ventos de intensidade da ordem de 2,6 m/s.

Em Natal/RN, a intensidade média do vento é da ordem de 4,41, sendo que no mês de setembro os ventos atingem valores médios de 5,27 m/s e no mês de abril atinge os menores valores, 3,17 m/s (Figura 48). Em Tauá/CE, a velocidade média do vento é de 3,05, sendo o mês de setembro os valores mais intensos e o mês de abril os ventos mais fracos (Figura 48).

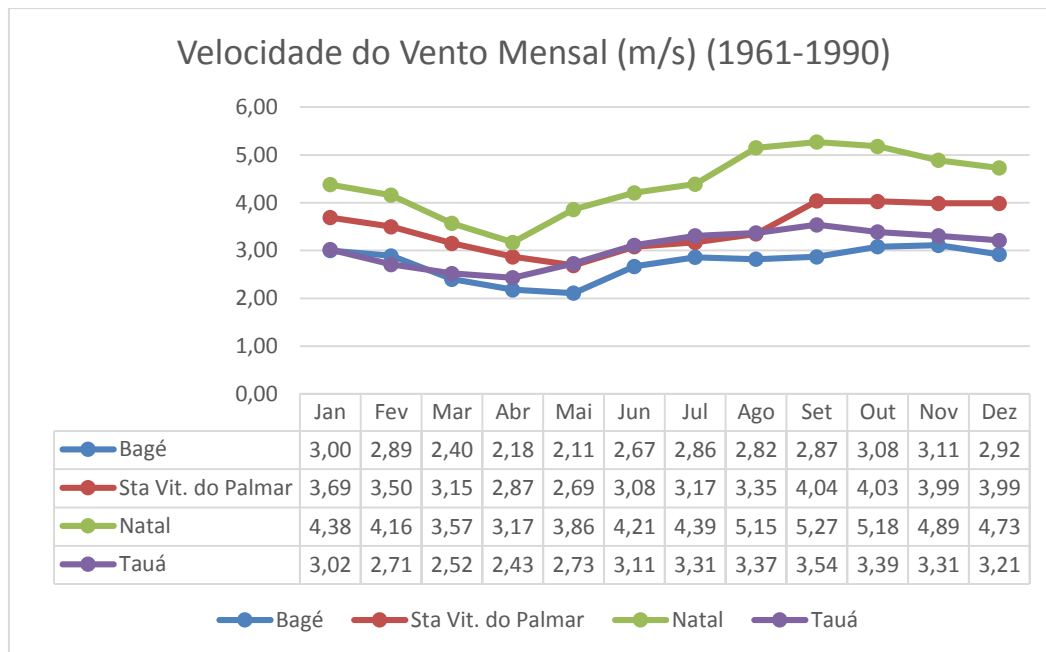


Figura 48 – Velocidade do Vento Mensal (m/s), normais climatológicas (1961-1990).

6. ESTUDO DE CASO – EXEMPLOS DE MODELAGEM

O *Weather Research and Forecasting* (WRF) é um modelo atmosférico de mesoescala não hidrostático, aplicado para previsão numérica de tempo (PNT) e clima. É aberto e flexível, com código fonte livre para uso operacional e de pesquisa. Por possuir um código estável e aprimorado, o WRF pode ser executado, dependendo das necessidades computacionais, desde computadores comuns até supercomputadores. Sua formulação física é baseada nas leis de conservação de massa, a qual expressa às variações espaciais e temporais de energia, momentum e umidade do ar. O modelo foi desenvolvido através da parceria entre diversos institutos dos Estados Unidos: *National Center for Atmospheric Research* (NCAR); *Mesoscale & Microscale Meteorology* (MMM); *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA); *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP); *Naval Research Laboratory* (NRL); *Federal Aviation Administration* (FAA) e Universidade de Oklahoma (Skamarock et al., 2008). Os mesmos autores descrevem detalhadamente toda a sua estrutura física e computacional, além de outras informações específicas, como as relacionadas a grade do modelo, onde o eixo horizontal é baseado na grade de Arakawa-C, representado na Figura 49. Esta adota as componentes do vento u e v da velocidade horizontal no centro das faces das células, com as demais variáveis termodinâmicas inseridas no centro de cada célula.

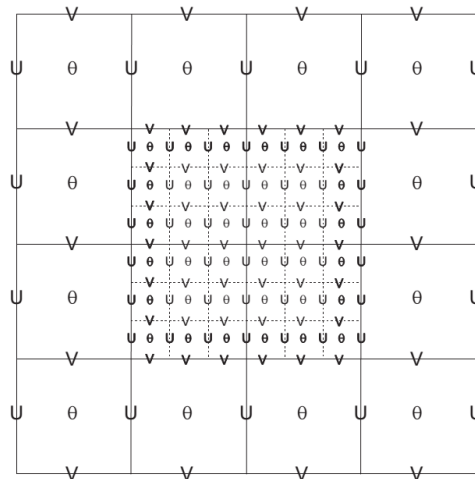


Figura 49. Representação da grade de Arakawa-C. (Fonte: Skamarock et al. 2008).

A estrutura vertical do modelo tem suas equações formuladas para que as isóbaras sigam as variações topográficas através da coordenada *sigma* (σ). Na documentação oficial do WRF está coordenada é chamada de *eta* (η), porém esta é calculada em forma de degraus sobre o terreno. É definida pela equação abaixo e ilustrada na Figura 50:

$$\eta = \frac{(p_h - p_{ht})}{(p_{hs} - p_{ht})}$$

Onde:

P_h - Componente hidrostático da pressão;

P_{hs} – Pressão no nível da superfície terrestre;

P_{ht} – Pressão do topo do nível de referência.

A coordenada σ é relacionada com a pressão atmosférica, então possui formulação mais simples, favorecendo no cálculo da equação do movimento. Acompanha naturalmente a inclinação da superfície, sendo eficiente na simulação de campos de advecção de temperatura e vento, principalmente sobre terrenos suavizados. A resolução vertical próxima à superfície é mais refinada, simulando com maior eficácia processos típicos da Camada Limite Atmosférica, como os fluxos turbulentos (calor sensível e latente), aquecimento superficial, umidade em baixos níveis e vento. No entanto, o cálculo do vento é limitado nesta coordenada sobre topografia com variação aguda. Outra dificuldade do σ é na previsão de eventos onde montanhas

atuam como obstáculo, devido à força gradiente de pressão que é calculada de maneira simplificada. Além disto, zonas costeiras e fenômenos meteorológicos que ocorrem sobre esta não possuem boa representação (ATMO, 2002; PIELKE, 2002).

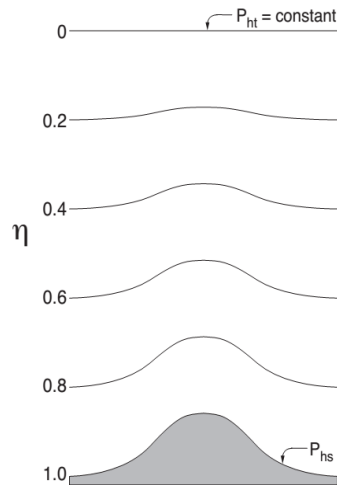


Figura 50 - Ilustração da coordenada vertical η . (Fonte: Skamarock *et al.*, 2008).

O modelo WRF possui diferentes parametrizações físicas relacionadas a radiação, aos fluxos da camada limite superficial, turbulência, convecção de cumulus e microfísica de nuvens. A seguir uma breve definição das principais parametrizações consideradas na simulação:

- **Microfísica de nuvens:** Responsável pela física simplificada até processos complexos que ocorrem na formação de nuvens e precipitação.
- **Superfície do solo:** Denota as características de múltiplas camadas da superfície terrestre, desde simples modelos térmicos baseados nos processos radiativos da superfície, até modelos complexos que caracterizam diversos tipos de vegetação e umidade do solo, bem como sua interação no sistema solo-planta-atmosfera.
- **Camada Limite Atmosférica:** Descreve os parâmetros turbulentos de TKE (Turbulence Kinetic Energy – Energia Cinética Turbulenta), e parâmetros termais em sub-grade, obtidos através da Camada Limite Superficial, intensidade de mistura turbulenta e resistência viscosa da superfície.
- **Cumulus:** Executa os efeitos de sub-grade das nuvens, sejam elas convectivas ou estratiformes.
- **Camada Limite Superficial:** Traduz os parâmetros influenciados pela superfície, tais como, velocidade de atrito, fluxos verticais de calor, umidade e momentum.

- **Radiação Atmosférica:** Envolve os comprimentos do espectro visível da radiação solar (onda curta). O feixe espectral é obtido pela emissividade da superfície, que depende do uso e temperatura do solo (onda longa).

Um dos recursos amplamente empregado nos modelos mesoescala é a regionalização dinâmica, realizado pelo aninhamento de grades. A vantagem desse método é executar simulações de alta resolução, considerando uma área específica, sem a necessidade de processar todo o domínio de grade.

- Descrição das simulações

As simulações com o modelo WRF foram realizadas considerando dois diferentes domínios de grade, para um período de 24 horas. A grade 1 abrange parte da América do Sul e Oceano Atlântico adjacente, com resolução espacial de 10 km, e grade 2 o Estado do Rio Grande do Sul e divisas com Argentina, Uruguai e o Estado de Santa Catarina (figura 51), com resolução espacial de 5 km.

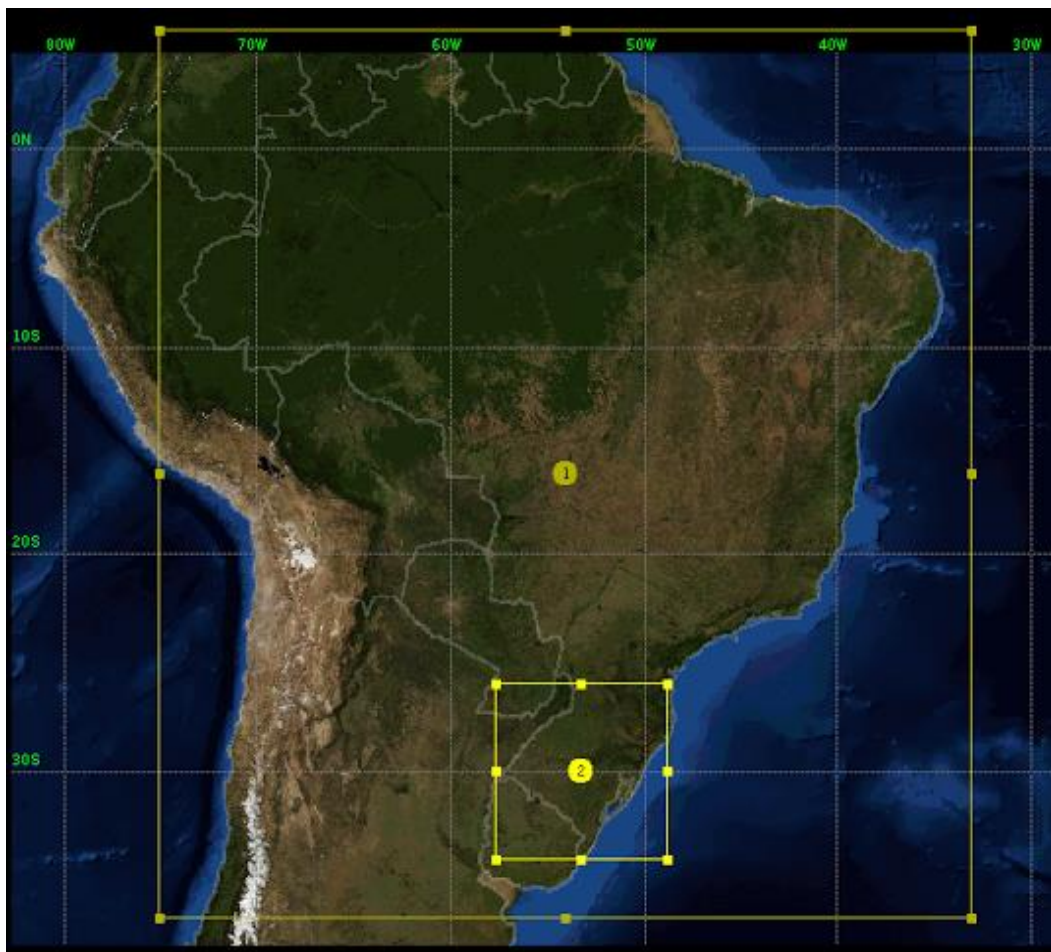
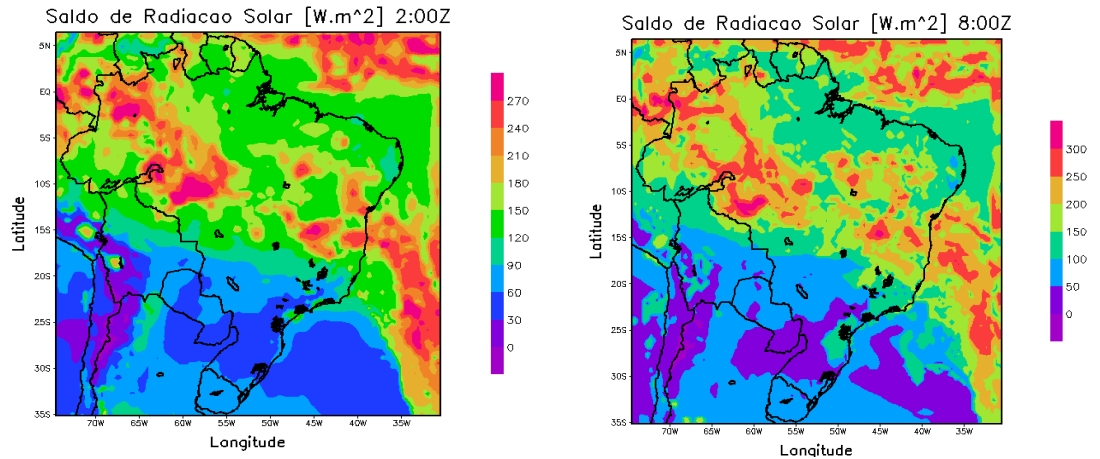


Figura 51 - Localização geográfica dos domínios configurados no modelo WRF.

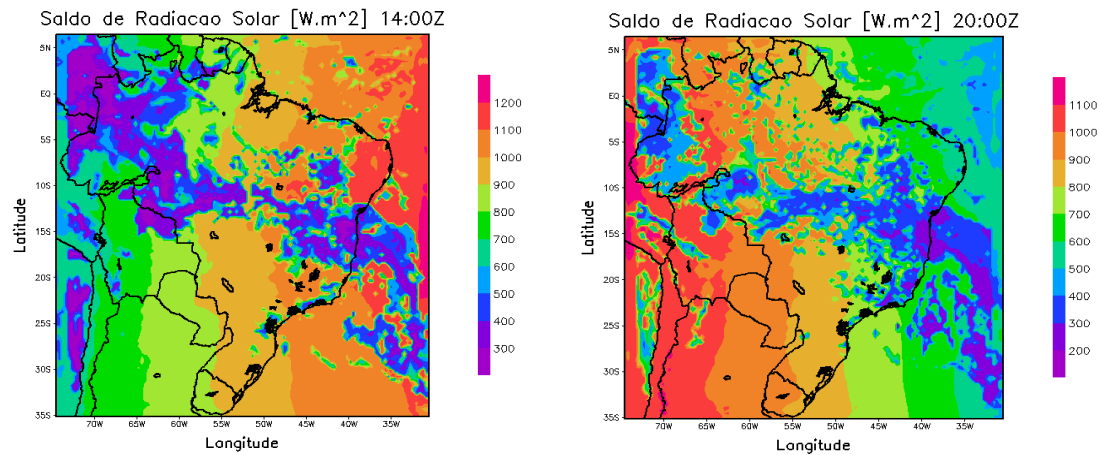
- Resultados Grade 1 - dia 16/11/2014

Os resultados a seguir consideram os horários 02Z, 08Z, 14Z, 20Z e 23Z (Greenwich Z). Aqui serão apresentadas as variáveis radiação, vento e precipitação.

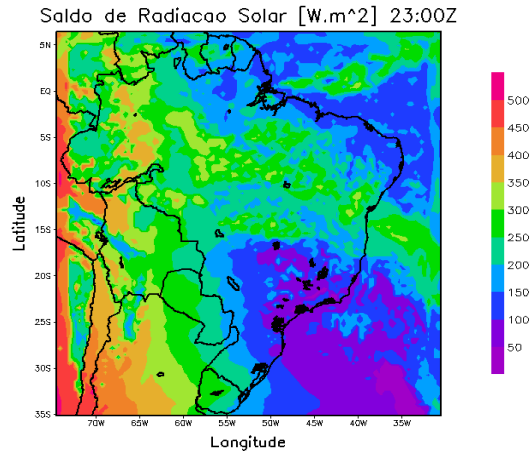
A radiação (figura 52), tem um padrão coerente ao longo do dia, com valores mais acentuados de radiação na parte Norte e Nordeste do Brasil no período da manhã, enquanto nas regiões do Sul a maior intensidade ocorre no período da tarde.



(a,b) Radiação Solar (w.m²) as 02Z e 08Z.



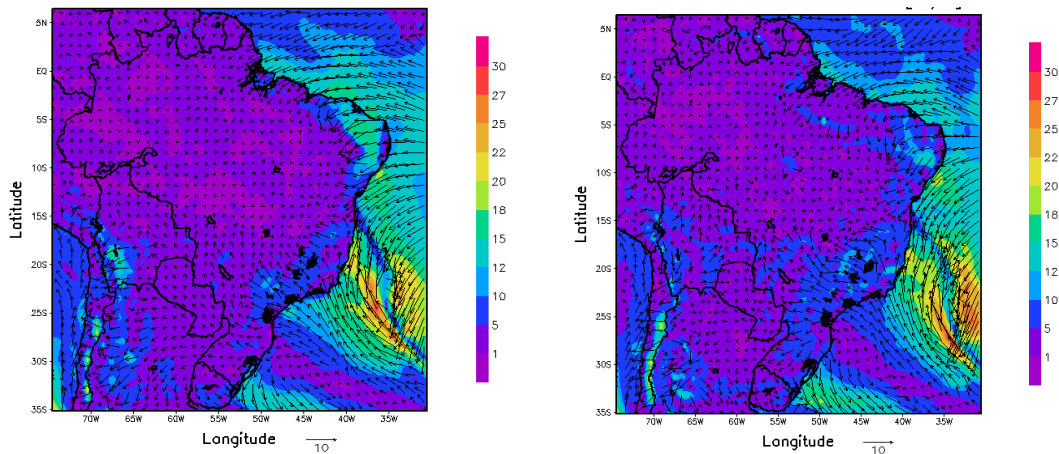
(c,d) Radiação Solar (w.m²) as 14Z e 20Z.



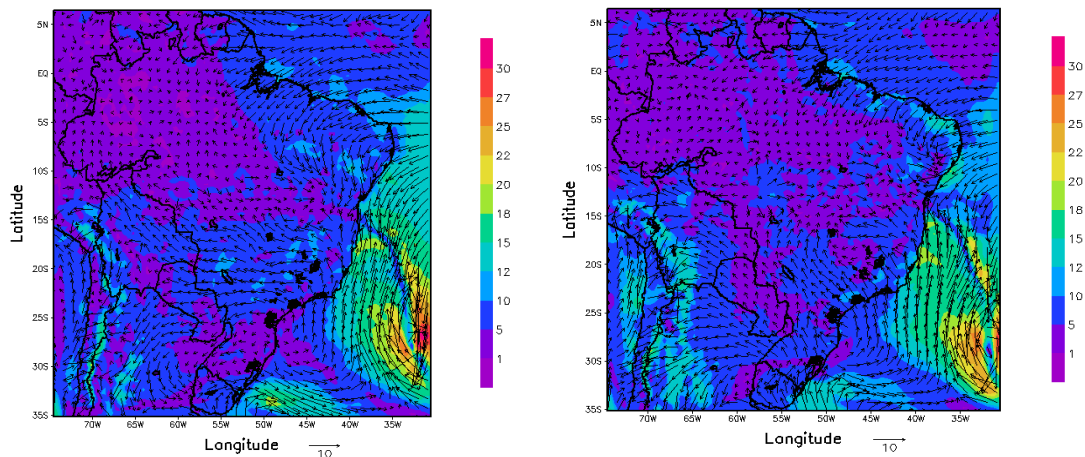
(e) Radiação Solar ($w.m^2$) às 23Z.

Figura 52 (a,b,c,d,e) - Radiação solar (W/m^2), dia 16/11/2014, resolução espacial 10km.

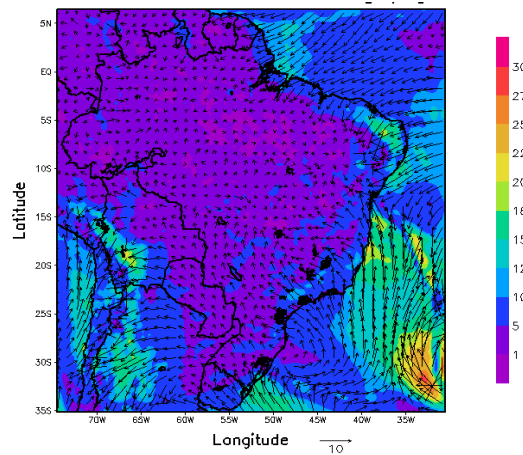
As figuras a seguir ilustram o campo de vento (figura 53) no primeiro nível do modelo, em 10 metros. Como resultado da modelagem a intensidade dos ventos neste dia é mais acentuados sobre o oceano, próximo ao Sudeste do Brasil.



(a,b) Velocidade (m/s) e direção do vento as 02Z e 08Z.



(c,d) Velocidade (m/s) e direção do vento as 14Z e 20Z.

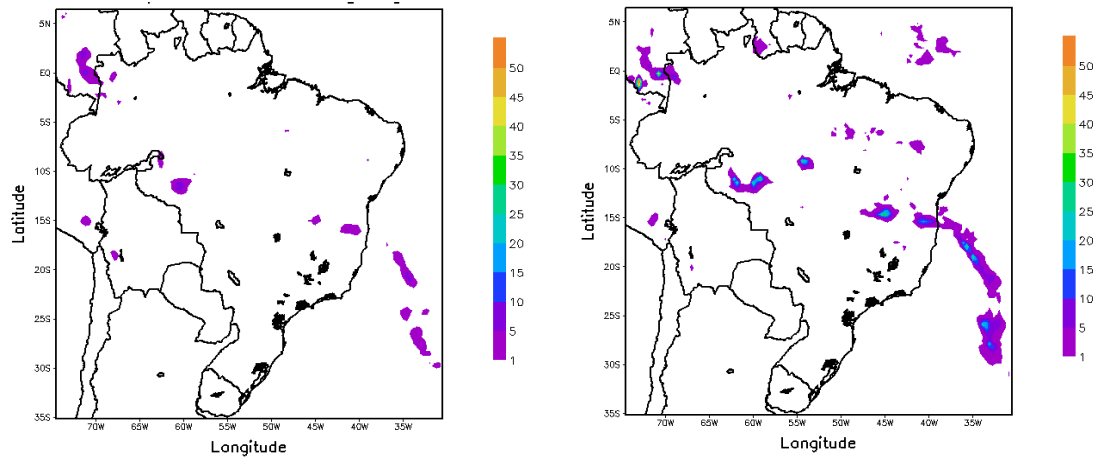


(e) Velocidade (m/s) e direção do vento as 23Z.

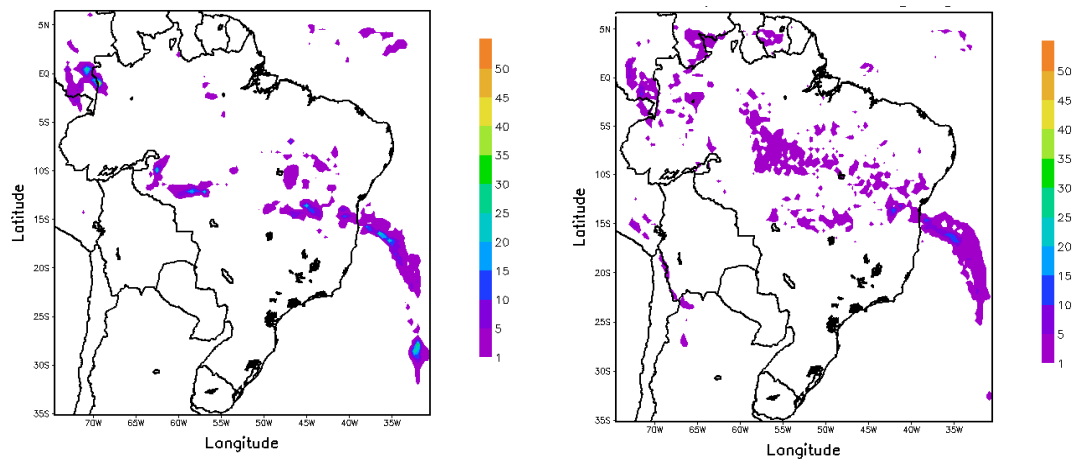
Figura 53 (a, b, c, d, e) - Velocidade e direção do vento, dia 16/11/2014, resolução espacial 10km.

- Precipitação

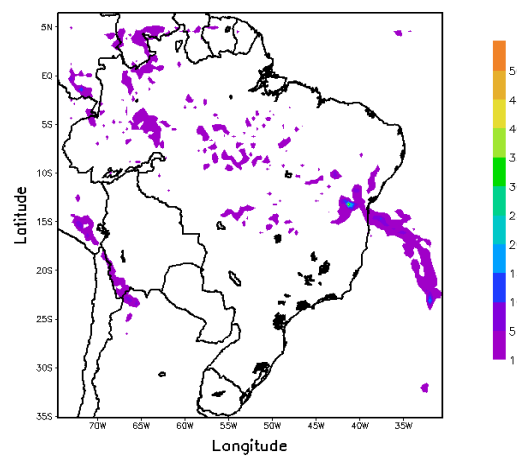
Como resultado da modelagem, a distribuição espacial da precipitação (figura 54) apresenta a configuração da Zona de Convergência do Atlântico Sul, com precipitações variando entre 1 a 15mm.



(a,b) Precipitação acumulada (mm) as 02Z e 08Z.



(c,d) Precipitação acumulada (mm) as 14Z e 20Z.

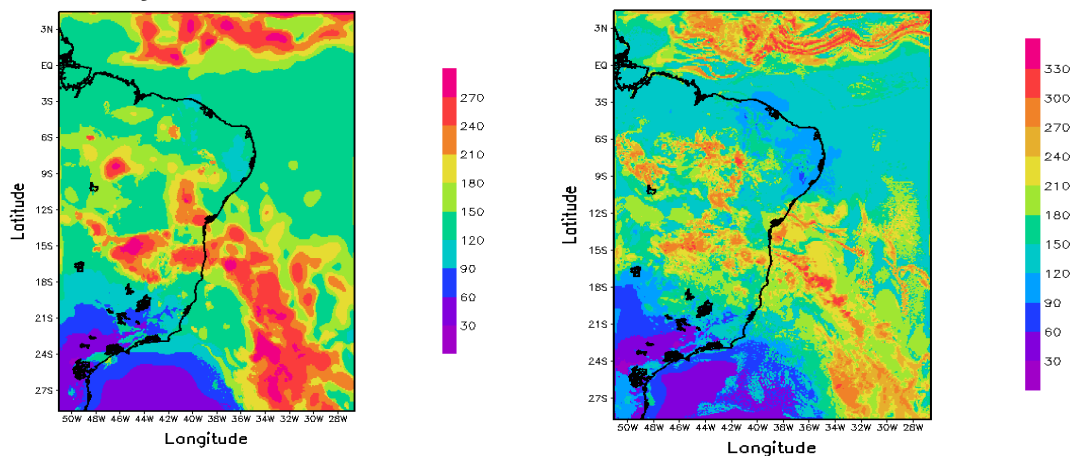


(e) Precipitação acumulada (mm) às 23Z.

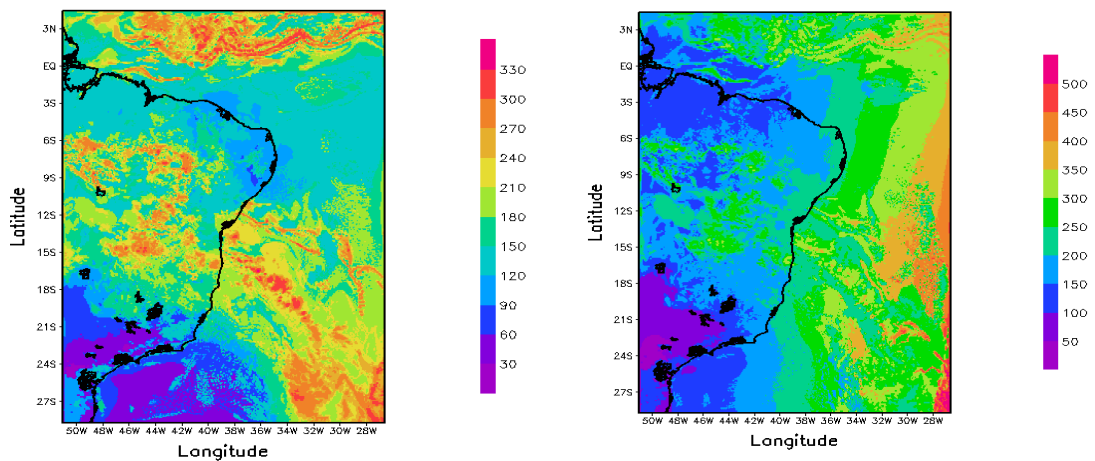
Figura 54 (a, b, c, d, e) - Precipitação (mm), dia 16/11/2014, resolução espacial 10km.

- Resultados Grade 2 - dia 16/11/2014

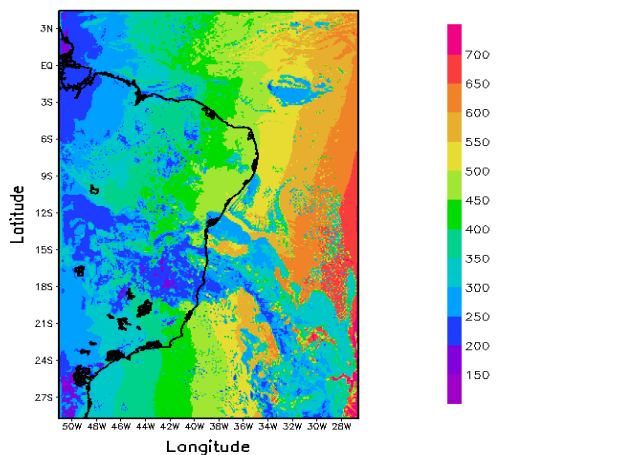
Região Nordeste
- Radiação Solar



(a,b) Radiação Solar (w.m²) as 02Z e 04Z.



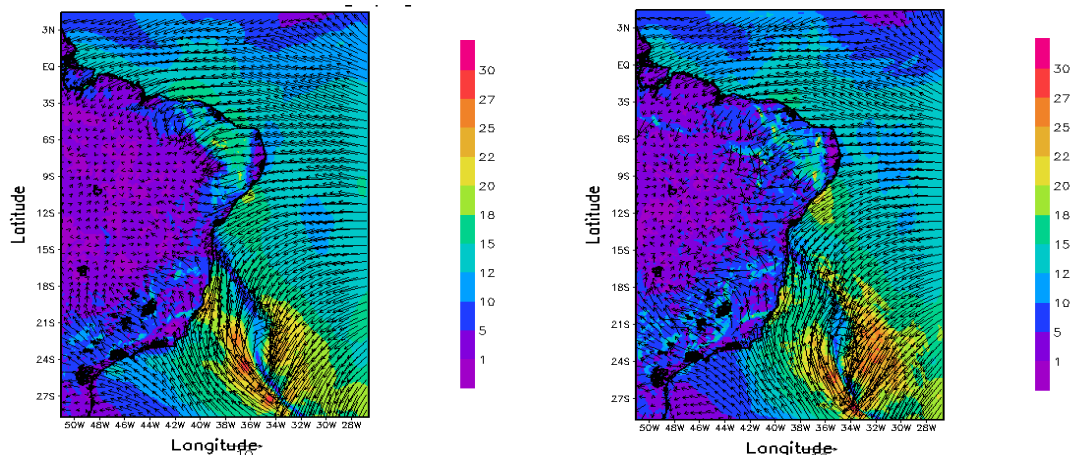
(c,d) Radiação Solar (w.m²) as 07h e 08Z.



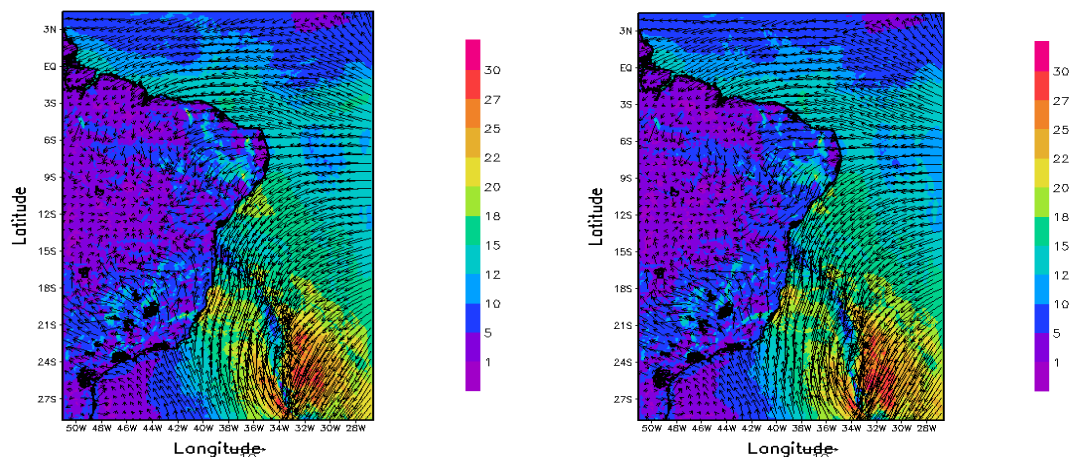
(e) Radiação Solar (w.m²) as 09Z.

Figura 55 (a, b, c, d, e) - Radiação Solar (W/m²), dia 16/11/2014, resolução espacial 5km - NE.

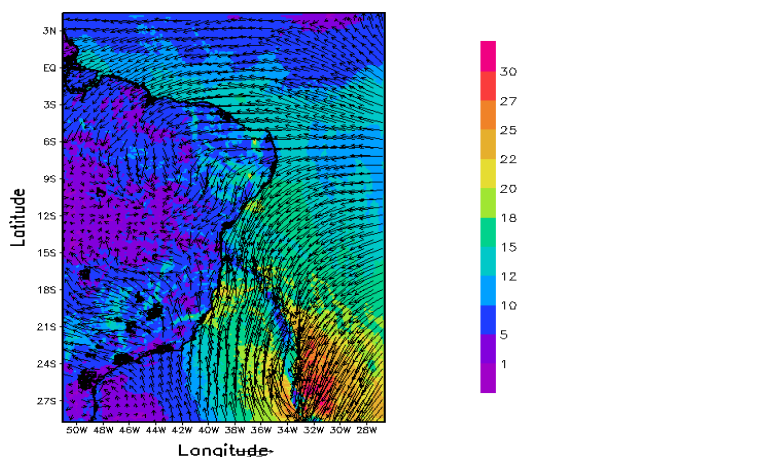
- Velocidade e direção do vento



(a,b) Velocidade (m/s) e direção do vento, as 02Z e 04Z.



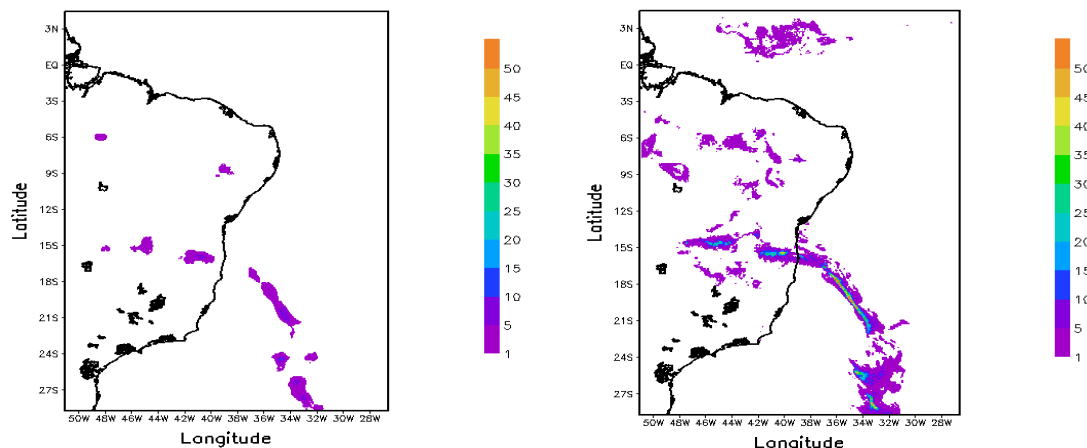
(c,d) Velocidade (m/s) e direção do vento, as 07h e 08Z.



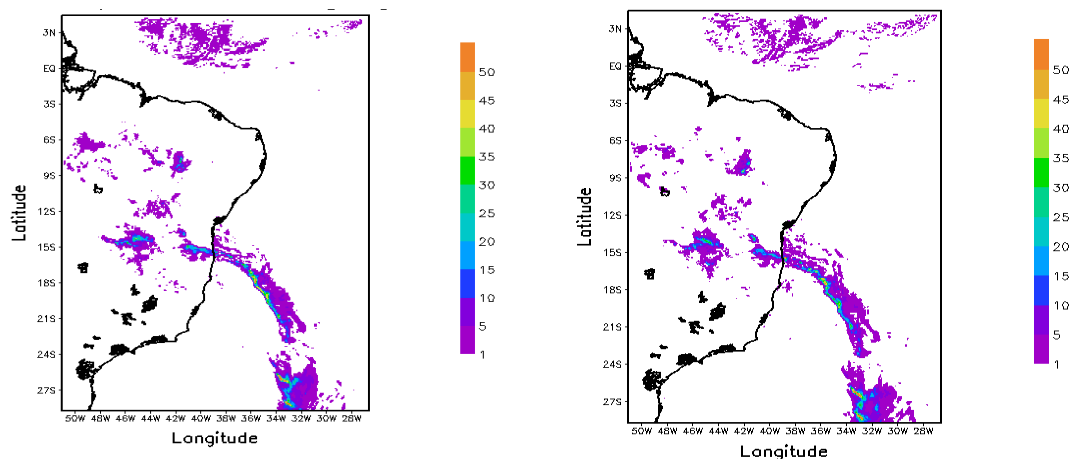
(e) Velocidade (m/s) e direção do vento as 09Z.

Figura 56 (a,b,c,d,e) – Velocidade (m/s) e direção do vento, dia 16/11/2014, resolução espacial 5km - NE.

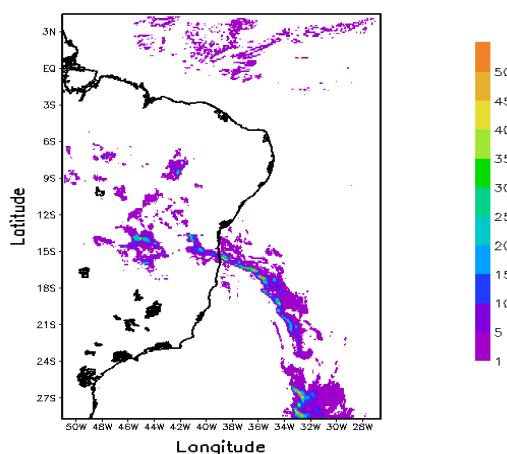
- Precipitação



(a,b) Precipitação acumulada (mm) as 00Z e 03Z.



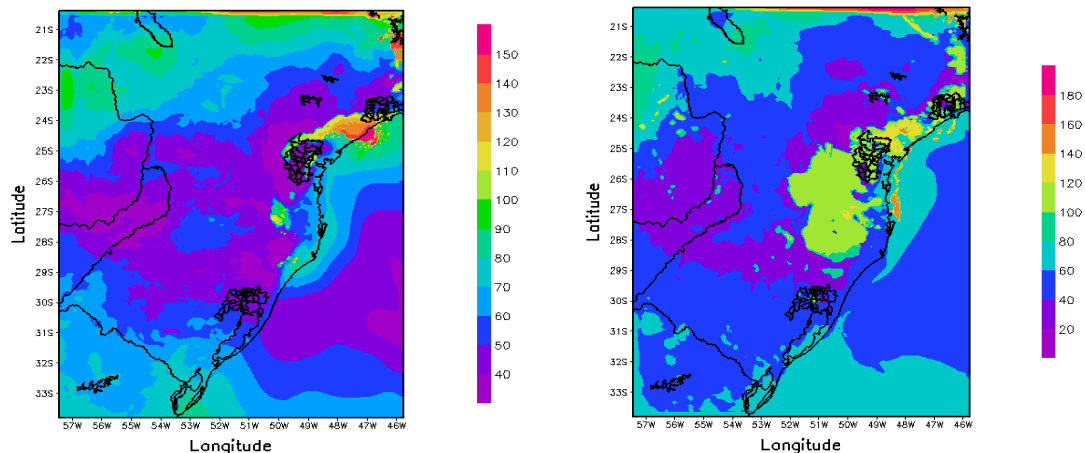
(c,d) Precipitação acumulada (mm) as 12Z e 14Z.



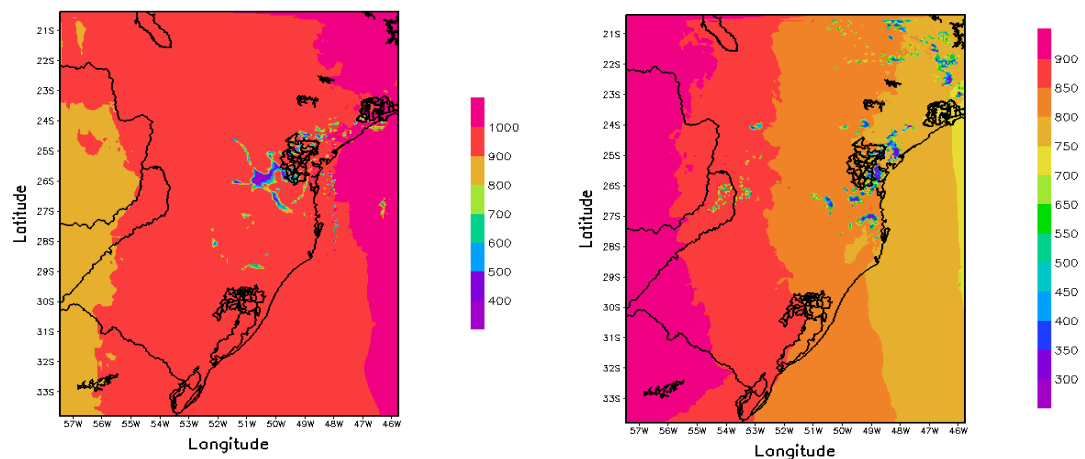
(a,b) Precipitação acumulada (mm) as 15Z

Figura 57 (a,b,c,d,e) - Precipitação acumulada (mm) dia 16/11/2014, resolução espacial 5km - NE.

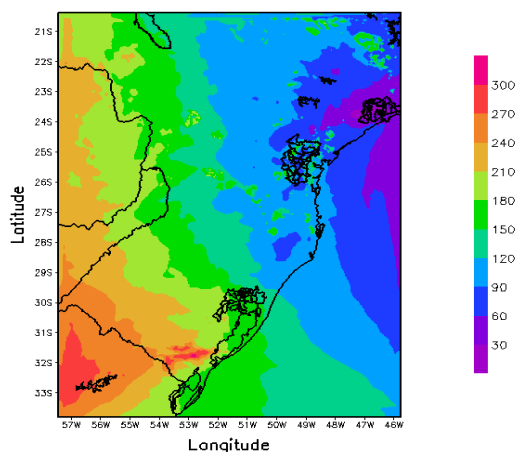
Região Sul
- Radiação Solar



(a,b) Radiação Solar ($w.m^2$) as 00Z e 03Z.



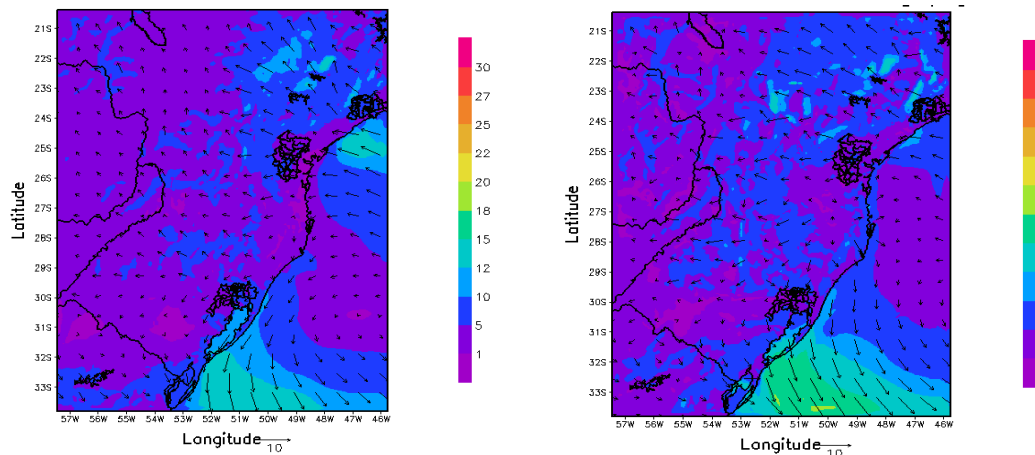
(c,d) Radiação Solar ($w.m^2$) as 12h e 18h.



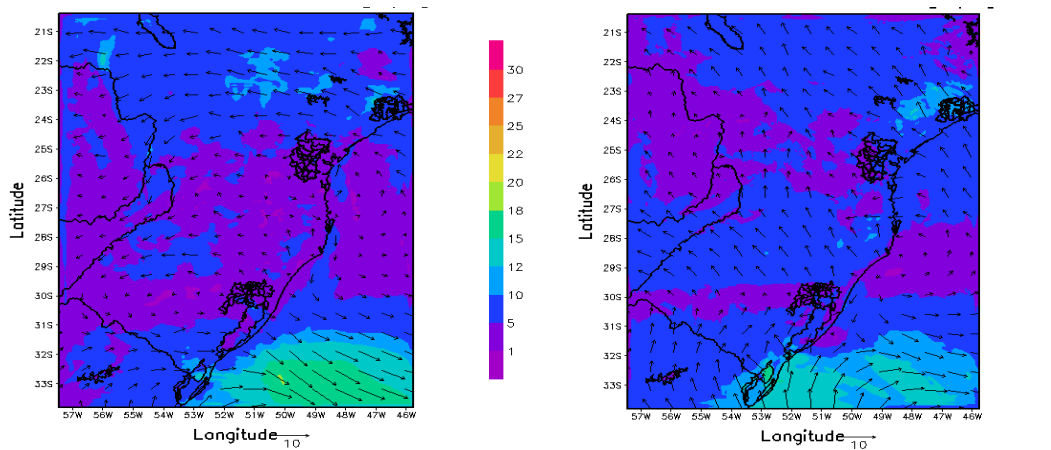
(e) Radiação Solar ($w.m^2$) às 21h.

Figura 58 (a,b,c,d,e) - Radiação Solar (W/m^2), dia 16/11/2014, resolução espacial 5km - SUL.

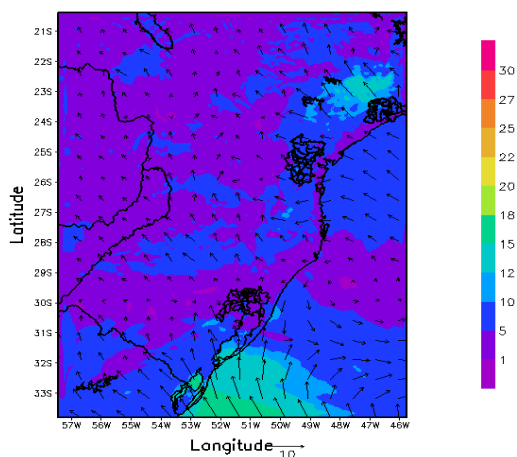
- Velocidade do vento



(a,b) Velocidade do vento as 03Z e 07Z.



(c,d) Velocidade do vento as 09Z e 12Z.



(e) Velocidade do vento às 00Z.

Figura 59(a,b,c,d,e) – Velocidade (m/s) e direção do vento, dia 16/11/2014, resolução espacial 5km - SUL.

7. SUGESTÕES

Considerando que a energia, não é um bem reciclável, os recursos de vento, sol e água, utilizados na geração de energia, devido as suas características renováveis e um fluxo constante, tem como assegurar um estoque permanente de recursos naturais para geração de eletricidade, podendo-se dizer um estoque infindável. Acrescenta-se ainda que esse tipo de energia atende ao suprimento de energia sem dilapidar o estoque global de recursos energéticos, contribuindo assim, para a conservação de outros recursos (não-renováveis).

Desta forma, é crescente a necessidade de se conhecer as potencialidades energéticas do Brasil, e essa necessidade torna-se mais aguda no que se refere às fontes alternativas de energia. Dentre essas, a energia eólica e solar, desponta como uma das mais promissoras.

Para definir o regime de vento e sol de uma determinada região, não é suficiente basear-se na análise de dados de apenas um ano. É necessário levar em consideração dados relativos a climatologia, com um mínimo de 30 anos de informações meteorológicas. Em geral, a coleta de dados realizada pelos serviços de meteorologia é bastante extensa, pois cobre longos períodos de tempo. Entretanto, em muitos casos, os dados não são suficientes para a determinação do potencial energético, em função da grande extensão territorial do País, o número de estações meteorológicas instaladas não é suficiente para cobrir todas as regiões. Desta forma, modelos numéricos tornam-se uma ferramenta extremamente útil para obtenção desses dados necessários para a organização de uma climatologia mais consistente, visto que os dados de vento, radiação e precipitação, de determinada região, bem como o uso de imagens de satélite meteorológicos, possibilitarão a identificação do tempo médio diário de vento, radiação solar incidente e precipitação na região de interesse.

Além de modelos numéricos com alta resolução, os dados de reanálise do Centro de Previsão dos Estados Unidos (NCEP) e da Agência Espacial Americana (NASA), ambos definem o estado da arte em modelagem e assimilação de dados, podem servir de referência para trabalhos futuros, onde sistemas similares podem ser utilizados para desenvolver um sistema de monitoramento e previsão do regime de ventos, sol e chuva.

A decisão sobre a conveniência da implantação de um sistema eólico para geração de energia, está condicionada a existência de condições meteorológicas favoráveis. Não resta dúvida de que o conhecimento local do regime dessas variáveis, é a informação mais importante a ser considerada no processo de decisão para a instalação de

sistemas que visem o aproveitamento máximo para geração de energia, bem como um monitoramento contínuo. Para isso é importante **ORGANIZAR AS INFORMAÇÕES METEOROLÓGICAS DO BRASIL**, de maneira integrada, onde tanto os dados meteorológicos de superfície e a modelagem numérica regional, servirão de suporte para a instalação de novos empreendimentos energéticos.

Para o êxito da organização destas informações é necessário buscar parceria junto aos institutos e centros regionais, e assim realizar um trabalho conjunto para o setor de energia, onde experimentos micrometeorológicos podem ser realizados em diferentes épocas do ano em áreas estratégicas. As campanhas experimentais podem ser realizadas em diferentes localidades do Brasil, durante diversos períodos. Através dos experimentos informações relacionadas aos perfis verticais das variáveis de vento, temperatura e umidade, podem ser traçadas até aproximadamente 500 metros com a utilização de balões piloto e radiossondagens, além desses perfis, informações relacionadas aos parâmetros micrometeorológicos da região, serão obtidos com o uso de estações de superfície.

As campanhas experimentais podem ser utilizadas como base para os modelos numéricos e procedimentos estatísticos avançados de assimilação de dados. Informações referente as reanálises da Agência Espacial Americana (NASA) e Centro Nacional de Meteorologia dos Estados Unidos (NCEP), estão disponíveis com informações para períodos superiores a 30 anos de dados, com dados a cada 6 h, e resolução espacial em torno de 50 km, estas podem ser refinadas com a utilização dos modelos de mesoescala, para uma resolução de 1 km.

Os dados obtidos durante as campanhas, dados de reanálise, os resultados dos modelos de mesoescala (WRF e RAMS) e modelo diagnóstico CALMET, podem gerar uma climatologia confiável de vento (direção e velocidade), radiação e precipitação, para os diferentes sítios experimentais distribuídos no território brasileiro. Como resultado do exposto acima, os perfis verticais de vento com resolução espacial de 10m, e variação horizontal da radiação e precipitação com resolução de 10 metros, podem ser utilizados para compor um conhecimento e análise de produção de energia.

Finalizando os possíveis trabalhos, pode-se ainda utilizar os diversos cenários de mudanças climáticas, disponibilizados pelo IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas), em conjunto com os modelos de mesoescala de alta resolução, para analisar os impactos potenciais e opções de adaptação e mitigação baseado nos resultados obtidos para períodos futuros.