



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA,
INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/02.13.14.07-TDI

ENERGÉTICA DA ZONA DE CONVERGÊNCIA DO ATLÂNTICO SUL (ZCAS)

Jaime Fernando António

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Meteorologia, orientada pelo Dr.
José Antonio Aravéquia, aprovada
em 14 de fevereiro de 2020.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3UU4TL8>>

INPE
São José dos Campos
2020

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GBDIR)

Serviço de Informação e Documentação (SESID)

CEP 12.227-010

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/7348

E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):

Presidente:

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

Membros:

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Cauê Silva Fróes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA,
INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/02.13.14.07-TDI

ENERGÉTICA DA ZONA DE CONVERGÊNCIA DO ATLÂNTICO SUL (ZCAS)

Jaime Fernando António

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Meteorologia, orientada pelo Dr.
José Antonio Aravéquia, aprovada
em 14 de fevereiro de 2020.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3UU4TL8>>

INPE
São José dos Campos
2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

António, Jaime Fernando.

An88e Energética da zona de convergência do Atlântico Sul
(ZCAS) / Jaime Fernando António. – São José dos Campos :
INPE, 2020.

xxviii + 150 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/02.13.14.07-TDI)

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional
de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2020.

Orientador : Dr. José Antonio Aravéquia.

1. ZCAS. 2. Energia potencial disponível da perturbação.
3. Instabilidade baroclínica e barotrópica. 4. Energia cinética da
perturbação. I.Título.

CDU 551.581.2



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): **Jaime Fernando Ant3nio**

T3tulo: "ENERG3TICA DA ZONA DE CONVERG3NCIA DO ATLANTICO SUL (ZCAS)"

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obten33o do T3tulo de **Mestre** em
Meteorologia

Dr. Dirceu Luis Herdies



Presidente / INPE / Cachoeira Paulista - SP

() Participa33o por Video - Confer3ncia

Aprovado () Reprovado

Dr. Jos3 Antonio Arav3quia



Orientador(a) / INPE / Cachoeira Paulista - SP

Participa33o por Video - Confer3ncia

Aprovado () Reprovado

Dr. Jos3 Paulo Bonatti

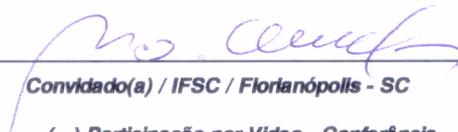


Membro da Banca / INPE / Cachoeira Paulista - SP

() Participa33o por Video - Confer3ncia

Aprovado () Reprovado

Dr. Mario Francisco Leal de Quadro



Convidado(a) / IFSC / Florian3polis - SC

() Participa33o por Video - Confer3ncia

Aprovado () Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

unanimidade

“A vida será mais complicada se você possuir uma curiosidade ativa, além de aumentarem as chances de você entrar em apuros, mas será mais divertida”.

EDWARD SPEYER
em *“Seis Caminhos a Partir de Newton”*, 1994

*A todas as **mães** que buscam todos os dias dar o melhor para seus filhos, em especial à **Teresa Fernando**, por todo apoio, amor e carinho, e a minha filha **Luzia**. Com **Muito Amor**.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo fôlego da vida e pela oportunidade de viver a experiência de observar a natureza através da ciência.

A meus pais, Jaime António e Teresa Fernando, por sempre me apoiarem e por todo esforço dedicado a nós.

A minha namorada, Isabel Nonjamba, pela paciência, compreensão e por incentivar e sempre me apoiar nessa jornada.

Aos meus irmãos, Madalena e Adão, por me aturarem sempre.

Aos meus amigos e familiares em Angola por todo apoio e incentivo.

A família Pachêco e Milhomem, em especial aos Srs. Tunílio Teixeira Milhomen Filho e Liliam de Fátima Pachêco Milhomem pelo carinho e recepção calorosa em sua casa.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José A. Aravéquia, pela amizade, orientação, e por se mostrar sempre disponível em todos os momentos do desenvolvimentos desta pesquisa.

Ao meus amigos e colegas, Nelson, Manuel, Anacleto, Eliseu, Dário, Agustinho, Bruno, João, Mateus, Luciano, Gabriel Pachêco, Erykson, Bruno Costa, Glícia, Lorena, Dayanis, Bianca, Tamires e a Mayna, pela amizade, incentivo e por estarem presente nessa caminhada.

A Gilvani Gomes e Isabella Talamoni pela amizade, incentivo e ajuda com os textos.

Aos Prof. Dr. José P. Bonatti, Manoel Alonso Gan, Dirceu Luis Herdies e Mário F. Leal de Quadro pelas críticas e sugestões.

Ao prof. Dr. Paulo Kubota pela disponibilização do código, que permitiu a elaboração deste trabalho.

A todos que de forma direta ou indiretamente tenham contribuído para que este trabalho fosse realizado.

Ao CNPq pela concessão de bolsa de estudos, sob o processo número 131725/2018-1.

RESUMO

A energia do Sol que chega ao sistema Terra-atmosfera gera energia potencial que é convertida em outras formas de energias que estão associadas às intensidades das tempestades (EC) e finalmente dissipada pelo atrito e pelos vórtices turbulentos. Durante este processo de geração e conversão de energia, sistemas como ZCAS podem se formar. As ZCAS são fenômenos atmosféricos de escala sinótica com grande impacto social sobre a AS. Elas são caracterizadas por uma banda de nuvens e chuvas orientada NW-SE que se estende desde o centro sul/SE da amazônia ao Atlântico subtropical sul com duração de 4 ou mais dias. O presente trabalho investiga a natureza energética das ZCAS, as características dos padrões de localização (Norte-PN, Centro-PC e Sul-PS), os mecanismos da formação, desenvolvimento e dissipação. Para isso, utiliza-se a abordagem de Oort (1964) do ciclo da energia de Lorenz sob um domínio misto. Por se tratar de um domínio de área restrita, componentes de fluxos e dos mecanismos dinâmicos associados ao ciclo de energia são considerados. Foram utilizados dados de temperatura, vento e geopotencial da reanálise ERA-5 no período de 01/10/1990 a 30/04/2018, que foi dividido em dois a fim de investigar possíveis mudanças na frequência de ocorrência, duração e intensidade das ZCAS. As análises dos resultados revelam importantes características do Ciclo da Energia de Lorenz (CEL) das ZCAS. Estes sugerem que, nas ZCAS a energia é gerada no estado básico de P_M a uma taxa média de $34,89 \text{ Wm}^{-2}$ e que o resfriamento através das nuvens desfavorece a geração de P_E [$G(P_E) = -5,69 \text{ Wm}^{-2}$]. As taxas de conversões seguem o sentido de trocas de energia representados nos diagramas, exceto pela instabilidade barotrópica observado durante os eventos de PN [$C(K_E, K_M) < 0$]. Uma análise detalhada baseada em subáreas de atuação das ZCAS, revelou que a instabilidade barotrópica domina nos trópicos e no setor mais ao sul de sua atuação. Os componentes de energias médias zonais evidenciam a influência do baixo gradiente horizontal de temperatura nas ZCAS (com P_M de $1,73 \cdot 10^5 \text{ Jm}^{-2}$) e a grande predominância de K_M ($10,14 \cdot 10^5 \text{ Jm}^{-2}$) através dos jatos subtropicais. As comparações dos resultados calculados para componentes de energias, mostraram que na média o 2º período foi 17,24% superior em relação ao 1º e que, as energias calculadas para PN é 20,45% e 21% superior do que em PC e PS respectivamente. As seções verticais, revelaram que nos componentes de conversões de energias as diferenças são maiores em altos níveis nas células de circulação de Hadley e Ferrel. Por exemplo, os processos barotrópicos nestas células, são mais intensas durante PC e PS. Os resultados sugerem ainda a possibilidade de existência de uma pequena célula de circulação dentro da célula de Ferrel, que seria consistente para explicar o baixo consumo de energia observado na célula de Ferrel durante PN [$C(P_M, K_M) < 0$]. Finalmente, concluímos que as ZCAS são geradas e mantidas pela convecção tropical originadas através da maior disponibilidade de radiação solar e pela convecção ao sul proporcionadas pelos jatos subtropicais e vórtice transientes de latitudes médias.

Palavras-chave: ZCAS. Energia Potencial Disponível da Perturbação. Instabilidade baroclínica e barotrópica. Energia Cinética da Perturbação.

ENERGY OF THE SOUTH ATLANTIC CONVERGENCE ZONE (SACZ)

ABSTRACT

The energy of the Sun arriving at the Earth-atmosphere system generates potential energy that is converted into other forms of energy that are associated with the intensities of the storms (KE) and finally dissipated by the friction and turbulent vortexes. During this process of energy generation and conversion, systems such as SACZ can form. The SACZ are synoptic scale atmospheric phenomena that has great social impact in AS. They are characterized by a band of clouds and rainfall oriented NW-SE that extends from the south/SE of the Amazon to the South subtropical Atlantic and persists for 4 or more days. Therefore, the present work investigates the energetic nature of the SACZ, the characteristics of the localization patterns (North, Center and South), the mechanisms of formation, development and dissipation. For this, we used the Lorenz energy cycle formulation following the Oort (1964) approach under a mixed domain. As it is a restricted area domain, components of flows and dynamic mechanisms associated with the energy cycle are considered. ERA-5 new generation reanalysis temperature, wind and geopotential data were used. The study period is from 01/10/1990 to 04/30/2018 (taking into account the dates of occurrence of the SACZ episodes occurrence), which was divided into two periods (from 01/10/1990 to 31/12 / 2005 and 01/01/2006 to 04/30/2018) to investigate possible changes in frequency of occurrence, duration and intensity of the SACZ. The results analysis reveal important Lorenz Energy Cycle (LEC) SACZ characteristics. These suggests that SACZ energy is generated in P_M basic state at a mean rate of $34,89 \text{ Wm}^{-2}$ and the cooling throughout the clouds works against the P_E [$G(P_E)=-5,69 \text{ Wm}^{-2}$] generation. The conversion rate follow the energies exchanges presented in the diagrams, except the barotropic instability observed during PN events [$C(K_E, K_M) < 0$]. A detailed analysis based in subareas of SACZ actuation, revealed that barotropic instability is dominant at tropics and at the southernmost sector of its actuation. The zonal average energy components shows the influence of the low horizontal temperature gradient over SACZ (with P_M equivalent to $1,73 \cdot 10^5 \text{ Jm}^{-2}$) and the great predominance of K_M ($10,14 \cdot 10^5 \text{ Jm}^{-2}$) due to subtropical jets. Energy components results comparisons, shows that on average the 2nd period was 17,24% superior in relation to the 1st and that calculated energies to PN is 20,45% and 21% superior than to PN and PS, respectively. The vertical cross sections, revealed that the energy conversions components differences are bigger at high levels at Hadley's and Ferrel's circulation cells. For example, the barotropic processes at Hadley's and Ferrel's circulation cells over SA is more intense during PC and PS. The results also suggests the possibility of the existence of a small cell inside Ferrel's cell, which would be consistent to explain the low energy consumption observed at Ferrel's cell during PN [$C(P_M, K_M) < 0$]. Therefore, SACZ are generated and maintained by tropical convection caused by higher solar radiation availability and by southward convection due to subtropical jets and mid-latitudes transient eddies.

Keywords: SACZ. Eddies's available potential energy. Baroclinic and barotropic instability. Eddies's kinetic energy.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
1.1 Esquema do espectro eletromagnético, em diferentes comprimento de onda.	2
1.2 Esquema de processos mais relevantes na interação da radiação solar com a atmosfera terrestre.	4
1.3 Representação esquemática dos sistemas atmosféricos na baixa e alta troposfera atuantes na AS.	6
2.1 Representação esquemática das principais características da dinâmica associada ZCAS.	14
2.2 Diagrama do ciclo de energia de Lorenz para uma atmosfera global. $G(P_M)$ e $G(P_E)$ são as Gerações da Energia Potencial Disponível Média Zonal (P_M) e Energia Potencial Disponível Média da Perturbação (P_E), (K_M) Energia Cinética Média Zonal, (K_E) Energia Cinética Média da Perturbação. $C(P_M, K_M)$, $C(P_M, P_E)$, $C(P_E, K_E)$ e $C(K_E, K_M)$ são as conversões de energia e $D(K_M)$ e $D(K_E)$, as respectivas dissipações de energia.	18
3.1 Representação da região de estudo com os respectivos padrões associados à localização das ZCAS em relação a sua posição climatológica. Padrão Sul - PS, Padrão Central - PC e Padrão Norte - PN. A linha preta pontilhada no centro da região das ZCAS representa a linha limite para as subdivisões dos padrões.	26
3.2 Representação esquemática do ciclo de energia para um domínio restrito.	31
3.3 Representação das divisões das subáreas de atuação da ZCAS.	36
4.1 Número total de eventos (N.E) e Total de dias (T.Dias) do ano nas quais foram observados os episódios de ZCAS. As linhas pontilhadas mostram a tendência e a média móvel da T.Dias. Os valores no retângulo localizado à esquerda da figura mostram as médias dos N.E (em vermelho), T.Dias (em verde) e Duração (em azul) dos episódios de ZCAS registrados nos dois períodos.	40
4.2 OLR para os dois períodos de análise.	43
4.3 O mesmo que na Figura 4.2, exceto para Período de análise de 1991-2018 e para os três padrões.	44
4.4 Diagrama do CEL para os Eventos de ZCAS ocorrido entre 1991 - 2018.	48

4.5	Secção vertical latitude – pressão da energia potencial disponível média zonal, P_M , para os dois períodos.	49
4.6	Secção vertical latitude – pressão da energia cinética média zonal, K_M , para os dois períodos.	50
4.7	Secção vertical latitude – pressão da energia potencial da perturbação, P_E , para os dois períodos.	51
4.8	Secção vertical latitude – pressão da energia cinética da perturbação, K_E , para os dois períodos.	52
4.9	Secção vertical latitude – pressão da taxa de conversão de P_M para P_E , $C(P_M, P_E)$, para os dois períodos.	54
4.10	Secção vertical latitude – pressão da taxa de conversão de P_E para K_E , $C(P_E, K_E)$, para os dois períodos.	55
4.11	Secção vertical latitude – pressão da taxa de conversão de K_E para K_M , $C(K_E, K_M)$, para os dois períodos.	56
4.12	Secção vertical latitude – pressão da taxa de conversão de P_M para K_M , $C(K_M, K_M)$, para os dois períodos.	58
4.13	Secção vertical latitude – pressão da taxa de fluxo de energia potencial média zonal, $B(P_M)$, para os dois períodos.	59
4.14	Secção vertical latitude – pressão da taxa de fluxo da energia cinética média zonal, $B(K_M)$, para os dois períodos.	60
4.15	Secção vertical latitude – pressão da taxa de fluxo da energia potencial dos distúrbios, $B(P_E)$, para os dois períodos.	61
4.16	Secção vertical latitude – pressão da taxa de fluxo energia cinética média zonal, $B(K_E)$, para os dois períodos.	62
4.17	Secção vertical latitude – pressão da taxa de força de pressão turbulenta, $B(E)$, para os dois períodos.	63
4.18	Diagrama do CEL para os episódios ocorridos entre 1991-2018 nos Padrões. 66	
4.19	Secções vertical latitude – pressão da energia potencial disponível média zonal, P_M , média dos eventos ocorridos entre 1991-2018.	68
4.20	Secções vertical latitude – pressão da energia cinética média zonal, K_M , média dos eventos ocorridos entre 1991-2018.	69
4.21	Secções vertical latitude – pressão da energia potencial da perturbação, P_E , média dos eventos ocorridos entre 1991-2018.	71
4.22	Distribuição espacial, latitude-longitude da energia potencial disponível da perturbação P_E , média dos eventos de ZCAS ocorridos entre 1991-2018. 72	
4.23	Secções vertical latitude – pressão da energia cinética da perturbação, K_E , média dos eventos ocorridos entre 1991-2018.	73

4.24	Distribuição espacial, latitude-longitude da energia cinética dos distúrbios, K_E , média dos eventos de ZCAS ocorridos entre 1991-2018.	74
4.25	Secções vertical latitude – pressão da taxa de conversão de P_M para P_E , $C(P_M, P_E)$, média dos eventos ocorridos entre 1991-2018.	76
4.26	Secções vertical latitude – pressão da taxa de conversão de P_E para K_E , $C(P_E, K_E)$ (com a formulação ' $v \cdot \nabla\Phi$ '), média dos eventos ocorridos entre 1991-2018.	77
4.27	Distribuição espacial, latitude-longitude da taxa de conversão de P_E para K_E , $C(P_E, K_E)$ (com a formulação ' $v \cdot \nabla\Phi$ '), média dos eventos de ZCAS ocorridos entre 1991-2018.	78
4.28	Secções vertical latitude – pressão da taxa de conversão de K_E para K_M , $C(K_E, K_M)$, média dos eventos ocorridos entre 1991-2018.	80
4.29	Secções vertical latitude – pressão da taxa de conversão de P_M para K_M , $C(P_M, K_M)$ (com a formulação ' $v \cdot \nabla\Phi$ '), média dos eventos ocorridos entre 1991-2018.	82
4.30	Secções vertical latitude – pressão da taxa de fluxo da energia potencial disponível média zonal, $B(P_M)$, média dos eventos ocorridos entre 1991-2018.	83
4.31	Secções vertical latitude – pressão da taxa de fluxo da energia cinética média zonal, $B(K_M)$, média dos eventos ocorridos entre 1991-2018.	84
4.32	Secções vertical latitude – pressão da taxa de fluxo da energia potencial da perturbação, $B(P_E)$, média dos eventos ocorridos entre 1991-2018.	86
4.33	Distribuição espacial, latitude-longitude da taxa de fluxo da energia potencial da perturbação, $B(P_E)$, média dos eventos de ZCAS ocorridos entre 1991-2018.	87
4.34	Secções vertical latitude – pressão da taxa de fluxo da energia cinética da perturbação, $B(K_E)$, média dos eventos ocorridos entre 1991-2018.	89
4.35	Distribuição espacial, latitude-longitude da taxa de fluxos de energia cinética média zonal, $B(K_E)$, média dos eventos de ZCAS ocorridos entre 1991-2018.	90
4.36	Secções vertical latitude – pressão da taxa de força de pressão da perturbação, $B(E)$, média dos eventos ocorridos entre 1991-2018.	92
4.37	o mesmo que na Figura 4.27, exceto pela taxa de força de pressão da perturbação, $B(E)$	93
4.38	Diagramas do CEL para o evento ocorridos entre 12 a 26/12/2013. Em azul nos reservatórios representam as tendências médias de energia. Unidades estão em $10^5 Jm^{-2}$ para as energias e Wm^{-2} para as tendências, taxas de converções, geração, fluxos, força de pressão e dissipação.	96

4.39	Secções vertical Latitude – Pressão dos componentes de energia nas regiões de atuação de ZCAS, média entre 12 e 26/12/2013.	98
4.40	Como na Figura 4.39, exceto que é para o Período de 12 a 15/12/2013.	99
4.41	Como na Figura 4.39, exceto que é para o Período de 16 a 22/12/2013.	100
4.42	Como na Figura 4.39, exceto que é para o Período de 23 a 26/12/2013.	101
4.43	Séries temporais de energia potencial disponível média zonal (P_M , em vermelho), energia potencial disponível da perturbação (P_E , em azul), energia cinética média zonal (K_M , em verde), energia cinética da perturbação (K_E , em roxo) média das subáreas 1 a 5 do evento de ZCAS entre 00UTC do dia 12/12/2013 a 18UTC do dia 15/12/2013. A linha pontilhada em preto é a série temporal para Energia Mecânica Total, igual ao somatório dos 4 componentes de energia. As unidades estão em $10^5 J/m^2$	103
4.44	Diagrama de fases de evolução dos eventos de ZCAS	106
4.45	Diagrama do modelo conceitual dos padrões de circulação meridional e energética durante os eventos de ZCAS.	108
B.1	Células de circulação atmosférica (Hadley, Ferrel e Polar).	130
C.1	Divergência (sombreado) e vento em 200 hPa, períodos 1991-2018. (a) para PC, (b) para PN e (c) para PS	142
C.2	Ômega (sombreado) e geopotencial (contorno) em 500 hPa, períodos 1991-2018. Válida para (a) PC, (b) PN e (c) PS.	143
C.3	Umidade específica integrada na coluna de 300 a 1000 hPa (sombreado) e vento em 850 hPa, períodos 1991-2018. Válida para (a) PC, (b) PN e (c) PS. As unidades estão em mm/(6.5dia) e m/s.	144
C.4	Secções vertical Latitude – Pressão da taxa de calor diabático (Q/C_p) para cada subárea de atuação do evento de ZCAS. Média para os períodos (a) de 12 a 26/12/2013, (b) de 12 a 15/12/2013, (c) de 16 a 22/12/2013, e (d) de 23 a 26/12/2013.	145
C.5	Desvio em relação a média zonal do geopotencial em 500 hPa do Período de 1991-2005. (a) para os eventos de ZCAS e (b) não ZCAS.	148
C.6	O mesmo que na Figura C.5, exceto para o Período de 2006 a 2018.	149
C.7	Desvio em relação a média zonal do geopotencial em 500 hPa do Período de 1991-2018. (a) Para os eventos de PN, (b) de PC e (c) de PS.	150

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
C.1 Datas e duração dos eventos de ZCAS Observado. PS, PC e PN representam os respectivos Padrões (Sul, Central e Norte).	131
C.2 Estatísticas dos episódios de ZCAS. Número total de eventos - n.e; t.d - total de dias do ano com ZCAS; e duração média dos episódios para cada ano e diferentes fontes. Inf das met - Influência da Metodologia. . .	136
C.3 Estatísticas dos episódios de ZCAS. Número total de eventos - n.e; t.d - total de dias do ano com ZCAS; e duração média dos episódios observados durante os dois períodos para cada Padrão.	137
C.4 Componentes do CEL para os episódios ocorridos entre 1991-2018. Unidades estão em $10^5 Jm^{-2}$ para as energias e Wm^{-2} para as taxas de converções, geração, fluxos, força de pressão e dissipação.	138

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AB	–	Alta da Bolívia
AS	–	América do Sul
ASAS	–	Alta Subtropical do Atlântico Sul
ASPS	–	Alta Subtropical do Pacífico Sul
CEL	–	Ciclo de Energia de Lorenz
IST	–	Irradiância Solar Total
OLR	–	Outgoing Longwave Radiation
PC	–	Padrão Central
PN	–	Padrão Norte
PS	–	Padrão Sul
SMAS	–	Sistema de Monções da América do Sul
SORCE	–	Solar Radiation and Climate Experiment
TIM	–	Total Irradiance Monitor
VCAN	–	Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis
ZCAS	–	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	–	Zona de Convergência Intertropical
ZCOU	–	Zona de Convergência de Umidade

LISTA DE SÍMBOLOS

a	– Raio Médio da Terra
C_p	– Calor Específico a Pressão Constante
R	– Constante dos gases para ar seco
k	– Kappa Igual a, $\frac{R}{C_p}$
dm	– Elemento de Massa m , Igual a, $\frac{(a^2 \cos \phi)}{g} d\lambda d\phi dp$
g	– Aceleração Devido à Gravidade
p	– Pressão
t	– Tempo
T	– Temperatura
θ	– Temperatura Potencial
Γ_d	– Lapse rate da Temperatura Para o Ar Seco, Igual a, $\frac{g}{C_p}$
Γ	– Lapse rate da Temperatura do Ar, Igual a, $\frac{dT}{dz}$
u	– Componente Zonal do Vento (Positivo: Leste)
v	– Componente Meridional do Vento (Positivo: Norte)
ω	– Velocidade Vertical (Positivo: Para Baixo)
Φ	– Geopotencial
Z	– Altura Geopotencial
γ	– Fator de Estabilidade, Igual a, $-\left(\frac{\theta}{T}\right)\left(\frac{R}{C_p P}\right)\left(\frac{\partial[\langle\tilde{\theta}\rangle]}{\partial p}\right)^{-1}$
q	– Umidade Especifica
ϕ	– Latitude
λ	– Longitude
$C(P,K)$	– Taxa de Conversão de Energia P Para K
P	– Energia Potencial Disponível
K	– Energia Cinética
$G(P)$	– Taxa de Geração de P
$D(K)$	– Taxa de Dissipação de K
P_M, P_E	– Energia Potencial Média, Perturbação
P_{TE}, P_{ES}	– Energia Potencial Perturbação Transiente, Estacionário
K_M, K_E	– Energia Cinética Média, Perturbação
K_{TE}, K_{ES}	– Energia Cinética Perturbação Transiente, Estacionário
$B(X)$	– Componentes de Fluxo de X
$B\Phi(M)$	– Mecanismos Dinâmico das Fronteiras Zonal
$B\Phi(E)$	– Mecanismos Dinâmico das Fronteiras dos Desvios
dx	– Igual a, $a \cos \phi \partial \lambda$
dy	– Igual a, $a \partial \phi$
$\langle X \rangle$	– Média Temporal de X, Igual a $\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} X dt$
X'	– Desvio da Média Temporal de X, Igual a $X - \langle X \rangle$

- $[X]$ – Média Zonal de X, Igual a $\frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} X d\lambda$
- X^* – Desvio da Média Zonal de X, Igual a $X - [X]$
- \widetilde{X} – Média da Área de X Sobre uma Superfície de Pressão Fechada,
 Igual a $\frac{1}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\sin \phi_2 - \sin \phi_1)} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \int_{\phi_1}^{\phi_2} X \cos \phi d\phi d\lambda$
- X'' – Desvio da Média Global de X, Igual a $X - \widetilde{X}$

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo geral	8
1.1.1 Objetivos específicos	8
1.2 Justificativas	9
2 EMBASAMENTO TEÓRICO	11
2.1 Zona de convergência do Atlântico Sul (ZCAS)	11
2.1.1 Influências remotas sobre as ZCAS	14
2.2 Energia da atmosfera terrestre	16
2.2.1 Energia potencial disponível e energia cinética	16
2.2.2 Ciclo de energia de Lorenz para atmosfera terrestre	17
2.2.3 Breve histórico de estudos sobre energética atmosférica	20
3 METODOLOGIA	25
3.1 Região de estudo	25
3.2 Dados utilizados	25
3.3 Equações empregadas para o cálculo do ciclo de energia	28
3.3.1 Componentes do ciclo de energia no domínio misto espaço-tempo	28
3.3.2 Componentes de conversões, gerações e dissipações de energia	29
3.3.3 Equações dos fluxos e dos mecanismos dinâmicos associados ao Ciclo Energia de Lorenz (CEL) para um domínio restrito	31
3.4 Análise estatística, dinâmicas e termodinâmicas dos episódios de ZCAS e procedimentos de cálculo das equações	34
3.5 Procedimentos usados para análise das características energéticas das ZCAS	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
4.1 Análise estatística dos episódios de ZCAS	39
4.2 Análise Sinótica dos episódios de ZCAS	41
4.2.1 OLR dos episódios de ZCAS	42
4.3 Energética das ZCAS	44
4.3.1 Energética das ZCAS durante os dois períodos de análise 1991-2005 e 2006-2018	45

4.3.1.1	Diagrama dos estados médios do Ciclo de Energia de Lorenz – CEL .	45
4.3.1.2	Distribuição espacial dos componentes de energia	47
4.3.1.3	Estrutura vertical de P_M	47
4.3.1.4	Estrutura vertical de K_M	49
4.3.1.5	Estrutura vertical de P_E	50
4.3.1.6	Estrutura vertical de K_E	51
4.3.1.7	Distribuição espacial dos componentes de taxas de conversões de energia	52
4.3.1.8	Estrutura vertical de $C(P_M, P_E)$	53
4.3.1.9	Estrutura vertical $C(P_E, K_E)$	54
4.3.1.10	Estrutura vertical de $C(K_E, K_M)$	55
4.3.1.11	Estrutura vertical de $C(P_M, K_M)$	56
4.3.1.12	Distribuição espacial dos componentes de taxas de fluxos de energia e dos mecanismos dinâmicos	57
4.3.1.13	Estrutura vertical de $B(P_M)$	57
4.3.1.14	Estrutura vertical de $B(K_M)$	59
4.3.1.15	Estrutura vertical de $B(P_E)$	60
4.3.1.16	Estrutura vertical de $B(K_E)$	62
4.3.1.17	Estrutura vertical de $B(E)$	63
4.3.2	Análise energética das ZCAS PC, PN e PS	64
4.3.2.1	Esquema do Ciclo de Energia de Lorenz (CEL) das ZCAS ocorridos entre 1991-2018, para os Padrões Sul - PS, Norte - PN e Central - PC	64
4.3.2.2	Estrutura vertical de P_M para PN, PC e PS	67
4.3.2.3	Estrutura vertical de K_M para PN, PC e PS	67
4.3.2.4	Estrutura vertical de P_E para PN, PC e PS	69
4.3.2.5	Estrutura vertical de K_E para PN, PC e PS	70
4.3.2.6	Estrutura vertical de $C(P_M, P_E)$ para PN, PC e PS	72
4.3.2.7	Estrutura vertical de $C(P_E, K_E)$ para PN, PC e PS	75
4.3.2.8	Estrutura vertical de $C(K_E, K_M)$ para PN, PC e PS	75
4.3.2.9	Estrutura vertical de $C(P_M, K_M)$ para PN, PC e PS	79
4.3.2.10	Estrutura vertical de $B(P_M)$ para PN, PC e PS	81
4.3.2.11	Estrutura vertical de $B(K_M)$ para PN, PC e PS	81
4.3.2.12	Estrutura vertical de $B(P_E)$ para PN, PC e PS	85
4.3.2.13	Estrutura vertical de $B(K_E)$ para PN, PC e PS	85
4.3.2.14	Estrutura vertical de $B(E)$ para PN, PC e PS	91
4.3.3	Análise energética do episódio de ZCAS ocorrido entre 12 e 26/12/2013	94

4.3.3.1	Análise dos diagramas dos componentes do CEL para o evento de ZCAS ocorridos entre 12 e 26/12/2013	94
4.3.3.2	Análise das estruturas verticais dos componentes de energia para o evento de ZCAS ocorrido entre 12 e 26/12/2013	95
4.3.3.3	Séries temporais dos componentes de energia para o evento de ZCAS ocorrido entre 12 e 26/12/2013	102
4.4	Diagrama conceitual dos padrões de ZCAS	104
4.4.1	Diagrama de fases de evolução da ZCAS	105
4.4.2	Modelo conceitual dos padrões de circulação meridional e dos aspectos energéticos das ZCAS	106
5	CONCLUSÕES	109
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115
	APÊNDICE A - INSTABILIDADE ATMOSFÉRICA	127
A.1	Instabilidade barotrópica e baroclínica atmosférica	127
	APÊNDICE B - CIRCULAÇÃO ATMOSFÉRICA	129
B.1	Célula de Hadley	129
B.2	Célula de Ferrel	130
	APÊNDICE C - TABELAS DE DATAS E DOS COMPONENTES DO CEL DOS EPISÓDIOS DE ZCAS	131
C.1	Análise sinótica para os diferentes padrões, PN, PC e PS	141
C.2	Taxa de calor diabático para subáreas de atuação das ZCAS	144
C.3	Distribuição espacial da variação zonal do geopotencial em 500 hPa	147

1 INTRODUÇÃO

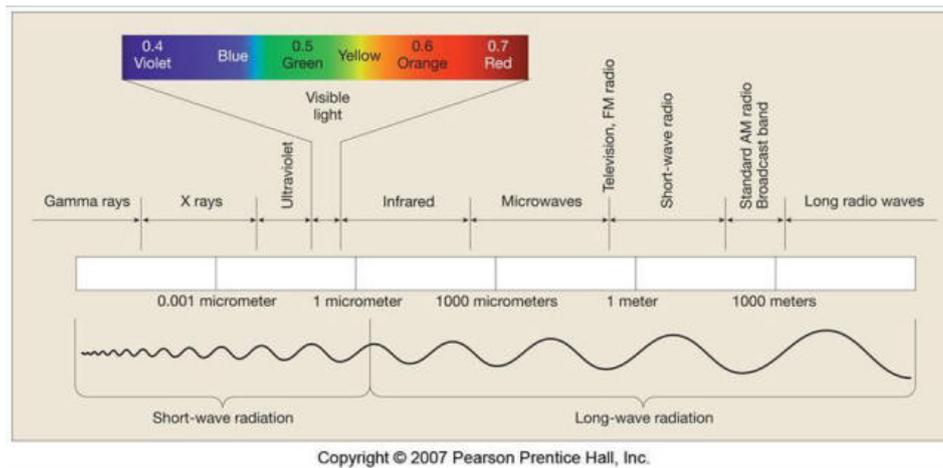
O ciclo de energia que descreve o comportamento atmosférico em suas mais variadas escalas foi desenvolvida por Lorenz (1955). Este, parte do princípio de transformação de energia, como a radiação solar que chega gera energia potencial que é transferida para a energia cinética e é finalmente perdida para a dissipação de atrito. Ela tem sido amplamente usada para estudar e compreender a ocorrência de tempestades em várias partes do globo (ver por exemplo os trabalhos de Mendonça e Bonatti (2008a), Mendonça e Bonatti (2008b), Veiga et al. (2008), Da Silva (2010), Da Silva e Satyamurty (2013), Nestares (2017)), descrever as características da circulação geral da atmosfera (PAN, 2015; KIM; KIM, 2013; LI et al., 2007a) e mudanças climáticas (PAN et al., 2017).

Considerando o sistema Terra, Oceano e atmosfera como um sistema termodinâmico, torna-se indispensável conhecer a principal fonte de energia para esse sistema, a fim de compreender as transformações e processos de trocas de energia (na forma de calor) que ocorrem dentro desse sistema. Pois, essas energias, geram movimentos e conseqüentemente os fenômenos atmosféricos tais como: os associados aos Sistemas de Monções da América do Sul (SMAS) (ZHOU; LAU, 1998), Índia e África (BARRY; CHORLEY, 2013), que estão ligados a mudanças nos padrões do escoamento do vento (circulação) e ocorrências de chuvas sobre essas regiões (ZHOU; LAU, 1998; HOLTON; HAKIM, 2013; GAN et al., 2004). No entanto, no caso das monções Sul americana, esses escoamentos podem gerar uma banda de nebulosidade e chuvas com orientação noroeste-sudeste (NW-SE) que se estende desde o sul/SE da região amazônica ao SE do Brasil, abrangendo o sudoeste (SO) do Atlântico subtropical sul conhecida como Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (KODAMA, 1992; QUADRO, 1994; CARVALHO et al., 2002; CARVALHO et al., 2004; ESCOBAR, 2019) presente durante o verão austral (dezembro-fevereiro) (QUADRO, 1994; ZHOU; LAU, 1998; CAVALCANTI et al., 2009; REBOITA et al., 2010).

O Sol é a nossa maior e a mais importante fonte de energia. Possui um diâmetro de aproximadamente 1.400.000 km e uma massa específica de $1,41 \text{ g/cm}^3$. É constituído de matéria gasosa, principalmente de hidrogênio ($\sim 75\%$) e hélio ($\sim 23\%$) (VIANELLO; ALVES, 2012), além de alguns elementos mais pesados como ferro, silício, néon e carbono (YAMASOE; CORRÊA, 2016). Devido a sua alta temperatura ($\sim 5.800 \text{ K}$), emite energia na forma de radiação em praticamente todo comprimento de onda do espectro eletromagnético (Figura 1.1). Sendo que em meteorologia e ciências atmosféricas em geral, os comprimentos de ondas localizadas na região do visível,

infravermelho (IV) e microondas são as de maior destaque devido aos processos de interação entre a radiação e as partículas de aerossóis (incluindo nuvens) e gases presente na atmosfera.

Figura 1.1 - Esquema do espectro eletromagnético, em diferentes comprimento de onda.



Fonte: NATIONAL ASTRONAUTICAL AND SPACE ADMINISTRATION - NASA (2007).

Segundo Yamasoe e Corrêa (2016), a quantidade de energia por unidade de tempo emitida na forma de radiação incidente sobre um elemento de superfície contendo um ponto e a área do elemento é denominada Irradiância. No entanto, como se sabe, a irradiância solar total (IST) que representa a taxa de energia emitida pelo Sol sobre uma superfície de área unitária, mantida em ângulo reto com os raios solares, em um ponto fora da atmosfera da Terra integrada em todo comprimentos de onda do espectro eletromagnético comumente conhecida como constante solar varia, isso é, depende da atividade solar e da distância da Terra ao Sol. Contudo, para estudos e compreensão do clima, valores médios podem ser considerados.

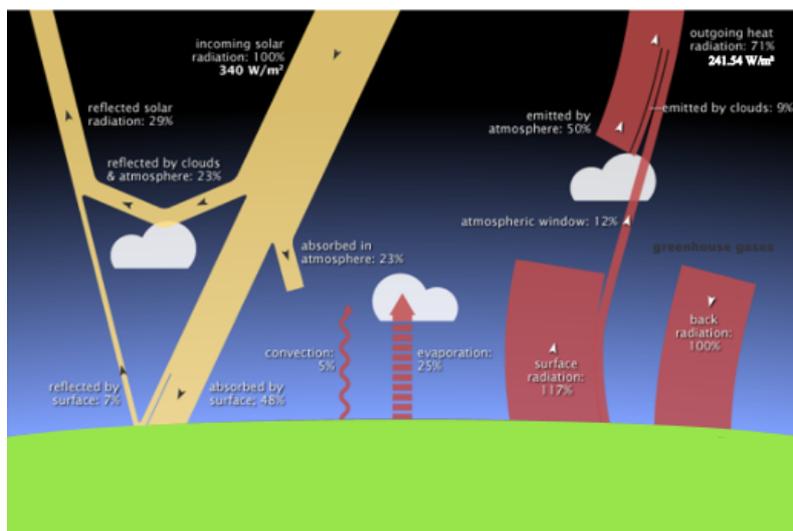
Resultados das medidas mais recente do instrumento Total Irradiance Monitor (TIM) da missão Solar Radiation and Climate Experiment (SORCE) / TIM lançado no início de 2003, mostram um valor de 1360.80 ± 0.50 W/m² para o IST durante os últimos 15 anos (2004-2018) (ver web-site: <http://lasp.colorado.edu/home/sorce/instruments/tim/>; (KOPP; LEAN, 2011)) um valor aproximadamente 0,34% inferior ao divulgado nos anos 90 (1365.4 ± 1.30 W/m², (VIEIRA et al., 2012)), com maiores intensidade entre 35°N e 35°S de latitude

(trópicos e subtropicais) e menor nas regiões de latitudes médias e polares (VIEIRA et al., 2012). No entanto, deve-se lembrar que ambos os resultados foram obtidos por instrumentos diferentes.

Essas oscilações na intensidade de IST, são refletidos em superfícies. Considerando que apenas 1/4 dessa quantidade chega realmente no topo da atmosfera, e que o albedo global é de 29,3% (99,68 W/m² do IST) (de acordo com os dados de observações globais de satélites baseadas na banda CERES - Clouds and the Earth's Radiant Energy System, ver Stephens et al. (2015) para maiores detalhamento), significa que cerca de 240,52 W/m² é absorvida continuamente pelo sistema Terra-atmosfera e que deverá sair para que se mantenha o equilíbrio termorradiativo (térmico e radiativo) da atmosfera. Contudo, Costa e Shine (2012) e literaturas por eles citados, mostram que a radiação total de saída (radiação de onda longa - OLR) é de 235 W/m², aproximadamente 2,3% inferior que a quantidade absorvida continuamente pelo sistema (240,52 W/m²). No entanto, em uma atmosfera em equilíbrio de fluxo radiativo, o albedo global teria de ser igual a 31%, ou seja, cerca de 105,20 W/m² deveria ser perdido para o espaço para que haja equilíbrio (o que quer dizer que há um provável excesso de energia de 5,52 W/m², segundo essas fontes). De acordo com Costa e Shine (2012), dessa quantidade (235 W/m²), 8,5% (20 W/m², (COSTA; SHINE, 2012)) é utilizada para os processos que envolvem o sistema Terra-atmosfera.

Na Figura 1.2, é apresentado um esquema dos processos sofridos pela radiação na atmosfera terrestre. Onde constata-se que cerca dos 29% da radiação solar global é refletida para o espaço e 71% é absorvida pela atmosfera e superfície da terrestre. Em resposta a essa radiação incidente absorvida, o sistema superfície-atmosfera, emite uma radiação infravermelha total de saída de ~ 71% o qual envolve os processos de geração e liberação de calor latente e sensível dentro da atmosfera terrestre.

Figura 1.2 - Esquema de processos mais relevantes na interação da radiação solar com a atmosfera terrestre.



Fonte: Adaptado de Pan (2015).

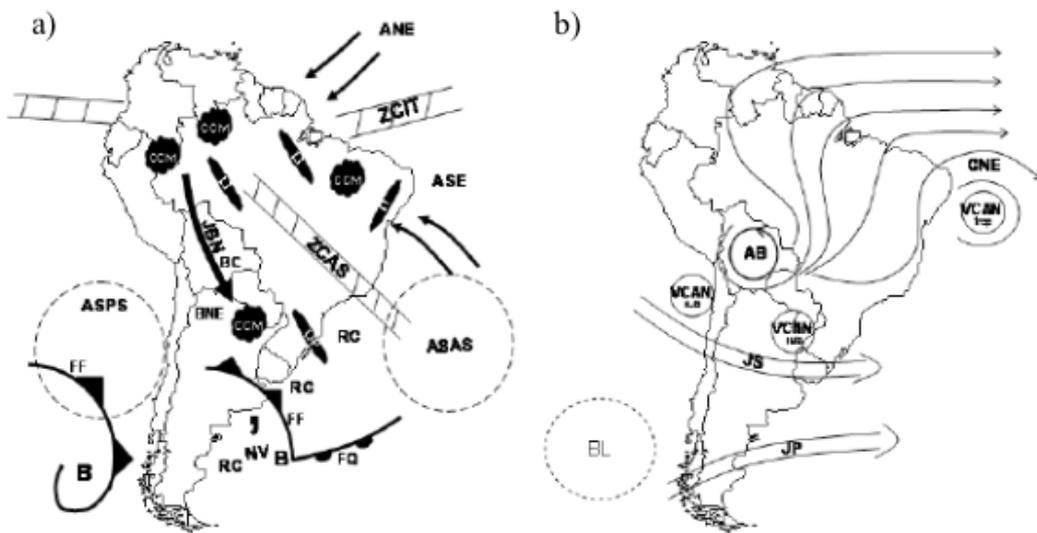
O continente Sul americano apresenta características climáticas específicas, desde as regiões de climas tropical quente e chuvoso (na Amazônia) ao deserto (Atacama) e regiões montanhosas em quase todo o extremo oeste da América do Sul (AS). Pode-se sucintamente resumir os principais sistemas atuantes sobre a AS os quais estão associados ao sistema de monção na AS e conseqüentemente ao início da estação chuvosa (GAN et al., 2004; RAO et al., 2014) em duas imagens (de escoamentos de baixos e altos níveis da atmosfera), apresentada na Figura 1.3 obtida de Reboita et al. (2010). Nesta figura, é possível observar que a região Norte e central da AS (que abrange grande parte da floresta amazônica), as chuvas são fortemente influenciadas por sistemas associados à convecção intensa devido ao aquecimento radiativo superficial, predominante durante o verão austral (dezembro, janeiro e fevereiro - DJF) como destacado por Reboita et al. (2010). Nesta época do ano, é constatado uma grande influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT - banda de nebulosidade convectiva no cinturão equatorial que pode ser visto pelas imagens de satélites, associadas as convergências dos alísios de sudeste - ASE e nordeste - ANE) o qual tem a sua posição mais ao Sul ($\sim 4^{\circ}S$) entre março e abril (CAVALCANTI et al., 2009; MOLION; BERNARDO, 2002b; MOLION; BERNARDO, 2002a) e dos alísios de nordeste nas regiões mais ao Norte. Nas regiões centrais, entre a Bolívia e centro-oeste do Brasil, destacam-se o jato de baixos níveis (JBN) a leste dos Andes que transporta

calor e umidade da amazônia em direção ao sul e SE da AS (MARENGO et al., 2002; HERDIES et al., 2002) e, que durante os eventos de ZCAS o fluxo flui em direção ao sudeste do Brasil (HERDIES et al., 2002), linhas de instabilidade que são conglomerados de nuvens cumulonimbus isolados e das ZCAS, esta última será tratada com mais detalhes posteriormente por ser o fenômeno de interesse do estudo. Essas atividades convectivas geram nebulosidades e conseqüentemente precipitações intensas sobre estas regiões. Ao sul, destacam-se as ondas ou sistemas frontais associadas aos cavados de baixos níveis conectados aos sistemas de baixas pressão das regiões extratropicais e ainda a influência da Alta Subtropical do Pacífico Sul (ASPS) a oeste dos Andes (Chile e Argentina).

Já nas regiões sudeste e Norteste do Brasil-NEB (leste da AS), são amplamente influenciadas pelas ZCAS (no sudeste e sul do NEB no período de maior atividade convectiva) e Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) que transporta umidade para as regiões continentais (litoral). No período de maio a agosto, apesar do núcleo da ASAS estar ligeiramente afastado da AS, ela intensifica-se abrangendo áreas maior e a componente do vento torna-se de leste/SE (praticamente zonal sobre o noroeste do Atlântico Sul e costa da AS). Segundo Gan et al. (2016) este fato inibe a ocorrência das chuvas sobre o sudeste do Brasil devido ao enfraquecimento do fluxo de umidade de baixos níveis e a redução do gradiente de temperatura, entre o continente subtropical e oceano adjacente, o que resulta no enfraquecimento do cisalhamento vertical do vento na região monçônica, resultando no final da estação chuvosa (no SE e centro-Oeste do Brasil) e conseqüentemente do SMAS de verão (GAN et al., 2004; RAO et al., 2014). Possivelmente esse mecanismo de intensificação e expansão da ASAS influencia as chuvas sobre as regiões ao sul/sudoeste da África subsahariana (partes de Angola, Namíbia e grande parte do Oeste Sul Africano) inibindo a ocorrência das chuvas no inverno e favorecendo no verão, com o aparecimento de regiões de baixa pressão sobre o continente (como é o caso do sistema ciclônico verificado frequentemente entre o norte da Namibia e o sul de Angola associado ao sistema de monção da África Meridional (SMAM) ver Barry e Chorley (2013)). Contudo, neste período (inverno austral) ela parece favorecer a ocorrência das chuvas sobre o litoral nordestino (NEB, com destaque às regiões litorâneas de Pernambuco, Alagoas e Sergipe) devido às pequenas perturbações que campos de vento oriundas da ASAS podem sofrer perto dessa região litorânea e que estão associadas aos sistemas de brisas, cujo o levantamento é forçado pela topografia e à convergência de umidade (MOLION; BERNARDO, 2002b; MOLION; BERNARDO, 2002a).

Em altos níveis da atmosfera, destacam-se a influência dos sistemas de bloqueios (BL), jatos Polar e Subtropical (JP e JS), vórtices ciclônicos de altos níveis (VCAN), Alta da Bolívia, um cavado (CNE) prolongado sobre o NEB ligado ao VCAN sobre o Atlântico Sul (ver Figura 1.3 (b)). É importante destacar que a alta da Bolívia (AB) e o CNE são sistemas que estão presentes durante o verão austral e têm grande influência sobre as ZCAS.

Figura 1.3 - Representação esquemática dos sistemas atmosféricos na baixa e alta troposfera atuantes na AS.



(a) Baixos níveis da troposfera tem-se: ANE ventos alísios de nordeste, ASE ventos alísios de sudeste, ASAS alta subtropical do Atlântico Sul, ASPS alta subtropical do Pacífico Sul, B baixa pressão, BC baixa do Chaco – região de baixas térmicas, BNE região 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 e ZCIT zona de convergência intertropical. (b) Alta troposfera tem-se: AB alta da Bolívia, BL região de bloqueios atmosféricos, CNE cavado do nordeste do Brasil, JS jato subtropical, JP jato polar, VCAN sub vórtices ciclônicos de altos níveis subtropicais, VCAN trop vórtices ciclônicos de altos níveis tropicais.

Fonte: Adaptado de Reboita et al. (2010).

Durante os eventos de ZCAS, dois sistemas são frequentemente observados nos trópicos e subtropicais sobre a AS em altos níveis da atmosfera: A AB que é um sistema anticiclônico de altos níveis da atmosfera localizado sobre o centro-oeste da AS

(região da Bolívia); e o VCAN nas regiões tropicais (os conhecidos como de tipo Palmer) mais especificamente sobre o Atlântico Sul e costa leste/nordeste do Brasil.

A AB, surge como resposta do processo de transferência de calor sensível da superfície para atmosfera devido ao intenso aquecimento radiativo superficial que está associado à convecção profunda sobre o Altiplano Boliviano abaixo de 500 hPa (ZHOU; LAU, 1998; CAVALCANTI et al., 2002). Durante o verão, esse aquecimento diabático em baixos níveis no Altiplano boliviano é fundido ao ar quente e úmido da Amazônia trazida pelo escoamento de baixos níveis (JBN), conectada a circulação ciclônica de altos níveis sobre o atlântico sul junto à costa do NEB (conhecido como VCAN) permitem o desenvolvimento das ZCAS (CARVALHO et al., 2004). Esses processos também foram destacados por Virji (1981), Marengo et al. (2012), Quadro (2012), Rao et al. (2014), Gan et al. (2016) entre outros.

No entanto, estudos que retratam a ocorrência dos VCANs sobre o Atlântico tropical sul junto à costa do NEB datam nas décadas de 80. Segundo Kousky e Gan (1981), VCANs são sistemas ciclônicos em altos níveis da atmosfera de núcleos frios e, uma circulação térmica direita com ar quente subindo (movimentos verticais ascendentes) em suas periferias e ar frio descendo (movimentos verticais descendentes) no centro do vórtice. Elas se formam devido a uma intensificação simultânea da AB e um cavado em baixos níveis associado a um sistema frontal sobre o Atlântico subtropical sul (KOUSKY; GAN, 1981) e por meio da instabilidade barotrópica (ver Apêndice A) drenando energia do estado básico (RAO; BONATTI, 1987). Rao e Bonatti (1987) sugerem ainda a influência do aquecimento por condensação, isso devido a fraca taxa de crescimento dos ventos zonais para instabilidade barotrópica. Kousky e Gan destacam ainda que o padrão de nebulosidade depende dos movimentos verticais (ascendentes e descendentes) associados e da localização do vórtice.

Contudo, devemos destacar ainda os estudos de modelagem de Silva Dias e Schubert (1983) (o qual considera uma fonte de calor centrada na Amazônia em 11°S e um raio de desdobramento de 750 Km) que destaca a influência das ondas de Kelvin que se propagam rapidamente para leste, Rossby e as ondas mista Rossby-gravidade, excitadas pela fonte de calor na Amazônia na reprodução de vários aspectos ligados à circulação sobre AS; como é o caso dos aspectos transitórios da AB.

Conforme encontrado em Carvalho et al. (2002), Carvalho et al. (2004), Andrade (2011) e Quadro (2012), as ZCAS apresentam alta variabilidade espacial e temporal, quanto a sua localização (mais para o Oceano ou continente) e duração. Além disso, elas podem se posicionar mais ao norte ou mais ao sul de posição média climatológica.

Estas posições (mais ao norte, mais ao sul e ou centro), configuram os chamados "padrões de localizações das ZCAS (Norte-PN, Central-PC e Sul-PS)"(ANDRADE, 2011).

Como visto nas literaturas brevemente citadas acima, vários estudos foram desenvolvidos com o objetivo de compreender os aspectos sinóticos das ZCAS, mas poucos se dedicaram a compreender os aspectos sinóticos ligados aos diferentes padrões de localizações norte, central e sul e, dos seus aspectos energéticos associados aos processos de geração e conversões de energia, o qual ainda é pouco entendido devido a poucos estudos feitos (destacam-se os de Mendonça e Bonatti (2008a), Mendonça e Bonatti (2008b), Da Silva (2010) e Quadro (2012) que foram encontrados pelo autor) e da complexidade do assunto.

Neste estudo, utilizamos a abordagem de Oort (1964) para ciclo de energia de Lorenz, que além de ser diferente dos estudos acima por considerar as influências dos vórtices transientes e permanentes, aqui procuramos investigar os aspectos ligados a energética dos diferentes padrões de localização, as influencias das células de circulação (ver Apêndice B) atmosférica sobre a AS durante esses eventos e ainda discutir a problemática dos reais motivos da alta frequência de ocorrência dos eventos de ZCAS nos últimos anos (2006 ao presente), que foi sugerida por Quadro (2012) e Quadro et al. (2016) a partir da energética.

1.1 Objetivo geral

Analisar as características energéticas das ZCAS a partir das componentes do ciclo de energia de Lorenz, usando o conjunto de dados da nova geração de reanálise ERA-5 do Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo (ECMWF).

1.1.1 Objetivos específicos

Análise estatística dos episódios de ZCAS para validação dos casos selecionados.

Análise sinótica associados aos padrões de localização (Norte, Central e Sul em relação a posição climatológica) das ZCAS.

Avaliar os padrões associados às mudanças de localização (Norte, Central e Sul em relação a posição climatológica) das ZCAS a partir das componentes energéticas de Lorenz a fim de averiguar qual dessas componentes exerce maior influência em cada um dos padrões durante o seu período de atuação, analisando a gênese, desenvolvimento e dissipação.

Avaliar os impactos dessas componentes nas ocorrências das tempestades associadas aos episódios de ZCAS durante as diferentes fases ou períodos de sua atuação.

Identificar possíveis mudanças no ciclo de energia de Lorenz nos períodos de 1991-2005 e 2006-2018 que expliquem a alta frequência de ocorrência de eventos recentes da ZCAS e sua conexão com a intensificação ou desintensificação das células de circulação de Hadley e Ferrel sobre AS.

Investigar possíveis mudanças nas componentes do ciclo de energia de Lorenz em cada padrão de localização, e como isso impacta nas perturbações das células de circulação de Hadley e Ferrel sobre AS e nas ZCAS em particular. E como a intensificação ou desintensificação das células de circulação podem ser associadas às intensidades, frequência de ocorrência e duração dos episódios de ZCAS.

1.2 Justificativas

As ZCAS é um fenômeno que tem impacto significativo nos regimes pluviométricos das localidades situadas na região central da América do Sul (AS), principalmente nas situadas (entre centro-sul/SE da Amazônia, regiões centro-oeste e SE do Brasil), influenciando significativamente nas atividades agropecuárias e no abastecimento de água dessas localidades. Além disso, chuvas intensas podem causar enchentes, deslizamento de terras e por vezes perdas de vidas humanas. Neste contexto, sendo um fenômeno de grande impacto social e que ainda necessita de evolução na sua compreensão e na identificação as propriedades termodinâmicas durante os estágios de seu ciclo de vida (QUADRO *et al.*, 2016), surge a necessidade e motivação para o desenvolvimento deste estudo, para proporcionar a compreensão deste fenômeno em termos energéticos uma vez que, perturbações atmosféricas que são responsáveis pelas variabilidades do clima e os ciclos de vida destes sistemas estão ligados aos processos de conversão e trocas de energia na atmosfera.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

Na seção anterior, introduziu-se de forma breve o ciclo de energia de Lorenz e alguns dos principais sistemas que ocorrem na AS e impactam no regime das chuvas sobre a AS. Apresentou-se ainda de forma breve, dois dos principais sistemas que influenciam de forma direta para a ocorrência e manutenção da ZCAS. Portanto, nesta seção, serão apresentados alguns dos principais avanços relacionados aos estudos e compreensão das ZCAS e a importância do esquema que será utilizado para a compreensão do fenômeno.

Um estudo comparativo das características das diversas zonas de precipitações subtropicais foram feitas por Kodama (1992). Neste estudo, ficou claro que as Zonas de Convergência do Pacífico Sul (ZCPS) e do Atlântico Sul (ZCAS) possuem diversas características em comum com a Zona Frontal Baiu (BFZ - sigla em inglês para Baiu Frontal Zone) que é uma zona quase-estacionária de convergência de umidade e chuva do leste asiático que está presente durante o verão boreal (junho, julho e agosto). Elas se formam ao longo de uma camada úmida espessa e zonas baroclínicas a leste dos jatos subtropicais de nível superior. Apresentam zonas de precipitação persistentes e contínuas com aproximadamente 400 mm/mês quando elas estão ativas. Também são caracterizados como limites polares de massas de ar úmidas tropicais ou de monção associadas à um gradiente de umidade de baixo nível, e pela constante geração de instabilidade convectiva pelo processo diferencial de advecção. Essa geração é importante para manter a convecção ativa sobre as ZPS, enquanto a estratificação ao longo desta banda é neutra por causa da convecção ativa.

2.1 Zona de convergência do Atlântico Sul (ZCAS)

A ZCAS pode ser considerada como um dos principais fenômenos que condiciona o tempo e o clima do Brasil e conseqüentemente as atividades humanas como: agricultura, energia e transporte durante os meses de maior atividade convectiva do HS (entre novembro e março). Pois em decorrência de eventos de precipitação extrema podem causar inundações e deslizamento de terras (SELUCHI; CHOU, 2009; REBOITA; VEIGA, 2017). Contudo, diversos estudos vêm sendo desenvolvidos no intuito de melhorar o entendimento do fenômeno em questão.

A existência de uma banda de nebulosidade com orientação NW-SE sobre a AS foram primeiramente constatadas por análise visual de imagens de brilho gravado por câmeras e radiômetros a bordo de satélites (STRETEN, 1973; QUADRO, 1994). Quadro

(1994) usando análise de 3 pentadas, na qual, a pentada central (considerada como sendo aquela onde a banda de nebulosidade associada às ZCAS apresenta-se melhor configurada em termo de posicionamento e persistência da precipitação) e a pentada seguinte são levados em conta para cada caso selecionado em que os episódios de ZCAS foram observados, analisou as características do escoamento sobre a região das ZCAS onde observou-se: Convergência de umidade em baixa e média troposfera proporcionado pelos JBN o que resulta em fortes movimentos ascendentes das massas de ar na baixa e média troposfera; um cavado em 500 hPa sobre a costa leste da América do Sul; incursão de sistemas frontais de latitudes médias fortalecendo a convecção tropical; uma faixa de vortacidade anticiclônica em altos níveis com a mesma orientação da ZCAS; a presença do VCAN sobre o NEB; jato subtropical em altos níveis na dianteira do cavado auxiliando na intensificação da frontogênese em superfície; além de forte gradiente de temperatura potencial equivalente na média troposfera e a ocorrência de chuvas persistente sobre a região das ZCAS.

Quadro (1994) conclui que, a ZCAS manifesta-se desde baixos níveis até altos níveis da atmosfera e que o El Niño desfavorece a manifestação das ZCAS pois, a convecção tende a concentra-se mais a oeste da AS.

Certamente, além das metodologias empregadas para a identificação das ZCAS, descrita por Quadro (1994) destacam-se ainda, os métodos objetivos de Carvalho et al. (2002) e Carvalho et al. (2004) nas quais médias diárias de OLR são usados para a identificação da banda de nebulosidade convectiva associada as ZCAS. Nestes estudos, os autores consideraram que valores de OLR menor ou igual a 200 W/m^2 como sendo valores bem correlacionados com as regiões de fortes atividades convectiva e precipitação.

Ainda concernente a metodologia, recentemente Rosa (2017) desenvolveu um método objetivo baseado em um algoritmo que identifica os episódio de ZCAS em três etapas executadas sequencialmente, utilizando dados de OLR (inferior a 230 W/m^2). Essa metodologia é apresentada e brevemente discutida no Capítulo 4.

Segundo os estudos de Carvalho et al. (2004), 70% dos episódios de ZCAS intensa e fraca (dos quais representam 79% das categorias oceânicas e continentais, segundo as suas subdivisões) ocorreram com persistência menor ou igual a 4 dias, o que significa que apenas 30% persistem em mais de 4 dias.

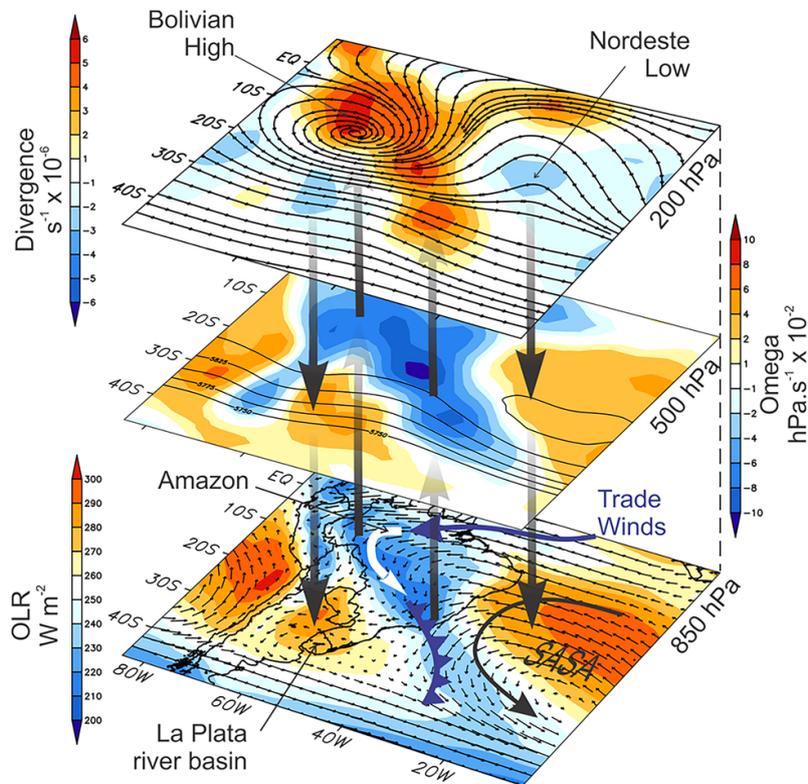
Em 2010, um estudo com o objetivo de avaliar as características associadas à sua ocorrência com persistência maior ou menor que 4 dias foi feito pelo Grupo de

Previsão de Tempo (GPT) do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Neste estudo, Sacramento Neto et al. (2010), categorizam o sistema em dois: (1) é categorizado ZCAS quando as características acima apresentadas (no caso deste trabalho, as observadas por Quadro (1994)) forem verificadas e a persistência do sistema for superior a 4 dias; (2) caso algumas das características acima ou similar, forem verificadas, mas com persistência menor ou igual a 4 dias, deverá ser chamada de Zona de Convergência de Umidade (ZCOU).

Um estudo sobre o breve histórico dos últimos 30 anos de monitoramento das ZCAS, onde são destacados as contribuições de diversos pesquisadores foi feito por Quadro et al. (2016). Neste estudo ficou claro que a frequência de atuação do sistema vem aumentando desde os anos de 2005 e 2006, os autores ressaltam ainda que não há evidências clara que justifiquem esse aumento. Tornando-se assim, um assunto em particular a ser investigado no presente trabalho sobre a energética das ZCAS.

Na Figura 2.1, é apresentado um esquema do padrão clássico de atuação do sistema (ZCAS). Onde é possível observar a faixa de divergência em 200 hPa com orientação NW-SE que estão associados à fortes movimentos ascendentes (indicadas pelas setas) em médios (500 hPa) e baixos níveis (850 hPa) vistos pelos campos de omega e OLR com a mesma orientação NW-SE e, movimentos descendentes nas periferias dessa faixa. A figura apresenta ainda a configuração da AB em 200 hPa que associado à convecção profunda de médios e baixos níveis da troposfera (CAVALCANTI et al., 2002), o JBN e um sistema frontal conectado ao sistema sobre o SE do Brasil e adjacência do Atlântico sudoeste subtropical. A presença do VCAN em 200 hPa é destacado.

Figura 2.1 - Representação esquemática das principais características da dinâmica associada ZCAS.



Parte inferior: vetores de vento de 850 hPa com radiação de onda longa de saída (OLR, $W \cdot m^{-2}$); Meio: velocidade vertical de 500 hPa (ω , $hPa \cdot s^{-1}$) e contornos de altura geopotencial (Φ , $J \cdot kg^{-1}$); Superior: linhas de fluxo do vento de 200 hPa e divergência horizontal sombreada. Composto de todos os 989 dias com configurações da ZCAS entre dezembro de 1995 e abril de 2015.

Fonte: Nielsen et al. (2018).

2.1.1 Influências remotas sobre as ZCAS

As influências remotas dos modos de baixa frequência, como as oscilações de 30 a 60 dias (MJO - Madden Julian Oscillation, que é o resultado de células de circulação de grande escala orientadas no plano equatorial que se movem para o leste do Oceano Índico até o Pacífico central (MADDEN; JULIAN, 1994)) e o El Niño - Oscilação Sul (ENSO) sobre o SMAS e as ZCAS foram estudadas por pesquisadores brasileiros e internacionais como por exemplo os trabalhos de Nogués-Paegle e Mo (1997), Aravéquia (2003), Carvalho et al. (2004) e, Andrade (2011). Carvalho et al. (2004) ao investigarem os aspectos de variabilidade de intensidade, forma, persistência das

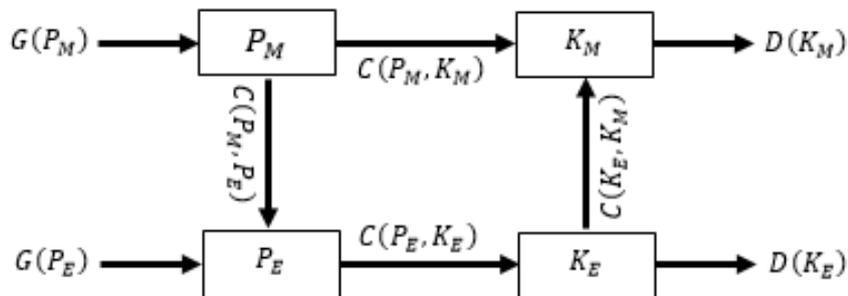
ZCAS e sua relação com o extremo de chuvas, perceberam grandes impactos da MJO sobre os extremos de chuvas nas regiões sul e SE e a localização geográfica das ZCAS. Segundo estes autores, a ZCAS tende a se posicionar mais ao norte de sua posição climatológica durante a fase em que a convecção associada a MJO está estabelecida sobre o Pacífico tropical central e inibida sobre a Indonésia. O que resulta em aumento das chuvas sobre o sul do NEB. Por outro lado, [Andrade \(2011\)](#) salientou que sua posição mais ao sul está associada à passagens de trens de ondas de latitude médias (ondas de Rossby de latitudes média que tendem a intensificar a convecção sobre o continente) o que influencia na persistência dos eventos de ZCAS ([ANDRADE, 2011](#)). Contudo, extensões sobre o continente/oceano e sua associação com os eventos de ENSO foram descritos por [Carvalho et al. \(2004\)](#) onde, eventos quentes (frio) de ENSO estão associados a sua extensão/localização sobre o oceano (continente).

Além dos estudos acima citados, padrões associados à interconexões entre a MJO, ENOS, ZCPS e a ZCAS também foram investigados anteriormente por [Grimm e Silva Dias \(1995\)](#) usando um modelo barotrópico não divergente, função de Green ou função de influência (FI) e campos de evolução de OLR na qual, o estado básico climatológico zonalmente assimétrico em 200 hPa é usado como forçante. De igual modo, mas usando um modelo barotrópico ou equações de água rasa com a inclusão de forçante no campo de altura, [Aravéquia \(2003\)](#) analisou as FI com dependência temporal e, observou interações em diferentes escalas temporal entre a ZCPS (via propagação de ondas de Rossby em direção a AS) e a ZCAS (nas escalas intra-sazonais de 16 a 32 dias, 32 a 64 dias e até de 70 dias). Uma conclusão mais interessante obtida por [Aravéquia \(2003\)](#) foi a constatação (a partir de análise de ondeleta cruzada) de que os extremos de convecção (mínimos valores de OLR) na região do Pacífico central e sobre as ZCPS modula as derivas de geopotencial em 500 hPa nas regiões de atuação das ZCAS com o sinal oposto. Significando que, quando é observado um sinal na anomalia de OLR sobre a ZCPS (positivo ou negativo), em um período de 16 a 32 dias, um sinal oposto será constatado nas derivas de geopotencial sobre a região das ZCAS. O mesmo foi constatado pelo espectro de potência de ondeleta para o cavado do NEB, onde, a influência da ZCPS é propagado para o cavado do NEB em uma escala de 16 e 32 dias. Indicando que, dada uma fonte de calor (anomalia de OLR negativa) sobre a ZCPS, em 8 e 16 dias a deriva do geopotencial em 500 hPa na região do Cavado do Nordeste deve ter sinal positivo. Sendo que, sua relação com as derivas no cavado do NEB depende da intensidade da anomalia de OLR observado sobre a ZCPS que por sua vez sofrem a influência dos eventos de ENOS ([ARAVÉQUIA, 2003](#)).

perturbações do estado básico da EPD por meio dos processos diabáticos (aquecimento/resfriamento) o qual envolve o aquecimento diferencial entre continente e oceanos e trópicos e o extratrópicos como mencionado no parágrafo anterior. Por outro lado, a EPD do estado básico é convertida em energia potencial da perturbação pelos processos baroclínicos em EC do estado básico pela circulação direta da célula de Hadley que gera um momento angular zonal no ramo superior da circulação (KIM; KIM, 2013). Conseqüentemente, devido aos processos de transformação de energia associados à instabilidade baroclínica induzida pelo afundamento (movimentos descendentes) do ar frio e ascensão do ar quente (KIM; KIM, 2013), a EPD da perturbação é convertida em EC da perturbação que por sua vez, uma parte dela é convertida em Ec do estado básico em uma conversão barotrópica, e outra é finalmente dissipada pelo atrito em superfície e vórtices turbulentos de pequena escala (viscosidade interna) (LORENZ, 1955; KIM; KIM, 2013; BARRY; CHORLEY, 2013) reduzindo assim, a intensidade das tempestades (ou sistemas associados) por meio da dissipação de energia no estado básico da Ec e nas perturbações.

Contudo, vale lembrar ainda que, além da EPD do estado básico ser convertida em EC do estado básico [$C(P_M, K_M) > 0$] e que, a EC do estado básico também pode ser convertida em EPD do estado básico [$C(P_M, K_M) < 0$] por meio da célula de circulação indireta de Ferrel em latitudes médias (KIM; KIM, 2013).

Figura 2.2 - Diagrama do ciclo de energia de Lorenz para uma atmosfera global. $G(P_M)$ e $G(P_E)$ são as Gerações da Energia Potencial Disponível Média Zonal (P_M) e Energia Potencial Disponível Média da Perturbação (P_E), (K_M) Energia Cinética Média Zonal, (K_E) Energia Cinética Média da Perturbação. $C(P_M, K_M)$, $C(P_M, P_E)$, $C(P_E, K_E)$ e $C(K_E, K_M)$ são as conversões de energia e $D(K_M)$ e $D(K_E)$, as respectivas dissipações de energia.



Fonte: Produção do autor.

Daqui em diante, o estado básico será representado com subscrito M (que representa as médias zonais) e a perturbação como E, conforme representado no esquema da Figura 2.2.

Os termos de energia utilizado neste estudo, são baseados nas médias e desvios zonais e temporais das variáveis envolvidas. Assim, temos que: Energia Potencial Disponível Média Zonal (P_M): representa o valor da média da energia potencial disponível nos domínios temporal e espacial; e K_M o valor médio da energia cinética no domínio do espaço e do tempo.

A Energia Potencial Disponível Média da Perturbação (P_E) e a Cinética Média da Perturbação (K_E), representam respectivamente as variações média de energia em relação a P_M e K_M dos dois domínios. Sendo que, as energias (P_E e K_E), são caracterizados por vórtices transientes (temporal) e estacionários (espacial), (PAN, 2015; KIM; KIM, 2013; OORT, 1964)

As energias médias descrevem os processos em larga escala no espaço e a longo prazo no tempo e as energias das perturbações se referem a processos de pequena escala no espaço e a curto prazo no tempo (PAN, 2015).

Conforme Oort (1964), energias EPD e E_c médias zonais e das perturbações da atmosfera podem ser computadas separadamente em três domínios diferentes: (1) no domínio do espaço; (2) no domínio do tempo e (3) no domínio misto (espaço-tempo).

No domínio do espaço, a EPD é definida como a energia potencial média dos círculos de longitude e a E_c é definida como a energia cinética do movimento da média zonal; no domínio do tempo, a EPD e a E_c são definidas como as energia potencial e energia cinética, médias do Período de tempo e, no domínio do espaço-tempo (misto), são definidas como a energia potencial e energia cinética do movimento do tempo médio e da médias zonais, ou seja, a combinação simultânea das médias no tempo e médias zonais. Portanto, segundo Oort (1964), o que resta da energia total é o que é chamado em cada caso, de energia “turbulenta”.

No presente trabalho, foram feitas as análises do Ciclo de Energia de Lorenz (CEL) em um domínio restrito (sobre a região das ZCAS) levando em conta o domínio misto, uma vez que o ciclo de energia no domínio misto fornece informações sobre como os vórtices transitórios ou transientes e permanentes (quase-estacionários) são mantidos em diferentes escalas espacial e temporal (OORT, 1964) dentro do sistema

Terra-atmosfera. Sendo assim, um breve histórico alguns estudos relacionado ao ciclo de energia de Lorenz será apresentado a seguir.

2.2.3 Breve histórico de estudos sobre energética atmosférica

Diversos trabalhos foram feitos para estudar a circulação geral da atmosfera. Phillips (1956) usando um modelo quase-geostrófico de duas camadas baseada nas equações primitivas para estudar a circulação geral da atmosfera, analisou as componentes de geração e transformação de energia na atmosfera. Ele observou que a geração de P_M foi proporcionado pelos processos de aquecimento interno difuso de calor da atmosfera, e que o resfriamento desfavoreceu a geração de P_E [$G(P_E) < 0$]. Com isso, Phillips notou que a intensidade do aquecimento é um fator importante para os padrões de fluxos observado e que as perturbações desempenham um papel importante no desenvolvimento das correntes zonais.

No caso de estudos em que um domínio misto é usado, surgem as primeiras evidências com os estudos de Oort (1964) que analisou o ciclo de energia para o hemisfério norte (HN) usando dados de componentes horizontal do vento, temperatura e de altura isobárica (altura de geopotencial) do Centro Nacional de Meteorologia (NMC) dos Estados Unidos. Observou-se neste estudo que existe geração de energia para o escoamento médio e para as perturbações. Outro aspecto interessante a ser destacado deste estudo, é que a conversão de P_M para K_M se deu no sentido inverso, ou seja, K_M cedendo energia para P_M [$C(P_M, K_M) < 0$], o que reflete uma maior perda de K_M devido a célula de circulação de Ferrel (PEIXOTO; OORT, 1992; KIM; KIM, 2013).

Já nas décadas de 70, Oort e Peixoto (1974) refizeram os cálculos anterior (feito por eles em 1974, artigo não citado neste documento) com uma densidade de dado maior em relação aos estudos de Oort (1964) (de 600 estações de radiossonda do Instituto de Tecnologia de Massachusetts, MIT) para o período de 5 anos. Os resultados revelaram uma tendência positiva de P_M , P_E , K_M e K_E entre os meses de agosto a janeiro, o que sugere que durante esse período a P_E drena energia do estado básico ($[C(P_M, P_E)] > 0$) e K_M de K_E ($[C(K_E, K_M)] > 0$). Mostrando que as perturbações do HN são de origem tanto barotrópicos como baroclínicos, mas com processos baroclínicos sendo dominante (principalmente nas latitudes médias).

Graças aos avanços tecnológicos e dos métodos de assimilação de dados atmosféricos, depois dos anos 70 muitas fontes de dados de reanálise estão disponíveis e mais acessíveis e com um número de pontos e densidade de observações cada vez maior (POLI et al., 2016). Com isso, foi possível estudar com maior abrangência o ciclo de

energia de Lorenz para a atmosfera global. Durante as últimas décadas, os estudos estiveram concentrados na compreensão da circulação geral em todo globo (LI et al., 2007b; LI et al., 2011; KIM; KIM, 2013; PAN, 2015) e mudanças climáticas Pan et al. (2017), usando o método de estudo de ciclo de energia em um domínio misto desenvolvido por Oort (1964) com diferentes fontes de dados de reanálise do Projeto de Intercomparação de Modelo Atmosférico - AMIP-II do Centro Nacional de Previsão Ambiental e do Departamento de Energia NCEP–DOE Reanálise II - R-II, (SAHA et al., 2010), ECMWF e da NASA. Os resultados destes estudos proporcionam uma melhor compreensão das características da circulação geral da atmosfera global em termos de geração e transformação de energia.

Kim e Kim (2013) examinaram o ciclo de energia de Lorenz usando dados do NCEP-DOE R-II e do MERRA para um período de 30 anos (1979–2008). Neste estudo, observa-se que apesar da maior contribuição de P_M nos dois hemisférios estar em latitudes médias e altas (entre 60° e 90° norte e sul, N/S), um sinal significativo da contribuição de P_M na superfície (abaixo de 900 hPa), é observado nas regiões dos trópicos no verão do HS em relação a inverno e a média anual. Pequenas contribuições de P_E também são observados perto dos trópicos em aproximadamente 18° a 20°S/N, e as posições das localizações dos jatos (uma das características da circulação geral da atmosfera) também são constatadas nos campos de K_M .

Contudo, deve-se de ressaltar ainda, os resultados obtidos por Pan et al. (2017) o qual evidencia tendências globais de aumento de energia nas perturbações (P_E e K_E) com $663,55 \pm 412,35 \text{ J.m}^{-2}/ano$ e $810,8 \pm 392 \text{ J.m}^{-2}/ano$ respectivamente, com um intervalo de confiança acima de 93% para ambas as tendências. O que pode refletir em uma maior frequência de ocorrência e duração de tempestades a nível global.

Quanto aos estudos sobre energética em uma área restrita e em particular sobre o HS, destacam-se os trabalhos de Gan e Rao (1999) sobre os distúrbios de alta frequência sobre o sul da AS, Veiga et al. (2008) investigando as possíveis fontes de energia para o desenvolvimento do furacão Catarina ocorrido junto à costa leste de Santa Catarina de 21 a 29 de Março de 2004, Da Silva (2010) energética atmosférica sobre a AS e em particular sobre a região das ZCAS e a ZCIT (DA SILVA; SATYAMURTY, 2013), Rosa et al. (2013) sobre a energética dos eventos de ciclogênese na região ciclogênética ao sul do Brasil e ainda os estudos de Nestares (2017) para o entendimento da energética das linhas de instabilidade sobre a bacia amazônica. Além dos estudos sobre a energética dos modos de propagação de ondas de Mendonça e

Bonatti (2008a) e Mendonça e Bonatti (2008b), no qual os autores descobriram que as interações cruzadas dos modos de Rossby-Kelvin favorecem o desenvolvimento das ZCAS através de interferências construtivas de energia na região da ZCAS. Os autores concluíram ainda que o crescimento de energia total de baixos níveis até a estratosfera são de 40 a 50% nas regiões das ZCAS.

A maioria dos estudos acima mencionados, usaram uma abordagem mais convencional na qual os componentes de energia são analisados apenas em torno das médias e desvios zonais (o qual a influência simultânea dos vórtices quase-estacionários e transitórios/transiente não é considerado). No entanto, Gan e Rao (1999), em seu estudo sobre a energética dos distúrbios de alta frequência na AS, usaram uma representação filtrada (do tipo gaussiano com frequência de corte igual a 5 dias em 9 pontos de grade) que leva em conta as interações entre um componente quase-estacionário representado por variáveis filtradas com passas-baixas (períodos superior a 5 dias) e um componente transiente representado por variáveis filtradas passas-alta de períodos menor ou igual a 5 dias. Com isso foi possível analisar o composto de 61 casos de ciclones sobre a região sul da AS, entre o Uruguai e nordeste da Argentina entre 01/01/1977 a 31/12/1979. Neste estudo, os autores perceberam que a distribuição espacial da EPD dos distúrbios de alta frequência para a região próximas às latitudes médias do HS é similar aos observados para os ciclones extratropicais do HN, onde distúrbios crescem por conversões associadas às instabilidades baroclínicas, apesar da instabilidade barotrópica ter um papel aparentemente importante sobre o oceano Pacífico durante a fase de crescimento da onda.

Ressalta-se ainda que em Gan e Rao (1999) é discutido brevemente detalhes de alguns trabalhos anteriores (não citados neste trabalho), a partir dos quais pode-se perceber as vantagens (descritas anteriormente) da metodologia clássica de Oort (1964), que será usada nesta pesquisa.

No mais, deve-se destacar que ao estudar o ciclo de energia em uma área restrita (conforme em nosso estudo), alguns cuidados devem ser tomados dos quais podemos destacar:

- (1) Considerar os efeitos dos contornos laterais (norte sul), superior (altos níveis) e inferior (baixos níveis), que estão ligados aos padrões de escoamentos associados às células de circulação em determinados locais (OORT, 1964; OORT; PEIXÓTO, 1974). Um exemplo da importância destes efeitos pode ser visto no trabalho de Da Silva e Satyamurty (2013), onde discrepâncias entre seus resultados e os obtidos por Oort e Peixóto (1974) (os quais em termos de valores médios de P_M e P_E foram uma ordem

de grandeza menor) foram justificadas por não incluírem as camadas superficiais durante as integrações, que por sinal apresentam valores significativos de P_M sobre as regiões tropicais (OORT; PEIXÓTO, 1974; KIM; KIM, 2013). Porém, deve-se salientar que as metodologias empregadas nos dois estudos são relativamente diferentes.

(2) Componentes de fluxos e dos mecanismos dinâmicos devem ser considerados conforme Muench (1965), os quais serão apresentados no próximo Capítulo.

No próximo Capítulo, será apresentada a metodologia e os procedimentos de integrações das equações usadas para atingir os objetivos propostos. A análise dos resultados obtidos é dada no Capítulo 4 e no Capítulo 5 a conclusão.

3 METODOLOGIA

Neste Capítulo, apresenta-se a localização geográfica da Região de estudo, uma descrição dos dados e, as equações que foram utilizadas.

3.1 Região de estudo

A fim de se evitar erros associados à metodologia para a identificação dos padrões de localização das ZCAS, optou-se em seguir os mesmos critérios descritos por [Andrade \(2011\)](#), segundo o qual, a partir da distribuição horizontal média dos valores mais negativos das anomalias da Radiação de Onda Longa Emergente no topo da Atmosfera (o qual abreviou como AROLE, aqui usaremos OLR obedecendo a sigla em inglês já usada anteriormente no Capítulo 1) em cada um dos casos, constatou variações no posicionamento geográfico das regiões de máxima convecção associado aos eventos possibilitando assim, a identificação dos diferentes padrões associados a ZCAS. Uma breve descrição dos dados de OLR usado neste trabalho será feito mais adiante no item 3.2.

Na [Figura 3.1](#), é apresentado o mapa da região de estudo com os respectivos padrões. A linha preta pontilhada no centro da região das ZCAS representa a linha limite a partir do qual foi considerado os diferentes padrões.

3.2 Dados utilizados

Foram usados conjunto de dados de temperatura (T), geopotencial ou altura geopotencial (Φ ou Z), componente zonal (u) e meridional (v) do vento e velocidade vertical (ω) no período de 01/10/1990 a 30/04/2018 da Reanálise do ERA-5 do projeto Copérnico do Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo (sigla em inglês, ECMWF) nos 4 horários sinóticos do dia. Os quais foram divididos em dois períodos o primeiro de 1991 a 2005 e o segundo de 2006 a 2018. A fim de examinar as características energéticas das ZCAS durante os dois períodos e constatar possíveis mudanças no ciclo de energia de Lorenz que expliquem a alta frequência de ocorrência de eventos recentes da ZCAS.

- ERA-5: É a mais recente reanálise do ECMWF, visa disponibilizar um conjunto de dados que cobrirá o período de 1950 ao presente em quase tempo real, sendo que, atualmente estão disponíveis de 1979 ao presente. Ela foi produzida de igual modo ao Era-interim ([DEE et al., 2011](#)) com um sistema de assimilação de dados 4D-Var em Cycle41R2 do Sistema de Previsão Integrada (IFS) de alta resolução espacial, com 31 km de grade horizontal e 137 níveis híbridos de pressão/sigma (do modelo)

Figura 3.1 - Representação da região de estudo com os respectivos padrões associados à localização das ZCAS em relação a sua posição climatológica. Padrão Sul - PS, Padrão Central - PC e Padrão Norte - PN. A linha preta pontilhada no centro da região das ZCAS representa a linha limite para as subdivisões dos padrões.



Fonte: Produção do autor.

na vertical com o último em 0,01 hPa (~ 80 km) (HERSBACH; DICK, 2016). Os níveis são interpolados para 37 níveis de pressão verticais da atmosfera e resolução de espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ de latitude e longitude (Lat e Lon) em todos os horários do dia inicializados duas vezes por dia a partir das análises às 06 e 18 UTC.

Aqui, são usados 32 níveis verticais do ERA-5 (de 1000 a 10 hPa), nos 4 horários sinóticos, ou seja, 00:00 UTC, 06:00 UTC, 12:00 UTC e 18:00 UTC. Os dados foram interpolados (pelo método de interpolação bilinear) para uma resolução horizontal de $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ latitude-longitude.

- Os dados de OLR (Outgoing Longwave Radiation em inglês) não-interpolados, foram obtidos pelo site da NOAA / OAR / ESRL PSD, Boulder, Colorado, EUA, pelo site (<https://www.esrl.noaa.gov/psd/>) gerenciada pela Divisão de Ciências Físicas (Physical Sciences Division - PSD) da NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Os dados são derivados do radiômetro avançado de resolução muito alta AVHRR (Advanced Very High Resolu-

tion Radiometer) a bordo dos satélites de órbita polar NOAA-18 (ver website: <https://noaasis.noaa.gov/NOAASIS/ml/avhrr.html>, para mais detalhes) disponibilizados diariamente desde 01/01/2002 ao presente com resolução horizontal igual ao do reanálise II (R-II) do NCEP. Contudo, neste trabalho foram usados dados do período compreendido entre 01/01/2006 a 30/04/2018, para a identificação dos padrões associados aos eventos de ZCAS.

Deve-se salientar que os dados de OLR acima mencionados, foram interpolados usando o método de interpolação bilinear mediante o software CDO (Climate Data Operators) a fim de preencher as regiões com valores faltantes devido ao horário de passagem do satélite sobre um mesmo local (duas vezes ao dia, uma diurna e uma noturna em um intervalo de 12h, com 01h:30min e 13h:30min sobre o equador).

- *Datas dos Episódios de ZCAS*

As datas de ocorrência dos episódios de ZCAS foram obtidos de duas fontes distintas (ambos ligados ao Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais CPTEC/INPE).

As primeiras datas foram obtidas dos estudos de [Andrade \(2011\)](#) que segundo este foram obtidos dos boletins mensais da Climanálise do CPTEC/INPE (<http://climanalise.cptec.inpe.br/~reclimanl/boletim/>) compreendem o período de outubro/1990 a março/2009 dos quais 81 casos foram registrados durante os 19 verões estendidos de outubro a março ([ANDRADE, 2011](#)).

As datas para os episódios subsequentes foram disponibilizadas por [Escobar \(2019\)](#) cobrindo o período de outubro/2006 a abril/2018 contabilizando um total de 119 episódios sendo que destes, 27 tiveram duração inferior 4 dias, por esta razão não foram considerados como episódios de ZCAS. Assim, dos 119 casos ou episódios, 92 foram considerados como eventos de ZCAS e os 27 como sendo eventos de ZCOU ([SACRAMENTO NETO et al., 2010](#)), e foram descartadas das análises.

No total, 150 casos (cujas datas estão na [Tabela C.1](#)) obtidas das duas fontes forma analisadas, sendo 53 durante o primeiro período e 97 durante o segundo.

Adicionalmente, pensando nas possíveis influências de mudanças de fontes e métodos usados para identificação dos eventos, usou-se os registros dos resultados obtidos por [Rosa \(2017\)](#) (cujas datas de ocorrências dos eventos de ZCAS pode ser encontradas em seu estudo) para validar a confiabilidade das datas dos episódios selecionado para este estudo e a confirmação da veracidade da alta frequência de ocorrência

dos eventos de ZCAS observada nos últimos anos (depois de 2006), que foi sugerida inicialmente por Quadro (2012) e Quadro et al. (2016).

3.3 Equações empregadas para o cálculo do ciclo de energia

Como salientado anteriormente, os cálculos dos componentes das energéticas foram feitas usando o domínio misto, ou seja, no domínio do espaço-tempo. Assim, os componentes das EPD e das Ec (médias zonais e das perturbações) são dadas conforme o desenvolvimento de Oort (1964).

3.3.1 Componentes do ciclo de energia no domínio misto espaço-tempo

Energia potencial média zonal (P_M): é dada pela integral do quadrado da variância hemisférica da temperatura média zonal de um elemento de massa ar.

$$P_M = P_0 = \frac{1}{2} C_p \int \gamma [\langle T \rangle]^2 dm \quad (3.1)$$

Energia potencial média da perturbação (P_E) (Transiente+ Estacionário): é a integral do quadrado dos desvios temporal (Transiente) e zonal (Estacionário) da temperatura média de um elemento de massa.

$$P_E = P_{T_E} + P_{E_S} = \frac{1}{2} C_p \int \gamma [\langle T'^2 \rangle + \langle T \rangle^{*2}] dm \quad (3.2)$$

Onde, $\gamma = -\left(\frac{\theta}{T}\right)\left(\frac{R}{C_p P}\right)\left(\frac{\partial \langle \tilde{\theta} \rangle}{\partial p}\right)^{-1} = \Gamma_d [\langle \tilde{T} \rangle]^{-1} ([\Gamma_d - \Gamma])^{-1} = \Gamma_d [\langle \tilde{T} \rangle]^{-1} [\Gamma_d - \frac{g}{R} \frac{\partial \ln \langle \tilde{T} \rangle}{\partial \ln p}]^{-1}$ é o fator de estabilidade. Os Colchetes retos $[X]$ representam as médias zonais, colchetes curvos $\langle X \rangle$ e as barras as médias temporais e o til \tilde{X} a média hemisférica. X uma variável qualquer.

Energia cinética média zonal (K_M): Representa a energia dos movimentos atmosféricos. Dada pela integral do quadrado dos componentes horizontal da velocidade média zonais e temporais de um dado elemento de massa ar dm em movimento.

$$K_M = K_0 = \frac{1}{2} \int ([\langle u \rangle]^2 + [\langle v \rangle]^2) dm \quad (3.3)$$

Energia cinética média da perturbação (K_E) (Transiente + Estacionário): Integral do quadrado dos componentes transitórias e estacionárias da velocidade de

um elemento de massa de ar.

$$K_E = K_{T_E} + K_{E_S} = \frac{1}{2} \int [\langle u'^2 \rangle + \langle v'^2 \rangle + \langle u \rangle^{*2} + \langle v \rangle^{*2}] dm \quad (3.4)$$

Nas equações acima (3.1, 3.2 e 3.4), o componente zonal da energia surge devido a variância da temperatura média zonal, enquanto o componente das perturbações de energia está associado à variação de temperatura dentro dos círculos de latitude. Já nas equações das conversões, dos fluxos e dinâmicos, os componentes são dados pelas covariâncias dos desvios das variáveis envolvidas.

3.3.2 Componentes de conversões, gerações e dissipações de energia

A conversão de energia potencial disponível média zonal em energia potencial da perturbação [$C(P_M, P_E)$]; é proporcionada pelo transporte meridional e vertical de temperatura médias das perturbações (calor sensível), em um processo baroclínico, resultando nas trocas de calor entre o equador e os polos e da superfície aos níveis mais altos da atmosfera (com ar quente subindo e ar frio descendo).

$$\begin{aligned} C(P_M, P_E) = & -C_p \int [\langle v'T' \rangle + \langle v \rangle^* \langle T \rangle^*] \frac{\partial [\langle T \rangle]}{\partial y} dm \\ & -C_p \int p^{-k} [\langle \omega'T' \rangle + \langle \omega \rangle^* \langle T \rangle^*] \frac{\partial (\gamma p^{-k} [\langle T \rangle]'')}{\partial p} dm \end{aligned} \quad (3.5)$$

A conversão de energia potencial disponível da perturbação para a energia cinética média da perturbação [$C(P_E, K_E)$]; é dada pela advecção zonal e meridional do gradiente geopotencial nas médias zonais e nas perturbações. Que equivale dizer que: a energia potencial disponível da perturbação é transformada em energia cinética média da perturbação pelos movimentos turbulentos através do transporte vertical de calor (processos associados à instabilidade baroclínica) com ar quente subindo e ar frio descendo (circulação direta), (LORENZ, 1955; HOLTON, 2004).

$$C(P_E, K_E) = - \int \left(\left[\langle \frac{u' \partial \Phi'}{\partial x} \rangle + \langle \frac{v' \partial \Phi'}{\partial y} \rangle \right] + \left[\frac{\langle u \rangle^* \partial \langle \Phi \rangle^*}{\partial x} + \frac{\langle v \rangle^* \partial \langle \Phi \rangle^*}{\partial y} \right] \right) dm \quad (3.6)$$

A energia cinética da perturbação é convertida em energia cinética média zonal [$C(K_E, K_M)$], através do transporte médio horizontal e vertical do momentum em um processo braotrópico.

$$\begin{aligned}
C(K_E, K_M) = & \int \left[\langle u'v' \rangle + \langle u \rangle^* \langle v \rangle^* \right] \cos \phi \left\{ \frac{\partial([\langle u \rangle] / \cos \phi)}{\partial y} \right\} dm \\
& + \int \left[\langle v'^2 \rangle + \langle v \rangle^{*2} \right] \frac{\partial([\langle v \rangle])}{\partial y} dm + \int \left[\langle \omega' u' \rangle + \langle \omega \rangle^* \langle u \rangle^* \right] \frac{\partial[\langle u \rangle]}{\partial p} dm \quad (3.7) \\
& + \int \left[\langle \omega' v' \rangle + \langle \omega \rangle^* \langle v \rangle^* \right] \frac{\partial[\langle v \rangle]}{\partial p} dm - \int [\langle v \rangle] \left[\langle u'^2 \rangle + \langle u \rangle^{*2} \right] \frac{\tan \phi}{a} dm
\end{aligned}$$

A energia potencial disponível média zonal também é obtida a partir da conversão da energia cinética média zonal [$C(P_M, K_M)$] pela advecção média meridional do gradiente meridional médio do geopotencial. Em outras palavras, podemos dizer que [$C(P_M, K_M)$] é dada pelo fluxo médio horizontal isobárico (no sentido nortesul) do gradiente do geopotencial. As duas formulações apresentadas abaixo são iguais desde que sejam integradas globalmente (KIM; KIM, 2013), apesar da física envolvida nos dois processos serem diferentes, uma vez que, a formulação à direita ($[\langle \omega \rangle]''[\langle \alpha \rangle]''$) está associada à incursão de ar relativamente quente dos trópicos e subtópicos em latitudes médias e altas e ar relativamente frio nos subtópicos e trópicos (KIM; KIM, 2013), conforme é observado nas células de Hadley e Ferrel. Aqui, será utilizado a formula à esquerda.

$$C(P_M, K_M) = - \int [\langle v \rangle] \frac{\partial[\langle \Phi \rangle]}{\partial y} dm = - \int [\langle \omega \rangle]'' [\langle \alpha \rangle]'' dm \quad (3.8)$$

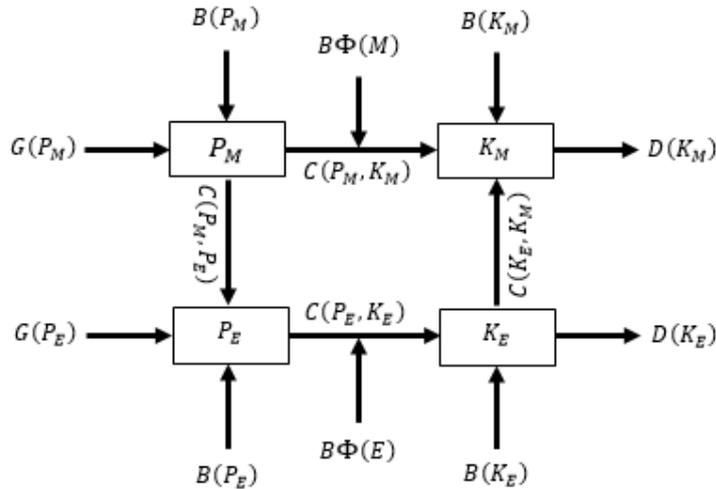
Com, $\partial x = a \cos \phi \partial \lambda$, $\partial y = a \partial \phi$ e $dm = (a^2 \cos \phi) / g \, d\lambda d\phi dp$.

Neste estudo, ciclo de energia de Lorenz foi aplicado em domínio de área limitada como já mencionado. Sendo assim, componentes de fluxos das fronteiras e dos mecanismos dinâmicos devem ser considerados (MUENCH, 1965). Para isso, introduziu-se os efeitos dos fluxos nas fronteiras (lateral, superior e inferior) no domínio considerado e os mecanismos dinâmicos do trabalho da pressão exercida sobre elas que podem funcionar como fonte (positivo) ou sumidouro (negativo) de energia cinética (MUENCH, 1965; VEIGA et al., 2008; VEIGA et al., 2013). Neste caso, seis parâmetros

são adicionados ao diagrama do ciclo apresentado anteriormente na Figura 2.2 ao estudar o ciclo de energia sobre a região das ZCAS.

É apresentado na Figura 3.2 o esquema que será considerado para o domínio de-sejado. Nesta, além dos componentes de entrada e saída (indicadas pelas setas) dos reservatórios de energias (indicados pelas caixas) considerado anteriormente ($G(P_M)$, $G(P_E)$, $C(P, K)$, $D(K_M)$ e $D(K_E)$), são adicionadas os componentes de fluxo ($B(P_M)$, $B(P_E)$, $B(K_M)$, e $B(K_E)$) e dos mecanismos dinâmico das fronteiras ($B\Phi(M)$ e $B\Phi(E)$) das médias zonais e dos distúrbios.

Figura 3.2 - Representação esquemática do ciclo de energia para um domínio restrito.



Fonte: Produção do autor.

3.3.3 Equações dos fluxos e dos mecanismos dinâmicos associados ao Ciclo Energia de Lorenz (CEL) para um domínio restrito

A seguir, são apresentadas as equações dos componentes de fluxos e dos mecanismos dinâmicos da força de pressão sobre as paredes do domínio. Estes, podem ser positivos ou negativos. Valores positivos (negativos) nas taxas de fluxos de energia [$B(P_M)$, $B(P_E)$, $B(K_M)$, e $B(K_E)$], podem representar regiões fontes (sumidouros) de energia e nas forças de pressão [$B\Phi(M)$ e $B\Phi(E)$] produção (destruição) de energia cinética Veiga et al. (2013), Muench (1965).

$$\begin{aligned}
B(P_M) &= \frac{1 + \sin \phi}{2a \cos \phi} C_p \int \gamma \{ [2\langle v' T' \rangle] \langle T \rangle^* + \langle T \rangle^{*2} [\langle v \rangle] \} dm \\
&\quad + \frac{1}{2g} C_p \gamma \{ [2\langle \omega' T' \rangle] \langle T \rangle^* + \langle T \rangle^{*2} [\langle \omega \rangle] \} \}_{P_1} \quad (3.9)
\end{aligned}$$

$$- \frac{1}{2g} C_p \gamma \{ [2\langle \omega' T' \rangle] \langle T \rangle^* + \langle T \rangle^{*2} [\langle \omega \rangle] \} \}_{P_2}$$

$$\begin{aligned}
B(P_E) &= \frac{1 + \sin \phi}{2a \cos \phi} C_p \int \gamma \{ [\langle T'^2 v \rangle] dm + \frac{1}{2g} C_p \gamma \{ [2\langle \omega T'^2 \rangle] \} \}_{P_1} \\
&\quad (3.10)
\end{aligned}$$

$$- \frac{1}{2g} C_p \gamma \{ [2\langle \omega T'^2 \rangle] \} \}_{P_2}$$

$$\begin{aligned}
B(K_M) &= \frac{1 + \sin \phi}{2a \cos \phi} \int \{ [(\langle u^2 \rangle + \langle v^2 \rangle - \langle u'^2 \rangle - \langle v'^2 \rangle) \langle v \rangle] \} dm \\
&\quad + \frac{1}{2g} \{ [(\langle u^2 \rangle + \langle v^2 \rangle - \langle u'^2 \rangle - \langle v'^2 \rangle) \langle \omega \rangle] \} \}_{P_1} \quad (3.11)
\end{aligned}$$

$$- \frac{1}{2g} \{ [(\langle u^2 \rangle + \langle v^2 \rangle - \langle u'^2 \rangle - \langle v'^2 \rangle) \langle \omega \rangle] \} \}_{P_2}$$

$$\begin{aligned}
B(K_E) &= \frac{1 + \sin \phi}{2a \cos \phi} \int \{ [(\langle u'^2 \rangle + \langle v'^2 \rangle) \langle v \rangle] \} dm \\
&\quad + \frac{1}{2g} \{ [(\langle u'^2 \rangle + \langle v'^2 \rangle) \langle \omega \rangle] \} \}_{P_1} \quad (3.12)
\end{aligned}$$

$$- \frac{1}{2g} \{ [(\langle u'^2 \rangle + \langle v'^2 \rangle) \langle \omega \rangle] \} \}_{P_2}$$

$$B\Phi(M) = \frac{1 + \sin \phi}{a \cos \phi} \int [v\Phi^*] dm + \frac{1}{g} \left\{ \langle \omega^* \Phi^* \rangle \right\}_{P_1} - \frac{1}{g} \left\{ \langle \omega^* \Phi^* \rangle \right\}_{P_2} \quad (3.13)$$

$$B\Phi(E) = \frac{1 + \sin \phi}{a \cos \phi} \int [v' \Phi'] dm + \frac{1}{g} \left\{ \langle \omega' \Phi' \rangle \right\}_{P_1} - \frac{1}{g} \left\{ \langle \omega' \Phi' \rangle \right\}_{P_2} \quad (3.14)$$

Nas fórmulas acima, os subscritos P_1 (inferior) e P_2 (superior) representam os níveis de pressão.

A taxa fluxo de energia potencial disponível média zonal $B(P_M)$, da energia potencial da perturbação foi $B(P_E)$, de energia cinética média zonal $B(K_M)$ e da preturbação $B(K_E)$, foram calculadas pelas [Equação 3.9](#) a [Equação 3.12](#). Estes componentes representam as taxas de fluxos para cada energia envolvida (P_M , P_E , K_M e K_E), que estão associados aos transporte de calor (nas enegias potenciais) e momento (nas energias cinéticas) em pequena e grande escala.

Os componentes de força de pressão média zonal $B\Phi(M)$ e da perturbação $B\Phi(E)$ foram calculadas pelas [Equação 3.13](#) e [Equação 3.14](#), que representam a produção e destruição de energia cinética na pequena e grande escala através do fluxo de massa (geopotencial) em direção a baixa pressão.

Aproveitando-se do esquema apresentado na [Figura 3.2](#), e da [Equação 3.1](#) a [Equação 3.14](#) associadas ao ciclo descritas acima, podemos calcular os componentes de gerações e dissipações a partir do balanço das diferentes componentes de entradas e saídas dos reservatórios de energia. Sendo assim, tem-se:

$$\left\{ \begin{array}{l} G(P_M) = C(P_M, K_M) + C(P_M, P_E) - B(P_M) \\ G(P_E) = C(P_E, K_E) - C(P_M, P_E) - B(P_E) \\ D(K_E) = C(P_E, K_E) - C(K_E, K_M) + B(K_E) + B\Phi(E) \\ D(K_M) = C(P_M, K_M) + C(K_E, K_M) + B(K_M) + B\Phi(M) \end{array} \right. \quad (3.15)$$

No conjunto de [Equação 3.15](#), as duas primeiras foram usadas para obter os componentes de gerações das energias potenciais disponíveis [$G(P_M)$ e $G(P_E)$] e as duas últimas para as dissipações das energias cinéticas [$D(K_M)$ e $D(K_E)$].

3.4 Análise estatística, dinâmicas e termodinâmicas dos episódios de ZCAS e procedimentos de cálculo das equações

Inicialmente, fez-se a constatação e comparação dos episódios selecionada de [Andrade \(2011\)](#) e [Escobar \(2019\)](#) utilizada neste estudo, com os resultados de [Rosa \(2017\)](#) para a validação das datas de início e fim de cada evento. A pois essa constatação, foram feitas análises estatísticas simples dos eventos de ZCAS, nas quais foram avaliadas a frequência de ocorrências, período de duração e totais de dias do ano com eventos de ZCAS.

As comparações e análises estatísticas dos episódios de ZCAS, foram feitas principalmente para averiguar se a alta frequência de ocorrência dos eventos de ZCAS está associada a erros de mudanças na metodologia empregada para a identificação das ZCAS (feita subjetivamente ao dos anos) e erros ligados a experiência do observador na identificação do fenômeno ([QUADRO, 2012](#); [QUADRO et al., 2016](#)) ou a uma resposta associada a uma variabilidade climática.

Vale salientar ainda que, os resultados de [Rosa \(2017\)](#) foram usados apenas para a validação das data dos eventos. Sendo assim, não são utilizados para a obtenção dos resultado de análises sinóticas nem da energética dos eventos de ZCAS.

As análises das características sinóticas foram feitas a partir dos campos de: divergência, ômega, linha de corrente (LC) e OLR (que é um campo dinâmico/termodinâmico) associados aos compostos de eventos de ZCAS para cada padrão (PN, PC e PS).

Os padrões de localizações (PN, PC e PS) para os eventos de ZCAS que não foram identificadas por [Andrade \(2011\)](#) (que abrange os períodos março/2009 a abril/2018), identificou-se usando dados de $OLR < 230 \text{ W/m}^2$ e partir da distribuição horizontal média dos valores mais negativos das anomalias OLR. Além disso, fez-se a constatação/confirmação dos PN, PC e PS referente aos anos entre 2002 a março/2009.

Posteriormente, usou-se as equações acima descritas, para analisar as características energéticas médias dos eventos de ZCAS usando o composto de todos os casos, o que permite avaliar os principais mecanismos dinâmico e termodinâmicos associados aos eventos de ZCAS, bem como as tendências das energias potenciais e cinéticas e ainda da energia mecânica total dos eventos. Estes resultados são apresentados nos campos de perfis verticais, de mudanças no tempo e campos de superfícies (latitude-longitude) dos componentes do ciclo de energia.

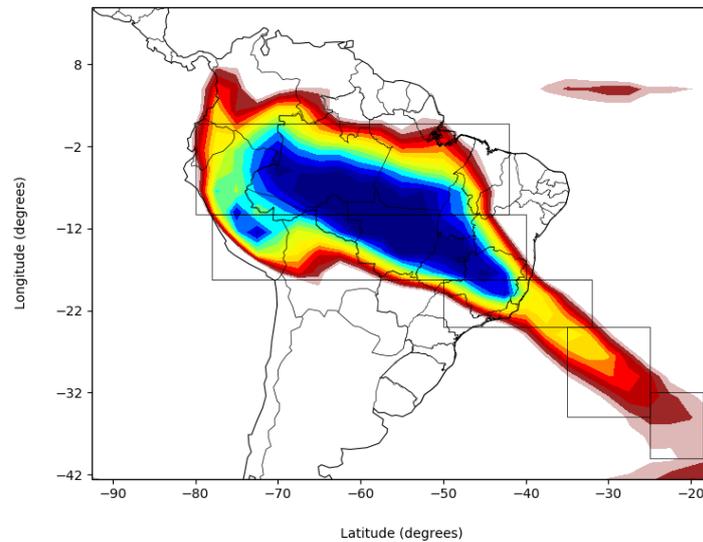
No entanto, para que se tenha os resultados mencionados no parágrafo acima, as equações apresentadas neste Capítulo foram resolvidas conforme os passos de integrações apresentados por [Oort e Peixoto \(1974\)](#), [Kim e Kim \(2013\)](#) e [Pan \(2015\)](#), os quais obedecem a hierarquia dos símbolos contidos nas equações e seus significados estão apresentados na lista de símbolos deste trabalho. Sendo assim, são calculados primeiramente as médias no tempo, depois as médias zonais e por final as hemisféricas.

Deve-se salientar ainda que este procedimento pode variar em função do campo desejado mas obedecendo a essência da metodologia (o qual considera os vórtices quase-permanentes e transientes). As integrais do volume são resolvidas para a representação dos diagramas do ciclo de energia e integrais duplas para os gráficos de superfícies, mudanças no tempo e perfis. Todos os procedimentos envolvidos no esquema do modelo utilizado foram desenvolvidos em Python, por meio de uma série de scripts que permitiu os cálculos das integrais acima.

As integrais do volume foram feitas sobre toda a área de atuação das ZCAS compreendida entre $0.5^\circ N$ a $39,5^\circ S$ e $78^\circ W$ a $18.5^\circ W$, e em todos os níveis de pressão (1000 a 10 hPa). A área de atuação das ZCAS, foram subdivididas em

5 áreas menores (área 1 a 5, como na Figura 3.3) levando em conta, as subáreas de maior influência do fenômeno (os quais foram identificados pelos campos de OLR). Quanto aos outros campos, são apresentados em uma extensão mais ampla como na Figura 3.1 a fim de constatar os efeitos do acoplamento lateral e trocas hemisféricas Rao e Bonatti (1987).

Figura 3.3 - Representação das divisões das subáreas de atuação da ZCAS.



Fonte: Produção do autor.

3.5 Procedimentos usados para análise das características energéticas das ZCAS

Após realizada a identificação da localização espacial do fenômeno (ZCAS) a partir dos campos de OLR (ver por exemplo a Figura 4.2) e calculados os componentes do ciclo de energia de Lorenz (CEL), fez-se os cálculos das médias que representariam as estruturas verticais (2-D) e latitude-longitude (3-D) de cada componente levando em conta todas as áreas da AS e oceanos adjacente. Isso, possibilita analisar as características de localização e intensidade das células de circulação a partir dos máximos e mínimos valores observados nos componentes do CEL nas regiões de localização das células de circulação (Hadley e Ferrel). Estas análises foram feitas nos componentes de energia (K_M e K_E), de conversões $[C(P_M, K_M), C(P_E, K_K)$ e $C(K_E, K_M)]$ e alguns componentes de fluxos como por exemplo $B(K_M)$ e $B(K_E)$.

As integrais do volume foram calculadas para cada subárea (1 a 5) apresentadas nas [Figura 4.2](#) e [Figura 4.3](#), e depois fez-se as médias das 5 subáreas a fim de representar a média para toda extensão de atuação das ZCAS. E assim, como os compostos dos episódios de ZCAS foram separados para cada padrão de localização, analisou-se como essas células se apresentam em cada padrão (Norte-PN, Central-PC e Sul-PS).

As estruturas verticais dos componentes de energia para o evento de ZCAS ocorrido entre 12 e 26/12/2013, foram geradas levando em conta a região de atuação do evento. Assim, cada ponto pressão-latitude corresponde a uma média dos pontos de longitude correspondente a região de atuação do evento. Por exemplo, os pontos pressão-latitude localizados em $0,5^{\circ}\text{N}$ na [Figura 4.39](#), correspondem a uma média dos pontos de longitudes localizados entre 78°W e 42°W (ver subáreas na [Figura 4.2](#)) e os últimos, localizados na latitude e $39,5^{\circ}\text{S}$, a uma média entre 25°W e $18,5^{\circ}\text{W}$. Para este estudo de caso, as tendências $(\frac{\partial}{\partial t})$ de energia foram calculadas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

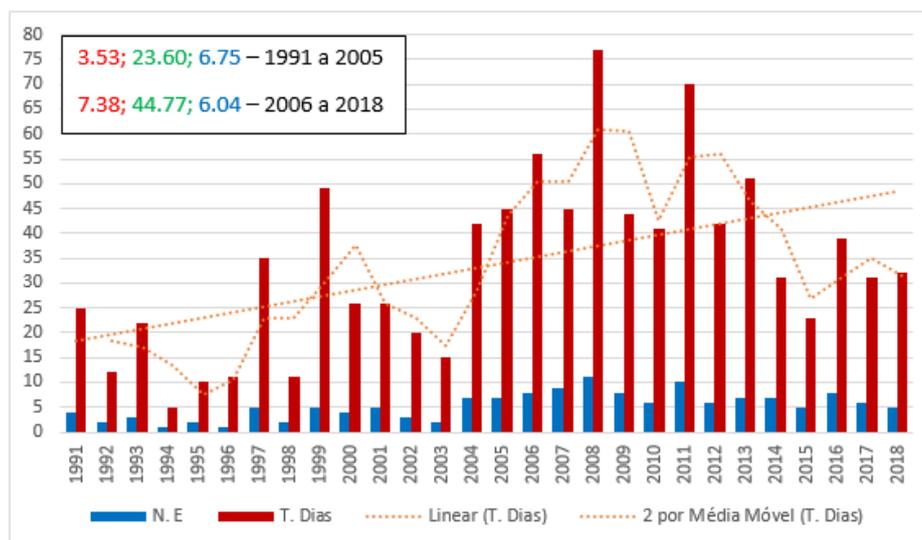
Neste Capítulo começaremos por apresentar e discutir os eventos de ZCAS registradas pelas duas fontes de observações, a confiabilidade destes registros e o quanto podem influenciar nos resultados obtidos em caso da existência de episódios registrados erroneamente. Em seguida, apresentamos uma breve análise das características sinóticas médias observadas e os principais resultados das componentes do ciclo de energia obtidos a partir da metodologia proposta, discutimos seus impactos e influências nos diferentes padrões de localização das ZCAS.

4.1 Análise estatística dos episódios de ZCAS

Na [Figura 4.1](#) é apresentada a frequência de ocorrência dos episódios de ZCAS observadas pelas duas fontes ([ANDRADE, 2011](#); [ESCOBAR, 2019](#)), os quais de agora em diante passaremos a chama-los apenas de "AE1119", a fim de compara-las com os registros retirados do trabalho de [Rosa \(2017\)](#) (ver valores entre parenteses na [Tabela C.2](#)). [Rosa \(2017\)](#) desenvolveu um método objetivo para identificação de ocorrências dos episódio de ZCAS. Este faz a utilização de dados de OLR (inferior a 230 W/m^2) em um algoritmo que identifica as ZCAS passando três etapas executadas sequencialmente. A primeira é de recorte da área de ocorrência a fim de eliminar a influência de outros sistemas (como a Baixa do Chaco, Noroeste da Argentina e da ZCIT mais ao Norte); segundo definição dos limiares (inferior a 230 W/m^2); e terceiro duração. Esta técnica conta ainda com um procedimento de filtragem para alerta de falso alarme, nos quais episódios detectados erroneamente são descartadas nas fases seguintes da detecção. Contudo, neste trabalho apresentamos apenas as quantidades registradas anualmente. As datas de ocorrências para esses episódios de ZCAS referentes aos estudos de [Rosa \(2017\)](#) podem ser vistos em seu trabalho.

Conforme a AE1119 ([Tabela C.1](#)), 150 episódio de ZCAS foram registrados durante todo o período de análise (1991-2018). Com isso, foi possível contabilizar a quantidade de casos registrados em cada ano e analisá-los estatisticamente. As estatísticas indicam uma maior frequência de ocorrência dos episódios de ZCAS nos últimos anos (entre 2004 a 2018, com quebras notáveis entre 2014 e 2015), confirmadas pelos valores médios de dois períodos distintos (1991-2005 e 2006-2018). Apesar de não haver mudanças notáveis em termos de duração ([Figura 4.1](#) e [Tabela C.2](#)). A alta frequência de ocorrência já foi documentado anteriormente por [Quadro \(2012\)](#) e [Quadro et al. \(2016\)](#), que sugeriu uma possível influência dos métodos de identificação utilizados, uma vez que estes (registros) dependem fortemente da experiência e dos critérios adotados pelos observadores.

Figura 4.1 - Número total de eventos (N.E) e Total de dias (T.Dias) do ano nas quais foram observados os episódios de ZCAS. As linhas pontilhadas mostram a tendência e a média móvel da T.Dias. Os valores no retângulo localizado à esquerda da figura mostram as médias dos N.E (em vermelho), T.Dias (em verde) e Duração (em azul) dos episódios de ZCAS registrados nos dois períodos.



Fonte: Produção do autor.

Pensando nas possíveis influências de mudanças de fontes e métodos usados para identificação, optou-se em considerar os registros de Rosa (2017) a fim de avaliar as diferenças dos dois registros (AE1119 e Rosa (2017)) e assim mostrar também a confiança dessas fontes, os quais apresentamos na Tabela C.2. Em termos de números de eventos a maior diferença foi registrada em 1996 e 1998 com -6 eventos cada. Nos totais de dias, a maior diferença foi de -32 dias registradas em 1998. Em termos de duração foi de 4,75 dias registrada em 1996. Na média, em todo período de comparação (1996 a 2015), a diferença entre a AE1119 e os registros de Rosa (2017) foram de -1,15, -2,15 e 0,04 para o número total de evento, totais de dias registrados com eventos de ZCAS e duração dos episódio respectivamente. Estes resultados sugerem que apesar do método objetivo ser eficaz nas detenções dos episódios de ZCAS, ela tende a subdividir os eventos registrados pelas observações como por exemplo constatados nos casos ocorridos de 01 a 11/03/1996, 06 a 18/01/1999 e ainda o caso ocorrido entre 23/11 a 05/12/2011, além de casos possivelmente não detectados pelo método objetivo (30/01 a 09/02/2007 01 a 12/03/2010).

Outro aspecto interessante a ser ressaltado com esses resultados é que, usando a

duração média (6,67 dias) dos episódios entre 1996 a 2015 para as duas análises, o grau de confiança para as metodologias em discussão neste texto foi superior a 80 % para os números de evento registrados e 67,78 % para os totais de dias. Nas durações, a influência das metodologias utilizadas é inferior a 1 %. No entanto, apesar disso (possíveis falhas, o qual é reconhecida pelo autor), os resultados dessas análises sugerem uma boa confiabilidade nas datas obtidas por Rosa (2017) e das AE1119, os quais foram usadas para elaboração dos compostos para as análises sinóticas e do ciclo de energia Lorenz para os eventos de ZCAS. Contudo, sugere-se que, apesar da alta confiabilidade das datas dos episódios, é indispensável para um estudo de caso, a constatação da real data de ocorrência do episódio em questão, independente da fonte. Mas, para um estudo no qual o estado médio das características dos episódios de ZCAS é desejado isso se torna menos importante pois o grau de confiança nas datas de ocorrência dos eventos é alto, além do mais, a diferença entre uma metodologia para outra é em média de 2 dias.

Os casos usados para este estudo, são os de AE1119 e, foram avaliados pelo autor usando dados de OLR (inferior a 230 W/m^2) e análise dos campos sinóticos, a fim de verificar as datas de início e fim do episódio.

4.2 Análise Sinótica dos episódios de ZCAS

Os padrões sinóticos médios observados durante os episódios de ZCAS em cada padrão de localização foram identificadas usando os compostos médios de dados de vento, ômega e geopotencial em altos médios e baixos níveis (ver figuras no [Apêndice C](#)). O objetivo foi constatar características observadas em cada padrão para suporte às discussões (pois não é o principal foco deste estudo). Nestes campos, observou-se a presença dos principais sistemas atuantes sobre AS durante os eventos de ZCAS, como é caso: da alta da Bolívia (AB), o cavado ou vórtices ciclones de altos níveis (VCAN) sobre o NEB na alta troposfera (200 hPa) [Figura C.1](#); o cavado frontal em 500 hPa (vistos pelos contornos de geopotencial na [Figura C.2](#)), que influencia na intensificação da convecção tropical (com maior influência sobre o continente em eventos de PS, vistos pelos campos de Ômega em 500 hPa); o fluxo de umidade para a região das ZCAS em baixos níveis da atmosfera ([HERDIES et al., 2002](#)), que evidencia a inclinação de sua localização para o norte (em PN) sul (em PS) e central em PC (indicadas pelas setas em cinzas na [Figura C.3](#)), e os centros de baixa pressão sobre o sudeste do Brasil (entre 20°S e 50°W).

Estas figuras, evidenciam igualmente a ligeira mudança de localização da posição do núcleo (centro) da AB entre 12°S e 18°S e 60°W a 70°W , e o deslocamento/localização

do VCAN sobre o Oceano em PN e continente em PS e PC. É observado ainda que no componente do jato subtropical sobre AS tende a ser mais intenso durante os eventos de PN do que em PS. Além disso, a região de saída deste, tende a ser em direção sudoeste-nordeste (SW-NE) em PN.

4.2.1 OLR dos episódios de ZCAS

Conforme Gruber e Krueger (1984) e Chelliah e Arkin (1992), OLR está amplamente relacionada com os padrões de convecção tropical e subtropical associadas as nuvens, isso é, quanto mais profunda a nuvem (nuvens de topos mais alto e frio) menor os valores de OLR e atividade convectiva mais intensa.

Nas figuras 4.2 e 4.3 são apresentados os campos médios de OLR para os dois períodos analisados (1991-2005, P1 e 2006-2018, P2) e para diferentes padrões de localização (PN, PC e PS) no período de 1991 a 2018, respectivamente. Estas figuras mostram os padrões de convecção observados sobre a AS durante esses eventos de ZCAS.

Como pode ser observado na Figura 4.2, a convecção foi mais intensa durante o primeiro período (P1) se comparado com P2 em toda extensa área de atuação das ZCAS. Com destaque por exemplo, a convecção na região da ZCIT e em toda região continental. Isso é justificável pois durante P1 o número total eventos associados aos Padrões Sul (PS) observado foi ligeiramente superior e com maior duração. Conseqüentemente maior total de dias registrado (Tabela C.3). E como discutido anteriormente, durante os eventos de PS é observado maior influência dos sistemas frontais na intensificação da convecção tropical.

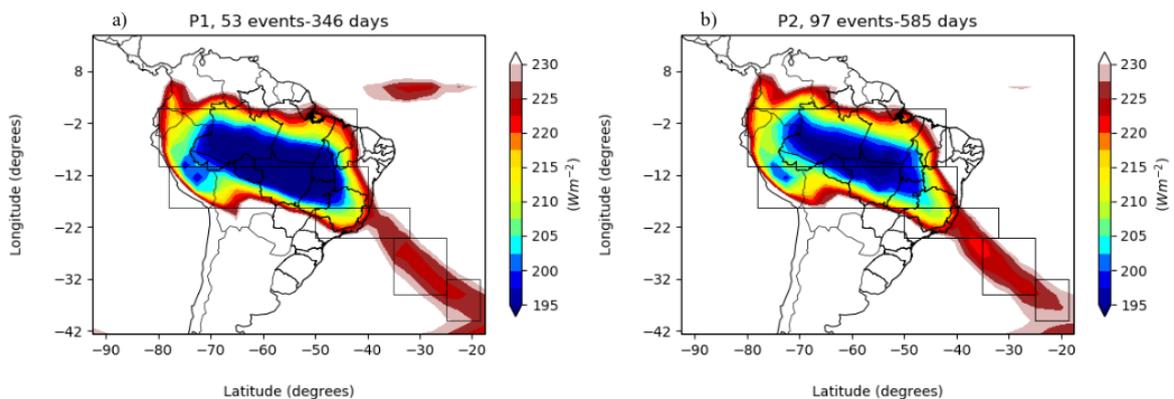
Observa-se que, os resultados dos campos de OLR para os eventos de ZCAS (Figura 4.3), refletem bem as características dos padrões de escoamento em cada padrão de localização. Por exemplo, a convecção tropical e subtropical (nas áreas continentais, bem como a convecção sobre a região da ZCIT) tendem a ser mais intensa e em uma área de atuação mais ampla durante os eventos de PS (mostrado pelas áreas em tons de cores azuis mais escuro sobre a região continental na Figura 4.3 (c) do que em eventos de PC e PN. Esses padrões de convecção, mostram muito bem as características ligadas a circulação de baixos e altos níveis sobre a AS durante esses eventos. Onde por exemplo, em eventos de PS o escoamento do fluxo de umidade em baixos níveis é mais inclinado para o sul, a Alta da Bolívia - AB ligeiramente deslocada ao sul, jato subtropical menos intenso e o VCAN a influenciar mais o interior do continente. Além disso, o centro de baixa pressão junto ao sudeste do

Brasil (encontrado entre 20°S e 50°W) é bem definido durante os eventos de PS, e isso adicionados aos trens de Ondas de Rossby de latitudes médias (ANDRADE, 2011; CARVALHO et al., 2004; CAVALCANTI et al., 2002; HOSKINS; AMBRIZZI, 1993) que tendem a exercer maior influência sobre as ZCAS durante os eventos de PS, intensificam e expandem mais a área de convecção.

Ressalta-se ainda que, em eventos de PN uma forte subsidência é estabelecida na região da ZCIT e a umidade sobre o oceano que alimentaria a ZCIT (sobre o Atlântico perto da AS) tende a alimentar as ZCAS (figura não mostrada). Além disso, as ondas equatoriais (Kelvin e Rossby) ligadas as oscilações Madden-Julian (OMJ), ativam a convecção sobre o NEB (ARAVÉQUIA, 2003), intensificando ainda mais a convecção nas regiões do NEB onde os menores valores de OLR são observados durante os eventos de PN.

As subdivisões das áreas representadas pelos retangulos nas Figura 4.2 e Figura 4.3, foram usadas para a identificação das áreas/subáreas a serem feitas os cálculos das integrais do volume. O primeiro retângulo nos trópicos representa a subárea 1 e o último (sobre o Oceano) a área 5, que poderão ser consideradas como áreas continentais (as duas primeiras), costeira ou litorânea a área 3 e oceânicas (as duas últimas).

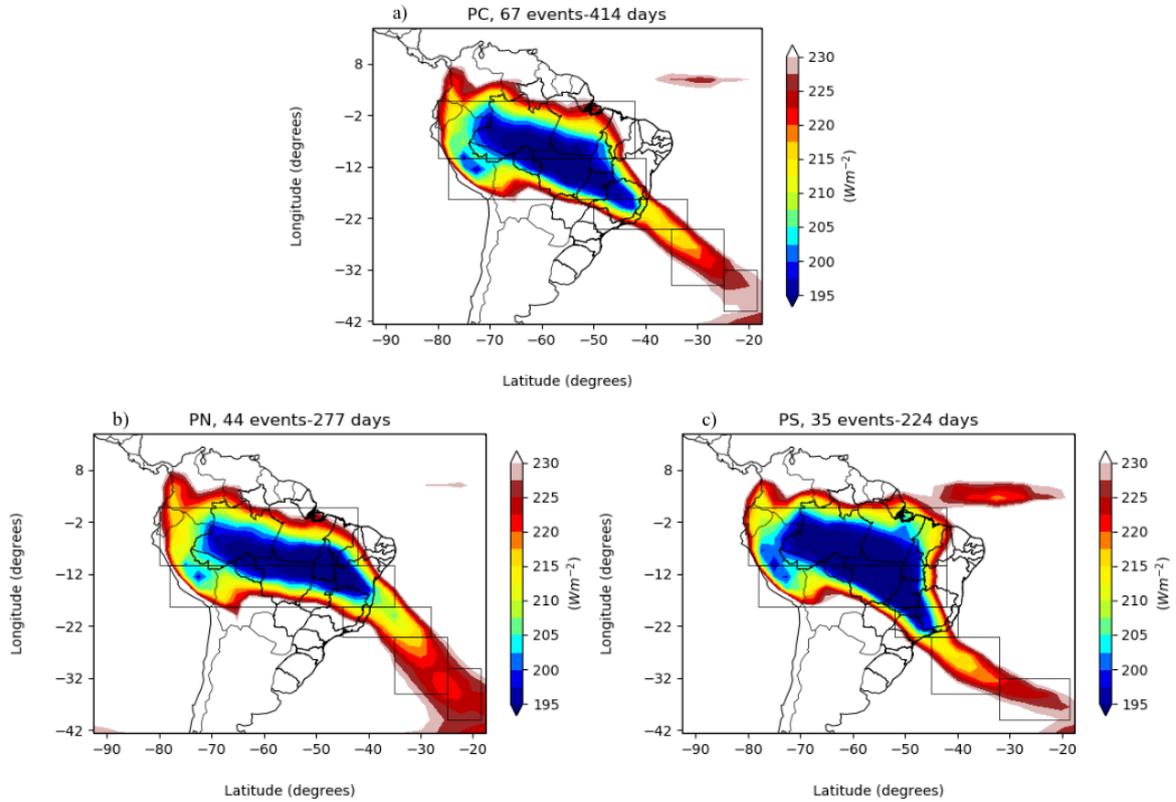
Figura 4.2 - OLR para os dois períodos de análise.



(a) Média do período de 1991-2005, P1 e (b) de 2006-2018, P2. As unidades estão em $W \cdot m^{-2}$.

Fonte: Produção do autor.

Figura 4.3 - O mesmo que na Figura 4.2, exceto para Período de análise de 1991-2018 e para os três padrões.



(a) Média de PC, (b) média de PN e (c) de PS.

Fonte: Produção do autor.

4.3 Energética das ZCAS

Nesta seção apresentamos e discutimos os resultados da energética de Lorenz obtidos para os componentes do ciclo de energia de Lorenz referentes aos dois períodos (1991-2005, P1 e 2006-2018, P2) e para os diferentes padrões (Sul-PS, Centro-PC e Norte-PN), usando dados de análises retrospectivas ERA-5 do ECMWF. Os valores dos componentes de energia (P_M , P_E , K_M e K_E), das taxas de conversões ($C(P_M, P_E)$, $C(P_E, K_E)$, $C(K_E, K_M)$ e $C(P_M, K_M)$), dos fluxos ($B(P_M)$, $B(P_E)$, $B(K_M)$, e $B(K_E)$) e, dos mecanismos dinâmicos de força de pressão ($B\Phi(M)$ e $B\Phi(E)$) foram calculadas diretamente usando equações apresentadas nas Subseção 3.3.1, Subseção 3.3.2 e Subseção 3.3.3. Os valores de geração de energia potencial disponível e dissipação de energia cinética foram estimados usando balanço dos componentes de entrada e saída dos reservatórios do Ciclo de Energia de Lorenz

(CEL).

Os resultados desses componentes são apresentados em diagramas e nas estruturas verticais 2-D (Pressão-Latitude) e de superfícies que refletem as estruturas 3-D integrados da coluna vertical (Pressão, Latitude e Longitude). Nos diagramas, os valores destacados em vermelho (azul) são referentes à P1 (P2) e em preto referentes à média de todos os eventos de ZCAS entre 1991 a 2018.

4.3.1 Energética das ZCAS durante os dois períodos de análise 1991-2005 e 2006-2018

O objetivo da presente seção, é investigar possíveis mudanças nos componentes do CEL e como isso pode ser usada para explicar a alta frequência de ocorrência das ZCAS observados nos últimos anos (principalmente entre 2004 a 2014, [Figura 4.1](#)).

4.3.1.1 Diagrama dos estados médios do Ciclo de Energia de Lorenz – CEL

Os valores do diagrama do CEL, foram calculados levando em conta as diferentes subáreas (1 a 5, [Figura 4.2](#)) de atuação das ZCAS. Assim, os valores médios obtidos representam a média das 5 subáreas apresentadas nesta figura.

Em preto na [Figura 4.4](#) representam o estado médios dos componentes do CEL para as eventos de ZCAS durante os 28 anos (1991-2018) considerando todos os 150 episódios. Observa-se que nas ZCAS, a energia é gerada no estado médio de P_M [$G(P_M)$] a uma taxa de $34,89 \text{ W/m}^2$ e que $C(P_M, P_E)$ é aproximadamente duas vezes maior que $C(P_E, K_E)$, ou seja, $9,68 \text{ W/m}^2$ e $4,43 \text{ W/m}^2$ respectivamente. Isso, é refletido na geração líquida de energia potencial da perturbação P_E [$G(P_E) < 0$, $-5,69 \text{ W/m}^2$]. Neste caso, como a taxa de conversão baroclínica $C(P_M, P_E)$ supera a taxa de conversão $C(P_E, K_E)$, o excesso de P_M convertida em P_E deve ser perdida de alguma forma e, uma delas é através do resfriamento provocado pelas nuvens e chuvas nas ZCAS que diminui do contraste zonal de temperatura ([HOLTON, 2004](#); [HOLTON; HAKIM, 2013](#)), mas como a liberação líquida de calor em nuvem pode ser positiva (ver por exemplo [Figura C.4](#)), uma correlação negativa entre a variação da taxa de calor e a temperatura é obtida [$G(P_E) < 0$]. Assim como P_M foi convertido em P_E e P_E em K_E , P_M e K_E são convertidos em K_M . Nos componentes dos reservatórios, destacam-se os valores de P_M ($1,73 \cdot 10^5 \text{ J/m}^2$ em média) que é mais de 10 vezes menor, se comparado aos valores médios globais obtidos por [Marques et al. \(2009\)](#), [Marques et al. \(2010\)](#), [Kim e Kim \(2013\)](#) e [Pan \(2015\)](#) mas, equiparados aos

de Da Silva (2010), Da Silva e Satyamurty (2013) obtidos para mesma região. Os baixos valores de P_M devem-se ao fato da área de estudo ser relativamente pequena e do baixo gradiente térmico horizontal sobre a região das ZCAS, principalmente nos trópicos (DA SILVA, 2010; DA SILVA; SATYAMURTY, 2013). Devemos destacar ainda, a grande predominância de energia cinética média zonal (K_M , $10,14 \cdot 10^5 J/m^2$) devido à grande influência dos jatos subtropicais sobre as regiões mais ao sul de atuação das ZCAS.

Observa-se ainda na Figura 4.4, que as principais diferenças entre os dois períodos estão nos componentes da taxa de geração de energia ($G(P_M)$ e $G(P_E)$), nas energias potencial disponível (P_M e P_E) e nos componentes de conversões baroclínica e barotrópica $C(P_M, P_E)$ e $C(K_E, K_M)$ respectivamente.

P_M do segundo período é o dobro do primeiro, ou seja, $2,08 \cdot 10^5 J/m^2$ e $1,04 \cdot 10^5 J/m^2$, contribuindo com mais de 20% no valor médio ($1,73 \cdot 10^5$) observado para todo período (1991-2018), isso é, 50% mais energia disponível para o desenvolvimento/manutenção das ZCAS. Para P_E a diferença é de $0,66 \cdot 10^5 J/m^2$, resultando em um aumento de 17,46% em energia potencial da perturbação média da ZCAS. Para K_M , o aumento é de 3,41%. No caso de energia cinética dos distúrbios, K_E de P2 foi 0,25% inferior à média, mostrando que houve uma diminuição de energia de 1,24% em relação ao primeiro período. Esse aumento de energia, podem explicar a alta frequência dos eventos de ZCAS observado durante P2, devido à maior distribuição relativa de temperatura que resultaram em aumento de P_M e P_E , e a baixa diferença na intensidade e persistência dos episódios devido as poucas diferenças observado em K_M e K_E entre os dois períodos. Além disso, $G(P_M)$ mostra que o aquecimento radiativo na ZCAS foi maior durante P2 [$G(P_M)$ de P2 > $G(P_M)$ de P1], sustentando ainda mais a suspeita de um aquecimento tropical maior durante P2.

Nas taxas de conversões, destacam-se as taxas ligadas às conversões baroclínicas e barotrópicas com maiores diferenças. Para estas, foram observadas $C(P_M, P_E)$ de $7,32 W/m^2$ para P1 e $10,98 W/m^2$ para o P2. E para $C(K_E, K_M)$, observou-se que o valor referente ao P1 é 4 vezes superior ao segundo, mostrando uma forte predominância de processos baroclínicos durante o 2º período e processos barotrópicos no 1º. Contudo, as análises em detalhes baseadas nas subáreas, mostram que nos trópicos é dominada pela instabilidade barotópica [$C(K_E, K_M) < 0$], o qual foi mais forte durante P1 e nas regiões mais ao sul das ZCAS foi durante P2 (ver Tabela C.4).

Nos componentes de conversões ($C(P_M, P_E)$, $C(P_E, K_E)$, $C(K_E, K_M)$ e

$C(P_M, K_M)$), apesar do primeiro período apresentar uma taxa de conversão maior em relação ao segundo em quase todos componentes [com exceção em $C(P_M, P_E)$], é compensado por uma maior dissipação de energia cinética tanto no estado básico como nos distúrbios (ver [Figura 4.7](#)).

Nos componentes dos fluxos e dos mecanismos dinâmicos, constatou-se que nas ZCAS, esses componentes tendem a ser negativos nas médias zonais e positivos nos componentes dos distúrbios, exceto em $B(K_E)$ onde é negativo. No caso das taxas de geração, valores negativos observados para $G(P_E)$ podem representar perda de energia devido à perda de radiação na tempestade [Holton e Hakim \(2013\)](#).

As gerações, dissipações, conversões os componentes de fluxos e dos mecanismos dinâmicos, são responsáveis por manter os fluxos/suprimento de energia no ciclo de energia de Lorenz para as ZCAS.

4.3.1.2 Distribuição espacial dos componentes de energia

A seguir, é apresentado a estrutura da distribuição espacial dos componentes dos reservatórios de energia (P_M , P_E , K_M e K_E) durante os dois períodos de análises (1991-2005 e 2006-2018). A estrutura 2-D da energia potencial disponível (P_M) é determinada pela distribuição da relação solar. Neste contexto, regiões de latitudes baixas (ou equatoriais) terão valores de P_M diferentes das latitudes mais altas. O contraste Terra-Mar devido ao calor específico é outro aspecto importante que leva a uma estrutura 3-D da distribuição térmica (P_E).

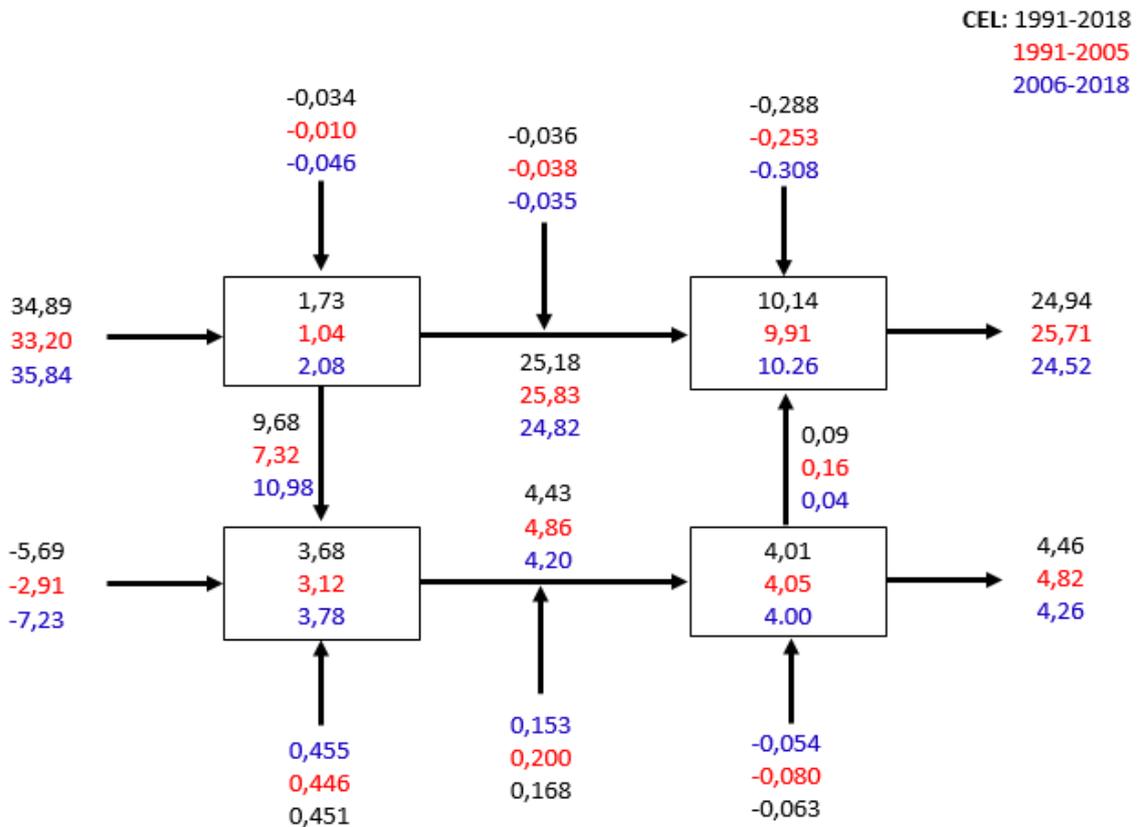
De igual modo, K_M apresenta uma estrutura 2-D, o qual está ligado à disponibilidade de P_M e P_E e às condições de superfície que contribui para maior/menor velocidade do vento ([PAN, 2015](#)), e devido aos distúrbios do vento em alto e baixos níveis da atmosfera uma estrutura 3-D de energia cinética é obtida K_E (como resposta as características superficiais e topográficas).

Assim, os componentes PM e KM são apresentados em uma estrutura 2-D (Pressão e Latitude) e os componentes P_E e K_E em uma estrutura 3-D (Pressão, Latitude e Longitude).

4.3.1.3 Estrutura vertical de P_M

A energia potencial disponível P_M é originada da radiação solar que é absorvida pela superfície e pelos gases em níveis superiores. A sua estrutura vertical é determinada pela distribuição da radiação solar absorvida em diferentes latitudes.

Figura 4.4 - Diagrama do CEL para os Eventos de ZCAS ocorrido entre 1991 - 2018.



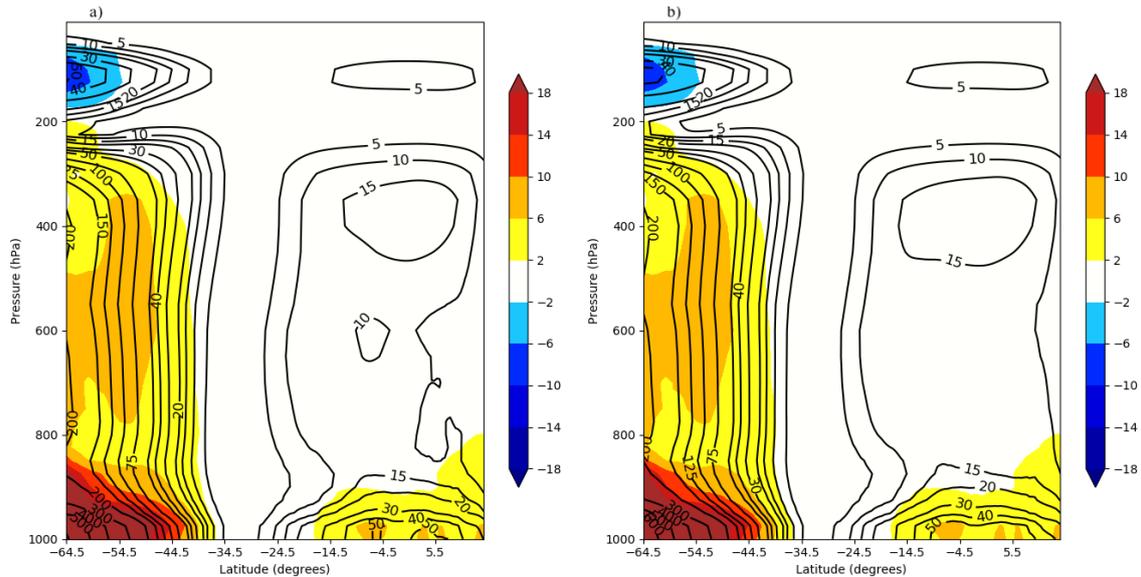
Os valores em preto representam as médias entre 1991 a 2018, em vermelho de 1991-2005 (P1) e azul 2005-2018 (P2). Unidades estão em $10^5 Jm^{-2}$ para as energias e Wm^{-2} para as taxas de conversões, geração, fluxos, força de pressão e dissipação.

Fonte: Produção do autor.

Abaixo (Figura 4.5) são apresentadas as estruturas verticais (2-D) de P_M para os eventos de ZCAS nos dois períodos analisados. Os máximos de P_M são concentrados nas altas latitudes. Grandes contribuições de P_M são também observados nos trópicos em baixos níveis da atmosfera, isso devido principalmente às grandes variações de temperatura em relação à média hemisférica. Nesta figura, é possível observar as regiões de maior diferença de um período para outro. Nas regiões tropicais e nas latitudes mais altas (acima de $44.5^\circ S$) é claramente notável a maior disponibilidade de energia durante o segundo período de análise (valores positivos acima de $4 \cdot 10^5 Jm^{-2} bar^{-1}$). Isso pode ser uma resposta das altas oscilações térmicas (aquecimento/resfriamento) nos trópicos e extratropicos observado nos últimos anos (PAN et al., 2017; HUANG; MCELROY, 2015; HUANG; MCELROY, 2014; LIU et al., 2012; EMANUEL, 2005), (ver também o website <https://data.giss.nasa.gov/gistemp/>), que

estão ligadas às mudanças climáticas refletidas pelo aquecimento global devido às altas concentrações dos gases de efeito estufa na atmosfera (HANSEN et al., 2006).

Figura 4.5 - Secção vertical latitude – pressão da energia potencial disponível média zonal, P_M , para os dois períodos.



(a) P1 de 1991-2005 e (b) P2 de 2006-2018. Sombreado é a diferença entre os dois períodos ($P1 - P2$) e os contornos são $P_M(P1)$ e $P_M(P2)$ a esquerda e a direita respectivamente. O intervalo de contorno é 10 até 50 e 25 depois. As unidades estão em $10^5 J/m^2/bar$ ou $10^2 J/m^2/hPa$.

Fonte: Produção do autor

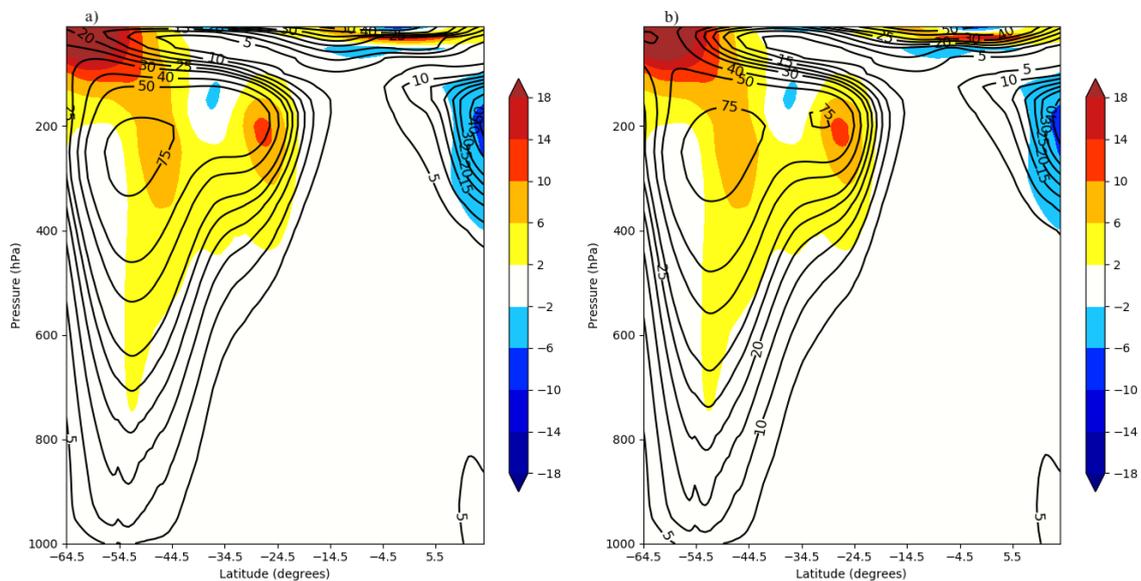
4.3.1.4 Estrutura vertical de K_M

A energia cinética K_M é originada de P_M e de algumas conversões de K_E .

Os padrões das estruturas verticais de K_M para os eventos de ZCAS ocorridos durante os dois períodos analisados (1991-2005 e 2006-2018) são apresentados na Figura 4.6. Esta figura mostra que os maiores valores de K_M são observados em áreas de forte circulação atmosférica, destacando-se os centros de localização dos jatos troposféricos nas latitudes médias e subtropicais em 250 e 200 hPa, os ventos do Hemisfério Norte (HN), para o Hemisfério Sul (HS) em baixos e altos níveis da atmosfera, que influenciam no transporte inter-hemisférico de momento, calor e umidade para AS.

As comparações dos dois períodos, evidenciam que K_M foi maior durante P2 na estratosfera e na região dos jatos troposféricos. Além disso, o núcleo dos jatos subtropicais são claramente evidentes durante P2, significando que na média os jatos subtropicais foram mais intensos durante P2. O transporte de momento inter-hemisférico foi ligeiramente mais baixo durante P2 em altos níveis da atmosfera, mostrando que a influência dos jatos de HN foi menor durante P2.

Figura 4.6 - Secção vertical latitude – pressão da energia cinética média zonal, K_M , para os dois períodos.



(a) P1 de 1991-2005 e (b) P2 de 2006-2018. Sombreado é a diferença entre os dois períodos ($P1 - P2$) e os contornos são $K_M(P1)$ e $K_M(P2)$. O intervalo de contorno é 5 até 30, 10 até 50 e 25 depois. As unidades estão em $10^5 J/m^2/bar$ ou $10^2 J/m^2/hPa$.

Fonte: Produção do autor

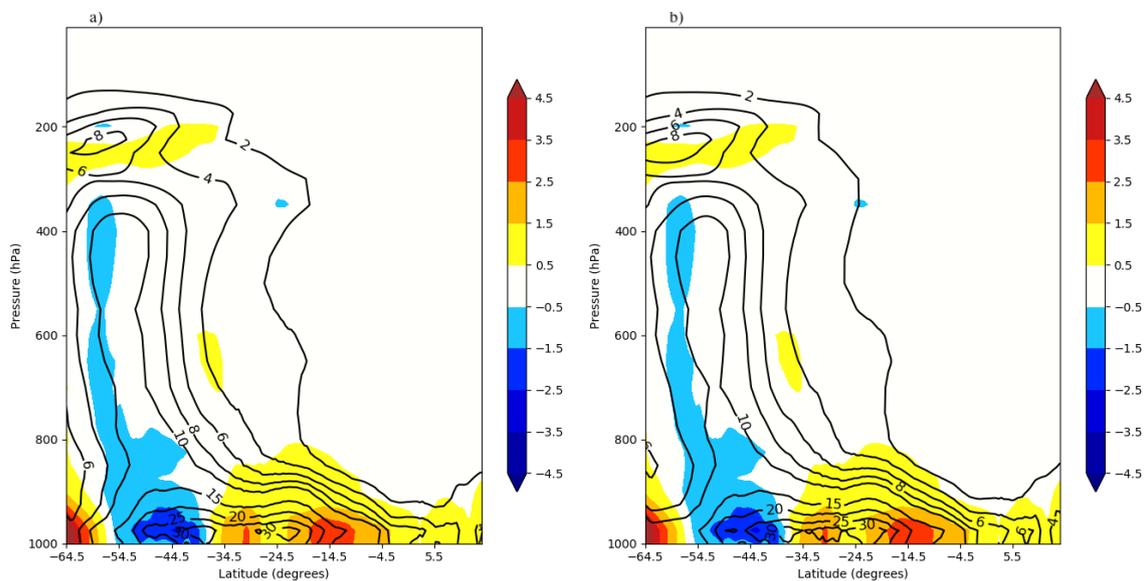
4.3.1.5 Estrutura vertical de P_E

A energia potencial da perturbação P_E é originada principalmente do gradiente térmico zonal refletido pelo contraste Terra-Mar e pelos desvios temporais locais de temperatura, além de algumas conversões de P_M .

As estruturas verticais dos estados médios de P_E durante os eventos de ZCAS ocorridos entre 1991 a 2018 nos dois períodos são apresentadas na Figura 4.7. Nesta figura, podemos facilmente observar que a estrutura vertical de P_E é similar ao de

P_M com máximos em superfície, exceto que em P_E os máximos são encontrados nas regiões entre os trópicos e subtropicais. Além disso, a estrutura de P_E é levemente inclinado para o sul. As diferenças entre os períodos evidenciam que a energia potencial disponível da perturbação (P_E) foi superior durante P2 em superfície em quase toda região tropical e subtropical. P_E foi igualmente superior durante P2 nas regiões das latitudes mais altas acima de 58°S e menor entre 35 e 55°S . Essas diferenças entre P1 e P2, foram refletidas nas ZCAS onde P2 foi 17,46% superior que P1.

Figura 4.7 - Secção vertical latitude – pressão da energia potencial da perturbação, P_E , para os dois períodos.



(a) P1 de 1991-2005 e (b) P2 de 2006-2018. Sombreado é a diferença entre os dois períodos ($P1 - P2$) e os contornos são $P_E(P1)$ e $P_E(P2)$. O intervalo de contorno é 2 até 10 e 5 depois. As unidades estão em $10^5 J/m^2/bar$ ($10^2 J/m^2/hPa$).

Fonte: Produção do autor

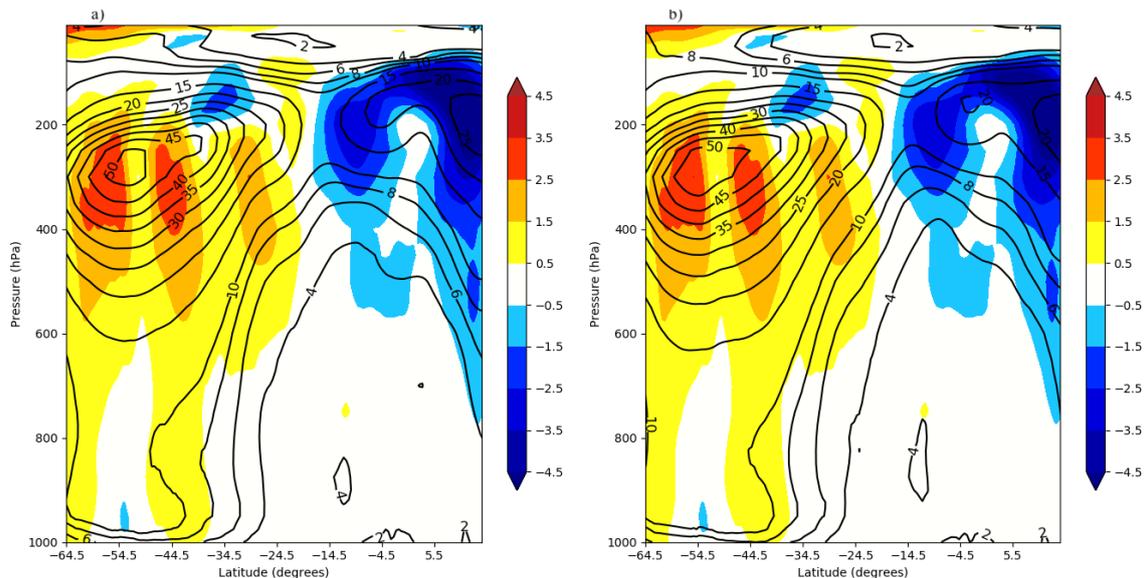
4.3.1.6 Estrutura vertical de K_E

A energia cinética da perturbação K_E é originada dos desvios zonais e temporais dos ventos, e de conversões de P_E proporcionada pelos transportes zonal e meridional de massa.

Os padrões de K_E para AS durante os eventos de ZCAS ocorridos entre 1991-2005

e 2006-2018 são mostrados na Figura 4.8. Tal como em K_M , K_E é máximo em altos níveis da troposfera em 250 hPa e 54,5°S. Grandes contribuições de K_E para a circulação sobre a AS também são observadas nos trópicos na alta troposfera. Nas diferenças entre os períodos, constata-se uma maior diferença nas regiões dos jatos de latitudes médias e subtropicais, onde P2 foi superior a P1 e nos trópicos na alta atmosfera, onde P1 foi superior, isso mostra uma maior atividade dos jatos troposféricos durante P2 nas latitudes médias e menor nos trópicos, e conseqüentemente uma intensificação (desintensificação) no levantamento (ou criação de vórtices) associados aos jatos nas latitudes médias (trópicos).

Figura 4.8 - Secção vertical latitude – pressão da energia cinética da perturbação, K_E , para os dois períodos.



(a) P1 de 1991-2005 e (b) P2 de 2006-2018. Sombreado é a diferença entre os dois períodos (P1 - P2) e os contornos são $K_E(P1)$ e $K_E(P2)$. O intervalo de contorno é 2 até 10 e 5 depois. As unidades estão em $10^5 J/m^2/bar$ ($10^2 J/m^2/hPa$).

Fonte: Produção do autor

4.3.1.7 Distribuição espacial dos componentes de taxas de conversões de energia

Nas figuras a seguir, são apresentadas as estruturas das distribuições 2-D dos componentes de taxas de conversões de energia [$C(P_M, P_E)$, $C(P_E, K_E)$, $C(K_E, K_M)$ e

$C(P_M, K_M)$]. Os componentes de taxas de conversões, são responsáveis por manter as trocas/conversões de energia no ciclo. Suas estruturas estão ligadas às estruturas (2-D e 3-D) de P_M , P_E , K_M e K_E . Os componentes de conversões podem ser positivos e negativos. Indicando as regiões de favorecimento/desfavorecimento de troca de energia em um dado sentido.

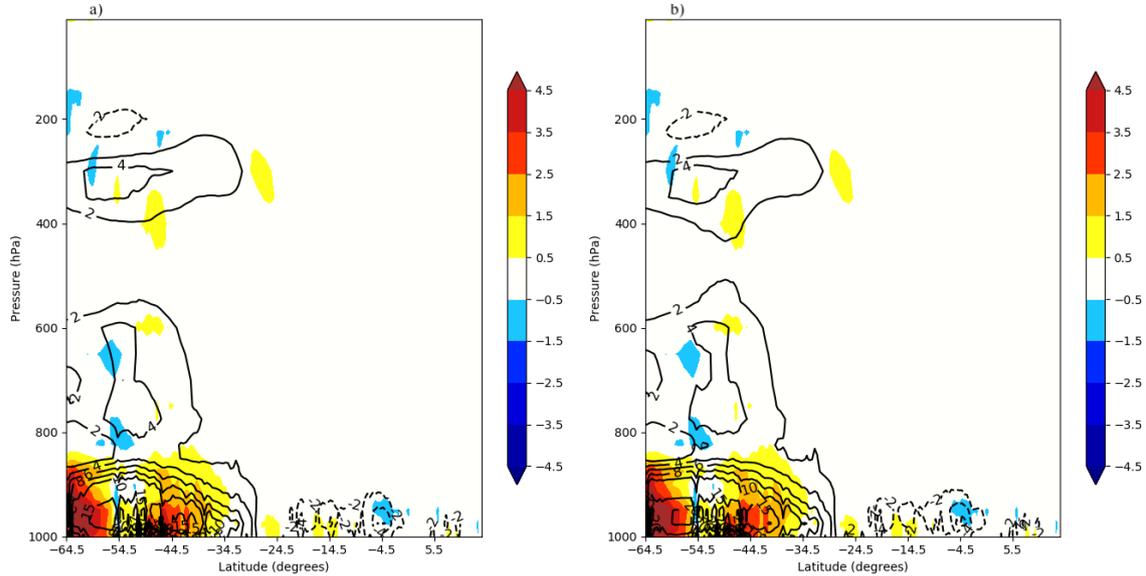
Para as análises referentes aos dois períodos, todos os componentes de taxas de conversões são apresentados em uma estrutura 2-D.

4.3.1.8 Estrutura vertical de $C(P_M, P_E)$

A taxa de conversão de energia potencial disponível P_M para energia potencial da perturbação (P_E) [$C(P_M, P_E)$] mostra como os efeitos de larga escala ligadas ao transporte de calor são transferidas para pequena escala. A transferência (conversão) de P_M em P_E [$C(P_M, P_E)$] é positivo, em regiões onde P_M cede energia para P_E [$C(P_M, P_E) > 0$] e, é negativo onde P_E cede energia para P_M [$C(P_M, P_E) < 0$]. $C(P_M, P_E)$ é uma importante fonte de P_E , através do transporte meridional e vertical de temperatura dos vórtices turbulentos.

A [Figura 4.9](#) mostra a estrutura 2-D da taxa de conversão de energia potencial disponível P_M para energia potencial da perturbação (P_E) [$C(P_M, P_E)$] para os eventos de ZCAS ocorrido durante os dois períodos (1991-2005 e 2006-2018). Observa-se nesta figura, que os máximos de $C(P_M, P_E)$ estão localizados na baixa troposfera próximo dos centros de máxima de P_E (entre 35° e 65°S). Os mínimos valores são encontrados de igual modo na baixa troposfera e nos trópicos. Um pequeno núcleo de $C(P_M, P_E)$ negativos também é observado em 200 hPa e 54,5°S. Essas características de $C(P_M, P_E)$ é um importante fator que dá estrutura de P_E , e está associada ao aumento ou diminuição dos distúrbios baroclínicos, que devem existir para reduzir o contraste térmico entre trópicos e extratropicos adicionando uma variação zonal (na direção leste-oeste, (KIM; KIM, 2013)). Esses distúrbios são instáveis baroclinicamente nas latitudes médias em baixo e altos níveis da atmosfera. Constatou-se ainda nesta figura, que a taxa de conversão baroclínica foi superior durante P2 principalmente na baixa troposfera acima de 35°S, onde essa diferença é maior.

Figura 4.9 - Secção vertical latitude – pressão da taxa de conversão de P_M para P_E , $C(P_M, P_E)$, para os dois períodos.



(a) P1 de 1991-2005 e (b) P2 de 2006-2018. Sombreado é a diferença entre os dois períodos (P1 - P2) e os contornos são $C(P_M, P_E)[P1]$ e $C(P_M, P_E)[P2]$. O intervalo de contorno é 2 até 10 e 5 depois. As unidades estão em $W/m^2/bar$ ($10^{-3}W/m^2/hPa$).

Fonte: Produção do autor

4.3.1.9 Estrutura vertical $C(P_E, K_E)$

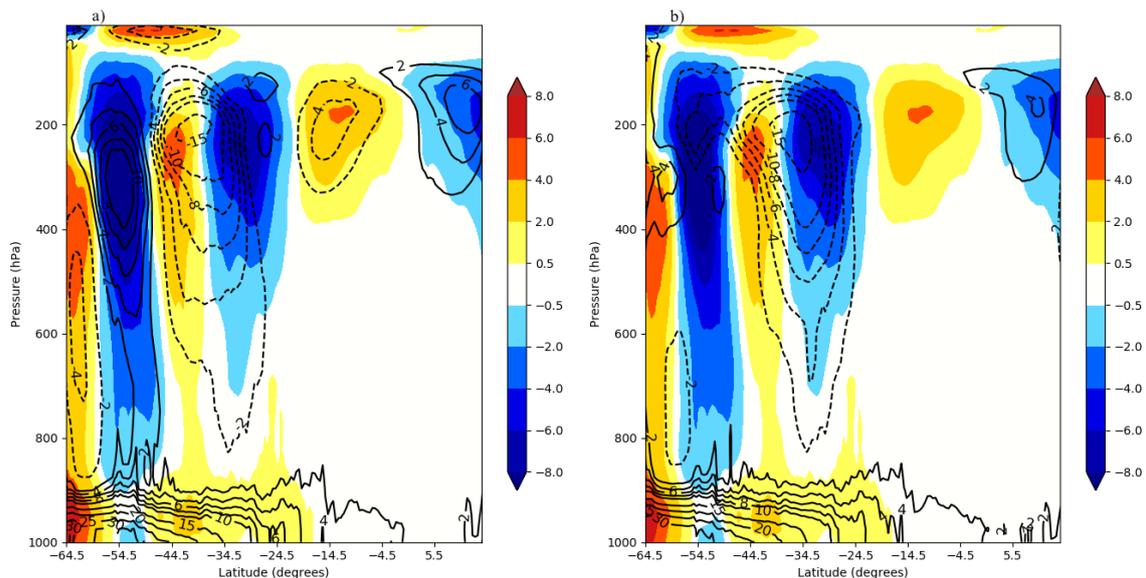
A taxa de conversão de energia P_E para K_E $C(P_E, K_E)$ relaciona as trocas de energia em pequena escala, através dos movimentos verticais com ascensão do ar quente e subsidência do ar frio.

A Figura 4.10 mostra estrutura vertical (2-D) de $C(P_E, K_E)$ dos eventos de ZCAS ocorrido durante os dois períodos (1991-2005 e 2006-2018). Observa-se que os máximos de $C(P_E, K_E)$ são encontrados na baixa troposfera em torno de $55^\circ S$ e os mínimos em 200 hPa entre 35 e $45^\circ S$ (junto a célula de Hadley). Valores positivos de $C(P_E, K_E)$ com grandes contribuições são igualmente observados em 200 hPa e $54^\circ S$ (na célula de Ferrel). Esses resultados mostram as regiões de maiores movimentos de subida e descida do ar conduzida pelo calor ((LI et al., 2007b), (KIM; KIM, 2013)) sobre a região de estudo. Observa-se ainda que as regiões de fortes instabilidade baroclínicas estão nas latitudes médias em baixos e altos níveis da troposfera, onde são encontrados os máximos de movimentos verticais [$C(P_E, K_E > 0)$] pro-

porcionadas pelos vórtices, concordando com o que foi observado na estrutura de $[C(P_M, P_E) > 0]$.

As maiores diferenças entre P1 e P2 são observadas em superfície, onde P2 foi maior que P1 e na alta troposfera nas regiões dos ramos superior da célula de Ferrel em 54°S e em aproximadamente 32°S, onde $C(P_E, K_E)$ de P1 foi superior à P2. Esses fatos contribuem para uma diferença global de aproximadamente 3.21% observadas nos dois períodos de análises sobre a região das ZCAS (com P1 sendo superior, ver Figura 4.4).

Figura 4.10 - Secção vertical latitude – pressão da taxa de conversão de P_E para K_E , $C(P_E, K_E)$, para os dois períodos.



(a) P1 de 1991-2005 e (b) P2 de 2006-2018. Sombreado é a diferença entre os dois períodos (P1 - P2) e os contornos são $C(P_E, K_E)[P1]$ e $C(P_E, K_E)[P2]$. O intervalo de contorno é 2 até 10 e 5 depois. As unidades estão em $W/m^2/bar$ ($10^{-3}W/m^2/hPa$).

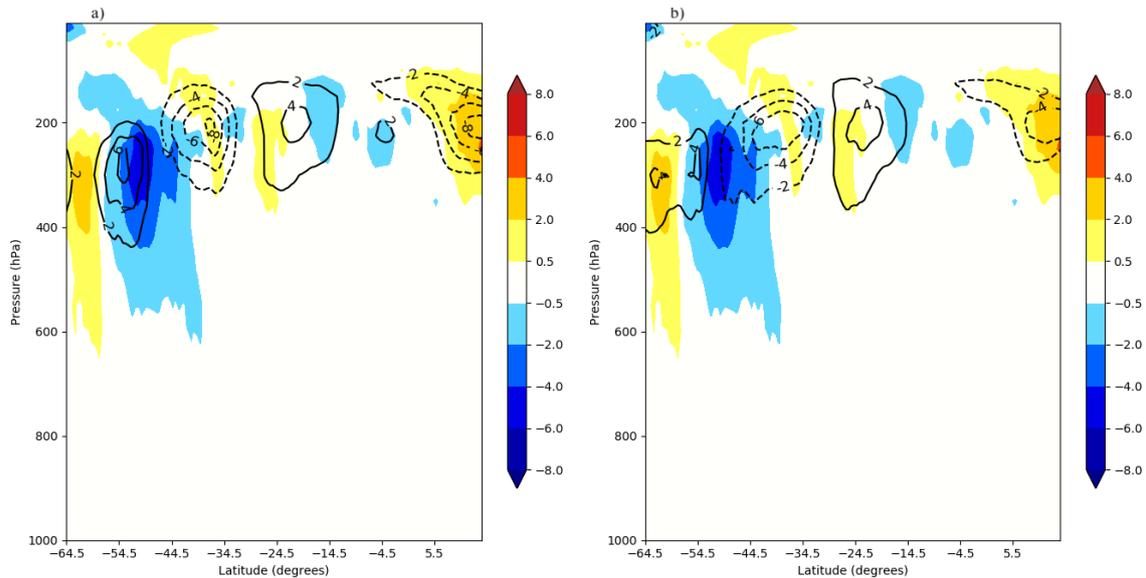
Fonte: Produção do autor

4.3.1.10 Estrutura vertical de $C(K_E, K_M)$

As posições dos centros de máximos e mínimos valores de $C(K_E, K_M)$ para os dois períodos são apresentados na Figura 4.11. Nesta figura, 4 centros são observados (dois positivos e dois negativos). Estes centros estão localizados sobre as regiões de fortes circulações atmosféricas nos trópicos, subtropicais e nas latitudes médias

sobre as regiões dos ramos ascendente e descendentes das células de circulação de Hadley e Ferrel (ver descrição na Seção B.1). Estes resultados, medem a intensidade dos processos barotrópicos associados ao aumento do transporte de momento para o lado oposto do movimento da perturbação ligados aos movimentos dos jatos sobre a AS tal como salientado por Kim e Kim (2013) e por Pan (2015). As taxas de conversões barotrópicas calculadas para P1 foi maior entre 45 e 55°S em 300 hPa e menor no centro observado perto do equador (no HN). Vale salientar ainda, que estes resultados mostram que a instabilidade barotrópica [regiões de $C(K_E, K_M) < 0$] domina em 40°S e ao norte de 5°S e, foram mais intensas durante P1.

Figura 4.11 - Secção vertical latitude – pressão da taxa de conversão de K_E para K_M , $C(K_E, K_M)$, para os dois períodos.



(a) P1 de 1991-2005 e (b) P2 de 2006-2018. Sombreado é a diferença entre os dois períodos (P1 - P2) e os contornos são $C(K_E, K_M)[P1]$ e $C(K_E, K_M)[P2]$. O intervalo de contorno é 2 até 10 e 5 depois. As unidades estão em $W/m^2/bar$ ($10^{-3}W/m^2/hPa$).

Fonte: Produção do autor

4.3.1.11 Estrutura vertical de $C(P_M, K_M)$

A taxa de conversão de P_M para K_M $C(P_M, K_M)$ conecta as trocas de energia em larga escala de P_M para K_M . Ela descreve a circulação em larga escala entre P_M e K_M relacionando as trocas de calor na direção meridional (trópico-extratrópicos)

via células de circulação direta de Hadley e de Ferrel.

A Figura 4.11 mostra os padrões de taxa de conversão de P_M para K_M [$C(P_M, K_M)$] durante os eventos analisados (1991-2005 e 2006-2018). Observa-se que $C(P_M, K_M)$ ligado à célula de Hadley é positivo (entre 20 e 34°S em 200 hPa, nas regiões dos jatos subtropicais), indicando que na média o ar é transportado dos trópicos para os extratropicais e negativo na região da célula de Ferrel (entre 45 e 55°S e 250 hPa, nas regiões dos jatos de latitudes médias), indicando um transporte de ar frio dos polos para as médias latitudes. Centros de $C(P_M, K_M)$ positivo menos intenso ligados à célula de Ferrel também são observados em superfície, mostrando um transporte de massa de ar ligeiramente quente (frio) em direção as polos (subtrópicos).

As diferenças negativas (positivas) são maiores nas regiões de localização da célula de Ferrel na alta (média e baixa) troposfera (estratosfera). Indicando maiores (menores) conversões de energia durante P1 (P2) onde as diferenças são negativas (positiva). Nos trópicos, na região da célula de circulação direta de Hadley, essa diferença é pequena, o que também é nítido nos valores médios de $C(P_M, K_M)$ para região das ZCAS onde essa diferença não excede os 4% (ver Figura 4.4).

Nas próximas subseções, serão analisada as estruturas verticais (2-D) para os componentes de fluxos de energia e dos mecanismos dinâmicos relacionando às forças de pressão em direção a baixa pressão.

4.3.1.12 Distribuição espacial dos componentes de taxas de fluxos de energia e dos mecanismos dinâmicos

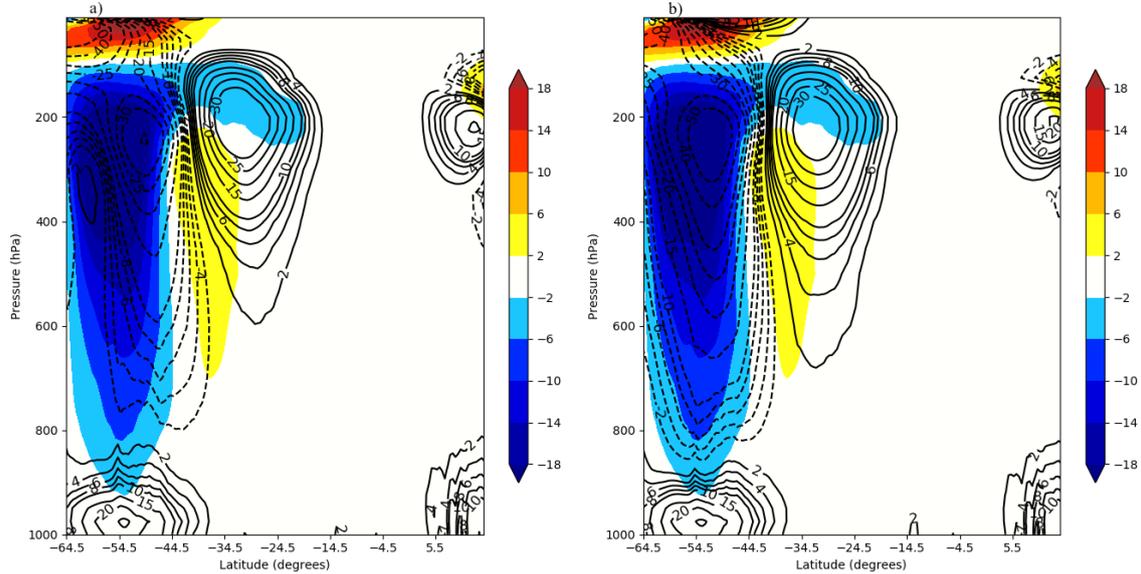
Nesta seção, analisamos os componentes de fluxos [$B(P_M)$, $B(P_E)$, $B(K_M)$, e $B(K_E)$] e dos mecanismos dinâmicos da força de pressão [$B\Phi(M)$ e $B\Phi(E)$] sobre AS durante os dois períodos. Aqui, voltaremos nossa atenção para os componentes que tiveram maior impacto e que apresentaram uma estrutura 2-D de destaque. Os componentes de fluxos podem ser interpretados como fonte (valores positivos) ou sumidouro (valores negativos) de energia sobre a região de estudo.

De igual modo, os componentes de força de pressão como produção ou destruição de energia cinética.

4.3.1.13 Estrutura vertical de $B(P_M)$

A taxa de fluxo de P_M $B(P_M)$ conecta o transporte de energia em larga escala relacionando a troca de calor na direção meridional entre os trópicos e os extratropicais

Figura 4.12 - Secção vertical latitude – pressão da taxa de conversão de P_M para K_M , $C(K_M, K_M)$, para os dois períodos.



(a) P1 de 1991-2005 e (b) P2 de 2006-2018. Sombreado é a diferença entre os dois períodos (P1 - P2) e os contornos são $C(P_M, K_M)[P1]$ e $C(P_M, K_M)[P2]$. O intervalo de contorno é 2 até 10, 5 até 30 e 10 depois. As unidades estão em $W/m^2/bar$ ($10^{-3}W/m^2/hPa$).

Fonte: Produção do autor

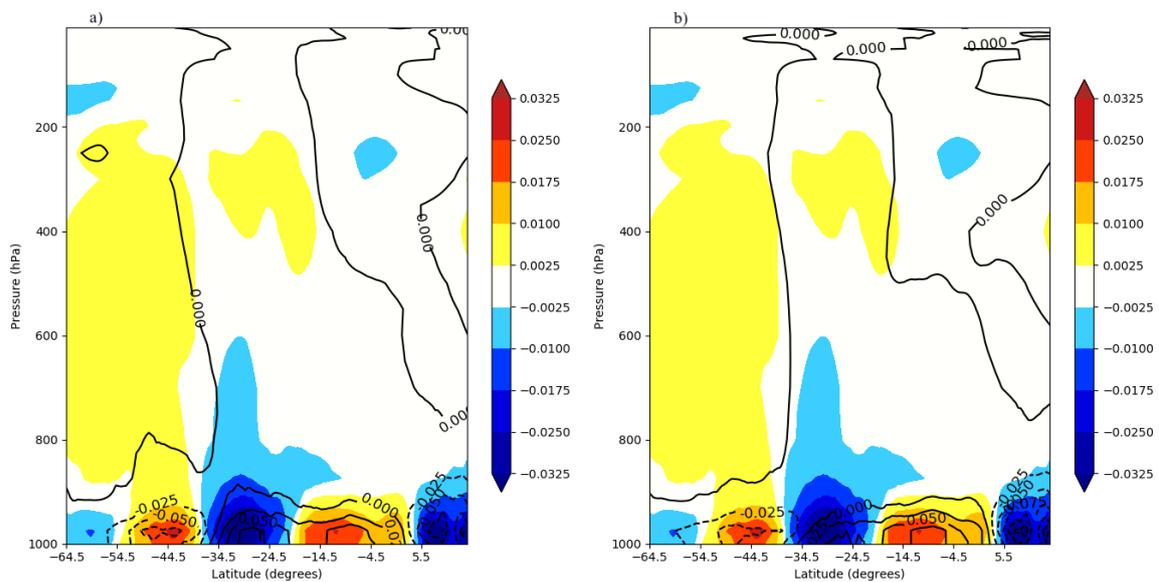
através dos movimentos verticais ascendentes (descendentes) do ar quente e (ar frio) via células de circulação direta de Hadley e indireta de Ferrel.

A Figura 4.13 mostra a estrutura 2-D do componente de taxa de fluxo de P_M [$B(P_M)$] sobre América do Sul (AS) e oceanos adjacentes durante os períodos de 1991-2005 e 2006-2018. Observa-se que, os centros de máximos e mínimos valores de $B(P_M)$ são encontrados na baixa troposfera em $10^\circ N$, $10^\circ S$, $28^\circ S$ e $45^\circ S$ nos dois períodos. Esses centros mostram as regiões onde a combinação simultânea da variação de temperatura e velocidade (vertical- ω e meridional) são maiores e, assim, maior troca de calor em larga escala entre o trópicos e o extratropicos. Esses resultados mostram também que durante os eventos de ZCAS os trópicos e subtropicos são uma fonte de energia. Enquanto que os sumidouros de energia (P_M) são encontrados $45^\circ S$ e $10^\circ N$ de latitude.

Os centros de valores máximos/mínimos de $B(P_M)$ em $10^\circ S$ e $45^\circ S$ apresentaram

valores superiores durante P2, enquanto que em 10°N e 28°S durante P1. E isso, representa mais ou menos fluxos de energia entrando/saindo sobre as regiões localizadas nessas latitudes, o que foi refletido sobre os eventos de ZCAS onde a saída (no diagrama do CEL) líquida de energia P_M a partir do fluxo foi 4.6 vezes maior durante P2 (Figura 4.4).

Figura 4.13 - Secção vertical latitude – pressão da taxa de fluxo de energia potencial média zonal, $B(P_M)$, para os dois períodos.



(a) P1 de 1991-2005 e (b) P2 de 2006-2018. Sombreado é a diferença entre os dois períodos (P1 - P2) e os contornos são $B(P_M)[P1]$ e $B(P_M)[P2]$. O intervalo de contorno é de 0,025. As unidades estão em $W/m^2/bar$ ($10^{-3}W/m^2/hPa$).

Fonte: Produção do autor

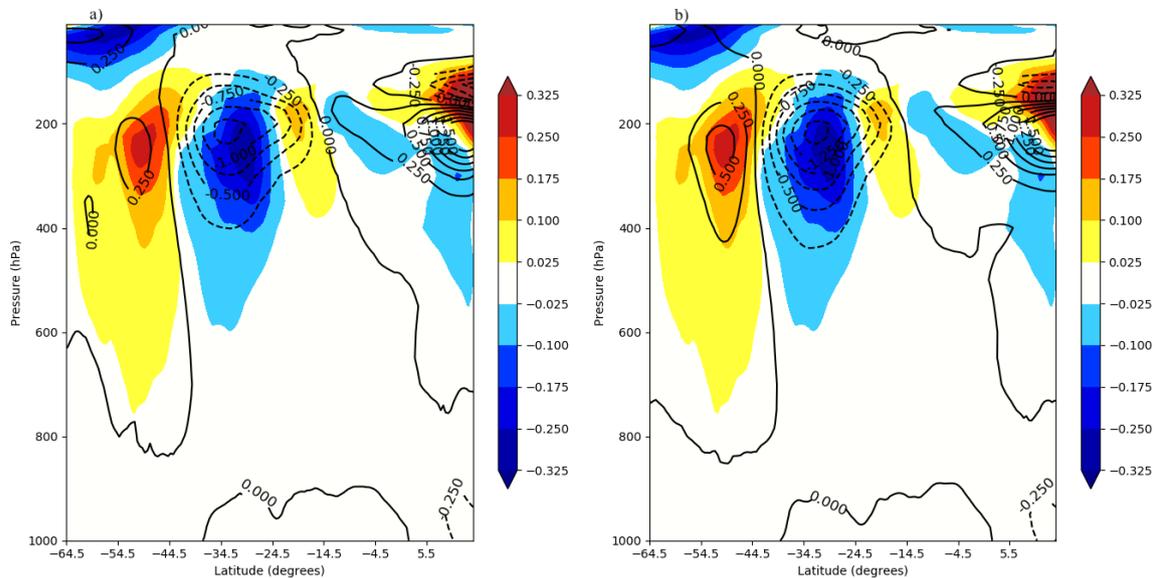
4.3.1.14 Estrutura vertical de $B(K_M)$

Assim como $B(P_M)$ (Subsubseção 4.3.1.13), ligados ao transporte de calor, $B(K_M)$ conecta o fluxo de energia em larga escala relacionando ao transporte de momento meridional pelas células de Hadley e Ferrel.

A Figura 4.14 apresenta a estrutura 2-D do componente de $B(K_M)$ sobre América do Sul (AS) e oceanos adjacentes para os períodos de 1991-2005 e 2006-2018. Os centros de máximos e mínimos de $B(K_M)$ são encontrados na alta troposfera (em

200 hPa) e na baixa estratosfera (em aproximadamente 100 hPa). Observa-se que na alta troposfera, $B(K_M)$ é mínimo (máximo) sobre as regiões dos ramos descendente (ascendente) da célula de Hadley em torno de 35°S (e 10°N) nos dois períodos. Centros de valores positivos de $B(K_M)$ também são encontrados sobre a região da célula de Ferrel (em 52°S aproximadamente), sendo que, com menor intensidade. A comparação entre os dois períodos mostram que, $B(K_M)$ favoreceu (valores mais negativos) à uma maior intensidade nos fluxos dos jatos subtropicais durante P2.

Figura 4.14 - Secção vertical latitude – pressão da taxa de fluxo da energia cinética média zonal, $B(K_M)$, para os dois períodos.



(a) P1 de 1991-2005 e (b) P2 de 2006-2018. Sombreado é a diferença entre os dois períodos ($P1 - P2$) e os contornos são $B(K_M)[P1]$ e $B(K_M)[P2]$. O intervalo de contorno é de 0,025. As unidades estão em $\text{W}/\text{m}^2/\text{bar}$ ($10^{-3}\text{W}/\text{m}^2/\text{hPa}$).

Fonte: Produção do autor

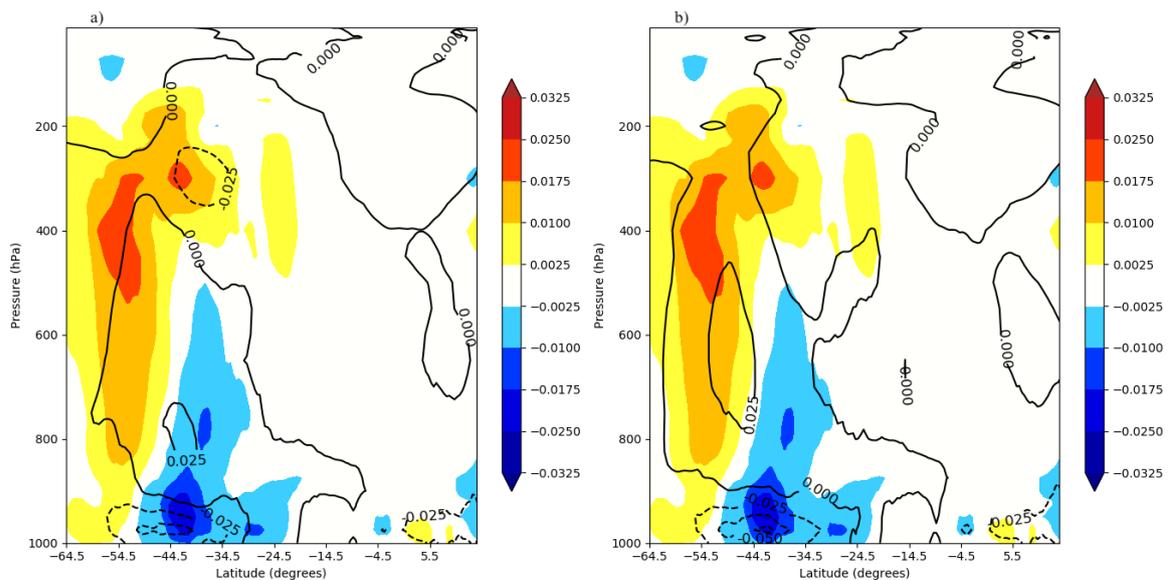
4.3.1.15 Estrutura vertical de $B(P_E)$

A taxa de fluxos de energia potencial da perturbação $B(P_E)$ está associado ao transporte de fluxo de calor proporcionados pelos turbilhões na direção meridional.

A estrutura vertical (2-D) pressão-latitude de $B(P_E)$ sobre América do Sul (AS, e oceanos adjacentes) para os dois períodos é visto na Figura 4.15. Esta figura apresenta uma estrutura similar a estrutura de P_E com regiões de valores positivo

ligeiramente inclinado para o sul. Centros de valores negativos são observados em superfície perto de 44°S e 10°N. Esses resultados mostram as regiões de geração (fonte) e dissipação (sumidouros) de P_E devido ao fluxo meridional de calor liberados pelos vórtices turbulentos sobre a região equatorial (ligados à ZCIT) e aos anticiclones e ciclones nas latitudes mais ao sul da AS. Comparativamente, o centro de valor positivo de P1 é encontrado em 800 hPa em 44°S, ao passo que em P2 em 600 hPa e ligeiramente deslocado ao sul. Além disso, os centro de valores negativos apresenta valores absoluto maior em P2, o que quer dizer mais fluxo de energia turbulenta sobre essas regiões (de $B(P_E) < 0$ durante P2). Estrutura 3-D de $B(P_E)$ mostra bem esses efeitos, onde a região das ZCAS é destacada como uma ampla região de sumidouro [$B(P_E) < 0$] de P_E (como veremos mais adiante na Subsubseção 4.3.2.12).

Figura 4.15 - Secção vertical latitude – pressão da taxa de fluxo da energia potencial dos distúrbios, $B(P_E)$, para os dois períodos.



(a) P1 de 1991-2005 e (b) P2 de 2006-2018. Sombreado é a diferença entre os dois períodos ($P1 - P2$) e os contornos são $B(P_E)[P1]$ e $B(P_E)[P2]$. O intervalo de contorno é de 0,025. As unidades estão em $W/m^2/bar$ ($10^{-3}W/m^2/hPa$).

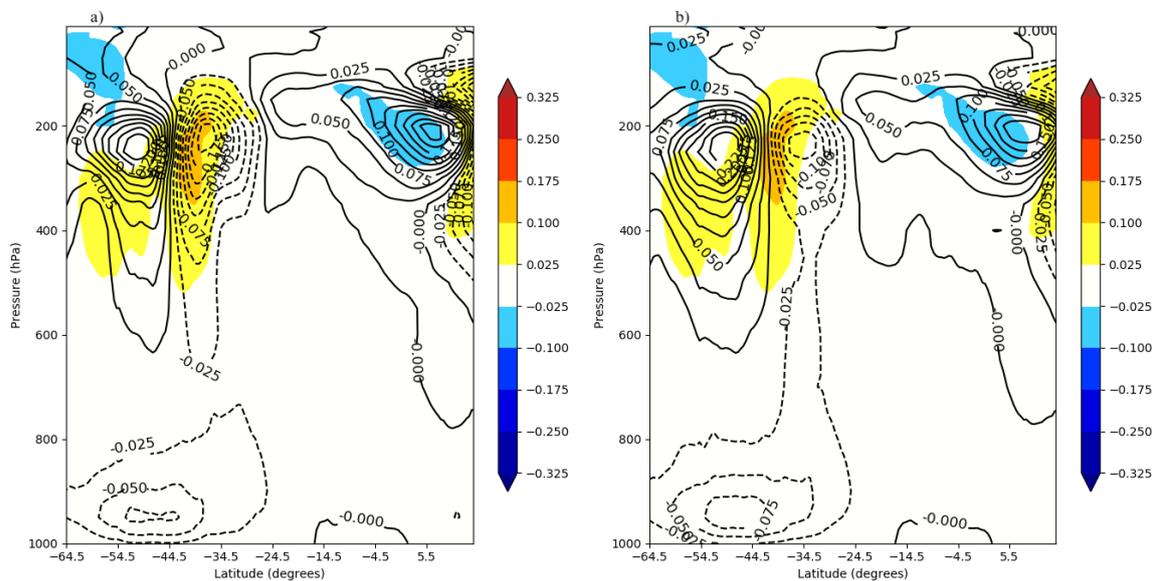
Fonte: Produção do autor

4.3.1.16 Estrutura vertical de $B(K_E)$

O componente de taxa de fluxo de energia $B(K_E)$, representa a taxa de energia cinética adicionada ou retirada através do transporte meridional e vertical de momento turbulento entre o equador e os extratropicos, superfície e altos níveis da atmosfera por meio de vórtices de variações rápida (como é o caso de vórtices transientes em médias latitudes).

A estrutura 2-D pressão-latitude de $B(K_E)$ para os eventos de ZCAS ocorridos durante os dois períodos analisados (1991-2005 e 2006-2018) são apresentadas na Figura 4.16. Assim como observado em $B(K_M)$, a estrutura vertical de $B(K_E)$ para os dois períodos analisados, apresentam centros de máximos e mínimos valores em altos níveis da atmosfera na região dos jatos troposféricos e sobre equador, além do centro em superfície em 50°S (Figura 4.16). Nota-se que poucas diferenças foram observadas de um período para outro, exceto em 40°S onde P2 foi ligeiramente maior.

Figura 4.16 - Secção vertical latitude – pressão da taxa de fluxo energia cinética média zonal, $B(K_E)$, para os dois períodos.



(a) P1 de 1991-2005 e (b) P2 de 2006-2018. Sombreado é a diferença entre os dois períodos ($P1 - P2$) e os contornos são $B(K_E)[P1]$ e $B(K_E)[P2]$. O intervalo de contorno é de 0,025. As unidades estão em $\text{W}/\text{m}^2/\text{bar}$ ($10^{-3}\text{W}/\text{m}^2/\text{hPa}$).

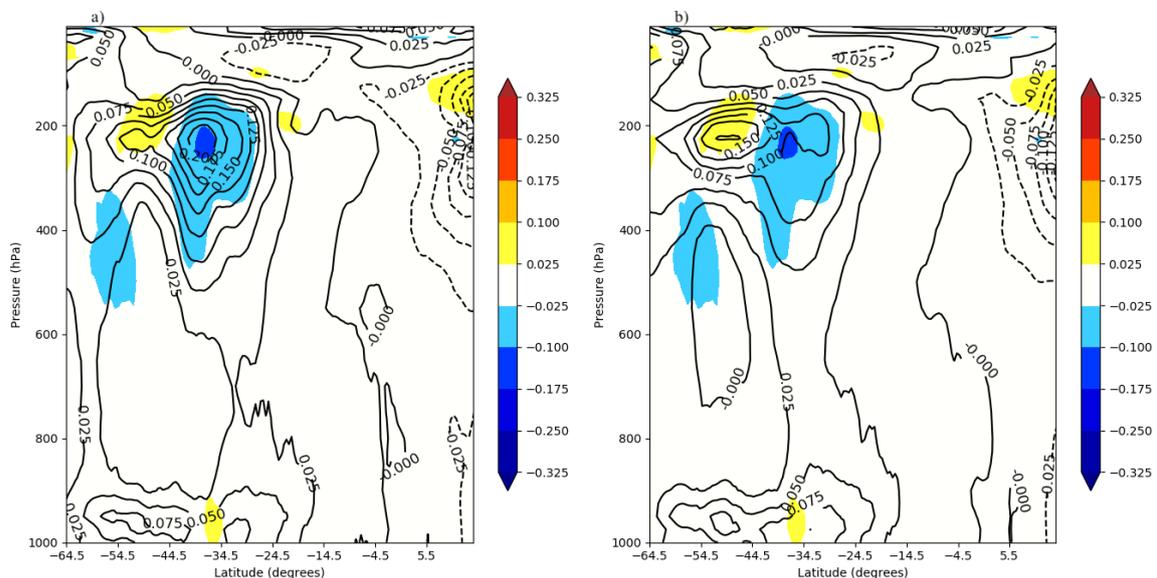
Fonte: Produção do autor

4.3.1.17 Estrutura vertical de B(E)

B(E) mostra a força de pressão exercida sobre as paredes de contornos inferiores, superiores e laterais (norte-sul e leste-oeste) devido à variação do transporte de massa (geopotencial) na direção meridional e vertical. B(E) avalia quanto a pressão exercida sobre os contornos pode impulsionar/influenciar (aumentar/diminuir) a conversão de P_E para K_E e assim, na produção de energia cinética da perturbação.

A Figura 4.17 mostra a estrutura vertical de B(E) sobre AS e oceanos adjacentes para os períodos de 1991-2005 e 2006-2018. B(E) é positivo nas regiões dos jatos troposféricos (em 200 hPa) e em superfície (entre 24 e 60°S). É negativo ao norte de 5°N (lembrando que a área de estudo abrange apenas 15°N). Isso mostra as regiões de maior/menor produção ou destruição de K_E através do fluxo de massa na direção norte-sul. Observa-se poucas diferenças entre os dois períodos, exceto pela maior influência na conversão durante o primeiro período na região dos jatos na troposfera superior em 40°S.

Figura 4.17 - Secção vertical latitude – pressão da taxa de força de pressão turbulenta, B(E), para os dois períodos.



(a) P1 de 1991-2005 e (b) P2 de 2006-2018. Sombreado é a diferença entre os dois períodos ($P1 - P2$) e os contornos são $B(E)[P1]$ e $B(E)[P2]$. O intervalo de contorno é de 0,025. As unidades estão em $W/m^2/bar$ ($10^{-3}W/m^2/hPa$).

Fonte: Produção do autor

Nas subsecções a seguir, apresentamos as principais diferenças dos componentes da energética de Lorenz durante os eventos de ZCAS nos padrões Norte (PN), Centro (PC) e padrão Sul (PS). Os principais aspectos responsáveis por essas diferenças, e como isso pode servir para a compreensão dos episódios de ZCAS observados em cada padrão.

4.3.2 Análise energética das ZCAS PC, PN e PS

O objetivo desta seção é discutir as principais diferenças entre os padrões de localizações dos eventos de ZCAS, que podem ser importantes para o entendimento das ZCAS em cada padrão.

Nos diagramas do CEL, os valores em vermelho (azul) representam os valores de PN (PS) e em preto para PC. Estes valores são destacados nos texto para evidenciar facilmente as diferenças entre os padrões.

4.3.2.1 Esquema do Ciclo de Energia de Lorenz (CEL) das ZCAS ocorridos entre 1991-2018, para os Padrões Sul - PS, Norte - PN e Central - PC

A Figura 4.18 mostra o esquema do CEL, que descreve o comportamento atmosférico na região das ZCAS entre 1991 a 2018 para os diferentes padrões. Observa-se que durante os eventos de PC, P_M é gerada a uma taxa de $36,73 W/m^2$, $48,38 W/m^2$ para PN e $30,48 W/m^2$ em eventos de PS. Isso reflete uma correlação/covariância positiva entre a variação hemisférica da taxa de calor e da temperatura. Por sua vez, P_M é convertido em P_E pelos processos baroclínicos a uma taxa de $10,32 W/m^2$ durante PC, $11,48 W/m^2$ durante PN e $6,40 W/m^2$ para os eventos de PS. E devido à uma correlação/covariância negativa entre a variação da taxa do calor e temperatura, P_E foi gerado a taxas negativa [$G(P_E) < 0$, isso é, $-6,38 W/m^2$, $-7,08 W/m^2$ e $-2,52 W/m^2$ para PC, PN e PS respectivamente], o que pode representar um desfavorecimento proporcionado pelo resfriamento através das nuvens.

As taxas de conversões são positivas em todos os componentes, exceto que K_M cede energia para K_E [$C(K_E, K_M) < 0$] em evento de PN, devido aos processos associados à instabilidade barotrópica. Uma análise mais detalhada a partir das subáreas de atuação, revelou que nas ZCAS, a instabilidade barotrópica (ver apêndice na Seção A.1 sobre instabilidade) domina nas áreas continentais (subáreas 1 e 2) e na subárea oceânica mais ao sul (subárea 5), e que, durante PN a instabilidade barotrópica na subárea 5 é até 3,25 vezes mais intensa que em PC (ver valores na Tabela C.4),

mostrando que os fortes ventos de oeste associados aos jatos subtropicais na célula de circulação de Hadley transferem mais energia para a perturbação em eventos de PN e ainda, que essa transferência de energia é responsável pela manutenção da instabilidade na região sul de atuação das ZCAS durante PN e PC.

No geral, a energia (P_M , P_E , K_M e K_E) é maior durante o PN e menor durante PS, que significa uma maior variação horizontal de temperatura e jatos mais intensos durante eventos de PN.

Na média, as taxas de fluxos e de forças de pressão, são positivas (negativas) para os componentes de energia da perturbação (estado básico, ou médias zonais), mostrando as ZCAS como sumidouro de energia e com alta produção de energia cinética da perturbação (principalmente durante PN). Contudo, as análises detalhadas desses componentes baseadas nas subáreas (Tabela C.4) revelaram que: 1 - os componentes de fluxos de energia potencial [$B(P_M)$ e $B(P_E)$], tendem a ser positivos nas áreas oceânicas (áreas 4 e 5) e negativos nas áreas continentais e costeiras (áreas 1, 2 e 3) em todos os padrões, exceto em PN onde valores negativos foram obtidos na subárea 4 nos dois componentes de fluxos e positivo na subárea 3 para $B(P_E)$.

Nos componentes de fluxos para as energias cinéticas [$B(K_M)$ e $B(K_E)$] o inverso é observado, ou seja, positivos nas áreas continentais e costeiras, e negativas nas áreas oceânicas. 2 - Nos componentes de força de pressão, $B(M)$ apresentou resultados semelhantes aos componentes de fluxos de energia potencial, isto é, negativos nos trópicos e positivos nas áreas mais ao sul; Já $B(E)$, é positivo em toda extensão de atuação das ZCAS, com maiores valores nas subáreas 2, 4 e 5, mostrando que:

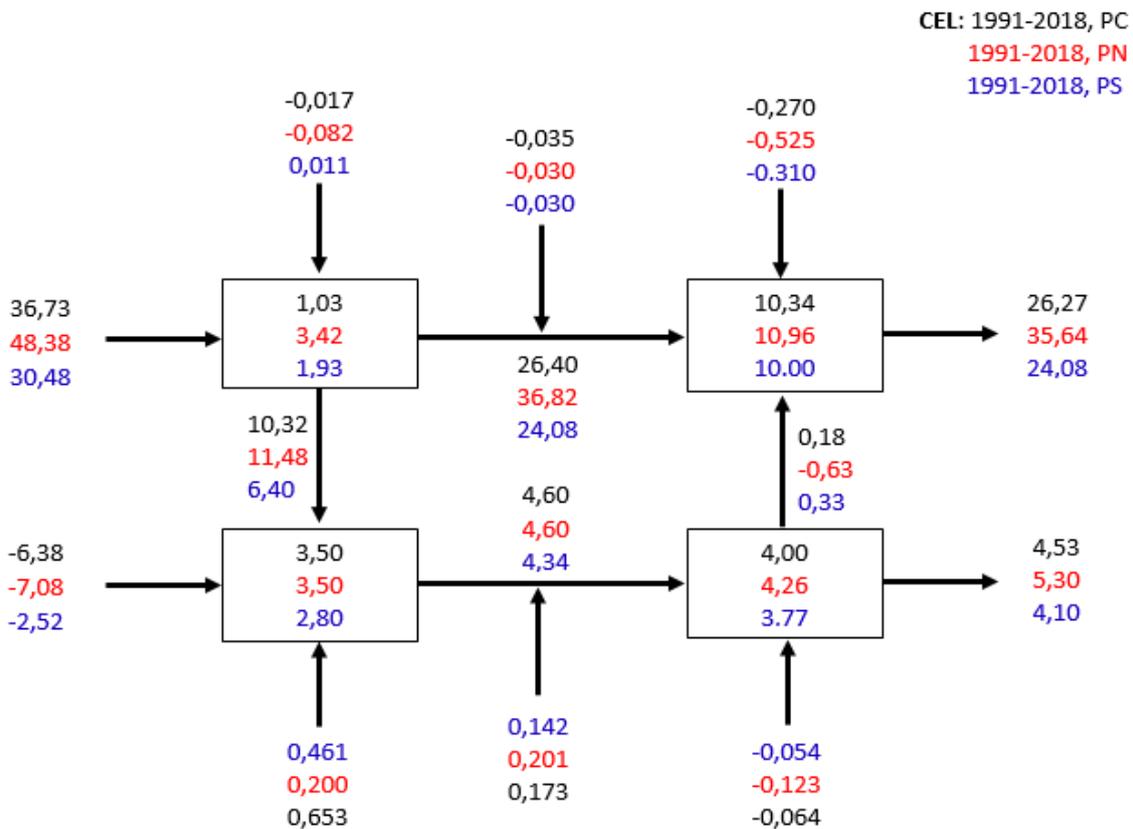
a) as ZCAS são categorizadas por regiões fonte e sumidouros de fluxos de energia; b) que a produção de energia cinética do estado básico é favorecida em sua extensão mais ao sul e desfavorecida nos trópicos; c) a energia cinética dos distúrbios é produzida em toda extensão de atuação das ZCAS, devido às variações temporais nos fluxos de massa nas subáreas 2, 4 e 5, onde esses fluxos são maiores (mais intenso), consistente com o transporte de umidade nas ZCAS (HERDIES et al., 2002). Essas alternâncias de regiões de maiores e menores fluxos de massa, é importante para a manutenção das ZCAS através da convergência de fluxo de calor, momento e massa (ver exemplo Figura 4.33 e Figura 4.36).

No geral, a energética calculada para PN foi superior em relação a PC e PS. O diagrama mostra que nos componentes de energia, PN foi 20,45% superior em relação à PC e 21% em relação à PS, enquanto nos componentes de conversões de energia,

com exceção $C(K_E, K_M)$ onde a direção oposta foi observado, essas diferenças são de 12,84% e 28,12% para PC e PS respectivamente. Para os componentes de fluxo de energia [$B(P_M)$, $B(P_E)$, $B(K_M)$ e $B(K_E)$], PN foi 58,59% e 48,78% maior que PC e PS, lembrando que os componentes de direção oposta não foram considerados.

Nos componentes de força de pressão, destaca-se o componente da perturbação $B(E)$ onde PN foi 14 e 29,23% superior que PC e PN, isso mostra a grande contribuição de $B(E)$ na produção de K_E sobre a região das ZCAS durante PN.

Figura 4.18 - Diagrama do CEL para os episódios ocorridos entre 1991-2018 nos Padrões.



Central - PC (em preto), Norte - PN (vermelho) e Sul (em azul) - PS. Unidades estão em $10^5 Jm^{-2}$ para as energias e Wm^{-2} para as taxas de conversões, geração, fluxos, força de pressão e dissipação.

Fonte: Produção do autor.

4.3.2.2 Estrutura vertical de P_M para PN, PC e PS

A Figura 4.19 mostra a estrutura 2-D de P_M para os eventos de ZCAS ocorridos entre 1991-2018 nos Padrões Norte (PN), Central (PC) e Sul (PS). Assim como já visto anteriormente (Subsubseção 4.3.1.3), P_M é máximo em baixos níveis da troposfera nas altas latitudes (acima de 55°S) em todos os padrões. Nos trópicos, máximos valores de P_M são encontrados em superfície. O núcleo encontrado entre 350 a 400 hPa nos trópicos estão associados à convecção tropical.

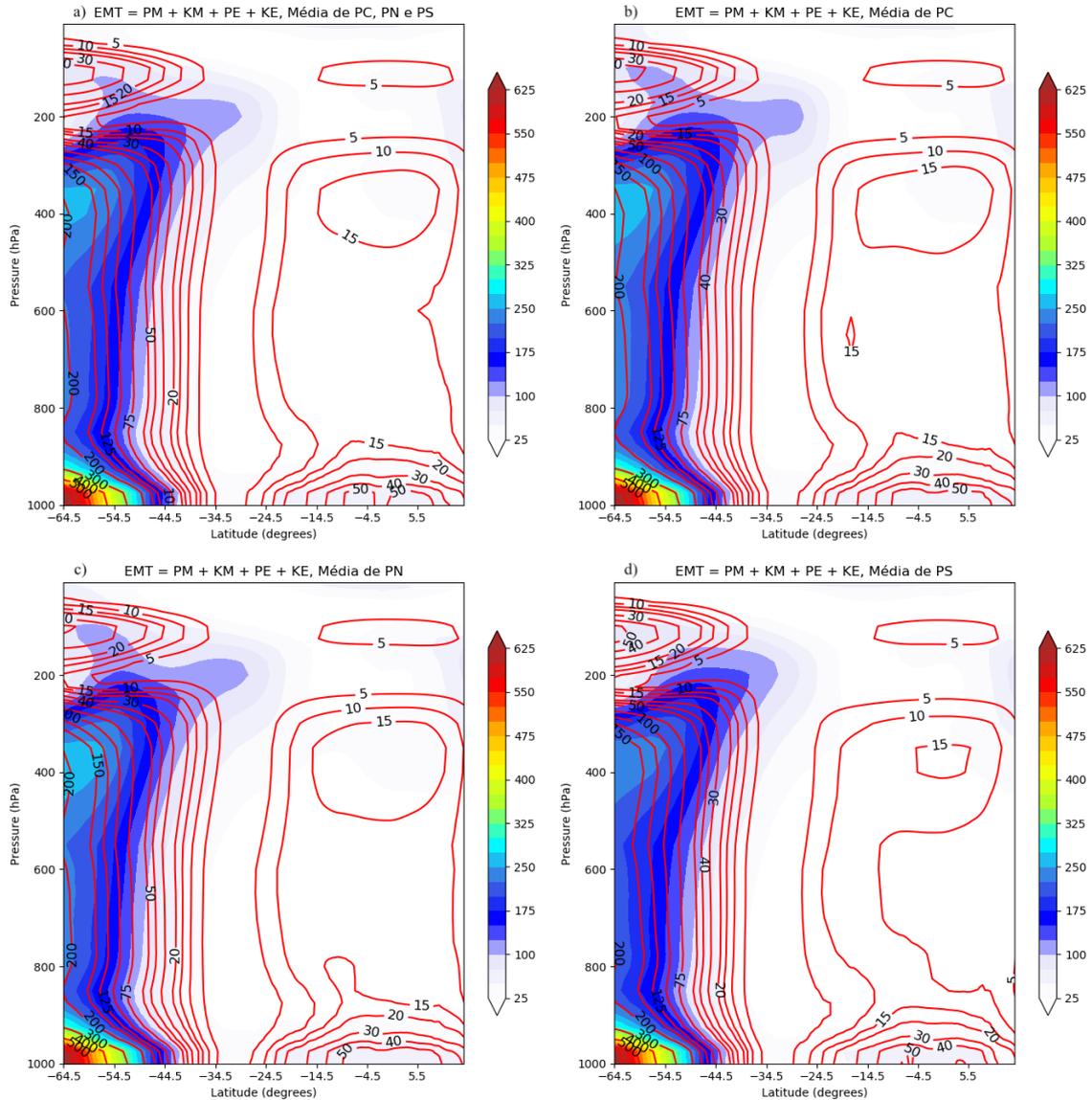
Observa-se que, os centros de máximos valores de P_M entre 300 a 450 hPa (contornos de valores acima de $15 \cdot 10^5 J/m^2/bar$) e em superfície nos trópicos (contornos de $50 \cdot 10^5 J/m^2/bar$), são maiores (e em uma vasta área) em eventos de PN se comparados com PS. Isso se deve a uma maior variação meridional de temperatura em eventos de PN do que em PS. Essas diferenças, podem ser causadas pela existência de uma vasta área coberta por nuvens convectivas mais intensa em eventos de PS do que em PN (como visto na Figura 4.3). Neste caso, em eventos de PN como as nuvens convectivas são mais restritas às regiões próximas ao equador e com uma inclinação mais zonal, o gradiente térmico entre trópicos-extratrópicos tende a ser maior. Além disso, a virada convectiva em altos níveis e a forte liberação de calor latente (que é máximo em médios níveis, ver por exemplo a Figura C.4 e os trabalhos Dopplick (1972) e Yanai et al. (1973)) nas ZCAS, podem justificar as grandes diferenças observadas nas estruturas de P_M nos trópicos para os eventos de PN e PS.

4.3.2.3 Estrutura vertical de K_M para PN, PC e PS

Nas estruturas 2-D de K_M são destacados os padrões de influência dos jatos troposféricos e estratosféricos durante os eventos de ZCAS ocorridos entre 1991-2018 para cada padrão de localização (Figura 4.20). Os máximos de K_M são observados nas latitudes médias nas regiões dos jatos troposféricos em 250 hPa. Grandes contribuições de K_M também são observados na alta troposfera nos trópicos e na média e baixa estratosfera.

Observa-se que, os centros de máximos valores de K_M em torno de 52°S são maiores durante PS e menores durante PN, evidenciando claramente que durante PS os jatos subtropicais e dos jatos de latitudes médias tendem a ser acoplados e separados durante os eventos de PC e PN. Além disso, os altos valores de K_M associado ao jato subtropical é ligeiramente deslocado para o norte durante os eventos de PN, o que significa uma maior influência deste nas regiões das ZCAS durante PN.

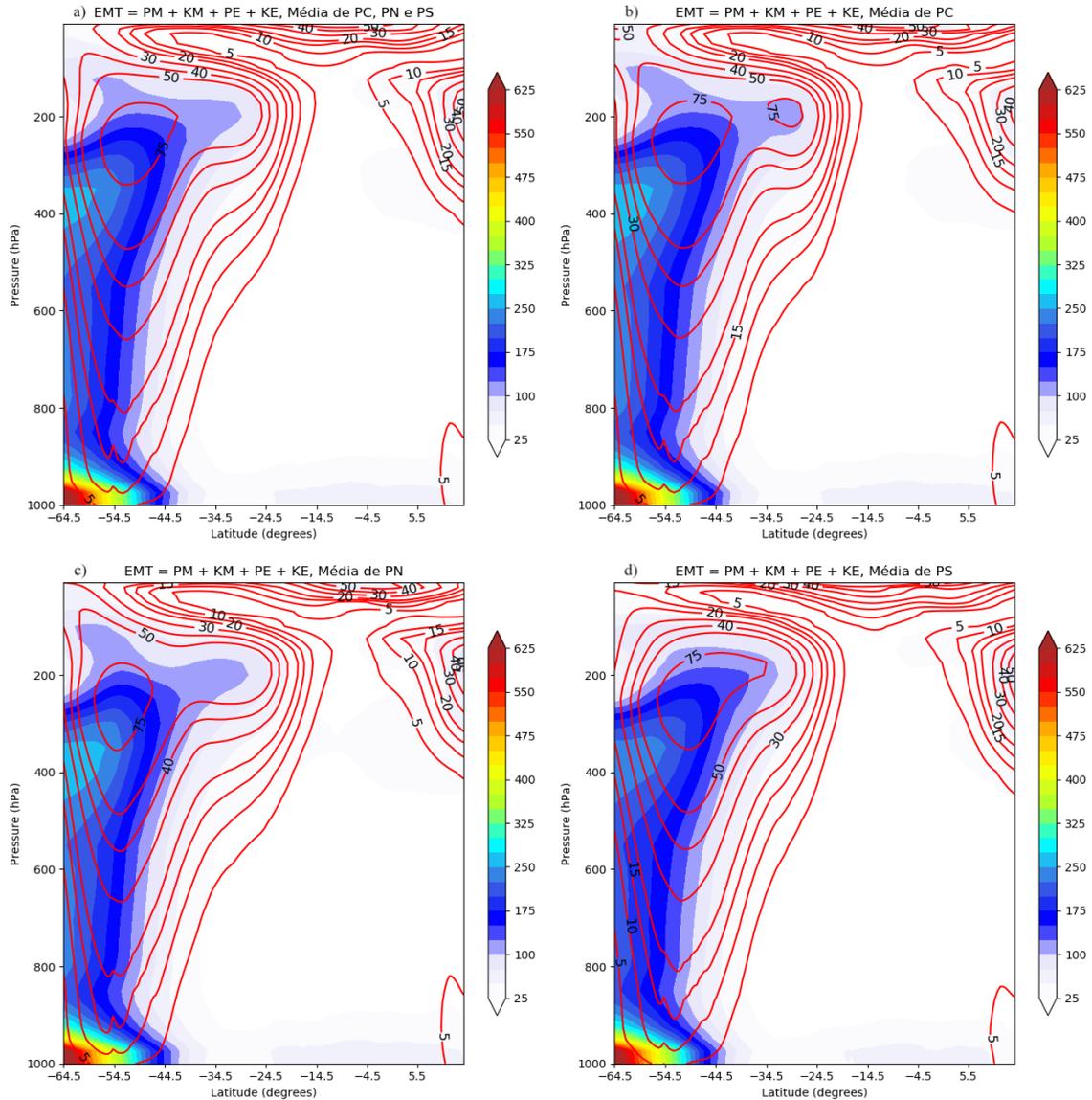
Figura 4.19 - Seções vertical latitude – pressão da energia potencial disponível média zonal, P_M , média dos eventos ocorridos entre 1991-2018.



(a) Média dos 3 padrões de ZCAS, (b) média dos PC, (c) média dos PN, e (d) dos PS. Os contornos e os sombreados (shaded) indicam as quantidades de energia, P_M e Energia Mecânica Total, EMT, respectivamente. O intervalo de contorno é 10 até 50 e 25 depois. As unidades estão em $10^5 J/m^2/bar$ ou $10^2 J/m^2/hPa$.

Fonte: Produção do autor.

Figura 4.20 - Secções vertical latitude – pressão da energia cinética média zonal, K_M , média dos eventos ocorridos entre 1991-2018.



(a) Média dos 3 padrões de ZCAS, (b) média dos PC, (c) média dos PN, e (d) dos PS. Os contornos e os sombreados (shaded) indicam as quantidades de energia, K_M e Energia Mecânica Total, EMT. O intervalo de contorno é 10 até 50 e 25 depois. As unidades estão em $10^5 J/m^2/bar$ ou $10^2 J/m^2/hPa$.

Fonte: Produção do autor.

4.3.2.4 Estrutura vertical de P_E para PN, PC e PS

A Figura 4.21 mostra as estruturas verticais de P_E durante os eventos de ZCAS nos 28 anos (1991 e 2018) para os PN, PC e PS. P_E é máximo na superfície em

torno de 24.5°S e 38°S em todos os padrões. Os contornos de regiões com grandes contribuições P_E são levemente inclinados para o sul, mostrando que na coluna vertical P_E aumenta para o sul devido às maiores variações temporais e zonais de temperatura causados pelos ciclones extratropicais. Poucas diferenças podem ser observadas entre os diferentes padrões, com exceção que a estrutura de P_E é mais deslocado para sul durante PS, e que os contornos de $10 \cdot 10^5 J/m^2/hPa$ estão concentrados na baixa troposfera.

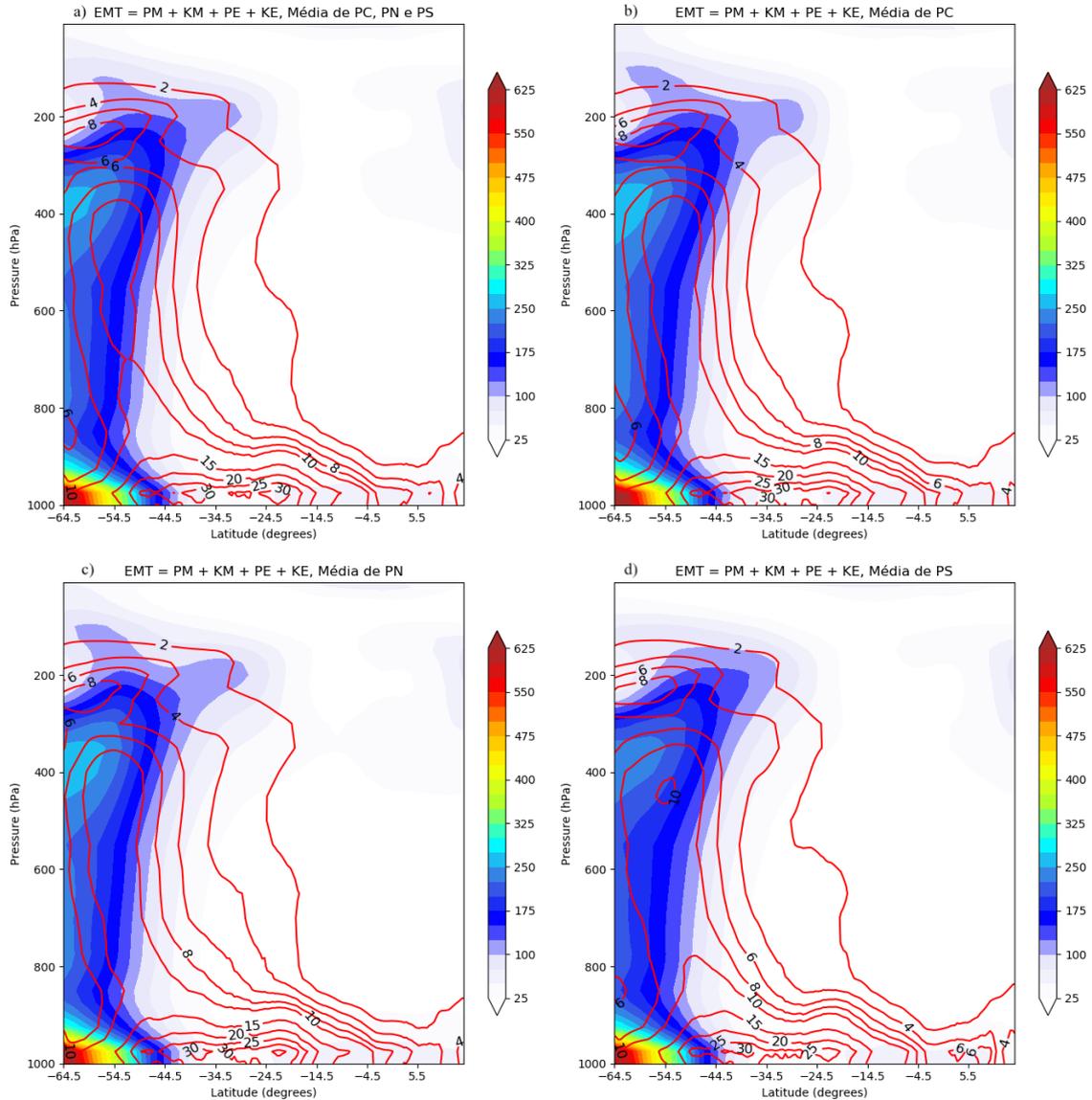
Os padrões de maior contraste térmico (temporal e zonal) Terra-Mar durante os eventos de ZCAS para cada padrão nos 28 anos analisados podem ser vistos na estrutura 3-D pressão, latitude e longitude de P_E (Figura 4.22). Os máximos de P_E sobre AS estão sobre a Argentina perto dos Andes. Grandes contribuições de P_E também são encontrados nos oceanos Pacífico e Atlântico sul. Os máximos sobre Argentina estão relacionados com o transporte das massas de ar de oeste que ao cruzarem os Andes, são levantadas e afundadas, causando um forte gradiente térmico zonal devido ao processo de aquecimento/resfriamento súbito do ar subsidente/ascendente. Uma possível má representação da temperatura na reanálise sobre os Andes não são descartadas. Contribuições consideráveis de P_E sobre o Brasil são observados em partes da região sul. Algumas diferenças entre os padrões de localização podem ser observadas nas intensidades, com PC e PN mais intenso que PS.

4.3.2.5 Estrutura vertical de K_E para PN, PC e PS

As estruturas 2-D e 3-D do estado médio de K_E para AS durante os eventos de ZCAS ocorridos entre 1991-2018 são apresentadas nas Figura 4.23 e Figura 4.24. Observa-se nas estruturas verticais de K_E , que os máximos de K_E estão em 55°S (na célula de Ferrel, em 300 hPa), e sobre os trópicos ao norte de 5°S (em 200 hPa) tal como nos padrões de K_M , mas os centros em K_E são levemente deslocados para o sul. No geral, os padrões de K_E são semelhantes em todos os padrões de localização das ZCAS, exceto que os máximos são maiores em PN do que em PS.

Na distribuição espacial da estrutura 3-D (Figura 4.24) de K_E , observam-se detalhes da estrutura vertical. Os centros de máximos K_E estão ao sul sobre os oceanos, nas regiões de frequentes passagens de tempestades extratropicais ou trilhos de tempestades como também são conhecidas (TRENBERTH, 1991; HOSKINS; HODGES, 2005; WOOLLINGS, 2010; GRAFF; LACASCE, 2012). As posições de localização dos ventos que transportam umidade (HERDIES et al., 2002), calor e momento nas ZCAS em cada padrão também podem ser observados. Nota-se que durante PN a contribuição nas regiões de atuação das ZCAS é maior, significando mais levantamento

Figura 4.21 - Secções vertical latitude – pressão da energia potencial da perturbação, P_E , média dos eventos ocorridos entre 1991-2018.

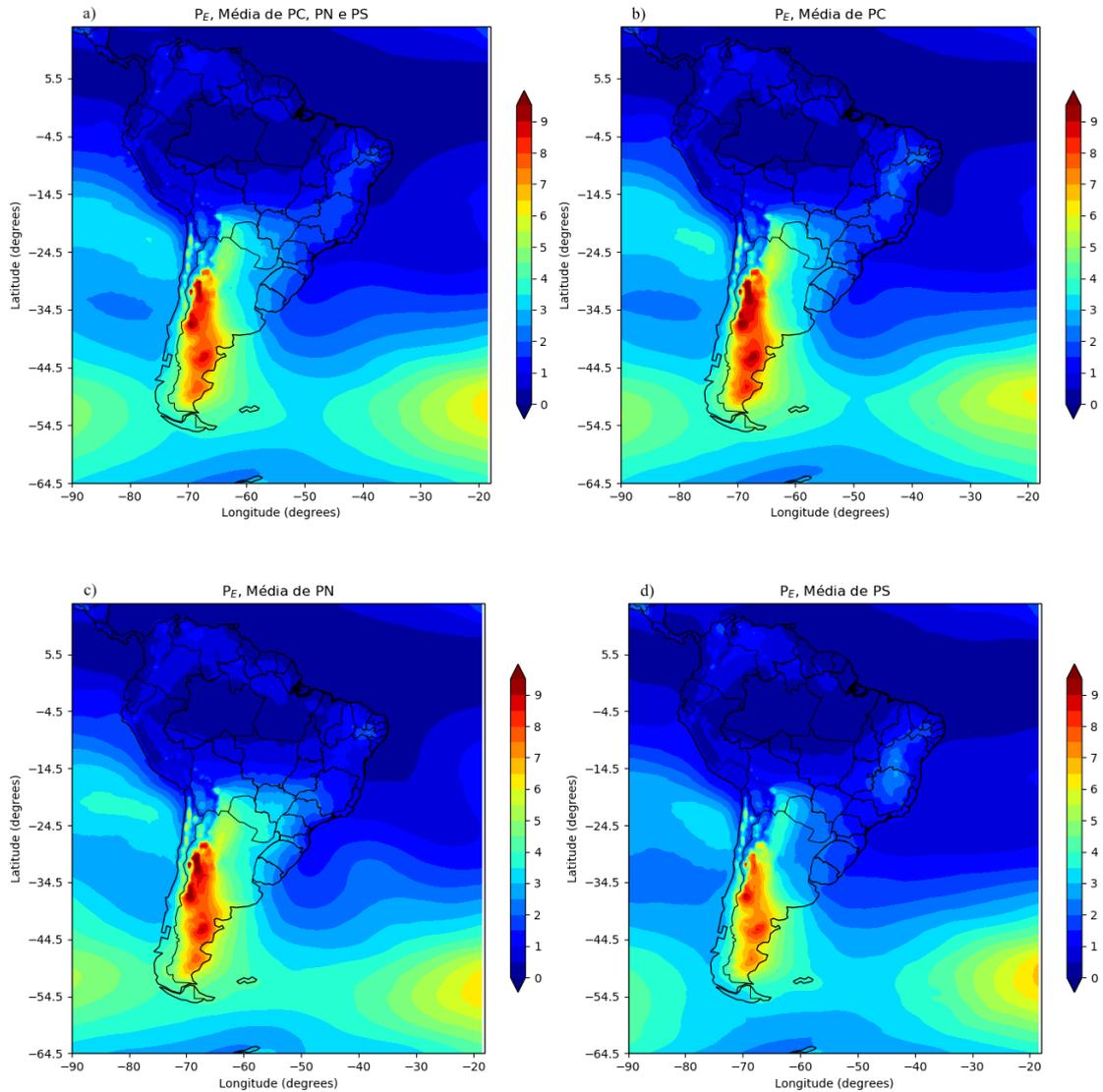


(a) Média dos 3 padrões de ZCAS, (b) média dos PC, (c) média dos PN, e (d) dos PS. Os contornos e os sombreados (shaded) indicam as quantidades de energia, P_E e Energia Mecânica Total, EMT. O intervalo de contorno é 2 até 10 e depois 5. As unidades estão em $10^5 J/m^2/bar$ ou $10^2 J/m^2/hPa$.

Fonte: Produção do autor.

proporcionados pelos jatos turbulentos durante PN.

Figura 4.22 - Distribuição espacial, latitude-longitude da energia potencial disponível da perturbação P_E , média dos eventos de ZCAS ocorridos entre 1991-2018.



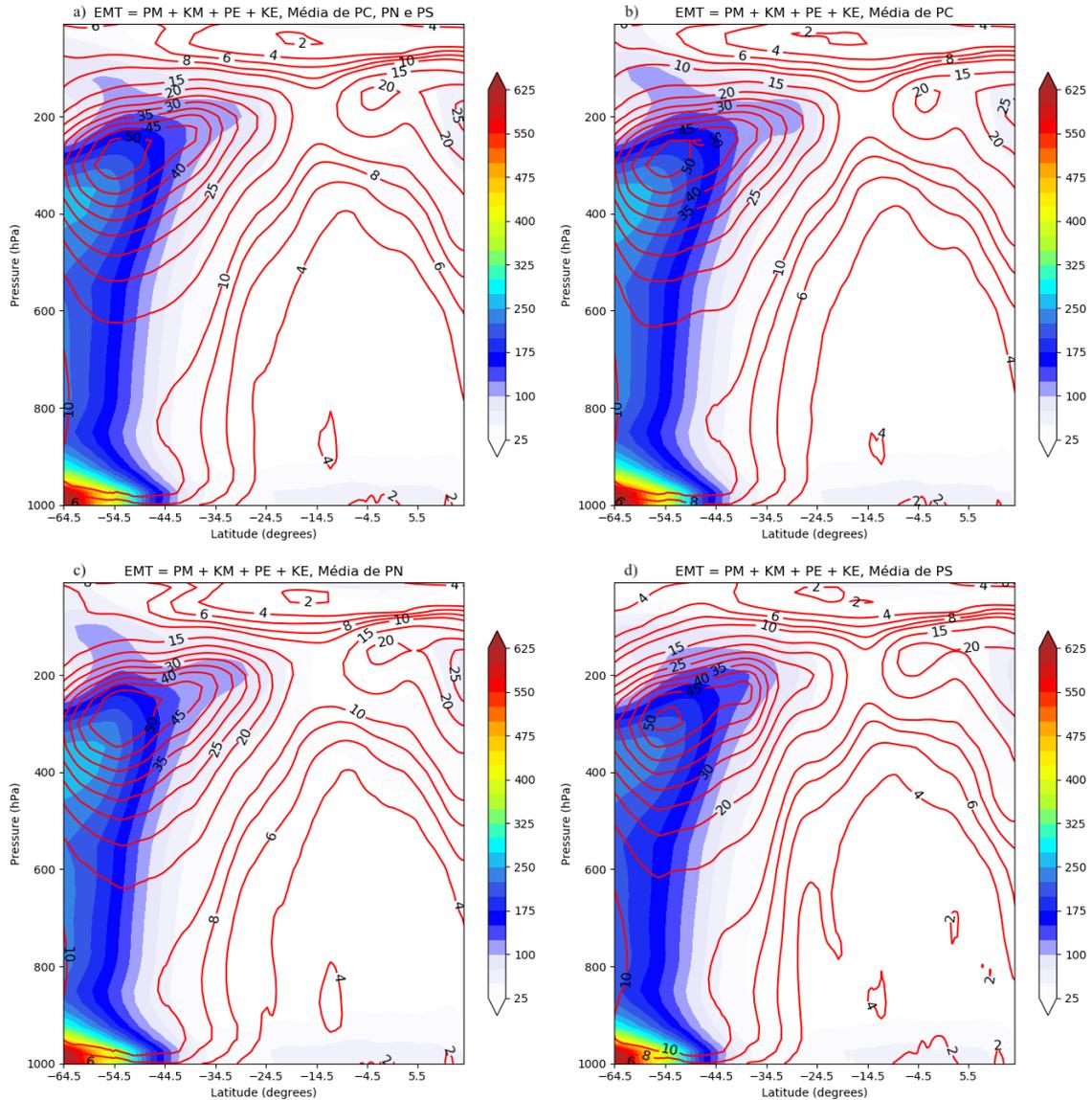
(a) Média dos 3 padrões de ZCAS, (b) média de PC, (c) média de PN e (d) média de PS. P_E representa uma estrutura tridimensional (latitude-pressão-longitude). As unidades estão em $10^5 J/m^2$.

Fonte: Produção do autor.

4.3.2.6 Estrutura vertical de $C(P_M, P_E)$ para PN, PC e PS

A taxa conversão de energia potencial disponível media zonal para energia potencial da perturbação $C(P_M, P_E)$ representa a troca de calor entre duas escalas diferen-

Figura 4.23 - Secções vertical latitude – pressão da energia cinética da perturbação, K_E , média dos eventos ocorridos entre 1991-2018.

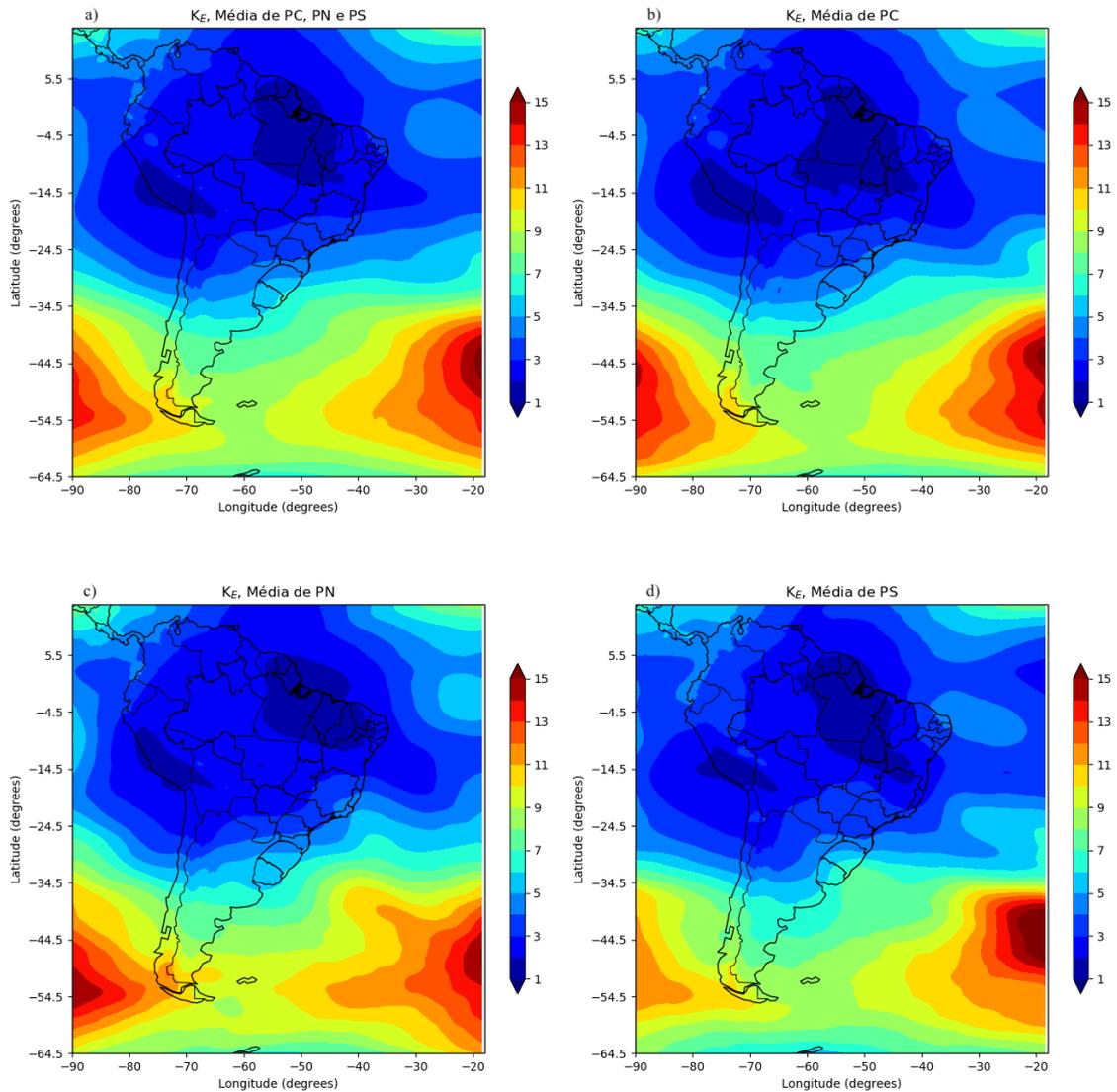


(a) Média dos 3 padrões de ZCAS, (b) média dos PC, (c) média dos PN, e (d) dos PS. Os contornos e os sombreados (shaded) indicam as quantidades de energia, K_E e Energia Mecânica Total, EMT. O intervalo de contorno é 2 até 10 e depois 5. As unidades estão em $10^5 J/m^2/bar$ ou $10^2 J/m^2/hPa$.

Fonte: Produção do autor.

tes através do transporte méridional e vertical de temperatura. $C(P_M, P_E)$ mostra os processos baroclínicos associados às atividades dos ciclones em altas e baixas

Figura 4.24 - Distribuição espacial, latitude-longitude da energia cinética dos distúrbios, K_E , média dos eventos de ZCAS ocorridos entre 1991-2018.



(a) Média dos 3 padrões de ZCAS, (b) média de PC, (c) média de PN e (d) média de PS. K_E representa uma estrutura tridimensional (latitude-pressão-longitude). As unidades estão em $10^5 J/m^2$.

Fonte: Produção do autor.

latitudes.

As estruturas verticais pressão-latitude $C(P_M, P_E)$ em eventos de ZCAS nos três padrões durante os 28 anos são apresentadas na Figura 4.25. Observa-se que os

padrões de $C(P_M, P_E)$ é semelhante em todos os padrões de localizações analisados, com máximos nos extratropicais (nas latitudes médias entre 35 e 65°S) e mínimos nos trópicos em torno de 4,5°S em baixos níveis da atmosfera. Centros de mínimos também são encontrados em 200 hPa em torno de 55°S. Contudo, os mínimos nos trópicos (em torno de 4,5°S, na ZCIT) na baixa troposfera são ligeiramente mais fortes durante PC e PN, significando que, a instabilidade baroclínica nos trópicos é mais intenso durante os eventos ligados a esses padrões.

4.3.2.7 Estrutura vertical de $C(P_E, K_E)$ para PN, PC e PS

Os padrões de taxa de conversão de energia em pequena escala $C(P_E, K_E)$ em eventos de ZCAS durante os 28 verões estendidos analisados são apresentados nas [Figura 4.26](#) e [Figura 4.27](#). Valores positivos (negativos) de $C(P_E, K_E)$ mostram regiões onde a trocas de energia segue o sentido de P_E para K_E , ou seja, $C(P_E, K_E) > 0$ e o oposto de K_E para P_E significa $C(P_E, K_E) < 0$.

Nas estruturas verticais pressão-latidade ([Figura 4.26](#)) observam-se que $C(P_E, K_E)$ é máximo em baixos níveis da troposfera nos extratropicais (acima de 45°S) e mínimos em 200 hPa em torno de 35°S. Os máximos são mais fortes durante PC e PN. Por outro lado, os centros de mínimos são mais fracos durante PC e, mais fortes durante PN. Representando as regiões onde as trocas de calor proporcionados pelos vórtices de pequena escala são maiores.

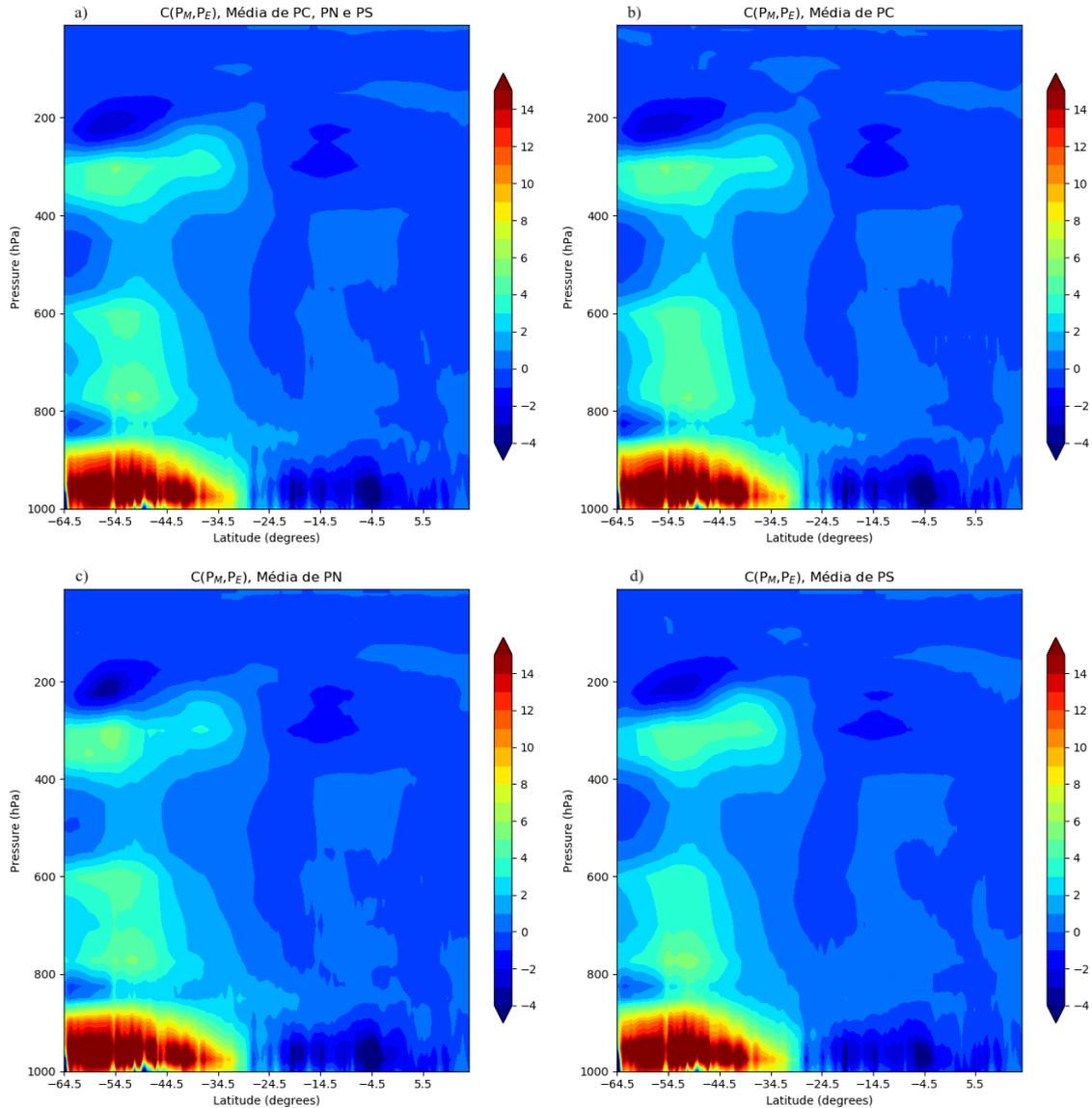
Na distribuição espacial (estrutura 3-D, Pressão, Latitude e Longitude) podemos ver em detalhe essas regiões. Nos quais, os máximos e os mínimos valores de $C(P_E, K_E)$ estão em latitude médias sobre os oceanos ao sul. Máximos valores de $C(P_E, K_E)$ sobre o continente são observados na costa oeste da AS próximo dos Andes. Observa-se ainda que os centros de máximos e mínimos sobre o Atlântico Sul são maiores em valores absolutos durante PN, mas os mínimos estão mais próximo do continente durante PS ([Figura 4.26](#) (d)). Significando uma maior influência dos vórtices transientes sobre o continente (nas regiões sul da ZCAS) durante PS.

4.3.2.8 Estrutura vertical de $C(K_E, K_M)$ para PN, PC e PS

A [Figura 4.28](#) mostra a estrutura 2-D da taxa de conversão barotrópica $C(K_E, K_M)$ em eventos de ZCAS nos 28 anos (1991-2018). $C(K_E, K_M)$ relaciona as trocas de energia cinética de duas escalas diferentes (de larga para pequena escala), através do transporte horizontal e vertical de momento.

Observa-se na [Figura 4.28](#) que na média, os centros de máximas e mínimos de

Figura 4.25 - Seccões vertical latitude – pressão da taxa de conversão de P_M para P_E , $C(P_M, P_E)$, média dos eventos ocorridos entre 1991-2018.

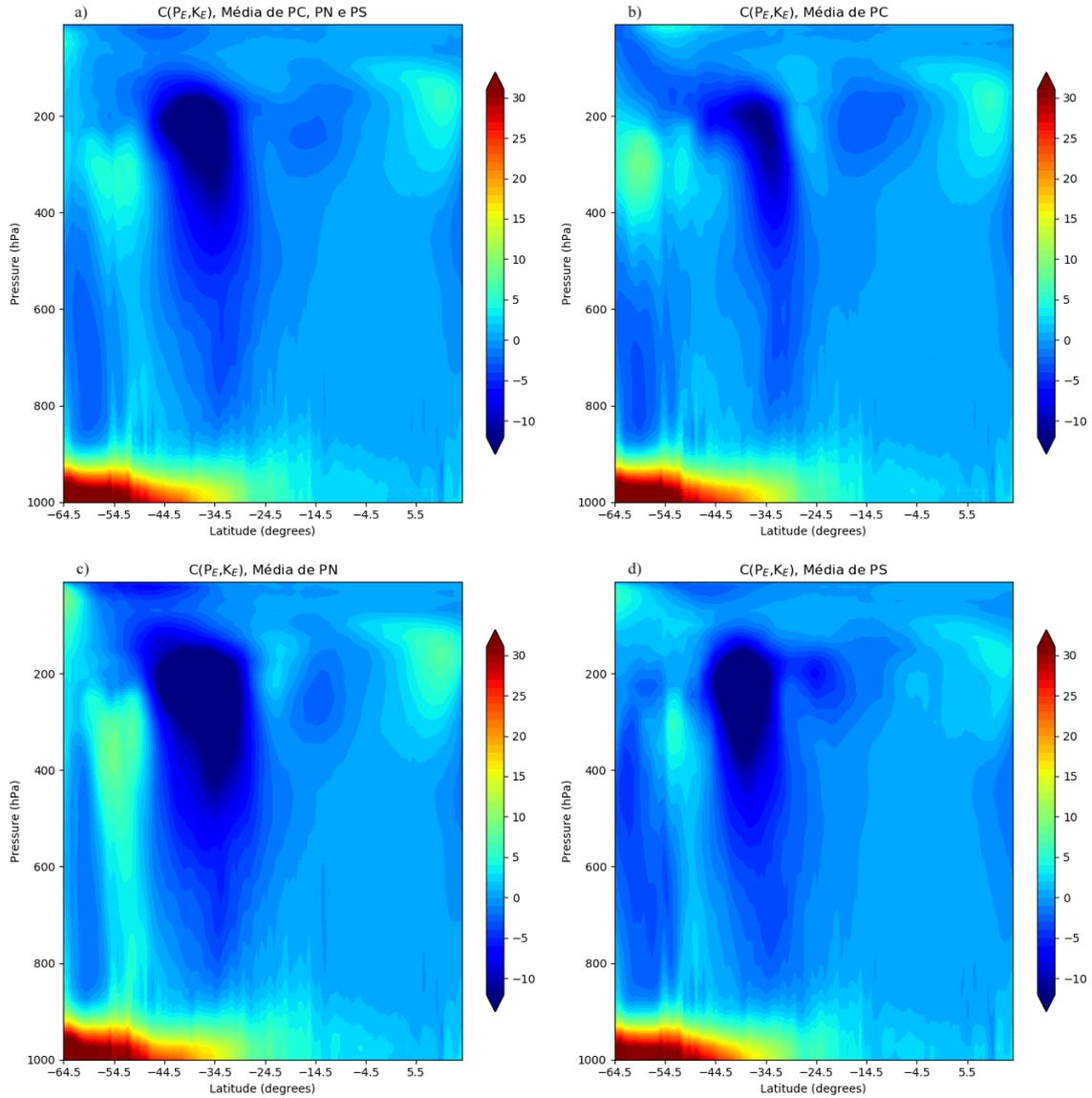


(a) Média dos 3 padrões de ZCAS, (b) média de PC, (c) média de PN e (d) média de PS. As unidades são $W/m^2/bar$ ou $10^{-3} W/m^2/hPa$.

Fonte: Produção do autor.

$C(K_E, K_M)$ estão nos extratropicos em 200 e 300 hPa nas regiões de atuação das duas células de circulação de Hadley e Ferrel (ver descrição no Apêndice B). Os mínimos em $34^\circ S$ na célula circulação de Hadley são mais fracos em eventos de PN e mais fortes em PC e PS. Os centros de mínimos associados aos ramos descendentes

Figura 4.26 - Seções vertical latitude – pressão da taxa de conversão de P_E para K_E , $C(P_E, K_E)$ (com a formulação ' $v \cdot \nabla \Phi$ '), média dos eventos ocorridos entre 1991-2018.

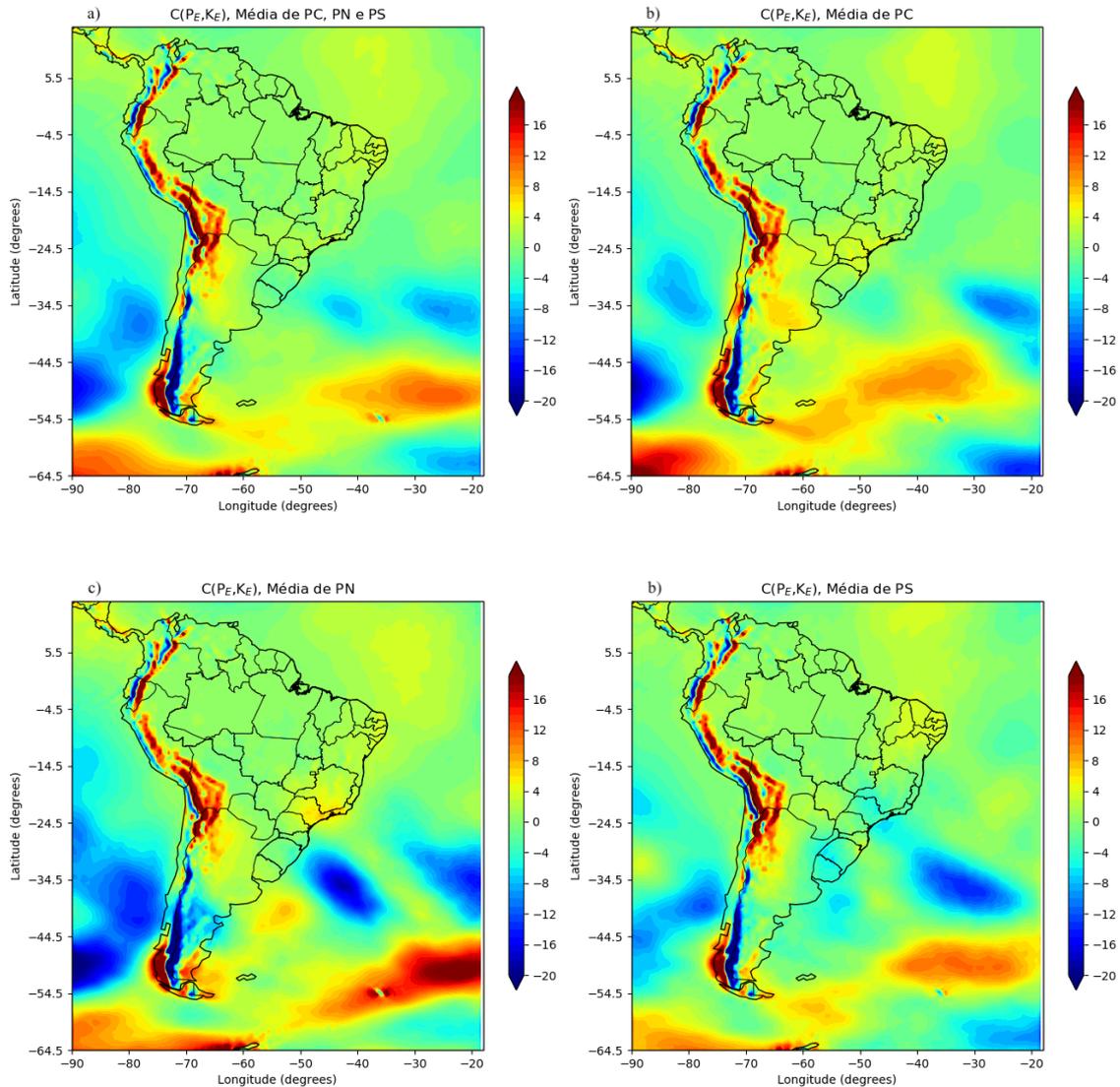


(a) Média dos 3 padrões de ZCAS, (b) média de PC, (c) média de PN e (d) média de PS. As unidades são $W/m^2/bar$ ou $10^{-3} W/m^2/hPa$.

Fonte: Produção do autor.

das células de Hadley são levemente deslocados para o norte em PN e para o sul em eventos de PS. Nos trópicos, os mínimos são mais fortes em eventos de PN e fracos em PC e PS, mostrando que nos trópicos a instabilidade barotrópica na célula de

Figura 4.27 - Distribuição espacial, latitude-longitude da taxa de conversão de P_E para K_E , $C(P_E, K_E)$ (com a formulação ' $v \cdot \nabla \Phi$ '), média dos eventos de ZCAS ocorridos entre 1991-2018.



(a) Média dos 3 padrões de ZCAS, (b) média de PC, (c) média de PN e (d) média de PS. As unidades são W/m^2 .

Fonte: Produção do autor.

Hadley sobre AS são mais intensas em eventos de PN.

Durante PN centros de máximos são mais fracos se comparados com PC e PS, e sua estrutura nas latitudes média sobre as regiões de atuação da célula de Ferrel é

ligeiramente diferente das estruturas de PC e PS, enquanto que durante PC e PS um único centro é observado entre 50 e 60°S, em eventos de PN dois núcleos fracos (positivo e negativo) é observado, que é refletido na média dos três padrões, onde o centro de máximo nessas latitudes é mais fraco. Acreditamos que seja uma característica proporcionada pela existência de uma pequena célula de circulação dentro da célula de Ferrel sobre AS que converte K_M em K_E , e instabiliza barotrópicamente a atmosfera durante PN nessas regiões. Isso já foi mencionado por Barry e Chorley (2013), mas contudo, essa característica deve ser mais estudada para identificar as suas possíveis causas.

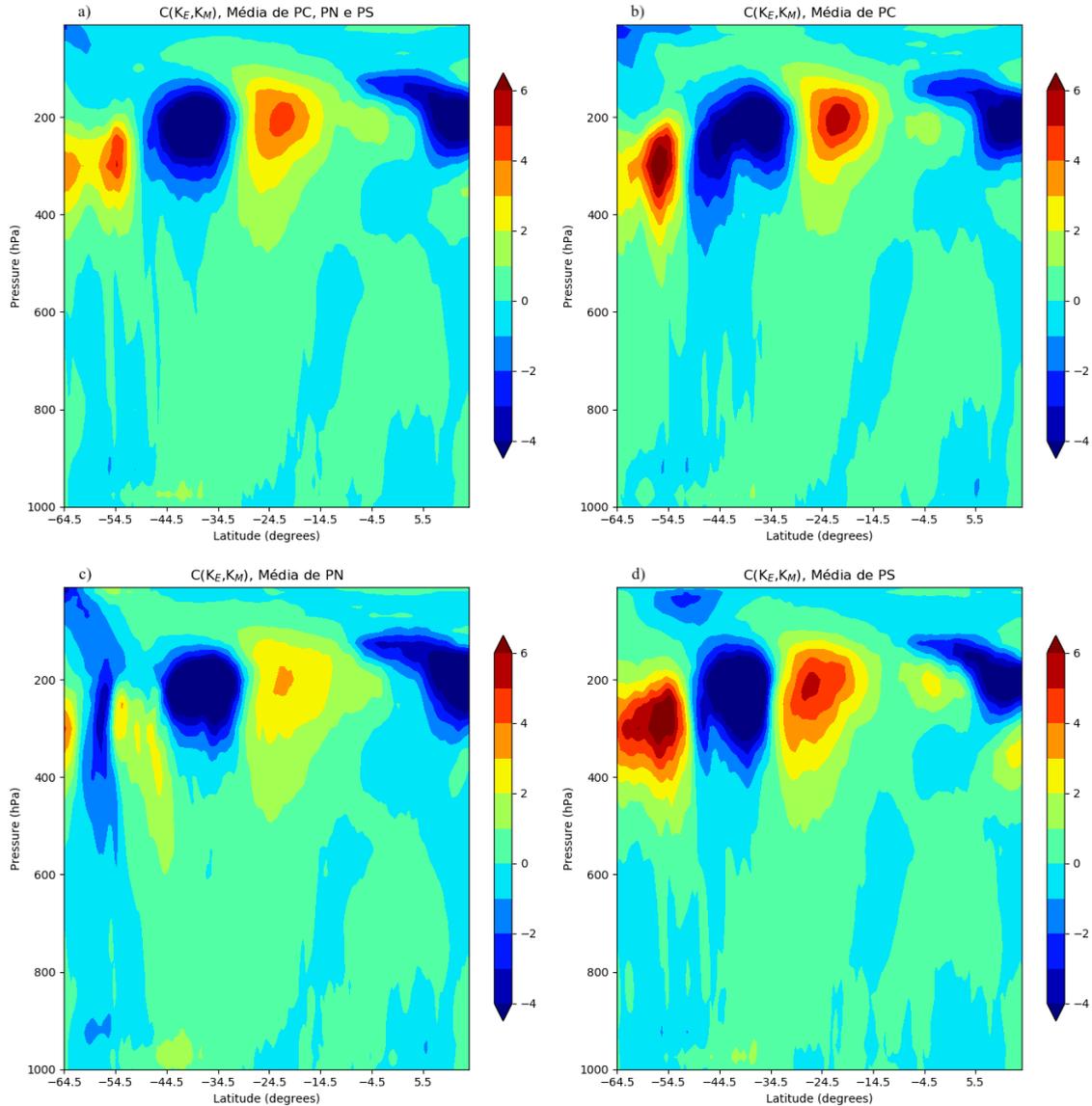
No geral, esses resultados mostram que os processos barotrópicos nas células de circulação de Hadley e Ferrel sobre AS é mais intensa durante PC e PS e menos intensa durante PN

4.3.2.9 Estrutura vertical de $C(P_M, K_M)$ para PN, PC e PS

A Figura 4.29 mostra os padrões da estrutura vertical (2-D) de troca (ou transformação) de energia de P_M em K_K $C(P_M, K_M)$ sobre América do Sul (AS) em eventos de ZCAS ocorridos nos PN, PC e PS nos 28 anos (1991-2018). Os centros de máximos e mínimos valores de $C(P_M, K_M)$ estão na troposfera (200 e 300 hPa) e na média e baixa estratosfera. Observa-se que na média, os centros de máximos (mínimos) são encontrados nas regiões de atuação das células de circulação Hadley (Ferrel) em 32°S (52°S). No entanto, os máximos (mínimos) nas duas células são mais fortes (fracos) e ligeiramente deslocado para o norte durante PN, e em PS os mínimos são mais fortes. Isso, significa que durante os eventos de PN o transporte de calor (ar quente) do equador para os extratropicos é maior (mais intenso) e de ar frio dos polos para as latitudes médias é mais fraco se comparados com os outros dois padrões (PC e PS). O mesmo vale para PS, onde o transporte de ar frio dos polos para as latitudes médias é mais intenso, e isso, tem fortes implicações nas ZCAS, pois isso pode mostrar que durante o período em que o evento está mais ao norte (PN), o calor transportado dos trópicos para extratropicos é maior e os jatos podem ser mais intenso, como podemos ver no diagrama Figura 4.18 onde a energia cinética média zonal (K_M) durante PN é até 5,66% e 8,76% superior em relação à PC e PS e dos distúrbios (K_E) 6,10% e 11,50% para PC e PS respectivamente. Esses resultados, podem mostrar que, as ZCAS são fortes canais pelos quais o transporte de calor entre o equador e os extratropicos ocorrem.

Os resultados, nos mostram ainda que há uma intensificação da célula de circulação de Hadley no transporte de massas de ar do equador para os extratropicos durante

Figura 4.28 - Secções vertical latitude – pressão da taxa de conversão de K_E para K_M , $C(K_E, K_M)$, média dos eventos ocorridos entre 1991-2018.



(a) Média dos 3 padrões de ZCAS, (b) média de PC, (c) média de PN e (d) média de PS. As unidades são $\text{W}/\text{m}^2/\text{bar}$ ou $10^{-3} \text{W}/\text{m}^2/\text{hPa}$.

Fonte: Produção do autor.

PN no ramo descendente, e uma leve desintensificação em PC e PS.

De igual modo, uma intensificação da atividade da célula de Ferrel durante PS e desintensificação durante PN, ou seja, menos ar frio dos polos para as latitudes

médias em PN.

Acreditamos igualmente que a forte desintensificação nos centros de mínimos na estrutura de $C(P_M, K_M)$ observadas durante PN na célula de Ferrel se deve a pequena célula barotropicamente instável em torno 55°S , que atua para desfavorecer (ou com uma fraca) a conversão energia de P_M para K_M .

A seguir, apresentamos os componentes de fluxos de energia e dos componentes de força de pressão sobre América do Sul (AS) durante os eventos de ZCAS ocorridos nos diferentes padrões (PN, PC e PS) nos 28 anos (1991-2018).

4.3.2.10 Estrutura vertical de $B(P_M)$ para PN, PC e PS

O fluxos de energia potencial média zonal $B(P_M)$ representa o transporte meridional e vertical de calor em grande escala através das variações temporais e zonais de temperatura.

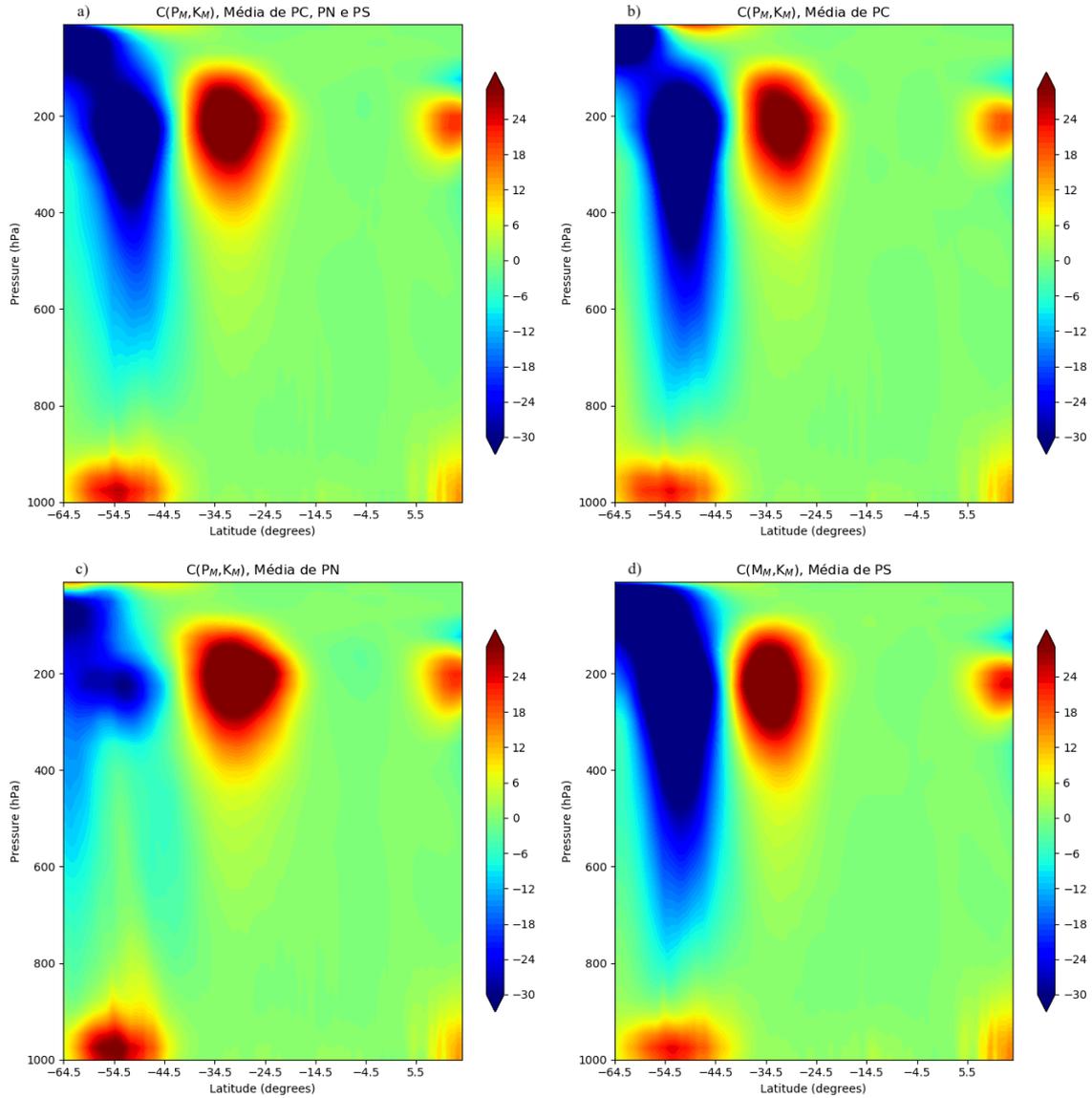
Os padrões de taxa de fluxos de energia potencial média zonal $B(P_M)$ sobre a AS durante os eventos de ZCAS ocorridos entre 1991-2018 (Figura 4.30), mostram que $B(P_M)$ é máximo na baixa troposfera nos trópicos e subtropicais (entre 3°N e 34°S), e mínimo nos extratropicais e ao norte de 4°N . Observa-se ainda que os máximos são maiores em PC do que em PN e PS, ao passo que os mínimos são maiores em valores absolutos durante PS, representando menos fluxos desfavorecendo em eventos de ZCAS de PN e PS, e mais fluxos ao norte de 4°S favorecendo em eventos de PS.

4.3.2.11 Estrutura vertical de $B(K_M)$ para PN, PC e PS

Os padrões dos componentes de fluxo de energia cinética $B(K_M)$ para os eventos de ZCAS analisados durante os 28 anos, mostram os padrões de circulação (transporte de momento) em larga escala observadas nas duas células (Ferrel e Hadley) (Figura 4.31).

As estruturas verticais de $B(K_M)$ apresentam grandes semelhanças com as estruturas de $C(P_M, K_M)$ (Figura 4.29), exceto pelos máximos e mínimos que estão em células diferentes e da intensificação dos máximos nos trópicos. Observa-se que os máximos de $B(K_M)$ em altos níveis estão nas regiões das células de Ferrel e os mínimos nas células de Hadley, ao passo que em $C(P_M, K_M)$, os mínimos estão nas células de Ferrel e os máximos nas de Hadley. Os padrões de $B(K_M)$ nos eventos de PC, PN e PS são bastante similar, mas diferem nas intensidades dos fluxos. Por exemplo em eventos

Figura 4.29 - Seções vertical latitude – pressão da taxa de conversão de P_M para K_M , $C(P_M, K_M)$ (com a formulação ' $v \cdot \nabla \Phi'$ '), média dos eventos ocorridos entre 1991-2018.

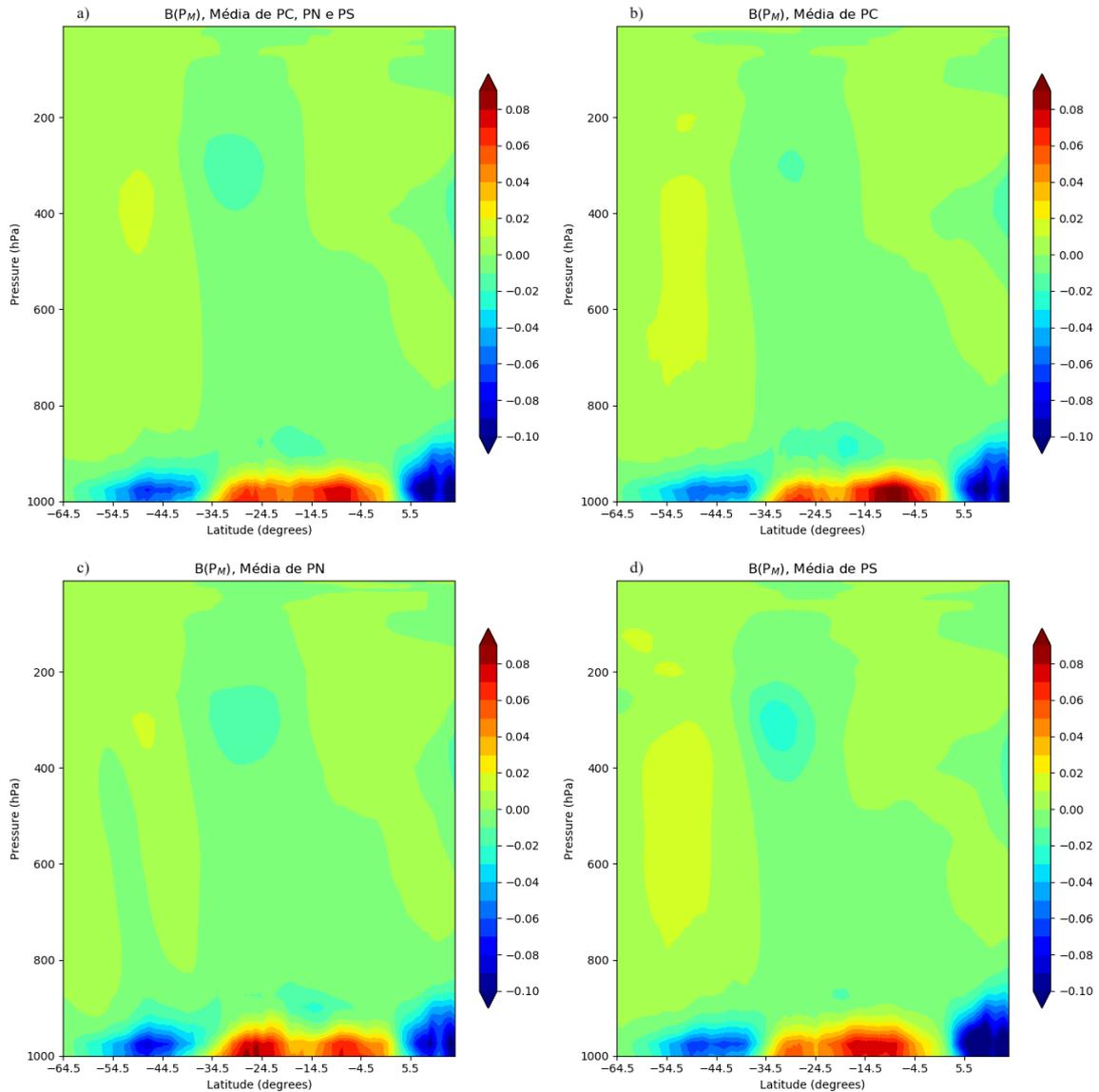


(a) Média dos 3 padrões de ZCAS, (b) média de PC, (c) média de PN e (d) média de PS. As unidades são $W/m^2/bar$ ou $10^{-3} W/m^2/hPa$.

Fonte: Produção do autor.

de PN, a intensidade dos fluxos na célula de Ferrel é mais fraco, em contrapartida o consumo de energia na região dos jatos subtropicais na parte superior do ramo descendente célula de circulação de Hadley é maior, significando igualmente que, as

Figura 4.30 - Secções vertical latitude – pressão da taxa de fluxo da energia potencial disponível média zonal, $B(P_M)$, média dos eventos ocorridos entre 1991-2018.



(a) Média dos 3 padrões de ZCAS, (b) média de PC, (c) média de PN e (d) média de PS. As unidades são $\text{W}/\text{m}^2/\text{bar}$ ou $10^{-3} \text{W}/\text{m}^2/\text{hPa}$.

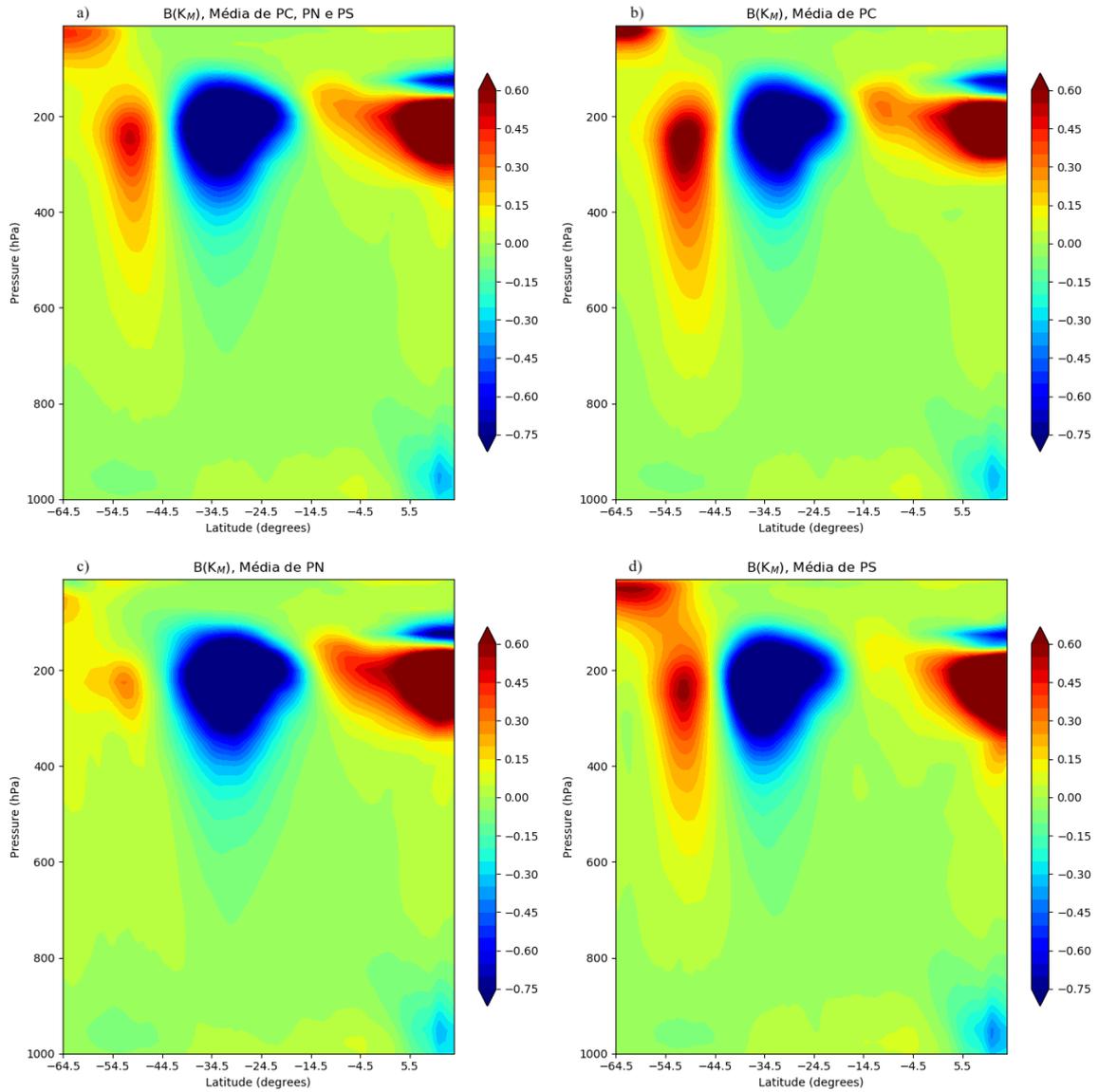
Fonte: Produção do autor.

atividades dos jatos nas células de Hadley (Ferrel) é maior (menor) durante PN, ou seja, ocorre uma intensificação (desintensificação) das células de Hadley (Ferrel).

De igual modo, sugerimos que a grande diferença da estrutura de $B(K_M)$ entre PN

e as estruturas de PC e PS sejam um reflexo da pequena célula de Ferrel barotropicamente instável em aproximadamente 55°S.

Figura 4.31 - Secções vertical latitude – pressão da taxa de fluxo da energia cinética média zonal, $B(K_M)$, média dos eventos ocorridos entre 1991-2018.



(a) Média dos 3 padrões de ZCAS, (b) média de PC, (c) média de PN e (d) média de PS. As unidades são $W/m^2/bar$ ou $10^{-3} W/m^2/hPa$.

Fonte: Produção do autor.

4.3.2.12 Estrutura vertical de $B(P_E)$ para PN, PC e PS

O fluxo de energia potencial da perturbação $B(P_E)$ representa o transporte de calor na direção meridional e vertical em pequena escala.

Os padrões das estruturas verticais (2-D) dos componentes de fluxo de energia potencial da perturbação $B(P_E)$ em eventos de ZCAS analisados são apresentadas na [Figura 4.32](#). Nesta figura, são observadas diferenças notáveis entre as estruturas de $B(P_E)$ dos padrões de localizações das ZCAS. Por exemplo, os mínimos em 250 hPa e 34°S são mais intensos e deslocados para o sul durante PS, ao passo que em eventos de PN, esse centro é bastante fraco. Os máximos em 200 hPa e em médios níveis (entre 600 e 700 hPa) são mais intensos em PS e PC e os mínimos em superfície, são igualmente mais fracos em PN. Essas estruturas estão ligadas aos processos de geração (fonte) e dissipação (consumo) de energia associados às atividades dos ciclones extratropicais nas latitudes médias, onde as fontes são encontradas em médios e altos níveis da troposfera e os mínimos em superfície.

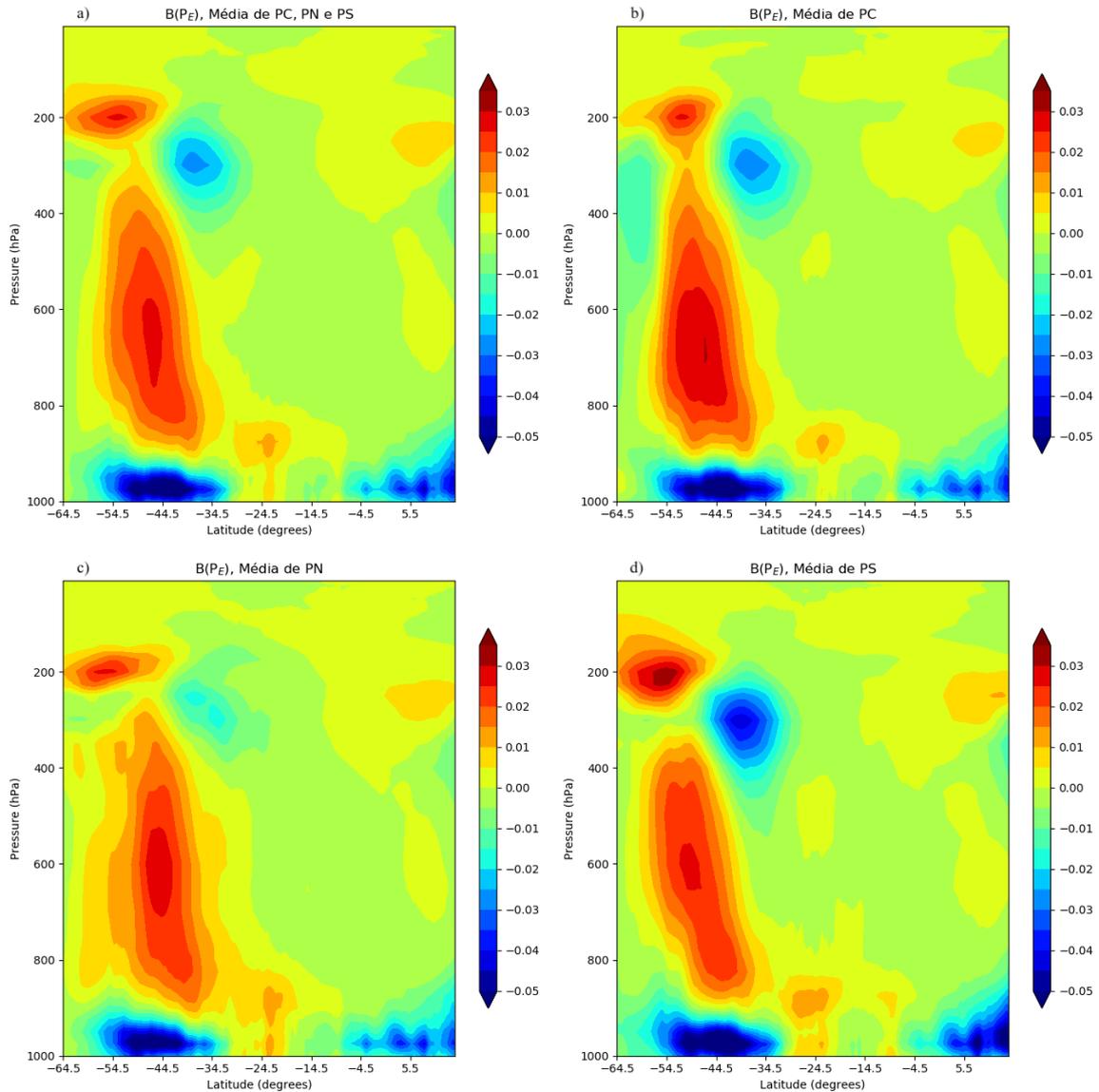
Na estrutura 3-D [Figura 4.33](#), é visto em detalhes as regiões de fontes e sumidouros de fluxos de P_E durante esses eventos, sendo destacadas as regiões das ZCAS (principalmente a sua extremidade mais ao sul), os Andes e sul do Pacífico (em 55°S) como regiões de dissipação (consumo) de P_E .

4.3.2.13 Estrutura vertical de $B(K_E)$ para PN, PC e PS

A [Figura 4.34](#) representa a estrutura vertical (2-D) do fluxo de momento de energia cinética em pequena escala $B(K_E)$ para os eventos de ZCAS ocorridos entre 1991 e 2018 nos PN, PS, e PC. Nesta figura, observa-se que os máximos e os mínimos valores estão na troposfera superior nas localizações das células de Ferrel e Hadley respectivamente. Os centro de máximos valores de $B(K_E)$ em 250 hPa na célula de Ferrel (em 50°S) e em 5°N são menos intensos em eventos de PS, se comparados com PC e PN. Por outro lado, os mínimos em 34,5°S (na célula de Hadley) são mais intensos e levemente deslocados para o sul durante os eventos de PS.

Nas estruturas 3-D para esses eventos [Figura 4.35](#), são observadas em detalhes as regiões fontes e sumidouros de $B(K_E)$. Fontes são encontradas em 35°S e 50°W e sumidouros (valores negativos) entorno de 35°S e 28°W (na localização mais ao sul das ZCAS, evidenciando as atividades dos jatos associados à célula de Hadley) e sobre o Pacífico sul. Vale salientar ainda que, quando comparados com os padrões de escoamentos sinóticos, as regiões de valores positivos e negativos de $B(K_E)$ coincidem

Figura 4.32 - Secções vertical latitude – pressão da taxa de fluxo da energia potencial da perturbação, $B(P_E)$, média dos eventos ocorridos entre 1991-2018.

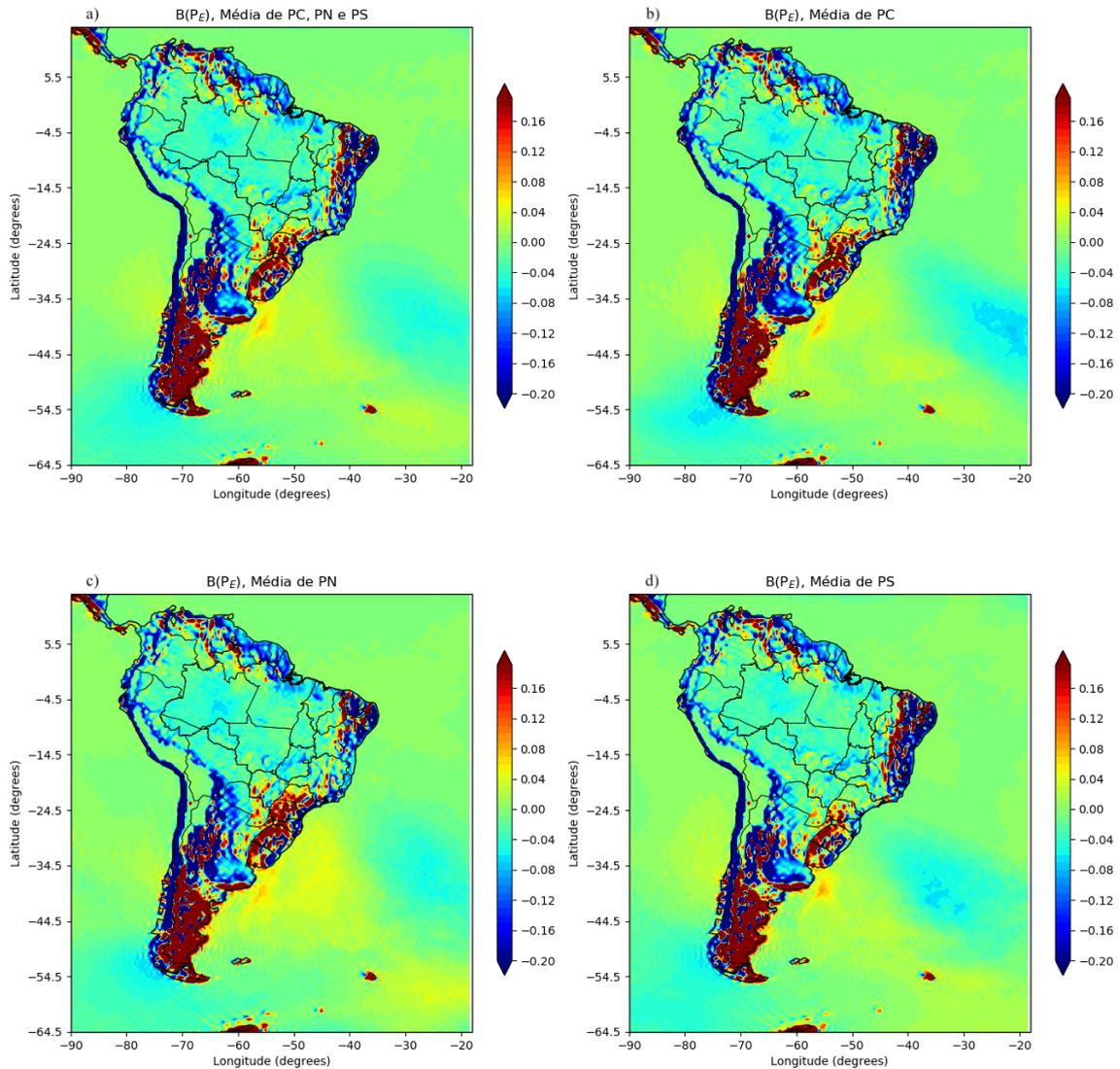


(a) Média dos 3 padrões de ZCAS, (b) média de PC, (c) média de PN e (d) média de PS. As unidades são $W/m^2/bar$ ou $10^{-3} W/m^2/hPa$.

Fonte: Produção do autor.

com as regiões de localização dos ciclones e anticiclones observados na AS durante os eventos de ZCAS, como por exemplo o VCAN e dos ciclones e anticiclones originados dos extratropicos, nas regiões de passagens de tempestades transientes ao sul sobre o atlântico.

Figura 4.33 - Distribuição espacial, latitude-longitude da taxa de fluxo da energia potencial da perturbação, $B(P_E)$, média dos eventos de ZCAS ocorridos entre 1991-2018.



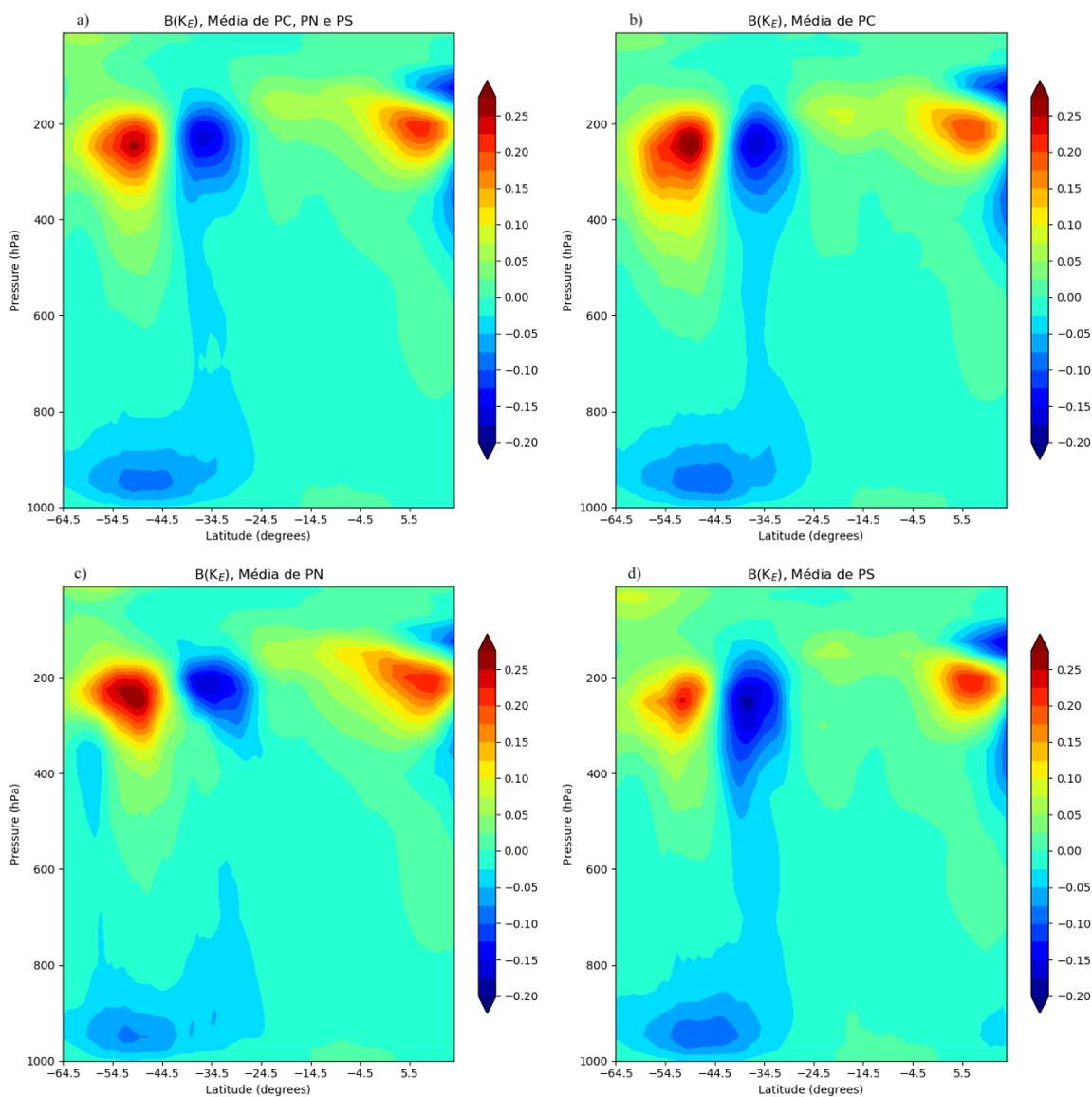
(a) Média dos 3 padrões de ZCAS, (b) média de PC, (c) média de PN e (d) média de PS. As unidades são W/m^2 .

Fonte: Produção do autor.

Outro detalhe interessante de ser mencionado, é que assim como na taxa de conversão de energia de pequena escala (Figura 4.27), os mínimos de $B(K_E)$ sobre o Atlântico estão mais perto do continente em eventos de PS, mostrando que durante esses

eventos há uma maior influência das atividades ligadas aos ciclones extratropical sobre o continente, apesar de terem menor intensidade se comparados com os eventos de PN [Figura 4.35 c](#) e [Figura 4.35 d](#). Esses resultados corroboram com os estudos de [Rosa \(2017\)](#), que destaca a presença de um vórtice próximo ao continente durante os eventos de PS.

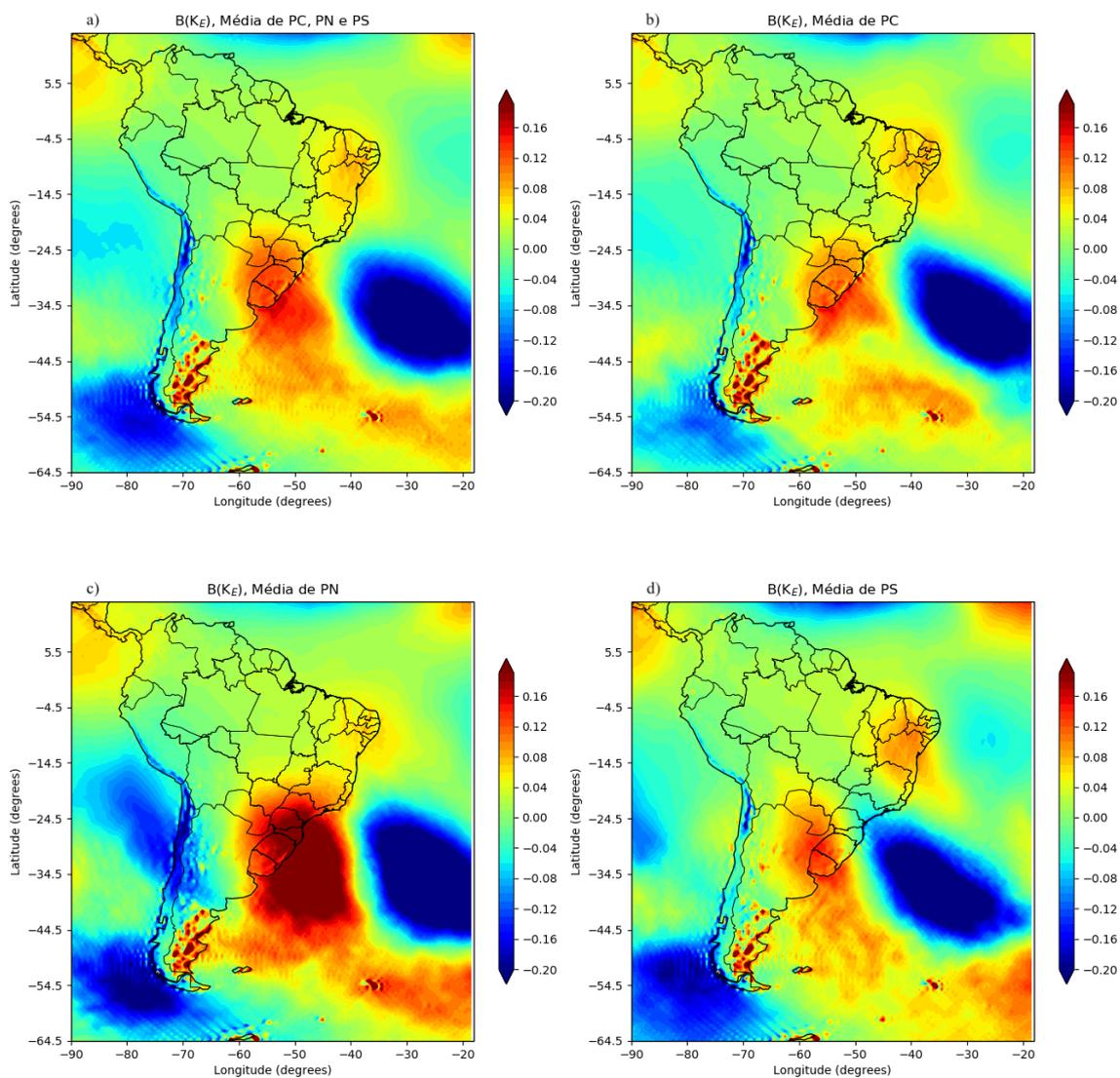
Figura 4.34 - Secções vertical latitude – pressão da taxa de fluxo da energia cinética da perturbação, $B(K_E)$, média dos eventos ocorridos entre 1991-2018.



(a) Média dos 3 padrões de ZCAS, (b) média de PC, (c) média de PN e (d) média de PS. As unidades são $\text{W}/\text{m}^2/\text{bar}$ ou $10^{-3} \text{ W}/\text{m}^2/\text{hPa}$.

Fonte: Produção do autor.

Figura 4.35 - Distribuição espacial, latitude-longitude da taxa de fluxos de energia cinética média zonal, $B(K_E)$, média dos eventos de ZCAS ocorridos entre 1991-2018.



(a) Média dos 3 padrões de ZCAS, (b) média de PC, (c) média de PN e (d) média de PS. As unidades estão W/m^2 .

Fonte: Produção do autor.

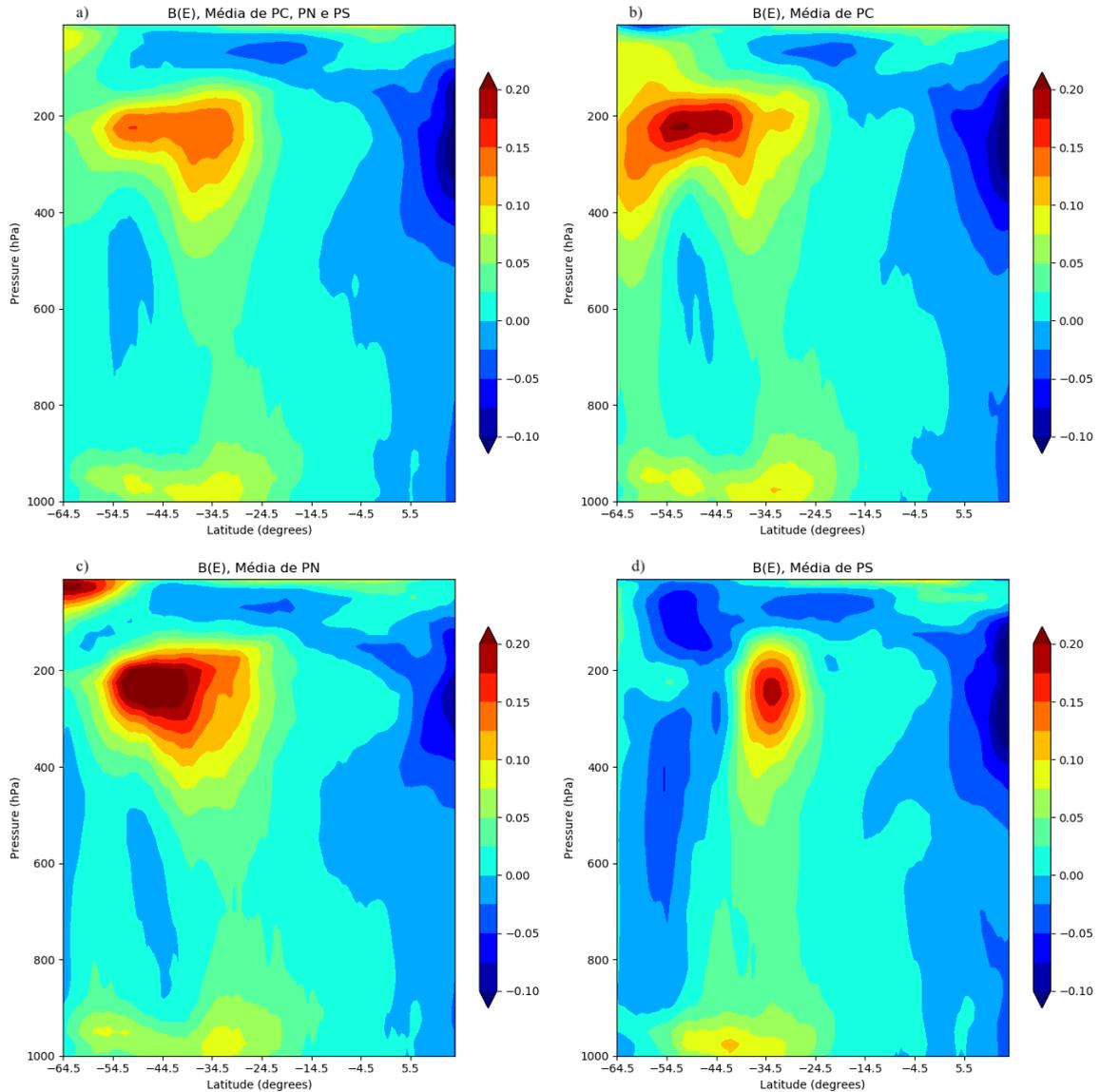
4.3.2.14 Estrutura vertical de $B(E)$ para PN, PC e PS

A força de pressão $B(E)$ representa produção (valores positivos) ou destruição (valores negativos) de energia cinética dos distúrbios (K_E) através do favorecimento ou desfavorecimento da conversão de P_E para K_E proporcionado por um fluxo meridional isobárico cruzado em direção a baixa pressão.

Os padrões espaciais 2-D e 3-D de $B(E)$ para AS durante os eventos ZCAS analisados são apresentadas nas [Figura 4.36](#) e [Figura 4.37](#). Observa-se na [Figura 4.36](#), que os máximos de $B(E)$ estão sobre as regiões dos jatos em 250 hPa entre 30 a 54°S de latitude. Verificou-se ainda que os máximos são menos intensos durante PS e mais deslocado para o norte do que PC e PN, ao passo que em PN, os máximos são mais intenso e levemente deslocado para o sul se comparados com a média ([Figura 4.36](#), acima a esquerda), que é bastante curioso (na visão do autor) já que era esperado que estivesse deslocado mais para o sul em evento de PS e para o norte em eventos de PN. Essas características são refletidas em suas estruturas 3-D ([Figura 4.37](#)), onde a região das ZCAS é destacado com $B(E)$ positivo em todos padrões de localização, mostrando que $B(E)$ é importante na contribuição para conversão de energia nos distúrbios e conseqüentemente para a produção de K_E durante os eventos de ZCAS.

Nos Andes, são encontrados os máximos valores de $B(E)$, o que pode estar associado às passagens dos ventos de oeste sobre as montanhas. Na parte mais ao sul da AS, os valores positivos de $B(E)$ estão associados à produção de energia cinética dos ciclones transientes ([Figura 4.37](#)).

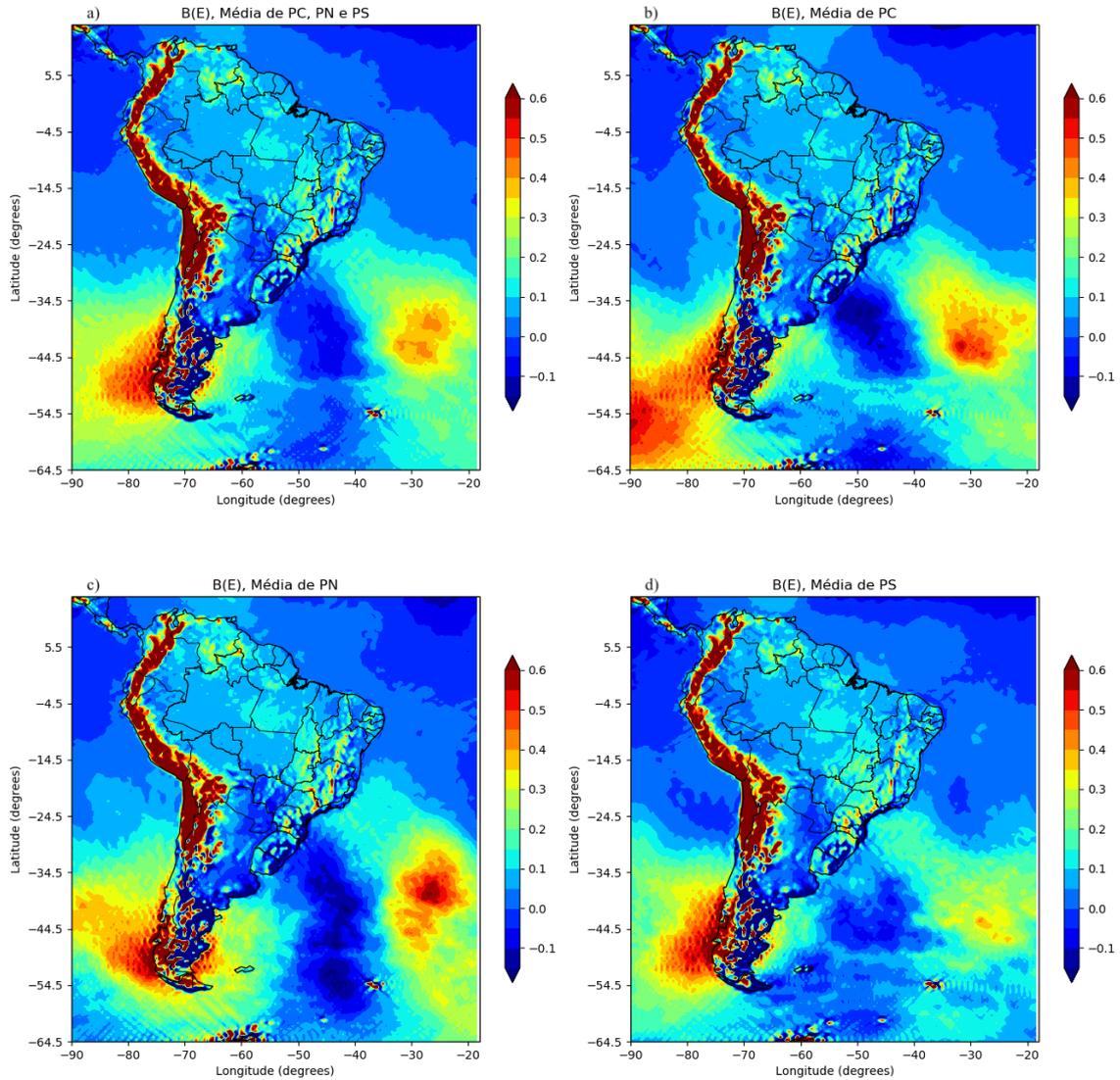
Figura 4.36 - Secções vertical latitude – pressão da taxa de força de pressão da perturbação, $B(E)$, média dos eventos ocorridos entre 1991-2018.



(a) Média dos 3 padrões de ZCAS, (b) média de PC, (c) média de PN e (d) média de PS. As unidades são $W/m^2/bar$ ou $10^{-3} W/m^2/hPa$.

Fonte: Produção do autor.

Figura 4.37 - o mesmo que na Figura 4.27, exceto pela taxa de força de pressão da perturbação, $B(E)$.



(a) Média dos 3 padrões de ZCAS, (b) média de PC, (c) média de PN e (d) média de PS. As unidades são W/m^2 .

Fonte: Produção do autor.

Nas próximas subseções, analisamos os detalhes de evolução energética do evento ocorrido entre os dias 12 e 26 de dezembro de 2013.

4.3.3 Análise energética do episódio de ZCAS ocorrido entre 12 e 26/12/2013

O objetivo desta seção é analisar a energética para ajudar a compreender o desenvolvimento do episódio, que ocorreu em um período que se dava o início de um período crítico quanto as frequências de ocorrência dos episódios de ZCAS ((QUADRO, 2012) e (QUADRO et al., 2016), também confirmado pelo autor em análises prévia da frequência de ocorrência dos eventos de ZCAS Figura 4.1) e consequentemente as escassez de chuvas sobre o sudeste do Brasil, marcando assim o início de um período conhecido na literatura como a época de seca e crise hídrica sobre o sudeste do Brasil (COELHO et al., 2016).

Para o diagrama do CEL, todos os componentes são analisados e para as estruturas verticais as análises são concentradas nos padrões das estruturas dos componentes de energia (P_M , P_E , K_M e K_E) durante o evento de ZCAS ocorrido entre 12 e 26/12/2013. As análises foram subdivididas em períodos. O primeiro é o período de 12 a 16/12, quando o evento esteve localizado em PC, o segundo em PN entre 16 e 22/12 e o último entre PC e PN durante 23 e 26/12/2013.

4.3.3.1 Análise dos diagramas dos componentes do CEL para o evento de ZCAS ocorridos entre 12 e 26/12/2013

Na Figura 4.38 são apresentados os resultados das integrais globais do CEL para o evento de ZCAS ocorridos Entre 12 e 26/12/2013. Nesta figura, podemos observar que na média do evento (de 12 a 26/12/2013) a energia é gerada tanto no estado básico como nas perturbações de energia potencial. Porém, as análises dos diferentes períodos de evolução do evento (12 a 15, 15 a 22 e 23 a 26/12/2013) evidenciam que a geração foi proporcionada pelo aquecimento durante os dois primeiros períodos analisados (ver por exemplo na Figura C.4), mas com grande parte dele durante primeiro período. No período final, observa-se que a geração de energia foi desfavorecida pelo resfriamento proporcionado pela correlação/covariância negativa entre a variação horizontal da taxa de calor (ver exemplo de sua estrutura vertical na Figura C.4) e a temperatura. P_M foi convertida para P_E a uma taxa de conversão baroclínica crescente durante a evolução do evento com $0,75 \text{ Wm}^{-2}$ no período inicial, $1,58 \text{ Wm}^{-2}$ no segundo e $2,81 \text{ Wm}^{-2}$ no período final que resultou em uma taxa de conversão baroclínica média de $1,71 \text{ Wm}^{-2}$. As conversões das duas formas de energia (P_M e P_E para K_M e K_E), seguem o sentido indicado pelas setas, exceto durante 23 a 26/12 onde K_M cede energia para P_M , segundo Peixoto e Oort (1992), Li et al. (2007b), Kim e Kim (2013) e literaturas por eles citadas, isso representa um

maior consumo de energia da célula de Ferrel nas regiões mais ao sul das ZCAS. A instabilidade barotrópica [$C(K_E, K_M) < 0$] dominou em todos os períodos de evolução do evento, mas com menor intensidade durante o período em que o evento estava localizado mais ao norte (aqui, considerado PN).

Nos componentes dos reservatórios, todos os componentes de energia apresentaram tendências de aumento, exceto para K_M onde uma tendência negativa foi observado durante 12 a 15/12, mostrando uma maior influência de um jato menos intenso nas regiões sul das ZCAS durante esse período. Essas características de tendências de energia serão observadas com melhores detalhes mais adiante nas figuras de evolução temporal dos componentes de energia (Figura 4.43).

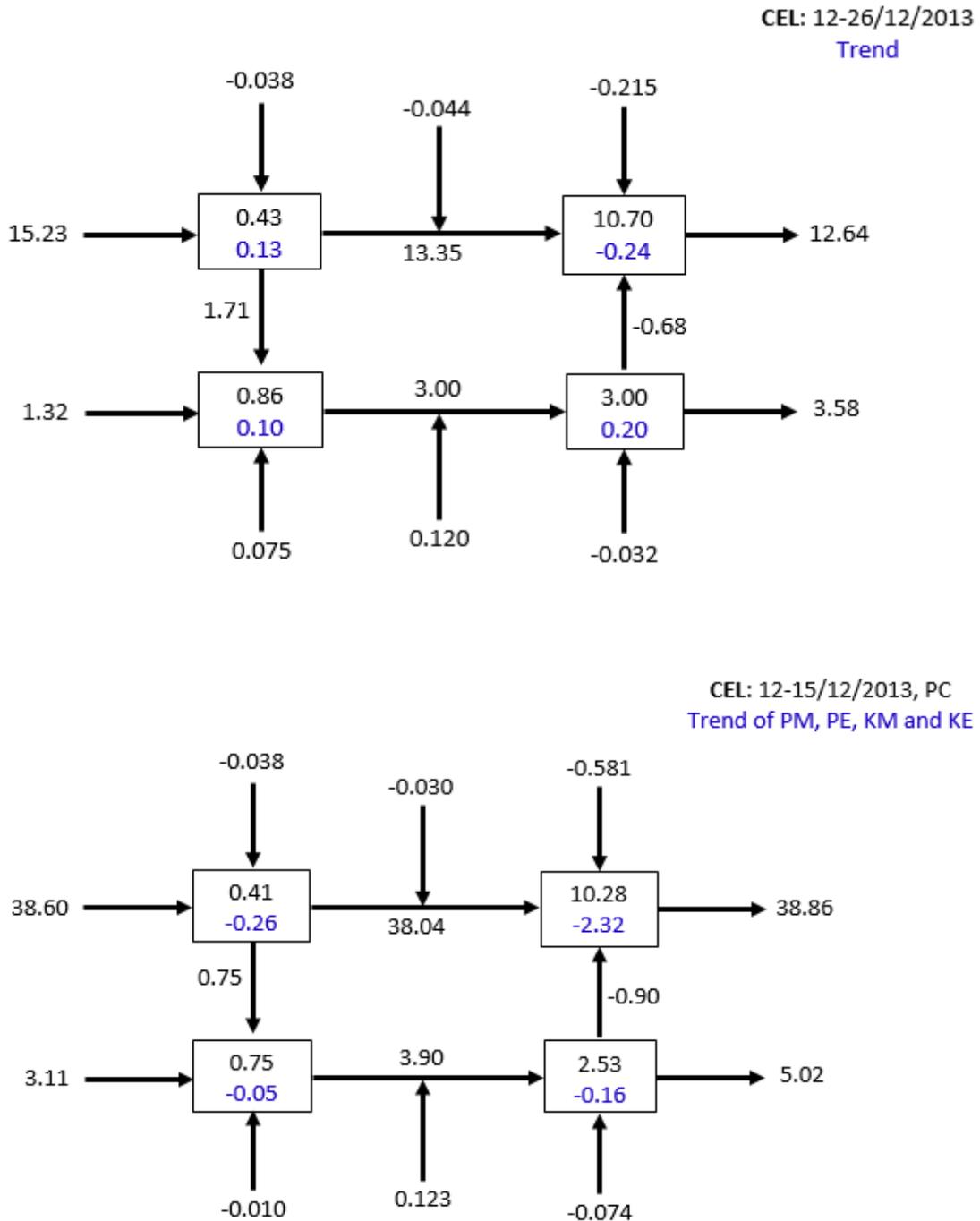
4.3.3.2 Análise das estruturas verticais dos componentes de energia para o evento de ZCAS ocorrido entre 12 e 26/12/2013

As análise das estruturas verticais dos componentes de energia na região das ZCAS durante o evento de 12 a 26/12/2013, são apresentadas nas Figura 4.39, Figura 4.40, Figura 4.41 e Figura 4.42. Nestas figuras, podemos observar com maiores detalhes a influência de maior disponibilidade de radiação solar nos trópicos sobre as regiões de atuação das ZCAS (no caso particular, para o evento). Como resultado, uma maior disponibilidade de P_M é observado em baixos níveis da troposfera nas regiões tropicais. Os máximos de P_E são encontrados na superfície acima 35°S através de passagens dos vórtices transientes e nos trópicos em 19°S , onde as diferenças de temperatura entre Terra e Mar é maior. As influências dos jatos troposféricos em altos níveis da troposfera e dos jatos estratosféricos na média e baixa estratosfera são evidenciados nas estruturas de K_M e K_E , nos quais os maiores valores são observados nas partes superior dos ramos descendentes das células de circulação de Hadley e Ferrel.

No geral, assim como nos diagramas, as estruturas verticais desses componentes evidenciaram que os componentes de energia foram superiores durante os períodos em que o evento estava ligeiramente mais ao norte de sua posição média (PC), exceto em P_M onde a disponibilidade de energia de PC (12 a 15/12) foi superior que em PN (16 a 22/12), mas menor em relação ao período de 23 a 26/12/2013.

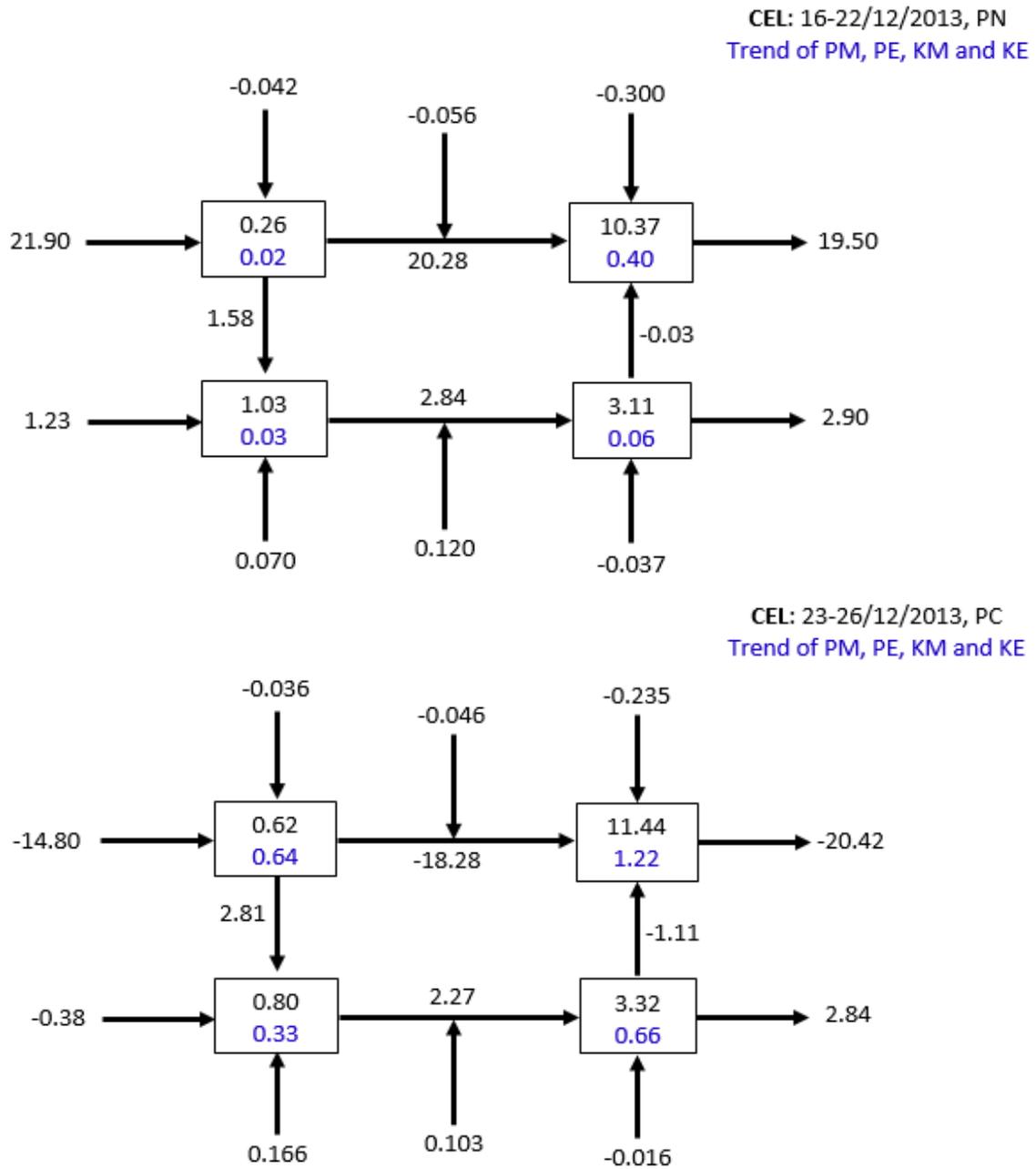
Quanto as estruturas verticais da Energia Mecânica Total (EMT) nas Figura 4.39, Figura 4.40, Figura 4.41 e Figura 4.42, observou-se que a EMT nas regiões de atuação das ZCAS possui seus máximos em altos níveis na região dos jatos troposféricos, mostrando que, EMT é amplamente dominada por K_M . Contribuições consideráveis

Figura 4.38 - Diagramas do CEL para o evento ocorridos entre 12 a 26/12/2013. Em azul nos reservatórios representam as tendências médias de energia. Unidades estão em $10^5 Jm^{-2}$ para as energias e Wm^{-2} para as tendências, taxas de converções, geração, fluxos, força de pressão e dissipação.



(Continua)

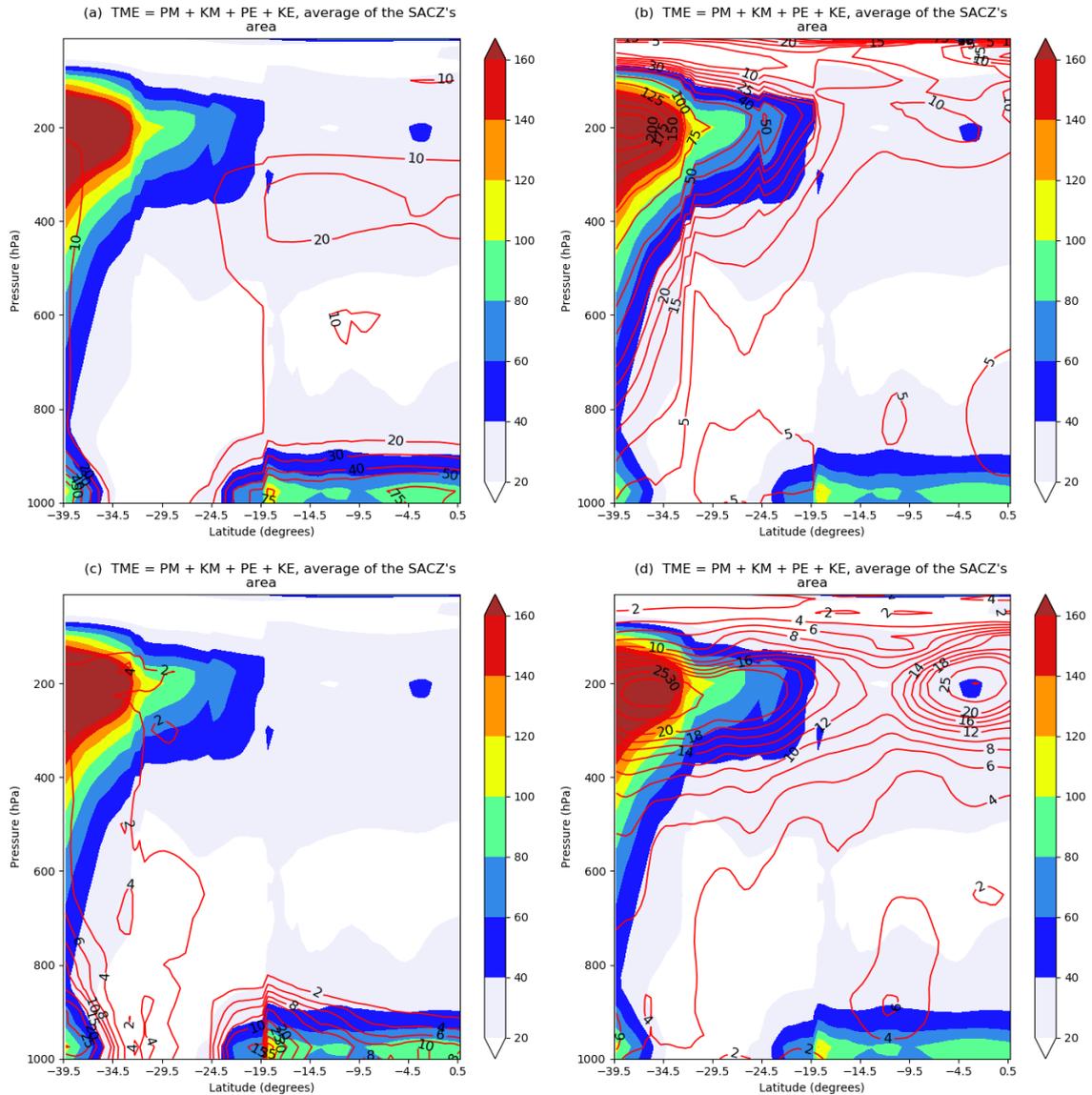
Figura 4.38 - Conclusão.



Fonte: Produção do autor.

das energias potenciais (P_M e P_E) são observadas nos trópicos na baixa troposfera, mostrando a influência de maior disponibilidade de energia solar e do contraste Terra-Mar em torno de 19°S.

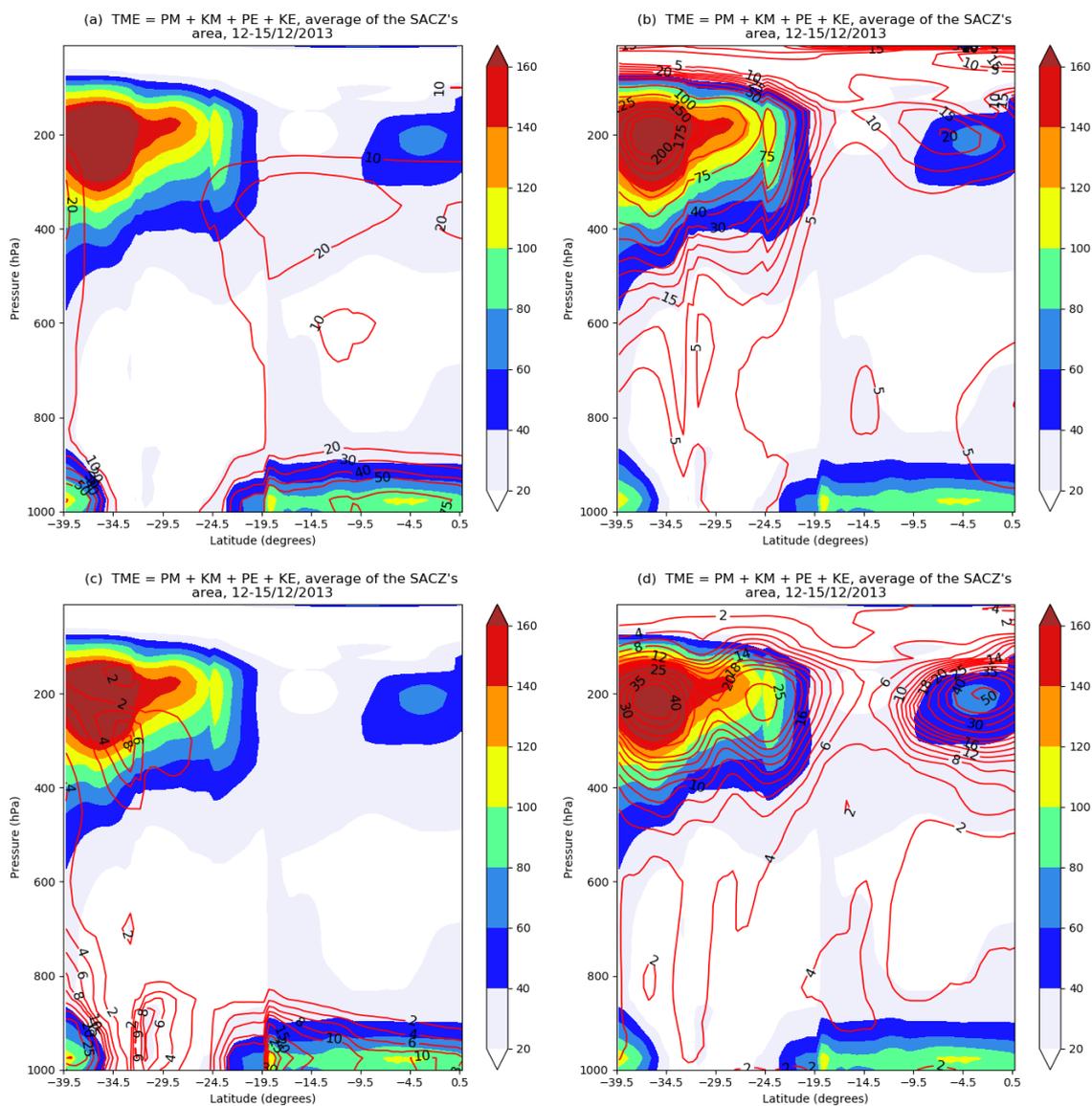
Figura 4.39 - Secções vertical Latitude – Pressão dos componentes de energia nas regiões de atuação de ZCAS, média entre 12 e 26/12/2013.



(a) P_M (acima a esquerda), (b) K_M (acima a direita), (c) P_E (abaixo a esquerda), e (d) K_E (abaixo a direita). Os contornos e os sombreados (shaded) indicam as quantidades de energia e da Energia Mecânica Total, EMT, respectivamente. Os intervalos de contorno são como nas estruturas anterior. As unidades estão em $10^5 J/m^2/bar$ ou $10^2 J/m^2/hPa$.

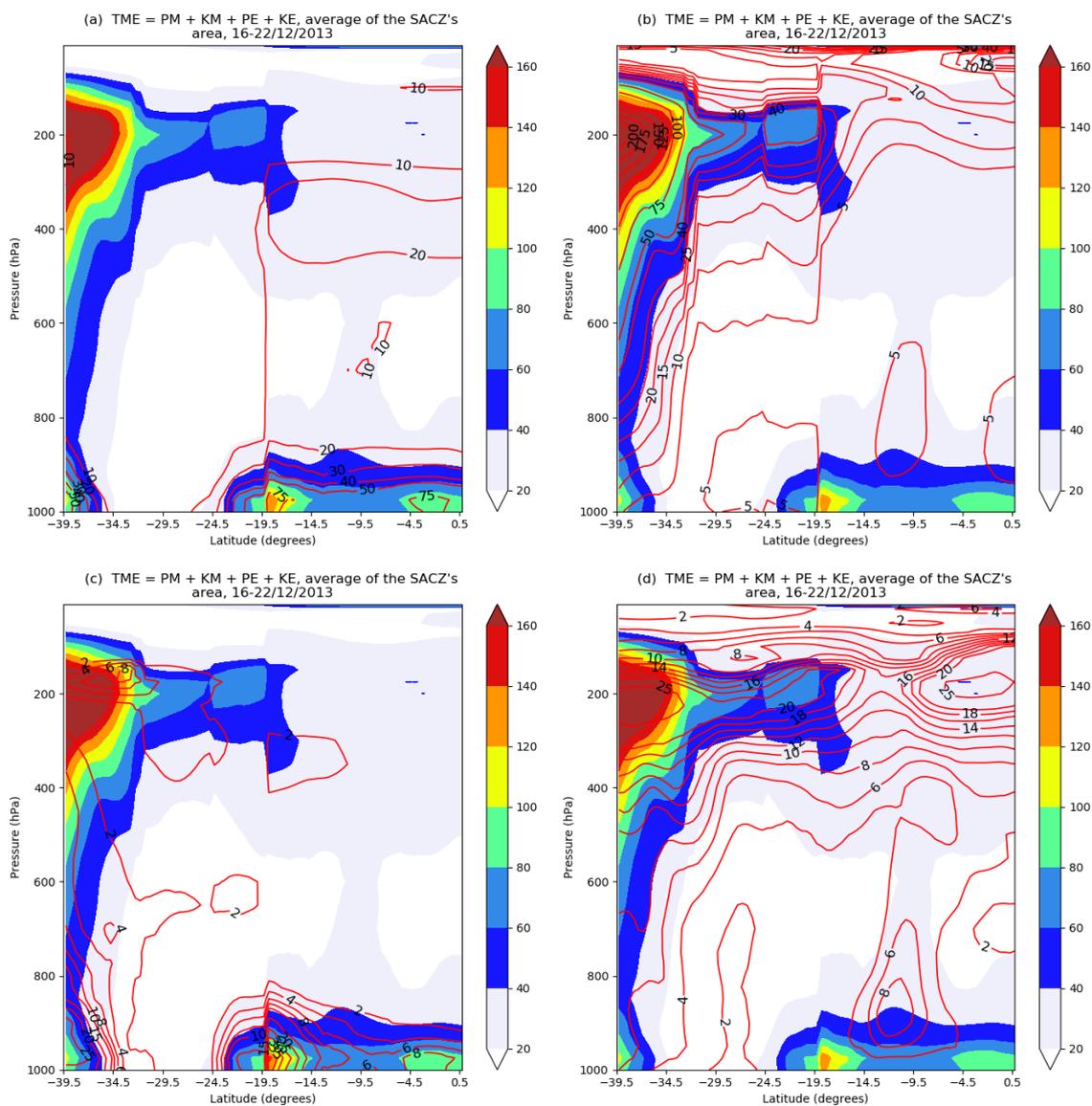
Fonte: Produção do autor

Figura 4.40 - Como na Figura 4.39, exceto que é para o Período de 12 a 15/12/2013.



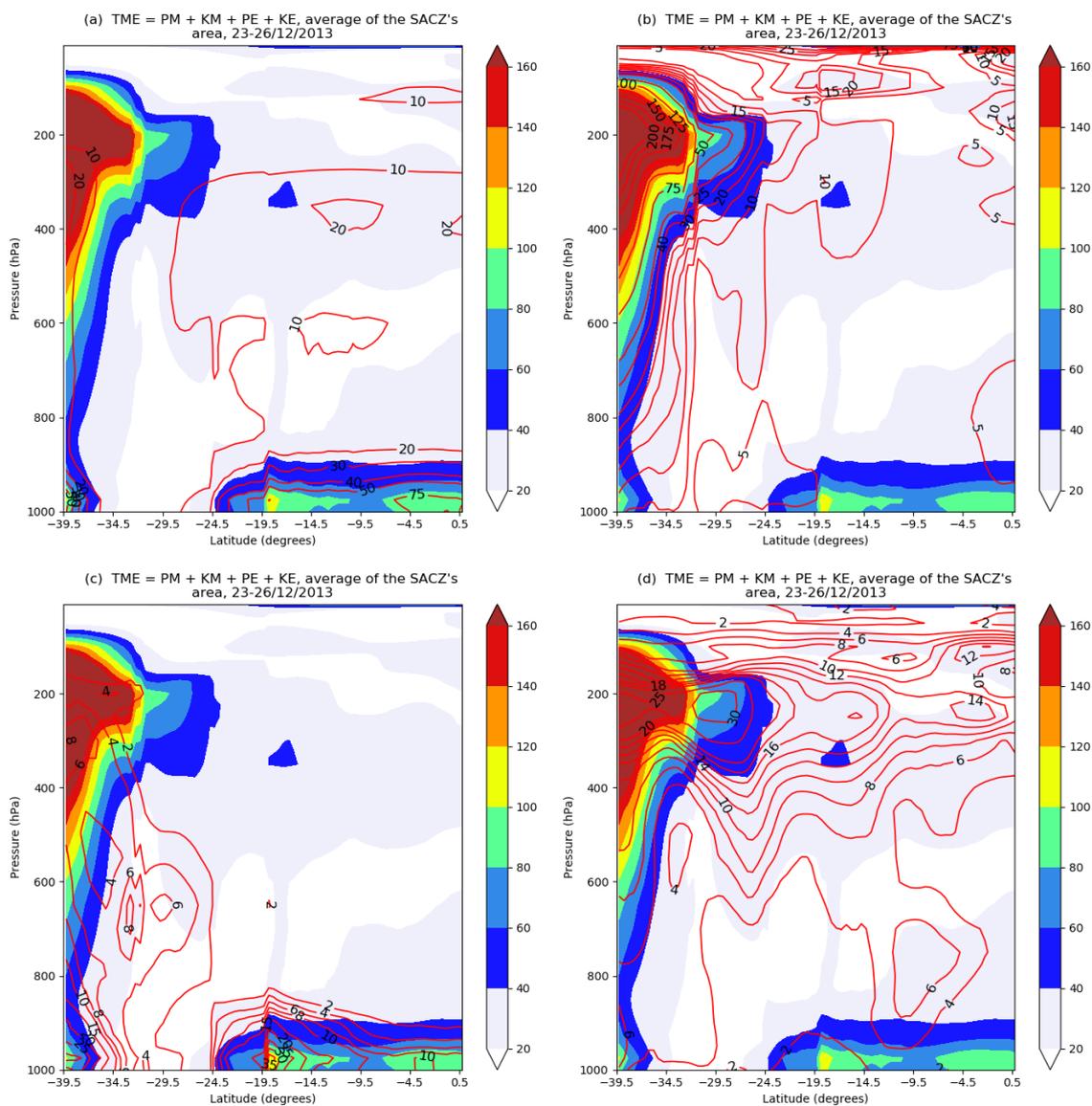
Fonte: Produção do autor.

Figura 4.41 - Como na Figura 4.39, exceto que é para o Período de 16 a 22/12/2013.



Fonte: Produção do autor.

Figura 4.42 - Como na Figura 4.39, exceto que é para o Período de 23 a 26/12/2013.



Fonte: Produção do autor.

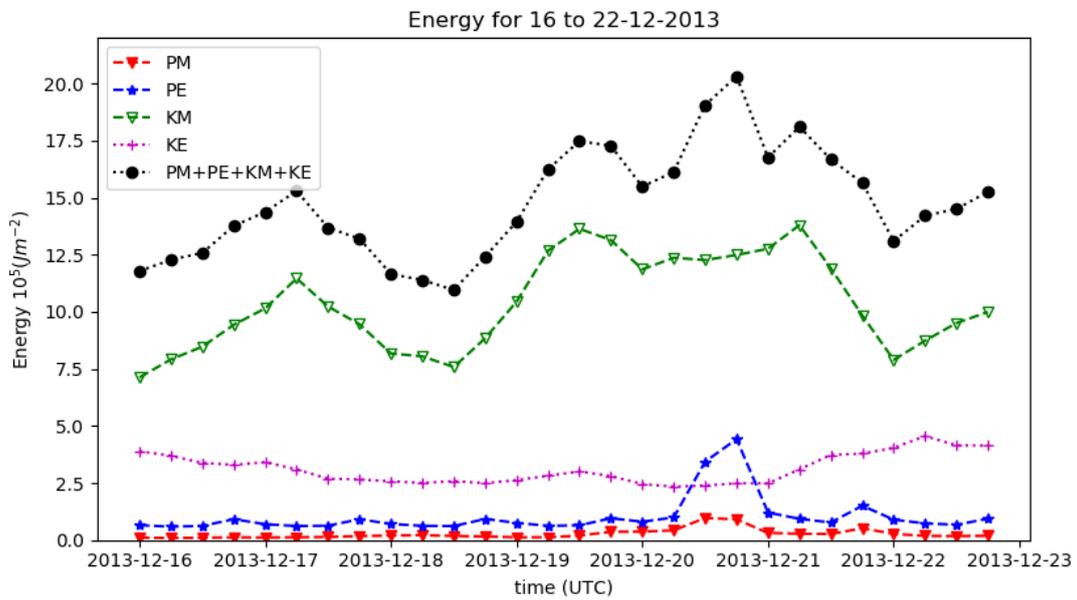
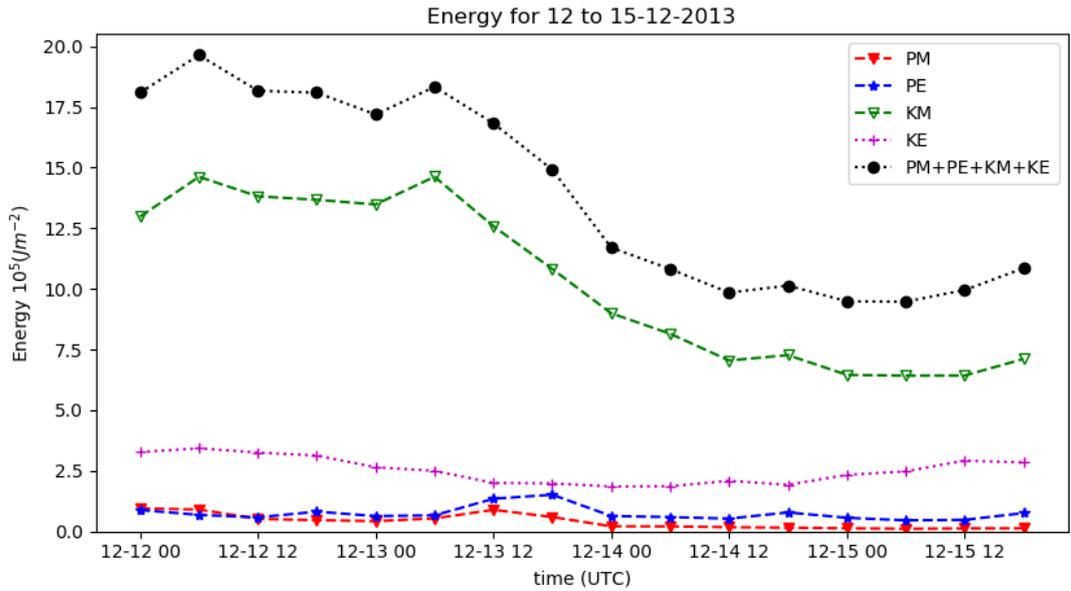
4.3.3.3 Séries temporais dos componentes de energia para o evento de ZCAS ocorrido entre 12 e 26/12/2013

Na Figura 4.43 é visto em detalhes a evolução do evento durante os diferentes períodos analisados, obedecendo a localização do evento em cada período. Os componentes de energia mostram tendências de crescimento de energia nos horários iniciais do evento (entre as 00 UTC do dia 12 as 06 UTC do 13, principalmente nos componentes K_M e K_E onde isso é mais evidente), mas observa-se que a tendência média negativa observada no componente de K_M durante o período de 12 a 15/12/2013 (ver Figura 4.38), foi proporcionada por uma grande queda de energia cinética observado nos horários depois das 06 UTC do dia 13/12/2013. No entanto, nos horários subsequentes esses componentes tornaram a apresentar uma tendência positiva, que possibilitou a manutenção e desenvolvimento do evento.

Os resultados de evolução do evento evidenciam fortemente as conexões entre P_E e K_E , ou seja, de como as perturbações dos ventos (K_E) é afetado pelos desvios temporais e zonais de temperatura (P_E) durante os eventos de ZCAS, onde as tendências de aumento e quedas de energias (K_E e P_E) apresentam uma pequena defezagem de algumas horas. Além disso, assim como nos diagramas do CEL esses resultados mostram igualmente a grande predominância e influência dos jatos sobre a região das ZCAS.

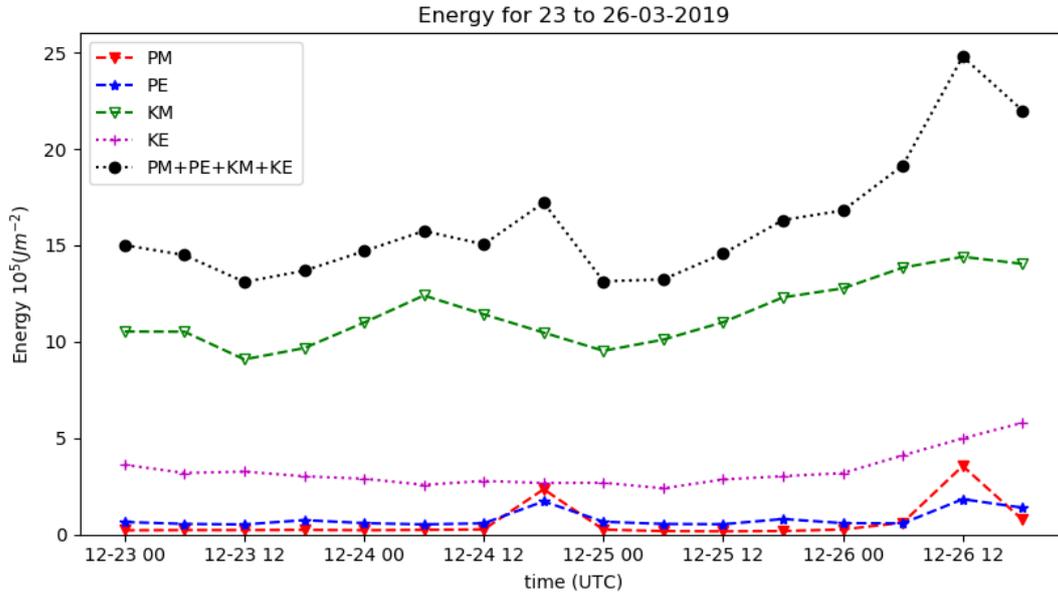
Estas análises energéticas nas regiões de atuação das ZCAS, reforçam ainda mais a ideia das ZCAS serem geradas pelas disponibilidades de radiação solar e mantidas pelos jatos principalmente os jatos subtropicais que causam um levantamento de massa nas regiões mais ao sul das ZCAS.

Figura 4.43 - Séries temporais de energia potencial disponível média zonal (P_M , em vermelho), energia potencial disponível da perturbação (P_E , em azul), energia cinética média zonal (K_M , em verde), energia cinética da perturbação (K_E , em roxo) média das subáreas 1 a 5 do evento de ZCAS entre 00UTC do dia 12/12/2013 a 18UTC do dia 15/12/2013. A linha pontilhada em preto é a série temporal para Energia Mecânica Total, igual ao somatório dos 4 componentes de energia. As unidades estão em $10^5 J/m^2$.



(Continua)

Figura 4.43 - Conclusão.



Fonte: Produção do autor.

Assim, podemos dizer que as ZCAS são geradas e mantidas por dois fatores; um ligado a convecção mais intensa nos trópicos originadas pela maior disponibilidade de radiação solar e outra pela convecção ao sul proporcionadas pelos jatos e vórtices transientes de latitudes médias os quais crescem por conversão baroclínicas drenando energia do estado básico. Além disso, a produção de energia cinética dos distúrbios B(E) e a alternância (padrão de gangorra) de instabilidade e estabilidade barotrópica entre os trópicos subtropicais e regiões mais ao sul das ZCAS (ver componente $C(K_E, K_M)$ na Tabela C.4) parece ser preponderante (importante).

4.4 Diagrama conceitual dos padrões de ZCAS

Na presente secção apresentamos os diagramas conceituais das etapas de evolução das ZCAS e dos padrões de circulação meridional e aspectos energéticos que podem ser observados durante os eventos de ZCAS. Esses padrões de circulação constituem uma base para o entendimento das características das células de circulação de Ferrel e Hadley sobre a AS.

4.4.1 Diagrama de fases de evolução da ZCAS

Na Figura 4.44 são apresentadas as diferentes fases de evolução das ZCAS. Devemos destacar ainda que para uma melhor representação das características energéticas observadas durante cada fase, mais estudos dedicados a compreender a evolução das ZCAS nos diferentes padrões de localizações devem ser feitos, pois este diagrama foi baseado nas análises de todos os resultados apresentados nos Subsubseção 4.3.2.1 e de um único estudo de caso Subsubseção 4.3.3.2.

As análises dos resultados das secções anteriores sugerem que a evolução da ZCAS ocorre em diferentes fases em termos de energética. Aqui dividimos em 5 possíveis:

1) Fase 1 – fase inicial de evolução do evento ou fase pré-revolução: esta fase é marcada pelo início da convecção nas regiões tropicais através do aquecimento radiativo diferenciado que causa um certo gradiente térmico (zonal e meridional) e, como a umidade é alta sobre a Amazônia e há adição da contribuição do oceano, começam a surgir as primeiras perturbações que possibilitam o início de gerações de energias potenciais (das duas formas) suficiente para o desenvolvimento das ZCAS, ou seja, começa a crescer $G(P_M)$ e $G(P_E)$.

2) Fase 2 – fase marcada pela intensificação da perturbação energética; o calor sobre a Amazônia e seus efeitos (ligadas às ondas originadas dessa fonte de calor) começam a ser advectado para a região sul da AS e isso associado ao aquecimento local no sudeste (SE) do Brasil e na Bolívia, que permitem a configuração da AB e com a convecção que é gerada pela intensificação dos jatos subtropicais (que está sendo gerado pelo aumento de K_M que ganhou energia do estado básico de energia potencial P_M), os componentes de perturbações da energética começam a ganhar intensidade. Neste caso, P_M começa a ceder mais energia para P_E e este para K_E , permitindo que os máximos de convecção ao sul estejam sobre determinados locais que dá a inclinação adequada às ZCAS.

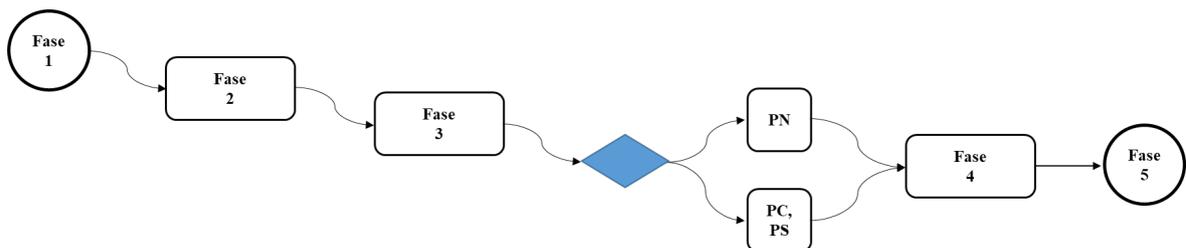
3) Fase 3 – A ZCAS já apresenta a devida configuração e energeticamente a instabilidade baroclínica úmida intensifica, neste caso, P_E e K_E crescem. 4) Fase 4 – ZCAS totalmente desenvolvida e configurada. Nesta fase, alguns aspectos interessantes podem acontecer. Neste caso, se o evento em questão é um evento de padrão norte (PN), há uma maior intensificação da instabilidade barotrópica ao sul e na subárea 2 de atuação das ZCAS. No caso de um evento de PC ou PS, essa instabilidade associada a conversão barotrópica, isto é, K_M cedendo energia para K_E é menos intensa, além disso, é confinada nas áreas mais ao sul (na região dos jatos

principalmente).

5) Fase 5 – Desentesificação e dissipação das ZCAS; nesta fase a geração de energia é desfavorecida [$G(P_M)$ e $G(P_E)$ negativos] através do resfriamento e chuva na região das ZCAS, a instabilidade baroclínica úmida é desfavorecida e K_M começa ceder energia para P_M , o que inibe a intensificação dos movimentos médios e, como não há geração de energia, os ventos são mais fracos e as ZCAS tendem a se dissipar.

Contudo, essas explicações foram baseadas nas análises dos resultados médios das energéticas de ZCAS e de um estudo de caso. Por essa razão, sugere-se análises mais detalhadas desses aspectos, analisando separadamente uma quantidade considerável de casos (20 ou mais) em cada padrão para maior sustentabilidade do que realmente é apresentado em cada fase.

Figura 4.44 - Diagrama de fases de evolução dos eventos de ZCAS



Fonte: Produção do autor.

4.4.2 Modelo conceitual dos padrões de circulação meridional e dos aspectos energéticos das ZCAS

Modelo conceitual são de extrema importância para a compreensão dos aspectos dominante de um dado fenômeno em estudo. Representam uma forma de visualizar os principais resultados de um estudo mostrando as características observadas.

Na Figura 4.45 apresenta-se o diagrama do modelo conceitual das características da circulação meridional nas células de Hadley e Ferrel e energética das ZCAS. Os aspectos apresentados nesta figura são válidos para os três padrões. Na América do Sul (AS) são observados diversos fenômenos de interesse científico que ainda carecem de entendimento. É a primeira vez que um estudo investiga as características ener-

gética das ZCAS e trás átona como as diferentes células de circulação se comportam durante os eventos de ZCAS em cada padrão. As características apresentadas nesta figura são baseadas nos resultados médios obtidos neste estudo. Contudo, devido à complexidade das características da circulação da célula de Ferrel no seu ramo ascendente, as características associadas às mudanças de posição das duas células (Ferrel e Hadley) em cada padrão não são aqui representadas nem discutidas, sendo por tanto, um assunto a ser investigado em estudos futuro.

Como podemos observar na legenda, nesta figura temos as regiões de levantamento de massas de ar nos trópicos na região da ZCIT na célula de Hadley e descendência do ar nas latitudes perto de 32°S , junto da região de localização da alta subtropical. Em aproximadamente 60°S é encontrada a célula indireta de Ferrel com o ramo descendente em 32°S e ascendente em $\pm 60^{\circ}\text{S}$ nas regiões de localização dos ciclones e anticiclones extratropicais.

Estão representados ainda as localizações dos jatos Polar e subtropical, o transporte de ar quente para as altas latitude e de ar frio para as latitudes mais baixa por meios das células de circulação, a inclinação da frente fria e as áreas de maior geração de energias potenciais [$G(P_M)$ e $G(P_E)$]. A combinação do jato Polar e subtropical (jato acoplado) é igualmente apresentado, o qual é observado durante os eventos de PS. Áreas com as linhas pontilhadas em azul escuro são as regiões de maior contribuição de geração de energia potencial do estado básico e da perturbação $G(P_M)$ e $G(P_E)$ respectivamente. As pontilhadas em azul claro são as áreas onde a maior contribuição é apenas de $G(P_M)$.

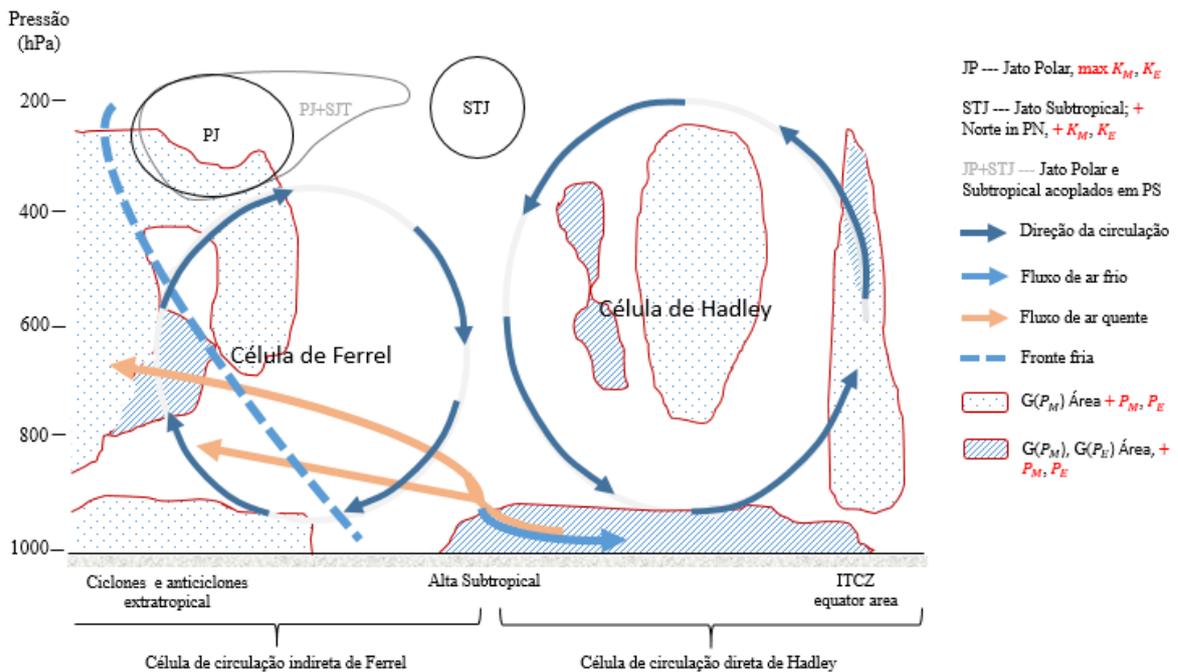
Conforme o diagrama, as maiores gerações de energia estão concentradas nos trópicos sobre a região da ZCIT em toda camada da troposfera, em toda baixa troposfera dos trópicos e parte dos subtropicais e nas regiões entre 800 e 300 hPa em torno de 14 e 20°S . Nas latitudes média, as maiores contribuições são encontradas nas regiões dos ciclones extratropicais na baixa troposfera e acima de 850 hPa. Essas características mostram com razoável concordância os padrões médios zonais de nebulosidade e de regiões de maior ocorrência de chuvas observadas sobre a AS durante os eventos de ZCAS.

Em termos de energética, os jatos subtropicais são marcados por fortes instabilidades barotrópicas e tende a se deslocar mais para o norte em eventos de PN, enquanto que em eventos de PS tende a ser acoplado ao jato Polar. Além disso, o jato se torna mais intenso em evento de PN e tem maior influência nas regiões de atuação das ZCAS neste padrão. Neste caso, a célula de Hadley desloca-se levemente para o

norte e com um ramo descendente mais instável.

Observou-se ainda que as regiões de maior contribuição de geração de energia, coincidem com as regiões de maior P_M e P_E nos trópicos e nas latitudes médias e que as atividades mais intensas ligadas às células de circulação estão nas regiões de maior K_M e K_E e também de máximos fluxos de energia cinética. Essas características estão representadas no diagrama do modelo conceitual (Figura 4.45), onde em eventos de PN as posições dos centros dos K_M e K_E ligados a circulação de Hadley são ligeiramente deslocados para o norte.

Figura 4.45 - Diagrama do modelo conceitual dos padrões de circulação meridional e energética durante os eventos de ZCAS.



Fonte: Produção do autor.

5 CONCLUSÕES

Neste estudo, foi investigado a natureza energética atmosférica dos eventos de ZCAS. As análises são focadas nas regiões de atuação dos eventos nos diferentes padrões de localização, Norte (PN), Central (PC) e Sul (PS).

Inicialmente discutimos os métodos usados na identificação dos eventos de ZCAS por meio de comparações entre as datas utilizadas neste estudo "AE1119" e as de Rosa (2017) e através de análises estatísticas simples. Nestas, percebemos que para uma análise em que as características médias climatológicas são desejadas, o método usado para identificação dos casos, tem pouco impacto, o que dá uma alta confiabilidade das datas usada neste estudo.

Outra conclusão importante retirada das comparações das data, é que os resultados dos estudos feitos por Rosa (2017) são de alta confiabilidade apesar de algumas falhas tais como: na identificação da real data de início ou final do evento, a tendência subdivisão de caso em alguns casos e possibilidade de existências de casos não identificado. Esses problemas sugerem que estudos devem ser feitos para identificar os motivos dessas falhas e assim, melhorar o método em questão.

Os resultados das análises estatísticas sugerem ainda que a alta frequência de ocorrência dos eventos de ZCAS não pode ser um reflexo de mudanças da metodologia usada para a identificação dos episódios ao longo dos anos como supôs Quadro et al. (2016), pois a influência da metodologia é muito baixa para explicar a alta frequência observada (inferior a 1%). Por isso, acreditamos ser uma influência associada a uma variabilidade climática, o qual buscamos caracterizar usando a energética de Lorenz.

As análises das características sinóticas dos eventos de ZCAS em cada padrão de localização mostram que, o posicionamento da alta da Bolívia (AB) em altos níveis segue o padrão do posicionamento das ZCAS, isto é, mais ao norte em eventos de PN, centrada sobre a Bolívia em evento de PC e mais ao sul em PS. O que era esperado (na visão do autor), uma vez que a região de fortes convecção associada às ZCAS se desloca seguindo cada padrão (Figura 4.3), além do mais, a AB surge como resposta ao intenso aquecimento sobre o Altiplano Boliviano em baixos níveis da troposfera (ZHOU; LAU, 1998) e dos aspectos ligados às propagações de ondas tropicais excitadas pela convecção sobre a Amazônia (SILVA DIAS; SCHUBERT, 1983). A presença do VCAN é deslocada mais para o oceano em eventos de PN e mais sobre o continente em PS, e isso é de grande importância para as previsões desse sistema

uma vez que este tem grande influência nas chuvas sobre o NEB. Neste caso, as regiões de levantamento de médios para altos níveis e conseqüentemente as chuvas associadas aos VCAN terão maior impacto sobre o NEB em eventos de PN.

Nossos resultados das análises sinóticas evidenciam ainda que a maior influência dos vórtices transiente (sistemas frontais) de latitudes médias na intensificação da convecção tropical é durante os eventos de PS tal como encontrado por [Andrade \(2011\)](#). Além disso, a circulação ciclônica em baixos níveis da atmosfera sobre o sudeste do Brasil ficou evidente e tende a ser fechada em eventos de PS.

Outro detalhe interessante é que o fluxo de umidade originado do Atlântico e das regiões norte da AS (sobre a Amazônia) divide-se em dois: um alimenta as ZCAS e outro de menor intensidade que segue em direção a região de localização do JBN observados durante os eventos de PN e PC. No entanto, durante os eventos de PS um único fluxo é observado ([Figura C.3 \(c\)](#)) tal como foi constatado por [Herdies et al. \(2002\)](#), que dá uma configuração de não existência do JBN.

Assim, podemos dizer os diferentes padrões das ZCAS estão associadas aos diferentes posicionamento e inclinação da convecção proporcionados pela convecção tropical e pelo levantamento dos jatos, além do posicionamento da AB e do VCAN e da incursão dos sistemas frontais de latitudes médias que permitem o seu estabelecimento.

As análises dos resultados dos componentes de geração do ciclo de energia de Lorenz (CEL) nos diagramas sugerem que nas ZCAS, a energia é gerada no estado básico (média zonal) da energia potencial disponível P_M a uma taxa média de $34,89 \text{ Wm}^{-2}$ e que o resfriamento desfavorece a geração de energia potencial da perturbação [$G(P_E) = -5,69 \text{ Wm}^{-2}$]. Porém, as análises de evolução de um estudo de caso ([Subsubseção 4.3.3.2](#)) mostraram que a energia foi gerada nos dois componentes [$G(P_M)$ e $G(P_E)$] nos instantes iniciais de formação do evento através de uma maior correlação/covariância positiva entre o gradiente horizontal de temperatura e a taxa de calor diabático, que são causados pelo aquecimento diferenciado entre os trópicos-extratrópicos e Terra-Mar nos instantes iniciais e, do levantamento causado pelos jatos subtropicais na região sul. No entanto, a nebulosidade e chuvas depois que as ZCAS estão formadas tendem a diminuir esse contraste térmico e causar perdas de energias através do resfriamento, que origina um saldo líquido negativo na geração de energia potencial das duas formas [principalmente no componente $G(P_E)$]. Além disso, as estruturas verticais dos componentes de energia para as regiões das ZCASs (no estudos de caso), destacam as influências da maior disponibilidades de radiação solar nos trópicos (principalmente nos instantes iniciais), dos jatos subtropicais na

alta troposfera e das atividades dos ciclones extratropicais, corroborando com as análises dos diagramas.

Na média, todos os componentes de taxas de conversões seguem o sentido de trocas de energias dos diagramas dos CEL, exceto o componente da taxa de conversão barotrópica, onde a instabilidade barotrópica domina durante os eventos de PN [$C(K_E, K_M) < 0$]. Nos componentes de energia, observou-se que P_M nas regiões de atuação das ZCAS é uma ordem de grandeza inferior ($P_M = 1,73 \cdot 10^5 Jm^{-2}$) se comparados com os resultados médios globais obtidos por Marques et al. (2009), Marques et al. (2010), Kim e Kim (2013) e Pan (2015). Porém, aceitável devido ao baixo gradiente horizontal de temperatura (principalmente no trópico) e da área de estudo que é pequena e foi subdividida em áreas ainda menores. No geral, nos componentes de energia, K_M domina nas regiões de atuação das ZCAS com $10,14 \cdot 10^5 Jm^{-2}$ em média, através da grande influência dos jatos subtropicais e, a conversão baroclínica domina sobre a conversão barotrópica, mas a conversão de P_M para K_M domina sobre todos os componentes de conversão.

Contudo, outros aspectos a respeito dos termos de conversões de energias interessantes para serem mencionados, são: o fato da atmosfera nas ZCAS ser barotrópicamente instável nas áreas continentais (subáreas 1 e 2) e na área oceânica mais ao sul (subárea 5, ver Tabela C.4). Isso é um fator importante para a manutenção e desenvolvimento das ZCAS devido ao fato do estado médio dos jatos subtropicais transferir energia para a perturbação [$C(K_E, K_M) < 0$, na área 5]. Essa transferência de energia é maior durante os eventos de PN, pois os ventos associados aos jatos tornam-se mais turbulentos, o que justifica a predominância da instabilidade barotrópica em eventos de PN.

Os resultados das comparações entre os dois períodos (P1 e P2) para componentes de energia nas integrais globais, mostraram que as energias foram maiores durante P2, exceto para K_E onde são praticamente iguais. Nestes resultados, destacam-se os componentes de P_M e P_E onde as diferenças são de 50% e 17,46% respectivamente. Isso sugere que houve uma maior variação de temperatura durante o P2 que podem estar associadas às mudanças climáticas (PAN et al., 2017; HUANG; MCELROY, 2015; LIU et al., 2012) originadas pelo aquecimento global (HANSEN et al., 2006) ou de uma variabilidade climática, que podem explicar a maior ocorrência de eventos de ZCAS durante P2 devido à uma maior disponibilidade de energia.

Para os diferentes padrões, os resultados das integrais globais mostram que a geração de energia $G(P_M)$ é maior durante os eventos de PC e PN, 5,73% e 38,66% superior

que a média de todos os eventos é 12,64% inferior em PS. Do mesmo modo, a perda de P_E através do resfriamento foi 12,13% e 24,43% superior para PC e PN, e 55,71% inferior durante PS. Em geral, os maiores valores dos componentes do CEL nas ZCAS são observados durante os eventos de PN.

Nas estruturas verticais para AS, são destacadas as localizações dos jatos troposféricos em 200 hPa (nas células de Ferrel e Hadley) e das atividades dos ciclones e anticiclones extratropicais nos componentes de energia (K_M e K_E , principalmente), nas taxas de conversões e alguns componentes de fluxos [$B(K_M)$, $B(P_E)$ e $B(K_E)$]. A instabilidade barotrópica domina no ramo superior ascendente e no descendente da célula de Hadley (o que está de acordo com os valores médios obtidos para as subáreas das ZCAS, Tabela C.4). Nas comparações entre períodos, observou-se que a conversão baroclínica nos extratropicos foi superior durante P2 ao passo que a instabilidade barotrópica nos ramos superiores da célula de Hadley foi mais intensa durante P1, mas nas ZCASs, isso parece ser durante P2 (ver subárea 5 na Tabela C.4).

Já na taxa de conversão de P_M para K_M , o consumo de energia pela célula de Ferrel foi superior durante P2, mas a produção de energia na célula de Hadley permaneceu praticamente a mesma [ver Figura 4.12]. Os componentes de energia sugerem uma maior disponibilidade de energia durante P2. Nas taxas de fluxos de K_M , o consumo (geração) de energia cinética é maior na célula de Hadley em 200 hPa nos subtropicos durante P2, que foi refletido no componente de energia K_M , onde os jatos subtropicais são mais intensos durante P2. Estes fatores contribuíram para uma maior quantidade de energia observada nas ZCAS durante P2, onde nas integrais globais para os componentes de energia foram 17% superior. Os resultados das estruturas verticais, evidenciam uma possível intensificação das atividades das células de circulação de Hadley e Ferrel durante P2 e corroboram para explicar a maior frequência de ocorrência dos episódios de ZCASs observados durante P2.

As análises das estruturas verticais dos diferentes padrões revelaram que, nos componentes de energia, a energia é maior durante eventos de PN e menor durante PS. Além disso, os jatos de latitudes médias e subtropicais são acoplados durante PS. Nos componentes de conversões, destacam-se que os processos baroclínicos são semelhantes nos três padrões, e que a região localizada em 4°S (na localização da ZCIT, na baixa troposféra) é baroclinicamente estável, isto é, P_E cedendo energia para P_M e baixa da conversão de P_E para K_E , que justifica a redução dos movimentos (velocidade do vento) em pequena escala, principalmente em baixos níveis

e no continente onde o efeito atrito é maior. As instabilidades barotrópicas [$C(K_E, K_M) < 0$] domina nos ramos superiores ascendente e descendente da célula de Hadley sobre AS em todos os padrões, mas nos trópicos é mais intenso em eventos de PN. No geral, as conversões barotrópicas nas células de circulação de Hadley e Ferrel sobre AS é superior durante PC e PS e menor durante PN. Nas regiões da célula de Ferrel, a conversão barotrópica em PN apresentou um padrão diferente de PC e PS, que sugerimos que esteja relacionado à existência de uma pequena célula de Ferrel barotrópicamente instável. As taxas de conversões de P_M para K_M evidenciam um maior (menor) consumo de energia da célula de Ferrel durante PS (PN, que pode ser igualmente influenciado pela pequena célula), mas a produção pela célula de Hadley é maior durante PN.

Os componentes de fluxos de energia cinética das duas formas [$B(K_M)$ e $B(K_E)$], evidenciam o consumo de energia na parte superior do ramo descendente da célula de Hadley e produção (ou fonte) no ramo ascendente (descendente) da célula de Hadley (Ferrel), porém, com maior intensidade em eventos de PN. $B(E)$, mostra que a produção de energia é favorecida nas regiões dos jatos juntos ao ramo descendente da célula de Hadley em todos os padrões, mas com uma produção maior durante os eventos de PN. Esses aspectos contribuíram para a maior quantidade de energia observada durante os eventos de PN, onde a diferença nas integrais globais nos componentes de energia foram de 20,45% e 21% para PC e PS respectivamente.

Nas estruturas 3-D, destacam-se que o máximo de P_E estão sobre os Andes e os de K_E nas regiões de trilhos de tempestades. No entanto, parece evidente a localização das ZCAS nos diferentes padrões nos componentes de K_E , de fluxo $B(P_E)$ apresentando-se como uma região de consumo de P_E e em $B(E)$ como uma região de produção de K_E .

Os resultados mostram que: a) as ZCAS são categorizadas por regiões fonte e sumidouros de energia; b) a energia cinética média zonal é favorecida nas regiões mais ao sul e desfavorecida nos trópicos, que é consistente com as características da circulação médias observadas sobre América do Sul (AS) em eventos de ZCAS e c) que a energia cinética da perturbação é produzida em toda extensão de atuação das ZCAS. Os resultados sugerem ainda que as ZCAS são os meios pela qual, o transporte de calor dos trópicos para os extratropicos é efetuado.

Assim, pode-se então concluir que as ZCAS são geradas e mantidas por dois fatores: uma ligada a convecção mais intensa nos trópicos originadas pela maior disponibilidade de radiação solar (principalmente nos instantes iniciais) e outra pela convecção

ao sul proporcionadas pelos jatos subtropicais e vórtices transientes de latitudes médias.

No mais, sugere-se o desenvolvimento de um estudo para investigar a possibilidade da existência desta pequena célula de circulação de Ferrel sobre a AS; a análise da energética das ZCAS em eventos de ENOS; um estudo mais abrangente dedicado a analisar as estruturas dos componentes da energética dos eventos de ZCASs na região de atuação das ZCAS, tal como feito para o estudo de caso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, F. M. de. **Influências remotas na previsibilidade, estrutura e ciclo de vida da Zona de Convergência do Atlântico Sul**. 177 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/398H4P8%3E>>. 7, 8, 14, 15, 25, 27, 34, 35, 39, 43, 110, 131

ARAVÉQUIA, J. A. **Funções de influência com dependência temporal: aplicações na interpretação da deriva de prognósticos de tempo e da gênese de anomalias climáticas**. 242 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003. 14, 15, 16, 43

BARRY, R. G.; CHORLEY, R. J. **Atmosfera, tempo e clima**. 9. ed. [S.l.: s.n.], 2013. 512 p. ISBN 978-85-65837-10-1. 1, 5, 18, 79, 129

CARVALHO, L. M. V.; JONES, C.; LIEBMANN, B. Extreme precipitation events in southeastern South America and large-scale convective patterns in the South Atlantic Convergence Zone. **Journal of Climate**, v. 15, n. 17, p. 2377–2394, sept 2002. ISSN 0894-8755. Disponível em: <<http://ovidsp.ovid.com/ovidweb.cgi?T=JS%26PAGE=reference%26D=emed11%26NEWS=N%26AN=2013125976http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0442%282002%29015%3C2377%3A%26PEISS%3E2.0.CO%3B2>>. 1, 7, 12

_____. The South Atlantic Convergence Zone: intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. **Journal of Climate**, v. 17, n. 1, p. 88–108, 2004. ISSN 08948755. 1, 7, 12, 14, 15, 43

CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J.; DIAS, M. A. F. S. **Tempo e clima no Brasil**. São Paulo, Brasil: [s.n.], 2009. 464 p. ISBN 978-85-86238-92-5. 1, 4

CAVALCANTI, I. F. A.; MARENGO, J. A.; SATYAMURTY, P.; NOBRE, C. A.; TROSNIKOV, I.; BONATTI, J. P.; MANZI, A. O.; TARASOVA, T.; PEZZI, L. P.; D'ALMEIDA, C.; SAMPAIO, G.; CASTRO, C. C.; SANCHES, M. B.; CAMARGO, H. Global climatological features in a simulation using the CPTEC–COLA AGCM. **Journal of Climate**, v. 15, n. 21, p. 2965–2988, nov

2002. ISSN 0894-8755. Disponível em:

<[http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0442\(1992\)282002\(029015\)3C2965:3AGCFIAS3E2.0.CO;2](http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0442(1992)282002(029015)3C2965:3AGCFIAS3E2.0.CO;2)>. 7, 13, 43

CHELLIAH, M.; ARKIN, P. Large-scale interannual variability of monthly outgoing longwave radiation anomalies over the global tropics. **Journal of Climate**, v. 5, n. 4, p. 371–389, apr 1992. ISSN 0894-8755. Disponível em:

<[https://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0442\(1992\)005\(030371\)3ALSIVOM3E2.0.CO;2](https://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0442(1992)005(030371)3ALSIVOM3E2.0.CO;2)>. 42

COELHO, C. A. S.; OLIVEIRA, C. P. de; AMBRIZZI, T.; REBOITA, M. S.; CARPENEDO, C. B.; CAMPOS, J. L. P. S.; TOMAZIELLO, A. C. N.; PAMPUCH, L. A.; CUSTÓDIO, M. d. S.; DUTRA, L. M. M.; DA ROCHA, R. P.; REHBEIN, A. The 2014 southeast Brazil austral summer drought: regional scale mechanisms and teleconnections. **Climate Dynamics**, v. 46, n. 11-12, p. 3737–3752, jun 2016. ISSN 0930-7575. Disponível em:

<<http://link.springer.com/10.1007/s00382-015-2800-1>>. 94

COSTA, S. M. S.; SHINE, K. P. Outgoing longwave radiation due to directly transmitted surface emission. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 69, n. 6, p. 1865–1870, jun 2012. ISSN 0022-4928. Disponível em:

<<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JAS-D-11-0248.1>>. 3

DA SILVA, L. A. **Energética atmosférica na América do Sul e oceanos adjacentes e impactos climáticos de agentes naturais**. 266 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010. 1, 8, 21, 46

DA SILVA, L. A.; SATYAMURTY, P. Evolution of the Lorenz energy cycle in the Intertropical Convergence Zone in the South American sector of the Atlantic Ocean. **Journal of Climate**, v. 26, n. 10, p. 3466–3481, may 2013. ISSN 0894-8755. Disponível em:

<<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JCLI-D-11-00426.1>>. 1, 21, 22, 46

DEE, D. P.; UPPALA, S. M.; SIMMONS, A. J.; BERRISFORD, P.; POLI, P.; KOBAYASHI, S.; ANDRAE, U.; BALMASEDA, M. A.; BALSAMO, G.; BAUER, P.; BECHTOLD, P.; BELJAARS, A. C. M.; BERG, L. van de; BIDLOT, J.; BORMANN, N.; DELSOL, C.; DRAGANI, R.; FUENTES, M.; GEER, A. J.;

HAIMBERGER, L.; HEALY, S. B.; HERSBACH, H.; HÓLM, E. V.; ISAKSEN, L.; KÅLLBERG, P.; KÖHLER, M.; MATRICARDI, M.; MCNALLY, A. P.; MONGE-SANZ, B. M.; MORCRETTE, J.-J.; PARK, B.-K.; PEUBEY, C.; ROSNAY, P. de; TAVOLATO, C.; THÉPAUT, J.-N.; VITART, F. The ERA-interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 137, n. 656, p. 553–597, apr 2011. ISSN 00359009. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/qj.828>>. 25

DOPPLICK, T. G. Radiative heating of the global atmosphere. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 29, n. 7, p. 1278–1294, oct 1972. ISSN 0022-4928. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0469%7D281972%7D29029%7D3C1278%7D3ARHOTGA%7D3E2.0.CO%7D3B2>>. 67

EMANUEL, K. Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. **Nature**, v. 436, n. 7051, p. 686–688, aug 2005. ISSN 0028-0836. Disponível em: <<http://www.nature.com/articles/nature03906>>. 48

ESCOBAR, G. C. J. **ZONA DE CONVERGÊNCIA DO ATLÂNTICO SUL (ZCAS)**: critério de detecção para uso em centros operacionais de previsão de tempo. São José dos Campos, SP: INPE, 2019. 1, 27, 34, 39, 131

GAN, M. A.; KOUSKY, V. E.; ROPELEWSKI, C. F. The South America monsoon circulation and its relationship to rainfall over west-central Brazil. **Journal of Climate**, v. 17, n. 1, p. 47–66, 2004. ISSN 08948755. 1, 4, 5

GAN, M. A.; RAO, V. B. Energetics of the high frequency disturbances over South America. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 17, n. 1, p. 20–28, mar 1999. ISSN 0102-261X. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-261X1999000100003&lng=en&nrm=iso&tlng=en>. 21, 22

GAN, M. A.; SANTOS, L. F. dos; LIMA, J. R. A.; AFONSO, J. M. d. S.; SILVA, A. B. da. Monção na América do Sul. **Revista Climanálise**, v. 04, p. 01–06, 2016. 5, 7

GRAFF, L. S.; LACASCE, J. H. Changes in the extratropical storm tracks in response to changes in SST in an AGCM. **Journal of Climate**, v. 25, n. 6, p. 1854–1870, mar 2012. ISSN 0894-8755. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/JCLI-D-11-00174.1>>. 70

GRIMM, A. M.; SILVA DIAS, P. L. Analysis of tropical–extratropical interactions with influence functions of a barotropic model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 52, n. 20, p. 3538–3555, oct 1995. ISSN 0022-4928. Disponível em: <[http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0469\(201995\)29052\(3C3538\)3AAOTIWI\(3E2.0.CO\(3B2\)\)](http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0469(201995)29052(3C3538)3AAOTIWI(3E2.0.CO(3B2)))>. 15, 16

GRUBER, A.; KRUEGER, A. F. The status of the NOAA outgoing longwave radiation data set. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 65, n. 9, p. 958–962, sep 1984. ISSN 0003-0007. Disponível em: <[http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0477\(281984\)29065\(3C0958\)3ATSOTNO\(3E2.0.CO\(3B2\)\)](http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0477(281984)29065(3C0958)3ATSOTNO(3E2.0.CO(3B2)))>. 42

HANSEN, J.; SATO, M.; RUEDY, R.; LO, K.; LEA, D. W.; MEDINA-ELIZADE, M. Global temperature change. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 103, n. 39, p. 14288–14293, sep 2006. ISSN 0027-8424. Disponível em: <<http://www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.0606291103>>. 49, 111

HERDIES, D. L.; SILVA, A. da; DIAS, M. A. F. S.; FERREIRA, R. N. Moisture budget of the bimodal pattern of the summer circulation over South America. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. D20, p. 8075, 2002. ISSN 0148-0227. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/2001JD000997>>. 5, 41, 65, 70, 110

HERSBACH, H.; DICK, L. ERA5 reanalysis is in production. **ECMWF Newsletter**, v. 147, n. 147, p. 7, 2016. Disponível em: <<http://www.ecmwf.int/sites/default/files/elibrary/2016/16299-newsletter-no147-spring-2016.pdf>>. 26

HOLTON, J. R. **An introduction to dynamic meteorology**. 4. ed. [S.l.]: Elsevier, 2004. 532 p. ISBN 0-12-354015-1. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/C20090633948>>. 16, 29, 45, 127, 129, 144

HOLTON, J. R.; HAKIM, G. J. **An introduction to dynamic meteorology**. 5. ed. [S.l.]: Elsevier, 2013. 552 p. ISSN 0002-9505. ISBN 9780123848666. Disponível em: <<http://aapt.scitation.org/doi/10.1119/1.1987371https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/C20090633948>>. 1, 45, 47, 127, 144

HOSKINS, B. J.; AMBRIZZI, T. Rossby wave propagation on a realistic longitudinally varying flow. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 50, n. 12,

p. 1661–1671, jun 1993. ISSN 0022-4928. Disponível em:

<[http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0469\(2005\)18:0290\(3C1661\)3ARWPOAR\(3E2.0.CO;3B2](http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0469(2005)18:0290(3C1661)3ARWPOAR(3E2.0.CO;3B2)>. 43

HOSKINS, B. J.; HODGES, K. I. A new perspective on Southern Hemisphere storm tracks. **Journal of Climate**, v. 18, n. 20, p. 4108–4129, oct 2005. ISSN 0894-8755. Disponível em:

<<http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/JCLI3570.1>>. 70, 147

HUANG, J.; MCELROY, M. B. Contributions of the Hadley and Ferrel circulations to the energetics of the atmosphere over the past 32 years. **Journal of Climate**, v. 27, n. 7, p. 2656–2666, apr 2014. ISSN 0894-8755. Disponível em:

<<http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/JCLI-D-13-00538.1>>. 48

_____. Thermodynamic disequilibrium of the atmosphere in the context of global warming. **Climate Dynamics**, v. 45, n. 11-12, p. 3513–3525, dec 2015. ISSN 0930-7575. Disponível em:

<<http://link.springer.com/10.1007/s00382-015-2553-x>>. 48, 111

KIM, Y. H.; KIM, M. K. Examination of the global lorenz energy cycle using MERRA and NCEP-reanalysis 2. **Climate Dynamics**, v. 40, n. 5-6, p. 1499–1513, 2013. ISSN 09307575. 1, 18, 19, 20, 21, 23, 30, 35, 45, 53, 54, 56, 94, 111

KODAMA, Y. Large-Scale Common Features of Subtropical Precipitation Zones (the Baiu Frontal Zone, the SPCZ, and the SACZ) Part I: Characteristics of Subtropical Frontal Zones. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 70, n. 4, p. 2947–2957, 1992. Disponível em:

<<http://www.st.hirosaki-u.ac.jp/~kodama/paper/1992JMSJKodama.pdf>>. 1, 11, 141

KOPP, G.; LEAN, J. L. A new, lower value of total solar irradiance: evidence and climate significance. **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 1, 2011. ISSN 00948276. 2

KOUSKY, V. E.; GAN, M. A. Upper tropospheric cyclonic vortices in the tropical South Atlantic. **Tellus**, v. 33, n. 6, p. 538–551, jan 1981. ISSN 0040-2826.

Disponível em:

<<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.3402/tellusa.v33i6.10775>>.

7

LI, L.; INGERSOLL, A. P.; JIANG, X.; FELDMAN, D.; YUNG, Y. L. Lorenz energy cycle of the global atmosphere based on reanalysis datasets. **Geophysical**

Research Letters, v. 34, n. 16, aug 2007. ISSN 00948276. Disponível em:
<<http://doi.wiley.com/10.1029/2007GL029985>>. 1

_____. _____. **Geophysical Research Letters**, v. 34, n. 16, 2007. ISSN
00948276. 21, 54, 94

LI, L.; JIANG, X.; CHAHINE, M. T.; WANG, J.; YUNG, Y. L. The mechanical
energies of the global atmosphere in El Niño and La Niña years. **Journal of the
Atmospheric Sciences**, v. 68, n. 12, p. 3072–3078, dec 2011. ISSN 0022-4928.

Disponível em:

<<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/JAS-D-11-072.1>>. 21

LIU, J.; SONG, M.; HU, Y.; REN, X. Changes in the strength and width of the
Hadley circulation since 1871. **Climate of the Past**, v. 8, n. 4, p. 1169–1175, jul
2012. ISSN 1814-9332. Disponível em:

<<https://www.clim-past.net/8/1169/2012/>>. 48, 111

LORENZ, E. N. Available potential energy and the maintenance of the general
circulation. **Tellus**, v. 2, p. 157 – 167, 1955. 1, 16, 17, 18, 29

_____. Barotropic instability of Rossby wave motion. **Journal of the
Atmospheric Sciences**, v. 29, n. 2, p. 258–265, mar 1972. ISSN 0022-4928.

Disponível em: <[http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/
1520-0469%7D281972%7D29029%7D3C0258%7D3ABIORWM%7D3E2.0.CO%7D3B2](http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0469%7D281972%7D29029%7D3C0258%7D3ABIORWM%7D3E2.0.CO%7D3B2)>. 127

MADDEN, R. A.; JULIAN, P. R. Observations of the 40–50-day tropical
oscillation—a review. **Monthly Weather Review**, v. 122, n. 5, p. 814–837, may
1994. ISSN 0027-0644. Disponível em:

<[http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/
1520-0493%7D281994%7D29122%7D3C0814%7D3A00TDT0%7D3E2.0.CO%7D3B2](http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0493%7D281994%7D29122%7D3C0814%7D3A00TDT0%7D3E2.0.CO%7D3B2)>. 14

MARENGO, J. A.; DOUGLAS, M. W.; SILVA DIAS, P. L. The South American
low-level jet east of the Andes during the 1999 LBA-TRMM and LBA-WET AMC
campaign. **Journal of Geophysical Research D: Atmospheres**, v. 107, n. 20,
2002. ISSN 01480227. 5

MARENGO, J. A.; LIEBMANN, B.; GRIMM, A. M.; MISRA, V.; SILVA DIAS,
P. L.; CAVALCANTI, I. F.; CARVALHO, L. M.; BERBERY, E. H.; AMBRIZZI,
T.; VERA, C. S.; SAULO, A. C.; NOGUES-PAEGLE, J.; ZIPSER, E.; SETH, A.;
ALVES, L. M. Recent developments on the South American monsoon system.

International Journal of Climatology, v. 32, n. 1, p. 1–21, 2012. ISSN
08998418. 7

MARQUES, C.; ROCHA, A.; CORTE-REAL, J. Comparative energetics of ERA-40, JRA-25 and NCEP-R2 reanalysis, in the wave number domain. **Dynamics of Atmospheres and Oceans**, v. 50, n. 3, p. 375–399, oct 2010. ISSN 03770265. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0377026510000126>>. 45, 111

MARQUES, C. A. F.; ROCHA, A.; CORTE-REAL, J.; CASTANHEIRA, J. M.; FERREIRA, J.; MELO-GONÇALVES, P. Global atmospheric energetics from NCEP-reanalysis 2 and ECMWF-ERA40 reanalysis. **International Journal of Climatology**, v. 29, n. 2, p. 159–174, feb 2009. ISSN 08998418. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/joc.1704>>. 45, 111

MENDONÇA, R. W. B.; BONATTI, J. P. Estudo da energética modal para episódios de ZCAS. Parte I: análise observacional. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, n. 4, p. 360–380, dec 2008. ISSN 0102-7786. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-77862008000400001&lng=pt&tlng=pt>. 1, 8, 22

_____. Estudo da energética modal para episódios de ZCAS. parte II: impacto da resolução do modelo e da parametrização de convecção. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 23, n. 4, p. 381–403, 2008. 1, 8, 22

MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. d. O. Dinâmica das chuvas no nordeste brasileiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 12., 2002, Foz do Iguaçu, PR. **Anais...** p. 1334–1342, 2002. 4, 5

_____. Uma revisão da dinâmica das chuvas no nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 17, n. 1, p. 1–10, 2002. 4, 5

MUENCH, H. S. On the dynamics of the wintertime stratosphere circulation. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 22, n. 4, p. 349–360, jul 1965. ISSN 0022-4928. Disponível em: <[http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0469\(1965\)22:2902:3C0349:3AOTDOTW3E2.0.CO;3B2](http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0469(1965)22:2902:3C0349:3AOTDOTW3E2.0.CO;3B2)>. 23, 30, 31

NATIONAL ASTRONAUTICAL AND SPACE ADMINISTRATION - NASA. **Esquema do espectro eletromagnético**. 2007. Disponível em: <http://faculty.icc.edu/easc111lab/labs/labi/prelab_i.html>. 2

- NESTARES, V. J. A. **Lorenz energetic applied to understanding of squall lines propagation over the Amazon basin**. 90 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017. 1, 21
- NIELSEN, D. M.; BELÉM, A. L.; MARTON, E.; CATALDI, M. Dynamics-based regression models for the South Atlantic Convergence Zone. **Climate Dynamics**, v. 0, n. 0, p. 0, oct 2018. ISSN 0930-7575. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s00382-018-4460-4>><<http://link.springer.com/10.1007/s00382-018-4460-4>>. 14
- NOGUÉS-PAEGLE, J.; MO, K. C. Alternating wet and dry conditions over South America during Summer. **Monthly Weather Review**, v. 125, n. 2, p. 279–291, 1997. ISSN 0027-0644. 14
- OORT, A. H. On estimates of the atmospheric energy cycle. **Monthly Weather Review**, v. 92, n. 11, p. 483 – 493, 1964. xi, xiii, 8, 16, 17, 19, 20, 21, 22, 28
- OORT, A. H.; PEIXÓTO, J. P. The annual cycle of the energetics of the atmosphere on a planetary scale. **Journal of Geophysical Research**, v. 79, n. 18, p. 2705–2719, jun 1974. ISSN 01480227. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1029/JC079i018p02705>>. 20, 22, 23, 35
- PAN, Y. **The Lorenz energy cycle of the global atmosphere during the past 35 years (1979-2013)**. 105 p. Tese (PhD) — University of Houston, Houston, 2015. 1, 4, 19, 21, 35, 45, 47, 56, 111, 129
- PAN, Y.; LI, L.; JIANG, X.; LI, G.; ZHANG, W.; WANG, X.; INGERSOLL, A. P. Earth's changing global atmospheric energy cycle in response to climate change. **Nature Communications**, v. 8, p. 14367, jan 2017. ISSN 2041-1723. Disponível em: <<http://www.nature.com/doi/10.1038/ncomms14367>>. 1, 21, 48, 111
- PEIXOTO, J. P.; OORT, A. H. **Physics of climate**. New York, NY: American Institute of Physics., 1992. 1–520 p. ISBN 0-88381-711-6. 20, 94, 129, 144
- PHILLIPS, N. A. The general circulation of the atmosphere: a numerical experiment. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 82, n. 352, p. 123–164, apr 1956. ISSN 00359009. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/qj.49708235202>>. 20
- POLI, P.; HERBACH, H.; DEE, D. P.; BERRISFORD, P.; SIMMONS, A. J.; VITART, F.; LALOYLAUX, P.; TAN, D. G. H.; PEUBEY, C.; THÉPAUT, J.-N.;

TRÉMOLET, Y.; HÓLM, E. V.; BONAVIDA, M.; ISAKSEN, L.; FISHER, M. ERA-20C: An atmospheric reanalysis of the twentieth century. **Journal of Climate**, v. 29, n. 11, p. 4083–4097, jun 2016. ISSN 0894-8755. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/JCLI-D-15-0556.1>>. 20

QUADRO, M. F. L. D.; PEZZI, L. P.; ROSA, E. B. O Climanálise e o monitoramento da ZCAS nos últimos 30 anos. **Revista Climanálise**, v. 04, p. 19–25, 2016. Disponível em: <<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/revista/pdf/30anos/quadroetal.pdf>>. 8, 9, 13, 28, 34, 39, 94, 109

QUADRO, M. F. L. de. **Estudo de episódios de Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre a América do Sul**. São José dos Campos, SP: INPE, 1994. 124 p. 1, 11, 12, 13

QUADRO, M. F. L. de. **Estudo de vórtices ciclônicos de mesoescala associados à Zona de Convergência do Atlântico Sul**. 180 p. Tese (Doutorado em Meteorologia) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. 7, 8, 28, 34, 39, 94

RAO, V. B.; BONATTI, J. P. On the origin of upper tropospheric cyclonic vortices in the South Atlantic ocean and adjoining Brazil during the summer. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 37, n. 1, p. 11–16, 1987. ISSN 01777971. 7, 36

RAO, V. B.; FRANCHITO, S. H.; GAN, M. A.; GEROLAMO, R. O. P. Duration of the South America summer monsoon is increasing. **Atmospheric Science Letters**, v. 15, n. 2, p. 110–113, apr 2014. ISSN 1530261X. Disponível em: <<http://doi.wiley.com/10.1002/asl2.476>>. 4, 5, 7

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P. da; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 185–204, jun 2010. ISSN 0102-7786. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-77862010000200004&lng=pt&tlng=pt>. 1, 4, 6

REBOITA, M. S.; VEIGA, J. A. P. Análise sinótica e energética de um VCAN que causou chuva no deserto do atacama em março de 2015. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 1, p. 123–139, 2017. ISSN 19824351. 11

ROSA, E. B. **Desempenho de um método automático de detecção de episódios de ZCAS**. 1 – 105 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento

Remoto) — Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017. 12, 27, 34, 39, 40, 41, 88, 109, 131, 136

ROSA, M. B.; FERREIRA, N. J.; GAN, M. A.; MACHADO, L. H. R. Energetics of cyclogenesis events over the southern coast of Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 3, p. 231–245, 2013. 21

SACRAMENTO NETO, O. B.; ESCOBAR, G. C. J.; SILVA, P. E. D. da. Método objetivo para identificar episódios de Zonas de Convergência de Umidade (ZCOU) no ambiente operacional do Centro de Previsão de Tempo e Estados Climáticos - CPTEC. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 9., 2010, Belém, PA. **Anais...** 2010. 13, 27

SAHA, S.; MOORTHY, S.; PAN, H.-L.; WU, X.; WANG, J.; NADIGA, S.; TRIPP, P.; KISTLER, R.; WOOLLEN, J.; BEHRINGER, D.; LIU, H.; STOKES, D.; GRUMBINE, R.; GAYNO, G.; WANG, J.; HOU, Y.-T.; CHUANG, H.-y.; JUANG, H.-M. H.; SELA, J.; IREDELL, M.; TREADON, R.; KLEIST, D.; Van Delst, P.; KEYSER, D.; DERBER, J.; EK, M.; MENG, J.; WEI, H.; YANG, R.; LORD, S.; DOOL, H. van den; KUMAR, A.; WANG, W.; LONG, C.; CHELLIAH, M.; XUE, Y.; HUANG, B.; SCHEMM, J.-K.; EBISUZAKI, W.; LIN, R.; XIE, P.; CHEN, M.; ZHOU, S.; HIGGINS, W.; ZOU, C.-Z.; LIU, Q.; CHEN, Y.; HAN, Y.; CUCURULL, L.; REYNOLDS, R. W.; RUTLEDGE, G.; GOLDBERG, M. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 91, n. 8, p. 1015–1058, aug 2010. ISSN 0003-0007.

Disponível em:

<<http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/2010BAMS3001.1>>. 21

SELUCHI, M. E.; CHOU, S. C. Synoptic patterns associated with landslide events in the Serra do Mar, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 98, n. 1-2, p. 67–77, sep 2009. ISSN 0177-798X. Disponível em:

<<http://link.springer.com/10.1007/s00704-008-0101-x>>. 11

SILVA DIAS, P. L.; SCHUBERT, W. H. M. D. Large-scale response of the tropical atmosphere to transient convection. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 40, p. 2689 – 2707, 1983. 7, 109

STEPHENS, G. L.; O'BRIEN, D.; WEBSTER, P. J.; PILEWSKI, P.; KATO, S.; LI, J.-l. The albedo of Earth. **Reviews of Geophysics**, v. 53, n. 1, p. 141–163, mar 2015. ISSN 87551209. Disponível em:

<<http://doi.wiley.com/10.1002/2014RG000449>>. 3

STRETEN, N. A. Some characteristics of satellite-Observed bands Of persistent cloudiness over the Southern Hemisphere. **Monthly Weather Review**, v. 101, n. 6, p. 486–495, jun 1973. ISSN 0027-0644. Disponível em:

<[http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0493\(2019\)101\(29101\)3C0486\(3ASCOSB0\)3E2.3.CO\(3\)3B2](http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0493(2019)101(29101)3C0486(3ASCOSB0)3E2.3.CO(3)3B2)>. 11

TRENBERTH, K. E. Storm tracks in the Southern Hemisphere. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 48, n. 19, p. 2159–2178, oct 1991. ISSN 0022-4928.

Disponível em: <[http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0469\(2019\)19\(29048\)3C2159\(3ASTITSH\)3E2.0.CO\(3\)3B2](http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0469(2019)19(29048)3C2159(3ASTITSH)3E2.0.CO(3)3B2)>. 70, 147

VEIGA, J. A. P.; PEZZA, A. B.; AMBRIZZI, T.; RAO, V. B.; FRANCHITO, S. H.; YOSHIDA, M. C. The energy cycle associated to the Pacific Walker circulation and Its relationship to ENSO. **Atmospheric and Climate Sciences**, v. 03, n. 04, p. 627–642, 2013. ISSN 2160-0414. 30, 31

VEIGA, J. A. P.; PEZZA, A. B.; SIMMONDS, I.; Silva Dias, P. L. An analysis of the environmental energetics associated with the transition of the first South Atlantic hurricane. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 15, 2008. ISSN 00948276. 1, 21, 30

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. 2. ed. Viçosa, MG, Brasil: [s.n.], 2012. 460 p. ISBN 978-85-7269-432-2. 1

VIEIRA, L. E. A.; NORTON, A.; DUDOK DE WIT, T.; KRETZSCHMAR, M.; SCHMIDT, G. A.; CHEUNG, M. C. M. How the inclination of Earth's orbit affects incoming solar irradiance. **Geophysical Research Letters**, v. 39, n. 16, aug 2012. ISSN 00948276. Disponível em:

<<http://doi.wiley.com/10.1029/2012GL052950>>. 2, 3

VIRJI, H. A preliminary study of summertime tropospheric circulation patterns over South America estimated from cloud winds. **Monthly Weather Review**, v. 109, n. 3, p. 599–610, mar 1981. ISSN 0027-0644. Disponível em:

<[http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0493\(2019\)109\(29109\)3C0599\(3AAPSOST\)3E2.0.CO\(3\)3B2](http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0493(2019)109(29109)3C0599(3AAPSOST)3E2.0.CO(3)3B2)>. 7

WIEL, K. van der; MATTHEWS, A. J.; STEVENS, D. P.; JOSHI, M. M. A dynamical framework for the origin of the diagonal South Pacific and South Atlantic Convergence Zones. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological**

Society, v. 141, n. 691, p. 1997–2010, jul 2015. ISSN 00359009. Disponível em:
<<http://doi.wiley.com/10.1002/qj.2508>>. 141

WOOLLINGS, T. Dynamical influences on European climate: an uncertain future. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 368, n. 1924, p. 3733–3756, aug 2010. ISSN 1364-503X. Disponível em:
<<https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.2010.0040>>. 70, 147

YAMASOE, M. A.; CORRÊA, M. d. P. **Processos radiativos na atmosfera: fundamentos**. São Paulo, Brasil: [s.n.], 2016. 142 p. ISBN 978-85-7975-229-2. 1, 2

YANAI, M.; ESBENSEN, S.; CHU, J.-H. Determination of bulk properties of tropical cloud clusters from large-scale heat and moisture budgets. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 30, n. 4, p. 611–627, may 1973. ISSN 0022-4928. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0469%7D281973%7D29030%7D3C0611%7D3AD0BPOT%7D3E2.0.CO%7D3B2>>. 67

ZHOU, J.; LAU, K.-M. Does a monsoon climate exist over South America? **Journal of Climate**, v. 11, n. 5, p. 1020–1040, may 1998. ISSN 0894-8755. Disponível em: <<http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0442%7D281998%7D29011%7D3C1020%7D3ADAMCEO%7D3E2.0.CO%7D3B2>>. 1, 7, 109

APÊNDICE A - INSTABILIDADE ATMOSFÉRICA

A atmosfera é um fluido cuja as suas propriedades são descritas principalmente pela dependência da pressão e temperatura. As propriedades fundamentais são melhor investigadas quando analisamos as suas propriedades dinâmicas e termodinâmicas. Quando a densidade depende apenas da pressão, trata-se de uma atmosfera barotrópica. E, estamos perante uma atmosfera baroclínica quando a densidade depende da pressão e temperatura.

A.1 Instabilidade barotrópica e baroclínica atmosférica

Quando a temperatura não varia em uma superfície isobárica, ou seja, sem gradiente de temperatura, o que representa um fluxo sem qualquer energia potencial disponível (P_M e P_E) e de acordo com a relação do vento térmico sem cisalhamento vertical do vento, para que o fluxo seja instável deve existir o cisalhamento horizontal do vento, neste caso, o fluxo possui um momento espacial total não uniforme na qual parte da energia cinética média zonal K_M é convertida em energia cinética da perturbação K_E , neste caso, é chamada de instabilidade barotrópica (LORENZ, 1972; HOLTON, 2004; HOLTON; HAKIM, 2013).

Do mesmo modo, as propriedades da instabilidade baroclínica são melhor investigadas quando considerado um fluxo que não transfere nenhuma energia cinética, ou seja, sem cisalhamento horizontal, mas o cisalhamento vertical deve existir e gradientes horizontais de temperatura para proporcionar a existência de energia potencial disponível das duas formas, P_M e P_E .

APÊNDICE B - CIRCULAÇÃO ATMOSFÉRICA

A circulação atmosférica descreve os padrões de movimento das massas de ar em grande escala entre regiões com diferentes disponibilidades de energia térmica originadas do aquecimento do Sol. O aquecimento desigual da superfície da Terra e em diferentes níveis de altitude pela radiação solar, gera gradiente de temperatura entre os trópicos e extratropicos e oceano e continente, com isso, gradientes de energia potencial são geradas e devido ao movimentos de ascensão do ar quente e descida do ar frio, parte dessas energia é convertida em energia cinética do movimento atmosférico.

Uma das formas de atmosfera redistribuir o excesso de calor (ar quente dos trópicos e frio dos polos) é através das células de circulação meridional (célula de Hadley, Ferrel e célula de circulação Polar), além da célula de circulação zonal (célula de circulação Walker) de grande importância para a redistribuição de calor na direção zonal (Terra-Mar).

Aqui, vamos descrever apenas as células de Hadley e Ferrel, mas o leitor pode consultar literaturas de [Holton \(2004\)](#) Capítulo 10, [Barry e Chorley \(2013\)](#) Capítulo 7 e [Peixoto e Oort \(1992\)](#) Capítulo 7 para mais detalhes.

B.1 Célula de Hadley

As células de circulação de Hadley, descreve o modelo de circulação meridional atmosférica de baixas latitude entre 30°N e 30°S . A atmosfera equatorial, recebe maior radiação solar em relação as latitudes mais altas, com isso, regiões de ascensão das massas de ar é estabelecida sobre o equador. Essas massas movem-se em direção aos polos na troposfera superior antes de afundar em $30^{\circ}(\text{N/S})$ e retornar ao equador, por essa razão, é conhecida como termicamente direta. O fluxo de retorno na baixa troposfera é desviado para oeste perto do equador através do efeito da rotação da Terra, formando-se assim, os conhecidos como ventos Alísios de nordeste e sudeste. Estas explicações foram propostas por George Hadley em 1735, uma teoria amplamente aceita no século XIX. Contudo, sabe-se que o efeito da força de Coriolis é pequeno nas latitudes baixa e zero no equador, então, outro fator deve ser responsável por esse efeito. Partindo dessas concepções, é que mais tarde (um século depois, em 1856), William Ferrel mostrou que a conservação de momento seria o mecanismo mais provável da causa dos ventos de leste perto do equador.

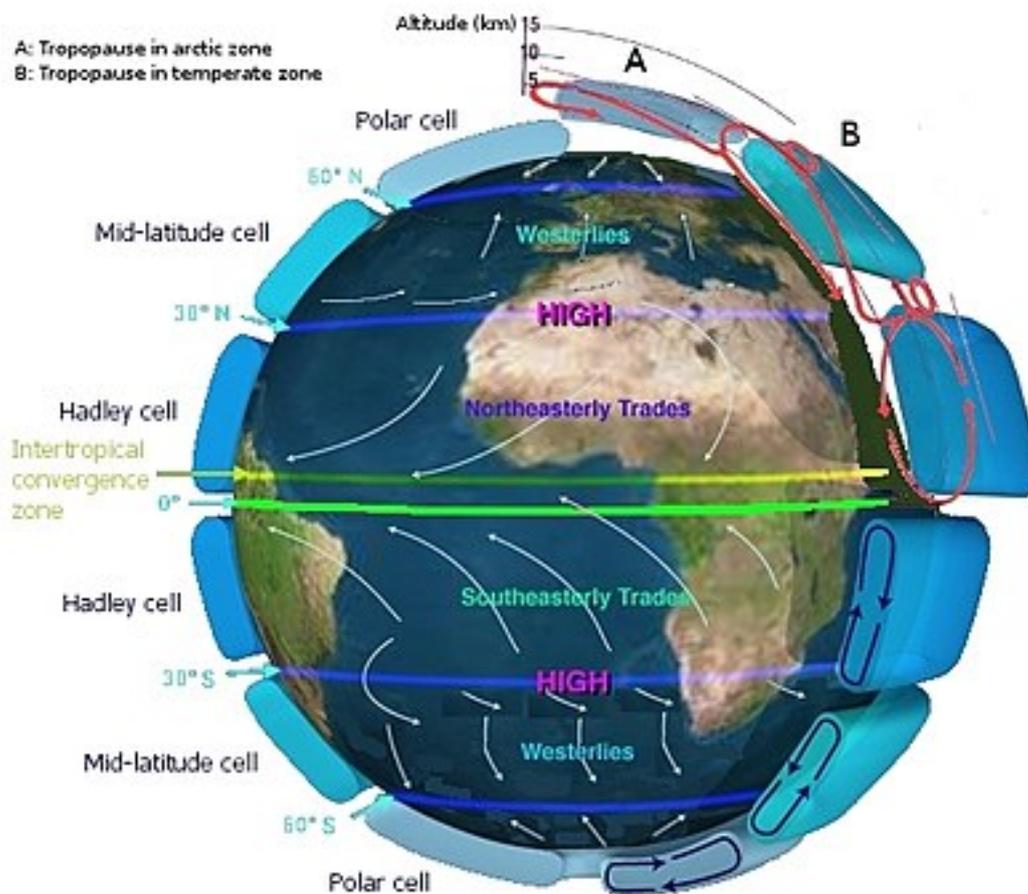
Esta célula é responsável pelos fluxos dos jatos subtropicais, vento Alísios e a ZCIT, o qual representa a posição do centro da célula ([PAN, 2015](#)).

B.2 Célula de Ferrel

As células de Ferrel descrevem o modelo de circulação meridional atmosféricas para latitudes médias (entre 30 e 60° dos dois Hemisfério). Ela é termicamente indireta, ou seja, ascende perto dos polos (em aproximadamente 60°(S ou N), e afunda em 30°(S ou N). É responsável pelo transporte de maior parte do fluxo de calor e momento em direção aos polos. Isso é feito por meio das altas semi-estacionárias (ondas estacionarias) e pelos vórtices transientes nas latitudes média.

É de ressaltar ainda, que a célula de circulação zonal está amplamente relacionada com o El Niño Oscilação Sul (ENSO), ligadas ao aquecimento e resfriamento das águas do pacífico equatorial.

Figura B.1 - Células de circulação atmosférica (Hadley, Ferrel e Polar).



Fonte: Livre na internet.

APÊNDICE C - TABELAS DE DATAS E DOS COMPONENTES DO CEL DOS EPISÓDIOS DE ZCAS

Nas Tabelas a seguir, C.1 e C.2 são apresentadas as datas de ocorrências e as estatísticas dos episódios de ZCAS respectivamente. No caso da [Tabela C.1](#) os prefixos em PS, PC e PN representam um identificador usado para identificar os episódios associados a cada padrão. E os 4 últimos eventos referem-se aos episódios que foram constatados em diferentes padrões durante a sua atuação. Por exemplo 2PS2PN com 2 dias de PS e 2 dias de PN. Na [Tabela C.2](#) das estatísticas desses eventos, os valores entre parentes representam os valores retirados do trabalho de [Rosa \(2017\)](#). As datas correspondentes podem ser vistas em seu estudo. Nesta tabela, também são apresentadas as influências da metodologia usadas para a detenção dos eventos de ZCAS, que foram calculadas a partir dos resultados médios das comparações dos totais anuais registrados pelas fontes.

Vale lembrar que as observações apresentadas neste trabalho correspondem aos episódios obtidos de [Andrade \(2011\)](#) e [Escobar \(2019\)](#).

Tabela C.1 - Datas e duração dos eventos de ZCAS Observado. PS, PC e PN representam os respectivos Padrões (Sul, Central e Norte).

Evento	Período de Ocorrência	Duração (dias)
PS1	27/jan/91 – 03/fev/91	8
PS2	22/fev/93 – 27/fev/93	6
PS3	10/jan/94 – 14/jan/94	5
PS4	01/mar/96 – 11/mar/96	11
PS5	02/jan/97 – 08/jan/97	7
PS6	20/jan/97 – 29/jan/97	10
PS7	14/nov/97 – 19/nov/97	6
PS8	12/fev/98 – 16/fev/98	5
PS9	06/jan/99 – 18/jan/99	13
PS10	19/fev/99 – 28/fev/99	10
PS11	01/jan/00 – 08/jan/00	8
PS12	25/jan/03 – 01/fev/03	8
PS13	25/jan/04 – 29/jan/04	5
PS14	20/fev/04 – 24/fev/04	5
PS15	21/dez/04 – 25/dez/04	5
PS16	17/jan/05 – 21/jan/05	5

(Continua)

Tabela C.1 - Continuação

Evento	Período de Ocorrência	Duração (dias)
PS17	15/mar/05 – 20/mar/05	6
PS18	17/nov/05 – 21/nov/05	5
PS19	01/jan/06 – 08/jan/06	8
PS20	27/jan/06 – 02/fev/06	7
PS21	09/fev/06 – 13/fev/06	5
PS22	26/nov/06 – 02/dez/06	7
PS23	19/mar/07 – 23/mar/07	5
PS24	22/out/07 – 26/out/07	5
PS25	04/nov/07 – 07/nov/07	4
PS26	19/dez/07 – 24/dez/07	6
PS27	12/mar/08 – 17/mar/08	6
PS28	12/fev/09 – 16/fev/09	5
PS29	13/jan/12 – 21/jan/12	7
PS30	07/jan/13 – 17/jan/13	9
PS31	02/fev/13 – 10/fev/13	7
PS32	13/fev/14 – 24/fev/14	4
PS33	14/fev/15 – 19/fev/15	4
PS34	08/mar/16 – 14/mar/16	5
PS35	16/jan/17 – 23/jan/17	6
PC1	18/dez/93 – 24/dez/93	7
PC2	29/dez/93 – 06/jan/94	9
PC3	13/dez/95 – 16/dez/95	4
PC4	01/dez/00 – 08/dez/00	8
PC5	01/jan/01 – 04/jan/01	4
PC6	01/nov/01 – 06/nov/01	6
PC7	16/nov/01 – 21/nov/01	6
PC8	17/dez/01 – 21/dez/01	5
PC9	24/dez/01 – 28/dez/01	5
PC10	16/fev/02 – 24/fev/02	9
PC11	10/dez/02 – 16/dez/02	7
PC12	13/jan/03 – 19/jan/03	7
PC13	02/jan/04 – 06/jan/04	5
PC14	07/fev/04 – 11/fev/04	5
PC15	01/mar/05 – 07/mar/05	7

(Continua)

Tabela C.1 - Continuação

Evento	Período de Ocorrência	Duração (dias)
PC16	11/dez/05 – 16/dez/05	6
PC17	07/mar/06 – 16/mar/06	10
PC18	17/out/06 – 20/out/06	4
PC19	07/dez/06 – 16/dez/06	10
PC20	30/jan/07 – 09/fev/07	11
PC21	06/jan/08 – 09/jan/08	4
PC22	20/jan/08 – 24/jan/08	5
PC23	30/jan/08 – 08/fev/08	10
PC24	22/fev/08 – 25/fev/08	4
PC25	07/nov/08 – 11/nov/08	5
PC26	13/nov/08 – 24/nov/08	12
PC27	27/nov/08 – 01/dez/08	5
PC28	03/dez/08 – 07/dez/08	5
PC29	12/dez/08 – 20/dez/08	9
PC30	25/dez/08 – 28/dez/08	4
PC30	13/mar/09 – 17/mar/09	7
PC31	23/mar/09 – 02/abr/09	11
PC32	28/out/09 – 01/nov/09	7
PC33	04/dez/09 – 09/dez/09	6
PC34	28/mar/10 – 31/mar/10	4
PC35	01/nov/10 – 04/nov/10	4
PC36	01/dez/10 – 04/nov/10	4
PC37	14/dez/10 – 18/dez/10	5
PC38	11/jan/11 – 20/jan/11	10
PC39	28/fev/11 – 10/mar/11	11
PC40	04/abr/11 – 07/abr/11	4
PC41	02/out/11 – 07/out/11	6
PC42	16/out/11 – 20/out/11	5
PC43	23/nov/11 – 05/dez/11	13
PC44	15/dez/11 – 22/dez/11	8
PC45	26/dez/11 – 30/dez/11	5
PC46	01/jan/12 – 09/jan/12	9
PC47	26/jan/12 – 31/jan/12	6
PC48	26/jan/13 – 30/jan/13	5

(Continua)

Tabela C.1 - Continuação

Evento	Período de Ocorrência	Duração (dias)
PC49	27/fev/13 – 04/mar/13	6
PC50	27/mar/13 – 30/mar/13	4
PC51	05/nov/13 – 09/nov/13	5
PC52	11/dez/13 – 15/dez/13	5
PC53	23/dez/13 – 26/dez/13	4
PC54	17/jan/14 – 20/jan/14	4
PC55	15/fev/14 – 19/fev/14	5
PC56	06/mar/14 – 10/mar/14	5
PC57	26/out/14 – 29/out/14	4
PC58	27/nov/14 – 30/nov/14	4
PC59	06/fev/15 – 09/fev/15	5
PC60	12/jan/16 – 19/jan/16	6
PC61	03/dez/16 – 06/dez/16	4
PC62	25/fev/17 – 28/fev/17	4
PC63	19/nov/17 – 24/nov/17	6
PC64	04/jan/18 – 09/jan/18	6
PC65	22/fev/18 – 25/fev/18	4
PC66	03/abr/18 – 07/abr/18	5
PN1	05/jan/91 – 08/jan/91	4
PN2	12/jan/91 – 19/jan/91	8
PN3	01/dez/91 – 05/dez/91	5
PN4	05/jan/92 – 10/jan/92	6
PN5	15/jan/92 – 20/jan/92	6
PN6	05/dez/95 – 10/dez/95	6
PN7	01/mar/97 – 05/mar/97	5
PN8	17/mar/97 – 23/mar/97	7
PN9	20/nov/98 – 25/nov/98	6
PN10	23/out/99 – 03/nov/99	12
PN11	17/nov/99 – 25/nov/99	9
PN12	16/dez/99 – 20/dez/99	5
PN13	21/jan/00 – 24/jan/00	4
PN14	17/dez/00 – 22/dez/00	6
PN15	04/fev/02 – 07/fev/02	4
PN16	10/jan/04 – 20/jan/04	11

(Continua)

Tabela C.1 - Continuação

Evento	Período de Ocorrência	Duração (dias)
PN17	20/nov/04 – 25/nov/04	6
PN18	13/fev/05 – 22/fev/05	10
PN19	10/nov/05 – 15/nov/05	6
PN20	10/nov/06 – 14/nov/06	5
PN21	12/fev/07 – 17/fev/07	6
PN22	27/nov/07 – 02/dez/07	6
PN23	02/jan/09 – 09/jan/09	6
PN24	06/abr/09 – 11/abr/09	4
PN25	06/out/09 – 12/out/09	5
PN26	01/mar/10 – 12/mar/10	12
PN27	27/dez/10 – 07/jan/11	12
PN28	30/out/11 – 04/nov/11	4
PN29	07/dez/11 – 12/dez/11	4
PN30	14/mar/12 – 21/mar/12	6
PN31	02/nov/12 – 08/nov/12	5
PN32	12/nov/12 – 22/nov/12	9
PN33	14/dez/13 – 22/dez/13	7
PN34	13/nov/14 – 19/nov/14	5
PN35	15/mar/15 – 20/mar/15	4
PN36	20/mar/15 – 25/mar/15	4
PN37	03/out/16 – 09/out/16	5
PN38	13/nov/16 – 19/nov/16	5
PN39	18/jan/16 – 25/jan/16	6
PN40	27/mar/17 – 03/abr/17	6
PN41	09/nov/17 – 15/nov/17	5
PN42	10/dez/17 – 15/dez/17	4
PN43	28/jan/18 – 08/fev/18	10
PN44	06/mar/18 – 13/mar/18	6
2PS2PN	12/dez/14 – 17/dez/14	4
2PC4PS	07/mar/15 – 14/mar/15	6
3PC3PS	27/fev/16 – 05/mar/16	6
2PC2PS	22/mar/16 – 27/mar/16	4

Fonte: Produção do autor.

Tabela C.2 - Estatísticas dos episódios de ZCAS. Número total de eventos - n.e; t.d - total de dias do ano com ZCAS; e duração média dos episódios para cada ano e diferentes fontes. Inf das met - Influência da Metodologia.

AE1119 (ROSA, 2017)				AE1119 - Rosa (2017)		
Anos	n.e	t.d	Duração	n.e	t.d	Duração
1991	4	25	6.25	—	—	—
1992	2	12	6	—	—	—
1993	3	22	7.33	—	—	—
1994	1	5	5	—	—	—
1995	2	10	5	—	—	—
1996	1 (7)	11 (38)	11.00 (6.25)	-6	-27	4.75
1997	5 (5)	35 (31)	7.00 (6.00)	0	4	1
1998	2 (8)	11 (43)	5.50 (7.33)	-6	-32	-1.83
1999	5 (10)	49 (60)	9.80 (5.00)	-5	-11	4.8
2000	4 (6)	26 (32)	6.50 (5.00)	-2	-6	1.5
2001	5 (7)	26 (43)	5.20 (43)	-2	-17	-5.8
2002	3 (3)	20 (25)	6.70 (7.00)	0	-5	-0.3
2003	2 (5)	15 (33)	7.50 (5.50)	-3	-18	2
2004	7 (10)	42 (62)	6.00 (9.80)	-3	-20	-3.8
2005	7 (11)	45 (59)	6.43 (6.50)	-4	-14	-0.07
2006	8 (7)	56 (38)	7.00 (5.20)	1	18	1.8
2007	9 (6)	45 (30)	5.54 (6.70)	3	15	-1.16
2008	11 (11)	77 (62)	7.00 (7.50)	0	15	-0.5
2009	8 (5)	44 (24)	5.50 (6.00)	3	20	-0.5
2010	6 (7)	41 (39)	6.83 (6.43)	-1	2	0.4
2011	10 (8)	70 (41)	7.00 (7.00)	2	29	0
2012	6 (9)	42 (49)	7.00 (5.54)	-3	-7	1.46
2013	7 (8)	51 (57)	7.29 (7.00)	-1	-6	0.29
2014	7 (4)	31 (18)	4.43 (5.50)	3	13	-1.07
2015	5 (4)	23 (19)	4.60 (6.83)	1	4	-2.23
2016	8	39	4.8	—	—	—
2017	6	31	5.17	—	—	—
2018	5	32	6.4	—	—	—
Média	—	—	—	-1.15	-2.15	0.04
Inf da Met	—	—	—	0.1776	0.3222	0.0055

Fonte: Produção do autor.

Tabela C.3 - Estatísticas dos episódios de ZCAS. Número total de eventos - n.e; t.d - total de dias do ano com ZCAS; e duração média dos episódios observados durante os dois períodos para cada Padrão.

Padrões	P1, 1991-2005			P2, 2006-2018		
	n.e	t.d	Duração	n.e	t.d	Duração
PN	19	126	6.63	25	151	6.04
PC	16	100	6.25	51	314	6.15
PS	18	128	7.10	17	100	5.9

Fonte: Produção do autor.

Na tabela abaixo são apresentados os valores médios dos componentes dos CEL obtidas para cada subárea de cada localização das ZCAS para os diferentes padrões

Tabela C.4 - Componentes do CEL para os episódios ocorridos entre 1991-2018. Unidades estão em $10^5 Jm^{-2}$ para as energias e Wm^{-2} para as taxas de converções, geração, fluxos, força de pressão e dissipação.

Componentes	Área-1	Área-2	Área-3	Área-4	Área-5	Média
Média de todos eventos de ZCAS, 1991-2018						
P_M	0.02	0.04	0.12	5.03	3.41	1.73
K_M	2.26	2.14	6.75	12.95	26.58	10.14
P_E	0.44	0.83	0.93	2.91	13.29	3.68
K_E	2.20	2.50	3.74	4.36	7.25	4.01
$C(P_M, P_E)$	0.01	0.06	0.30	11.94	36.07	9.68
$C(P_E, K_E)$	1.79	3.72	4.36	5.18	7.14	4.44
$C(K_E, K_M)$	-0.17	-0.23	1.38	0.95	-1.50	0.09
$C(P_M, K_M)$	0.45	0.57	2.63	43.81	78.44	25.18
$B(P_M)$	-0.022	-0.093	-0.045	-0.089	0.078	-0.034
$B(P_E)$	-0.035	-0.037	-0.032	-0.069	2.430	0.451
$B(K_M)$	0.032	0.019	0.030	-0.624	-0.898	-0.288
$B(K_E)$	0.014	0.011	0.019	-0.140	-0.217	-0.063
$B(M)$	-0.016	-0.206	-0.016	0.033	0.026	-0.036
$B(E)$	0.091	0.185	0.072	0.171	0.323	0.168
Média de todos eventos de ZCAS, 1991-2005						
P_M	0.02	0.04	0.11	1.83	3.21	1.04
K_M	2.15	2.08	6.59	12.11	26.60	9.91
P_E	0.41	0.78	0.92	2.14	11.38	3.12
K_E	2.22	2.42	3.81	4.45	7.36	4.05
$C(P_M, P_E)$	0.01	0.05	0.25	5.86	30.45	7.32
$C(P_E, K_E)$	1.63	3.64	4.69	5.56	8.81	4.86
$C(K_E, K_M)$	-0.10	-0.10	1.51	0.85	-1.34	0.16
$C(P_M, K_M)$	0.45	0.87	-1.39	41.95	87.29	25.83
$B(P_M)$	-0.020	-0.090	-0.043	0.008	0.096	-0.010
$B(P_E)$	-0.034	-0.039	-0.033	0.221	2.116	0.446
$B(K_M)$	0.033	0.010	0.129	-0.531	-0.906	-0.253
$B(K_E)$	0.016	0.010	0.039	-0.144	-0.319	-0.079
$B(M)$	-0.016	-0.211	-0.019	0.034	0.024	-0.038

(Continua)

Tabela C.4 - Continuação

Componentes	Área-1	Área-2	Área-3	Área-4	Área-5	Média
B(E)	0.089	0.176	0.059	0.186	0.472	0.196
Média de todos eventos de ZCAS, 2006-2018						
P_M	0.02	0.04	0.12	6.81	3.41	2.08
K_M	2.32	2.18	6.84	13.41	26.57	10.26
P_E	0.45	0.86	0.93	3.34	13.29	3.77
K_E	2.19	2.54	3.70	4.31	7.20	3.99
$C(P_M, P_E)$	0.01	0.07	0.32	15.31	39.19	10.98
$C(P_E, K_E)$	1.88	3.77	4.17	4.97	6.22	4.20
$C(K_E, K_M)$	-0.21	-0.31	1.31	1.01	-1.59	0.04
$C(P_M, K_M)$	0.45	0.40	4.85	44.84	73.53	24.82
B(P_M)	-0.022	-0.095	-0.046	-0.143	0.078	-0.046
B(P_E)	-0.035	-0.036	-0.031	-0.229	2.606	0.455
B(K_M)	0.030	0.023	-0.025	-0.676	-0.893	-0.308
B(K_E)	0.012	0.011	0.007	-0.138	-0.161	-0.054
B(M)	-0.016	-0.203	-0.014	0.033	0.027	-0.035
B(E)	0.092	0.190	0.079	0.162	0.241	0.153
Padrão Norte - PN						
P_M	0.02	0.05	0.76	14.18	2.12	3.42
K_M	2.24	2.29	10.87	15.06	24.34	10.96
P_E	0.44	0.83	2.17	5.73	8.27	3.49
K_E	2.09	2.66	3.74	5.10	7.72	4.26
$C(P_M, P_E)$	0.01	0.05	5.27	27.60	24.40	11.48
$C(P_E, K_E)$	1.62	3.73	4.55	5.99	7.10	4.60
$C(K_E, K_M)$	-0.16	-0.60	1.22	0.38	-3.98	-0.63
$C(P_M, K_M)$	0.42	0.27	19.70	66.22	97.49	36.82
B(P_M)	-0.021	-0.093	-0.002	-0.334	0.041	-0.082
B(P_E)	-0.036	-0.037	0.162	-0.671	1.574	0.199
B(K_M)	0.026	0.014	-0.308	-1.099	-1.256	-0.525
B(K_E)	0.011	0.012	-0.039	-0.245	-0.355	-0.123
B(M)	-0.015	-0.216	0.027	0.031	0.028	-0.029
B(E)	0.100	0.186	0.119	0.224	0.375	0.201
Padrão Central - PC						
P_M	0.02	0.04	0.11	1.55	3.41	1.03

(Continua)

Tabela C.4 - Continuação

Componentes	Área-1	Área-2	Área-3	Área-4	Área-5	Média
K_M	2.30	2.10	6.76	14.09	26.46	10.34
P_E	0.45	0.84	0.88	2.03	13.29	3.50
K_E	2.18	2.36	3.51	4.52	7.40	3.99
$C(P_M, P_E)$	0.01	0.07	0.31	7.36	43.84	10.32
$C(P_E, K_E)$	1.78	3.75	4.21	6.05	7.17	4.59
$C(K_E, K_M)$	-0.13	-0.16	1.26	1.14	-1.22	0.18
$C(P_M, K_M)$	0.44	0.73	4.52	43.78	82.52	26.40
$B(P_M)$	-0.022	-0.096	-0.046	0.000	0.078	-0.017
$B(P_E)$	-0.036	-0.039	-0.029	0.241	3.127	0.653
$B(K_M)$	0.031	0.015	-0.001	-0.561	-0.834	-0.270
$B(K_E)$	0.013	0.005	0.013	-0.130	-0.219	-0.064
$B(M)$	-0.017	-0.205	-0.016	0.037	0.026	-0.035
$B(E)$	0.087	0.186	0.066	0.189	0.336	0.173
Padrão Sul - PS						
P_M	0.02	0.03	0.56	2.72	6.30	1.93
K_M	2.22	2.04	8.15	12.72	24.81	9.99
P_E	0.41	0.81	0.69	1.91	10.16	2.79
K_E	2.35	2.57	3.23	4.18	6.51	3.77
$C(P_M, P_E)$	0.01	0.06	0.60	5.86	25.49	6.40
$C(P_E, K_E)$	1.98	3.66	4.17	4.88	7.02	4.34
$C(K_E, K_M)$	-0.26	0.05	0.49	1.09	0.29	0.33
$C(P_M, K_M)$	0.49	0.63	24.10	44.17	51.04	24.09
$B(P_M)$	-0.021	-0.089	-0.021	0.011	0.175	0.011
$B(P_E)$	-0.032	-0.035	-0.044	0.146	2.271	0.461
$B(K_M)$	0.039	0.030	-0.332	-0.631	-0.654	-0.309
$B(K_E)$	0.019	0.018	-0.067	-0.138	-0.100	-0.054
$B(M)$	-0.017	-0.195	-0.018	0.036	0.045	-0.030
$B(E)$	0.089	0.182	0.073	0.135	0.232	0.142

Fonte: Produção do autor.

A seguir são apresentados os padrões sinóticos observados em cada padrão (PN, PC e PS), as estruturas da distribuição espacial de taxa de calor diabático e da variação de massa (geopotencial) em 500 hPa durante os eventos de ZCAS. Elas foram usadas como subsídios para as discussões dos resultados.

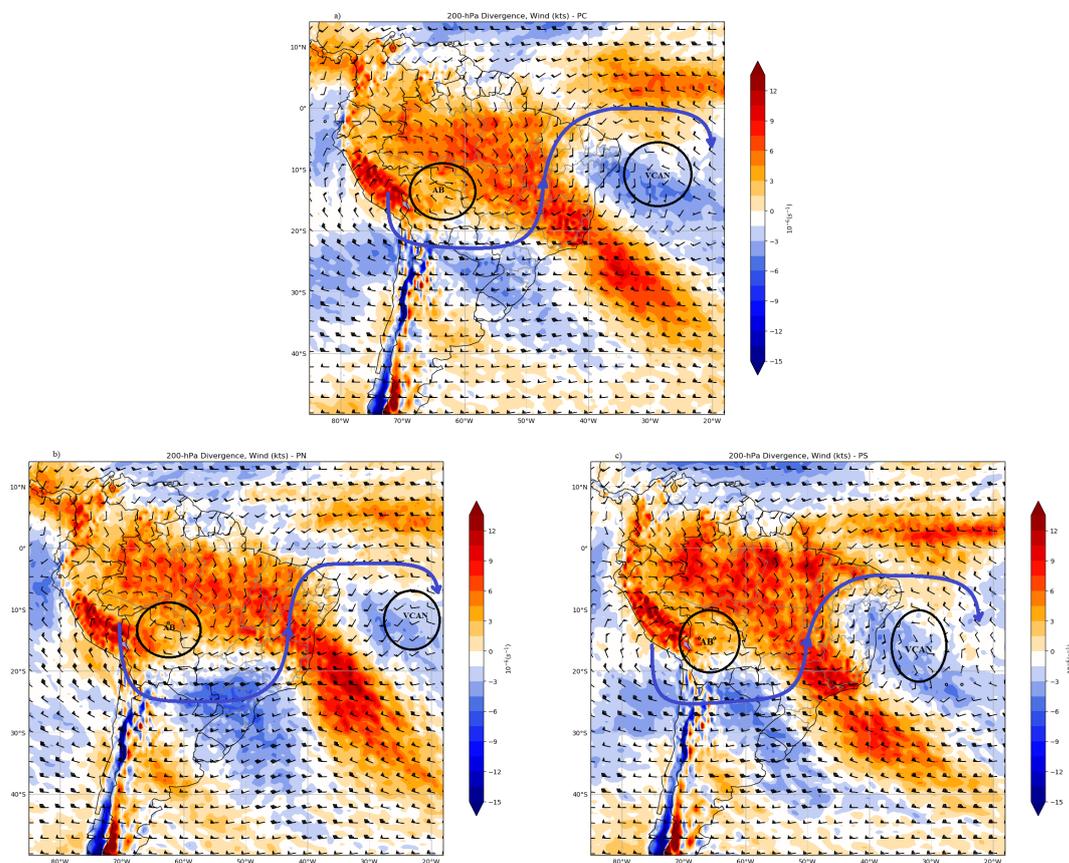
C.1 Análise sinótica para os diferentes padrões, PN, PC e PS

As Figuras C.1, C.2 e C.3 mostram os padrões sinóticos de altos, médios e baixos níveis em 200, 500 e 850 hPa observados durante os eventos de ZCAS ocorridos no período de 1991 a 2018. As linhas azuis na Figura C.1 representa o sentido do escoamento em altos níveis conectando à alta da Bolívia (AB) e o VCAN.

Na Figura C.2, as setas em preto mostram o cavado associado aos sistemas frontais e o círculo as regiões de máximos movimentos verticais em cada padrão.

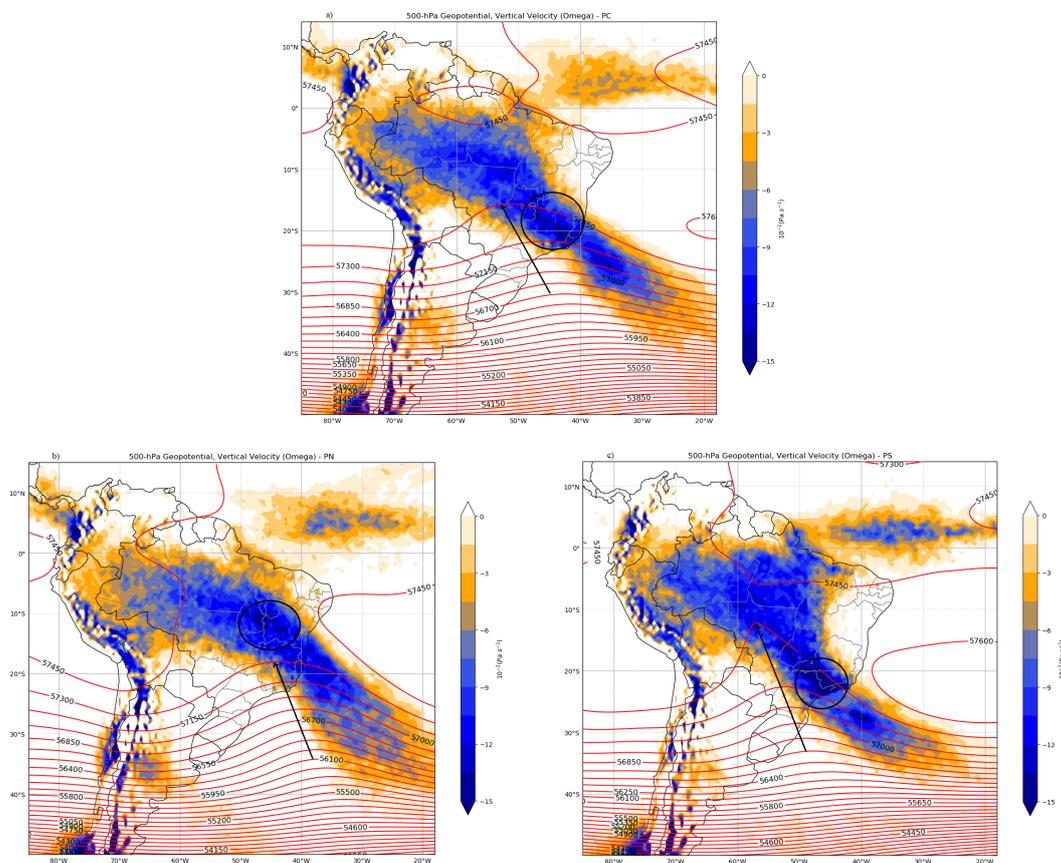
Na Figura C.3 a umidade específica é integrada na coluna vertical de 300 a 1000 hPa, e foi convertida (usando o período médio de duração dos eventos) de tal forma que o seu valor médio é representativo/equivalente à taxa média acumulada de chuvas observada sobre a AS durante os eventos de ZCAS (10 mm/dia em áreas de maior quantidade de chuvas, ver por exemplo Kodama (1992) e Wiel et al. (2015)). Deve-se mencionar ainda que na figura C.3 também é evidente a localização de um fluxo a leste dos Andes durante os eventos de PN e PC (setas em preta nas figuras C.3 (a) e C.3 (b)), porém de menor intensidade que o fluxo que alimenta as ZCAS. O conteúdo de água que está disponível para ser convertida em precipitação na ITCZ junto à AS é maior em evento de PS, além de abranger uma área mais ampla sobre o continente.

Figura C.1 - Divergência (sombreado) e vento em 200 hPa, períodos 1991-2018. (a) para PC, (b) para PN e (c) para PS



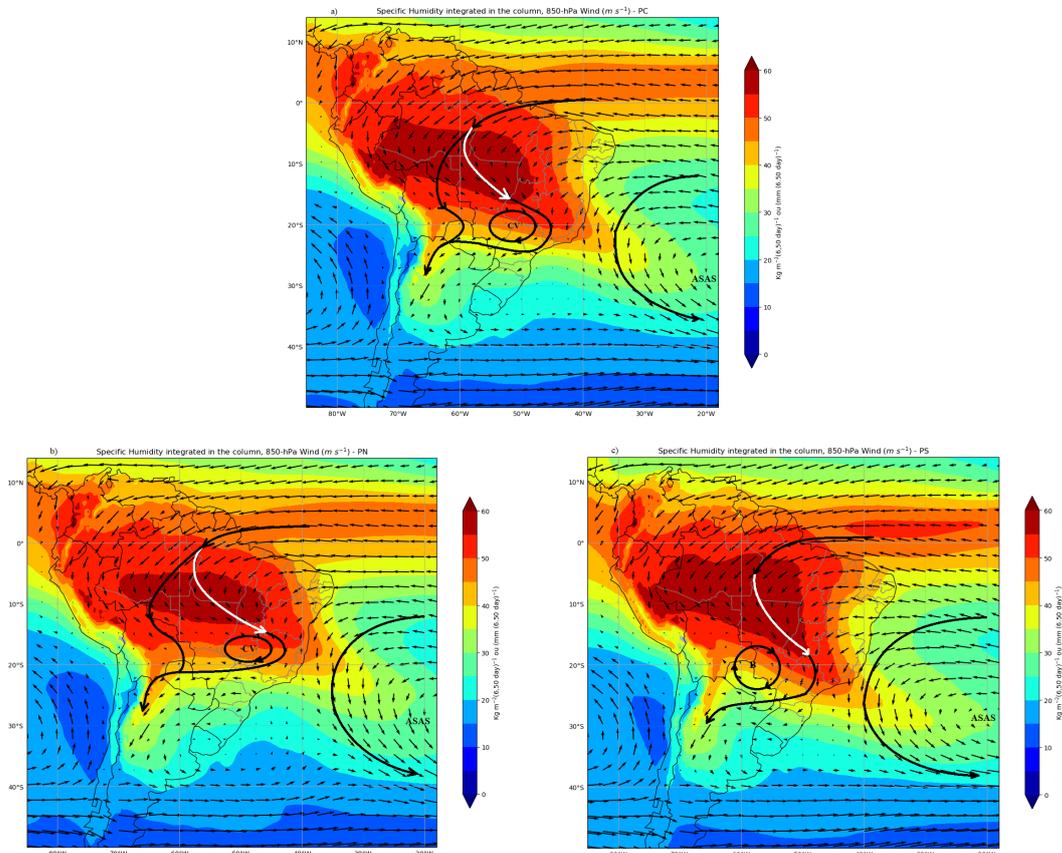
Fonte: Produção do autor.

Figura C.2 - Ômega (sombreado) e geopotencial (contorno) em 500 hPa, períodos 1991-2018. Válida para (a) PC, (b) PN e (c) PS.



Fonte: Produção do autor.

Figura C.3 - Umidade específica integrada na coluna de 300 a 1000 hPa (sombreado) e vento em 850 hPa, períodos 1991-2018. Válida para (a) PC, (b) PN e (c) PS. As unidades estão em $\text{mm}/(6.5\text{dia})$ e m/s .

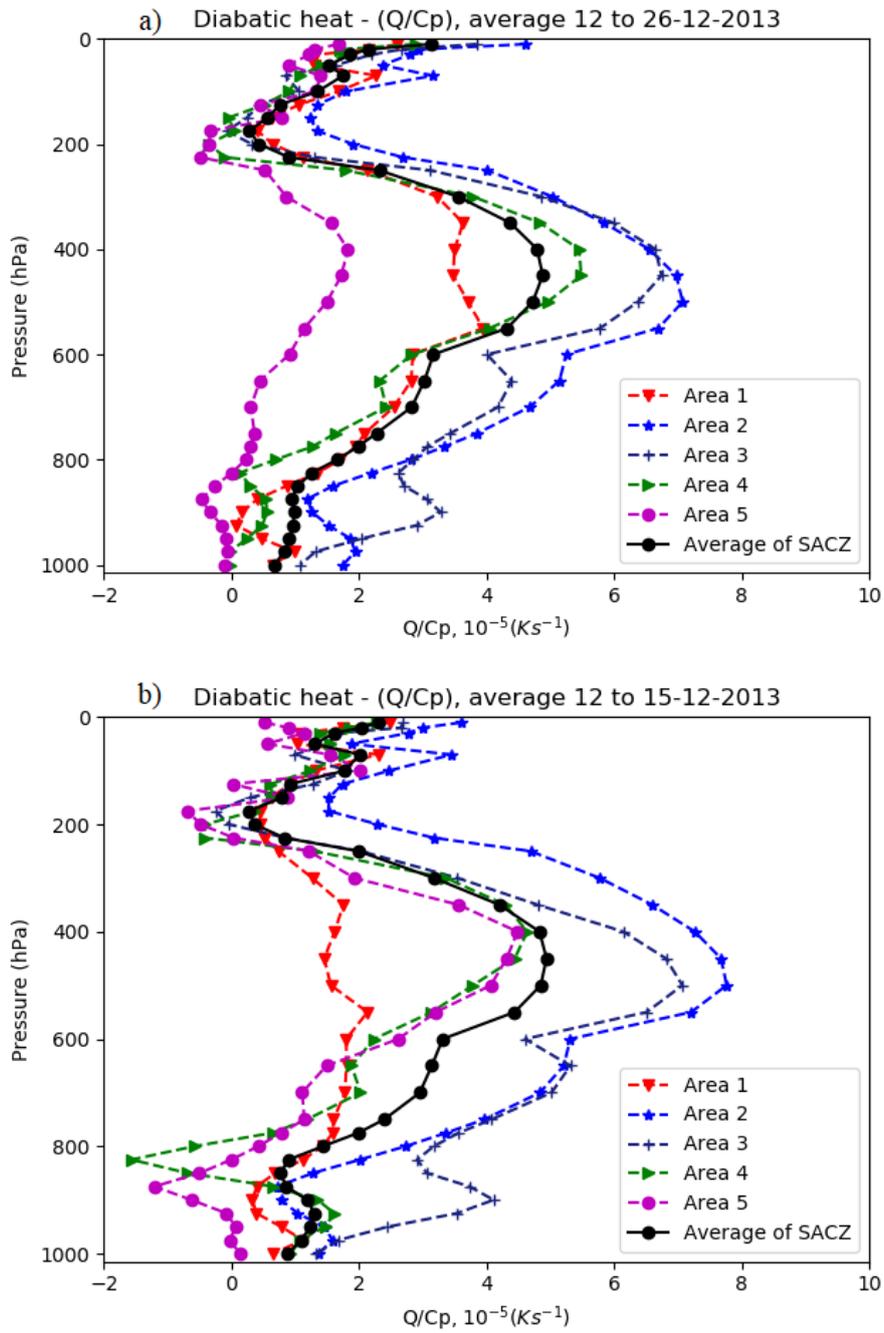


Fonte: Produção do autor.

C.2 Taxa de calor diabático para subáreas de atuação das ZCAS

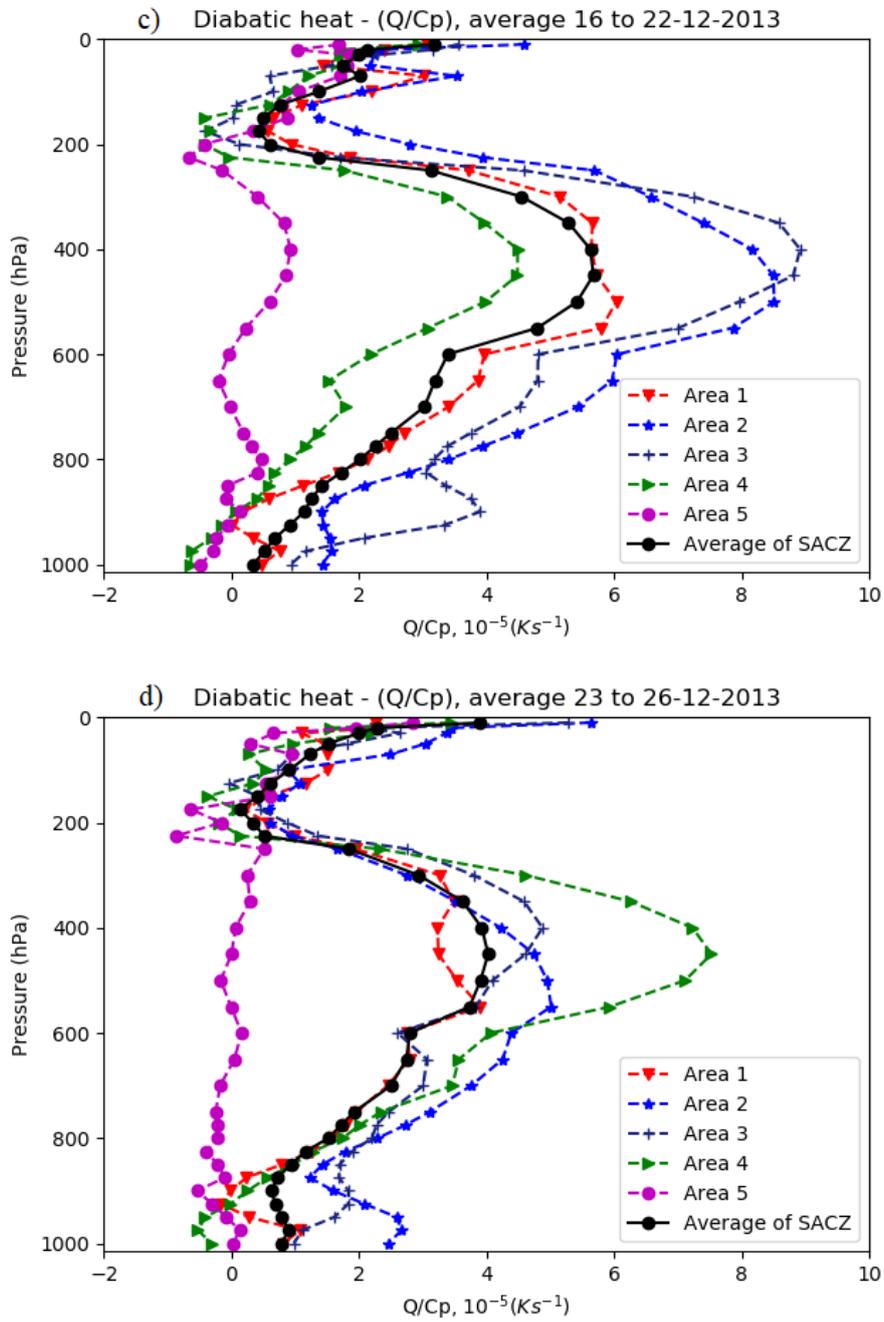
Na Figura C.4, são apresentadas as estruturas verticais da taxa de calor diabático calculada a partir da equação da energia termodinâmica (PEIXOTO; OORT, 1992; HOLTON, 2004; HOLTON; HAKIM, 2013) para cada subárea de atuação da ZCAS durante o evento ocorrido entre 12 e 26/12/2013. Nesta, podemos facilmente observar que a taxa de calor é maior em médios níveis da troposfera e que os máximos são observados nos trópicos e subtropicais (subáreas 2 e 3). Observe que durante o período em que o evento esteve entre PN e PC (de 23 a 26/12/2013) fortes liberações de calor latente são observados na subárea 4, o qual pode estar associado à influência de incursão de vórtices transientes nas regiões mais ao sul de atuação das ZCAS.

Figura C.4 - Seções vertical Latitude – Pressão da taxa de calor diabático (Q/C_p) para cada subárea de atuação do evento de ZCAS. Média para os períodos (a) de 12 a 26/12/2013 , (b) de 12 a 15/12/2013, (c) de 16 a 22/12/2013, e (d) de 23 a 26/12/2013.



(Continua)

Figura C.4 - Conclusão.

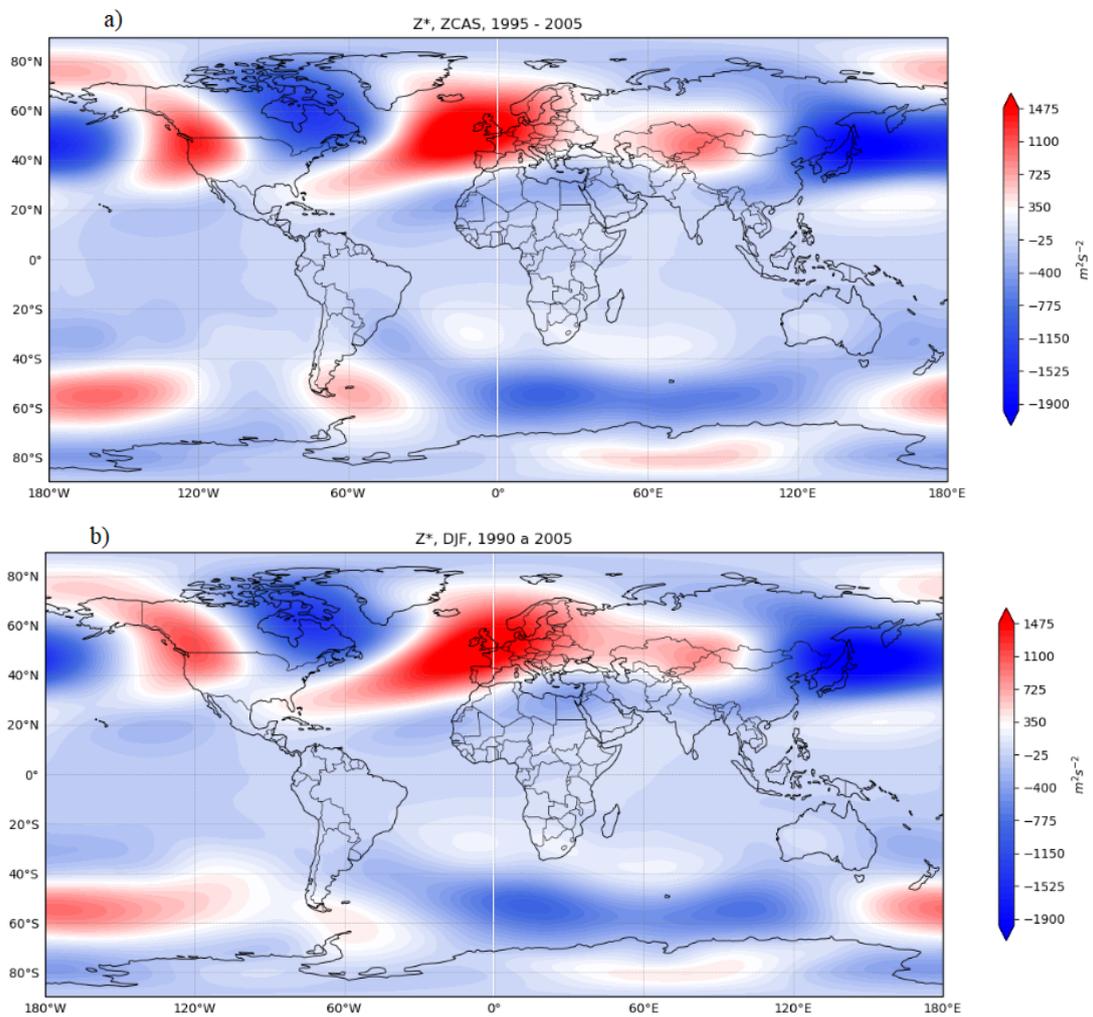


Fonte: Produção do autor, (2019)

C.3 Distribuição espacial da variação zonal do geopotencial em 500 hPa

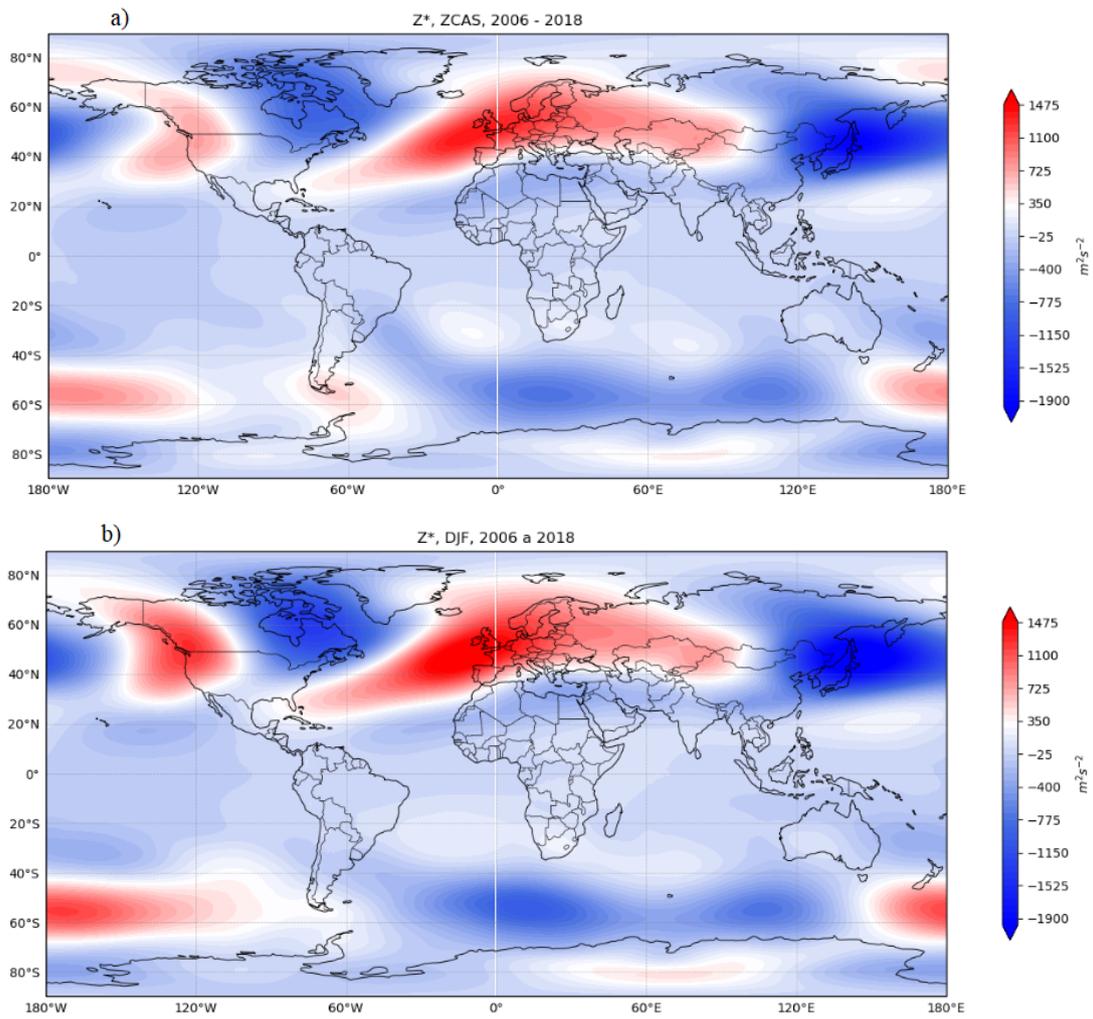
Nas Figuras C.5, C.6 e C.7 são apresentadas as estruturas da distribuição espacial Latitude-Longitude para a variação zonal de geopotencial em 500 hPa durante os eventos de ZCAS e não ZCAS. Estas figuras evidenciam as regiões de maior e menor disponibilidades de energia potencial, onde as regiões de trens de ondas de latitudes médias (TRENBERTH, 1991; HOSKINS; HODGES, 2005; WOOLLINGS, 2010) são destacadas. Observe que em eventos de ZCAS uma maior variação do geopotencial em 500 hPa são observados no setor mais ao sul de localização de ZCAS, indicando a existência de maiores disponibilidades de energia durante evento de ZCAS nestes locais.

Figura C.5 - Desvio em relação a média zonal do geopotencial em 500 hPa do Período de 1991-2005. (a) para os eventos de ZCAS e (b) não ZCAS.



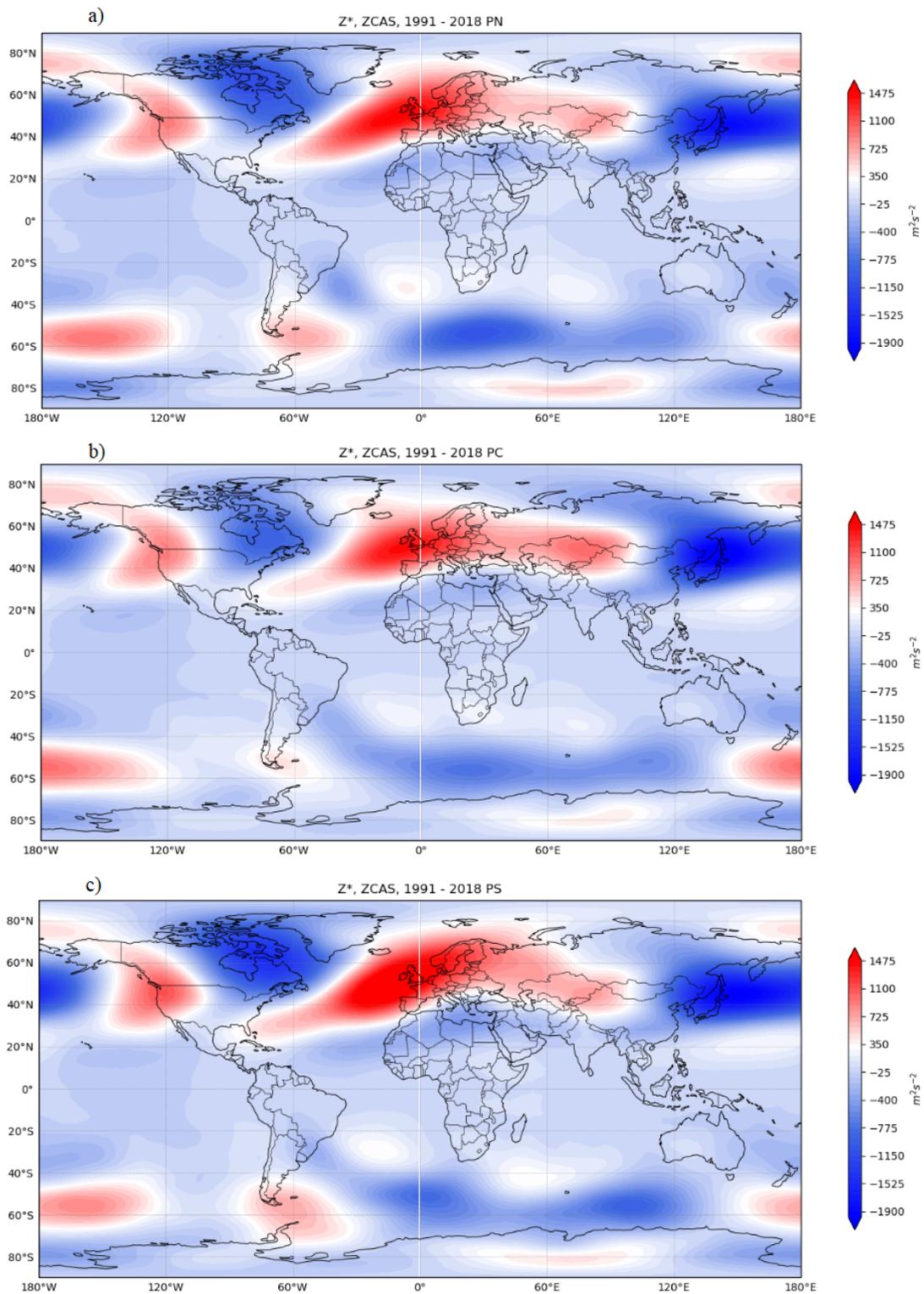
Fonte: Produção do autor.

Figura C.6 - O mesmo que na Figura C.5, exceto para o Período de 2006 a 2018.



Fonte: Produção do autor.

Figura C.7 - Desvio em relação a média zonal do geopotencial em 500 hPa do Período de 1991-2018. (a) Para os eventos de PN, (b) de PC e (c) de PS.



Fonte: Produção do autor.

PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS EDITADAS PELO INPE

Teses e Dissertações (TDI)

Teses e Dissertações apresentadas nos Cursos de Pós-Graduação do INPE.

Manuais Técnicos (MAN)

São publicações de caráter técnico que incluem normas, procedimentos, instruções e orientações.

Notas Técnico-Científicas (NTC)

Incluem resultados preliminares de pesquisa, descrição de equipamentos, descrição e ou documentação de programas de computador, descrição de sistemas e experimentos, apresentação de testes, dados, atlas, e documentação de projetos de engenharia.

Relatórios de Pesquisa (RPQ)

Reportam resultados ou progressos de pesquisas tanto de natureza técnica quanto científica, cujo nível seja compatível com o de uma publicação em periódico nacional ou internacional.

Propostas e Relatórios de Projetos (PRP)

São propostas de projetos técnico-científicos e relatórios de acompanhamento de projetos, atividades e convênios.

Publicações Didáticas (PUD)

Incluem apostilas, notas de aula e manuais didáticos.

Publicações Seriadas

São os seriados técnico-científicos: boletins, periódicos, anuários e anais de eventos (simpósios e congressos). Contam destas publicações o Internacional Standard Serial Number (ISSN), que é um código único e definitivo para identificação de títulos de seriados.

Programas de Computador (PDC)

São a seqüência de instruções ou códigos, expressos em uma linguagem de programação compilada ou interpretada, a ser executada por um computador para alcançar um determinado objetivo. Aceitam-se tanto programas fonte quanto os executáveis.

Pré-publicações (PRE)

Todos os artigos publicados em periódicos, anais e como capítulos de livros.