Natalia Fedorova
Bruce Francisco Pontes da Silva
Vladimir Levit

Análise e previsão prática das nuvens pelo diagrama termodinâmico SKEW-T/LOG-P

1ª Edição

Natalia Fedorova

Maceió - Alagoas

2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação:

Catalogação na fonte

Bibliotecária Responsável: Fernanda Lins de Lima

F294a Fedorova, Natalia.

Análise e previsão prática das nuvens pelo diagrama termodinâmico SKEW-T/LOG-P / Natalia Fedorova, Bruce Francisco Pontes da Silva, Vladimir Levit. – Maceió : N. F., 2017.

227 p. : il.

Inclui bibliografia.

ISBN: 978-85-923360-1-1.

1. Meteorologia. 2. Termodinâmica atmosférica. 3. Meteorologia sinótica. 4. Diagrama termodinâmico SKEW-T/LOG-P. 5. Nuvens – identificação – previsão. I. Pontes da Silva, Bruce Francisco, autor. II. Levit, Vladimir, autor. III. Título.

CDU: 536.44

Conteúdo

Apresentação 8

1. **Introdução** 10

2. **Teoria geral dos diagramas** 19
2.1 Diagramas termodinâmicos
2.2 Visão geral
2.3 Tipos de diagrama termodinâmico
2.4 Conceitos teóricos dos diagramas
2.5 Problema inverso
Diagrama Stüve (ou Diagrama Adiabático)
Emagrama
Tefigrama

3. **Diagrama termodinâmico Skew-T/Log-P: estrutura, parâmetros e estabilidade** 44
3.1 Estrutura e parâmetros principais identificados no diagrama termodinâmico Skew-T/Log-P
3.2 Procedimentos básicos para a identificação de variáveis no diagrama Skew-T/Log-P

4. **Identificação das nuvens** 77
4.1 Identificação das nuvens de desenvolvimento horizontal:
Stratus (St)

Stratocumulus (Sc)
Altocumulus (Ac) e *Altostratus (As)*
Cirrus (Ci), Cirrocumulus (Cc) e Cirrostratus (Cs)

4.2 Identificação da nebulosidade profunda (em todas as camadas da troposfera):
Nimbostratus (Ns)

4.3 Identificação das nuvens de desenvolvimento vertical
Cumulus (*Cu*):
cumulus humilis (*Cu hum*)
cumulus mediocris (Cu med)
Cumulus congestus (Cu com)
Cumulonimbus (*Cb*)
Recomendações para aplicação prática

5. **Influência da mudança de umidade no desenvolvimento das nuvens** 104
5.1 Mudança na RH devido ao acréscimo de vapor d'água na atmosfera instável – nuvens convectivas
5.2 Mudança na RH devido ao acréscimo de vapor d'água na atmosfera estável em baixos níveis – nuvens estratiformes
Recomendações para aplicação prática

6. **Influência da advecção de temperatura no desenvolvimento das nuvens.**.....115

6.1 Conceitos básicos do mecanismo de influência da advecção horizontal na instabilidade

6.2 Influência da advecção fria em baixos níveis na instabilidade

6.3 Influência da advecção de ar quente em médios níveis na instabilidade

Recomendações para aplicação prática

7. **Influência dos movimentos verticais na mudança das nuvens**.....131

7.1 Conceitos básicos sobre o mecanismo de influência dos movimentos verticais no umedecimento do ar

7.2 Processos nas regiões de circulação anticiclônica devido à subsidência de ar

7.3 Processos nas regiões de circulação ciclônica devido aos movimentos ascendentes

Recomendações para aplicação prática

8. **Variação diária das nuvens**.....152

8.1 Variação diária das nuvens devido ao processo de aquecimento diurno

8.2 Variação diária das nuvens devido no processo de resfriamento noturno

Recomendações para aplicação prática

9. **Mudança das nuvens devido à entrada de frente quente**.....168

9. 1 Mudança das nuvens devido à entrada da frente quente em altos níveis

9. 2 Mudança das nuvens devido à entrada da frente quente em médios níveis

9. 3 Mudança das nuvens devido à entrada da frente quente em baixos níveis

Recomendações para aplicação prática

10. **Mudança das nuvens devido à entrada de frente fria**.....186

10. 1 Mudança das nuvens devido à entrada de frente fria lenta

a) entrada de frente fria lenta em baixos níveis

b) entrada da frente fria lenta em médios níveis

c) última etapa da entrada da frente fria lenta

10.2 Mudança das nuvens devido à entrada de frente fria rápida e frente secundária

a) entrada de frente fria principal

b) entrada de frente fria secundária

Recomendações para aplicação prática

11. **Considerações finais**.....203

12. **Referências Bibliográficas**..... 209

13. **Apêndices**..... 217

Apêndice I. Atmosfera padrão

Apêndice II. Alturas das camadas superior, média e inferior

Apêndice III. Camadas, gêneros/espécies e abreviaturas das nuvens

Apêndice IV. Índices de instabilidade

Sobre os autores.....224

APRESENTAÇÃO

O livro inclui informações fundamentais sobre a teoria dos diagramas termodinâmicos, identificação das nuvens e previsão de nebulosidade pelos métodos termodinâmicos.

O principal objetivo do livro é dar suporte aos alunos de graduação e pós-graduação de cursos de meteorologia e às atividades de previsão meteorológica operacional. O livro apresenta amplas recomendações para aplicação prática.

Política editorial: *os dados, conceitos e textos publicados, bem como a exatidão das referências bibliográficas, são de inteira responsabilidade dos autores.*

1. Introdução

Fenômenos meteorológicos adversos, tais como chuva intensa, descargas atmosféricas, granizo, ventania, ondas de frio e calor, umidade relativa do ar muito baixa e geada forte são conhecidos por provocarem diversos prejuízos socioeconômicos ano após ano.

Provocando deslizamentos de terra e inundações, enxurradas violentas causam destruição ao levarem pontes e diversas outras construções humanas, não raramente decepando todo tipo de vida animal e vegetal que encontram pela frente, ao mesmo tempo em que descargas atmosféricas causam a morte de rebanhos inteiros no meio rural, além de dizimarem a vida de muitas pessoas. Somado a isso, vendavais e granizo avariam edificações junto à queda de árvores, sendo que todos esses fenômenos, assim como as geadas intensas, provocam diversos estragos no meio rural e impactos nos meios de transporte, afetando a segurança, a saúde pública e, indiscutivelmente, a economia.

Para se ter ideia, só no ano de 2008, conforme destacado por diversos jornalistas do Brasil e do mundo, desastres de grandes proporções foram causados por fenômenos meteorológicos extremos, como o ciclone Nargis entre abril e maio, que devastou áreas

do sudeste asiático, o tufão Fengshen em junho, que afetou parte da China e a tragédia de novembro no litoral de Santa Catarina, quando chuvas torrenciais acumularam um valor equivalente ao esperado para o mês inteiro em apenas dois dias, quebrando os recordes históricos anteriores, cujos primeiros dados datam de 1961 (600 mm em cinco dias na cidade de Blumenau). De acordo com dados do governo, as inundações e deslizamentos de terra resultaram em 135 vítimas fatais (dois desaparecidos), fizeram com que mais ou menos 80 mil pessoas deixassem suas casas, interditaram rodovias, fecharam o porto de Itajaí e interromperam o abastecimento de gás no estado e também no vizinho Rio Grande do Sul. Além disso, oito municípios chegaram a ficar isolados, 14 decretaram estado de calamidade pública e vários ficaram praticamente submersos. As indústrias catarinenses estimaram perdas que somaram quase meio bilhão de reais. Esse foi o desastre natural que fez mais vítimas fatais no estado depois das enchentes de 1974, que ceifaram a vida de 199 pessoas (DEFESA CIVIL DE SANTA CATARINA, 2008). A chuva excessiva foi causada pelos ventos em baixos níveis da troposfera perpendiculares à costa catarinense, originados pela borda noroeste de um anticiclone semiestacionário com centro sobre o Oceano Atlântico, e um vórtice ciclônico de médios e altos níveis (profundo)

sobre o estado. Resumindo, um bloqueio atmosférico do tipo dipolo foi o responsável pelo tempo severo.

Não muito tempo depois, os eventos de 11 e 12 de janeiro de 2011 no estado do Rio de Janeiro configuraram o que viria ser, não mais, não menos, o pior desastre natural da história brasileira. Chuvas torrenciais em sete municípios da Região Serrana do estado causaram a morte de mais de 900 pessoas e afetaram mais de 300 mil. Grande parte dos impactos foi causada por deslizamentos de terra devido à grande altura de chuvas registrada na região. Para se ter uma ideia da quantidade de precipitação, o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) registrou 166 mm de chuva em 24h na cidade de Nova Friburgo, o que representa mais de 70% do valor médio histórico para o mês de janeiro. Os impactos do desastre na Região Serrana não se limitaram às perdas e danos, mas também configuraram um marco nas políticas de gestão de riscos e desastre no país. Com relação às perdas e danos, estimativas do Banco Mundial apontam para custos totais da ordem de R$ 4,78 bilhões. Os setores sociais foram os que mais sustentaram perdas e danos, com um custo total estimado em R$ 2,69 bilhões. Em segundo lugar, o setor de infraestruturas foi impactado em cerca de R$ 1 bilhão. Os setores produtivos tiveram custos diretos e indiretos estimados em R$ 896

milhões, enquanto os impactos ambientais foram estimados em R$ 71,4 milhões (BANCO MUNDIAL – BM, 2012). A chuva foi provocada pela passagem de uma frente fria. Contudo, como é típico de regiões montanhosas, a orografia contribuiu ainda mais para o aumento da instabilidade, que resultou em precipitações torrenciais.

Gerando enxurradas e inundações, um evento extremo de chuva sobre o Espírito Santo e leste de Minas Gerais afetou diretamente 54 dos 78 municípios capixabas, sendo que mais de 60 mil pessoas precisaram, em algum momento, deixar suas casas. 24 pessoas morreram. No dia 24 de dezembro, o estado do Espírito Santo, reconhecido pelo Governo Federal, decretou estado de emergência. Em vários municípios o acumulado de chuva foi recorde, inclusive na capital, Vitória, onde a estação meteorológica automática do Inmet somou 746,4 mm no mês. As primeiras medições na cidade datam do final de 1923.

As chuvas mais fortes que castigaram o Espírito Santo durante dezembro de 2013 começaram no dia 11, a partir da formação de uma Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Naquela data, uma frente fria que avançava pelo país com jato em torno de 25 °S estacionou em alto-mar, à sudeste do

Espírito Santo (PONTES DA SILVA et al, 2014).

Uma forma de amenizar os impactos socioeconômicos causados pela atuação de fenômenos meteorológicos extremos seria aprimorar o conhecimento dos mecanismos responsáveis por sua origem, manutenção e definhamento e, a partir daí, desenvolver métodos capazes de prognosticá-los com maior eficácia e em tempo hábil, no sentido de emitir avisos às defesas civis e à população, o que levou à criação das salas de situação e emissão de alertas de risco hidrológico e geológico, que têm se tornado cada vez mais comuns no Brasil. A Agência Nacional de Águas (ANA) conta com salas de situação em quase todos os estados do país.

A emissão de avisos meteorológicos envolve uma boa previsão de curto prazo, definida como a previsão de tempo que se estende até 48h. Contudo, o prognóstico advindo das técnicas de modelagem numérica da atmosfera, nem sempre é suficiente para a detecção de eventos meteorológicos extremos vindouros, fazendo-se da aplicação da análise termodinâmica do perfil vertical da atmosfera um complemento muito útil.

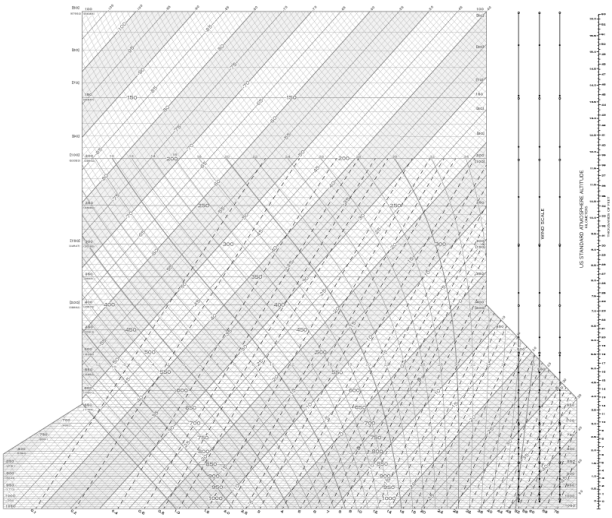
É com esse objetivo que este trabalho vem abordar os procedimentos detalhados para se realizar uma análise pormenorizada do perfil vertical da atmosfera na prática operacional, visando a melhoria da previsão

de fenômenos meteorológicos adversos. Também é digno de nota que o conhecimento prévio desta análise é muito importante para os alunos dos cursos de graduação e pós-graduação na área de meteorologia, onde a meteorologia sinótica e a termodinâmica da atmosfera são disciplinas obrigatórias.

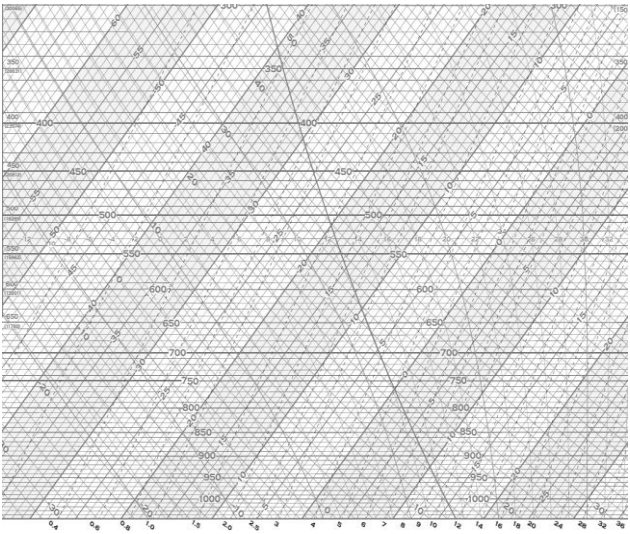
Essa análise pode ser feita através dos diagramas termodinâmicos, uma vez que eles servem para estudar e visualizar de forma bem prática e clara, através de gráficos, a estrutura e os processos termodinâmicos que ocorrem na atmosfera (propriedades termodinâmicas de substâncias reais). Alguns exemplos de diagramas deste tipo são: o tefigrama, o emagrama e o Skew-T/Log-P.

O diagrama Skew-T/Log-P (Figura 1.1) foi escolhido para análise do perfil vertical da troposfera nesta publicação, uma vez que este é um diagrama termodinâmico muito conveniente para uso geral. O Skew-T/Log-P é fácil de ser usado em diversos procedimentos meteorológicos e cálculos. Algumas das vantagens do Skew-T/Log-P no uso operacional são: o ângulo entre as adiabáticas e as isotermas é grande o suficiente para facilitar a estimativa de estabilidade, a taxa da área no gráfico para calcular a energia termodinâmica é a mesma sobre todo o diagrama, uma radiossondagem completa para níveis dentro da estratosfera pode ser plotada e o perfil vertical da atmosfera real se

aproxima da coordenada vertical do diagrama (ALCÂNTARA, 1969; AIR WEATHER SERVICE, 1979;). Além disso, as isóbaras desse diagrama são retas, facilitando a estimativa dos níveis (altitudes) de pressão.



(a)



(b)

Figura 1.1 Diagrama Skew-T/Log-P completo (a) e parte do mesmo ampliada (b).

O Inmet e o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) possuem bancos de dados observacionais, os quais incluem dados de radiossondagem de alguns aeródromos do Brasil. Assim como o Inmet e o CPTEC, o Departamento de Ciência Atmosférica da Universidade de Wyoming disponibiliza, em uma de suas páginas na internet, plotagens dos dados de radiossonda. Exemplos desses dados plotados no Skew-T/Log-P são apresentados na figura1.2.

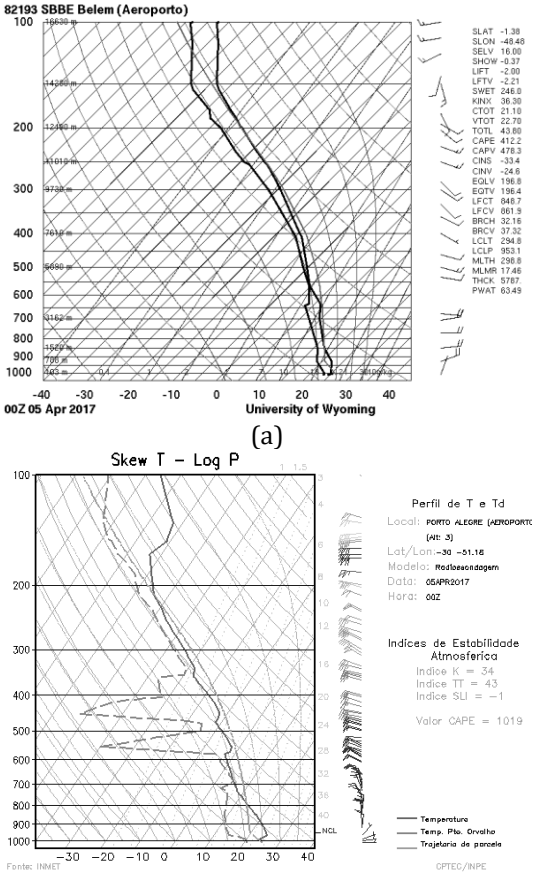


Figura 1.2 Radiossondagens plotadas no diagrama Skew-T/Log-P para Belém/PA (a) e Porto Alegre/RS (b) a 00 UTC do dia 5 de abril de 2017. Fontes: (a) Universidade de Wyoming; b) CPTEC/INPE.

2. Teoria geral dos diagramas

2.1 Diagramas termodinâmicos

Os diagramas termodinâmicos são diagramas usados para representar os estados termodinâmicos de uma substância (tipicamente, fluido) e as consequências da manipulação dessa substância. Por exemplo, um diagrama de temperatura-entropia (diagrama T-S) pode ser usado para demonstrar o comportamento de um fluido no processo da mudança de pressão.

2.2 Visão geral

Especialmente na meteorologia, diagramas termodinâmicos são usados para analisar o estado real da atmosfera derivado das medições de radiossondas, normalmente obtidas com balões meteorológicos e também calculadas por modelos meteorológicos. Nesses diagramas, valores de temperatura e umidade (representados pelo ponto de orvalho) são exibidos em relação à pressão. Assim, o diagrama dá uma visão da estratificação real da atmosférica e a distribuição vertical do vapor de água. Uma análise mais aprofundada fornece a base real e a altura máxima das nuvens convectivas ou possíveis instabilidades na estratificação.

Ao assumir a quantidade de energia devida à radiação solar é possível prever a temperatura, umidade e vento a 2 m durante o dia, o desenvolvimento da camada limite da atmosfera, a formação e o desenvolvimento de nuvens e as condições para voos alçados durante o dia.

A característica principal dos diagramas termodinâmicos é a equivalência entre a área no diagrama e a energia. Quando o ar muda a pressão e a temperatura durante um processo e prescreve uma curva fechada dentro do diagrama, a área encerrada por esta curva é proporcional à energia que foi absorvida ou libertada pelo ar (HOUGHTON, 2002; HANDBOOK, 2009).

2.3. Tipos de diagramas termodinâmicos

Os diagramas de finalidade geral incluem: Diagrama P-V, Diagrama T-s, Diagrama H-S (Mollier), Diagrama psicrométrico, Curva de refrigeração, Diagrama do indicador e Curva de vapor saturado.

Na Termodinâmica da Superfície Específica para serviços meteorológicos, existem principalmente três tipos diferentes de diagramas termodinâmicos: Diagrama Skew-T - log-P, Tephigrama e Emagrama

(IRIBARNE & GODSON, 1981; PETTY, 2008; YAU & ROGERS, 1989).

Skew-T/ Log-P - Este é o diagrama mais popular nos Estados Unidos. É melhor para exibir dados até o nível de 100 hPa. A construção do diagrama é semelhante ao Emagrama, mas as linhas de temperatura são inclinadas a cerca de 45 graus.

Emagrama - Este diagrama é popular na Europa e nos Estados Unidos. Geralmente é usado para exibir dados até o nível de 400 hPa. Devido à sua escala de temperatura vertical e reta, é ideal para identificar visualmente características térmicas, como inversões.

Tefigrama - Este diagrama é popular na Inglaterra. Seus algoritmos de construção são mais complexos do que os outros diagramas e, portanto, raramente são usados por programas de traçado automatizados.

O diagrama Skew-T/Log-P - É um dos quatro diagramas termodinâmicos geralmente usados na análise e previsão de tempo. Em 1947, N. Herlofson propôs uma modificação ao Emagrama, que permite isóbaras retas e horizontais, e proporciona um grande ângulo entre as isotermas e adiabáticas secas, semelhante ao do

tefigrama. Foi, portanto, mais adequado para algumas das novas técnicas de análise que foram inventadas pela Força Aérea dos Estados Unidos (HERLOFSON, 1947; STIPANUK, 1973).

Todos estes são derivados do diagrama físico P-v, que combina pressão e volume específico (v) como coordenadas básicas. O diagrama P-v mostra uma forte deformação da grade para as condições atmosféricas e, portanto, não é útil em ciências atmosféricas. Os três diagramas são construídos a partir do diagrama P-v utilizando transformações de coordenadas apropriadas (BELINSKIY, 1948; IRIBARNE & GODSON, 1981; HOUGHTON, 2002).

2.4. Conceitos teóricos dos diagramas

Inicialmente, compara-se os dois diagramas da Figura 2.1: