

ENTRANHAMENTO EM NUVENS DO TIPO CUMULUS

TAVARES, Mônica Weber¹; SCHMALFUSS, Laís²
Departamento de Meteorologia – FMET/UFPeI
Campus Universitário – Caixa Postal 354 – CEP 96010- 900
monicawtavares@gmail.com

YAMASAKI, Yoshihiro
Departamento de Meteorologia – FMET/UFPeI

1 INTRODUÇÃO

A clássica teoria das nuvens convectivas, que apresentam correntes de ar ascendentes, com entranhamentos do ar das vizinhanças de uma nuvem é explorada à luz dos efeitos da mistura de ar sobre a velocidade vertical. O efeito da mistura, do ar saturado da nuvem com o ar não saturado do ar das vizinhanças é levado em consideração tomando camadas estratificadas da atmosfera e permitindo que o entranhamento ocorra no nível médio de cada camada. A técnica é aplicada considerando uma taxa de entranhamento constante em todas as camadas de ar, bem como o conhecimento da temperatura e umidade específica do perfil vertical da atmosfera e as condições iniciais da temperatura, pressão e velocidade de uma parcela de ar na base da nuvem. Além das velocidades da parcela de ar em cada camada, a concentração de água condensada no desenvolvimento de uma parcela de ar da nuvem é igualmente determinada e comparada com o caso e os valores que se obtêm quando o entranhamento é ignorado.

2 METODOLOGIA (MATERIAL E MÉTODOS)

O entranhamento nas nuvens (Kain e Fritsch 1990, Emanuel 1991) é simulado considerando os três processos básicos - primeiro considerando o esfriamento adiabático; em seguida a mistura do ar da nuvem com o do ar do meio ambiente e na última instância a liberação de calor da condensação do vapor das nuvens. Esse processo de entranhamento da massa δM do meio, que envolve a nuvem, para dentro de uma camada δz da nuvem é apresentado na Fig. 1. Por continuidade e conservação da massa, no topo da camada de nuvem, o fluxo é dado por $(M + \frac{\delta M}{\delta z}) \delta z$

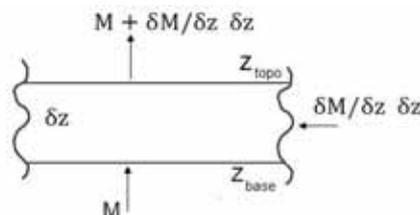


Figura 1: Distribuição das variáveis termodinâmicas na nuvem.

Considerando o potencial de Montgomery, ou energia estática úmida:

$$\tilde{h} = c_p T + g z + L q \quad (1)$$

Ela pode ser aplicada com \tilde{h} , para o meio ambiente e \tilde{h}_c para a nuvem. Assim, pela conservação da energia: $\frac{d(M \tilde{h}_c)}{dz} = \frac{dM}{dz} \tilde{h}$.

Para uma taxa fracional de entranhamento, considera-se $\lambda_g = \frac{1}{M} \frac{dM}{dz}$, e se não houver entranhamento $\lambda_c = 0$, a equação (1) fica:

$$\frac{dh_c}{dz} = -\lambda_c (h_c - \tilde{h}) = 0 \quad (2)$$

A derivada da energia estática úmida com a altura, para o caso da nuvem, considerando que $w_s = w_s(P_c, T_c)$:

$$\frac{dh_c}{dz} = c_p \frac{dT_c}{dz} + g + L \left[\left(\frac{\partial w_s}{\partial T_c} \right)_{P_c} \frac{dT_c}{dz} + \left(\frac{\partial w_s}{\partial P_c} \right)_{T_c} \frac{dP_c}{dz} \right] \quad (3)$$

Considerando que a camada se encontra aproximadamente em balanço hidrostático, $\frac{dP_c}{dz} = \frac{P_c}{RT_c} g$, então:

$$\gamma_c = -\frac{dT_c}{dz} = \frac{1}{c_p} \frac{1 - L \frac{P_c}{RT_c} \left(\frac{\partial w_s}{\partial P_c} \right)_{T_c} + \lambda_c (h_c - \tilde{h})}{1 + \frac{L}{c_p} \left(\frac{\partial w_s}{\partial T_c} \right)_{P_c}} \quad (4)$$

Ressalta-se que essa equação, da taxa de variação vertical da temperatura com a altura, apresenta as diferentes contribuições: para os casos seco (*sem os termos com λ_c e L*); saturado (*sem o termo com λ_c*) e com entranhamento (*com todos os termos*).

O método de Stommel é aplicado usando o diagrama SKEW-T - considerando algumas camadas da atmosfera, pré-estabelecidas - permitindo que uma parcela da nuvem se esfrie pseudo-adiabaticamente, da base ao topo de cada camada. O esquema é aplicado para casos com e sem o entranhamento. Ele é aplicado determinando a temperatura, razão de mistura e o conteúdo de água líquida da mistura para o caso com entranhamento. Após a mistura do ar da nuvem com o ar entranhado, o ar da camada torna-se insaturado - com isso é necessário evaporar uma quantidade do "condensado" para saturar o ar. Esse processo fará com que a parcela se esfrie a temperatura do bulbo úmido. O processo é aplicado para cada camada da nuvem, determinando-se também, tanto a velocidade vertical como a aceleração da parcela de ar. O entranhamento da massa (γ) é tomado constante e é igual a $0,3 \text{ Km}^{-1}$.

Supondo que a aceleração se deve apenas à força de flutuação (F_z), a equação da quantidade de movimento pode ser escrita:

$$\frac{d}{dt}(Mw) = Fz \quad (5)$$

$$\text{Portanto: } \frac{dw}{dt} = \left(\frac{T_{v2} - T_{v1}}{T_{v1}} - q_l \right) g - W \frac{1}{M} \frac{dM}{dt} \quad (6)$$

onde g é a gravidade e $\frac{1}{M} \frac{dM}{dt}$ é o termo de entranhamento.

A metodologia é aplicada considerando o ar ambiente caracterizado pelas variáveis (consequente as convenções tradicionais da meteorologia termodinâmica) apresentadas na Tab.1.

Tabela 1 – Dados do meio ambiente

Altura (Km)	Pressão (hPa)	T1(°C)	UR (%)
1,5	850	18	60
2,5	750	11,5	60
3,5	660	5	60
4,5	580	-1,5	60
5,5	510	-8	60
6,5	440	-14,5	60

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caso sem entranhamento

Considerando que a nuvem apresenta-se saturada no nível de 850 hPa e com uma velocidade vertical de 0 m/s, no caso sem entranhamento, as camadas do ar da nuvem apresentam os valores das variáveis indicados na Tab. 2.

Tabela 2 – Camadas da nuvem sem entranhamento

Pressão (hPa)	Δq_l (medio)	dw/dt	w_t
850	0,001166404	-0,149734121	6,638750959
750	0,003455809	-0,059077161	9,388611644
660	0,0057561	0,020596391	14,58863641
580	0,007918753	0,093479274	19,99731343
510	0,009843846	0,156898808	25,26774073
440		0,178452157	

Os resultados foram obtidos com:

$$q_l = \frac{w_s}{1+w_s}$$

$$\Delta q_{li} = (q_{li} - q_{li-1}) + q_{li-1}, \text{ sendo } \Delta q_{li} = i = (1, 2, 3, 4, 5, 6)$$

$$\Delta q_{lm} = \Delta \bar{q}_l = \frac{\Delta q_{l1} + \Delta q_{l2}}{2}$$

A aceleração dw/dt e a velocidade vertical w_t da parcela, para o caso sem entranhamento, são obtidos pela equação:

$$\frac{dw}{dt} = g \left(\frac{T_{v2} - T_{v1}}{T_{v1}} - ql \right) \text{ e } w_t = \sqrt{(w_b)^2 + 2g\Delta z * \left(\frac{T_{v2} - T_{v1}}{T_{v1}} - \Delta ql \right)}$$

onde \bar{T}_v é a média aritmética simples, $\bar{T}_v = \bar{T}_{v(\text{topo})} - \bar{T}_{v(\text{base})}$; g é a gravidade; w_b é a velocidade da base da camada e Δz a espessura da camada da nuvem. Observa-se que o termo que envolve a gravidade é que apresenta a forçante da flutuação à aceleração vertical.

3.2 Caso com entranhamento

Para o caso com entranhamento é necessário considerar a mistura de ar da nuvem com a do ar do meio ambiente (ou seja, do ar entranhado).

Tabela 3 – Camadas da nuvem com entranhamento

Pressão(hPa)	$T_{v3}(K)$	Δq_m	dw/dt	w_t
850	293,89	0,001948317	-0,112962268	0,515645884
750	287,05	0,005465591	-0,069845763	0,976569896
660	280,31	0,008217289	-0,034087378	1,249519518
580	273,68	0,01029074	-0,005096166	1,430335211
510	267,12	0,011826669	0,018430199	1,567178128
440	260,4	0,006235944	0,029208026	

A temperatura T_3 é a mistura das temperaturas do meio ambiente e da parcela e a razão de mistura w_3 é a mistura das razões de mistura do meio ambiente e da parcela e são obtidas por:

$$T_3 = \frac{T_1 + \gamma T_2}{1 + \gamma} \text{ e } w_3 = \frac{w_1(1+w) + \gamma w_2(1+w)}{(1+w) + \gamma(1+w)}$$

A temperatura T_w é determinada para se obter a quantidade do condensado que deve ser evaporado para saturar o ar.

A quantidade de água líquida no topo de cada camada é determinada pela expressão: $q_l = \frac{w_3}{1+w_3}$. A aceleração dw/dt e a velocidade vertical w_t da parcela,

para o caso em questão, são obtidas pelas equações:

$\frac{dw}{dt} = \left(\frac{T_{v3} - T_{v1}}{T_{v1}} - ql \right) g - w \frac{1}{M} \frac{dM}{dt}$, na forma discretizada - usando o esquema centrado pode ser representada por:

$$\frac{dw}{dt} \cong w \frac{dw}{dz} = \left(\frac{w_t + w_b}{2} \right) \left(\frac{w_t - w_b}{\Delta z} \right) = \left(\frac{T_{v3} - T_{v1}}{T_{v1}} - ql \right) g - \frac{w_t + w_b}{2} \gamma, \text{ onde}$$

$$\gamma = \frac{1}{M} \frac{dM}{dt} = \frac{1}{M} w \frac{dM}{dz} = (M_b + M_T)(w_T + w_b) \left(\frac{M_T + M_b}{\Delta z} \right)$$

A velocidade vertical w_t é obtida pela solução da equação de segundo grau dada por:

$$w_t^2 + \left(\frac{2 w_b \gamma \Delta z}{2 + \gamma \Delta z} \right) w_t + \frac{1}{2 + \gamma \Delta z} \left[w_b^2 (2 - \gamma \Delta z) - 4 g \Delta z \left(\frac{T_{v3} - T_{v1}}{T_{v1}} - \Delta \bar{q}_t \right) \right] = 0 \quad \text{ou}$$

seja, pelas raízes:

$$w_t = \frac{- \left(\frac{2 w_b \gamma \Delta z}{2 + \gamma \Delta z} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{2 w_b \gamma \Delta z}{2 + \gamma \Delta z} \right)^2 - 4 \left\{ w_b^2 (2 - \gamma \Delta z) - 4 g \Delta z \left(\frac{T_{v3} - T_{v1}}{T_{v1}} - \Delta \bar{q}_t \right) \right\}}{2}$$

w_b é a velocidade da base da camada;

$$\Delta z = z_{topo} - z_{base}$$

$$\bar{T}_v = \bar{T}_{v(topo)} - \bar{T}_{v(base)}.$$

4 CONCLUSÕES

O entranhamento nas nuvens foi considerado levando em consideração o esfriamento adiabático, a mistura do ar do meio e a liberação de calor durante a ascensão da nuvem. No caso particular sem entranhamento, onde não há interação do ar da nuvem com o das vizinhanças - a velocidade vertical excede sobremaneira o que é normalmente observado; enquanto que, com o entranhamento ela condiz mais realisticamente com o que se observa (caso 3.2 do texto). Neste último caso, ao se considerar a mistura do ar da nuvem com a do ar do meio ambiente, ocorre uma desaceleração causada, essencialmente pela necessidade de reduzir o condensado, re-evaporando uma parte para saturar o ar entranhado. Como conseqüência, o nível em que a nuvem perde a flutuabilidade reduz, comparado com o caso quando não é levado em consideração o entranhamento - o qual apresenta um topo máximo demasiado elevado comparado com o que ocorre na natureza.

5 REFERÊNCIAS

Kain, J.S. and J.M.Fritsch. A one dimensional entrainment/detrainment plume model and its application in convective parameterization. **J. ATMOSPHERIC SCIENCE**, v. 47, p. 2784-2802, 1990.

Emanuel, K.A. A scheme for representing cumulus convection in large scale models. **J. ATMOSPHERIC SCIENCE**, v.48, p. 2313-2335, 1991.