

# ÍNDICES TERMODINÂMICOS DURANTE A CAMPANHA GOAMAZON2014/5 E COMPARAÇÃO COM DADOS DA REANÁLISE ERA-INTERIM

Matheus Tolentino<sup>1</sup>, Henrique M. J. Barbosa<sup>1</sup> e Theotonio Pauliquevis<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo-SP, Brasil <sup>2</sup>Universidade Federal de São Paulo, Diadema-SP, Brasil

### Resumo

Os índices termodinâmicos LCL, LFC, CINE e CAPE caracterizam a instabilidade atmosférica e, dessa forma, viabilizam o estudo da formação de nuvens e da convecção, fenômenos estes importantes para o ciclo hidrológico e o balanço radiativo. Em vista disso, este trabalho faz uma análise da variação sazonal destes índices calculados diretamente dos perfis das radiossondas lançadas durante o experimento GOAmazon2014/5, bem como uma intercomparação com a reanálise Era-Interim para os índices e para os perfis médios sazonais de temperatura e umidade. A análise da radiossonda mostra que o perfil vertical das medianas de umidade relativa na estação seca é menor em 2015 (em relação a 2014), promovendo LCLs mais altos e um CAPE menor em relação a estação chuvosa deste ano (2015 teve uma estação seca mais severa que 2014). A intercomparação com a reanálise revela que os valores de LCL são compatíveis com aqueles observados apenas as 18 Z. Por outro lado, os valore de CAPE são totalmente incompatíveis.

**Palavras-chave:** Amazonia; Convecção; Índices termodinâmicos; Sazonalidade; Reanálise ERA-Interim

### Abstract

The thermodynamic indexes LCL, CFL, CINE and CAPE characterize atmospheric instability and, hence allow studying cloud formation and convection, important phenomena for the hydrologic cycle and the radiative balance. In this light, this work makes a seasonal analysis of these indexs calculated directly from the radiosondes launched during the GOAmazon2014/5 experiment, as well as an intercomparison with Era-Interim reanalysis for the same indexes and for the seasonal average temperature and relative humidity profiles. Radiosonde analysis shows that the vertical profile of relative humidity medians in the dry season is lower in 2015 (compared to 2014), promoting higher LCLs and lower CAPE compared to this year's rainy season (2015 had a more severe dry season than 2014). Intercomparison with reanalysis reveals that LCL values are only compatible with observed ones at 18 Z. On the other hand, CAPE values are always incompatible.

Keywords: Amazon; Convection; Thermodynamic indexes; Seasonality; ERA-Interim Reanalysis

### 1. Introdução

Os índices termodinâmicos (ITs), como o LCL (nível de condensação por levantamento), LFC (nível de convecção livre), CINE (Energia de Inibição de Convecção) e CAPE (Energia Potencial Convectiva Disponível) caracterizam a instabilidade atmosférica e viabilizam o estudo da formação de nuvens e da convecção. Eles podem ser derivados a partir de perfis termodinâmicos obtidos por meio de radiossondas (observação) ou modelos atmosféricos (reanálises). Entretanto, as radiossondagens são limitadas a algumas regiões do mundo e por curtos períodos de tempo devido ao seu custo. Desse modo, validar os dados da reanálise cria confiabilidade estatística no uso de perfis termodinâmicos derivados destes produtos para regiões com pouca disponibilidade de observações,

como é o caso da região Amazônica. As radiossondas utilizadas neste trabalho foram lançadas a cada 6 horas (0, 6, 12 e 18 Z) durante o experimento GOAmazon2014/5 no sítio T3 em Manacapuru-AM (Martin et al., 2016). Esses dados também foram utilizados por Collow et al.(2016), que realizou o estudos dos ITs ao longo de 2014.

Neste trabalho foi feita a análise dos ITs por meio de radiossondas de 2014 até 2015, bem como dos perfis médios de temperatura (T) e umidade relativa (RH) com ênfase nos períodos chuvosos (Jan-Mar) e secos (Ago-Out). Estudamos diferentes abordagens no cálculo do LCL e comparamos com dados de referência disponibilizados no site da universidade do Wyoming. Por fim, intercomparamos os resultados obtidos (por radiossondas) com aqueles obtidos a partir dos dados da reanálise Era-Interim (Dee et al., 2011).

## 2. Materiais e Métodos

As radiossondas utilizadas durante o experimento GOAmazon2014/5 são do tipo Vaisala modelo RS92-SGP. Elas foram acopladas em balões meteorológicos e lançadas na atmosfera sobre o sítio T3 (3º12'46.70"S, 60º35'53.0"W; 49 m) nos horários meteorológicos padrão (0Z, 6Z, 12Z e 18Z).

As variáveis da reanálise foram adquirida pela página eletrônica do Centro Europeu de Previsão do Tempo (ECMWF) e são do tipo 4D (altitude, longitude, tempo e pressão). As coordenadas utilizadas em nossa análise (3 S, 60 W) foram escolhidas dentro da sua resolução espacial, o mais próximas possíveis do sítio T3 em Manacapuru.

Para intercomparar (reanálise/radiossonda) os perfis verticais de T, RH e Q, foi necessário, para cada nível da reanálise (que possui uma resolução vertical muito inferior a radiossonda), calcular a média entre 10 mb acima e abaixo do nível correspondente para a radiossonda, sendo o desvio padrão nossa estimativa da incerteza. Ao subtrairmos os perfis (reanálise - radiossonda), e tomarmos os valores médios por estação e horário, foi feita também a propagação de incertezas.

O LCL foi calculado a partir da equação documentada na página eletrônica da universidade do Wyoming<sup>1</sup>, que utiliza como dados de entrada os valores médios de T e RH em uma camada atmoférica próxima à superfície. A partir do caminho da parcela de ar no diagrama termodinâmico, pudemos obter por métodos numéricos, o nível de convecção livre (LFC) e as energias potenciais disponíveis e de inibição (CAPE e CINE) pela integração das áreas mostradas na figura 1.



## 3. Resultados

## 3.1 Radiossonda

A partir dos dados de umidade relativa da radiossonda, observarmos um grande contraste entre a atmosfera durante as estações seca e chuvosa. Os efeitos dessa diferença na umidade relativa acarretarão em mudanças nos valores dos ITs.

Os valores de umidade relativa próximos à superfície são importantes para a determinação do LCL (base da nuvem). Valores menores de RH promovem LCLs mais altos, visto que a parcela de ar formada na superfície precisa diminuir sua temperatura atingindo altitudes maiores para condensar seu vapor de água disponível. Comparamos os perfis médios de RH das estações chuvosa

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>http://weather.uwyo.edu/upperair/indices.html



Figura 2 – Perfis médios de temperatura (em cima) e umidade relativa (em baixo) para as estações chuvosa (cyan) e seca (vermelho) de 2014 (esquerda) e 2015 (direita). As regiões sombreadas delimitam o intevalo do percentil de 25th a 75th. A linha preta é a mediana.

e seca de 2014 e 2015 para o horário das 18 Z (14h local), quando a camada limite está bem desenvolvida. As figuras 2a e 2b mostram que tanto em 2014 quanto em 2015, a mediana de RH é sistematicamente menor ao longo da vertical para a estação seca. Além disso, a estação seca de 2015 tem valores ainda menores de umidade relativa em relação ao ano anterior, particularmente em níveis médios (500 hPa) mas também em superfície. Em outras palavras, o ano de 2015 teve uma estação seca mais severa quando comparada à de 2014. Essa diferença interanual pode ser explicada pelo impacto do forte El Niño ao final de 2015 na região onde foram coletados os dados do experimento GOAmazon2014/5 (Bueno, 2018).

Valores de temperatura próximos à superfície também são importantes para calcular o LCL. Fizemos a mesma análise sazonal (feita para a umidade relativa) para a temperatura as 18 Z, através dos perfis verticais das medianas. Observamos, nas figuras 2c e 2d, que a amplitude de um percentil a outro é pequeno, sendo ligeiramente maior na superfície em ambos os anos. A maior diferença de temperatura entre as estações de seus respectivos anos ocorre próximo à superfície, e fica cada vez menor com a altitude, sendo praticamente impossível distinguir a estação seca da chuvosa acima de 800 hPa.

Merece atenção mencionar que estamos utilizando dados das 18 Z porque nesse horário, não há a presença de inversões de temperatura em camadas pouco acima da superfície. A figura 3 mostra inversões que frequentemente observamos as 0, 6 e 12 Z. Já as 18 Z, a camada limite esta bem misturada, e podemos observar um comportamento linear da temperatura até níveis muito acima de 500 m, como observado exemplo apresentado da figura 3c, quando foi até 1.5 Km de

altitude. Ao utilizarmos médias de T e RH em diferentes camadas entre 0 e 500m (como pode ser visto na figura 4, utilizamos 0-500m, 50-500m, 0-350m, 50-350m) como entrada para a equação que calcula o LCL e compararmos com dados de referencia obtidos da página eletrônica da universidade do Wyoming (que utiliza uma camada de 0-500m), observamos o impacto dessas inversões nos valores de LCL, que para as 18 Z, é mínimo. Um outro ponto interessante é que os valores de LCL obtidos pela metodologia documentada no site do Wyoming não gera valores exatamente iguais aos reportados no mesmo dia e hora na página eletrônica, sugerindo um possível critério não documentado nos cálculos.



Figura 3 – Diagramas termodinâmicos para o dia 11 de Agosto de 2015 obtidos por radiossondas lançadas nos horários indicados. Em azul e verde temos a temperatura ambiente e temperatura de ponto de orvalho respectivamente. Em preto esta o caminho da parcela de ar partindo de 250m.



Figura 4 – Comparação entre o LCL de referência (Wyoming) e aqueles obtidos considerando médias de T e RH em diferentes camadas. Os dados acima são da estação chuvosa de 2014 e 2015 como indicado. As categorias no eixo "x"representam: 1: Wyoming(0-500m), 2: 0-500m, 3: 50-500m, 4: 0-350m e 5: 50-350m.

Através dos dados de umidade relativa e temperatura, calculamos o LCL e, a partir desta altitude calculamos o LFC, CINE e CAPE da maneira apresentada na seção de metodologia. Na figura 5, estão as séries temporais desses índices para um LCL calculado utilizando a camada de 0-500m, apenas para o horário das 18 Z.

Os índices termodinâmicos são importantes para estudar as principais mudanças na atmosfera entre o período chuvoso e seco. A figura 5a mostra o degrau de LCL entre a estação chuvosa



Figura 5 – Séries temporais dos índices termodinâmicos (LCL, LFC, CINE e CAPE) calculados a partir do LCL obtido por médias na camada de 0-500m. As curvas mostram os valores diários e uma média móvel de 10 dias, de 1/jan/2014 à 31/dez/2015.

e seca dos anos 2014 e 2015. Há um pico localizado entre os meses da estação seca (agosto a outubro) de 2014 e 2015, que é mais acentuado em 2015, concordando com o fato deste ano ter passado por uma estação seca mais severa como discutido anteriormente.

Também observamos um aumento no LFC da estação seca de cada ano, o que já era um efeito esperado devido ao LFC ser calculado a partir do nível de LCL.

O valor de CINE não sofre grandes mudanças. Seus valores são pequenos se comparados com o CAPE, sendo este último o principal índice que comanda os fenômenos convectivos da região.

A figura 5d também mostra que em 2014, o CAPE é máximo na estação seca (Ago/Out) mas em 2015, observamos o contrário, seu valor decai na estação seca. Esse comportamento inesperado pode estar associado as anomalias causadas pelo El Niño de 2015.

Um ponto importante a se destacar é que por mais que a frequência de chuvas durante a estação chuvosa seja maior (Machado et al., 2018), os maiores valores de instabilidade atmosférica foram observados na estação seca de 2014 (figura 5d), o que contribui para a presença de tempestades mais severas durante esse período quando o processo de precipitação de fato ocorre. Este resultado também é observado por Collow et al. (2016), que analisa dados da mesma campanha (GOAmazon2014/5), mas apenas para o ano de 2014.

## 3.2 Intercomparação com dados da reanálise Era-Interim

Feito o estudo observacional (radiossondas), agora iremos compará-lo com resultados obtidos pelo produto da reanálise Era-Interim. A importância da validação dos dados da reanálise está na possibilidade se substituirem os dados de radiossonda, visto que esta reanálise tem dados do mundo todo desde 1979. Quanto as radiossondas, temos dados apenas para algumas localidades do mundo e com resolução temporal baixa. Contudo, para poder comparar os dois conjuntos de dados neste trabalho, os dados da reanálise foram obtidos nas coordenadas 3 S, 60 W, dentro da sua resolução espacial, o mais próximo possível do sitio T3 em Manacapuru (AM) durante o experimento GOAmazon2014/5.



Figura 6 – Perfis verticais das diferenças de temperatura entre a reanálise e a radiossonda para às 18 Z, nas estações chuvosa (esquerda) e seca (direita).

A figura 6 mostra que tanto na estação chuvosa quanto na seca às 18 Z, os perfis de diferença de temperatura entre reanálise e radiossonda para 2014 e 2015 são praticamente indistinguíveis (se considerarmos uma incerteza de 3 sigmas). Isso demonstra que a reanálise erra de maneira sistemática nos dois anos, porém, é difícil justificar esse erros, há alguns trabalhos que os estudaram em maiores detalhes como Bao e Zhang (2013). Além disso, o maior erro de temperatura cometido pela reanálise ocorre em 950 mb e é maior em 2014 durante o período seco. Este maior erro próximo à superfície pode estar relacionado com a baixa resolução vertical da reanálise próxima a superfície e com o tipo de vegetação representado, isto é, com a incapacidade da reanálise em modelar adequadamente a interação entre a biosfera e a atmosfera.

Em relação à umidade relativa às 18 Z (figura 7a e 7b), o máximo de erro da reanálise ocorre em altas altitudes, aproximadamente a partir de 400 mb. Porém, como há uma diferença pequena de umidade específica (q) em altas altitudes (figura 7c e 7d), do ponto de vista de conteúdo de vapor, os erros nas camadas mais baixas são mais relevantes. Próximo à superfície, a diferença entre reanálise e radiossonda se aproxima de zero, demonstrando que a reanálise acertou bem os valores nesse horário, exceto na estação seca de 2015.

O maior erro em relação à umidade específica cometido pela reanálise, ocorre na superfície. Nesse nível, os valores da renálise são, em 2014, menores do que os disponibilizados pelas radiossondas na estação chuvosa. Na estação seca, próximo a superfície, a renálise erra em 2015, de maneira oposta a 2014, onde os valores de q da reanálise superaram os valores de radiossonda na superfície, além de 2015 ter acertado melhor os valores dessa variável (q), mesmo sendo um ano onde os dados observacionais foram afetados pelo El Niño. Está diferença é um reflexo das diferenças na temperatura, já discutidas.

A partir dos dois conjuntos de dados (radiossonda x reanálise), calculamos os índices termodinâmicos e fizemos uma comparação entre eles. Primeiro, comparamos os LCLs obtidos pelas médias de T e RH em diferentes colunas (0-100m, 0-300m e 0-500m). Fizemos então um ajuste linear pelo método dos mínimos quadrados, para cada um dos horários, para verificar a correlação entre os dois conjuntos de dados.

Para o LCL calculado para a camada 0-100 m, nota-se uma melhor correspondência entre reanálise e radiossonda, com coeficientes angulares mais próximas de 1, para o horário das 18Z.



Figura 7 – Perfis verticais das diferenças de umidade relativa (RH) e umidade específica (Q) entre a reanálise e a radiossonda para às 18 Z, nas estações chuvosa (esquerda) e seca (direita).



Figura 8 – Ajustes lineares para cada horário, de todos os valores ao longo dos dois anos (2014 e 2015) de LCL calculado com valores médios de T e RH de (a) 0 a 100, (b) 0 a 300, e (c) 0 a 500 metros.

Isto é um resultado coerente com o observado nas figuras 7a e 7b, que mostram que à superfície a diferença reanálise-radiossonda de RH é menor nesse horário, o que nos faz hipotetizar que quando os valores de RH sonda/reanálise concordam, os valores de LCL também terão boa concordância - mesmo que ainda com uma certa discrepância em temperatura (figuras 6a e 6b). Portanto, acertar

	0-100m	0-300m	0-500m
Horas	C.A e C.L	C.A e C.L	C.A e C.L
00 Z	0.46(1) 531(13)	0.72(2) 270(18)	0.75(2) 229(22)
06 Z	0.37(2) 630(18)	0.72(3) 280(26)	0.82(4) 175(33)
12 Z	0.51(2) 483(20)	0.70(3) 297(27)	0.78(4) 206(34)
18 Z	0.98(1) 22(11)	0.90(1) 89(13)	0.87(2) 114(18)

Tabela 1 – Tabela com os coeficientes angulares (C.A) e lineares (C.L) dos ajustes da figura 8.

o valor de umidade relativa é essencial para que a reanálise reproduza LCLs compatíveis com as radiossondas. Nos outros horários (0Z, 6Z e 12Z), em que a umidade relativa do modelo é mais discrepante na superfície, os coeficientes dos ajustes de LCL (0-100m) ficaram muito ruins (vide tabela 1).

Conforme utilizamos camadas maiores (0-300m e 0-500m) para calcular o LCL, os erros de T e RH do modelo em cada horário tendem a se compensar e os coeficientes angulares dos ajustes das 0, 6 e 12 Z vão melhorando. Porém, para esses horários (0, 6 e 12 Z), os coeficientes lineares continuam totalmente incompatíveis com 0 (tabela 1).

Os índices termodinâmicos da figura 9 foram calculados a partir da metodologia que utiliza médias na camada de 0-500m para o cálculo do LCL.



Figura 9 – Séries temporais da reanálise - radiossonda dos índices termodinâmicos (LCL, LFC, CINE e CAPE) às 18 Z, calculados a partir do LCL obtido por médias na camada de 0-500m. Valores diários e média de 10 dias indicados na figura.

Pela figura 9, as séries temporais das diferenças reanálise - radiossonda dos índices termo-

dinâmicos as 18 Z (medias de 10 dias) de LFC, CINE e CAPE, mostram que os valores da reanálise são muito diferentes dos valores obtidos pelas radiossondas. Os valores de LFC e CAPE (figura 9b e 9d respectivamente) da reanálise são predominantemente menores que aquelas da radiossonda ao longo dos dois anos, lembrando que, valores menores de LFC em unidade de pressão, equivalem a valores maiores em altura. Ainda que 2015 seja um ano de El Niño, é interessante notar que essa diferença (de LFC e CAPE) é menor em relação a 2014. De maneira oposta o CINE é predominantemente maior, porém, como discutido anteriormente, seus valores são muito pequenos em comparação ao CAPE, se tornando um índice de pouca relevância na análise da convecção.

Por fim, é importante ressaltar que o CAPE da reanálise possui valores significativamente mais baixos que obtidos com dados da radiossonda. Em 2014, pode-se observar grande variabilidade em CAPE, com diferenças de até 1000 J/Kg. Porém, visto que obtivemos valores muito altos de CAPE para a radiossonda (figura 5d), é possível que o método de determinação do CAPE por meio dos perfis termodinâmicos não seja eficiente na região (Amazônia central), visto que valores maiores que 2000 J/kg são elevados demais até mesmo para uma região marcada por convecção profunda como a Amazônia.

## 4. Conclusão

A equação utilizada para calcular o LCL pode gerar grande disparidade de valores, dependendo da espessura da camada atmosferica utilizada para tomarmos as médias de T e RH. Isto foi particularmente crítico para as 0, 6 e 12 Z (figura 4), devido à presença de inversões térmicas próximas à superfície. Devido ao El Niño, 2015 passou por uma estação seca mais severa que no ano anterior (2014), obtendo valores menores de RH no perfil vertical. Consequentemente, os valores de LCL deste período (estação seca de 2015) foram os mais altos, e os de CAPE, os mais baixos. Como observado neste trabalho e por Collow et al. (2016), 2014 possui CAPE mais alto na estação seca, porém, em 2015 observamos o oposto devido ao El Niño.

Tanto em 2014 como em 2015, os perfis verticais de T, RH e Q gerados pela reanálise Era-Interim diferem de maneira sistemática das observações (radiossondas), embora possamos notar algumas diferenças na estação seca como a da figura 7d (próximo a superfície). A reanálise acerta consideravelmente os valores de RH na superfície as 18 Z, e isso acarretou em boa concordância de LCLs calculados utilizando uma camada próxima a ela (0-100m) nesse horário. Por fim, os valores de CAPE gerados pela reanálise se mostraram totalmente incompatíveis com as radiossondas, com diferenças de até 1000 J/Kg.

## 5. Referencias Bibliográficas

Bao, X., and Zhang, F. (2013). Evaluation of NCEP-CFSR, NCEP-NCAR, ERA-Interim, and ERA-40 reanalysis datasets against independent sounding observations over the Tibetan Plateau. Journal of Climate, 26(1), 206-214. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00056.1 x

Bueno, P.B: Sistemas Meteorológicos Atuantes Durante o Experimento GOAMAZON e Impactos no Conjunto de Dados Coletados. Tese de Doutorado, IAG-USP, 2018.

Collow, A. B. M., M. A. Miller, and L. C. Trabachino (2016), Cloudiness over the Amazonnrainforest: Meteorology and thermodynamics, J. Geophys. Res. Atmos., 121, 7990-8005, doi: 10.1002/2016JD024848.

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., van de Berg, L., 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., Park, B., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J. and Vitart, F. (2011), The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. Q.J.R. Meteorol. Soc., 137: 553-597. doi:10.1002/qj.828

Machado, L. A. T., Calheiros, A. J. P., Biscaro, T., Giangrande, S., Silva Dias, M. A. F., Cecchini, M. A., Albrecht, R., Andreae, M. O., Araujo, W. F., Artaxo, P., Borrmann, S., Braga, R., Burleyson, C., Eichholz, C. W., Fan, J., Feng, Z., Fisch, G. F., Jensen, M. P., Martin, S. T., Pöschl, U., Pöhlker, C., Pöhlker, M. L., Ribaud, J.-F., Rosenfeld, D., Saraiva, J. M. B., Schumacher, C., Thalman, R., Walter, D., and Wendisch, M.: Overview: Precipitation characteristics and sensitivities to environmental conditions during GoAmazon2014/5 and ACRIDICON-CHUVA, Atmos. Chem. Phys., 18, 6461-6482, https://doi.org/10.5194/acp-18-6461-2018, 2018.

Martin, S. T., Artaxo, P., Machado, L. A. T., Manzi, A. O., Souza, R. A. F., Schumacher, C., Wang, J., Andreae, M. O., Barbosa, H. M. J., Fan, J., Fisch, G., Goldstein, A. H., Guenther, A., Jimenez, J. L., Pöschl, U., Silva Dias, M. A., Smith, J. N., and Wendisch, M.: Introduction: Observations and Modeling of the Green Ocean Amazon (GoAmazon2014/5), Atmos. Chem. Phys., 16, 4785-4797, 2016 doi:10.5194/acp-16-4785-2016