

## **Wavelet de Morlet Aplicada à Detecção de Ondas de Gravidade acima da Floresta Amazônica em Rondônia**

### **Cléo Quaresma Dias Júnior**

Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA) - Universidade do Estado do Amazonas (UEA) –  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA)  
Belém, PA.

E-mail: [cleo.quaresma@ifpa.edu.br](mailto:cleo.quaresma@ifpa.edu.br)

### **Cledenilson Mendonça de Souza**

Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA) - Universidade do Estado do Amazonas (UEA)  
Manaus, AM.

E-mail: [cledenilsonms@gmail.com](mailto:cledenilsonms@gmail.com)

### **Leonardo Deane de Abreu Sá**

Centro Regional da Amazônia-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CRA-INPE)  
Belém, PA.

E-mail: [leonardo.deane@pq.cnpq.br](mailto:leonardo.deane@pq.cnpq.br)

## **RESUMO**

Realiza-se um levantamento estatístico das características das ondas de gravidade que são geradas acima da floresta amazônica. Mais especificamente suas escalas de ocorrência, amplitude, tempo de duração, entre outros.

As ondas de gravidade (OGs) são uma componente importante da camada limite atmosférica (CLA) e sua ocorrência se deve à existência de uma estratificação de densidade estável no escoamento. Como uma propriedade importante destaca-se a capacidade que as OGs apresentam de transportar energia e momento de uma região para outra da atmosfera [4]. A turbulência intermitente que ocorre na CLA estável (CLE) está, muitas vezes, associada ao “colapso das ondas de gravidade” e constitui um dos fenômenos observados na CLE responsáveis por eventuais intensos episódios de mistura vertical noturna [2], já tendo sido verificado um episódio de sua ocorrência acima da CLE amazônica [6]. Contudo, características estatísticas de sua existência, tais como sua duração média e horários preferenciais de sua manifestação, ainda são pouco conhecidos. Tais características são analisadas nesta pesquisa utilizando-se dados medidos a taxas superiores a 10 Hz, acima da reserva florestal Rebio - Jarú, na Amazônia Ocidental, Rondônia – Brasil, durante a campanha experimental intensiva da estação úmida do projeto LBA (Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia). Os arquivos, contendo 1 hora de dados, foram analisados e detectaram-se 66 episódios de OGs observados durante 8 noites entre 10 e 20 de fevereiro (dias julianos de 41 a 51) de 1999. Para cada noite, a análise ficou restrita aos períodos 20h a 06h (hora local).

Para a detecção OGs e sua posterior análise foi usada a transformada wavelet (TW) contínua de Morlet que é uma ferramenta matemática usada para decompor uma série temporal em suas componentes de frequência, mantendo as informações sobre sua localização temporal [1]. Desta forma foi utilizado o espectro cruzado da TW da componente vertical do vento ( $w$ ) e da temperatura do ar ( $T$ ) como indicador de atividades de OG. Isto porque é sabido que um campo de OG pura apresenta característica distinta daquele de um escoamento turbulento, o primeiro caracterizando-se pela ausência de difusão vertical. Desse modo, espera-se que em uma região com ocorrência de OGs puras, as flutuações de  $w$  e  $T$  estejam em “quadratura” ( $90^\circ$  fora de fase). Assim o espectro de fase apresenta valores próximos de  $\pm 90^\circ$  [6].

A função complexa de Morlet, aqui utilizada, é expressa por [6]:

$$\psi(\eta) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0\eta} e^{-\eta^2/2}$$

onde  $\eta$  é o parâmetro adimensional de tempo e  $\omega_0$  é a frequência adimensional. Outros tipos de funções wavelet e suas características podem ser encontradas em [5]. A transformada wavelet é definida como [1]:

$$W(t, a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \psi^*\left(\frac{\tau - t}{a}\right) d\tau$$

onde  $t$  é o tempo,  $a$  é um parâmetro de escala,  $\tau$  é a variável de integração que desloca as versões em escala da wavelet mãe ao longo da série temporal  $x_n$  e (\*) indica o complexo conjugado. A técnica de wavelet também pode ser aplicada a um par de séries temporais, tais como  $w$  e  $T$  de modo que suas variabilidades comuns em frequência e tempo podem ser determinadas pelo espectro da wavelet cruzada, calculado como

$$W_{wT} = W_w W_T^*$$

A parte complexa do  $W_{wT}$  fornece a informação sobre a diferença de fase ( $DF_{wT}$ ) entre  $w(t)$  e  $T(t)$ , definido como [5]:

$$DF_{wT} = \tan^{-1}\{Im[W_{wT}]/Re[W_{wT}]\}$$

O valor absoluto de  $W_{wT}$  constitui a potência da wavelet cruzada, sendo proporcional à covariância entre as séries temporais, e a parte complexa de  $W_{wT}$  oferece informações sobre a diferença de fase entre  $w$  e  $T$  [3], a qual será útil para a detecção das OGs.

Com o objetivo de mostrar a validade da metodologia descrita acima foram criadas duas séries temporais hipotéticas (duas senóides). Primeiramente calculou-se a wavelet cruzada das duas séries em fase projetando-se a diferença entre suas fases em três escalas temporais escolhidas aleatoriamente (16s, 128s e 512s), como é mostrado na figura 1a, 1b, 1c e 1d. Em seguida procedeu-se da mesma maneira, mas agora, para as senóides em quadratura (figura 1e), e suas respectivas diferenças de fase (1f, 1g e 1h).

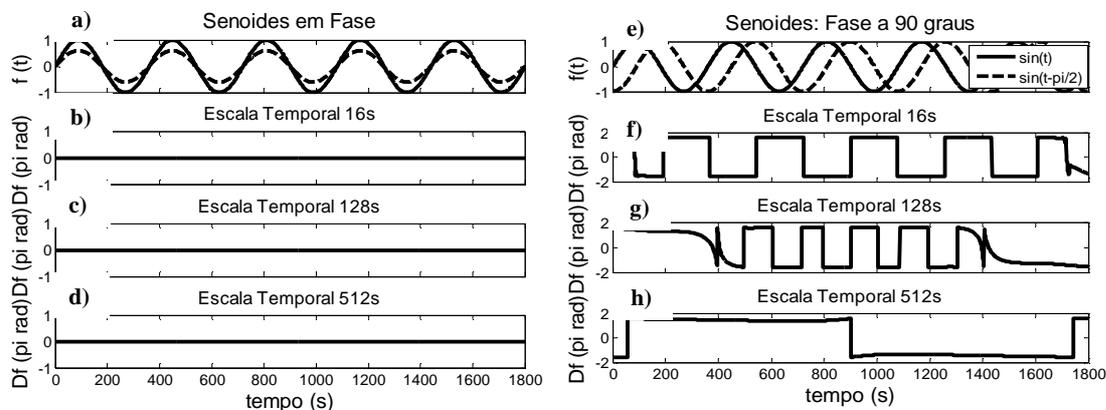


Figura 1 – (a) senóides em fase (1a) e a diferença de fase entre ambas em três escalas diferentes (1b, 1c e 1d), em radianos. Senóides em quadratura (1e), e a diferença de fase entre ambas, em radianos, para diferentes escalas temporais (1f, 1g e 1h).

Como esperado, as diferenças de fase mostradas nas figuras 1b, 1c e 1d foram de  $0^0$  enquanto que em 1f, 1g e 1h foram de  $90^0$  (1,57 rad). Resultado esse que mostra a consistência da metodologia.

Dessa maneira foi calculada a diferença de fase entre  $w$  e  $T$  para todos os arquivos de dados compreendidos entre os dias julianos 41 a 51. Como exemplo da detecção de uma OG é mostrada a figura 2 onde é observado um evento ocorrido no dia 43 juliano. Essa OG apresenta uma escala temporal de ocorrência de 304,4s e sua duração foi de aproximadamente 1000s (17min), começando por volta das 21:13h e se estendendo até aproximadamente as 21:30h.

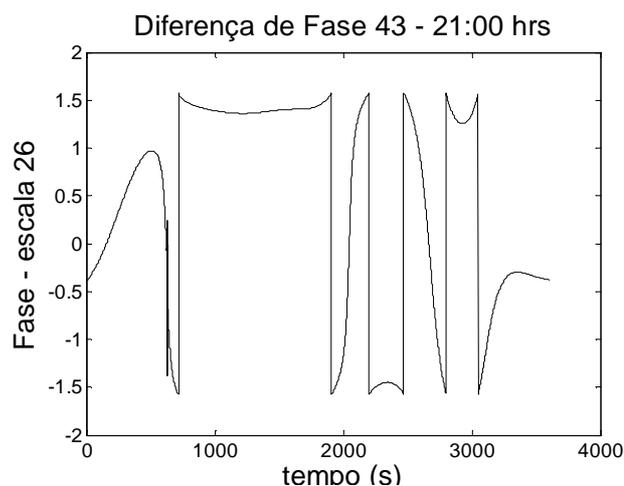


Figura 2 – diferença de fase entre  $w$  e  $T$  no dia Juliano 43 as 21:00h.

Após análise dos dados foram plotadas as tabelas 1 e 2 que mostram, respectivamente, o número de OG em cada hora do período noturno e o número de eventos por escala temporal. É possível observar que 41% dos eventos de OGs ocorreram de madrugada (de 00:00h as 06:00h) enquanto que, o restante, 59% ocorreram durante o início da noite (20:00h as 24:00h). Além disso, foi constatado que as OGs apresentaram escalas temporais desde 107,6s até 2048s, no entanto 83,3% dos eventos apresentaram escala temporal variando na faixa de 215s a 861s.

**Tabela 1:** Número de ondas de gravidade em diferentes horários, durante o período noturno, acima da reserva florestal Rebio - Jarú

Horário de Ocorrência	Número de Eventos
00:00	2
01:00	3
02:00	6
03:00	5
04:00	4
05:00	7
<b>Total Madrugada</b>	<b>27</b>
20:00	9
21:00	9
22:00	12
23:00	9
<b>Total Noite</b>	<b>39</b>

**Tabela 2:** Número de ondas de gravidade em por escala por escala temporal, durante o período noturno, acima da reserva florestal Rebio - Jarú

Escala Temporal de Ocorrência (seg)	Número de Eventos
107,6	1
128,	0
152,2	3
181	3
<b>215,3</b>	<b>7</b>
<b>256</b>	<b>4</b>
<b>304,4</b>	<b>8</b>
<b>362</b>	<b>5</b>
<b>430,5</b>	<b>9</b>
<b>512</b>	<b>4</b>
<b>608,9</b>	<b>4</b>
<b>724,1</b>	<b>8</b>
<b>861,1</b>	<b>6</b>
1024	1
1227,7	0
1448,2	1
1722,2	1
2048	1

### CONCLUSÃO:

Foi aplicada análise de wavelets para investigar ocorrência de ondas de gravidade acima da Floresta Amazônica em Rondônia. Foram detectados 66 eventos de ondas de gravidade sobre a reserva florestal Rebio – Jarú em 8 noites analisadas, durante o ano de 1999 na estação úmida. Foi observado que existe uma banda de escalas temporais preferenciais de ocorrência das ondas de gravidade, sendo que 83,3% dos eventos apresentaram escalas variando entre 215,3s a 861,1s. Além disso, observou-se que os eventos ocorrem mais frequentemente no início da noite comparativamente à madrugada.

**Palavras-chave:** *Camada Limite Noturna, Transformada Wavelet, Espectro Cruzado, Ondas de gravidade, Turbulência, Floresta Amazônica.*

### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, processo 97/09926-9. Cléo Dias Jr. agradece à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos concedida. Cledenilson Mendonça de Souza agradece à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas - FAPEAM e CNPq: 303.728/2010 – 8, 483226/2011 – 4, 306828/2010 – 3. Leonardo Sá agradece ao CNPq – Conselho Nacional de Pesquisas e Desenvolvimento Tecnológico, processo 303.728/2010-8.

## REFERÊNCIAS

- [1] I. Daubechies. “Ten lectures on wavelets. CBMS-NSF regional conference series in applied mathematics”. vol 61. Society for Industrial and Applied Mathematics, Philadelphia, PA, 377 pp, 1992.
- [2] J. Finnigan. “Kinetic-energy transfer between internal gravity-waves and turbulence”. J Atmos Sci 45(3):486–505, 1988.
- [3] A. Grinsted, J. C. Moore, S. Jevrejeva. “Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series”. Nonlinear Process Geophys 11(5–6):561–566, 2004.
- [4] Y.P. Meillier, R.G Frehlich, R.M Jones, B.B Balsley. “Modulation of small-scale turbulence by ducted gravity waves in the nocturnal boundary layer”. J Atmos Sci 65(4):1414–1427, 2008.
- [5] C. Torrence, G. P. Compo. “A practical guide to wavelet analysis”. Bull Am Meteorol Soc 79 (1) : 61–78, 1998.
- [6] M. Zeri, L. D. A. Sá. “Horizontal and Vertical Turbulent Fluxes Forced by a Gravity Wave Event in the Nocturnal Atmospheric Surface Layer Over the Amazon Forest”. Boundary-Layer Meteorol, 138:413–431, 2011.