



Ondas Anormais

Freak/Rogue Waves

Rogério N. Candella
Outubro 2017



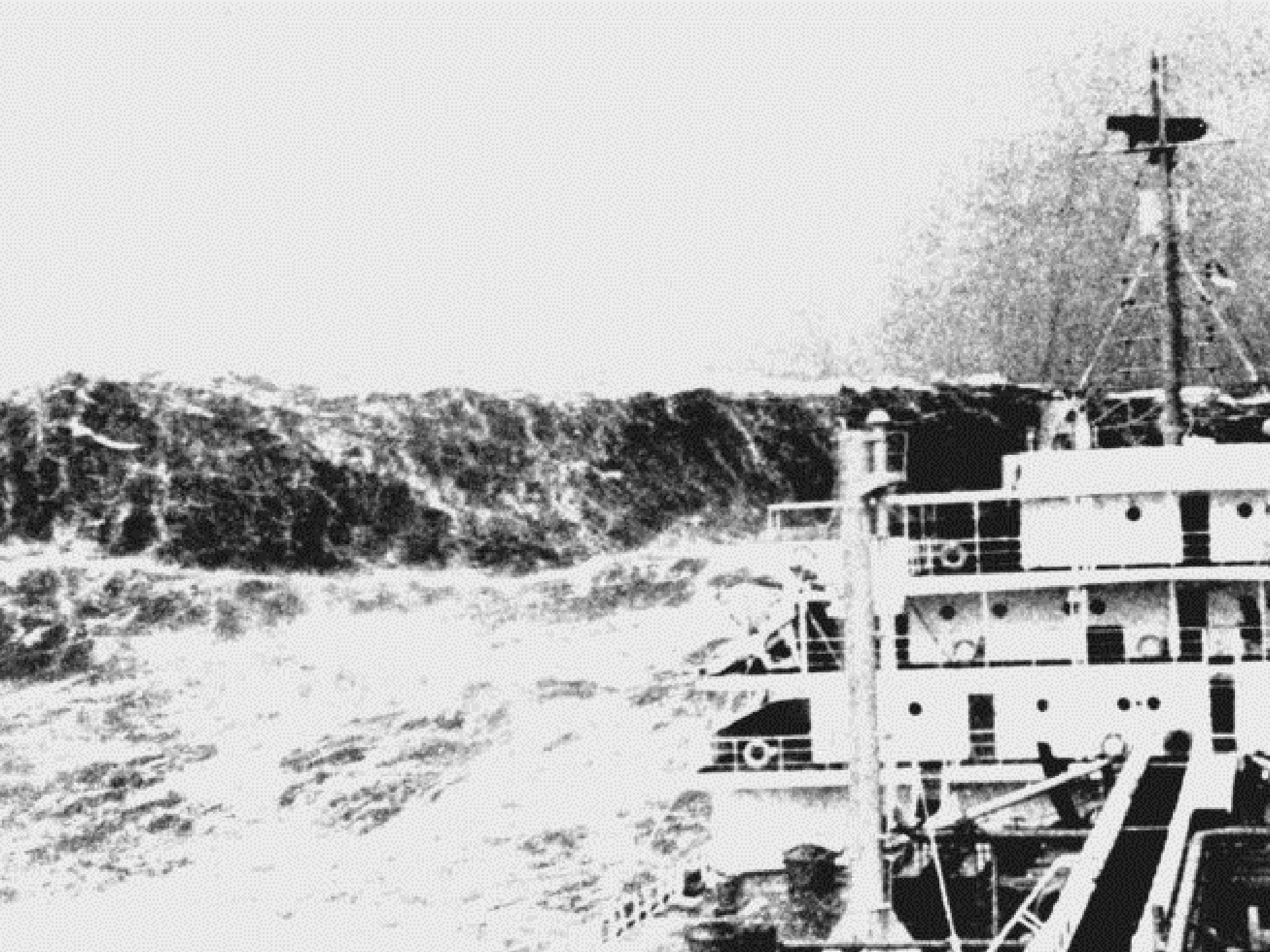
Ondas Anormais

Freak/Rogue Waves

- Onda "individual" muito maior que as outras.
- Ondas que vêm do nada (*Waves from nowhere*).
- Podem ocorrer em águas rasas e profundas, em qualquer estado de mar
- Reportadas desde os anos 50, mas, inicialmente, imaginadas como parte do folclore marítimo.
- Estudadas desde 1980s, tendo como marco a famosa onda "New Year wave", de 25,6 m, registrada no Mar do Norte na plataforma "Draupner", em 1º de Janeiro de 1995.
- Apontadas como causa de diversos acidentes, desde barcos pequenos até grandes navios.

Cr terios para determina o

- Dean (1990) - onda individual com altura maior que a esperada, baseada na distribui o de Rayleigh.
 -  ndice de anormalidade (IA) = H_{max}/H_s
 - ~ 2000 ondas: IA = 2
- Tomita & Kawamura (2000)
 -  ndice de Amplifica o de Crista = $Cr/H_s \geq 1,3$
 - "paredes de  gua"???



Critérios para determinação

- Dean (1990) - onda individual com altura maior que a esperada, baseada na distribuição de Rayleigh.
 - Índice de anormalidade (IA) = H_{max}/H_s
 - ~ 2000 ondas: IA = 2
- Tomita & Kawamura (2000)
 - Índice de Amplificação de Crista = $C_r/H_s \geq 1,3$
- Porém...

- Lehner (2005) - cavados profundos também podem ser perigosos.
- Kharif et al. (2009) → *holes in the sea*

Esse tipo de onda não satisfaz o critério de Tomita & Kawamura!!!

Cr terios para determina o

- Dean (1990) - onda individual com altura maior que a esperada, baseado na distribui o de Rayleigh.
 - $H_{max}/H_s = \text{ ndice de anormalidade (IA)}$
 - 2000 ondas: $IA = 2$
- Tomita & Kawamura (2000)
 -  ndice de Amplifica o de Crista = $Cr/H_s \geq 1,3$
- Candella (2016)
 - $ACav = |Cav|/H_s \geq 1,3$
- Olagnon & Van Iseghem (2000)
 - $H_s \geq 2,0 \text{ m}$

No Brasil

- Não há registros de acidentes **diretamente** associados a ondas anormais.
- Apenas três trabalhos publicados:
 - Pinho, Liu & Ribeiro (2004) Freak waves at Campos Basin Brazil. Geofizika.
 - Candella & Candella (2010) Investigações sobre a Ocorrência de Ondas Anormais em Arraial do Cabo RJ. RBGf
 - Candella (2016) Rogue waves off the south/southeastern Brazilian coast. Nat Hazards.

Cr terios para determina o

- $FW1 \rightarrow IA \geq 2$
- $FW2 \rightarrow FW1 + IAC \geq 1,3$
- $FW3 \rightarrow FW1 + A_{cav} \geq 1,3$
- $FW4 \rightarrow FW1 + FW2(3) + H_s \geq 2,0 \text{ m}$

Dados do PNBOIA



- Dados horários coletados por boias Axys (2009, 2012 e 2013).
- Não contínuos.

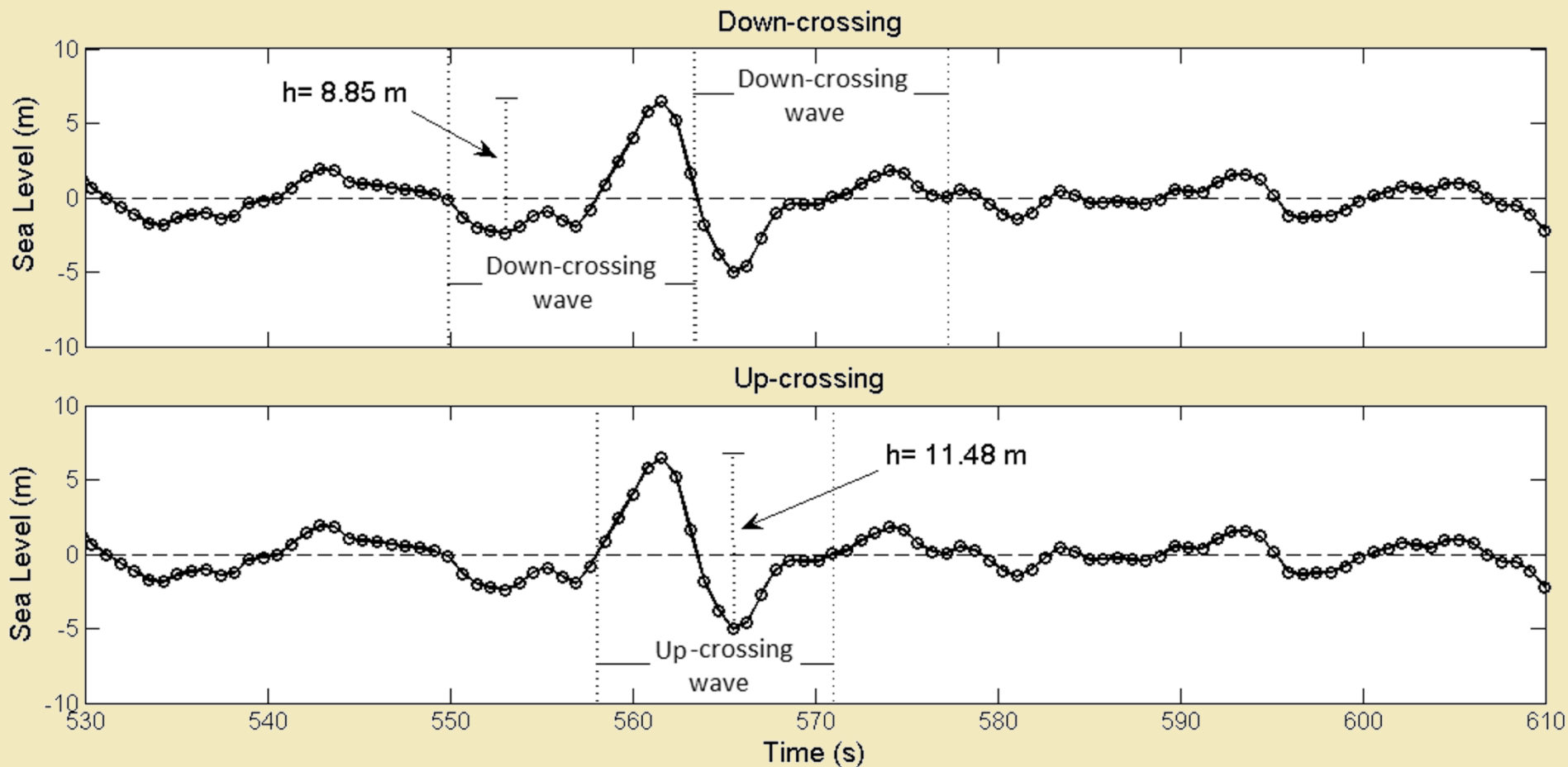
| | | Jan | Fev | Mar | Abr | Mai | Jun | Jul | Ago | Set | Out | Nov | Dec | Total |
|------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|
| 2009 | RS | - | - | - | 188 | 744 | 720 | 744 | 744 | 720 | 744 | 720 | - | 5324 |
| | SC | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | SP | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 2012 | RS | - | 696 | 744 | 720 | 744 | 720 | 744 | 744 | 720 | 744 | 720 | - | 7296 |
| | SC | - | 696 | 744 | 720 | 744 | 720 | 248 | - | - | - | - | - | 3872 |
| | SP | 345 | 696 | 744 | 720 | 744 | 720 | 55 | - | - | - | 325 | 742 | 5091 |
| 2013 | RS | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| | SC | - | 171 | - | - | - | 720 | 744 | 744 | 720 | 744 | 720 | 744 | 5307 |
| | SP | 743 | 660 | 743 | 713 | 743 | 299 | - | - | - | - | - | - | 3901 |

- Utilizados arquivos brutos (HNE).
- Total de registros: 30791 -
Aproximadamente 5 milhões de ondas

Parâmetros Analisados

- H_s (domínio do tempo) = $H_{1/3}$
- H_{max} (domínio do tempo)
- Análises pelos métodos de zero ascendente e descendente (up- e down-crossing)

- Análises em up e down-crossing
 - pouca diferença para H_s
 - em alguns casos, grande diferença para H_{max}



- H_s (domínio do tempo) = $H_{1/3}$
- H_{max} (domínio do tempo)
- Análises em up e down-crossing
- Altura de crista, profundidade do cavado e período calculados para todas as ondas individualmente em cada registro.
- T_p (domínio da frequência)

Resultados

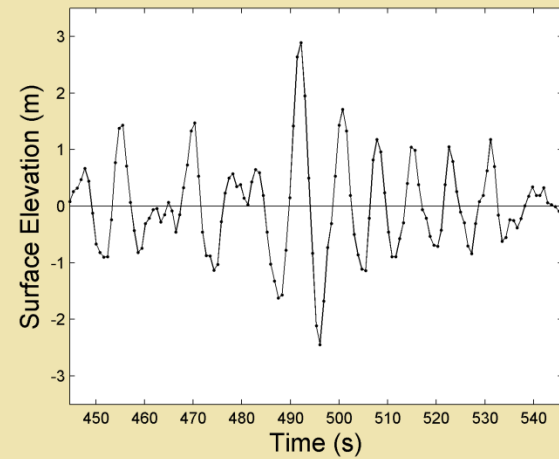
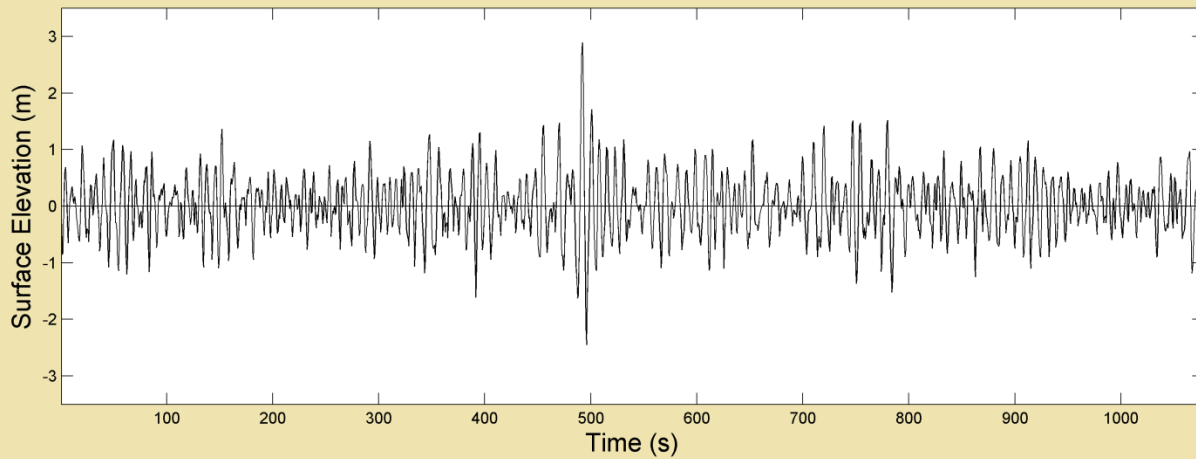
Índice de Anormalidade

- Divinsky et al. (2004) → IA = 3,9, mas contestado por Kharif et al. (2009)
- Kharif et al. (2009) → IA = 3,19
- New Year (Draupner) Wave → IA = 2,24
- Nos dados, $\overline{IA} = 1,5/1,6$

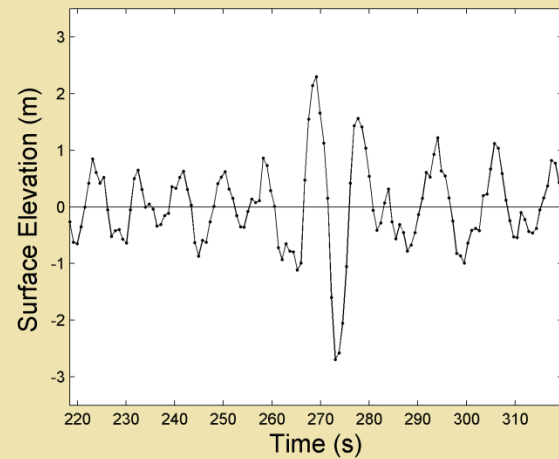
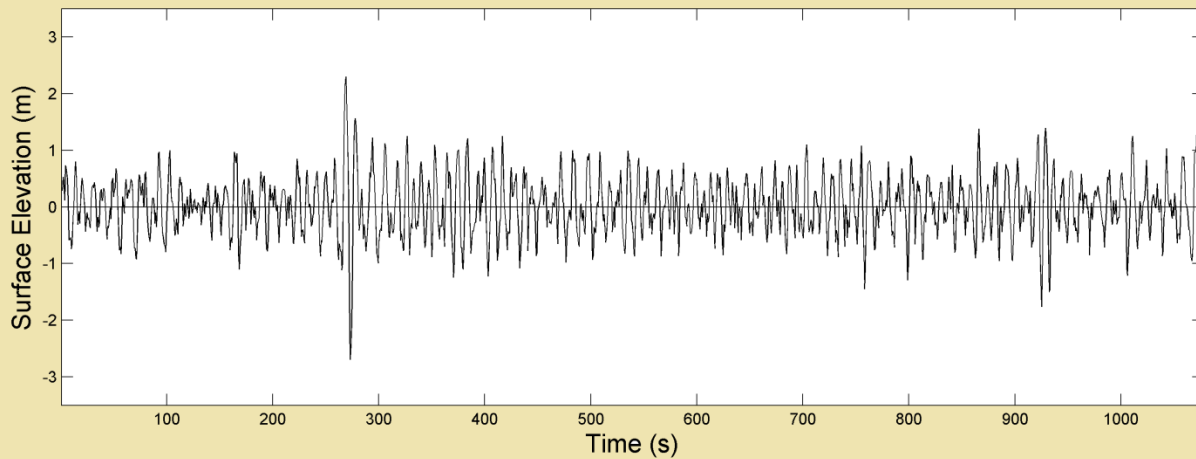
Maiores IA

| | | IA | Hs (m) | Hmax (m) | Date |
|----|------|------|-----------|-------------|---------------------|
| RS | up | 2.63 | 2.03 | 5.34 | 25/11/2012 14:00 |
| | down | 2.38 | 2.63 | 6.25 | 23/11/2012 18:00 |
| SC | up | 2.44 | 2.41 | 5.86 | 30/06/2013 19:00 |
| | down | 2.44 | 2.41 | 5.88 | 14/10/2013 13:00 |
| SP | up | 2.61 | 1.91 | 4.46 | 24/02/2013 10:00 |
| | down | 2.53 | 1.16 | 2.92 | 07/04/2012 04:00 |

RS - 2012 November 25th 14:00 GMT - H_{s_u} : 2.30 m; H_{max} : 5.34 m; H_{max}/H_{s_u} : 2.63



SP - 2013 February 24th 04:00 GMT - H_{s_u} : 1.91 m; H_{max} : 4.46 m; H_{max}/H_{s_u} : 2.61



Alturas Médias para as FW

Considerando Apenas FW1

- RS $\rightarrow 4.77 \pm 1.80$ m
- SC $\rightarrow 4.34 \pm 1.40$ m
- SP $\rightarrow 3.93 \pm 1.32$ m

FW x Estado do Mar

| | Todas FW (IA \geq 2) | | | | Hs \geq 2 m | | | | Hs $<$ 2 m | | | |
|--------------|------------------------|------|-----|------------|---------------|------|----|------------|------------|------|----|------------|
| | Up | Down | UD | Total | Up | Down | UD | Total | Up | Down | UD | Total |
| RS | 182 | 157 | 48 | 291 | 111 | 90 | 30 | 171 | 71 | 67 | 18 | 120 |
| SC | 126 | 121 | 35 | 212 | 74 | 75 | 21 | 128 | 52 | 46 | 14 | 84 |
| SP | 134 | 159 | 42 | 251 | 53 | 66 | 21 | 98 | 81 | 93 | 21 | 153 |
| Total | 442 | 437 | 125 | 754 | 238 | 231 | 72 | 397 | 204 | 206 | 53 | 357 |

Distribuição Mensal

| | | Up-Crossing Freak Wave (m) | | | | | | | | | | | |
|-------|---|----------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-------|-------|-------|
| | | 1-2 | 2-3 | 3-4 | 4-5 | 5-6 | 6-7 | 7-8 | 8-9 | 9-10 | 10-11 | 11-12 | Total |
| Jan | 0 | 3 | 6 | 3 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14 |
| Fev | 0 | 17 | 13 | 9 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 42 |
| Mar | 0 | 13 | 8 | 10 | 4 | 1 | 3 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 40 |
| Abr | 0 | 5 | 16 | 6 | 8 | 4 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 41 |
| Mai | 0 | 9 | 29 | 8 | 4 | 2 | 5 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 60 |
| Jun | 0 | 12 | 15 | 9 | 9 | 7 | 2 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 56 |
| Jul | 0 | 12 | 5 | 6 | 5 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 31 |
| Ago | 0 | 1 | 7 | 2 | 2 | 4 | 4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 |
| Set | 0 | 2 | 10 | 5 | 10 | 4 | 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 36 |
| Out | 0 | 3 | 9 | 13 | 9 | 3 | 5 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 44 |
| Nov | 0 | 4 | 11 | 10 | 9 | 1 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 37 |
| Dez | 0 | 6 | 6 | 6 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 21 |
| Total | 0 | 87 | 135 | 87 | 66 | 29 | 26 | 7 | 3 | 1 | 1 | 0 | 442 |

Assimetria Vertical

- $AV = \frac{\text{altura da crista}}{\text{profundidade do cavado}} = \frac{Cr}{Tr}$
- Maioria assimétrica, geralmente positiva
- 66 % das FW1 $\rightarrow AV > 1$

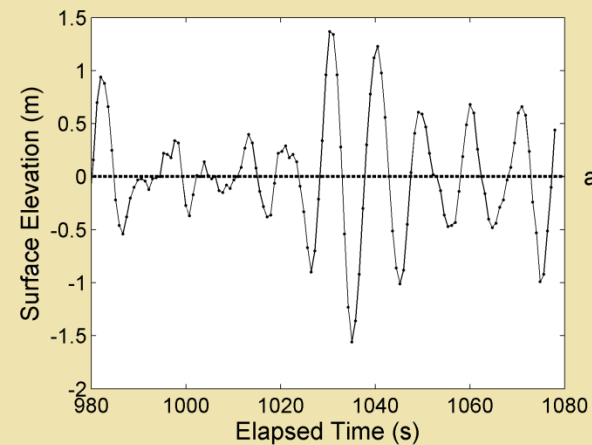
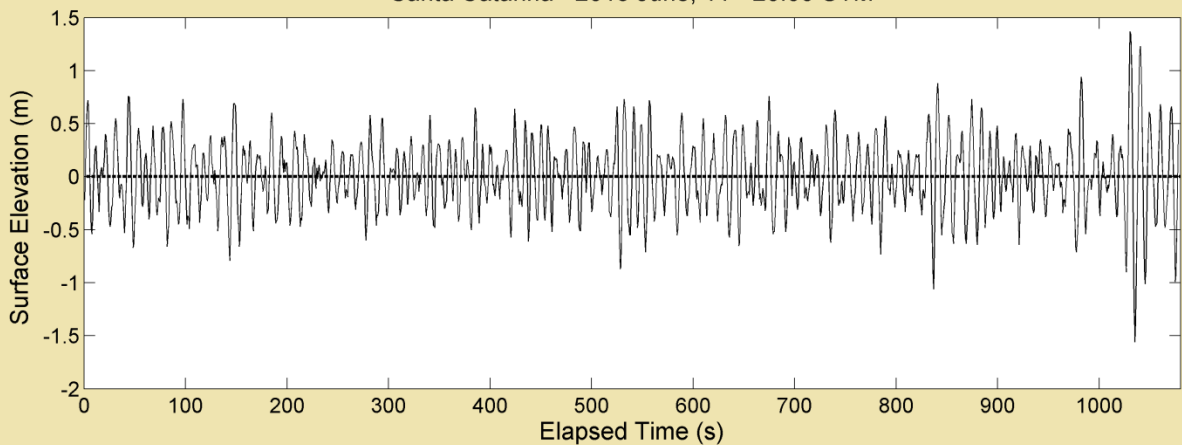
| | Up-Crossing | | | | Down-Crossing | | | |
|----|-----------------|------|-----|------|-----------------|------|-----|------|
| | \overline{AV} | > 1 | =1 | < 1 | \overline{AV} | > 1 | =1 | < 1 |
| RS | 1.12 ± 0.34 | 7306 | 108 | 4879 | 1.11 ± 0.33 | 7149 | 132 | 5011 |
| SC | 1.13 ± 0.35 | 5329 | 92 | 3426 | 1.12 ± 0.33 | 5290 | 70 | 3480 |
| SP | 1.10 ± 0.33 | 4838 | 100 | 3577 | 1.09 ± 0.32 | 4737 | 96 | 3670 |

Distribuição de IAC e Acav nas FW

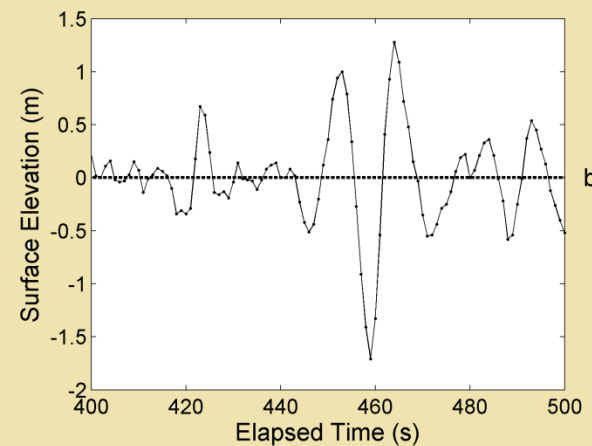
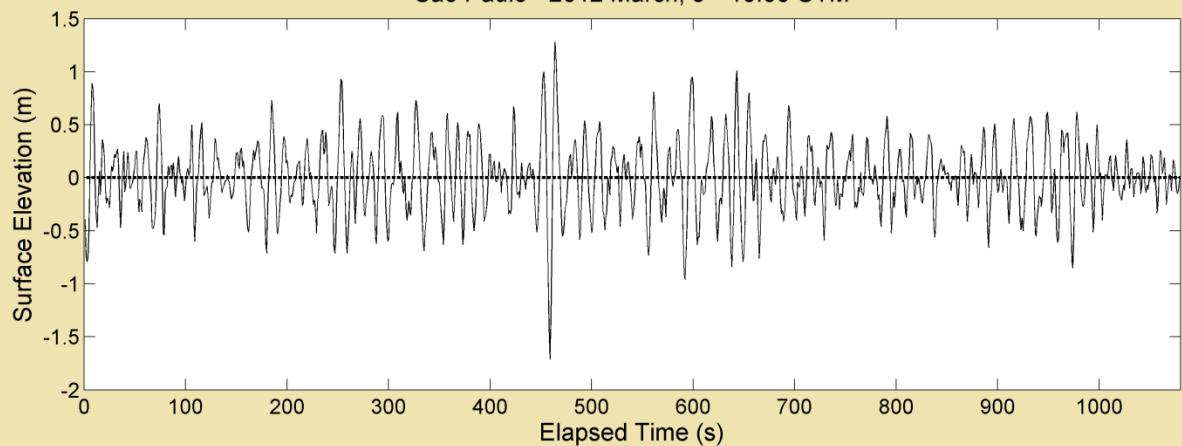
| | | IA \geq 2 | IAC \geq 1,3 | FW2 | Acav \geq 1,3 | FW3 | FW4 |
|----|------|-------------|----------------|-----|-----------------|-----|-----|
| RS | up | 182 | 4 | 3 | 1 | 0 | 3 |
| | down | 157 | 3 | 3 | 1 | 1 | 4 |
| SC | up | 126 | 87 | 3 | 46 | 1 | 2 |
| | down | 121 | 91 | 3 | 44 | 1 | 2 |
| SP | up | 134 | 3 | 2 | 2 | 2 | 0 |
| | down | 159 | 3 | 2 | 2 | 2 | 0 |

A_{cav} ≥ 1,3

Santa Catarina - 2013 June, 11th 20:00 UTM



São Paulo - 2012 March, 3rd 10:00 UTM

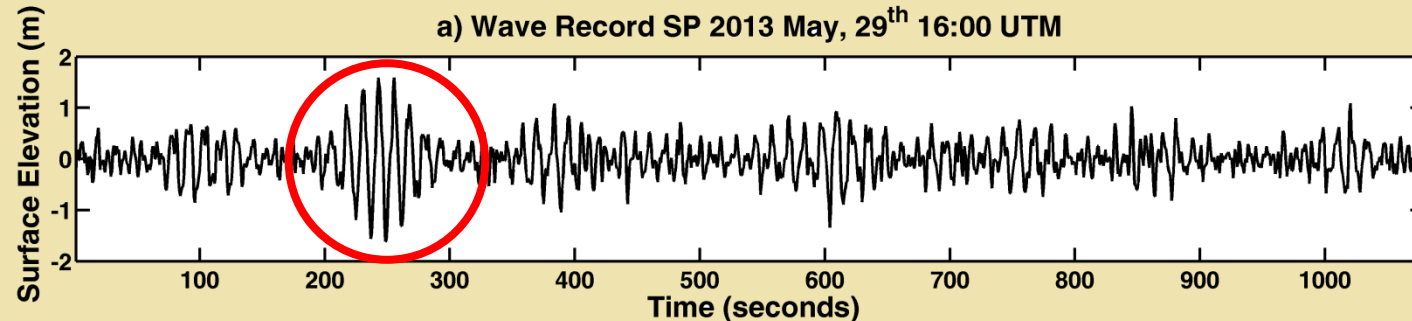


Mais de Uma FW em um Registro

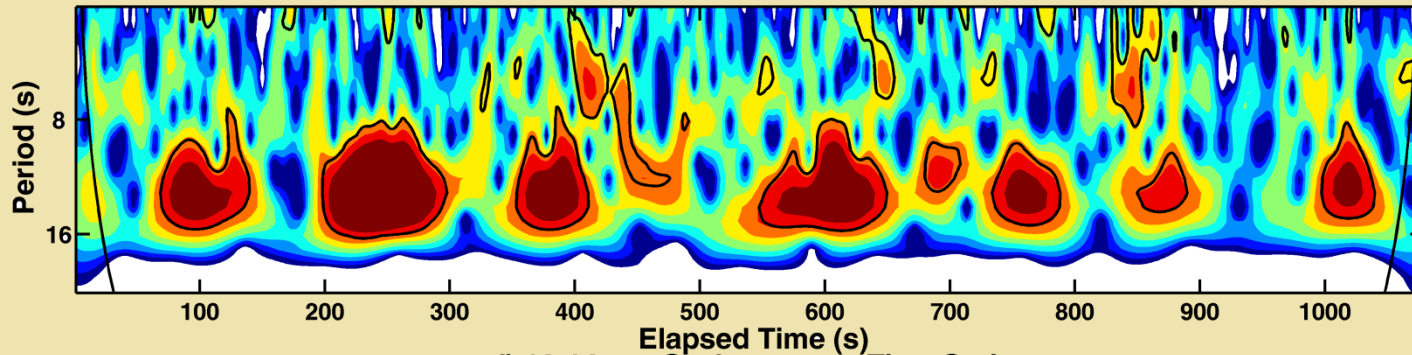
- *Three Sisters* – acidente com navio Louis Majesty [Kharif et al. (2009) e Nikolkina and Didenkulova (2011)]
- Nos dados, 15 casos observados – RS (7), SC (2) e SP (6)
- Em 10 casos, $\overline{H_s} = 1,47$ m, $\overline{H_{max_1}} = 3,16$ m e $\overline{H_{max_2}} = 3,04$ m.
- Em 5 casos, $\overline{H_s} = 2,55$ m, $\overline{H_{max_1}} = 5,49$ m e $\overline{H_{max_2}} = 5,27$ m.
- Extremo → RS (out/2012) – $H_s = 3,60$ m, $H_{max_1} = 7,66$ m e $H_{max_2} = 7,49$ m

2 FW no Mesmo Grupo

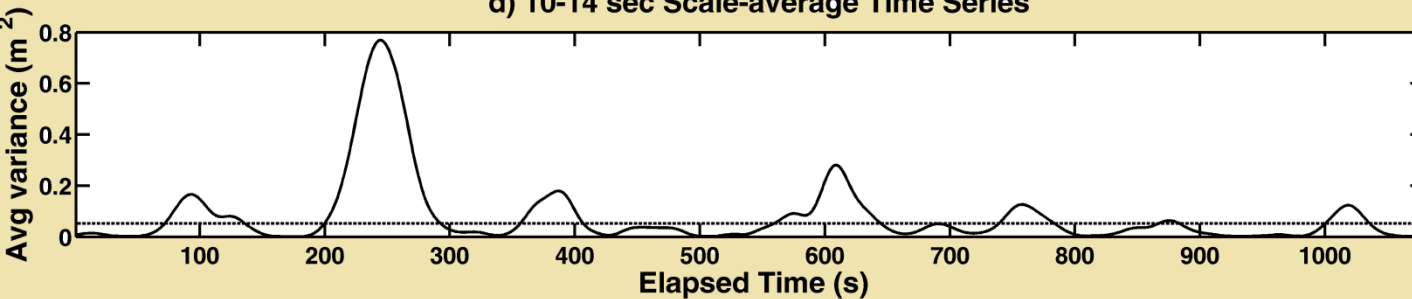
a) Wave Record SP 2013 May, 29th 16:00 UTM



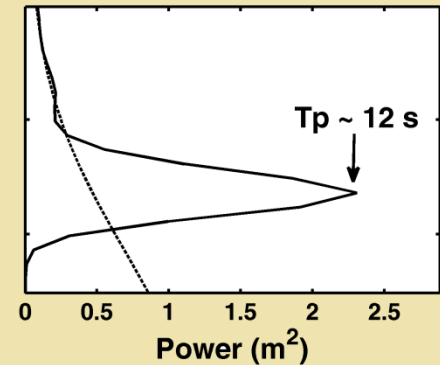
b) Wavelet Power Spectrum



d) 10-14 sec Scale-average Time Series

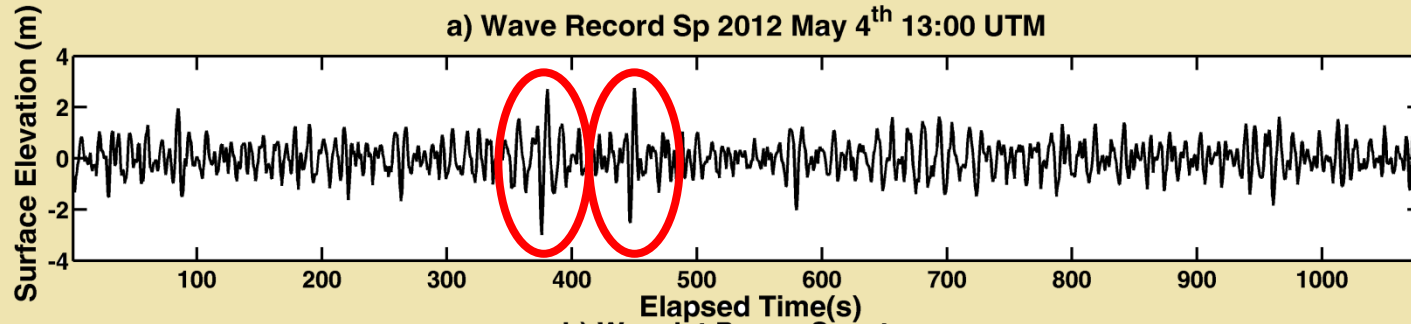


c) Global Wavelet Spectrum

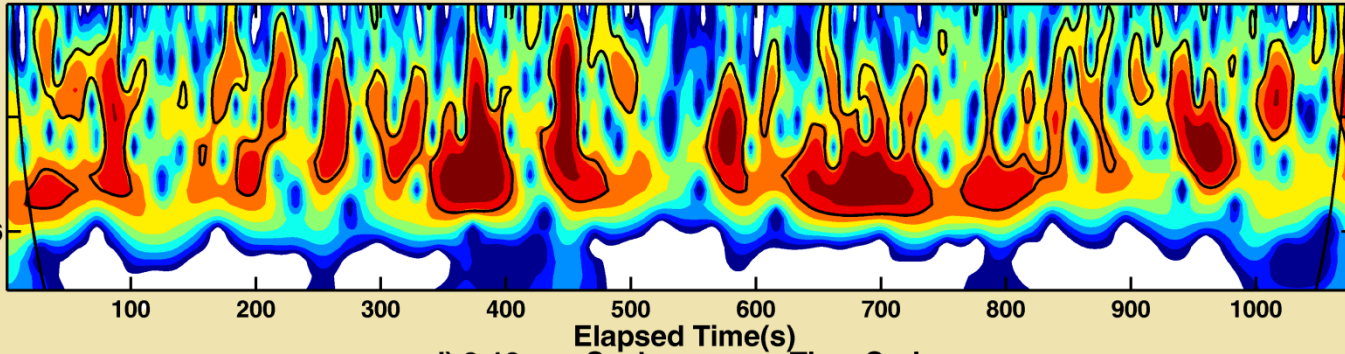


2 FW Isoladas

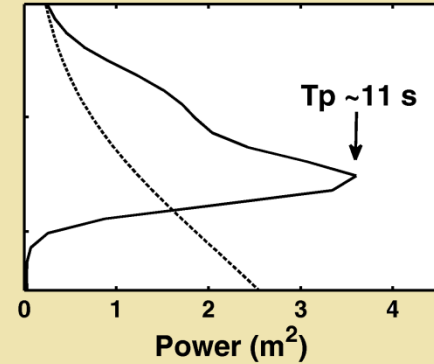
a) Wave Record Sp 2012 May 4th 13:00 UTM



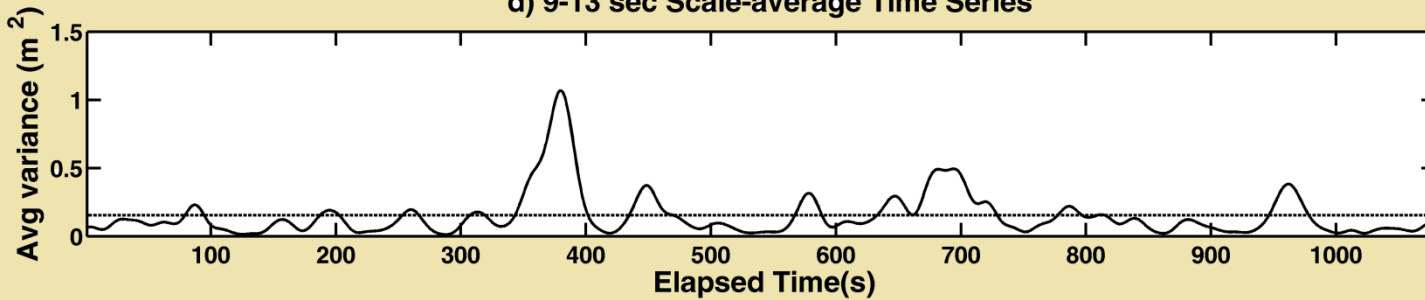
b) Wavelet Power Spectrum



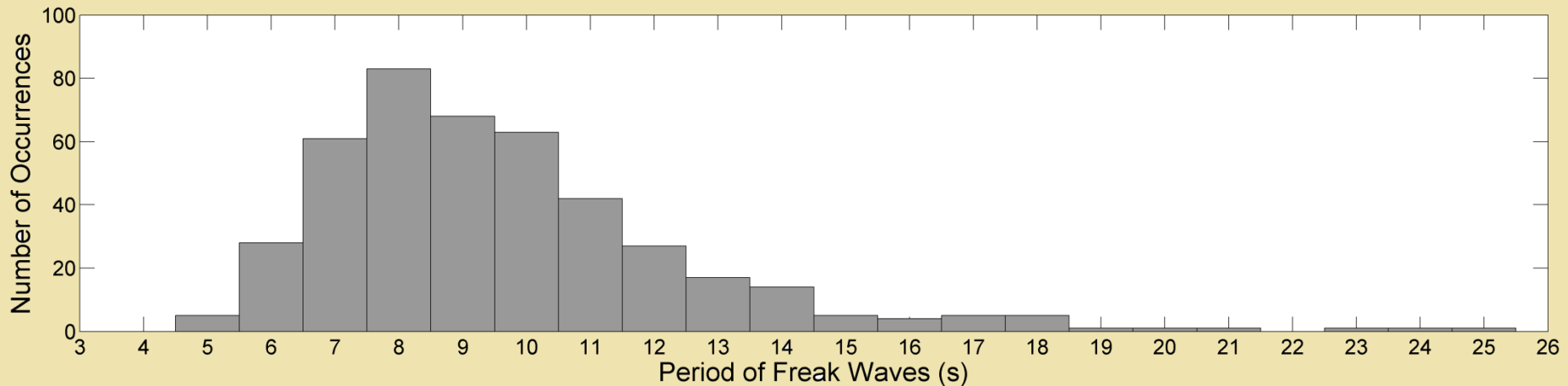
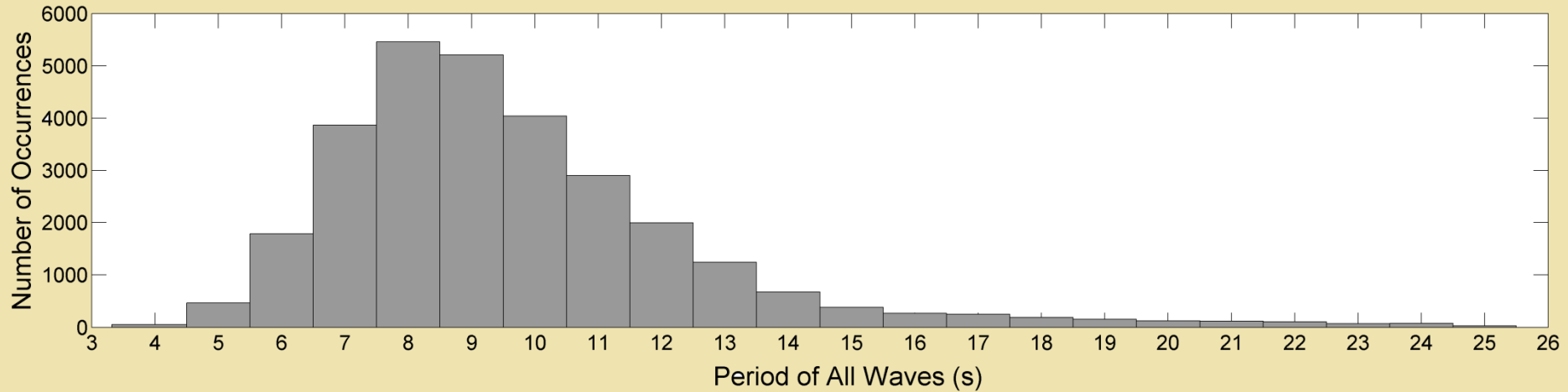
c) Global Wavelet Spectrum



d) 9-13 sec Scale-average Time Series



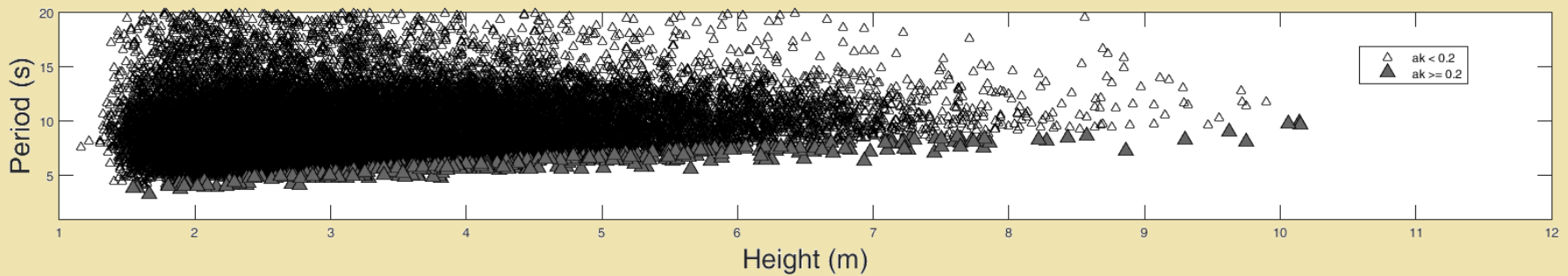
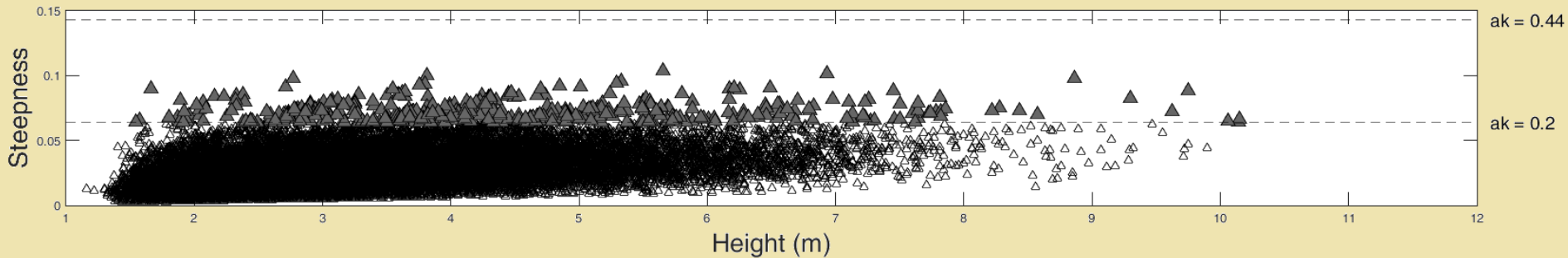
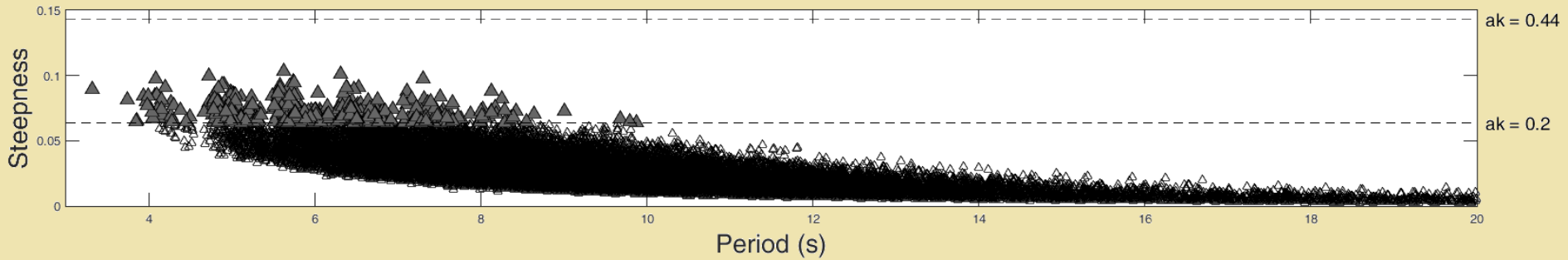
Período das Maiores Ondas de Cada Registro



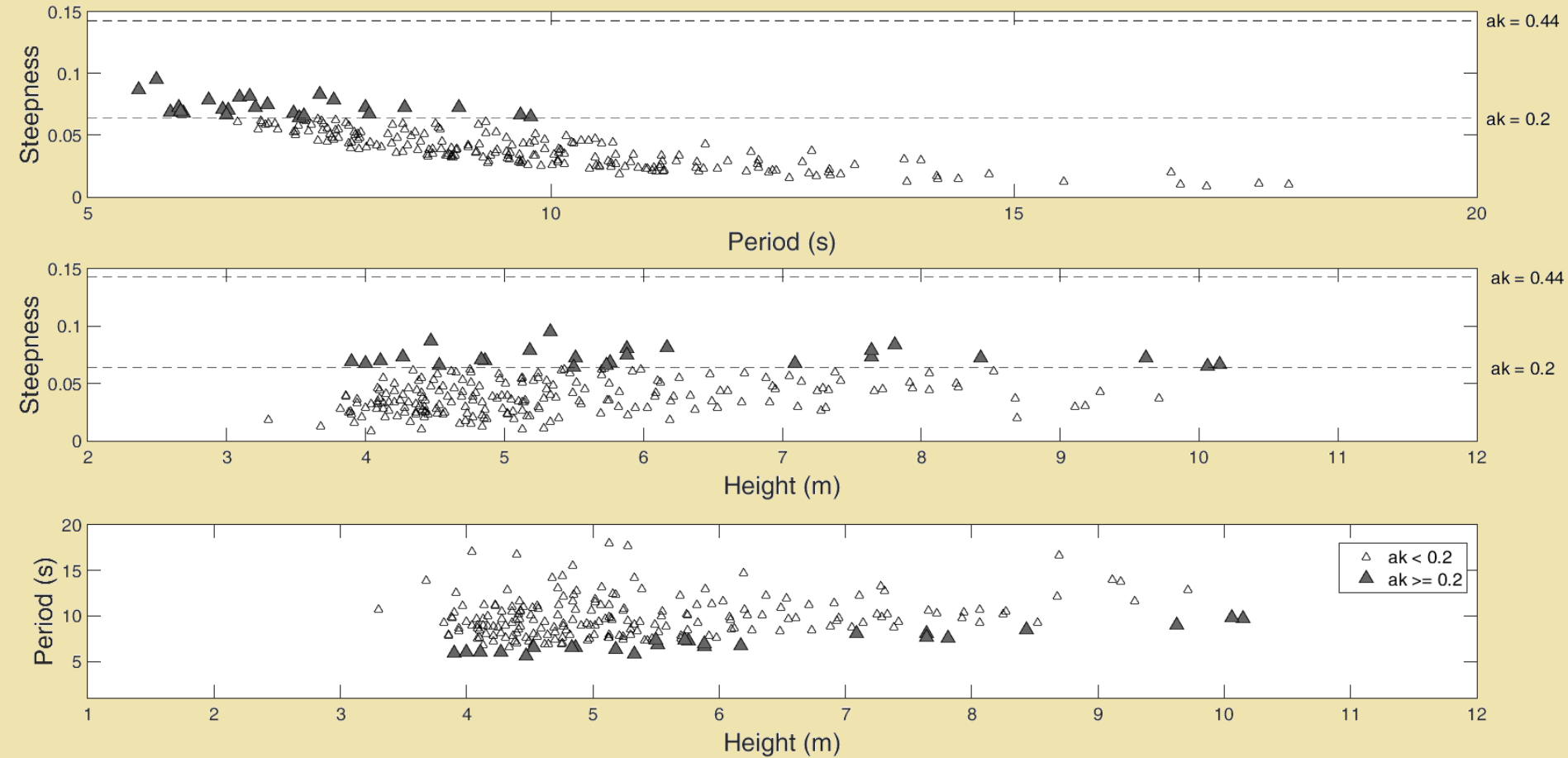
Steepness

- Comprimento \rightarrow eq. dispersão não linear (Yuen & Lake, 1982)
 - $\omega = \sqrt{gk} \left(1 + \frac{1}{2} k^2 a^2 \right)$
- Banner *et al* (2002), Chalikov & Babanin (2012)
 - $ak > 0,2$ ($H/L > 0,0634$) \rightarrow relacionado com eventos de quebra de onda
- Tofoli *et al* (2010)
 - *steepness* crítico $0,44 < ak < 0,55$

Steepness das Maiores Ondas de Cada Registro

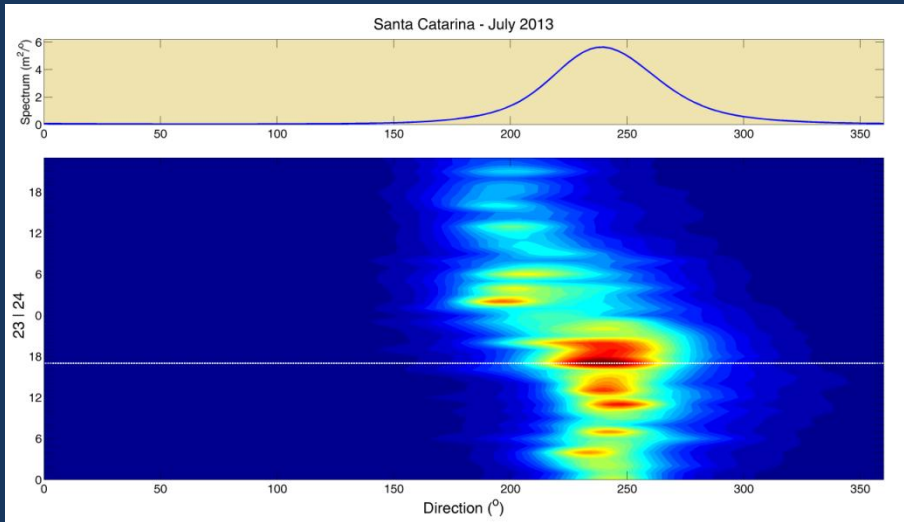


Steepness das FW

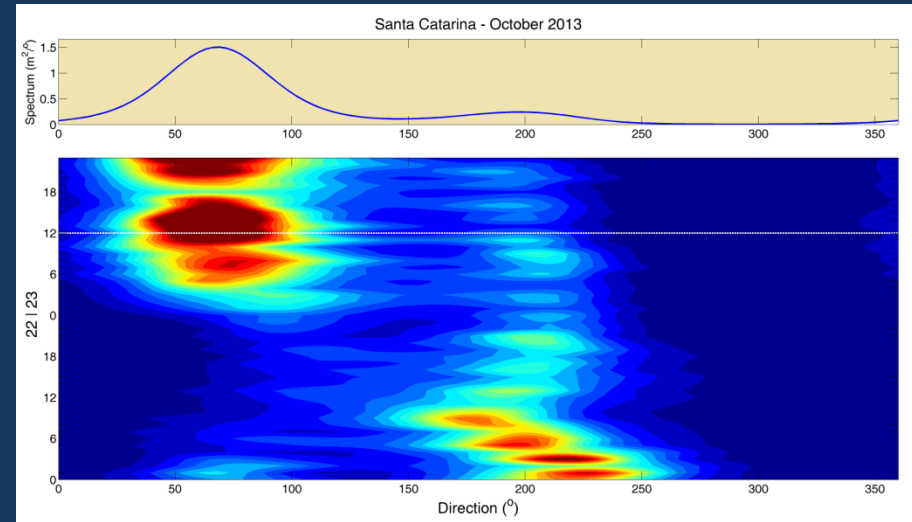


Características Direcionais do Registros com FW (Apenas Down-Crossing, $IA \geq 2$)

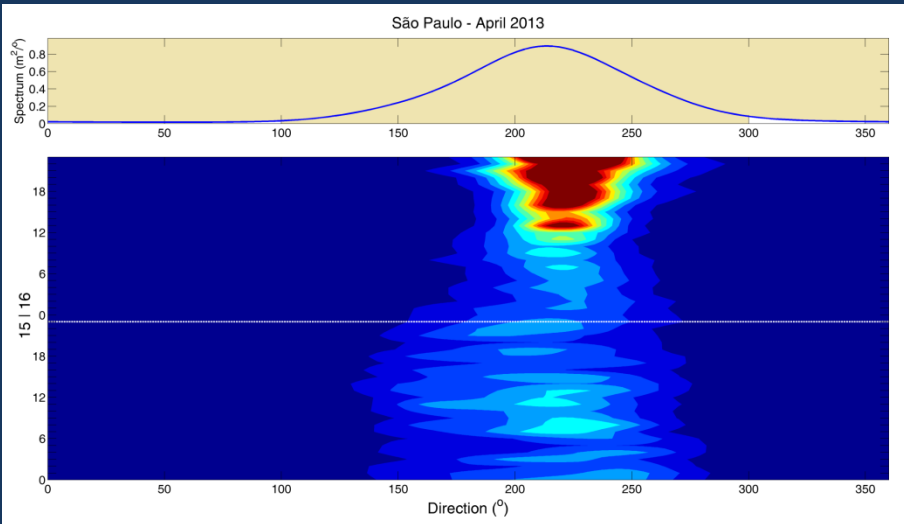
| | RS | SC | SP | Total |
|------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 1 sistema | 102 (63.8%) | 69 (57.5%) | 84 (50.6%) | 255 (57,2%) |
| 2 sistemas | 52 (32.5%) | 47 (39.2%) | 80 (48.2%) | 179 (40,1%) |
| 3 sistemas | 6 (3.8%) | 4 (3.3%) | 2 (1.2%) | 12 (2,7%) |
| Total | 160 (35,9%) | 120 (26,9%) | 166 (37,2%) | 446 |



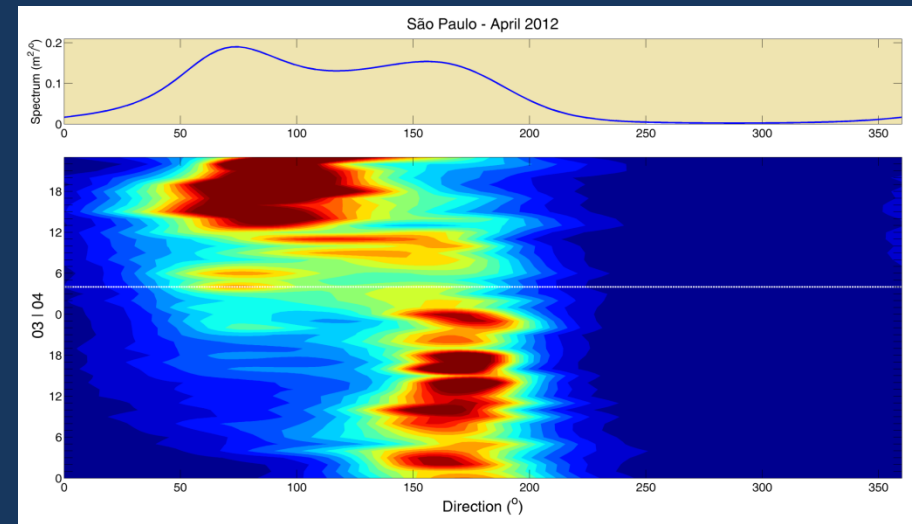
Maior Hs 2013 07 23 18:00 Hs = 4.74 m



Maior HS 2013 10 23 12:00 Hs = 2.78 m



Maior IA 2013 04 15 23:00 Ai = 2.42



Maior IA 2012 04 04 04:00 Ai = 2.52

Conclusões

- Mais de 700 FW encontradas ($IA \geq 2$), entre 1,0 e 11,48 m.
- Utilização de demais critérios em associação diminui drasticamente esse número.
- Apenas 7 ondas atenderam a todos os critérios.
- O critério proposto (Acav) permitiu a identificação de várias FW do tipo "hole in the sea", mas apenas uma pode ser considerada realmente uma FW.

| | Hmax (m) | Hs (m) | Método | IA | IAC | Acav | Cr (m) | Tr (m) | Date |
|-------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------------------------|
| Rio Grande do Sul | 4.85 | 2.17 | Down | 2.25 | 0.87 | 1.37 | 1.87 | 2.98 | 2012/07/29 05:00 |
| | 5.97 | 2.76 | Up | 2.39 | 1.31 | 0.85 | 3.62 | 2.35 | 2012/09/07 18:00 |
| | 5.98 | 2.76 | Down | 2.35 | 1.31 | 0.85 | 3.62 | 2.36 | |
| | 4.44 | 2.26 | Up | 2.06 | 1.30 | 0.66 | 2.94 | 1.50 | 2012/10/13 20:00 |
| | 7.63 | 3.52 | Up | 2.31 | 1.40 | 0.77 | 4.92 | 2.71 | 2012/10/18 07:00 |
| | 7.42 | 3.52 | Down | 2.25 | 1.40 | 0.71 | 4.92 | 2.50 | |
| | 3.94 | 2.05 | Down | 2.02 | 1.32 | 0.61 | 2.70 | 1.24 | 2012/10/21 02:00 |
| Santa Catarina | 5.37 | 2.67 | Up | 2.16 | 1.31 | 0.70 | 3.50 | 1.87 | 2012/04/22 19:00 |
| | 5.83 | 2.67 | Down | 2.39 | 1.31 | 0.87 | 3.50 | 2.33 | |
| | 5.86 | 2.40 | Up | 2.44 | 1.38 | 1.07 | 3.30 | 2.56 | 2013/06/30 19:00 |
| | 5.13 | 2.40 | Down | 2.16 | 1.38 | 0.76 | 3.30 | 1.83 | |

Conclusões

- Em 15 ocasiões foram encontradas duas FW em um mesmo registro.
- Steepness positivo mais comum, com altura da crista mais alta que a profundidade do cavado, incluindo nas FW.
- Ocorrência mais comum em mar unidirecional.

Obrigado pela atenção.



r.candella@marinha.mil.br