

# GERAÇÃO E PREVISÃO DE ONDAS

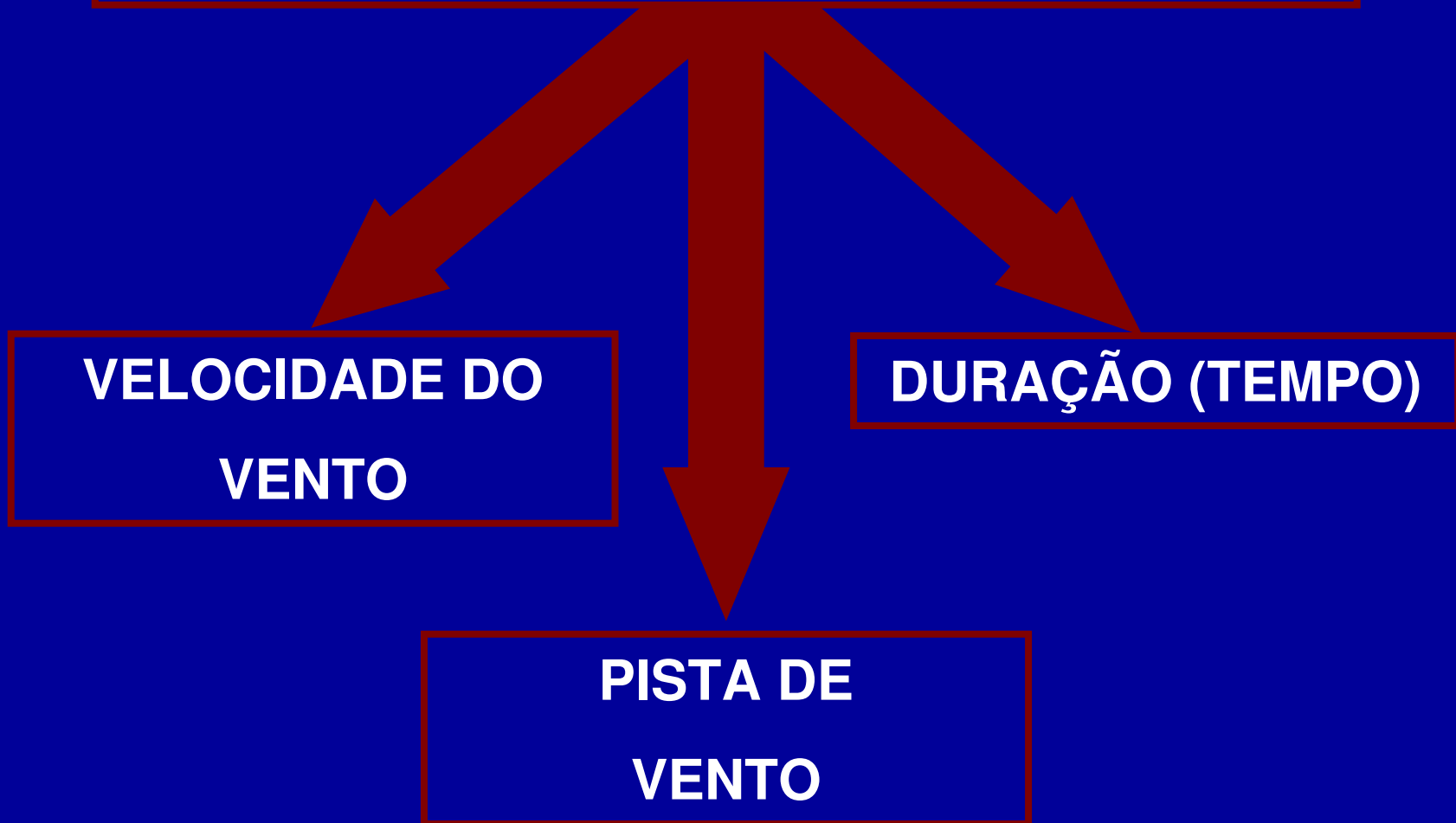
# FÍSICA DA GERAÇÃO DE ONDAS

EXISTEM 3 CONCEITOS BÁSICOS PARA O DESENVOLVIMENTO DAS ONDAS

VELOCIDADE DO VENTO

DURAÇÃO (TEMPO)

PISTA DE VENTO

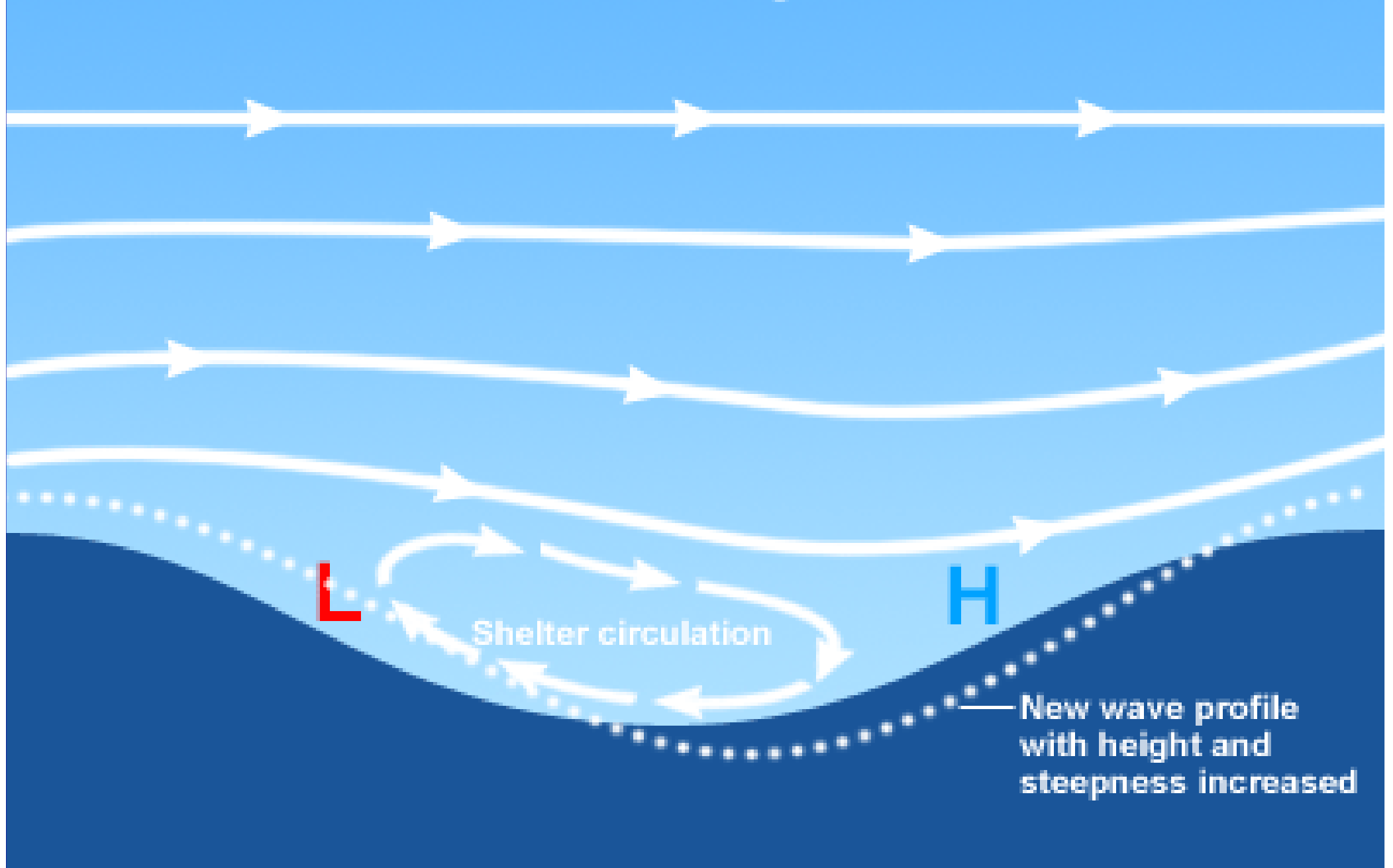


# VELOCIDADE DO VENTO

## GERAÇÃO DAS ONDAS

ONDA CAPILAR ( $L < 1,7\text{CM}$ ) — O PROCESSO DE COMO O VENTO PERTURBA A SUP. DA ÁGUA AINDA NÃO FOI TOTALMENTE DESCRITO.

## Wave Sheltering Effect



# VELOCIDADE DO VENTO

## GERAÇÃO DAS ONDAS

ONDA CAPILAR ( $L < 1,7\text{CM}$ ) → O PROCESSO DE COMO O VENTO PERTURBA A SUP. DA ÁGUA AINDA NÃO FOI TOTALMENTE DESCRITO.

RESSONÂNCIA DE PHILIPS → CRESCIMENTO LINEAR DE PEQUENAS ONDAS (VÁLIDO SOMENTE NOS ESTÁGIOS INICIAIS).

INSTABILIDADE DO FLUXO DE CISALHAMENTO → INTERAÇÃO COM FLUXO DE AR ACIMA

TEORIA DE MILES → DESENVOLVIMENTO EXPONENCIAL DA ORDEM DA RAZÃO ENTRE AS DENSIDADES DO AR E DA ÁGUA E PROPORCIONAL AO EXPECTRO DE ONDAS

$$S_{in}(f, \theta) = \frac{\rho_{ar}}{\rho_a} \beta \omega \left( \frac{U}{C} \cos \theta \right)^n F(f, \theta)$$

# LIMITAÇÃO PELA VELOCIDADE DO VENTO

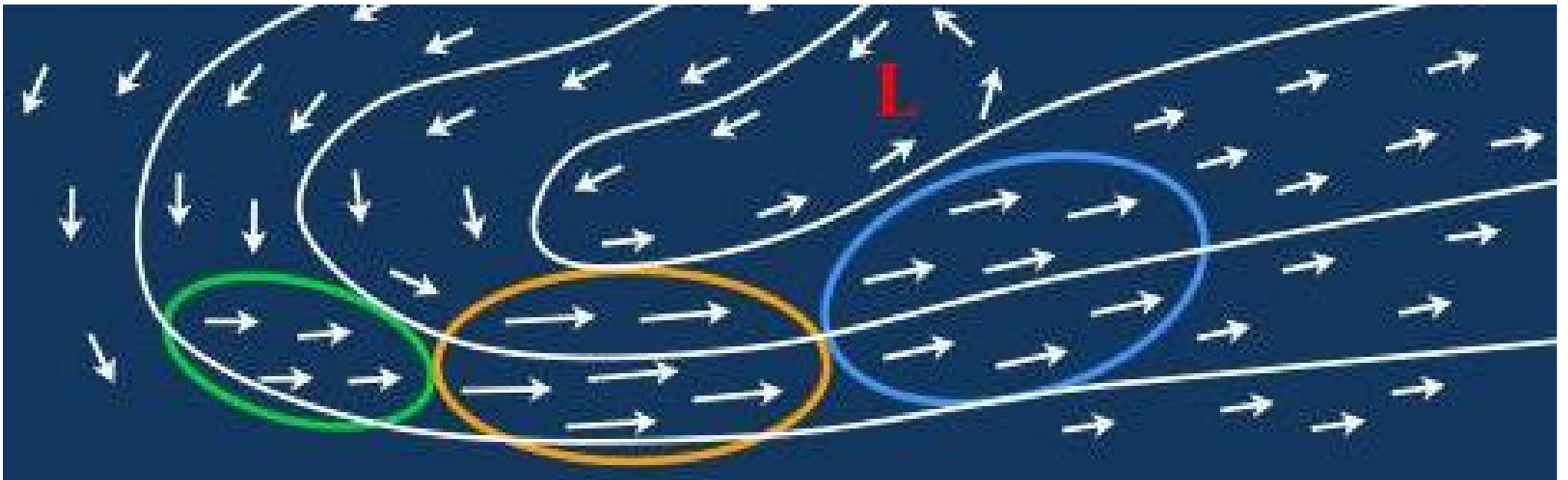
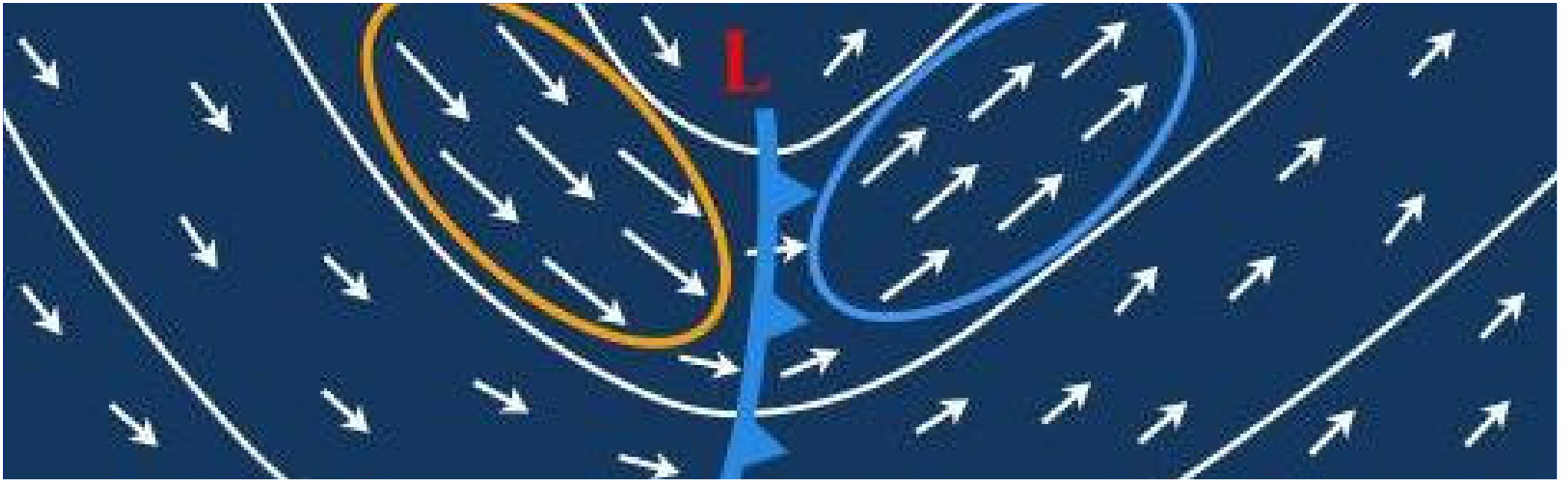
QUANDO A VELOCIDADE DO VENTO É MENOR OU IGUAL A VELOCIDADE DE FASE DAS ONDAS O CRESCIMENTO É INTERROMPIDO.

SE O VENTO FOR CONTRÁRIO AO SENTIDO DE PROPAGAÇÃO DAS ONDAS O “CRESCIMENTO” CHEGA A SER NEGATIVO.

# PISTA DE VENTO

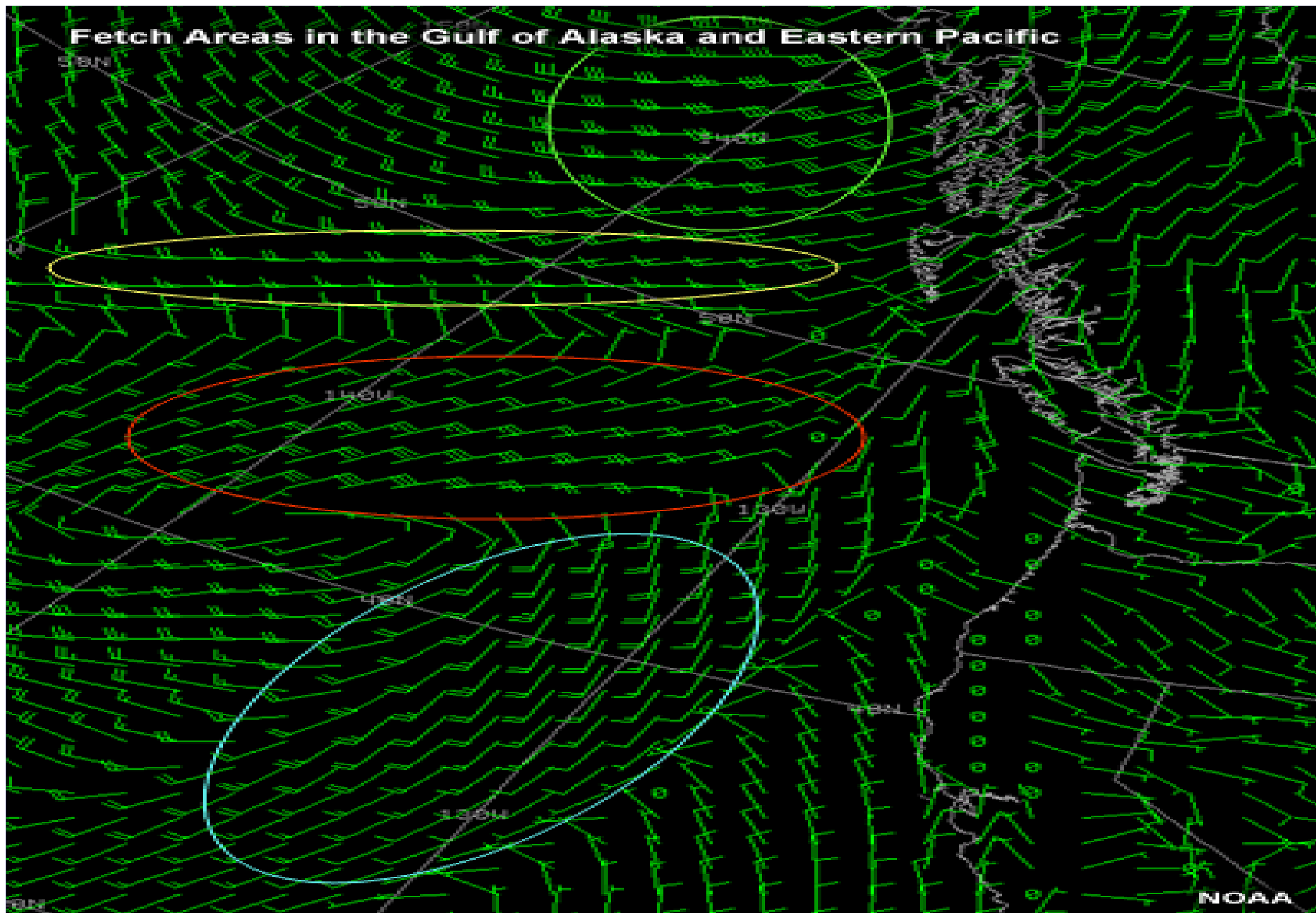
**DEFINIÇÃO: PISTA DE VENTO É A DISTÂNCIA NA QUAL O VENTO POSSUI VELOCIDADE E DIREÇÃO CONSTANTES.**

**O ENTENDIMENTO DE COMO A REGIÃO DA PISTA ESTÁ MUDANDO OU QUANTAS REGIÕES DIFERENTES DE PISTAS EXISTEM PODE AJUDAR AO PREVISOR SE OS MODELOS NUMÉRICOS ESTÃO CORRETOS EM SUAS PREVISÕES E ANÁLISES.**





# Fetch Areas in the Gulf of Alaska and Eastern Pacific



# PISTA DE VENTO

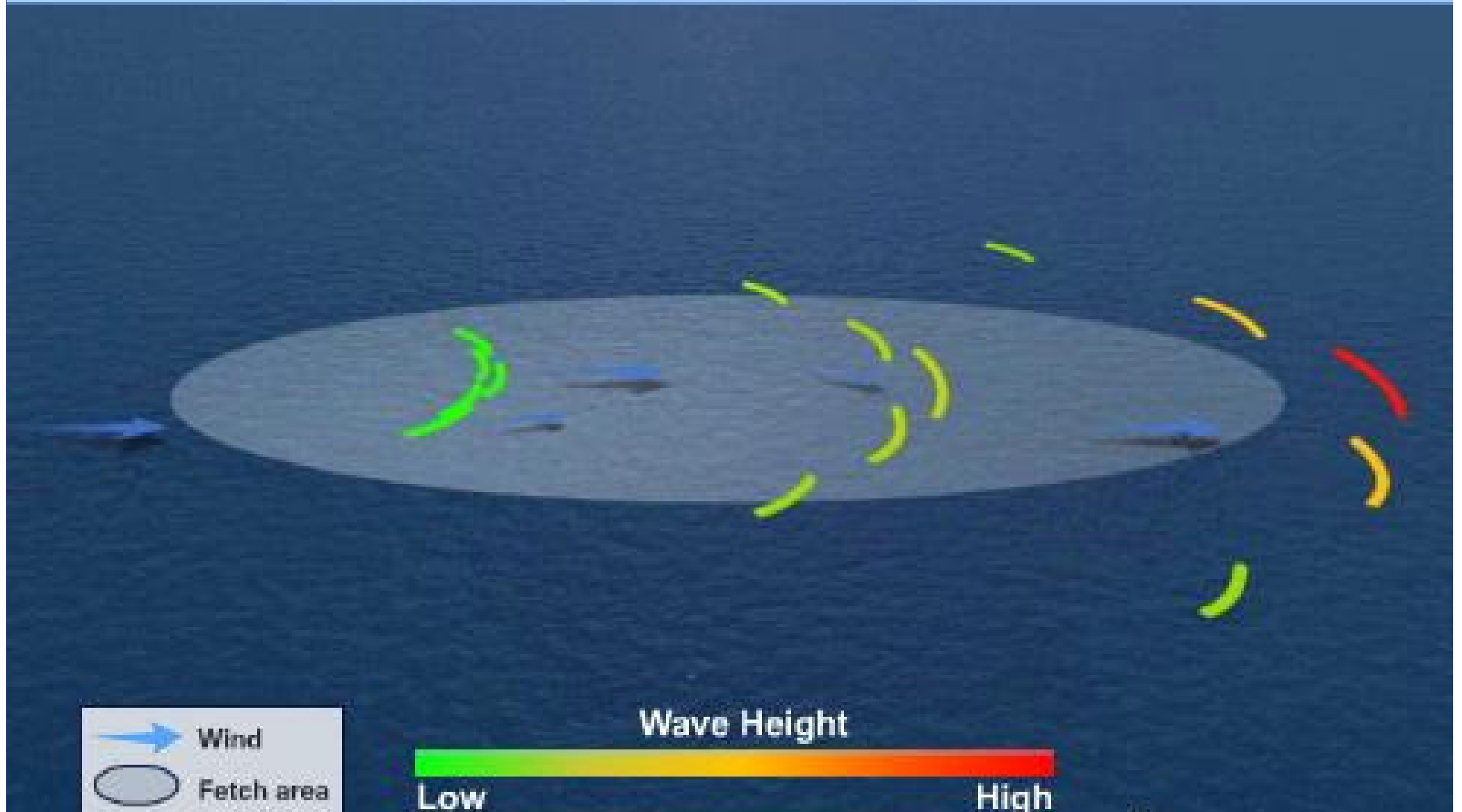
**DEFINIÇÃO: PISTA DE VENTO É A DISTÂNCIA NA QUAL O VENTO POSSUI VELOCIDADE E DIREÇÃO CONSTANTES.**

**O ENTENDIMENTO DE COMO A REGIÃO DA PISTA ESTÁ MUDANDO OU QUANTAS REGIÕES DIFERENTES DE PISTAS EXISTEM PODE AJUDAR AO PREVISOR SE OS MODELOS NUMÉRICOS ESTÃO CORRETOS EM SUAS PREVISÕES E ANÁLISES.**

**O DESENVOLVIMENTO DAS ONDAS TAMBÉM PODE SER LIMITADO PELO TAMANHO DA DA REGIÃO DA PISTA (**LIMITAÇÃO POR PISTA**)**

**INFLUÊNCIA DO TAMANHO DA PISTA**

# Wave Growth Within a Fetch



# PISTA DE VENTO

**DEFINIÇÃO: PISTA DE VENTO É A DISTÂNCIA NA QUAL O VENTO POSSUI VELOCIDADE E DIREÇÃO CONSTANTES.**

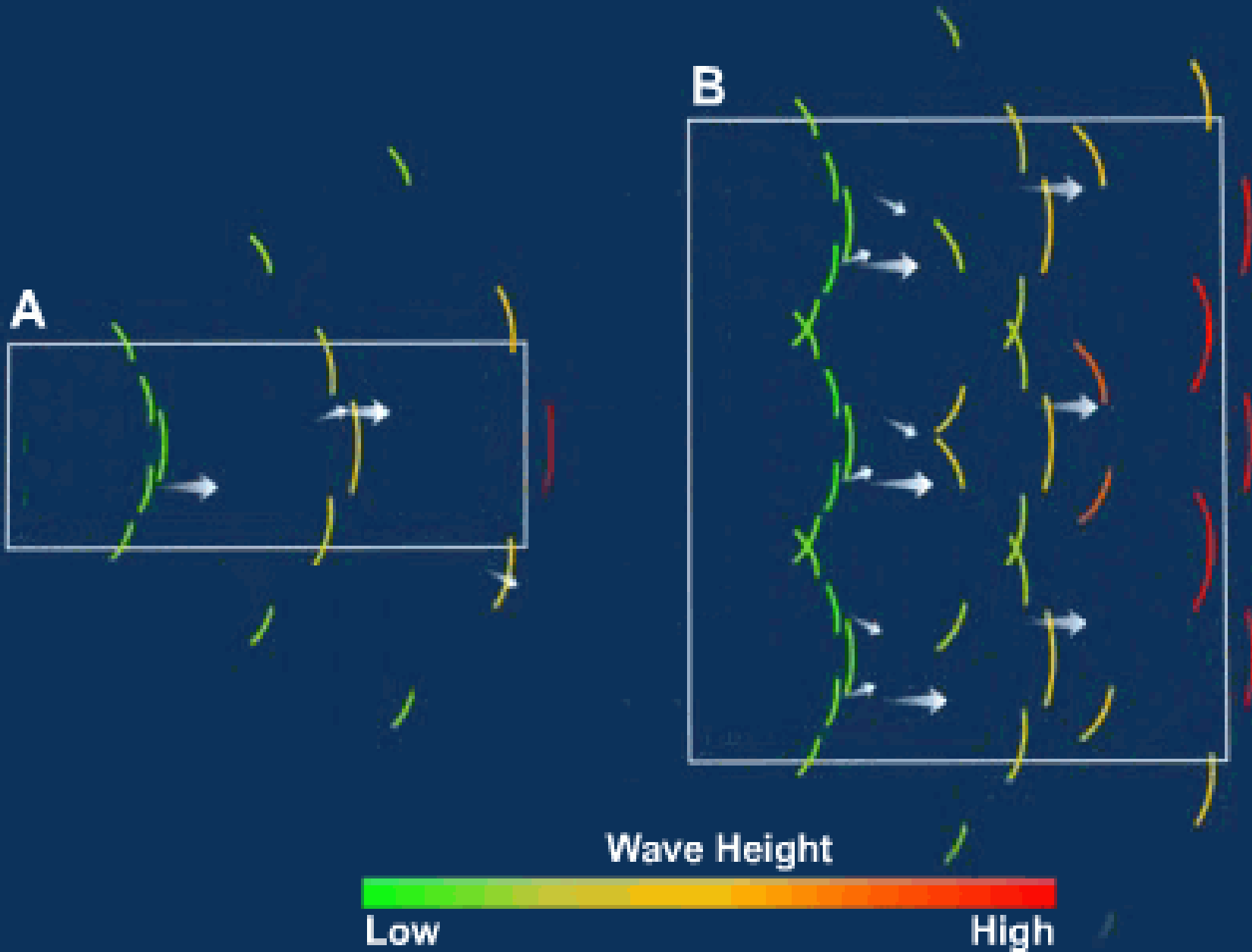
**O ENTENDIMENTO DE COMO A REGIÃO DA PISTA ESTÁ MUDANDO OU QUANTAS REGIÕES DIFERENTES DE PISTAS EXISTEM PODE AJUDAR AO PREVISOR SE OS MODELOS NUMÉRICOS ESTÃO CORRETOS EM SUAS PREVISÕES E ANÁLISES.**

**O DESENVOLVIMENTO DAS ONDAS TAMBÉM PODE SER LIMITADO PELO TAMANHO DA DA REGIÃO DA PISTA (**LIMITAÇÃO POR PISTA**)**

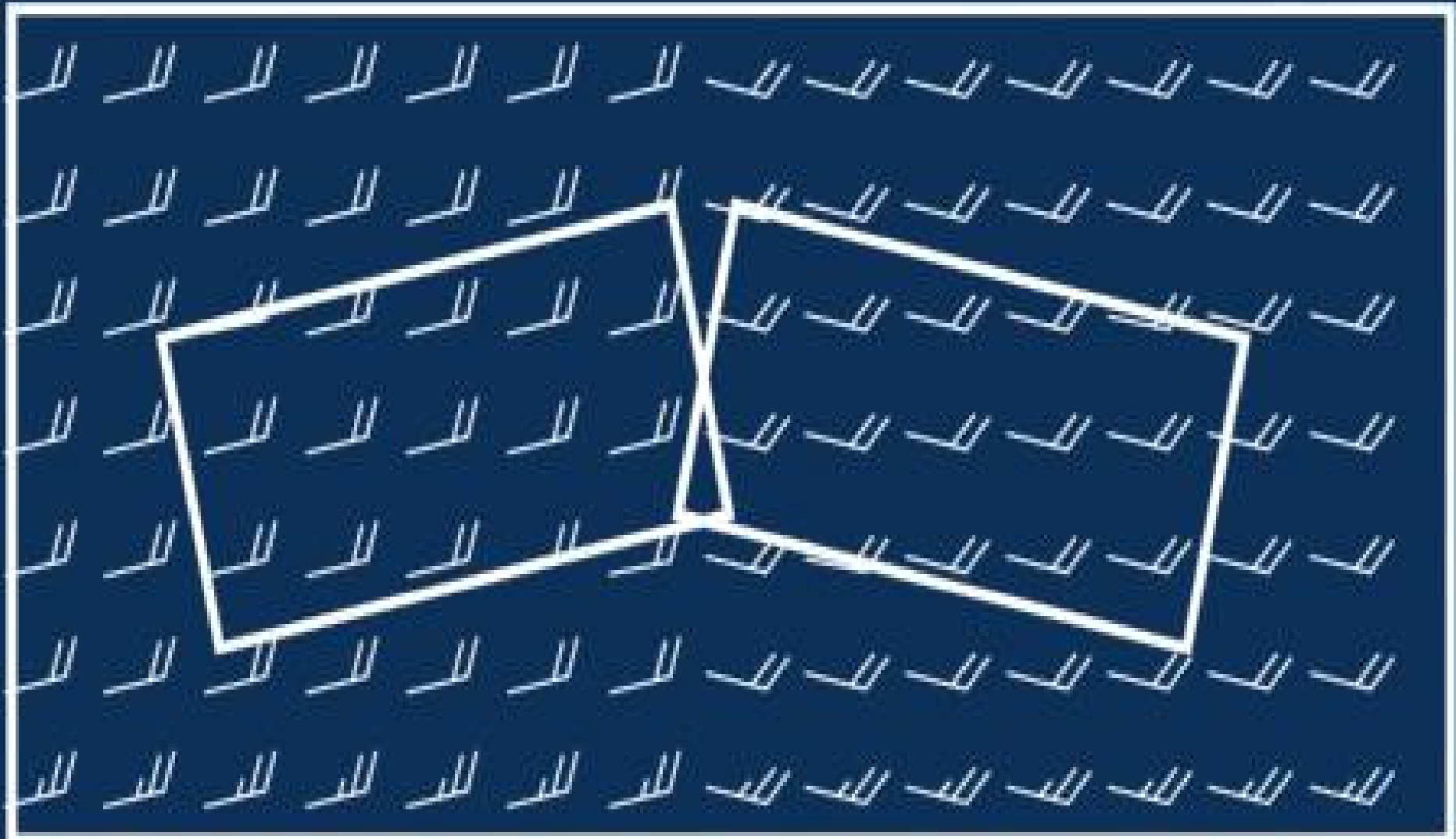
**INFLUÊNCIA DO TAMANHO DA PISTA**

**INTERAÇÕES NÃO LINEARES: MECANISMO DE MAIS BAIXA ORDEM CAPAZ DE TRANSFERIR ENERGIA DA ALTA FREQUÊNCIA PARA FREQUÊNCIAS MENORES**

# Energy Loss: Small vs. Large Fetch Areas



## Large vs. Small Fetch Dimensions



# PISTA DE VENTO

**DEFINIÇÃO: PISTA DE VENTO É A DISTÂNCIA NA QUAL O VENTO POSSUI VELOCIDADE E DIREÇÃO CONSTANTES.**

**O ENTENDIMENTO DE COMO A REGIÃO DA PISTA ESTÁ MUDANDO OU QUANTAS REGIÕES DIFERENTES DE PISTAS EXISTEM PODE AJUDAR AO PREVISOR SE OS MODELOS NUMÉRICOS ESTÃO CORRETOS EM SUAS PREVISÕES E ANÁLISES.**

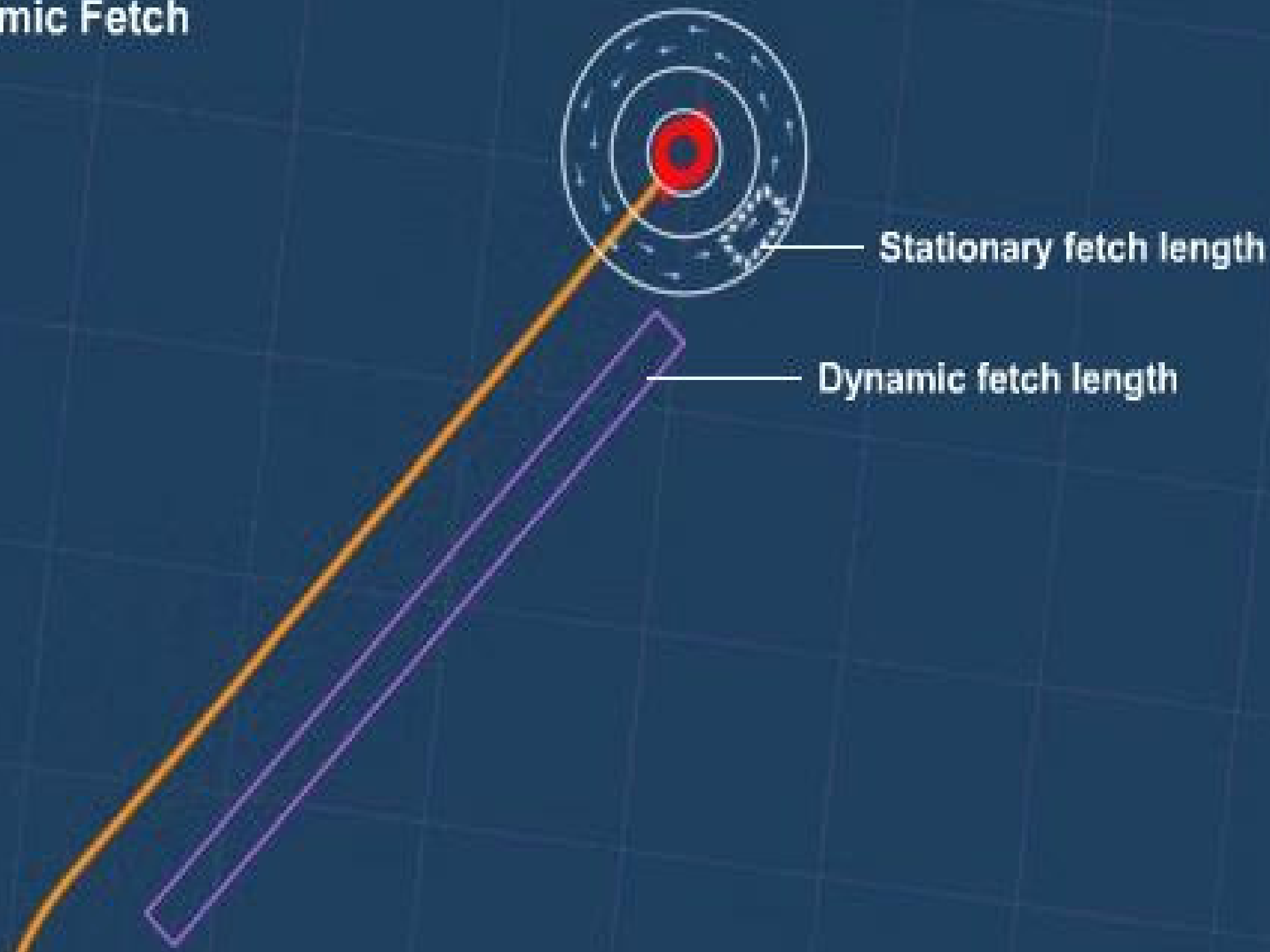
**O DESENVOLVIMENTO DAS ONDAS TAMBÉM PODE SER LIMITADO PELO TAMANHO DA DA REGIÃO DA PISTA (**LIMITAÇÃO POR PISTA**)**

**INFLUÊNCIA DO TAMANHO DA PISTA**

**INTERAÇÕES NÃO LINEARES: MECANISMO DE MAIS BAIXA ORDEM CAPAZ DE TRANSFERIR ENERGIA DA ALTA FREQUÊNCIA PARA FREQUÊNCIAS MENORES**

**PISTA DINÂMICA (ACÚMULO DE PISTA)**

# Dynamic Fetch





# PISTA DE VENTO

**DEFINIÇÃO: PISTA DE VENTO É A DISTÂNCIA NA QUAL O VENTO POSSUI VELOCIDADE E DIREÇÃO CONSTANTES.**

**O ENTENDIMENTO DE COMO A REGIÃO DA PISTA ESTÁ MUDANDO OU QUANTAS REGIÕES DIFERENTES DE PISTAS EXISTEM PODE AJUDAR AO PREVISOR SE OS MODELOS NUMÉRICOS ESTÃO CORRETOS EM SUAS PREVISÕES E ANÁLISES.**

**O DESENVOLVIMENTO DAS ONDAS TAMBÉM PODE SER LIMITADO PELO TAMANHO DA DA REGIÃO DA PISTA (**LIMITAÇÃO POR PISTA**)**

**INFLUÊNCIA DO TAMANHO DA PISTA**

**INTERAÇÕES NÃO LINEARES: MECANISMO DE MAIS BAIXA ORDEM CAPAZ DE TRANSFERIR ENERGIA DA ALTA FREQUÊNCIA PARA FREQUÊNCIAS MENORES**

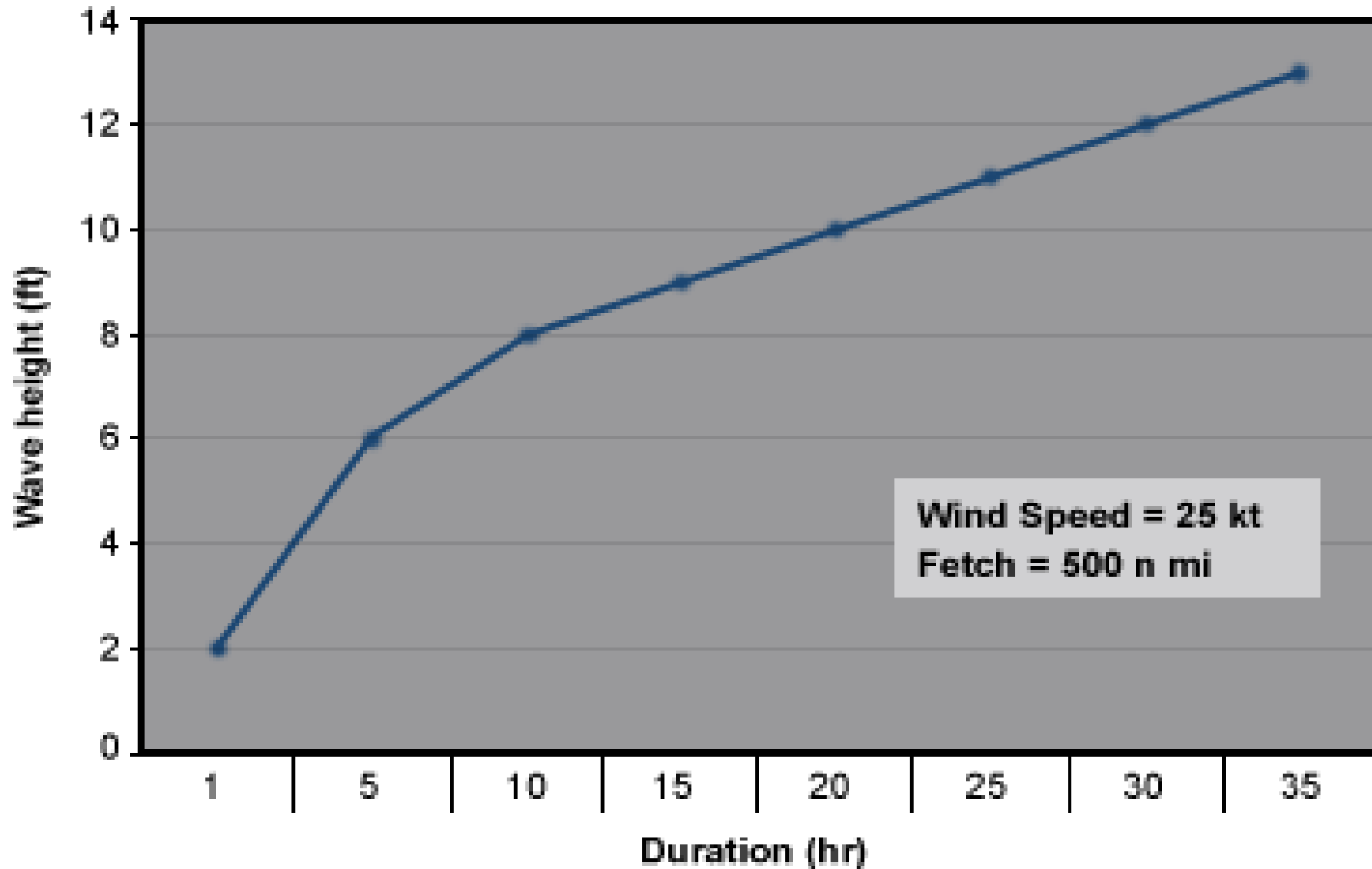
**PISTA DINÂMICA (ACÚMULO DE PISTA)**

**[animação](#)**

***WHITECAPPING***

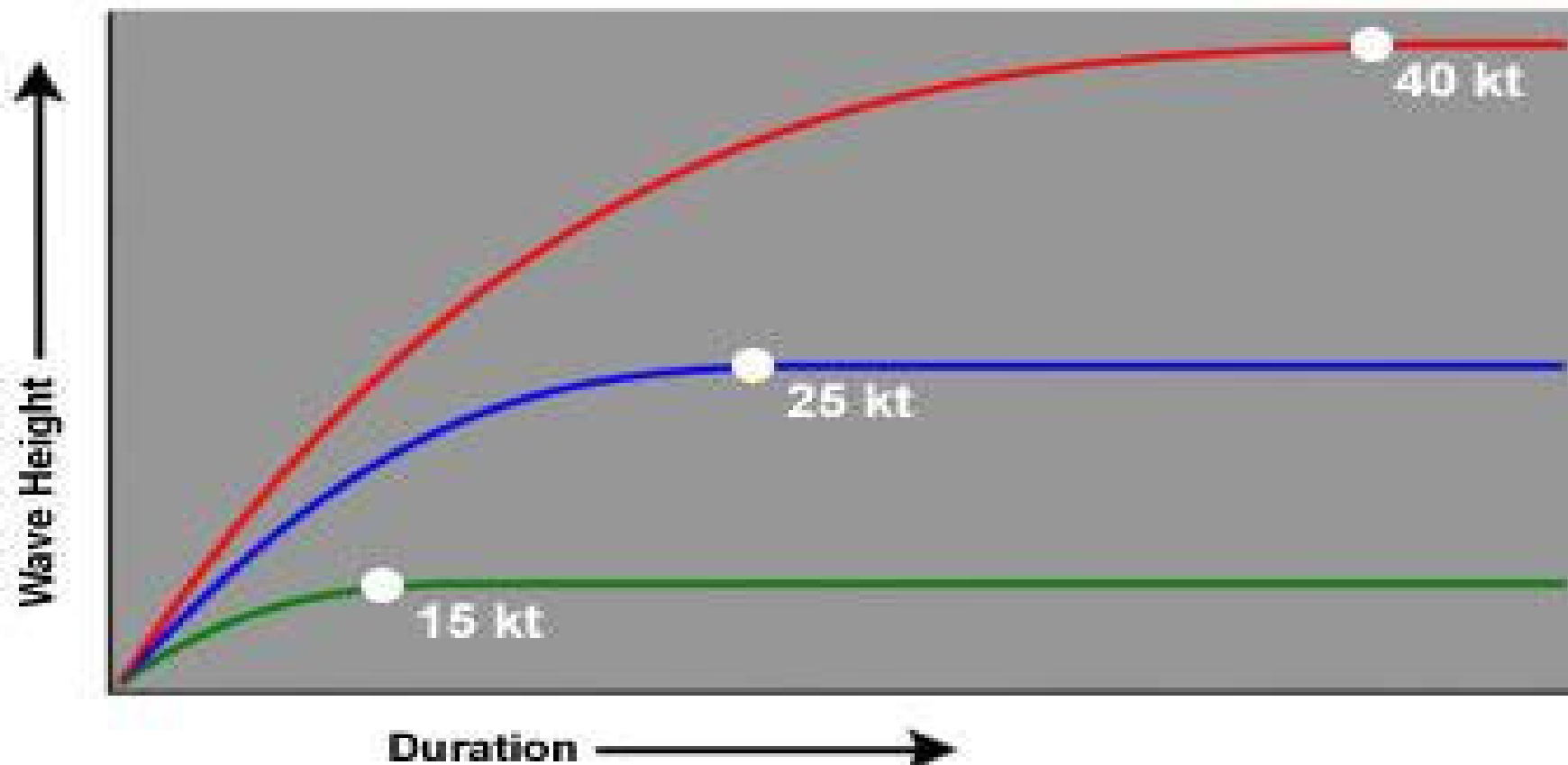
# DURAÇÃO (TEMPO)

Wave Height Given Constant Wind Speed and Fetch



# ESTÁGIO DE DESENVOLVIMENTO COMPLETO

Fully Developed Seas Concept Given Various Wind Speeds and Unlimited Fetch and Duration



# ESTÁGIO DE DESENVOLVIMENTO COMPLETO

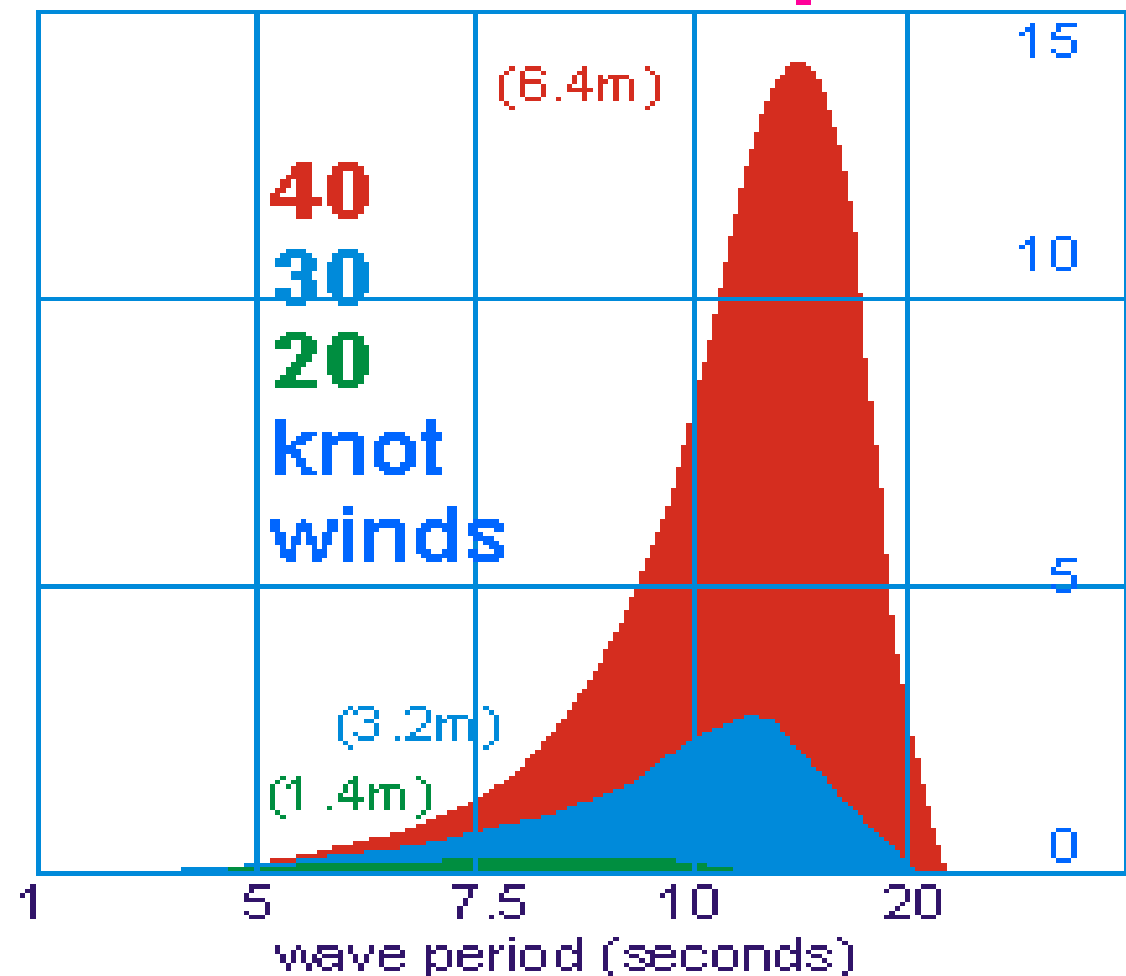
## Fully Developed Sea

### energy spectrum for various wind speeds

As the wind speed increases, the amount of energy transferred to the sea, increases very much more rapidly, proportional to the fourth power of wind speed.

The diagram shows energy spectra for winds of 20, 30, 40 knot. The area under each bell curve represents the total energy of the sea state.

Vertical scale is wave amplitude squared ( $A \times A$ ) in  $m^2$ . Average wave heights shown in brackets.



Adapted from Van Dorn, 1974.

# MODELAGEM DE ONDAS

EM MODELAGEM DE ONDAS O OBJETIVO PRINCIPAL CONSISTE NO ENTENDIMENTO DE COMO A ENERGIA INTRODUZIDA PELO VENTO SE DISTRIBUI NAS FREQUÊNCIAS E DIREÇÕES DAS COMPONENTES DE ONDA

EQUAÇÃO DE CONSERVAÇÃO DA DENSIDADE ESPECTRAL DE ENERGIA

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \mathbf{C}_g \cdot \nabla F = S_{tot}$$

$$F = F(f, \theta; x, y, t)$$

VETOR VELOCIDADE DE GRUPO

TERMO FONTE

- ARISTÓTELES, PLÍNIO O ANCIÃO, LEONARDO DA VINCI E BENJAMIN FRANKLIN
- SECULO XIX, TEORISTA DA MEC. FLU. MODERNA (AIRY, STOKES E RAYLEIGH)
- ATÉ O INÍCIO DA DECADA DE 40, ESTADO DO MAR DADO PELA ESCALA BEAUFORT.

ESCALA BEAUFORT RELACIONA INTENSIDADE DO VENTO COM A FORÇA DO MAR

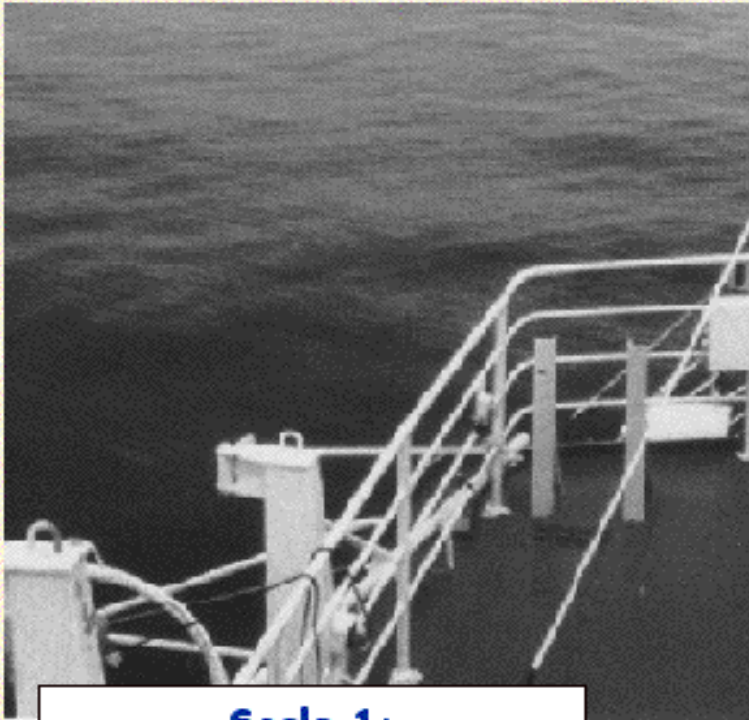
$$U = 1,87 \cdot B^{3/2}$$

INTENSIDADE DO VENTO (NÓS)

FATOR BEAUFORT

## Wind Scales:

- Beaufort (0-12), Sea State Code (0-9)



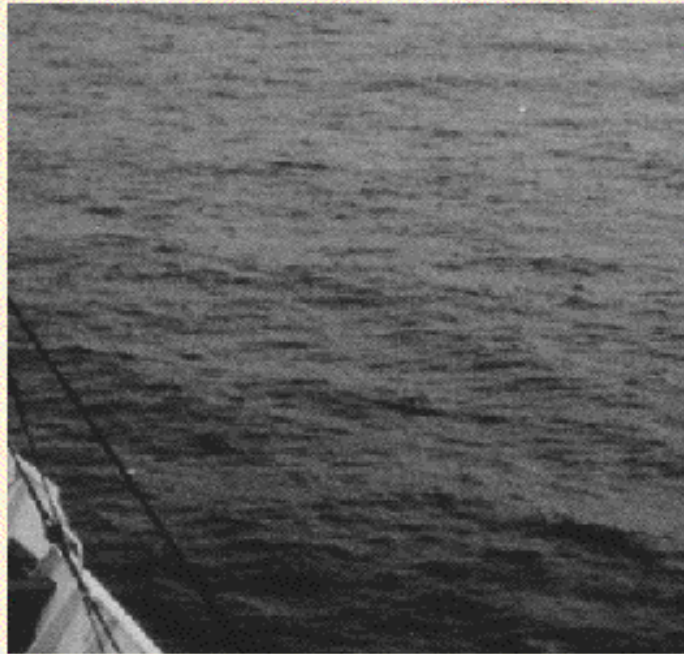
**Scale 1:**  
wind speed: 1-3 knots  
wave height: 10cm  
ripples



**Scale 2:**  
wind speed: 4-6 knots  
wave height: 20-30 cm  
wavelets



## Wind Scales:



**Scale 3:**  
wind speed: 7-10 knots  
wave height: 60-100cm  
large wavelets



**Scale 4:**  
wind speed: 11-16 knots  
wave height: 1-1.5m  
small waves





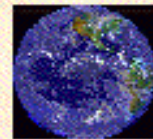
## Wind Scales:



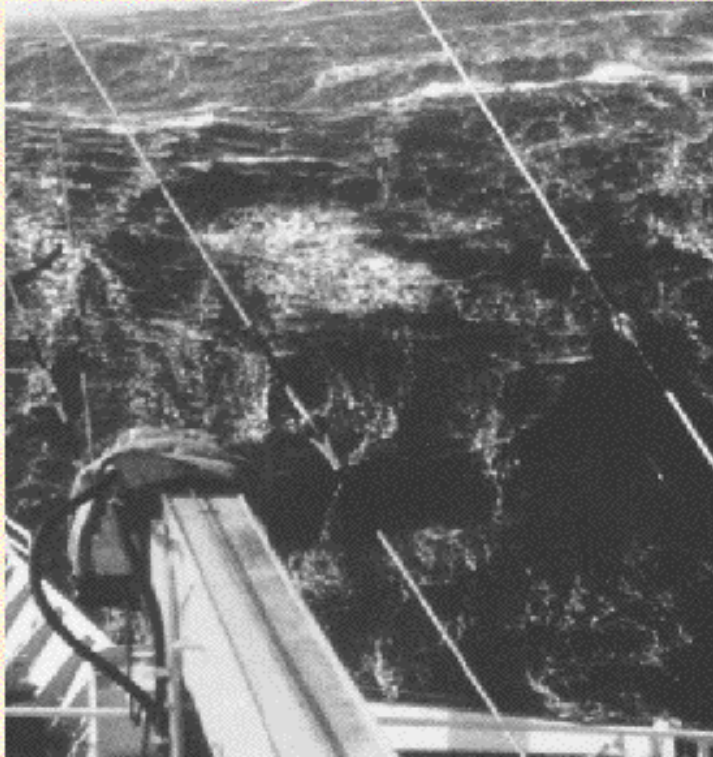
**Scale 7:**  
wind speed: 28-33 knots  
wave height: 4-5.5m  
large waves, spray



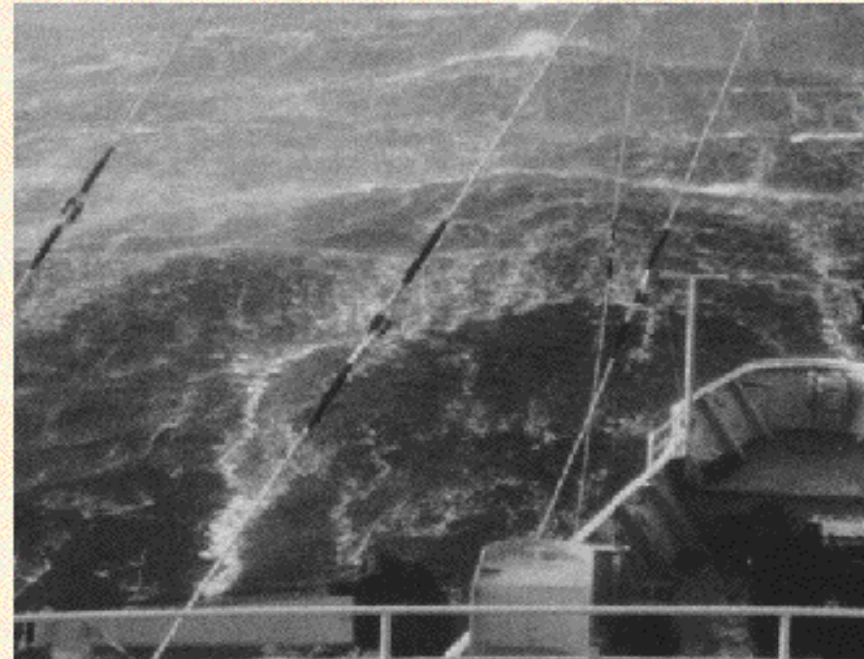
**Scale 8:**  
wind speed: 34-40 knots  
wave height: 5.5-7.5m  
moderately high waves



## Wind Scales:



**Scale 9:**  
**wind speed: 41-47 knots**  
**wave height: 7-10m**  
**high waves**

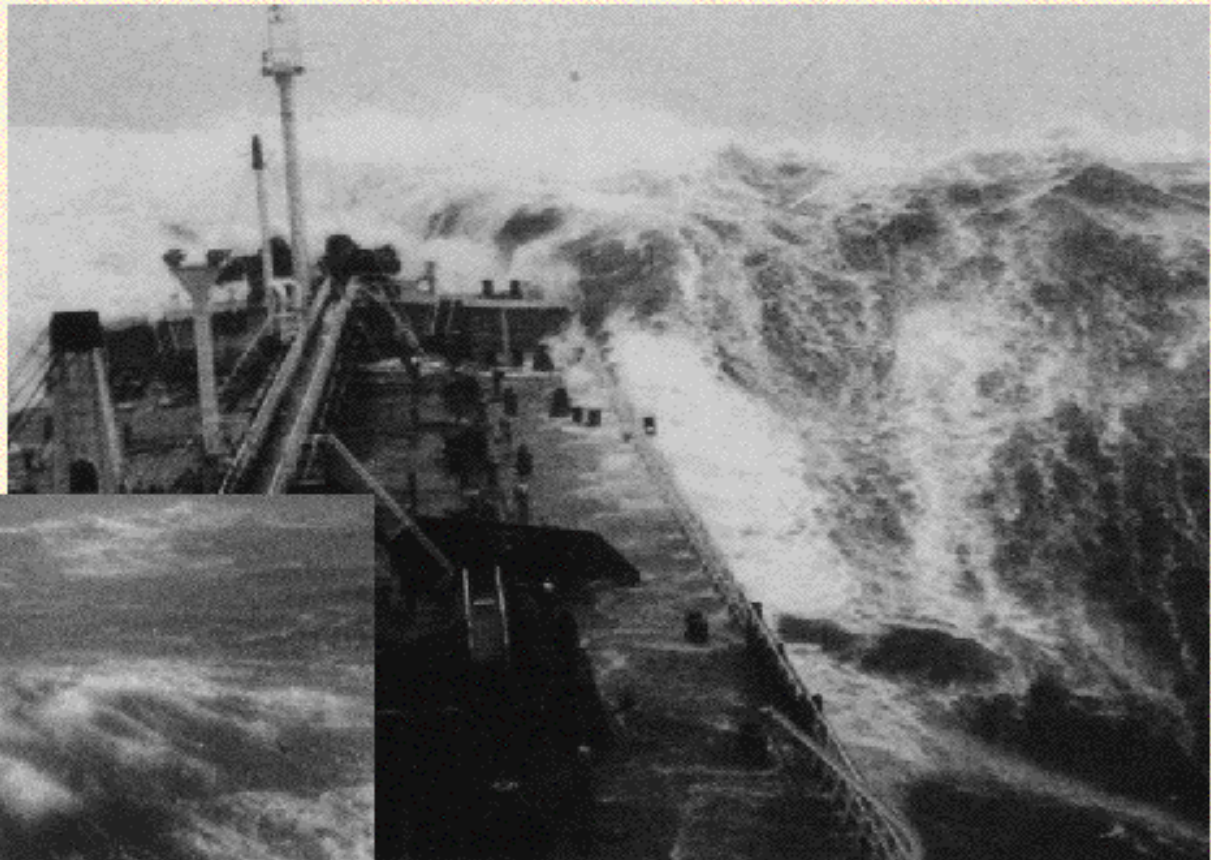


**Scale 10:**  
**wind speed: 48-55 knots**  
**wave height: 9-12.5m**  
**very high waves**



## Wind Scales:

**Scale 11:**  
**wind speed: 56-63 knots**  
**wave height: 11.5-16m**  
**huge waves**



**Scale 12:**  
**wind speed: >64knots**  
**wave height: >15m**  
**giant waves**



- ARISTÓTELES, PLÍNIO O ANCIÃO, LEONARDO DA VINCI E BENJAMIN FRANKLIN
- SECULO XIX, TEORISTA DA MEC. FLU. MODERNA (AIRY, STOKES E RAYLEIGH)
- ATÉ O INÍCIO DA DÉCADA DE 40, ESTADO DO MAR DADO PELA ESCALA BEAUFORT.
- DURANTE A SEGUNDA GUERRA MUNDIAL. SVERDRUP E MUNK (1947) DESENVOLVEM MODELO PARAMÉTRICO DE DESCRIÇÃO DO ESTADO DO MAR UTILIZANDO LEIS EMPÍRICAS SOBRE *WIND SEA* E *SWELL*.
- PIERSON INTRODUZ O CONCEITO DE ESPECTRO DE ONDA EM 1955.
- GELCI EM 1956 E 1957 INTRODUZIU O CONCEITO DA EQUAÇÃO DE TRANSPORTE ESPECTRAL.
- DESDE ESSA ÉPOCA O AVANÇO DOS COMPUTADORES PERMITIU O DESENVOLVIMENTO E OPERAÇÃO DE DIVERSOS MODELOS DE ONDAS.

# DESCRIÇÃO DE MODELOS DE ONDA

BASICAMENTE EXISTEM 4 DOMÍNIOS FÍSICOS PARA RESOLUÇÃO DO PROBLEMA DE ONDAS SUPERFICIAIS DE GRAVIDADE GERADAS POR VENTO



- OCEANO PROFUNDO

- MARES COSTEIROS

- ZONA DE EMPINAMENTO

- ESTRUTURAS

Tabela 2.1: Importância relativa dos processos físicos envolvidos em cada tipo de domínio,  $\otimes$  - desprezível;  $\circ$  - pouca importância;  $\cdot$  - significante;  $\bullet$  - dominante. Segundo Young (1999).

Proc. Físico	Oceano Prof.	Mares Cost.	Zona de Empin.	Estruturas
Difração	$\otimes$	$\otimes$	$\circ$	$\bullet$
Refração/empinamento	$\otimes$	$\cdot$	$\bullet$	$\cdot$
Refração por corrente	$\otimes$	$\circ$	$\cdot$	$\otimes$
Interações quad	$\bullet$	$\bullet$	$\circ$	$\otimes$
Interações triad	$\otimes$	$\circ$	$\cdot$	$\circ$
Entrada pelo vento	$\bullet$	$\bullet$	$\circ$	$\otimes$
<i>White-capping</i>	$\bullet$	$\bullet$	$\circ$	$\otimes$
Quebra por profundidade	$\otimes$	$\circ$	$\bullet$	$\otimes$
Fricção com fundo	$\otimes$	$\bullet$	$\cdot$	$\otimes$

# DESCRIÇÃO DE MODELOS DE ONDA

BASICAMENTE EXISTEM 4 DOMÍNIOS FÍSICOS PARA RESOLUÇÃO DO PROBLEMA DE ONDAS SUPERFICIAIS DE GRAVIDADE GERADAS POR VENTO

•MODELOS DE FASE X MODELOS ESPECTRAIS

•REPRESENTAÇÃO DOS TERMOS FONTE EM MODELOS ESPECTRAIS

$$S_{tot} = S_{in} + S_{nl} + S_{ds}$$

ENTRADA DE ENERGIA PELO VENTO

INTERAÇÕES NÃO LINEARES ONDA-ONDA

DISSIPAÇÃO (WHITECAPPING)

# CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS ESPECTRAIS

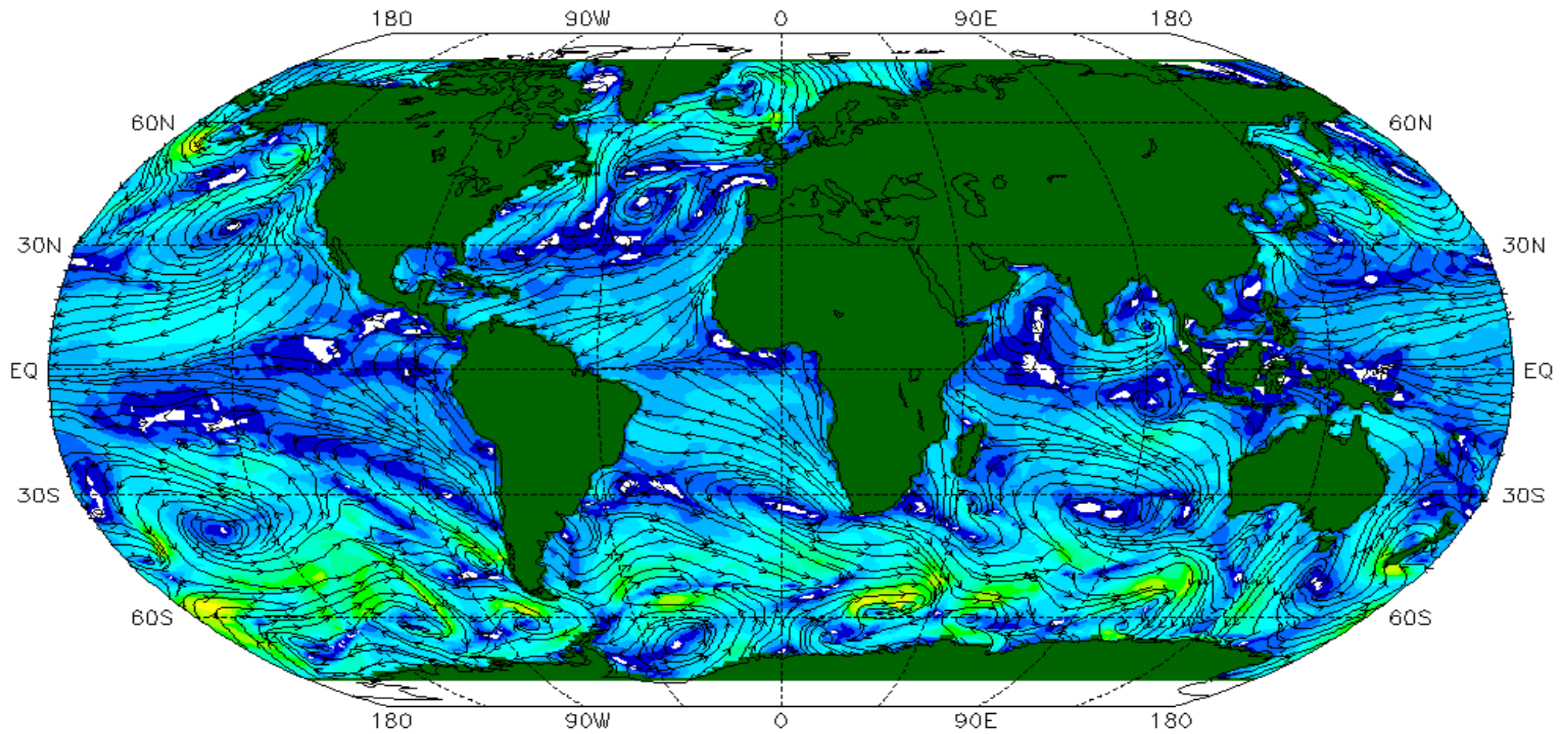
Tabela 2.2: Classes de modelos com base na resolução do termo fonte segundo Young (1999).

	$S_{in}$	$S_{nl}$	$S_{ds}$
Primeira Geração	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Baseado em medidas da taxa de desenvolvimento.</li> <li>•Grande em magnitude.</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>•Limite de saturação</li> </ul>
Segunda Geração	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Baseado em medidas de fluxo.</li> <li>•Menor que o de 1<sup>a</sup> geração.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Forma paramétrica.</li> <li>•Flexibilidade limitada.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Limite de saturação igual ao de 1<sup>a</sup> geração.</li> </ul>
Terceira Geração	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Baseado em medidas de fluxo.</li> <li>•Estresse acoplado ao estado do mar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Forma aproximada da integral de Boltzman.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Forma explícita.</li> </ul>



# PREVISÃO DE ONDAS

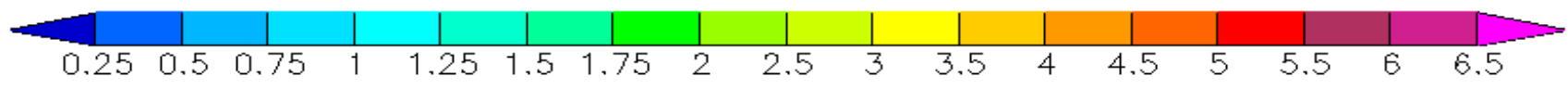
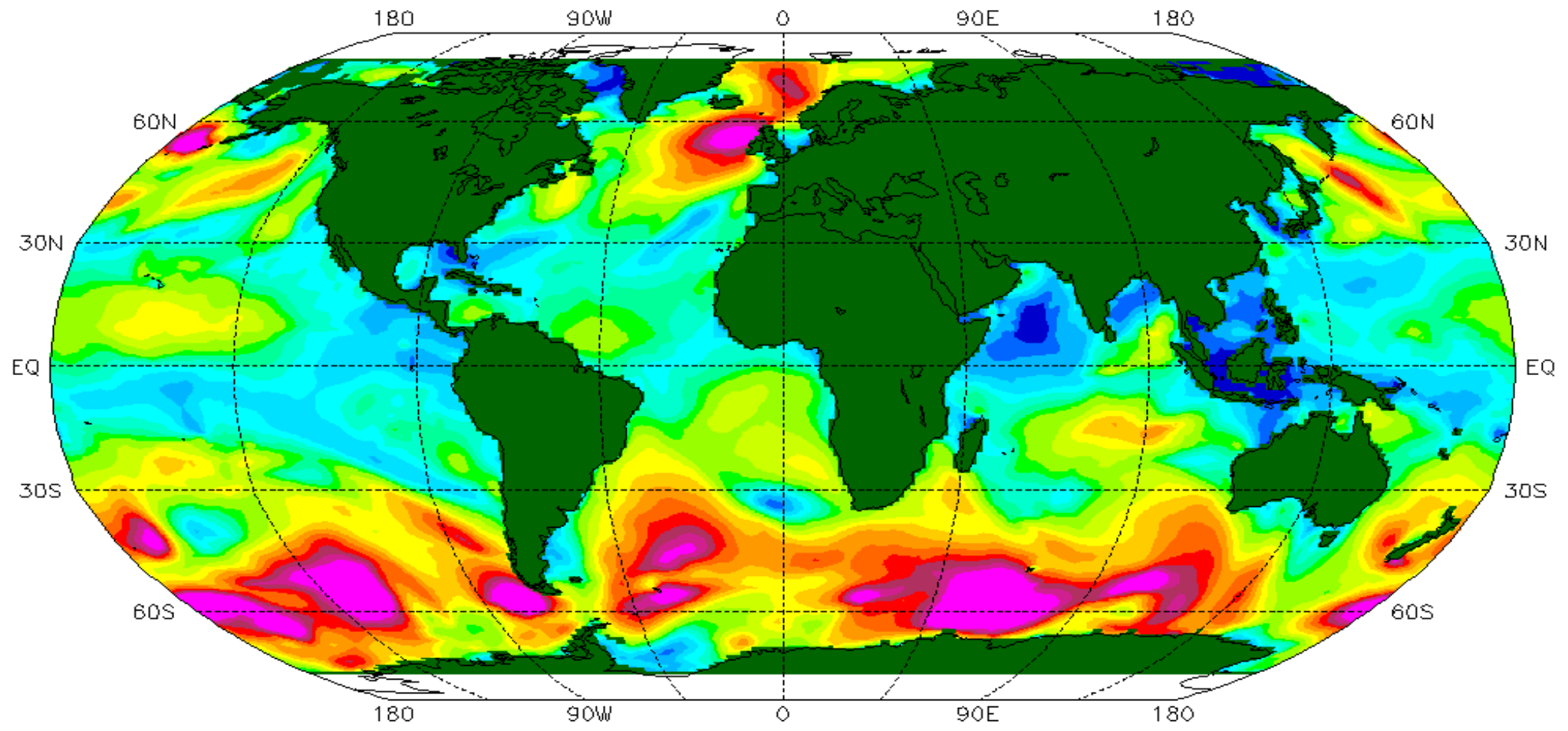
Vento a 10 m [m/s] – 2006/04/26 00z



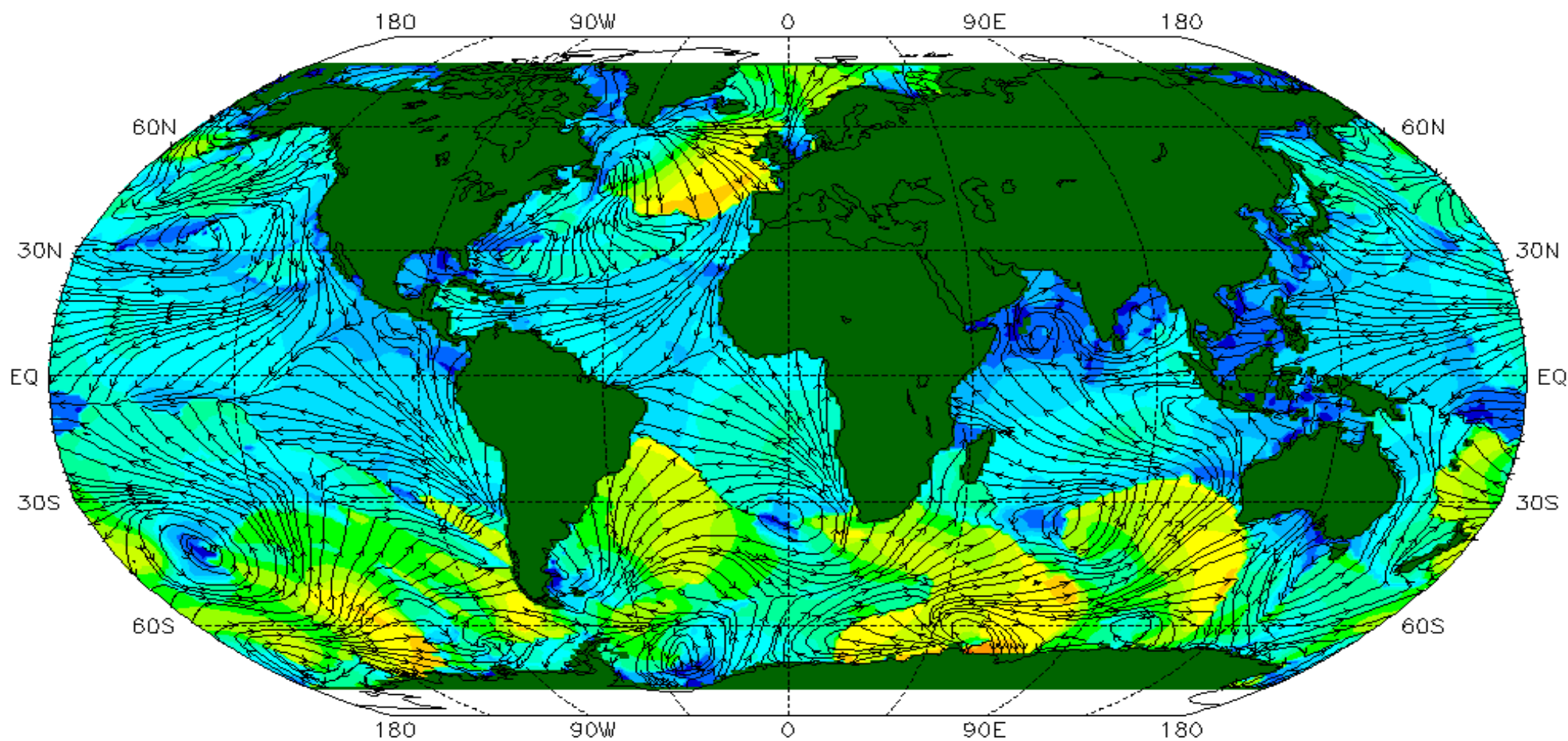
WAVEWATCH III – MASTER/DCA/IAG/USP

Modelo Global 1.25x1

Altura Significativa [m] - 2006/04/26 00Z

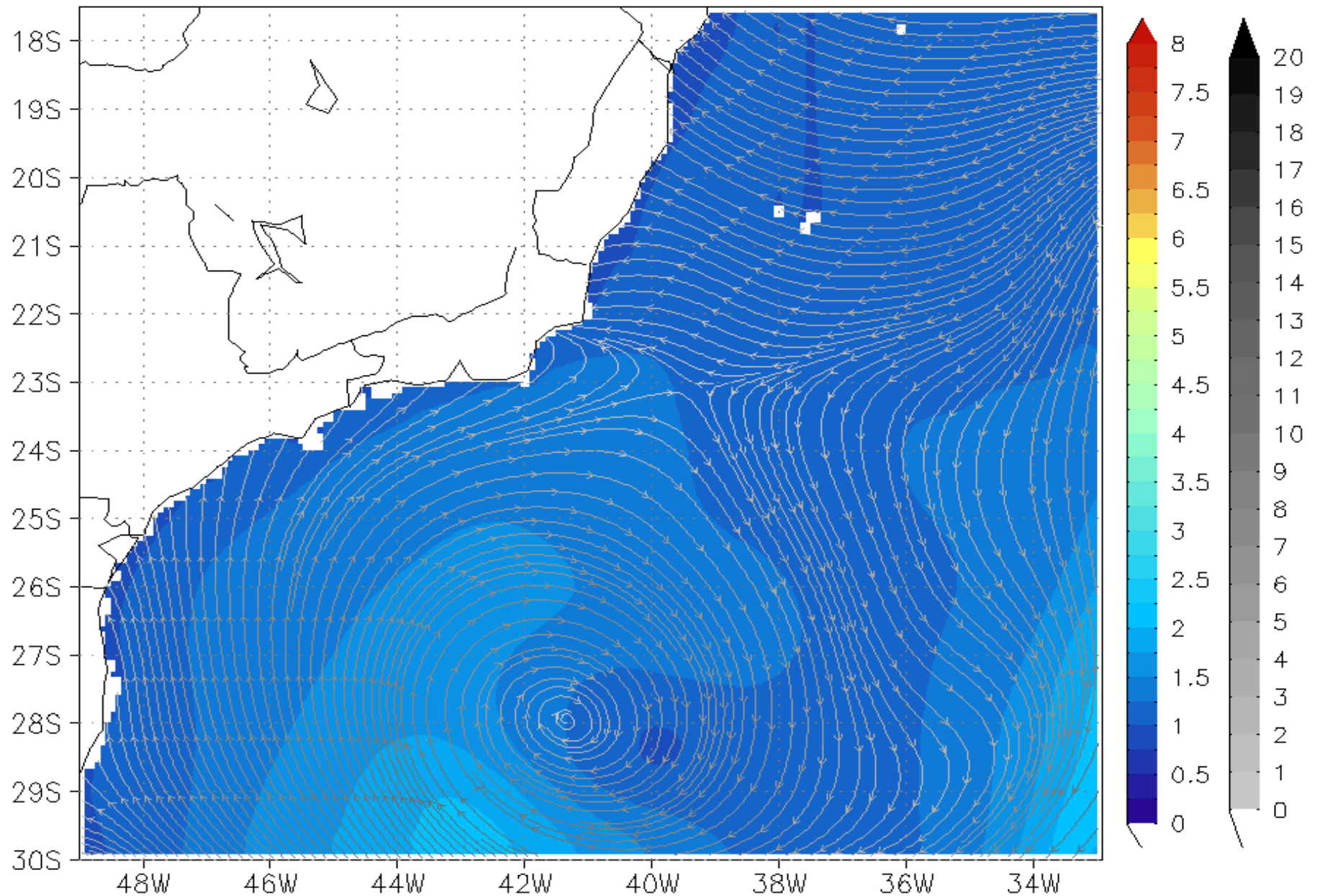


Periodo [s] e Direcao de Pico – 2006/04/26 00z

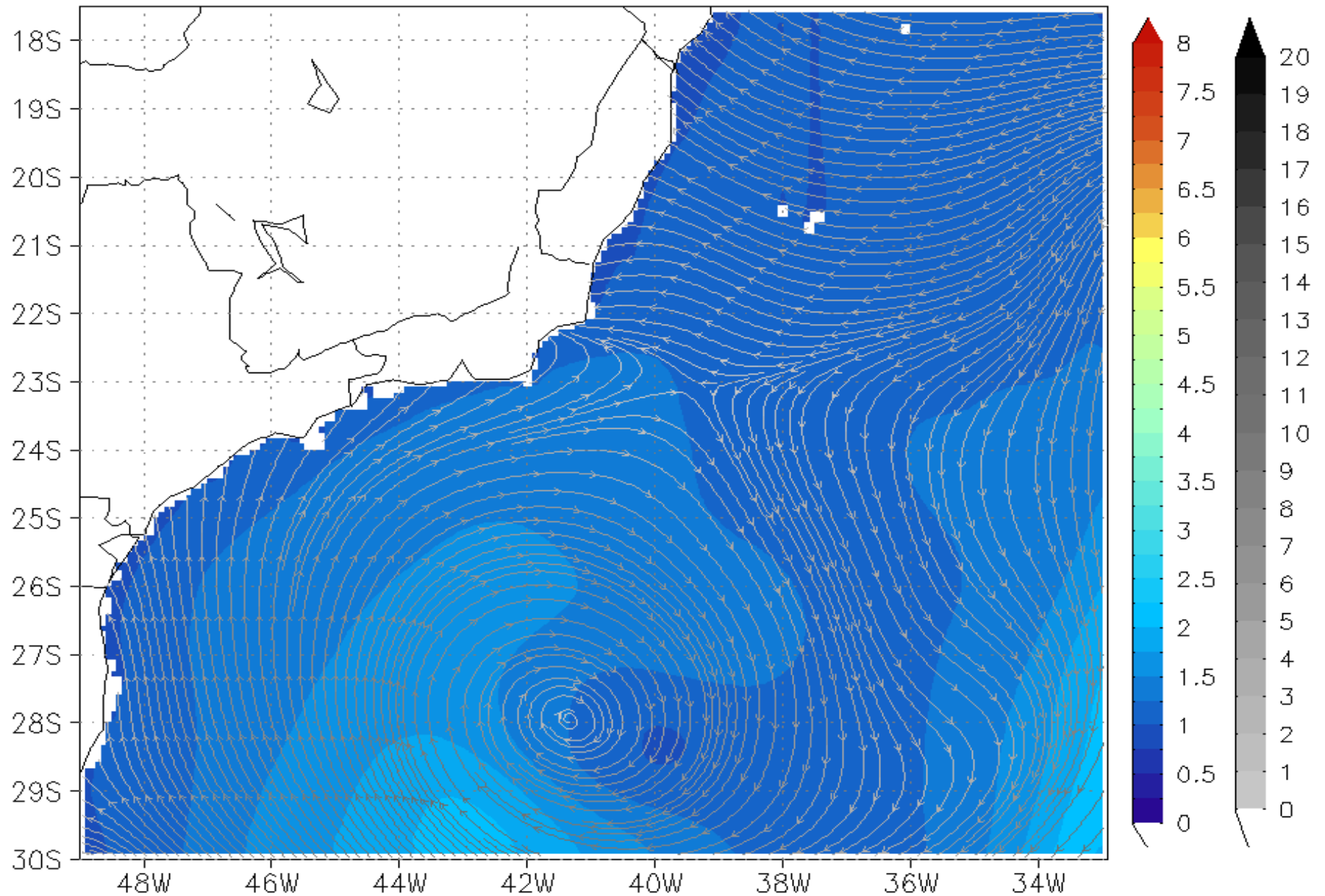


# **ESTUDO DE CASOS**

# Altura Significativa e Ventos a 10m – 2004/03/26 00z



# Altura Significativa e Ventos a 10m – 2004/03/26 00z



# **CLIMATOLOGIA DE SWELL**



# REFERÊNCIAS BÁSICAS

Dean, R. G. e R. A. Dalrymple, 1990: *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. Prentice-Hall, Inc., New Jersey, United States of America, 353pp.

Komen, G. J., L. Cavaleri, M. Donelan, K. Hasselmann, S. Hasselmann, e P. A. E. M. Janssen, 1994: *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 532pp.

Le Blond, P. H. e L. A. Mysak, 1978: *Waves in the Ocean*. Elsevier Scientific Publishing Co., Amsterdam, Netherlands, 602pp.

Pedlosky, J., 1986: *Geophysical fluids dynamics*. Springer-Verlag New York Inc, New York, United States of America, 2<sup>nd</sup> ed. edition, 710pp.

WMO, 1989: *Guide to Wave Analysis and Forecasting*. World Meteorological Organization, Genève, Suisse, 2<sup>nd</sup> ed. edition, WMO-No.702.

Young, I. R., 1999: *Wind Generated Ocean Waves*. Elsevier Science Ltd., Amsterdam, Netherlands, 288pp.

**CONTATO: FABRÍCIO V. BRANCO**

**[fabricao@master.iag.usp.br](mailto:fabricao@master.iag.usp.br)**

**[www.master.iag.usp.br](http://www.master.iag.usp.br)**