

ANÁLISE CRÍTICA DE UM SISTEMA COM RADAR DE ALTA FREQUÊNCIA PARA
SENSORIAMENTO REMOTO OCEÂNICO

Dante Rocha Lomonaco

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA
OCEÂNICA.

Aprovada por:

Prof. Carlos Eduardo Parente Ribeiro, D.Sc.

Prof. Afonso de Moraes Paiva, Ph.D.

Dr. José Antônio Moreira Lima, Ph. D.

Dr. Rogério Neder Candella, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2008

LOMONACO, DANTE ROCHA

Análise Crítica de um Sistema com Radar
de Alta Frequência para Sensoriamento
Remoto Oceânico [Rio de Janeiro] 2008

XV, 110p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc.,
Engenharia Oceânica, 2008)

Dissertação - Universidade Federal do Rio
de Janeiro, COPPE

1 - Instrumentação Oceanográfica

2 - Monitoramento de correntes oceânicas

I. COPPE/UFRJ II. Título (Série).

Em memória de:
Virgílio Luiz da Rocha

"Às vezes achamos que o que fazemos é apenas uma gota no oceano, mas se essa gota não estivesse lá, o oceano seria menor...".

(Madre Teresa de Calcutá)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que de alguma forma ajudaram na elaboração deste trabalho. Mas, gostaria de agradecer especialmente:

Ao Comandante Ricardo que, como Encarregado da Divisão de Instrumentação Oceanográfica do Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira, me possibilitou iniciar esse curso e que, como amigo, se empenhou pessoalmente para que pudesse realizá-lo.

Ao Prof. Carlos Eduardo Parente Ribeiro que como um verdadeiro Mestre norteou o rumo deste trabalho.

Aos senhores Carlos Leandro e Henrique Cadete que possibilitaram o término deste trabalho.

À PETROBRAS, pela cessão dos dados.

À minha família, por todo apoio durante todo o tempo.

E finalmente à minha esposa Priscila, por todo amor que tem me dedicado durante todos estes anos.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ANÁLISE CRÍTICA DE UM SISTEMA COM RADAR DE ALTA FREQUÊNCIA PARA
SENSORIAMENTO REMOTO OCEÂNICO

Dante Rocha Lomonaco

Março/2008

Orientador: Carlos Eduardo Parente Ribeiro

Programa: Engenharia Oceânica

Este trabalho descreve os métodos usados para a obtenção da informação do campo superficial de correntes a partir de dados de *SeaSonde®*, e dá exemplos de sua aplicação aos dados medidos. O *SeaSonde®* é um sistema compacto de radar de alta frequência (HF) que pode ser operado da costa ou de uma plataforma *offshore* para produzir mapas da velocidade de correntes superficiais marinhas e estimativas locais do espectro direcional da onda.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

CRITICAL ANALYSIS OF A HIGH FREQUENCY RADAR SYSTEM FOR OCEANIC
REMOTE SENSING

Dante Rocha Lomonaco

March/2008

Advisor: Carlos Eduardo Parente Ribeiro

Department: Oceanic Engineering

This paper describes methods used for the derivation of wave information from SeaSonde® data, and gives examples of their application to measured data. The SeaSonde® is a compact high frequency (HF) radar system operated from the coast or offshore platform to produce current velocity maps and local estimates of the directional wave spectrum.

INTRODUÇÃO	1
1. O SISTEMA CODAR (COASTAL OCEAN DYNAMICS APPLICATION RADAR)	5
1.1. A ESTAÇÃO CODAR DO TIPO SEASONDE® LONGRANGE	6
1.2. A ESTAÇÃO CENTRAL DE PROCESSAMENTO DOS DADOS	10
1.3. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO SEASONDE® LONG RANGE	11
2. PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DE UM SISTEMA COM RADAR DE ALTA FREQUÊNCIA PARA SENSORIAMENTO REMOTO OCEÂNICO	14
2.1. RESSONÂNCIA BRAGG	14
2.2. MEDIÇÃO DE VENTO POR RADAR DE ALTA FREQUÊNCIA	25
2.3. MEDIÇÃO DE CORRENTE POR RADAR DE ALTA FREQUÊNCIA	27
2.3.1. DETERMINAÇÃO DE DISTÂNCIA	27
2.3.2. DETERMINAÇÃO DE DIREÇÃO	29
2.3.3. DETERMINAÇÃO DE VELOCIDADE POR EFEITO DOPPLER	32
2.3.4. CÁLCULO DAS INTENSIDADES RADIAIS DA CORRENTE MARINHA	33
2.4. MEDIÇÃO DE ONDA POR RADAR DE ALTA FREQUÊNCIA	35
3. PROCEDIMENTOS DO TESTE PRELIMINAR	40
4. DADOS OBTIDOS	45
5. COMPARAÇÃO COM OUTROS DADOS MEDIDOS	90
6. UTILIZAÇÃO DE SISTEMAS DE RADAR DE ALTA FREQUÊNCIA NO MUNDO	101
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	106
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ANTENAS DE TRANSMISSÃO. _____	6
FIGURA 2 - ANTENA DE RECEPÇÃO. _____	7
FIGURA 3 - RECEPTOR, TRANSMISSOR, SINTONIZADORES, NO-BREAK E PACKS DE BATERIAS. _____	8
FIGURA 4 - COMPUTADOR DA ESTAÇÃO REMOTA. _____	9
FIGURA 5 - GRÁFICO QUE MOSTRA A RELAÇÃO ENTRE A ALTURA DE CADA ANTENA (EM RELAÇÃO AO SOLO) E O RAIOS DA ÁREA A SER MANTIDA LIVRE DE OBJETOS, PRINCIPALMENTE CONDUTORES. _____	11
FIGURA 6 - À ESQUERDA, ESQUEMA QUE ASSINALA A ÁREA QUE DEVE SER MANTIDA LIVRE DE MATERIAIS CONDUTORES LONGOS, ABAIXO DA SUPERFÍCIE. À DIREITA, O MESMO PARA OBJETOS CONDUTORES DE PEQUENA DIMENSÃO. _____	12
FIGURA 7 - EXEMPLO DE SINAL TRANSMITIDO E RETROESPALHADO. _____	17
FIGURA 8 - INTERAÇÃO CONSTRUTIVA DAS ONDAS RETROESPALHADAS. _____	18
FIGURA 9 - PICOS PRINCIPAIS (CORRENTE) E SECUNDÁRIOS (ONDA) DO ESPECTRO DO SINAL RECEBIDO PELAS 3 ANTENAS QUE COMPÕEM O RECEPTOR DO CODAR. _____	20
FIGURA 10 – PARÂMETROS AR-MAR ESTIMADOS A PARTIR DO ESPECTRO DE UM RADAR DE HF (ADAPTADO DE SHEARMAN, 1981). _____	21
FIGURA 11 - PULSO TRANSMITIDO PELO SISTEMA CODAR. _____	27
FIGURA 12 - FORMA DO SINAL TRANSMITIDO (VERMELHO) E DO SINAL RECEBIDO (AZUL). _____	28
FIGURA 13 - O CODAR UTILIZA TRÊS ANTENAS DE RECEPÇÃO: UM MONOPOLO, E DOIS LOOPS DISPOSTOS EM PLANOS PERPENDICULARES. _____	29
FIGURA 14 – EXEMPLO DE SINAL RECEBIDO EM CASOS NOS QUAIS EM QUE A CORRENTE SE DESLOCA APROXIMANDO-SE (VERMELHO), DESLOCANDO-SE PERPENDICULARMENTE (VERDE), AFASTANDO-SE (AZUL) E DESLOCANDO-SE PERPENDICULARMENTE (LARANJA) AO DO SENTIDO DE OBSERVAÇÃO DO RADAR. (ADAPTADO DE FERNANDEZ ET AL. 1997). _____	31
FIGURA 15 – AZIMUTE DA ANTENA DE RECEPÇÃO _____	41
FIGURA 16 – TRANSPONDER _____	42
FIGURA 17 – CORRIDA DO TRANSPONDER SENDO REALIZADA COM EMBARCAÇÃO. _____	43
FIGURA 18 - EXEMPLO DE ESPECTRO DE FREQUÊNCIA COLETADO DURANTE OS TESTES PRELIMINARES NA ESTAÇÃO DE BÚZIOS. _____	46
FIGURA 19 - EXEMPLO DE ESPECTRO DE FREQUÊNCIA COLETADO DURANTE OS TESTES PRELIMINARES NA ESTAÇÃO DE FAROL DE SÃO TOMÉ. _____	47
FIGURA 20 - EXEMPLO DE ESPECTRO DE FREQUÊNCIA COLETADO DURANTE OS TESTES PRELIMINARES NA ESTAÇÃO DE BARRA DE SÃO JOÃO. _____	48

FIGURA 21 - EXEMPLO DE ESPECTRO DE FREQUÊNCIA COLETADO DURANTE OS TESTES PRELIMINARES NA ESTAÇÃO DA PRAIA DO FOGUETE. _____	49
FIGURA 22 - PADRÃO DE IRRADIAÇÃO IDEAL _____	50
FIGURA 23 - PADRÃO DE IRRADIAÇÃO DA ESTAÇÃO DE FAROL DE SÃO TOMÉ. _____	51
FIGURA 24 - PADRÃO DE IRRADIAÇÃO DA ESTAÇÃO DE BARRA DE SÃO JOÃO. _____	52
FIGURA 25 - PADRÃO DE IRRADIAÇÃO DA ESTAÇÃO DA PRAIA DO FOGUETE. _____	53
FIGURA 26 - MAPA RADIAL DA ESTAÇÃO BÚZIOS CAPTADO NO DIA 16/09/2006 ÀS 21H00MIN. _____	55
FIGURA 27 - MAPA RADIAL DA ESTAÇÃO BÚZIOS CAPTADO NO DIA 16/09/2006 ÀS 22H00MIN. _____	56
FIGURA 28 - MAPA RADIAL DA ESTAÇÃO BÚZIOS CAPTADO NO DIA 16/09/2006 ÀS 23H00MIN. _____	57
FIGURA 29 - MAPA RADIAL DA ESTAÇÃO BÚZIOS CAPTADO NO DIA 17/09/2006 ÀS 00H00MIN. _____	58
FIGURA 30 - MAPA RADIAL DA ESTAÇÃO BÚZIOS CAPTADO NO DIA 17/09/2006 ÀS 01H00MIN. _____	59
FIGURA 31 - MAPA RADIAL DA ESTAÇÃO BÚZIOS CAPTADO NO DIA 17/09/2006 ÀS 02H00MIN. _____	60
FIGURA 32 - MAPA RADIAL DA ESTAÇÃO BÚZIOS CAPTADO NO DIA 17/09/2006 ÀS 03H00MIN. _____	61
FIGURA 33 - MAPA RADIAL DA ESTAÇÃO BÚZIOS CAPTADO NO DIA 17/09/2006 ÀS 04H00MIN. _____	62
FIGURA 34 - MAPA RADIAL DA ESTAÇÃO BÚZIOS CAPTADO NO DIA 17/09/2006 ÀS 05H00MIN. _____	63
FIGURA 35 - MAPA RADIAL DA ESTAÇÃO BÚZIOS CAPTADO NO DIA 17/09/2006 ÀS 06H00MIN. _____	64
FIGURA 36 - MAPA RADIAL DA ESTAÇÃO BÚZIOS CAPTADO NO DIA 17/09/2006 ÀS 07H00MIN. _____	65
FIGURA 37 - MAPA RADIAL DA ESTAÇÃO BÚZIOS CAPTADO NO DIA 17/09/2006 ÀS 08H00MIN. _____	66
FIGURA 38 - MAPA RADIAL DA ESTAÇÃO BÚZIOS CAPTADO NO DIA 17/09/2006 ÀS 09H00MIN. _____	67
FIGURA 39 - MAPA RADIAL DA ESTAÇÃO BÚZIOS CAPTADO NO DIA 17/09/2006 ÀS 10H00MIN. _____	68
FIGURA 40 - MAPA RADIAL DA ESTAÇÃO DE FAROL DE SÃO TOMÉ APÓS A CORREÇÃO DO PADRÃO DE IRRADIAÇÃO, CAPTADO NO DIA 16/09/2006 ÀS 01H00MIN. _____	69

FIGURA 41 - MAPA RADIAL DA ESTAÇÃO DE FAROL DE SÃO TOMÉ APÓS A CORREÇÃO DO PADRÃO DE IRRADIAÇÃO, CAPTADO NO DIA 16/09/2006 ÀS 02H00MIN. _____	70
FIGURA 42 - MAPA RADIAL DA ESTAÇÃO DE FAROL DE SÃO TOMÉ APÓS A CORREÇÃO DO PADRÃO DE IRRADIAÇÃO, CAPTADO NO DIA 16/09/2006 ÀS 03H00MIN. _____	71
FIGURA 43 - MAPA RADIAL DA ESTAÇÃO DE FAROL DE SÃO TOMÉ APÓS A CORREÇÃO DO PADRÃO DE IRRADIAÇÃO, CAPTADO NO DIA 16/09/2006 ÀS 04H00MIN. _____	72
FIGURA 44 - MAPA RADIAL DA ESTAÇÃO DE FAROL DE SÃO TOMÉ APÓS A CORREÇÃO DO PADRÃO DE IRRADIAÇÃO, CAPTADO NO DIA 16/09/2006 ÀS 05H00MIN. _____	73
FIGURA 45 - MAPA RADIAL DA ESTAÇÃO DE FAROL DE SÃO TOMÉ APÓS A CORREÇÃO DO PADRÃO DE IRRADIAÇÃO, CAPTADO NO DIA 16/09/2006 ÀS 06H00MIN. _____	74
FIGURA 46 - MAPA RADIAL DA ESTAÇÃO DE FAROL DE SÃO TOMÉ APÓS A CORREÇÃO DO PADRÃO DE IRRADIAÇÃO, CAPTADO NO DIA 16/09/2006 ÀS 07H00MIN. _____	75
FIGURA 47 - MAPA RADIAL DA ESTAÇÃO DE FAROL DE SÃO TOMÉ APÓS A CORREÇÃO DO PADRÃO DE IRRADIAÇÃO, CAPTADO NO DIA 16/09/2006 ÀS 08H00MIN. _____	76
FIGURA 48 - MAPA RADIAL DA ESTAÇÃO DE BARRA DE SÃO JOÃO APÓS A CORREÇÃO DO PADRÃO DE IRRADIAÇÃO, CAPTADO NO DIA 17/09/2006 ÀS 17H00MIN. _____	77
FIGURA 49 - MAPA RADIAL DA ESTAÇÃO DE BARRA DE SÃO JOÃO APÓS A CORREÇÃO DO PADRÃO DE IRRADIAÇÃO, CAPTADO NO DIA 17/09/2006 ÀS 18H00MIN. _____	78
FIGURA 50 – MAPA RADIAL DA ESTAÇÃO DA PRAIA DO FOGUETE APÓS A CORREÇÃO DO PADRÃO DE IRRADIAÇÃO, CAPTADO NO DIA 19/09/2006 ÀS 13H00MIN. _____	79
FIGURA 51 – MAPA RADIAL DA ESTAÇÃO DA PRAIA DO FOGUETE APÓS A CORREÇÃO DO PADRÃO DE IRRADIAÇÃO, CAPTADO NO DIA 19/09/2006 ÀS 14H00MIN. _____	80
FIGURA 52 – MAPA RADIAL DA ESTAÇÃO DA PRAIA DO FOGUETE APÓS A CORREÇÃO DO PADRÃO DE IRRADIAÇÃO, CAPTADO NO DIA 19/09/2006 ÀS 15H00MIN. _____	81
FIGURA 53 – MAPA RADIAL DA ESTAÇÃO DA PRAIA DO FOGUETE APÓS A CORREÇÃO DO PADRÃO DE IRRADIAÇÃO, CAPTADO NO DIA 19/09/2006 ÀS 16H00MIN. _____	82
FIGURA 54 – MAPA RADIAL DA ESTAÇÃO DA PRAIA DO FOGUETE APÓS A CORREÇÃO DO PADRÃO DE IRRADIAÇÃO, CAPTADO NO DIA 19/09/2006 ÀS 17H00MIN. _____	83
FIGURA 55 – MAPA ESTIMADO DO CAMPO DE CORRENTES SUPERFICIAIS NA BACIA DE CAMPOS COMBINANDO AS ESTAÇÕES DE FAROL DE SÃO TOMÉ E DA PRAIA DO FOGUETE. _____	85
FIGURA 56 – MAPA ESTIMADO DO CAMPO DE CORRENTES SUPERFICIAIS NA BACIA DE CAMPOS COMBINANDO AS ESTAÇÕES DE FAROL DE SÃO TOMÉ E DA PRAIA DO FOGUETE. _____	86
FIGURA 57 – MAPA ESTIMADO DO CAMPO DE CORRENTES SUPERFICIAIS NA BACIA DE CAMPOS COMBINANDO AS ESTAÇÕES DE FAROL DE SÃO TOMÉ E DA PRAIA DO FOGUETE. _____	87

FIGURA 58 – MAPA ESTIMADO DO CAMPO DE CORRENTES SUPERFICIAIS NA BACIA DE CAMPOS COMBINANDO AS ESTAÇÕES DE FAROL DE SÃO TOMÉ E DA PRAIA DO FOGUETE. _____	88
FIGURA 59 – MAPA ESTIMADO DO CAMPO DE CORRENTES SUPERFICIAIS NA BACIA DE CAMPOS COMBINANDO AS ESTAÇÕES DE FAROL DE SÃO TOMÉ E DA PRAIA DO FOGUETE. _____	89
FIGURA 60 - MAPA DO CAMPO DE VENTO NA REGIÃO DA BACIA DE CAMPOS PARA O DIA 15 DE SETEMBRO DE 2006 NO PERÍODO DIURNO. _____	92
FIGURA 61 - MAPA DO CAMPO DE VENTO NA REGIÃO DA BACIA DE CAMPOS PARA O DIA 15 DE SETEMBRO DE 2006 NO PERÍODO NOTURNO. _____	93
FIGURA 62 - MAPA DO CAMPO DE VENTO NA REGIÃO DA BACIA DE CAMPOS PARA O DIA 16 DE SETEMBRO DE 2006 NO PERÍODO DIURNO. _____	94
FIGURA 63 - MAPA DO CAMPO DE VENTO NA REGIÃO DA BACIA DE CAMPOS PARA O DIA 17 DE SETEMBRO DE 2006 NO PERÍODO NOTURNO. _____	95
FIGURA 64 - MAPA DO CAMPO DE VENTO NA REGIÃO DA BACIA DE CAMPOS PARA O DIA 18 DE SETEMBRO DE 2006 NO PERÍODO DIURNO. _____	96
FIGURA 65 - MAPA DO CAMPO DE VENTO NA REGIÃO DA BACIA DE CAMPOS PARA O DIA 18 DE SETEMBRO DE 2006 NO PERÍODO NOTURNO. _____	97
FIGURA 66 - MAPA DO CAMPO DE VENTO NA REGIÃO DA BACIA DE CAMPOS PARA O DIA 19 DE SETEMBRO DE 2006 NO PERÍODO DIURNO. _____	98
FIGURA 67 - MAPA DO CAMPO DE VENTO NA REGIÃO DA BACIA DE CAMPOS PARA O DIA 19 DE SETEMBRO DE 2006 NO PERÍODO NOTURNO. _____	99
FIGURA 68 - MAPA DO CAMPO DE VENTO NA REGIÃO DA BACIA DE CAMPOS PARA O DIA 20 DE SETEMBRO DE 2006 NO PERÍODO DIURNO. _____	100

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - BANDAS DE FREQUÊNCIA DE RADARES _____	2
TABELA 2 - EQUIPAMENTOS DE SENSORIAMENTO REMOTO (ADAPTADO DE MEASUREMENTS AND USE OF DIRECTIONAL SPECTRA OF OCEAN WAVES, 2005). _____	3

LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOS

BOON	<i>Bodega Ocean Observing Node</i>
COAS	<i>College of Oceanic and Atmospheric Sciences</i>
COCMP	<i>Coastal Oceans Currents Monitoring Program</i>
CODAR	<i>Coastal Ocean Dynamics Application Radar</i>
COOL	Coastal Ocean Observation Laboratory
cm	Centímetro
C_w	Velocidade de fase da onda superficial
d	Profundidade (metros)
dB	<i>Decibel</i>
θ	Direção da onda ($^\circ$)
f	Frequência da onda (Hz)
σ	Frequência <i>Doppler</i>
E	Energia ($kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$)
g	Aceleração da gravidade ($m \cdot s^{-1}$)
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HF	Alta frequência (<i>High Frequency</i>)
H_s	Altura significativa de onda
IOOS	<i>Integrated Ocean Observing System</i>
kg	Quilograma
k_0	Número de onda do radar
kHz	Kilohertz
L	Comprimento de onda
λ	Longitude
φ	Latitude

LEO-15	<i>Long-term Ecosystem Observatory</i>
MHz	Megahertz
m	Metro
OSU	<i>Oregon State University</i>
pol	Polegadas
ρ	Densidade de água
SALMON	<i>Sea-Air-Land Modeling and Observing Network</i>
SDCOOS	<i>San Diego Coastal Ocean Observing System</i>
T_p	Período de pico de onda
T_m	Período médio de onda
U	Vetor velocidade de corrente
u	Velocidade do vento
V_c	Componente radial da corrente na direção do radar

INTRODUÇÃO

Informações, em tempo real, tais como medições de dados de onda, e a medição de correntes marinhas são cruciais para proteção da costa e no controle de operações *offshore*, seja com plataformas semi-submersíveis ou navios FPSOs. A busca destas informações sempre foi um desafio para a melhor compreensão dos diversos processos e fenômenos de interesse daqueles que buscam um maior conhecimento sobre o mar.

Nas últimas décadas vem se tentando, no Brasil, manter medições, em tempo real e *in-situ*, de parâmetros oceanográficos, por meio de bóias oceanográficas e fundeios, equipamentos dos quais são extraídos dados de muito boa qualidade. Porém, além do fato de haver poucas instituições detentoras de equipamentos, de conhecimento técnico e apoio logístico capazes de realizar tais medições, há, para as instituições possuidoras de tais características, um custo elevado na manutenção do sistema operacional devido às constantes avarias causadas, principalmente, por navios pesqueiros que arrastam o equipamento, partindo seu sistema de fundeio, deixando, posteriormente, o mesmo à deriva. O que dificulta, e muito, a continuidade das medições.

Devido às dificuldades de se medir parâmetros oceanográficos *in-situ*, mostra-se, nos últimos anos, elevado interesse em medi-los por técnicas de sensoriamento remoto. Medições de campos de correntes por estas técnicas provêm dados de boa resolução e grande cobertura de uma determinada área. Seja o sistema implantado em terra ou numa embarcação, o sistema pode fornecer informações da evolução temporal do campo de correntes em uma determinada área e a partir destes dados podem ser calculados os parâmetros de ondas que são medidos por um equipamento de medição *in-situ*, tais como altura significativa, período e direção de onda.

A tecnologia de medição de parâmetros oceanográficos por radares de HF vem, justamente, superar essa limitação, já que é capaz de medir uma vasta área a cada coleta de dados. Dessa forma, feições das mais variadas escalas de tempo e espaço podem ser resolvidas e “visualizadas” no processamento dos dados.

Uma classificação de técnicas de sensoriamento remoto pode ser descrita de acordo com a banda de frequência usada na medição, por sensores ativos (sensores que enviam e recebem o sinal) ou passivos (sensor que somente recebe o sinal). Esta classificação pode ser vista na Tabela 1.

Tabela 1 - Bandas de frequência de radares

Nome da Banda	Faixa de frequência	Faixa de comprimento de onda
HF	3–30 MHz	10–100 m
P	< 300 MHz	1 m+
VHF	50–330 MHz	0.9–6 m
UHF	300–1000 MHz	0.3–1 m
L	1–2 GHz	15–30 cm
S	2–4 GHz	7.5–15 cm
C	4–8 GHz	3.75–7.5 cm
X	8–12 GHz	2.5–3.75 cm
K _u	12–18 GHz	1.67–2.5 cm
K	18–27 GHz	1.11–1.67 cm
K _a	27–40 GHz	0.75–1.11 cm
mm	40–300 GHz	7.5 mm – 1 mm
Q	40–60 GHz	7.5 mm – 5 mm
V	50–75 GHz	6.0–4 mm
E	60–90 GHz	6.0–3.33 mm
W	75–110 GHz	2.7 – 4.0 mm

A Tabela 2 mostra um apanhado dos vários sistemas de radares existentes, exibindo o tipo de equipamento utilizado na medição, o nome do sistema, a banda de frequência utilizada, o princípio de funcionamento e a plataforma de instalação do equipamento.

Tabela 2 - Equipamentos de sensoriamento remoto (adaptado de Measurements and use of directional spectra of ocean waves, 2005).

Equipamento	Acrônimo	Banda de Frequência	Princípio de medição	Plataforma
Altímetro	SRA, SCR	Ka	Medições de mapas topográficos de uma distância acurada	Aeronave
Radar marinho	WAMOS	X	Modulação do sinal retroespalhado com amplo ângulo de incidência	Navio, costa
Radar Doppler de plataforma	MIROS	C	Retroespalhamento de ângulos de incidência moderados	Navio, plataforma
Radar de alta frequência	WERA, Pisces, CODAR	HF	Espectro de energia do sinal retroespalhado devido a ondas em movimento com discriminação de azimute alcance	Costa
Radar de abertura real Não-Doppler	RESSAC, STORM, SWIMSAT	C, Ku	Modulação do sinal retroespalhado medidos em ângulos de incidência moderados, sobre um azimute de 360°	Aeronave, satélite
Radar de abertura real Doppler	CORAR	X	Modulação da velocidade Doppler na direção transversal a de vô	Aeronave
Radar de abertura sintética	SAR	X,C,L	Tempo de viagem (trajetória transversal a de vô), Histórico Doppler (trajetória ao longo a de vô)	Aeronave, satélite
Radar de abertura sintética Interferométrico	INSAR	X,C,L	Duas antenas SAR em uma configuração de trajetória ao longo ou transversal a de vô	Aeronave, satélite

O presente trabalho tem como escopo ilustrar os princípios de funcionamento do Sistema CODAR de medição de corrente superficial bem como, apresentar resultados de dados coletados por este método. Para consecução destes objetivos, acima citados, no capítulo 1, subdividido em 3 partes, discorreremos sobre o que é o sistema CODAR e quais equipamentos fazem parte de cada estação. No capítulo 2 será descrito os princípios de funcionamento de um sistema com radar de alta frequência para sensoriamento remoto. No capítulo 3 será narrado como foram os procedimentos do teste preliminar para a instalação do sistema de radar de alta frequência na Bacia de Campos. No Capítulo 4 serão apresentados os dados obtidos neste teste preliminar. No Capítulo 5 é feita uma comparação dos dados obtidos no teste preliminar com dados obtidos por outros equipamentos. No Capítulo 6 será elucidado algumas utilizações de sistemas de radar de alta frequência no mundo. E por fim no capítulo 7 são apresentadas as conclusões finais e recomendações para trabalhos futuros.

1. O Sistema CODAR (Coastal Ocean Dynamics Application Radar)

O CODAR consiste de um sistema radar capaz de medir as correntes superficiais do oceano e, em certas circunstâncias, o campo de ondas e vento de superfície com alta resolução temporal e espacial. Os dados provenientes do sistema possuem vasto emprego como, por exemplo, em aplicações operacionais em que se necessita de dados em tempo real; assimilação de dados e validação de modelos; e estudos dinâmicos.

O sistema radar opera em alta frequência (HF) na faixa de 4-50MHz, é instalado na costa e operado de forma totalmente remota.

Cada estação radar é capaz de gerar um mapa contendo as componentes radiais da corrente oceânica. A componente radial é aquela cuja direção é obtida por um vetor calculado entre o ponto de amostragem da corrente e a estação radar.

Para que se resolva o campo de correntes superficiais de uma dada região são necessários, portanto, no mínimo, dois sistemas (o sistema pode operar com um máximo de 6 estações para uma mesma área). Isso decorre do fato de que duas componentes radiais definem um vetor de corrente contido no plano horizontal. De posse do vetor, novas componentes podem ser projetadas em outros sistemas de referência como, por exemplo, o de coordenadas terrestres.

1.1. A Estação CODAR do Tipo SeaSonde® LongRange

Cada estação remota *SeaSonde®* é composta de duas (ou três) antenas, uma (ou duas) de transmissão (Figura 1) e uma de recepção (Figura 2); um transmissor, um receptor, sintonizadores das antenas de transmissão (Figura 3) e um computador (Figura 4). O computador é responsável pela aquisição dos dados e transmissão via modem/rede.



Figura 1 - Antenas de transmissão.



Figura 2 - Antena de recepção.

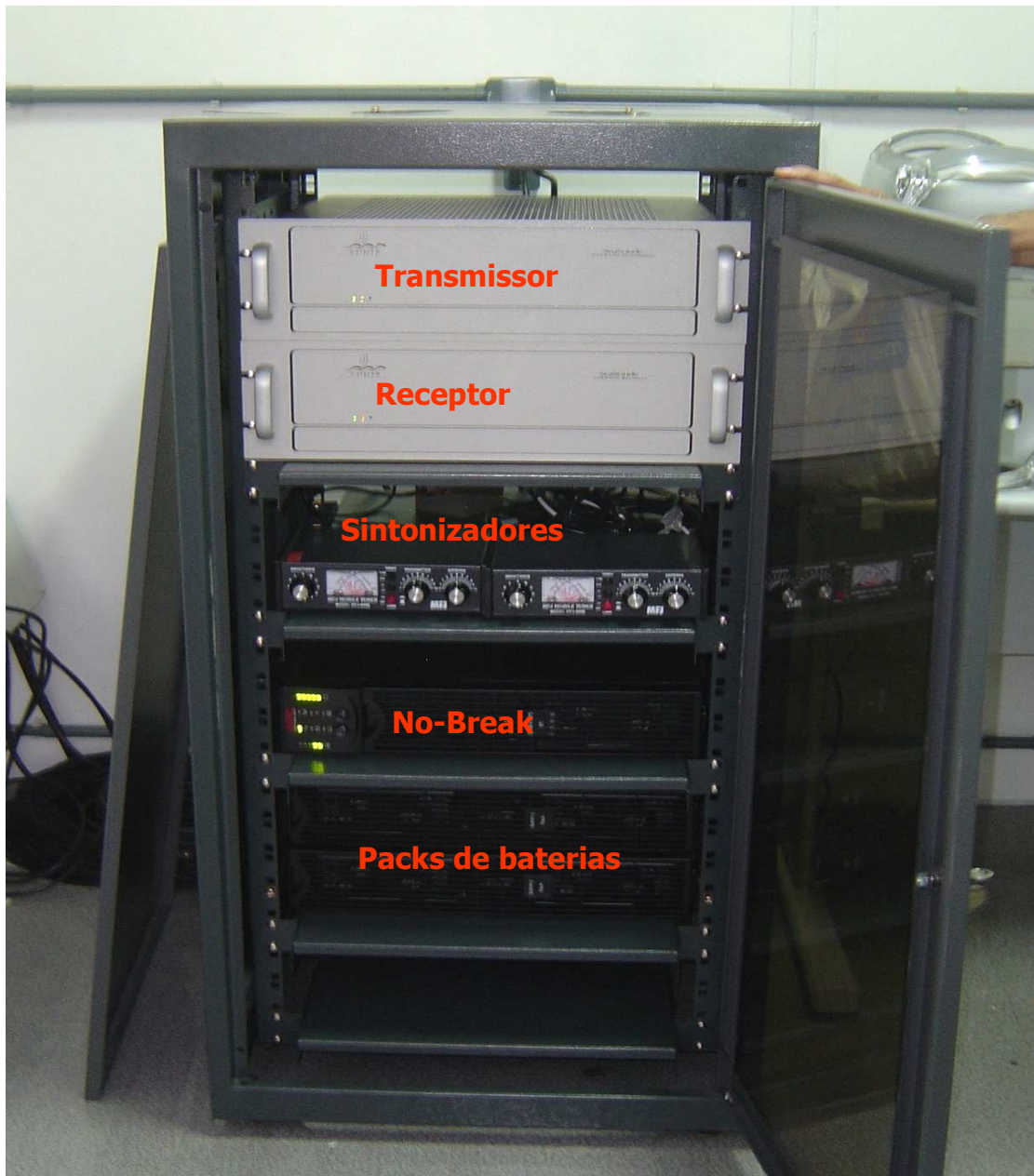


Figura 3 - Receptor, Transmissor, Sintonizadores, No-Break e Packs de baterias.



Figura 4 - Computador da estação remota.

1.2. A Estação Central de Processamento dos Dados

A estação central é responsável pela composição dos vetores radiais no vetor total do campo de correntes. Esta estação é composta de um computador que deve ter acesso às outras estações remotamente via modem/rede.

Como cada estação CODAR só é capaz de fornecer componentes radiais do campo de correntes superficiais, os dados provenientes de cada estação serão integrados numa estação central que será capaz de calcular os vetores de velocidade de corrente. Quando da aquisição de um sistema completo de aquisição de correntes junto à CODAR (mínimo 2 estações) uma estação central é automaticamente incluída.

A estação central não necessita estar próxima a nenhuma das estações CODAR porquanto os dados serão transmitidos por meio digital, através de conexão à Internet. Na estação central estarão instalados os *softwares* capazes de tratar as informações disponibilizadas por cada estação CODAR, realizando o armazenamento dos dados e o processamento.

Uma rotina típica de processamento dos dados inclui a utilização do padrão de diretividade da antena (diagrama real de recepção a partir dos dados coletados durante a fase de calibração do sistema).

1.3. Características Técnicas do SeaSonde® Long Range

O sistema *SeaSonde® Long Range* instalado pela PETROBRAS/ ENGENHARIA na Bacia de Campos, e que será utilizado nesta dissertação, opera na frequência de 4,7 MHz, o que implica num alcance máximo de cerca de 220 km. O alcance tende a diminuir durante a noite, quando as condições de propagação atmosférica ocasionam um aumento significativo no ruído de fundo, comprometendo a performance do sistema. A resolução do sistema depende da banda configurada pelo operador e varia, para o *Long Range*, entre células de 6 km.

A distância entre as antenas de transmissão e recepção de um sistema *Long Range* deve ser de no mínimo 60 metros. Além disso, deverá ser mantida livre de objetos, principalmente condutores, uma área no entorno da estação, cujo raio depende da altura de instalação das antenas (Figura 5):

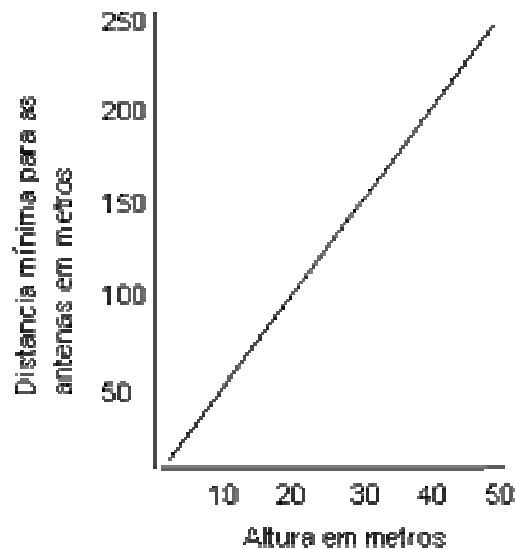


Figura 5 - Gráfico que mostra a relação entre a altura de cada antena (em relação ao solo) e o raio da área a ser mantida livre de objetos, principalmente condutores.

A parcela do solo contida num volume inscrito por uma circunferência de raio 100 metros, centrada em cada antena, e a profundidade de 10 metros abaixo da superfície, também deverá ser mantida livre de condutores longos como cabos elétricos e tubulações. Pequenos condutores sob o solo deverão ser mantidos à distância superior a 4 metros da base da antena (Figura 6).

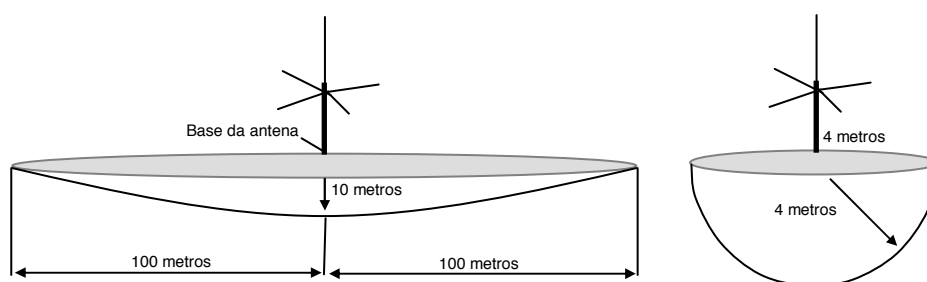


Figura 6 - À esquerda, esquema que assinala a área que deve ser mantida livre de materiais condutores longos, abaixo da superfície. À direita, o mesmo para objetos condutores de pequena dimensão.

Sistemas radar são, tipicamente, equipamentos eletrônicos capazes de fornecer a distância, a direção e a velocidade em que se encontram os mais diversos objetos. A aplicação mais característica dos sistemas radar é na navegação de navios e aeronaves. Nesse tipo de aplicação um pulso eletromagnético é enviado por uma antena direcional e, no caso de haver algum objeto refletor na direção de propagação do pulso, o tempo computado até a chegada do “eco” (sinal refletido que retorna ao sistema radar) fornece a distância do alvo. No caso de existirem vários refletores na mesma direção, o radar será capaz de “resolver” contatos tanto mais próximos quanto menor a largura do seu pulso. Infelizmente, pulsos menores possuem menor energia, limitando o alcance do equipamento.

Daí a relação existente em todos os sistemas radares entre a largura do pulso e o alcance desejado. De qualquer forma, fica claro que o período de tempo em que o

sistema radar permanece sem transmitir é consideravelmente maior que o tempo efetivamente gasto em transmissão, emitindo energia eletromagnética para a detecção de alvos, ou seja, a quantidade de energia utilizada para a detecção é bastante reduzida. Isso implica numa baixa eficiência do sistema já que ele fica, na maior parte do tempo, sem transmitir (90% do tempo de operação, no mínimo).

Para suplantar essa ineficiência, o sistema ora proposto (cujos obstáculos, ou alvos, em que a energia é refletida são as ondas do mar) utiliza uma técnica diferente para a determinação das distâncias, em relação aos tradicionais sistemas radar descritos acima, logrando manter um fator de trabalho de 50%, ou seja, o período de transmissão tem a mesma quantidade de tempo do modo de recepção.

2. Princípios de Funcionamento de um Sistema com Radar de Alta Frequência para Sensoriamento Remoto Oceânico

2.1. Ressonância Bragg

As medições de correntes marinhas derivadas a partir da reflexão das ondas de rádio de sinal de *HF* são baseadas na relação do forte pico de primeira ordem que aparece no efeito *Doppler do* espectro recebido. Este pico é correspondente a ondas oceânicas forçadas pelo vento de comprimento de onda ressonante com o sinal transmitido e se deslocam radialmente (na direção contra ou a favor) ao radar.

Os comprimentos de onda do radar de *HF* são semelhantes aos ressonantes retroespalhados, fenômeno conhecido como “Espalhamento de *Bragg*”, que ocorre devido à reflexão coerente da energia do sinal transmitido por ondas oceânicas de comprimento de onda de especificamente metade do tamanho do comprimento de onda do sinal transmitido.

Segundo o *Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual*, publicado pela NOAA em 2004, em 1913, os físicos ingleses, Sir W.H. Bragg e seu filho Sir W.L. Bragg chegaram a uma relação, que recebeu o nome de Lei de Bragg, com o intuito de explicar porque as faces clivadas de cristais refletem feixes de raios-X em certos ângulos de incidência.

A relação é esta:

$$n\lambda = 2d \operatorname{sen}(\theta) \quad [1]$$

Onde:

θ é o ângulo de incidência, d é a distância entre camadas atômicas de um cristal, λ é o comprimento de onda do feixe de raios-X incidente e n é um número inteiro.

Com a consolidação do conhecimento nesta área sua aplicação não ficou restrita apenas a cristalografia e esta relação tem sido utilizada para estudar estruturas de

todos os estados da matéria. Esta descoberta rendeu aos Bragg o Prêmio Nobel de Física em 1915.

Quando um sinal de radar de comprimento de onda λ atinge uma superfície em que há uma estrutura periódica, ocorre um efeito de ressonância causando um retroespalhamento que pode ser chamado de espalhamento Bragg. Este tipo de padrão periódico de estrutura pode ser encontrado na superfície dos oceanos dependendo da condição atmosférica presente. Deve-se observar que qualquer onda que possibilite a aplicação da Lei de Bragg pode ser chamada de onda Bragg.

Segundo Lyzenga (1991), este padrão de retroespalhamento por unidade de área pode ser descrito através da seguinte equação, quando aplicado à superfície do mar e relacionado com sinal incidente oriundo de radar:

$$\sigma_0(\theta, \phi_v) = 8\pi k_0^4 G(\theta) T(\theta, \phi_v) \quad [2]$$

Onde θ é o ângulo de incidência, ϕ_v é o ângulo de visada azimutal, k_0 é o número de onda eletromagnético, $G(\theta)$ é o fator geométrico dependente da polarização e $T(\theta, \phi_v)$ é a densidade espectral da superfície do mar

Este tipo de estrutura periódica encontrada na superfície do mar, chamada de onda Bragg, pode ser entendida dentro de uma escala de interesse como uma rugosidade superficial, conseqüentemente nota-se que a rugosidade superficial do oceano é um dos fatores determinantes no retroespalhamento de um sinal emitido por radar.

O retroespalhamento Bragg no oceano é resultado da periodicidade das ondas de curto comprimento de onda, que normalmente estão presentes na superfície, resultado essencialmente da ação do vento (Ochadlick et al., 1992).

Com o advento dos radares, a aplicação da lei de Bragg tem-se tornado bastante útil no que se refere ao estudo de feições na superfície do mar. Em

operações de radar, cujo uma variação de ângulo de incidência é aproximadamente 90°, típica do sistema CODAR, o retroespalhamento para cada elemento de superfície do mar é dominado pelo retroespalhamento Bragg (Hasselmann & Hasselmann, 1991).

A equação [2] relaciona a quantidade de energia retroespalhada por unidade de área, com o comprimento da onda eletromagnética, fator de polarização do sinal do radar e a densidade espectral da superfície do mar.

Os fatores que realmente serão responsáveis por modificações no resultado da equação de retroespalhamento são: o ângulo de incidência e os fatores dele dependentes, e a densidade espectral da superfície do mar, esta última podendo ser representada de um modo específico como será visto mais adiante, além dos valores de direção e intensidade do vento a 10 m.

Alguns conceitos precisam ser incluídos neste estudo, de modo que se possa trabalhar com as equações governantes do problema em questão sem cometer erros. Nos parágrafos a seguir serão apresentados alguns destes conceitos.

Para comprimentos de onda de radar λ_r , com um ângulo de incidência θ com a vertical, observando um trem de ondas do mar com comprimento de onda λ_w e cujas cristas são perpendiculares à linha de visada do radar, o espalhamento Bragg de primeira ordem ocorre se (Robinson, 1985):

$$\lambda_w = \frac{\lambda_r}{2 \cos(\theta)} \quad [2]$$

Onde λ_w é o comprimento de onda da onda oceânica, λ_r é o comprimento de onda do sinal transmitido pelo radar e θ é o ângulo de incidência.

Ou seja, para uma situação considerada ideal, em que as cristas das ondas do mar são perpendiculares à linha de visada do radar. O retroespalhamento ocorre em

sua maior parte, quando o alvo atingido, no caso, as ondas do mar, possuem um comprimento de onda tal, que este é igual à metade do comprimento de onda do radar multiplicado pelo inverso do cosseno do ângulo de incidência θ .

Como as antenas do sistema CODAR ficam próximas ao nível do mar, o ângulo de incidência tende à zero. Assumindo isto, então, reduz a equação acima à:

$$\lambda_w = \frac{\lambda_r}{2} \quad [3]$$

Assim sendo, o sinal transmitido pelo radar, deve atingir uma onda oceânica cujo comprimento de onda seja a metade do seu próprio comprimento de onda (Figura 7).

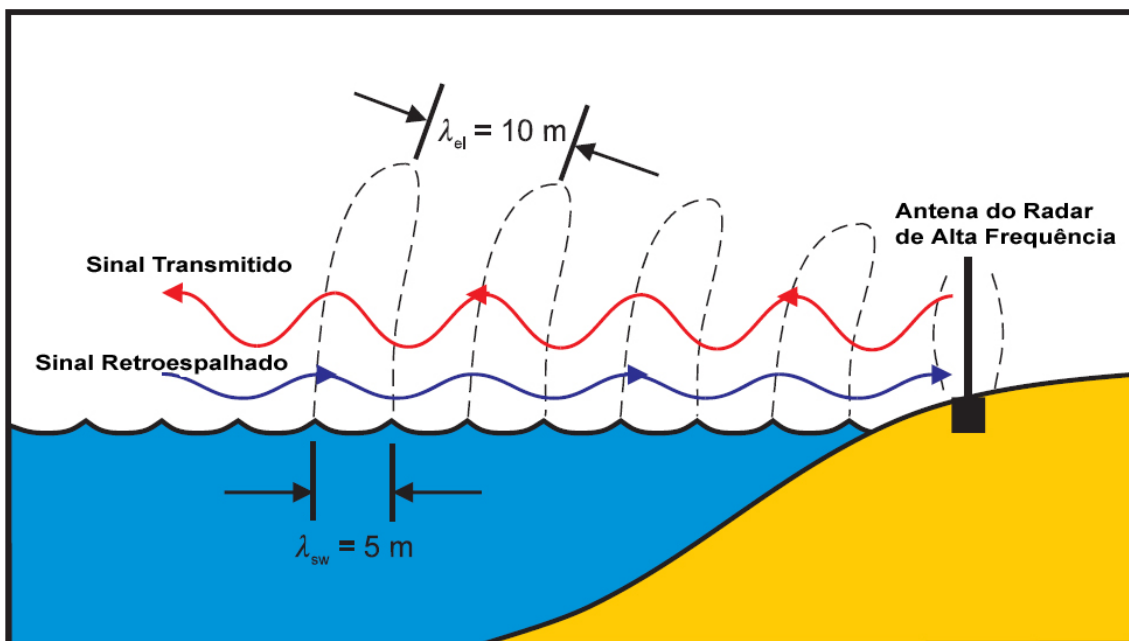


Figura 7 - Exemplo de sinal transmitido e retroespalhado.

No caso do sistema CODAR *LongRange* cuja a freqüência de utilização é de 4,7 MHz e com comprimentos de onda eletromagnéticos de aproximadamente 60m,

somente ondas oceânicas de comprimento de onda de 30m respeitarão a condição ressonante de Bragg.

A teoria de Bragg estabelece que, para uma superfície randômica dividida em seus componentes espectrais, a energia retroespalhada dominante origina-se das componentes que estiverem em ressonância com a onda incidente. As ondas capilares e de gravidade são as principais responsáveis pelo processo de espalhamento da radiação de *HF* na superfície do oceano, e sob as mais variadas condições oceânicas e de visada do radar. As ondas capilares refletem as ondas de radar, pois possuem comprimentos de ondas compatíveis com os exigidos para uma condição ressonante de Bragg com ondas eletromagnéticas. Ou seja o sinal retroespalhado é, basicamente amplificado na medida que as ondas interagem entre si. O sinal retroespalhado será amplificado cada vez que interagir com o próximo sinal retroespalhado que está em fase com o mesmo (Figura 8).

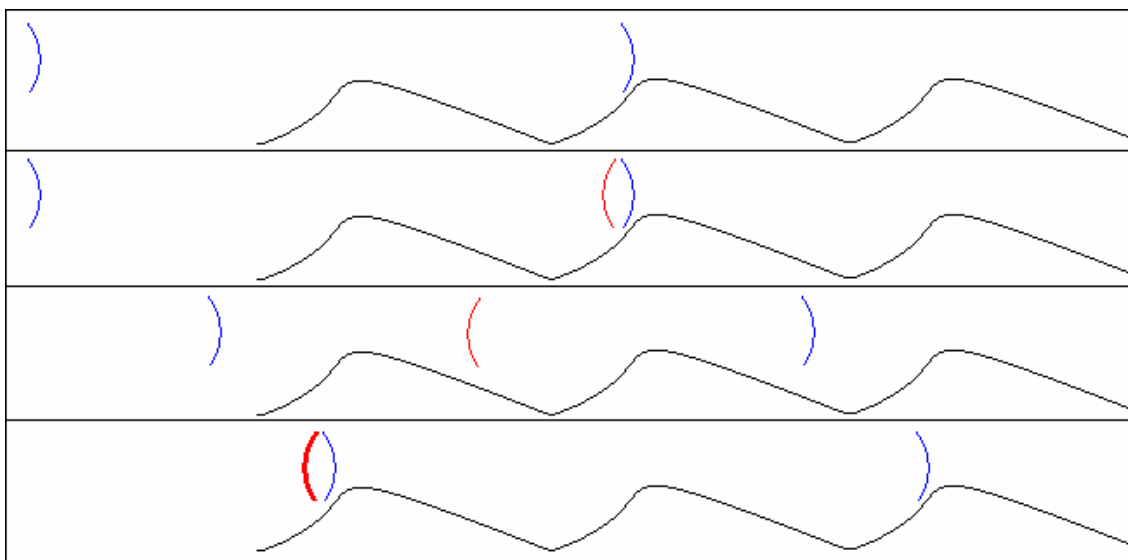


Figura 8 - Interação construtiva das ondas retroespalhadas.

Devido ao fato da superfície oceânica não ser uma única senóide, mas sim uma infinita soma de componentes de ondas móveis, o sinal eletromagnético refletido

irá produzir um completo espectro de energia ao invés de alguns únicos picos referentes ao efeito *Doppler*.

Um exemplo de espectro de energia recebido pode ser visto na Figura 9. O eixo horizontal é marcado por efeitos *Doppler* positivos (as ondas estão se aproximando do receptor) e negativos (as ondas estão se afastando do receptor) em relação à freqüência do radar (o zero do eixo horizontal). O eixo vertical é o nível da energia em decibéis (dB). O eco de energia é diretamente proporcional à energia de onda por unidade de área numa componente de onda particular.

Desde que somente componentes de ondas oceânicas que se deslocam contra ou a favor do radar satisfaçam a condição de *Bragg*, a verificação da amplitude de um determinado trecho do espectro na faixa positiva, como na negativa, indica a relação da energia nas ondas oceânicas se aproximando ou se afastando e conseqüentemente, a medição da direção do vento e das correntes oceânicas (Shearman, 1981).

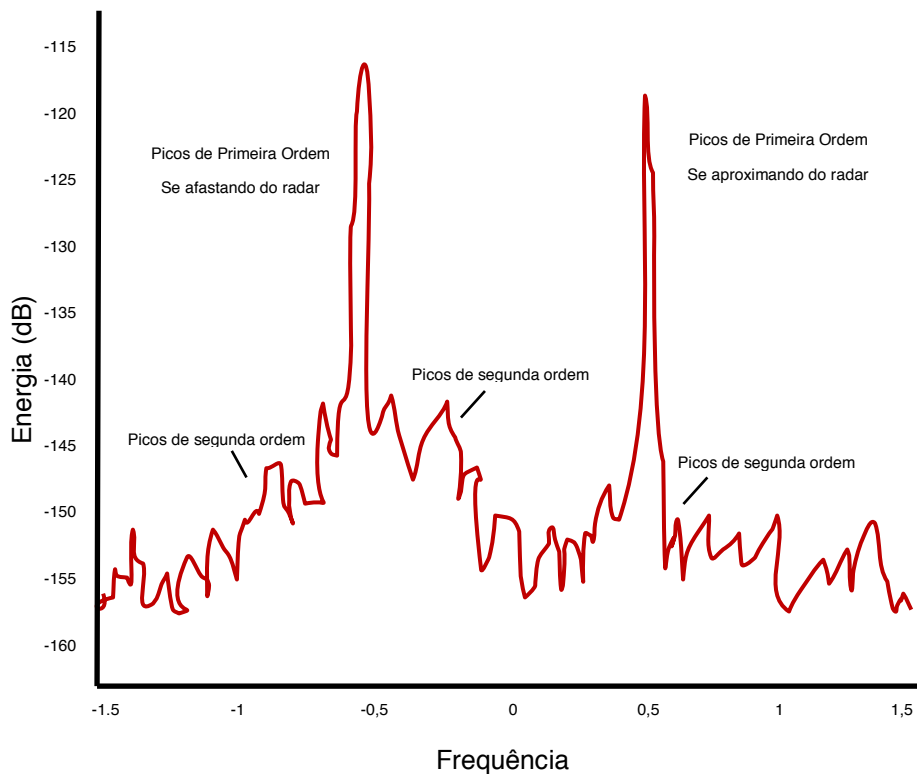


Figura 9 - Picos principais (corrente) e secundários (onda) do espectro do sinal recebido pelas 3 antenas que compõem o receptor do CODAR.

É importante distinguir a diferença entre a maneira que a direção do vento e as correntes oceânicas são deduzidas do mesmo espectro de energia. Enquanto as medições de vento são simplesmente feitas entre a razão dos níveis dos picos positivos e negativos, as medições de correntes oceânicas são derivadas do deslocamento de frequência, da velocidade de fase das ondas oceânicas e da velocidade da corrente oceânica subjacente. A contribuição da velocidade de fase da velocidade da onda ressonante pode ser computada, e subtraída do deslocamento *Doppler* observado; então, a porção restante pode ser atribuída às correntes oceânicas. Diferentemente das medições de vento, nas medições de correntes o radar capta somente uma componente radial da corrente oceânica total que é orientada radialmente ao longo da direção de visada do radar.

A Figura 10 ilustra como as medições de vento e correntes, bem como outros parâmetros podem ser derivadas a partir do espectro de energia do sinal de HF retroespalhado: (A) Diferença entre os dois picos principais – Direção do Vento; (B) Largura do maior pico de *Bragg* – Intensidade do vento; (C) Efeito Doppler do pico de primeira ordem de *Bragg* do que se era esperado – Componente radial da corrente superficial; (D) Magnitude dos picos de *Bragg* de primeira ordem – Espectro da altura de onda oceânica para uma única frequência e direção; (E) Magnitude da estrutura de segunda ordem - Espectro da altura de onda oceânica para todas as frequências e direções (adaptado de Shearman, 1981).

A robustez dessas derivações varia, dependendo da suscetibilidade e da relação sinal-ruído do sistema de radar e da relação entre a quantidade medida e o parâmetro físico.

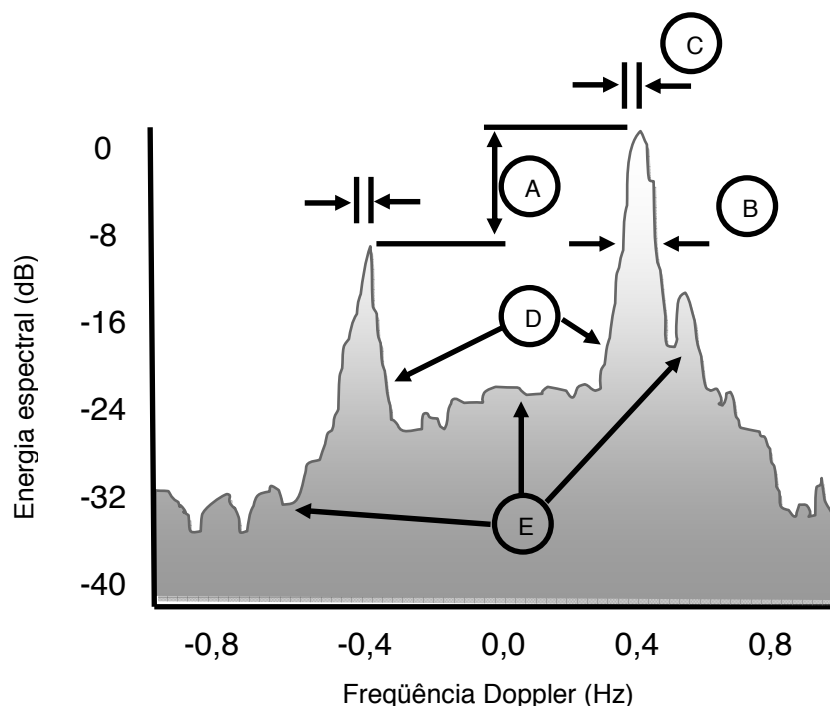


Figura 10 – Parâmetros ar-mar estimados a partir do espectro de um radar de HF (adaptado de Shearman, 1981).

Uma vez que as ondas ficam maiores que 1,7 cm, em comprimento, a gravidade se torna sua força restauradora. A presença destas ondas mais longas aumenta a transferência do impulso do ar para o mar de forma que cada vez mais ondas de gravidade progressivamente sejam produzidas. Além disso, processos não lineares permitem a troca de impulso entre ondas de comprimentos diferentes. Para um determinado impulso de velocidade de vento a transferência ocorre a todas as ondas com velocidade de fase até a velocidade do vento desde que não exista nenhum mecanismo para forçar o mar além da velocidade de vento.

Eventualmente, o equilíbrio é alcançado quando a amplitude das ondas de gravidade de cada comprimento de onda se mantém constante, então é dito que um mar completamente desenvolvido existe.

Considerando que ondas de gravidade são dispersivas em propagação de águas profundas, ondas de diferentes comprimentos de onda viajam a velocidades diferentes e assim têm frequências diferentes. A velocidade de fase de uma onda de gravidade pode ser determinada através da seguinte aproximação para águas profundas:

$$C_w = \sqrt{\frac{gL}{2\pi}} = f_w L \quad [4]$$

onde C_w é velocidade de fase da onda de gravidade, g é a aceleração da gravidade, f , é a frequência de onda e L é o comprimento de onda.

Devido a característica dispersiva das ondas, uma gama infinita de frequências que se estendem deste de capilares até a máxima permitida para uma determinada velocidade de vento, produz um espectro de velocidades de fase e energia de onda. Embora as ondas se propaguem predominantemente na direção em que o vento forçar, existe um espalhamento da energia de onda em todas as direções da mesma

forma como a maneira a qual as ondas se propagam em todas as direções quando uma pedra é lançada na água. As ondulações favorecem a direção da qual a pedra foi lançada, mas ondas menos dominantes se movimentam em todas as outras direções. A distribuição de energia de onda por unidade de área, a qual é dependente da frequência de onda, velocidade e direção do vento, pode ser expressa por:

$$(Energia\ de\ Onda)\ m^{-2} = \rho g \int S(f_w, \theta, u) df_w d\theta \quad \text{joules}\ m^{-2} \quad [5]$$

onde ρ é a densidade de água, u é a velocidade de vento e θ é o ângulo entre a direção de propagação de uma componente da onda particular e a direção de referência, normalmente a direção do vento médio (Shearman, 1981). A variância do espectro de onda altura de onda direcional $S(f_w, \theta, u)$ tem dimensões $m^2\ Hz^{-1}\ rad^{-1}$ e tem dependência temporal implicada com a velocidade de vento. O espectro pode ser fatorado em expressões temporais e direcionais:

$$S(f_w, \theta, u) = S_0(f_w, u)G(\theta, u) \quad [6]$$

onde $G(\theta, u)$ é adimensional ($\int G(\theta, u) d\theta = 1$). A amplitude da componente relacionada ao espalhamento *Bragg* do espectro direcional calculado no tempo é expresso no pico de primeira ordem do sinal que retorna ao radar (Hasselmann, 1971), e assim contém a direção de vento derivada do radar.

A determinação tradicional deste fator direcional é difícil. Medições podem se feitas por fotografia estereográfica por aeronave ou uma bóia de tilt de onda que contém uma bússola como uma referência direcional (Shearman, 1981). Porém, desde que o sinal do radar de *HF* recebido é proporcional à energia de onda que se move radialmente para longe ou para perto da antena de recepção do radar, a equação [5] fornece a medida de $G(\theta, u)$, dado o *equilíbrio dinâmico*, o mar completamente desenvolvido existe ($S_0(f_w, u)$ é constante). Se um modelo que relaciona o fator

direcional e o ângulo de referência, θ (o ângulo do vento relativo à direção de onda observada que é determinado pela direção de visada do radar devido ao espalhamento de *Bragg*), é conhecido, então a direção de vento pode ser determinada. A força restauradora dominante para ondas de até 1,7 cm, em comprimento, é a tensão superficial da água. Se o vento continua o tempo bastante e com pista suficiente, as ondas capilares continuam se organizando e fazendo aumentar a fricção experimentada pelo vento que se move em cima da superfície do mar.

2.2. Medição de vento por radar de alta frequência

Velocidade de vento nem é medida diretamente através de radar de HF nem facilmente discernida do espectro de energia. Ao invés, velocidade de vento é deduzida por uma variedade de modos inclusive a largura dos picos de primeira ordem do espectro *Doppler* (Steward e Barnum, 1975), comparando o conteúdo espectral do pico de segunda ordem com a linha de energia *Bragg* ou relacionando a velocidade de vento à altura de onda significativa calculada pelo eco do radar que retorna (Heron et al., 1985).

O sucesso destas aproximações variou, mas os resultados delas são freqüentemente pobres em condições de baixa velocidade de vento ou regiões de pista limitada. Como uma aproximação alternativa, a capacidade sem igual do radar de HF para medir as ondas do mar através da ressonância de *Bragg*, habilita a medição de correntes próximas a superfície (a profundidade efetiva da corrente de cada onda ressonante pode ser estimada, como modelado por Ha (1979)).

É esperado que a velocidade de vento sobre a água seja positivamente correlacionada com a corrente oceânica superficial que pode ser medida pelo radar de HF. Ainda que a estratificação do oceano e a compreensão dos mecanismos pelos quais o impulso do radar é transferido pela interface de ar-mar compliquem esta aproximação, há potencial para se medir velocidades de vento mais diretamente em condições de vento variadas.

A direção do vento derivada da medição de radar de HF depende fundamentalmente das condições de vento-mar antes e durante a "iluminação" do radar na superfície do mar. Kinsman (1965) e Shearman (1981) discutem o mecanismo de geração de vento-onda. O fator chave do ponto de vista de radar de HF é a condição conhecida como um mar "completamente desenvolvido." O vento de superfície que se move em cima de um mar tranquilo produzirá inicialmente ondulações pequenas na superfície que é da ordem de alguns centímetros em

comprimento de onda. Radares de alta frequência localizados em terra ou plataformas usam comprimentos de onda curtos (~ 1 cm) sensíveis ao espalhamento de *Bragg* nas ondas oceânicas capilares.

2.3. Medição de corrente por radar de alta frequência

2.3.1. Determinação de Distância

Para medição da distância das ondas que refletem a energia eletromagnética, o SeaSonde® utiliza um pulso periódico (com duração de 5 seg.), tipo dente de serra (em relação à frequência), cujo valor de transmissão varia em 50 kHz, linearmente, a cada ciclo, partindo da frequência original de transmissão do sistema (Figura 11).

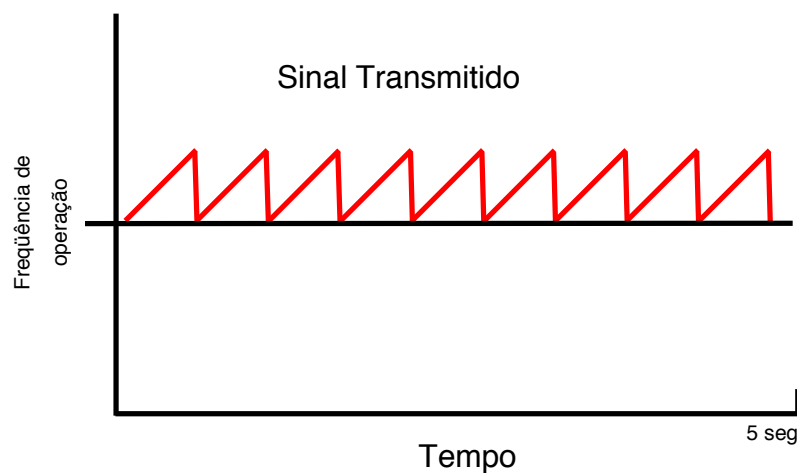


Figura 11 - Pulso transmitido pelo sistema CODAR.

Ao término do ciclo de transmissão o sistema inicia a recepção dos ecos. É de se esperar que o sinal refletido possua a mesma forma do sinal transmitido, defasado no tempo (Figura 12). O *retardo* assinalado nessa figura está associado à distância do alvo e, desta forma, para a determinação de uma distância bastante precisa das ondas, a distância pode ser definida, tantas vezes quanto o número de picos da forma “dente de serra”.

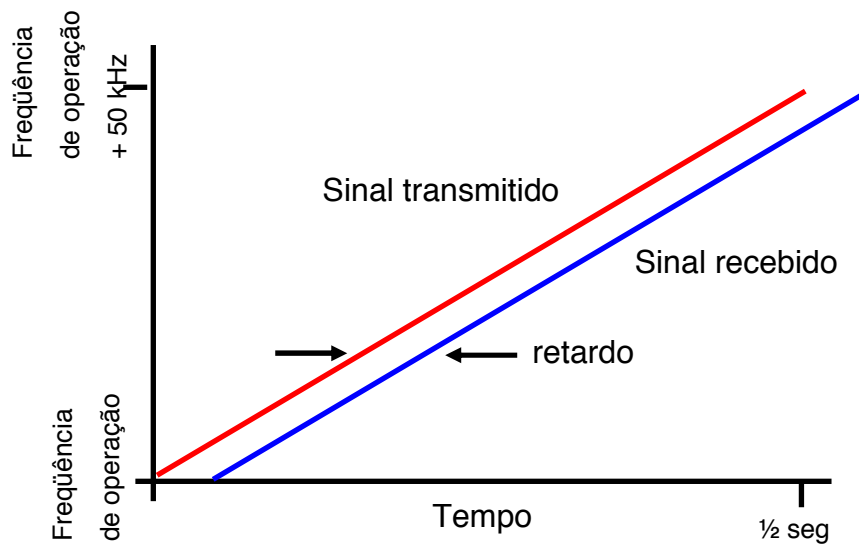


Figura 12 - Forma do sinal transmitido (vermelho) e do sinal recebido (azul).

Cabe ressaltar que, para o processamento dos dados, os sinais recebidos serão “agrupados” em células de distância para as quais serão associados vetores radiais de velocidade de corrente oceânica.

2.3.2. Determinação de Direção

As antenas do SeaSonde® não são direcionais (como as dos radares de navegação), transmitindo omnidirecionalmente. A determinação da direção dos ecos recebidos é obtida por meio da utilização de dois *loops* de antenas dispostos em planos perpendiculares (Figura 13) à semelhança de um radiogoniômetro. O sinal de saída de cada *loop* será proporcional à direção relativa entre o plano da antena e a direção do alvo. A partir dos padrões angulares conhecidos de cada uma e de um complexo algoritmo de posicionamento, chamado *MUSIC (Multiple Signal Classification)*, o ângulo é calculado. A obtenção do ângulo é o aspecto que mais varia de um radar *HF* para outro.

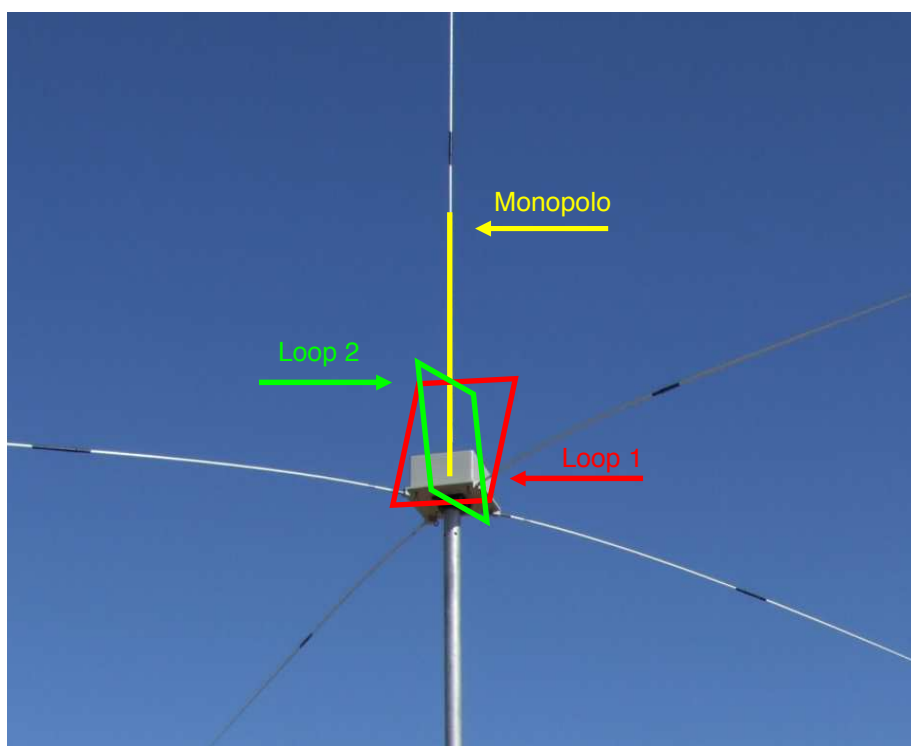


Figura 13 - O CODAR utiliza três antenas de recepção: um monopolo, e dois loops dispostos em planos perpendiculares.

Segundo Schmidt (1986) o termo *MUltiple Signal Classification* (MUSIC) é usado para descrever técnicas experimentais e teóricas envolvidas em determinar os parâmetros de múltiplas frentes de ondas que chegam a uma de antena radar. O problema geral considera antenas com locais arbitrários e características direcionais arbitrárias (ganho, fase e polarização) em um ambiente de ruído/interferência de matriz de covariação arbitrária. O MUSIC pode ser implementado como um algoritmo para prover estimativas assintoticamente imparciais de:

- 1) número de sinais;
- 2) direções de chegada (Directions Of Arrival - DOA);
- 3) energia e correlações cruzadas entre ondas direcionais;
- 4) polarizações;
- 5) intensidade do ruído/interferência.

Estas técnicas são muito gerais e de larga aplicação. Casos especiais do MUSIC são:

- 1) interferometria convencional;
- 2) localização da direção por mono-pulso, ex: usando um *array* de antenas;
- 3) estimação de frequência múltipla.

Na Figura 14 podem ser observados oito exemplos de sinal recebido em casos em que a corrente se desloca aproximando-se, deslocando-se perpendicularmente, afastando-se e deslocando-se perpendicularmente ao do sentido de observação do radar.

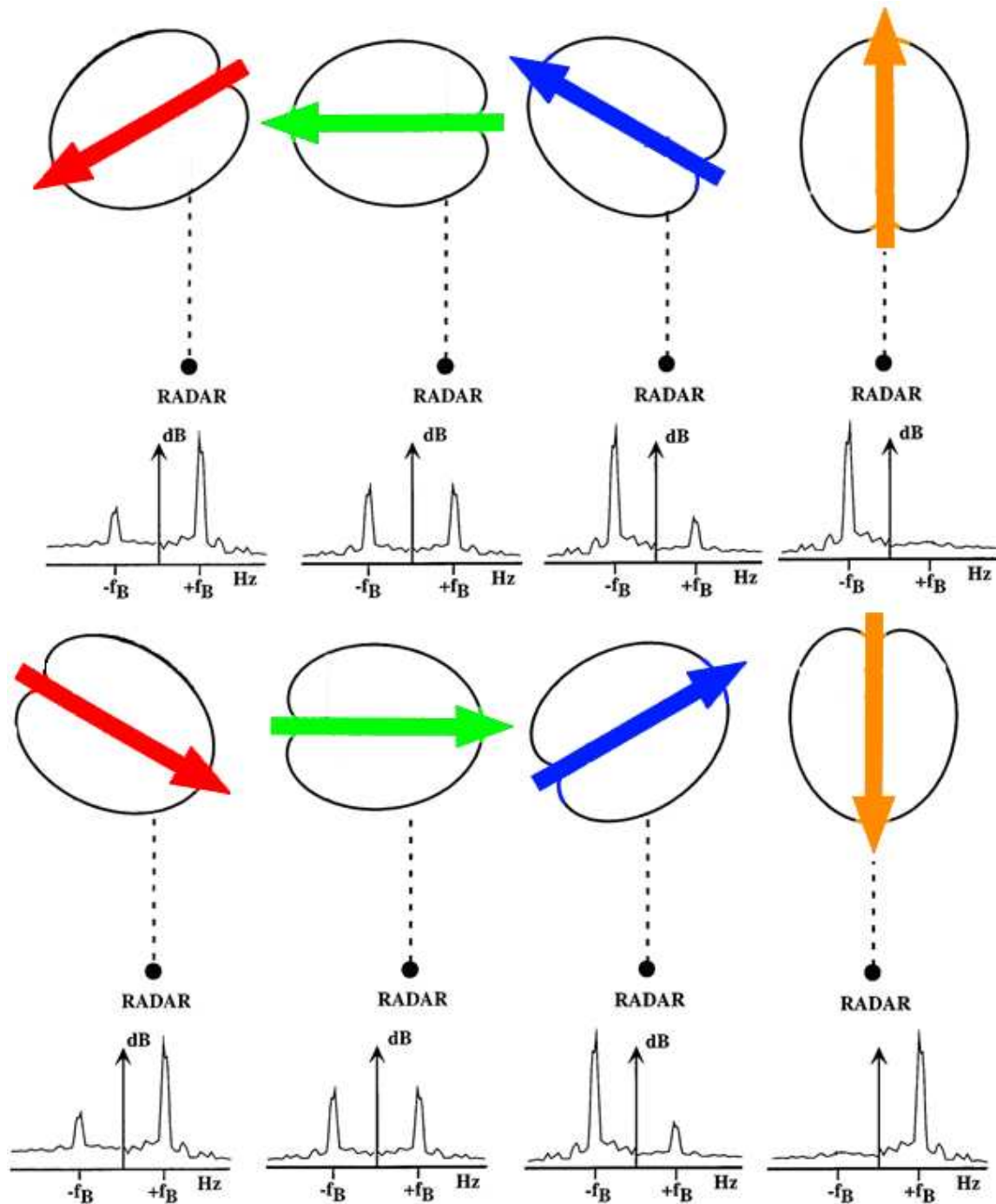


Figura 14 – Exemplo de sinal recebido em casos nos quais em que a corrente se desloca aproximando-se (vermelho), deslocando-se perpendicularmente (verde), afastando-se (azul) e deslocando-se perpendicularmente (laranja) ao do sentido de observação do radar. (adaptado de Fernandez et al. 1997).

2.3.3. Determinação de Velocidade por Efeito Doppler

Para determinação da velocidade da onda o CODAR utiliza o Efeito Doppler observado no sinal recebido. O Efeito *Doppler* é uma variação, na frequência original de um sinal, percebida por um observador que possui movimento relativo em relação ao transmissor.

O Efeito *Doppler* pode ser explicado da seguinte maneira: se uma torneira pinga uma gota d'água por segundo, por exemplo, e um observador mantém a mão parada abaixo da torneira, as gotas cairão na sua mão a uma frequência de 1 gota/seg. Se, ao contrário, o observador coloca sua mão em movimento aproximando-se da torneira, as gotas cairão na sua mão a uma frequência maior (ou seja, mais de uma gota por segundo). Da mesma forma, se o observador movimentar sua mão afastando-se da torneira, a frequência diminuirá. A variação na frequência "recebida" será proporcional à velocidade relativa entre transmissor (a torneira) e receptor (a mão do observador, no nosso exemplo). A essa variação na frequência recebida, denomina-se Efeito *Doppler*.

Como tal variação na frequência pode ser medida pelos receptores do sistema CODAR, essa é a maneira pela qual o sistema determina a velocidade das ondas. Isto é possível por que o transmissor emite o sinal, na banda de 4,7 MHz, que reflete na água e retorna ao receptor. A quantidade de energia que chega ao receptor (*backscattering*) é proporcional à rugosidade da superfície do mar. Quanto mais rugoso o mar, mais energia reflete na direção do receptor. Os picos de intensidade do sinal de retorno são causados essencialmente pela "Ressonância de *Bragg*". O resultado desta interação é a ressonância, provocando picos de intensidade no sinal de retorno. Como estas ondas capilares estão em movimento, com uma componente na direção do sensor, ocorre o efeito *Doppler*, modificando a frequência do sinal. A diferença de frequência, entre o sinal emitido pelo transmissor e o recebido pelo sensor, é proporcional à velocidade da água do mar.

2.3.4. Cálculo das Intensidades Radiais da Corrente Marinha

No tópico acima vimos que o sistema CODAR é capaz de medir a velocidade das ondas de gravidade que se propagam numa determinada região.

Especialmente, há um comprimento de onda específico (metade do comprimento de onda da emissão eletromagnética) que será capaz de refletir a energia eletromagnética incidente de forma ressonante e, portanto, com grande eficiência, no fenômeno denominado “Ressonância *Bragg*”. Para sistemas de 4,7 MHz (*Long-Range*) tais ondas têm, tipicamente, períodos da ordem de 4 (quatro) segundos. Ora, ocorre que essa velocidade de propagação das ondas do mar (nesse caso denominada celeridade) é conhecida pela teoria linear de ondas, sendo função, principalmente, do seu período (no caso de ondas em águas profundas).

Assim sendo, considerando conhecida a celeridade das ondas que estão refletindo o sinal irradiado, o desvio *Doppler* do sinal recebido pode ser estimado. A diferença entre o desvio *Doppler* estimado e o realmente medido pelo sistema, cuja intensidade estará se somando (ou diminuindo) ao valor da celeridade da onda, é a parcela correspondente à corrente superficial marinha. Este valor leva em conta, além do fluxo principal de corrente, forçantes como a maré e o vento (corrente de *Ekman*). Em termos quantitativos, o efeito da Ressonância *Bragg* resulta em dois picos discretos no espectro *Doppler* (Figura 14). Na ausência de corrente superficial, os picos espectrais são simétricos e suas frequências (σ) diferem do sinal original por um valor proporcional a

$$2C_w\lambda^{-1} \quad [7]$$

onde C_w representa a velocidade de fase da onda superficial, e o λ é o comprimento de onda do sinal radar.

Se houver a presença da corrente superficial, ocorre uma diferença entre os picos correspondente a

$$\Delta\sigma = 2V_{\sigma}\lambda^{-1} \quad [8]$$

onde V_{σ} é a componente radial da corrente na direção do radar.

A resolução varia entre 2 e 5 cm/s, uma acurácia melhor que 10 cm/s. Os dados de velocidade radial de cada célula de resolução são armazenados em coordenadas polares, ou seja, cada valor medido está associado a uma distância e a um ângulo em relação ao radar.

A partir daí, o sistema será capaz de compor o gráfico com as componentes radiais de cada estação e, utilizando ao menos 2 estações, o gráfico com os vetores de velocidade de corrente superficial.

2.4. Medição de onda por radar de alta frequência

Métodos para derivar o espectro de onda direcional de um radar de feixe estreito eram desenvolvidos por Lipa e Barrick nos anos setenta e estendeu consideravelmente desde então por Wyatt (1987-1996), Howell e Walsh (1993), Hisaki (1996), Hashimoto et al. (2003).

O SeaSonde provê medições robustas de correntes de superfície do oceano que são obtidas dos picos de primeira ordem dominantes no espectro do eco do radar. Porém a derivação de informação de onda do espectro de radar de segunda ordem é mais delicada, em parte porque o espectro de segunda ordem tem baixa energia e está próximo ao ruído de fundo barulho, podendo assim ser um dado contaminado. Além disso, para as condições de onda altas, de maior interesse, o espectro de radar satura quando a altura de onda exceder um limite definido por o radar transmite frequência. Sobre esta altura de onda limite, o espectro do radar perde sua forma definitiva e as expansões de perturbação nas quais as equações de Barrick são fundamentadas não convergem. No momento tais espectros de radar não são amenos a análise. Este efeito de saturação é comum a todos os sistemas de radar de alta frequência. Quando o espectro do radar é saturado, o eco de primeira ordem se funde com o eco de segunda e terceira ordem. Este espalhamento do espectro *Doppler* foi demonstrado, por exemplo, por Wyatt (1995). Quando os métodos normais de interpretação são aplicados aos espectros saturados, a altura de onda pode ser subestimada como demonstrado por Lipa & Barrick (1982) e predito teoricamente por Hisaki (1999).

O limite de saturação da altura significativa de onda é definido aproximadamente pela relação:

$$H_s = \frac{2}{k_0} \quad [9]$$

onde k_0 é o número de onda do radar.

Para um SeaSonde® *Long-Range*, o valor do Hs é 20 metros, enquanto para um SeaSonde® padrão (transmite a uma frequência de 13 MHz), o valor do Hs é 7,4 m. Logo, a observação de ondas extremamente elevadas com um SeaSonde® requer o uso do sistema de longo alcance (*Long-Range*).

Podem ser descritos dois métodos para o cálculo de ondas com o sistema SeaSonde®. O primeiro, de inversão integral, fornece informação detalhada da onda sob uma quantidade um tanto restrita de circunstâncias. O segundo envolve ajustar um modelo de espectro de onda do oceano aos dados do radar para dar estimativas da altura significativa, do período de pico e da direção. O software operacional do sistema SeaSonde® é baseado no segundo método, porque pode ser aplicado sob um grande números de circunstâncias.

Supondo que as ondas que produzem os picos do espectro de segunda ordem não interagem com o fundo oceânico, ou seja, são ondas de águas profundas. Para isto então a profundidade da água sobre a maior parte da área iluminada pelo radar obedece a seguinte condição (Lipa & Nyden, 2006):

$$2\pi d/L > 0,8 \quad [10]$$

onde d é a uma profundidade da água e L é o comprimento de onda dominante.

Barrick (1972a) mostrou que a seção transversal do pico de primeira ordem do radar na frequência ω e na direção φ é definido, em termos do espectro da onda oceânica no número de onda de *Bragg* como na relação:

$$\sigma^1(\omega, \varphi) = k_0^4 \sum_{m'=\pm 1} s\left(2k_0, \varphi + (m'+1)\frac{\pi}{2}\right) \delta(\omega - m' \omega_B) \quad [11]$$

onde k_0 é o número de onda do radar, $S(k, \varphi)$ é o espectro direcional da onda oceânica para o número de onda k e a direção φ e ω_B é a frequência de Bragg dada por $\sqrt{2gk_0}$, onde g é a constante gravitacional.

Barrick (1972b) mostrou que a seção transversal do pico de segunda ordem do radar como sendo:

$$\sigma^2(\omega, \varphi) = k_0^4 \sum_{m, m' = \pm 1} \int_0^{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |\Gamma|^2 S(k, \theta + \varphi + m\pi) S(k', \theta' + \varphi + m'\pi) \delta(\omega - mgk - m'\sqrt{gk'}) k dk d\theta \quad [12]$$

onde Γ é o coeficiente de acoplamento do radar, o qual é a soma incoerente dos termos hidrodinâmicos e eletromagnéticos e k, k' são os números de onda de duas ondas oceânicas dispersantes. Os valores de m e de m' em [9] definem as quatro combinações possíveis de direção das duas ondas dispersantes e também as quatro bandas laterais que cercam os picos de primeira ordem (Lipa & Barrick, 1982b).

Os dois vetores das ondas oceânicas obedecem a seguinte condição:

$$\tilde{k} + \tilde{k}' = -2\tilde{k}_0 \quad [13]$$

Lipa e Barrick (1983) descrevem a extensão da teoria para se aplicar a um sistema de banda larga como o SeaSonde®, assumindo padrões de irradiação de antenas. Do espectro cruzado da voltagem da antena, pode-se formar como um produto de dados intermediários, cinco coeficientes angulares de *Fourier* do sinal que retorna da área iluminada pelo radar. Estes coeficientes, $b_n^{1,2}(\omega)$ são definidos em termos da seção transversal do pico de primeira e segunda ordem do radar através da relação:

$$b_n^{1,2}(\omega) = \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} \sigma^{1,2}(\omega, \varphi) f_n(\varphi) d\varphi \quad [14]$$

onde a integração é feita sobre o ângulo em torno da célula de alcance do radar entre os ângulos da linha de costa definidos por γ_1 e γ_2 e os subscritos (1 e 2) referem-se aos picos de primeira e segunda ordem respectivamente. Os cinco coeficientes de *Fourier* são designados aqui pelo índice $n = -2, -1, 0, 1, 2$, e a seguinte notação de Lipa e Barrick (1986) sobre a função trigonométrica $tf_n(\varphi)$ dada por:

$$\begin{aligned} tf_n(\varphi) &= \text{sen}(-n\varphi) \quad n < 0 \\ &= \text{cos}(n\varphi) \quad n \geq 0 \end{aligned} \quad [15]$$

Assume-se o que o espectro de onda do mar é homogêneo na célula de alcance do radar, região onde a superfície do mar é iluminada pelo radar usada para a análise. Por causa desta suposição, é melhor que se use a célula mais próxima do radar para se analisar ondas captadas neste sistema. Perto da costa, não há pista insuficiente para gerar ondas de longo-período, uma suposição foi feita, então, que ondas de período maior do que 6 segundos chegam de um setor de 180° define o oceano aberto. Para ondas mais curtas e quando se está operando em plataformas ou uma ilha, nenhuma restrição foi colocada na direção de onda. Consideram-se, então, somente condições de água profundas e ignora-se a refração de onda.

Para se calcular o espectro direcional da onda oceânica, dois espectros de onda de modelo $S(k, \phi)$ são usados:

i. Séries de *Fourier*

Este modelo define o espectro de oceano como a soma dos primeiros cinco termos de uma série de *Fourier* sobre a direção:

$$S(k, \phi) = \sum_{n=-2}^2 c_n(k) t f_n(\varphi) \quad [16]$$

Os coeficientes angulares de *Fourier* $c_n(k)$ são funções reais independentes do número de onda do oceano e produz uma informação similar aquela obtida por uma ondógrafo *pitch-and-roll*. Quando o radar opera na costa, $S(k, \phi)$ é zero para ondas *offshore* de período maior do que 6 segundos.

ii. Modelo de *Pierson - Moskowitz* com distribuição direcional cardióide

O segundo modelo para o espectro oceânico está definido como o produto dos fatores direcionais e não direcionais:

$$S(k, \phi) = z(k) \cos^4 \left(\frac{\phi - \phi^*}{2} \right) \quad [17]$$

O fator direcional na equação acima tem uma distribuição de cardióide ao redor da direção ϕ^* . Para espectro não direcional é usado o modelo de *Pierson-Moskowitz*.

$$z(k) = \frac{A e^{-0,74 \left(\frac{k_c}{k} \right)^2}}{k^4} \quad [18]$$

Com parâmetros k_c e um fator A constante. A altura de onda período centróide e direção podem ser definidos em termos dos parâmetros do modelo. A altura de onda significativa segue do espectro direcional pela relação:

$$h = 4 \sqrt{\left(\int_0^\infty \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} s(k, \alpha) k \, dk \, d\alpha \right)} \quad [19]$$

3. Procedimentos do teste preliminar

No período compreendido entre os dias 15 e 21 de setembro de 2006 foram conduzidos testes de desempenho do sistema SeaSonde® Long Range, da CODAR Ocean Sensors, ao longo da costa do Rio de Janeiro, entre as cidades de Cabo Frio e Campos dos Goytacazes. O objetivo foi se escolher os melhores locais para instalação definitiva do sistema destinado ao monitoramento operacional das correntes oceânicas na área da Bacia de Campos. Os testes foram realizados nos seguintes locais: Farol de São Tomé (local da antiga estação ARGO da PETROBRAS); Barra de São João; Elevado de João Fernandes (Búzios); e Praia do Foguete (Cabo Frio).

No dia 15 chegou-se ao distrito de Farol de São Tomé (em Campos dos Goytacazes), por volta das 17:00 horas, iniciando imediatamente a montagem do sistema. Por ser o primeiro contato da equipe com o sistema, a montagem durou cerca de 2 horas (ao final dos testes o tempo de montagem já era de cerca de 30 minutos). Nessa primeira montagem, foi verificada obstrução em um orifício de uma das antenas de transmissão destinado à passagem do cabo de recepção do sinal, assim sendo apenas uma antena de transmissão foi utilizada, sem prejuízo para a realização dos testes.

O computador de controle da estação remota, o receptor e o transmissor do sistema SeaSonde® Long Range foram alimentados por um gerador à gasolina. O sistema foi operado de dentro da área de carga do caminhão utilizado para o transporte dos equipamentos. O sistema permaneceu funcionando durante toda a noite sem problemas.

Na manhã seguinte, com luz do dia, foi definido o azimute da antena de recepção, com a utilização de bússola e GPS. Isto é feito levando-se em conta a seta que está localizada na parte de baixo da antena (Figura 15).

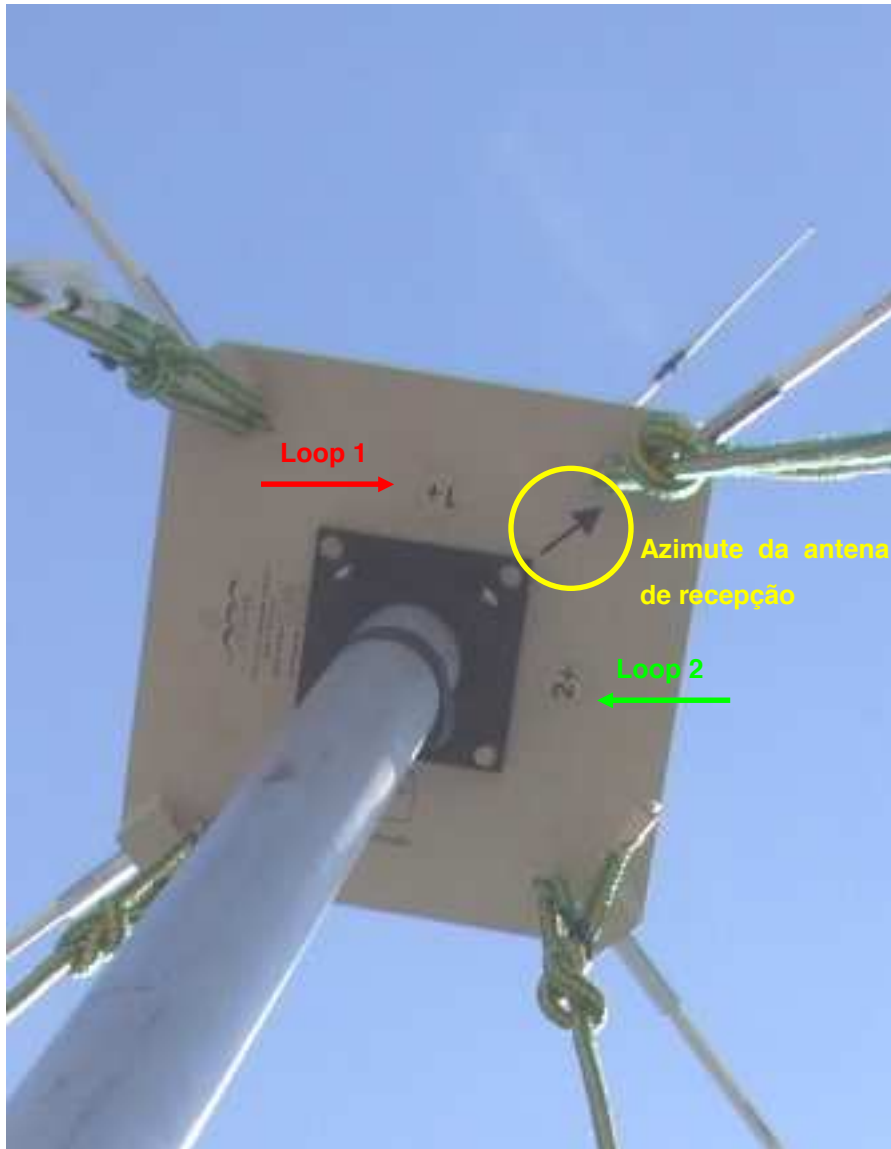


Figura 15 – Azimute da antena de recepção

A seguir o padrão de irradiação das antenas foi medido com a utilização de transponder (Figura 16) e GPS. Como a faixa de areia era suficientemente extensa, o percurso com transponder foi realizado a pé.

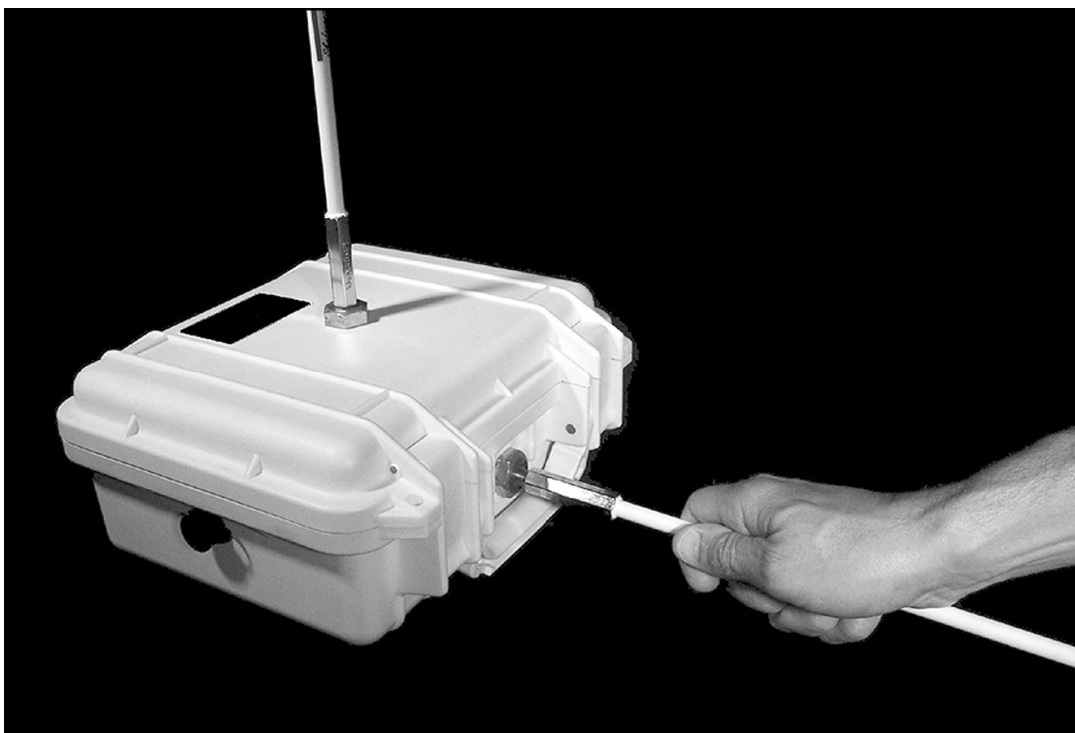


Figura 16 – Transponder

Esses procedimentos são importantes para a configuração do sistema e para o correto processamento dos dados coletados a fim de que se obtenham valores corretos da corrente oceânica medida. Com os dados coletados na “corrida” com o transponder, erros angulares inerentes ao local de instalação do sistema podem ser corrigidos a partir dos dados efetivamente medidos.

Por ocasião da desmobilização da estação, diversas peças do sistema não foram totalmente desmontadas, considerando-se que seriam novamente instaladas nas demais estações de teste. O estaiamento das antenas, feito com cabo de polipropileno de 1/2 pol. e com a utilização de estacas confeccionadas com cantoneiras de 3/16 pol., mostrou-se suficiente. Em locais onde a areia não era muito compacta, a estabilidade das estacas foi garantida por meio da colocação de peças de concreto (na verdade, sobras de meio-fio) de cerca de 30 kg. sobre as cantoneiras.

Ainda no dia 16, a equipe se deslocou para Búzios, visitando, no caminho, a localidade de Unamar, avaliada como desfavorável para a instalação final do sistema pela estreita faixa de areia, pela proximidade de postes de luz e de residências, falta de segurança, entre outros. Por volta das 16:00 horas a equipe chegou ao local de testes no Elevado de João Fernandes, em Búzios. O sistema foi montado e, mais uma vez, funcionou durante toda a noite.

Na manhã do dia 17, tendo em vista a má qualidade dos dados obtidos em Búzios – devido a interferências eletromagnéticas e, principalmente, do relevo – a estação foi desmobilizada sem a realização da “corrida” com transponder. Resolveu-se aproveitar o dia para a realização de testes em Barra de São João.

Em Barra de São João o sistema foi instalado na praia, próximo à Igreja de Barra de São João. Nessa estação os testes foram conduzidos apenas no período diurno, perfazendo um total de cerca de 5 horas de teste. Em função da pequena distância entre as antenas e a água do mar, a corrida do transponder foi realizada com embarcação (Fig. 17).



Figura 17 – Corrida do transponder sendo realizada com embarcação.

A manhã do dia 19 foi utilizada para trabalhos de processamento dos dados, especialmente em relação aos dados coletados durante cada utilização de transponder. O processamento foi realizado no notebook Apple trazido pelo técnico da CODAR. Posteriormente, o mesmo processamento foi repetido, no computador do sistema da Petrobras. Durante a tarde do dia 19, a equipe viajou para Cabo Frio, preparando-se para os testes do dia 20. No final da tarde a equipe visitou a Praia do Però para verificar a viabilidade de montagem de estação de testes no local, o que foi descartado pelo técnico da CODAR.

No dia 20 foram realizados testes na Praia do Foguete, em Cabo Frio. Os testes foram realizados no período diurno, por cerca de 10 horas. Nessa estação, a exemplo do ocorrido em Barra de São João, a aquisição de dados com transponder foi realizada por mar.

4. Dados obtidos

As estações realizadas em Farol de São Tomé, Praia do Foguete e Barra de São João apresentaram um bom desempenho, tendo sido citadas em ordem decrescente de performance. A estação de Búzios foi rejeitada devido à má qualidade dos dados. A melhor combinação de estações, considerando-se o setor e o alcance da cobertura obtida pelo sistema foi obtida com as estações Farol de São Tomé e Praia do Foguete.

A cada 17 minutos de aquisição de dados, o sistema processou os dados para o cálculo de um espectro do sinal. Nas Figuras 18 a 21 pode-se observar os espectros das estações de Búzios, Farol de São Tomé, Barra de São João e Praia do Foguete.

A partir desses espectros, são determinados o efeito Doppler entre a frequência transmitida e recebida, associado às correntes oceânicas. Ao final do processamento cada estação remota gera um mapa de componentes radiais de corrente.

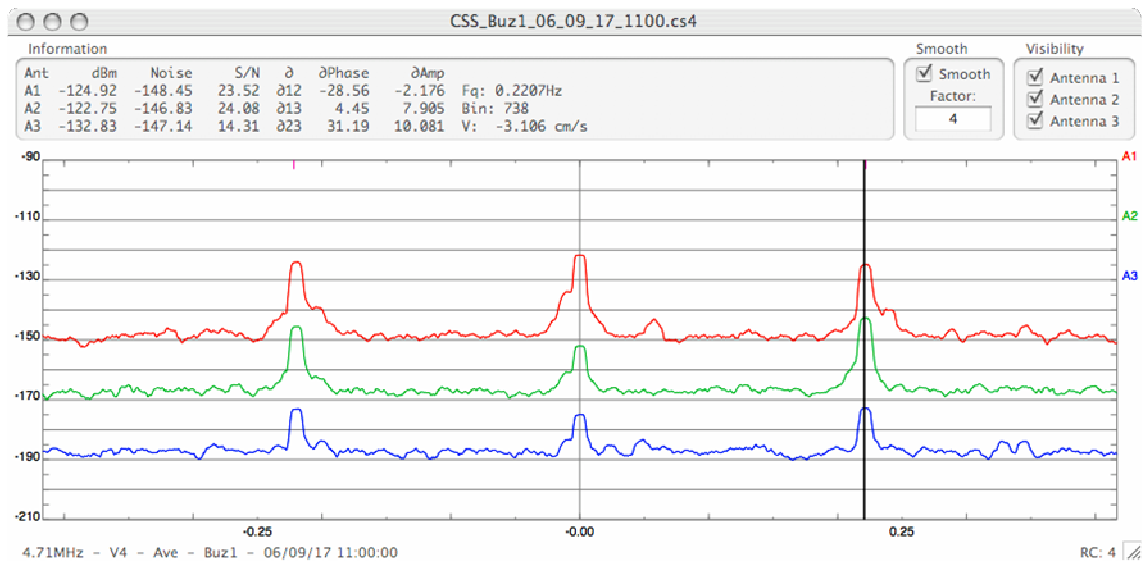
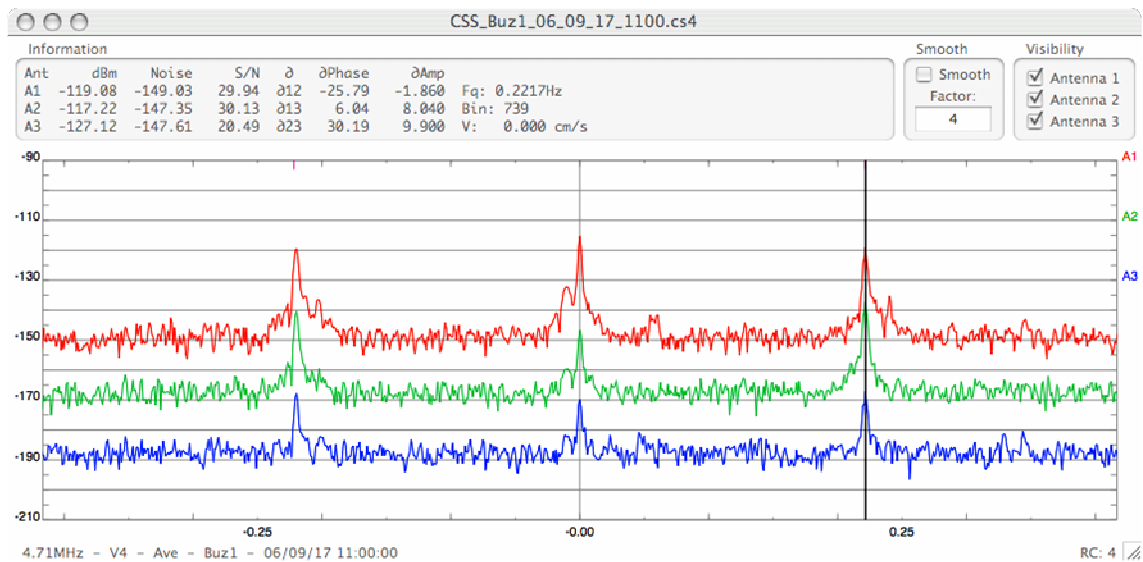


Figura 18 - Exemplo de espectro de frequência coletado durante os testes preliminares na estação de Búzios.

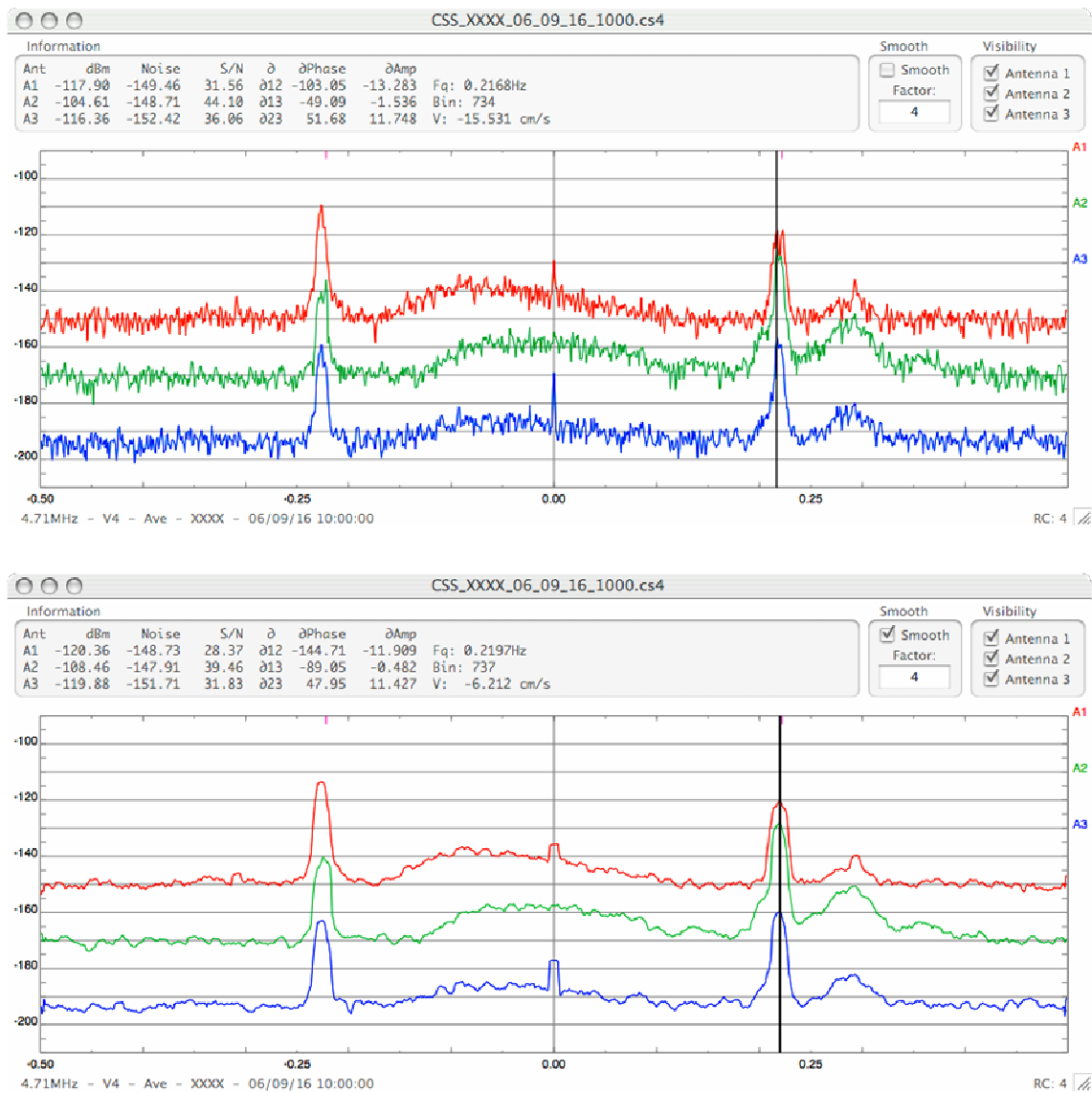


Figura 19 - Exemplo de espectro de frequência coletado durante os testes preliminares na estação de Farol de São Tomé.

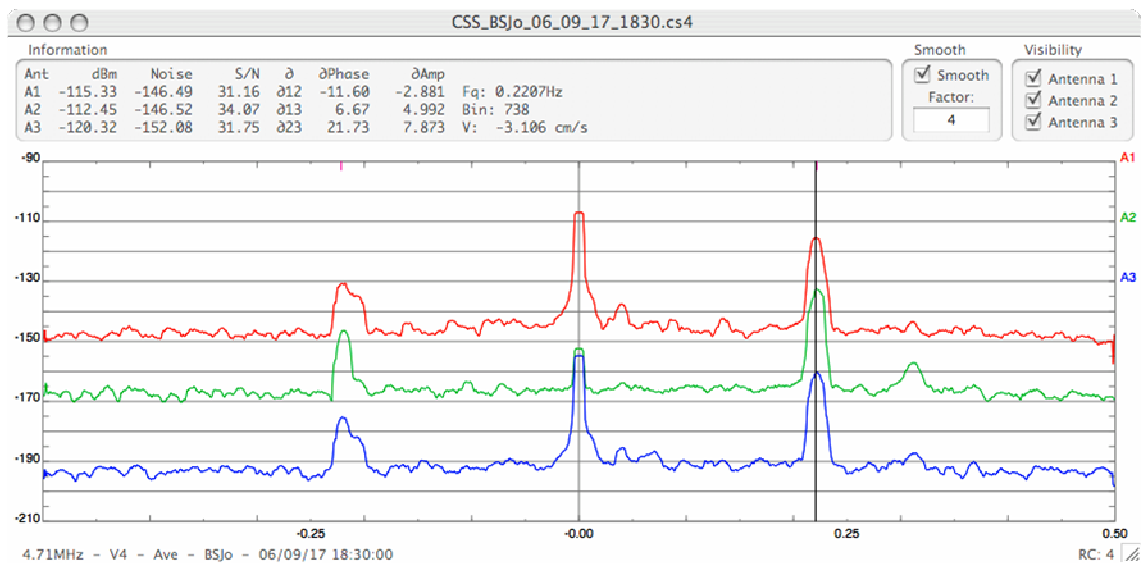
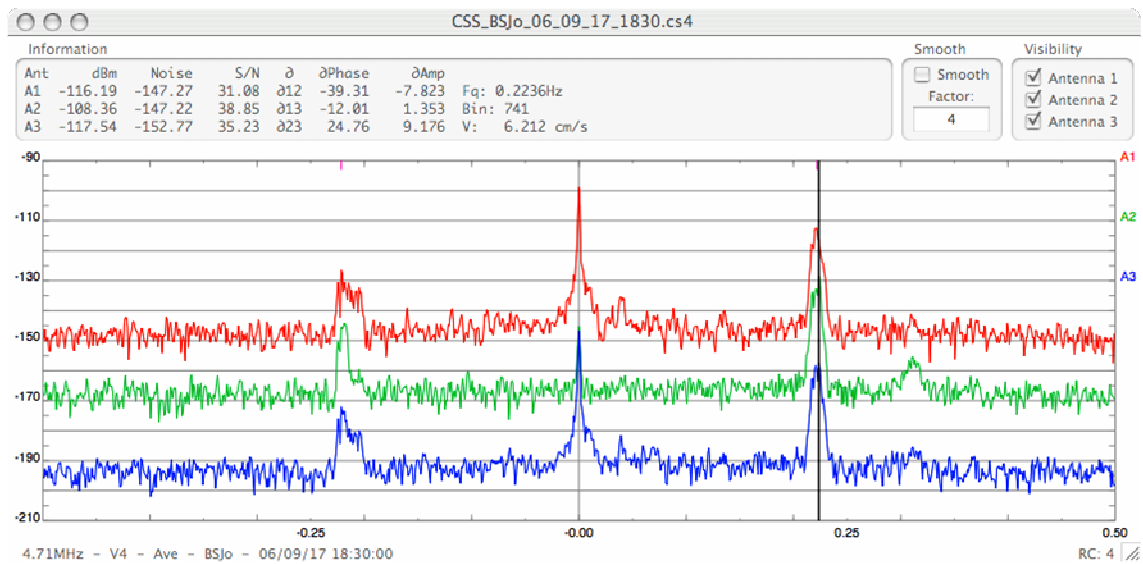


Figura 20 - Exemplo de espectro de frequência coletado durante os testes preliminares na estação de Barra de São João.

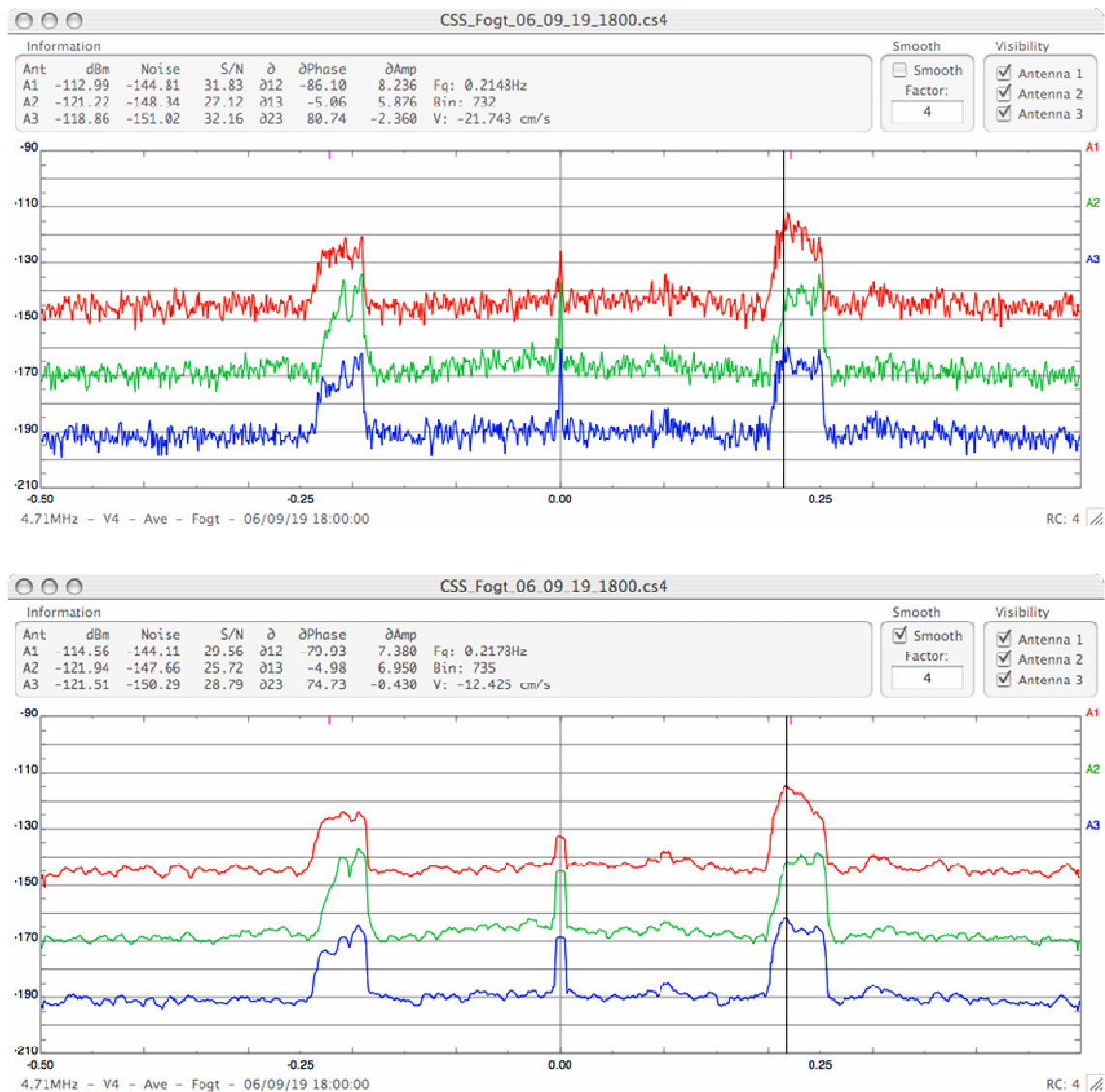


Figura 21 - Exemplo de espectro de frequência coletado durante os testes preliminares na estação da Praia do Foguete.

Esses gráficos foram corrigidos em marcação a partir dos dados coletados com a utilização do transponder. O padrão de irradiação ideal seria composto por círculos, como pode ser visto na Figura 22. O padrão de irradiação do sistema pôde ser coletado nas estações de Farol de São Tomé, Barra de São João e Praia do Foguete. Esta coleta consistiu em circular em torno da antena de transmissão com um *transponder*, aparelho que capta os sinais emitidos pelas antenas do sistema CODAR. Na estação de Búzios, o local onde as antenas estavam instaladas, não

possibilitou tal contorno. Devido a isto, não foi feita a coleta dos dados com o *transponder*. Esta coleta é feita para se atestar a qualidade dos dados e saber se há alguma interferência externa, tanto física, como magnética, à transmissão dos dados; assim sendo, o padrão ideal seria composto por círculos. Estão apresentados nas Figuras 19 a 21 os padrões de irradiação nas estações em que foram coletados.

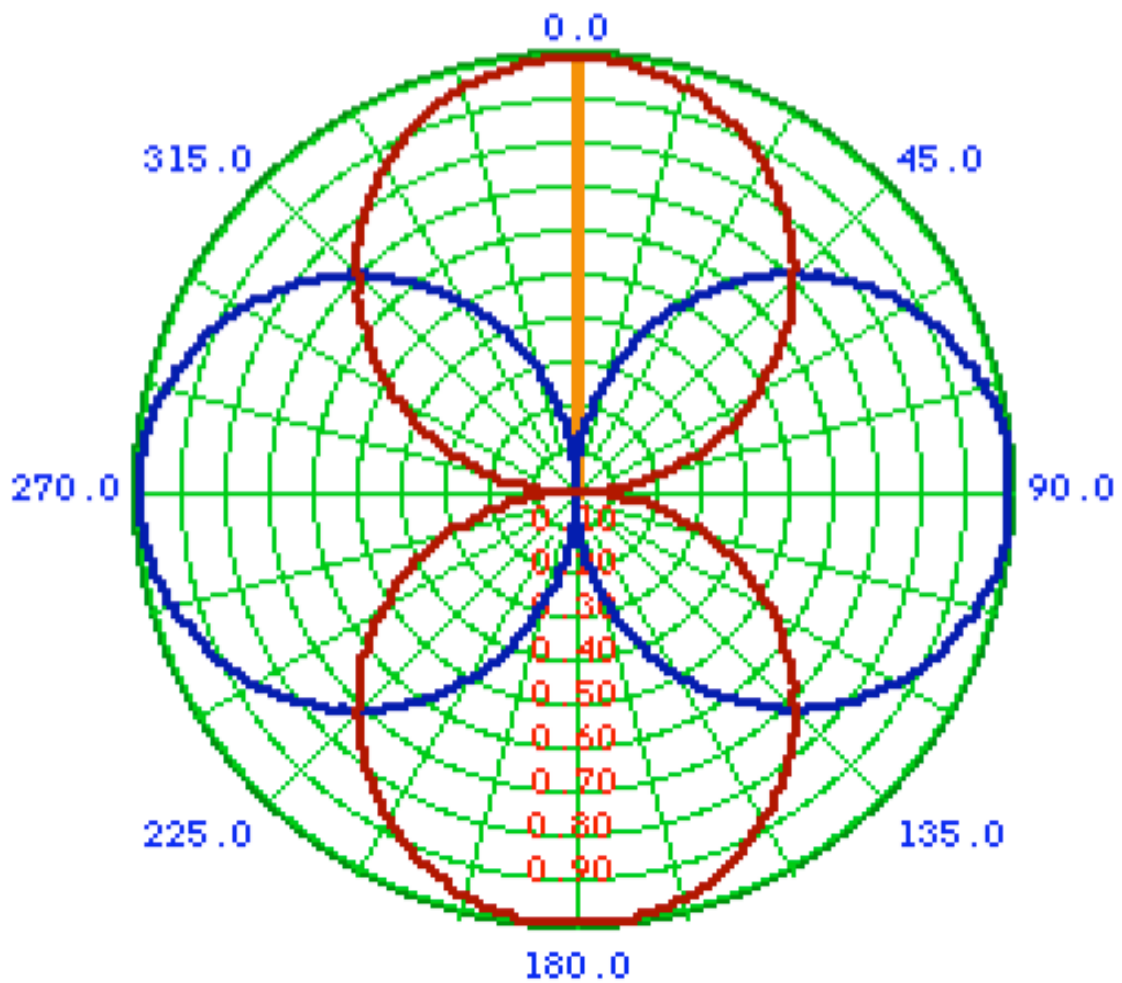


Figura 22 - Padrão de irradiação ideal

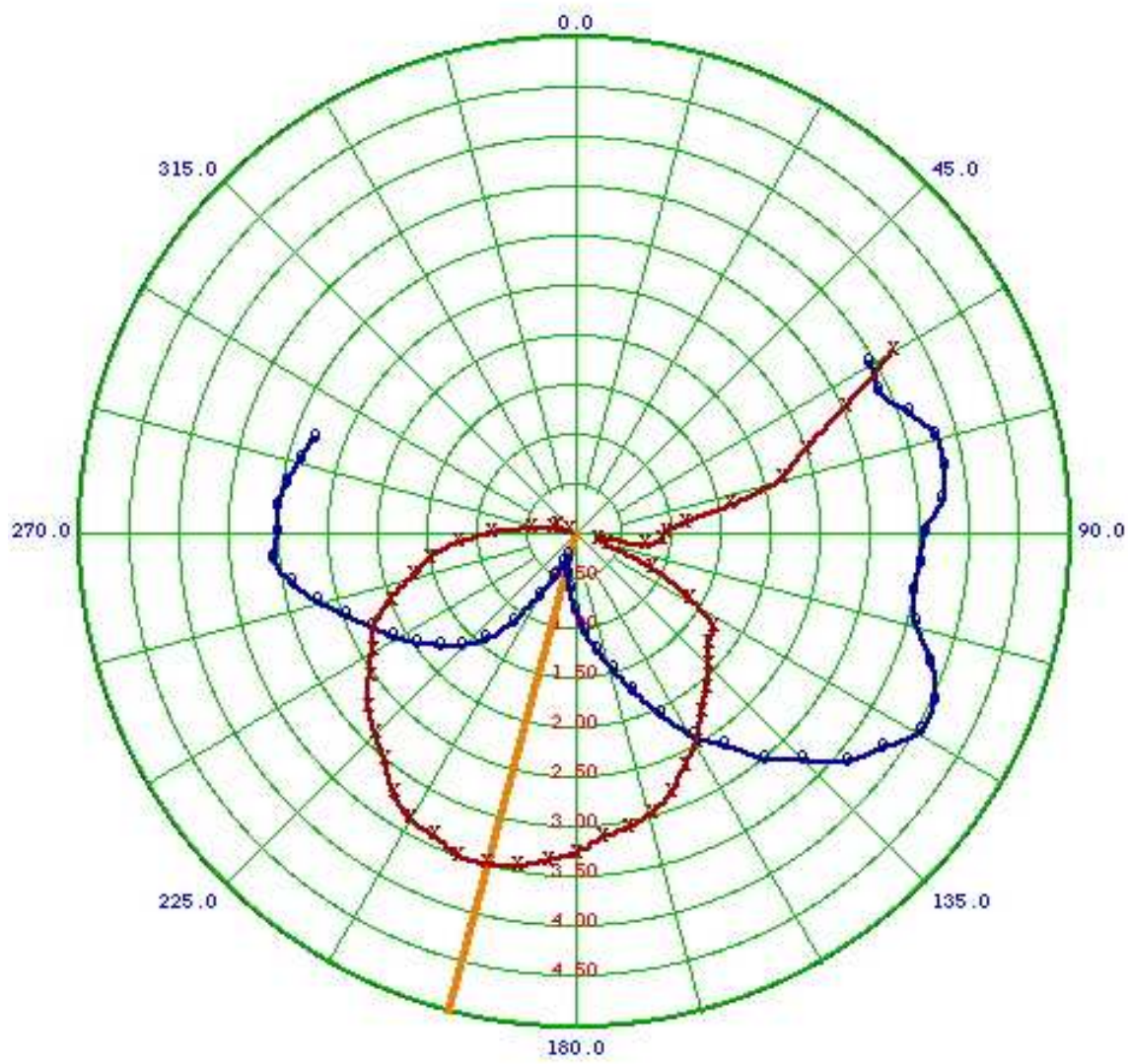


Figura 23 - Padrão de Irradiação da estação de Farol de São Tomé.

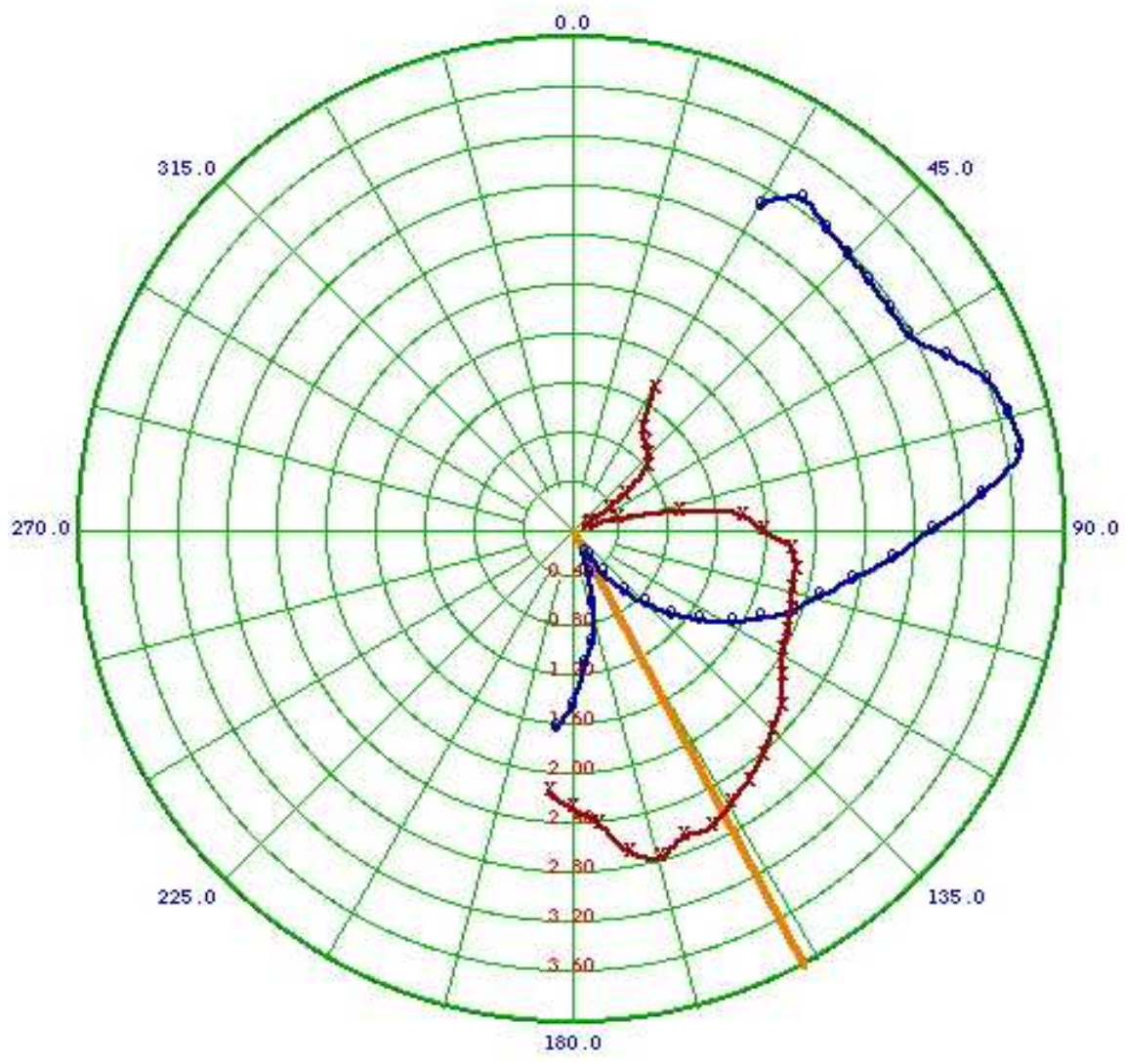


Figura 24 - Padrão de Irradiação da estação de Barra de São João.

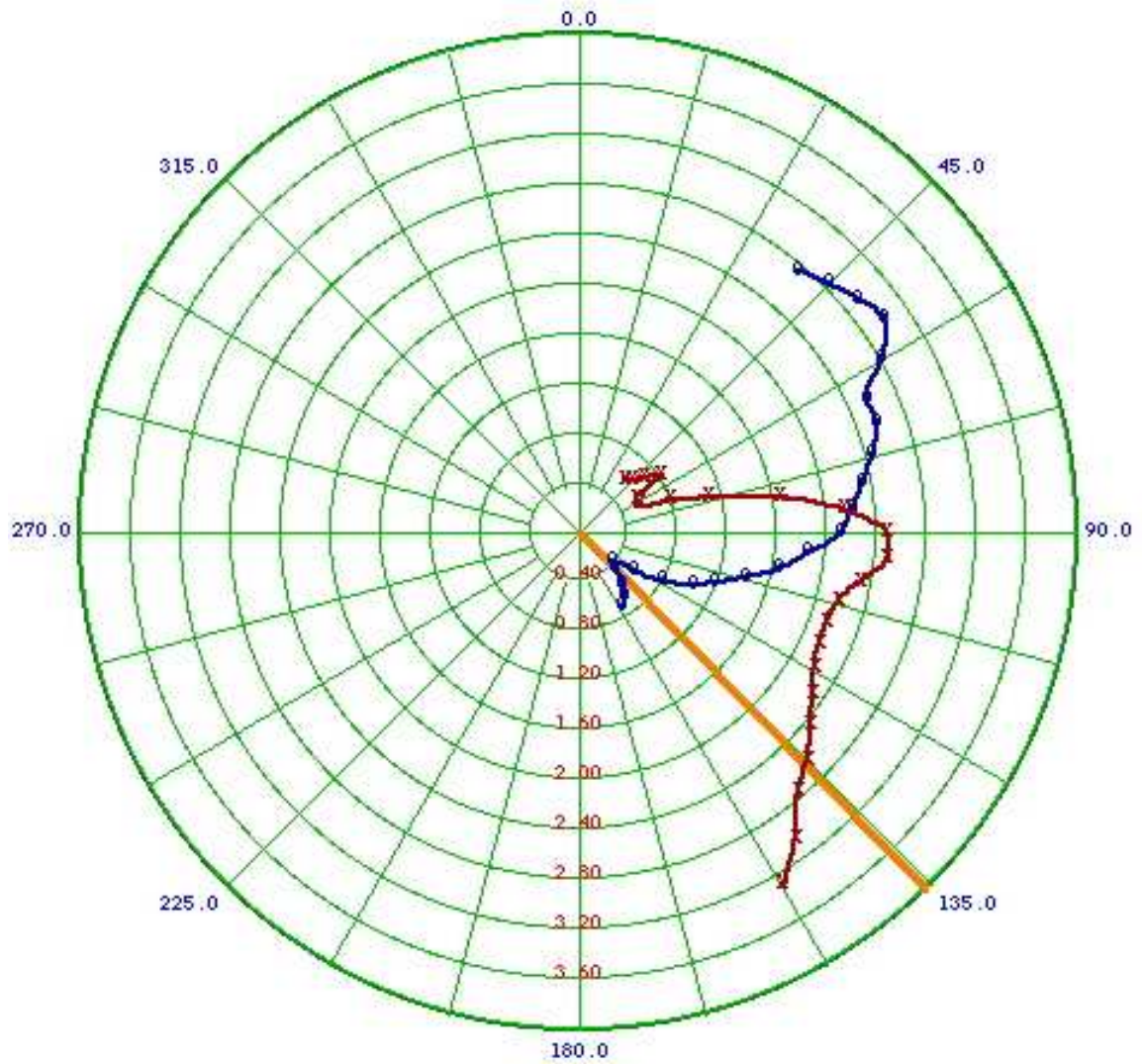


Figura 25 - Padrão de Irradiação da estação da Praia do Foguete.

As Figuras 26 a 39 apresentam as amostras de dados coletados na estação de Búzios. Nestas figuras pode-se observar o curto alcance obtido pelo sistema em todas as radiais coletadas bem como buracos no meio das radiais atestando a má qualidade do dado.

A seguir, nas Figuras 40 a 47 os mapas radiais coletados nas estações Farol de São Tomé são exibidos. Nestas imagens pode-se observar claramente a diferença

de qualidade nos dados obtidos. As radiais são longas e numerosas, alcançando até 220 km de distância do radar.

As radiais obtidas em Barra de São João podem ser observadas nas Figuras 48 e 49. Devido à difícil logística para se instalar a estação final neste local os testes foram realizados em curto período. Os dados provenientes nesta estação foram de boa qualidade, obtendo um médio alcance, com radiais alcançando até aproximadamente 150 km de distancia, pôde-se observar porém alguns buracos nos dados devido à falhas na obtenção dos mesmos provavelmente causada pela presença de rede elétrica próxima ao local de instalação das antenas.

Finalmente, nas Figuras 50 a 54, são visualizadas as radiais obtidas na Praia do Foguete, com dados de boa qualidade

Todas as Figuras das radiais, excetuando-se as radiais da estação de Búzios, mostram dados após a correção do padrão de irradiação do sistema.

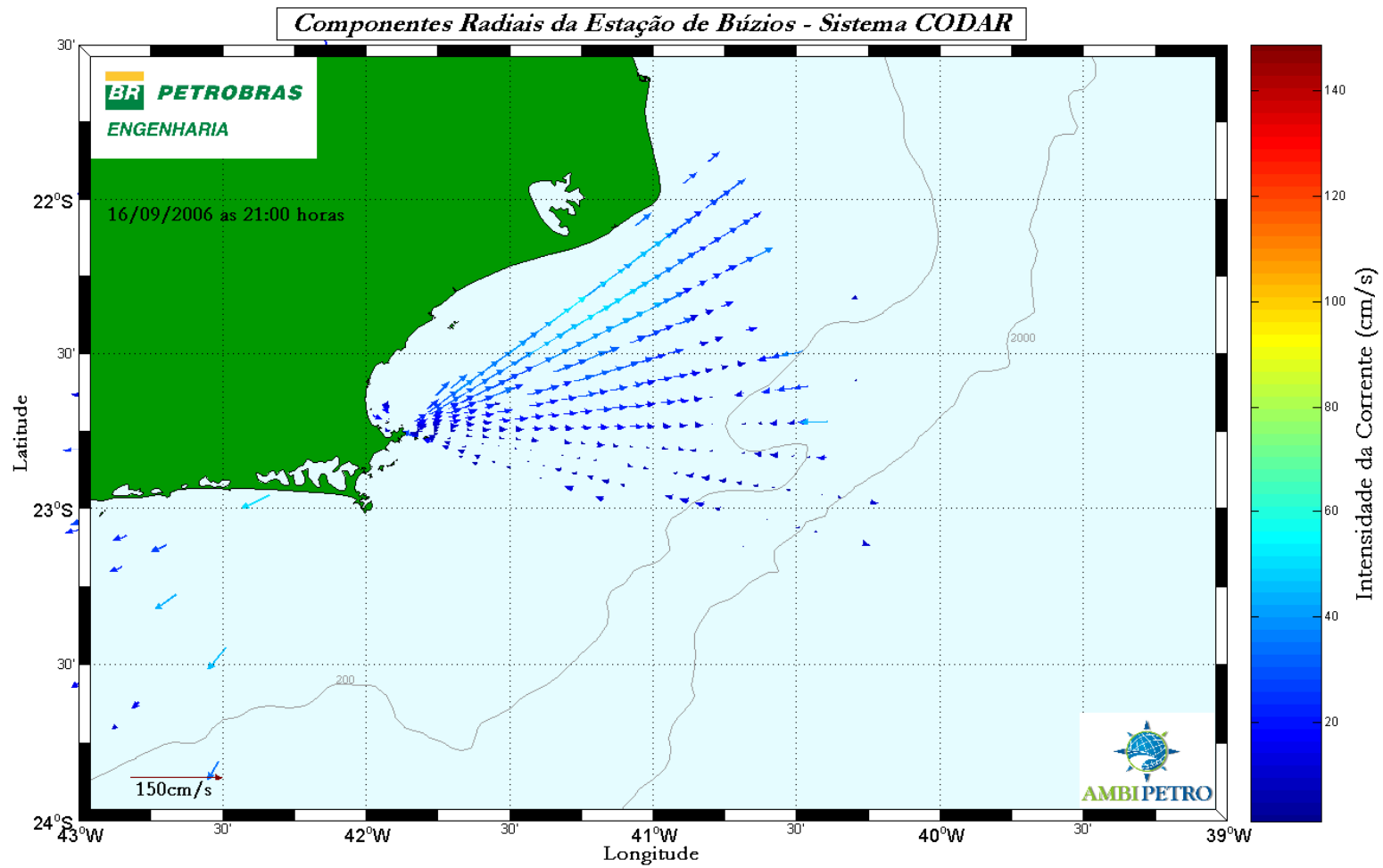


Figura 26 - Mapa Radial da Estação Búzios captado no dia 16/09/2006 às 21h00min.

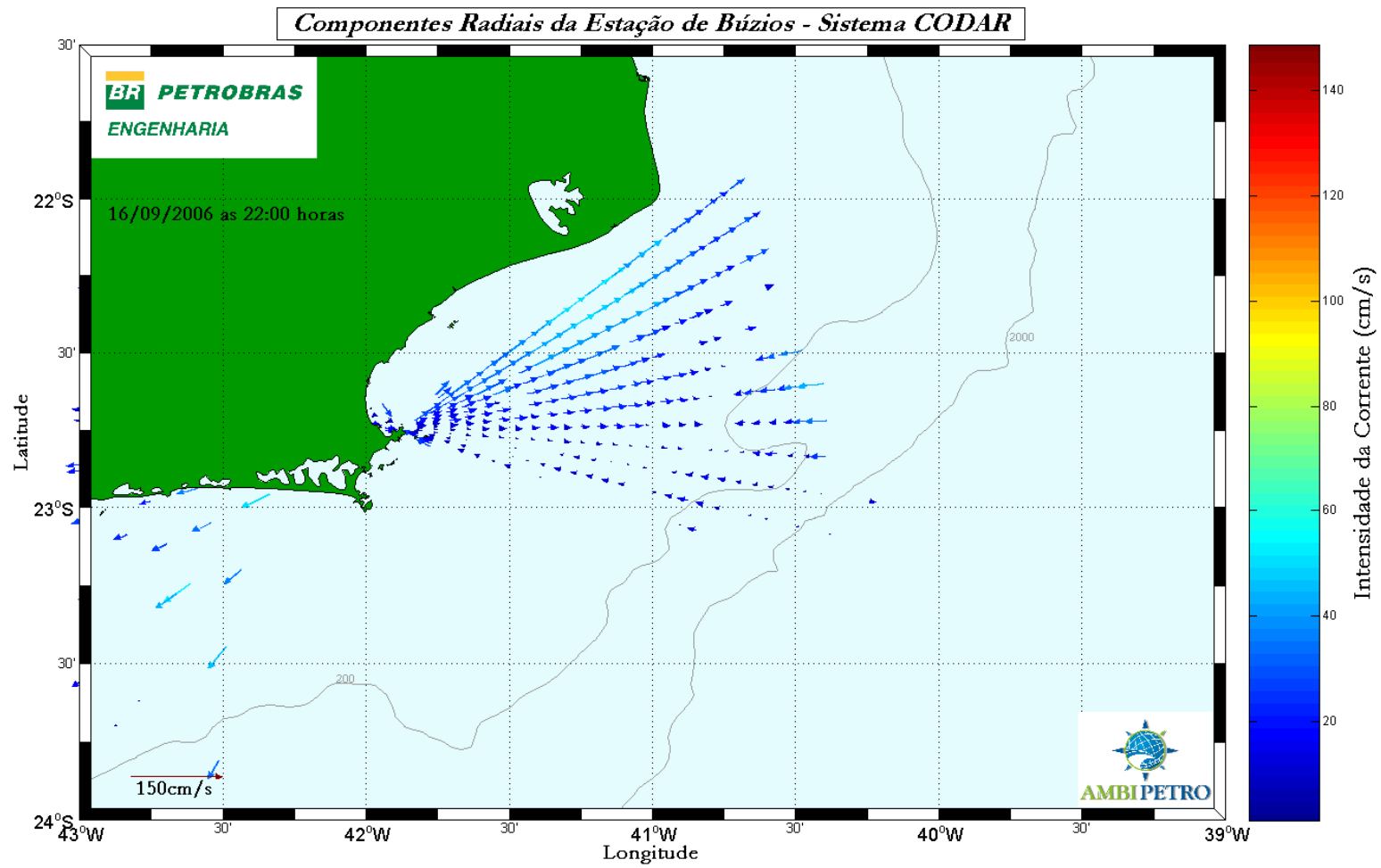


Figura 27 - Mapa Radial da Estação Búzios captado no dia 16/09/2006 às 22h00min.

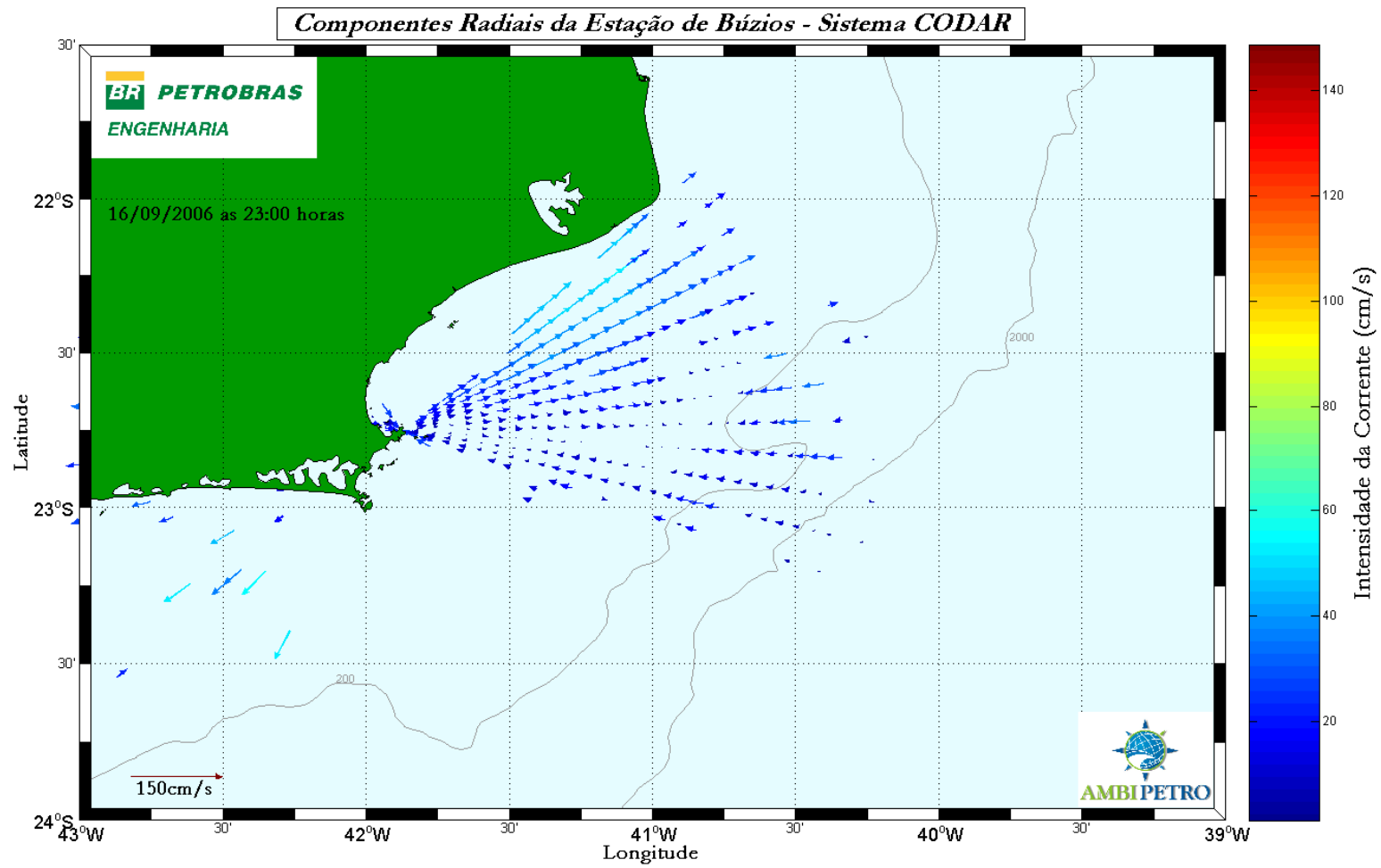


Figura 28 - Mapa Radial da Estação Búzios captado no dia 16/09/2006 às 23h00min.

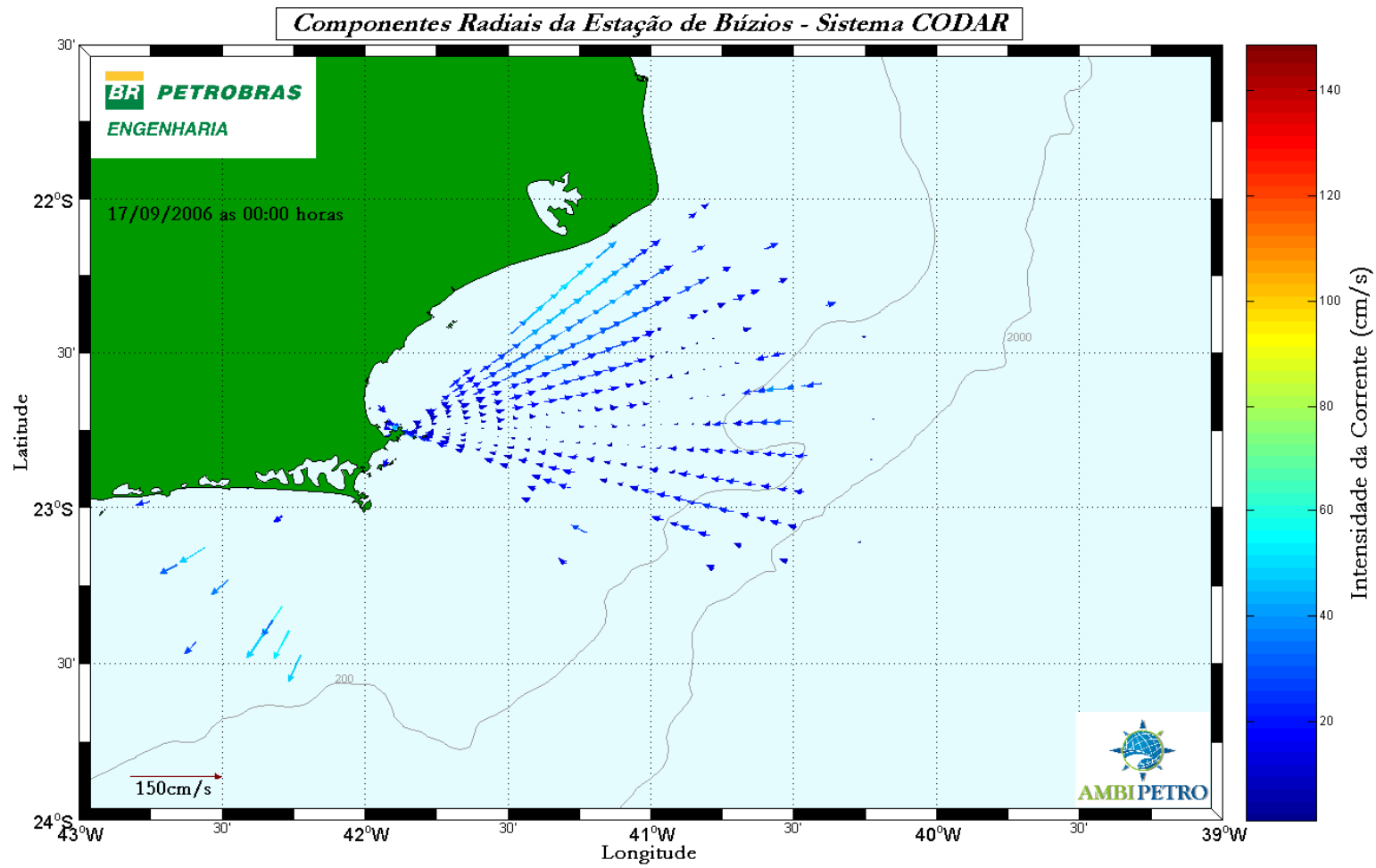


Figura 29 - Mapa Radial da Estação Búzios captado no dia 17/09/2006 às 00h00min.

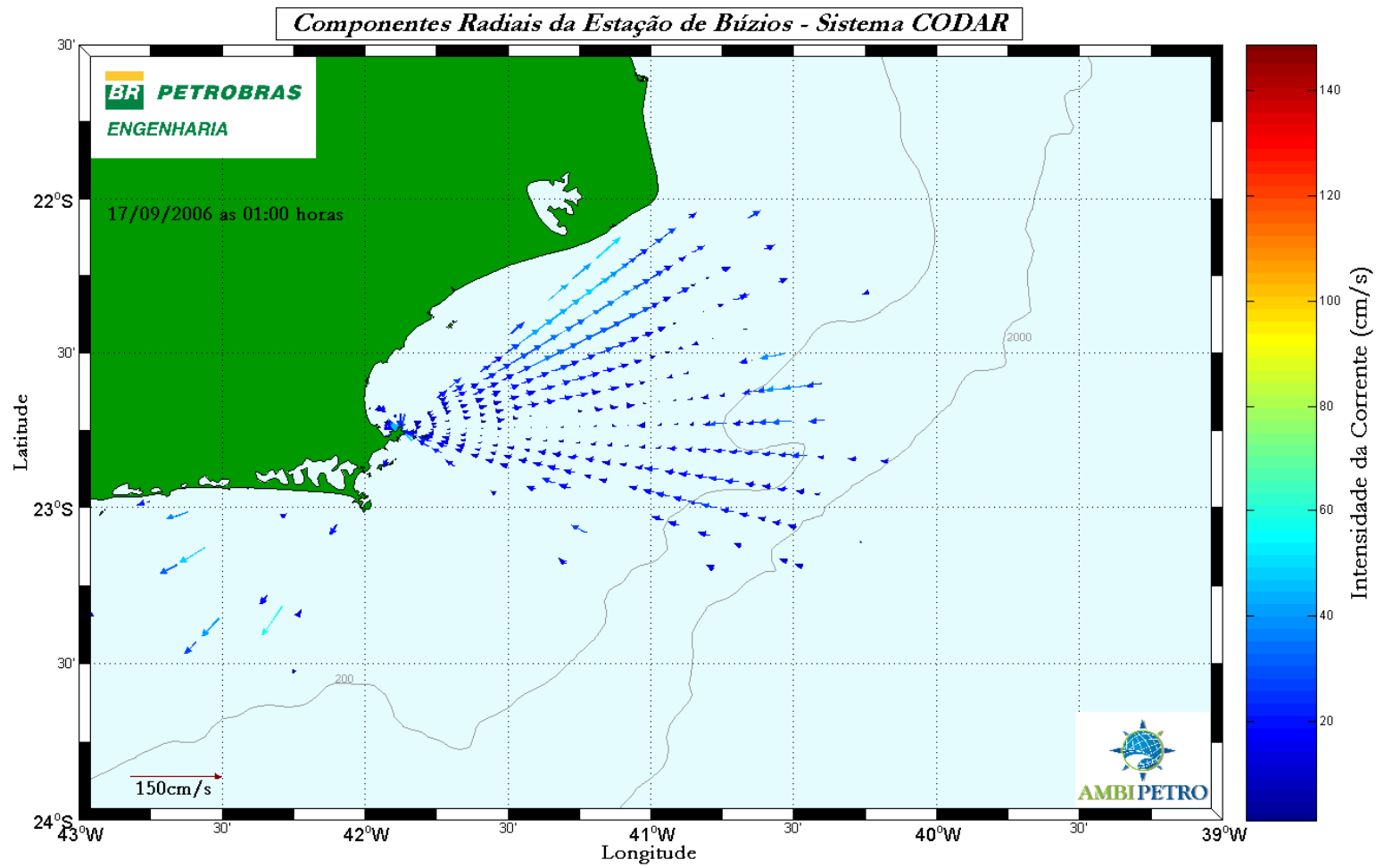


Figura 30 - Mapa Radial da Estação Búzios captado no dia 17/09/2006 às 01h00min.

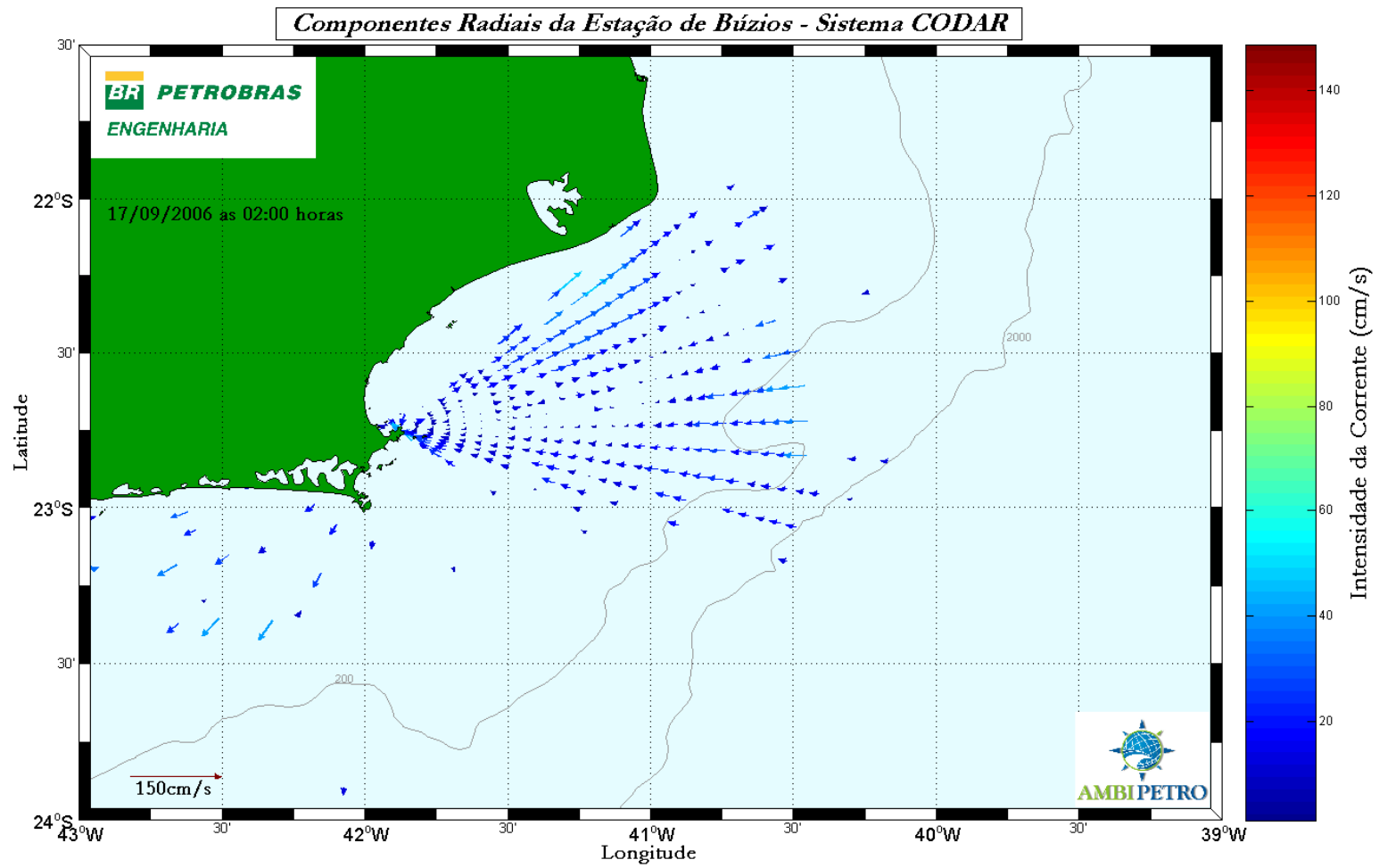


Figura 31 - Mapa Radial da Estação Búzios captado no dia 17/09/2006 às 02h00min.

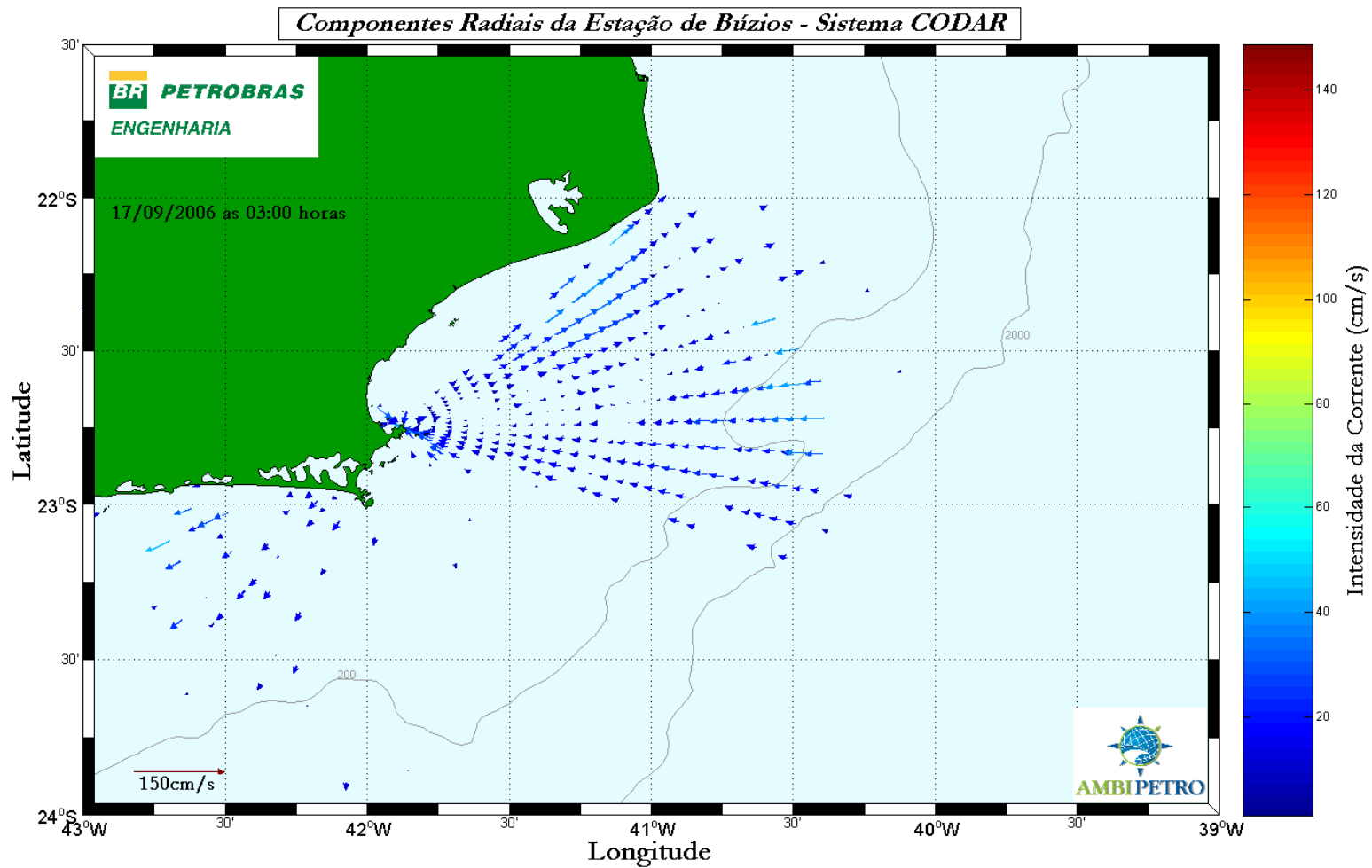


Figura 32 - Mapa Radial da Estação Búzios captado no dia 17/09/2006 às 03h00min.

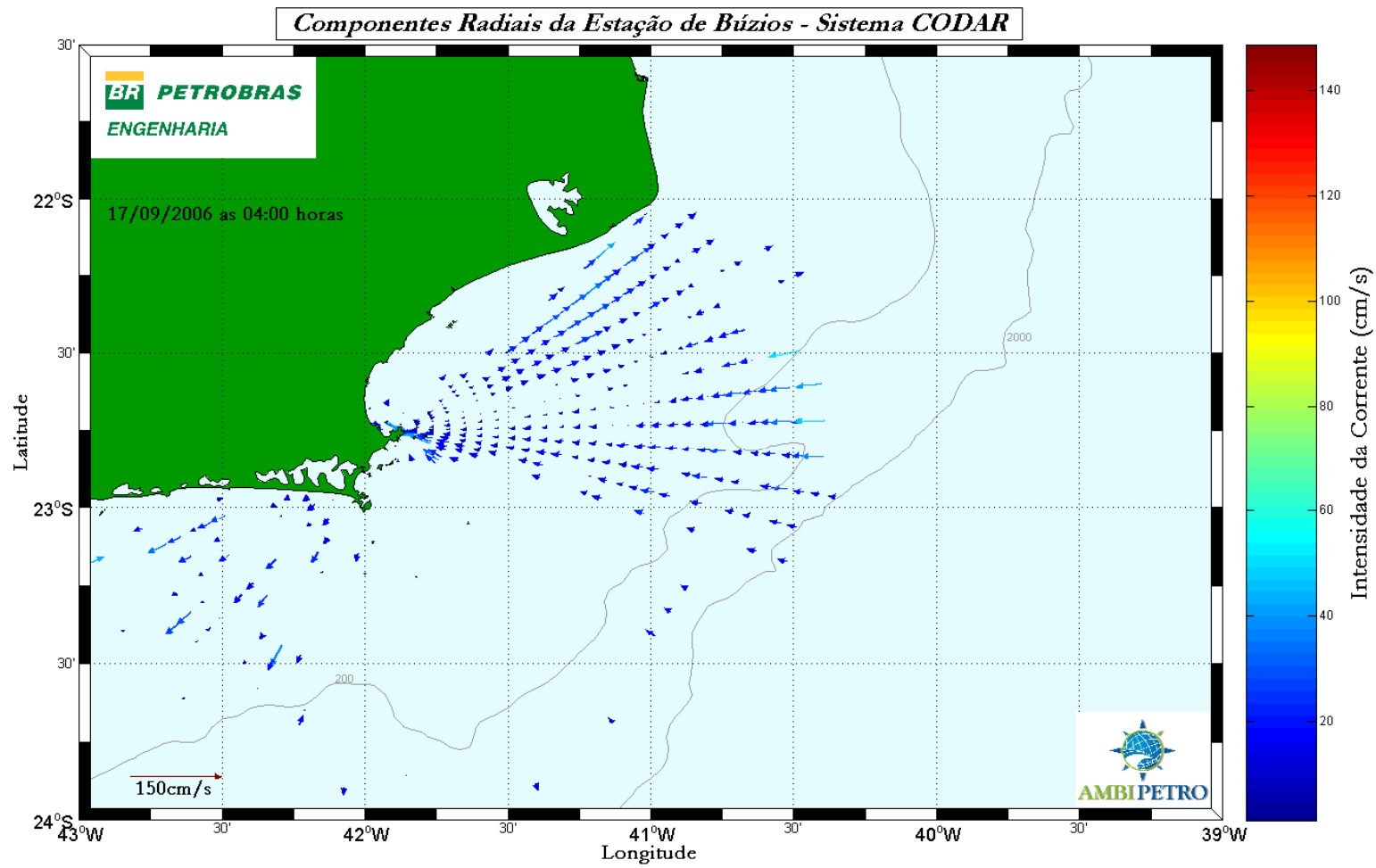


Figura 33 - Mapa Radial da Estação Búzios captado no dia 17/09/2006 às 04h00min.

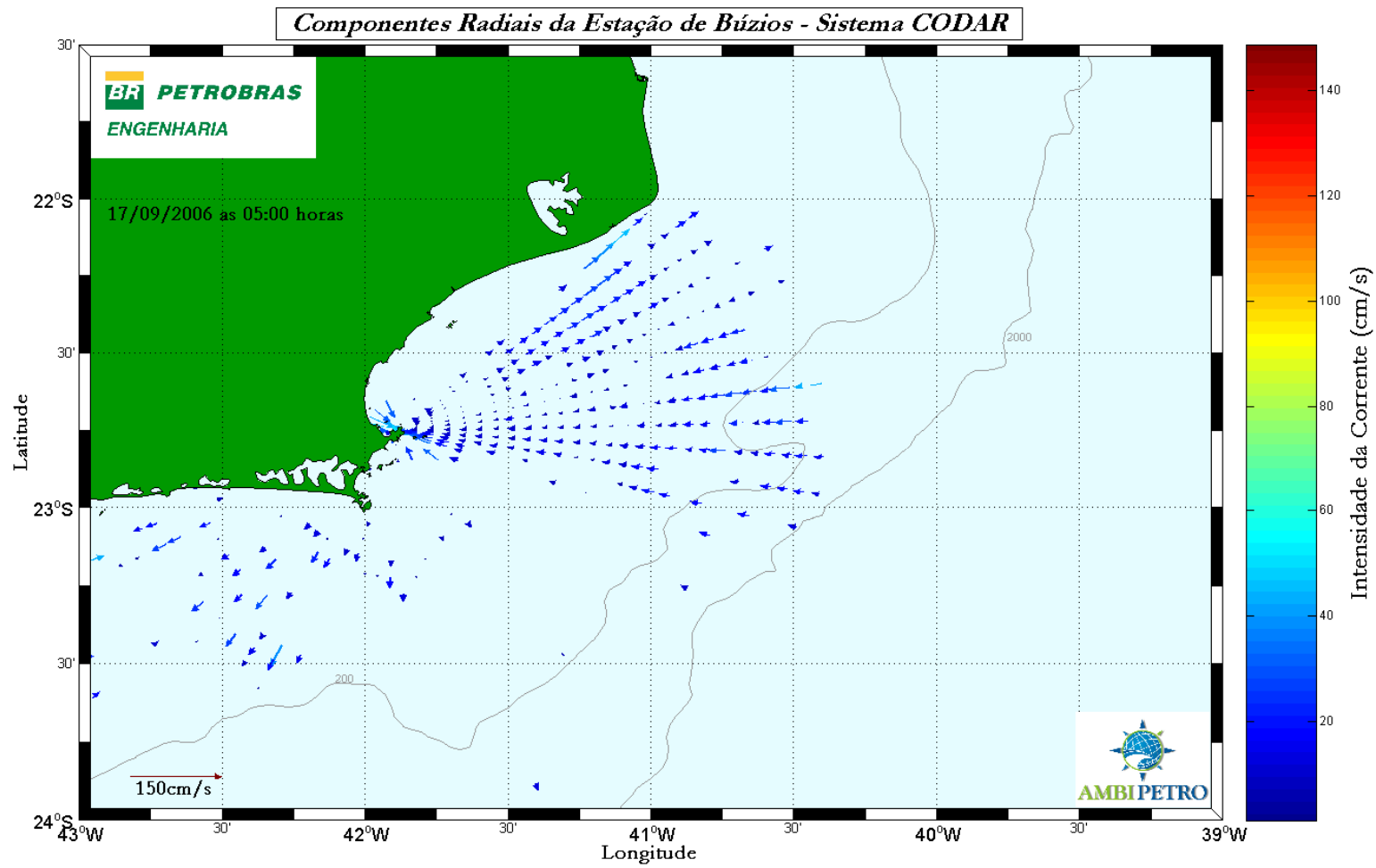


Figura 34 - Mapa Radial da Estação Búzios captado no dia 17/09/2006 às 05h00min.

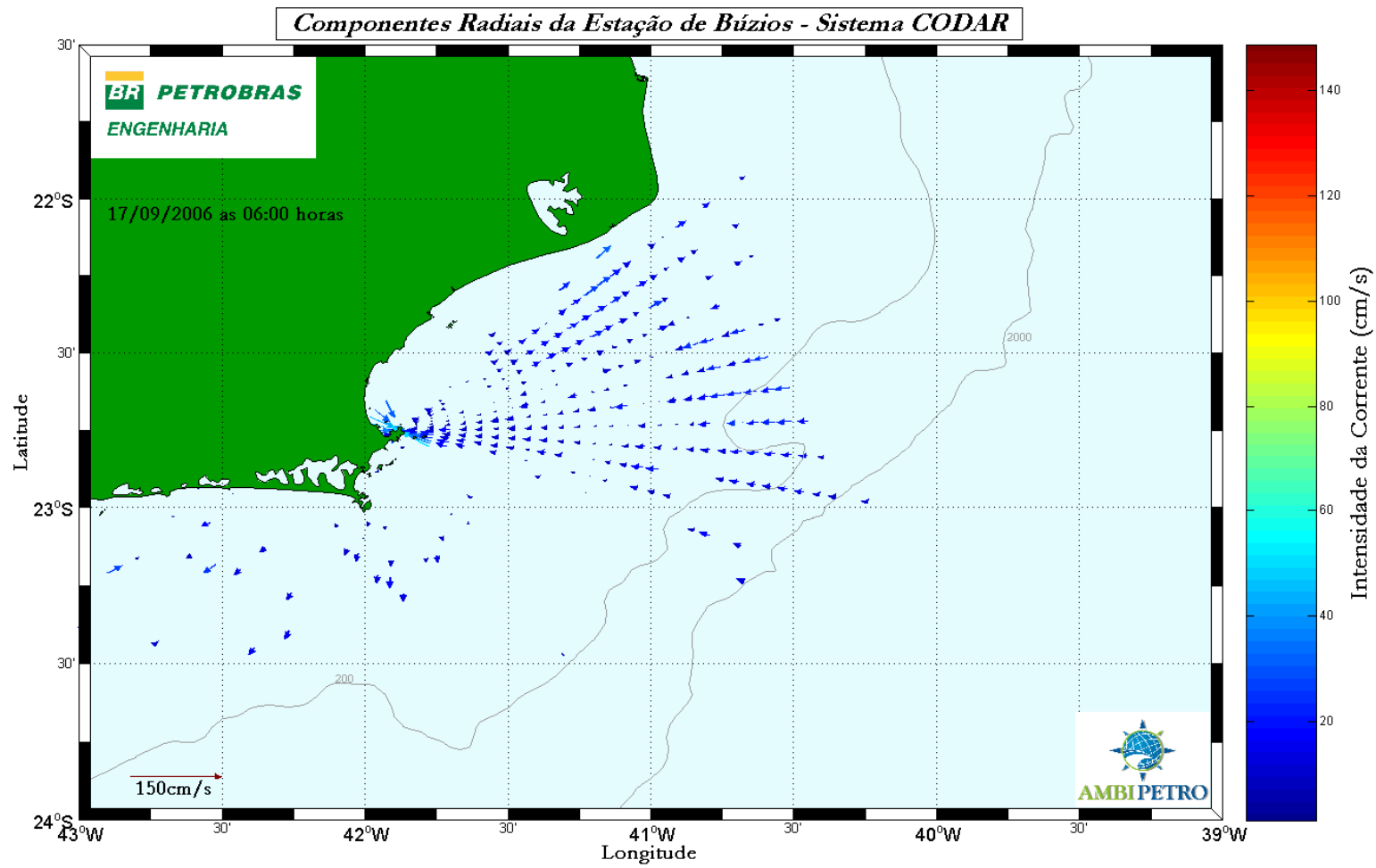


Figura 35 - Mapa Radial da Estação Búzios captado no dia 17/09/2006 às 06h00min.

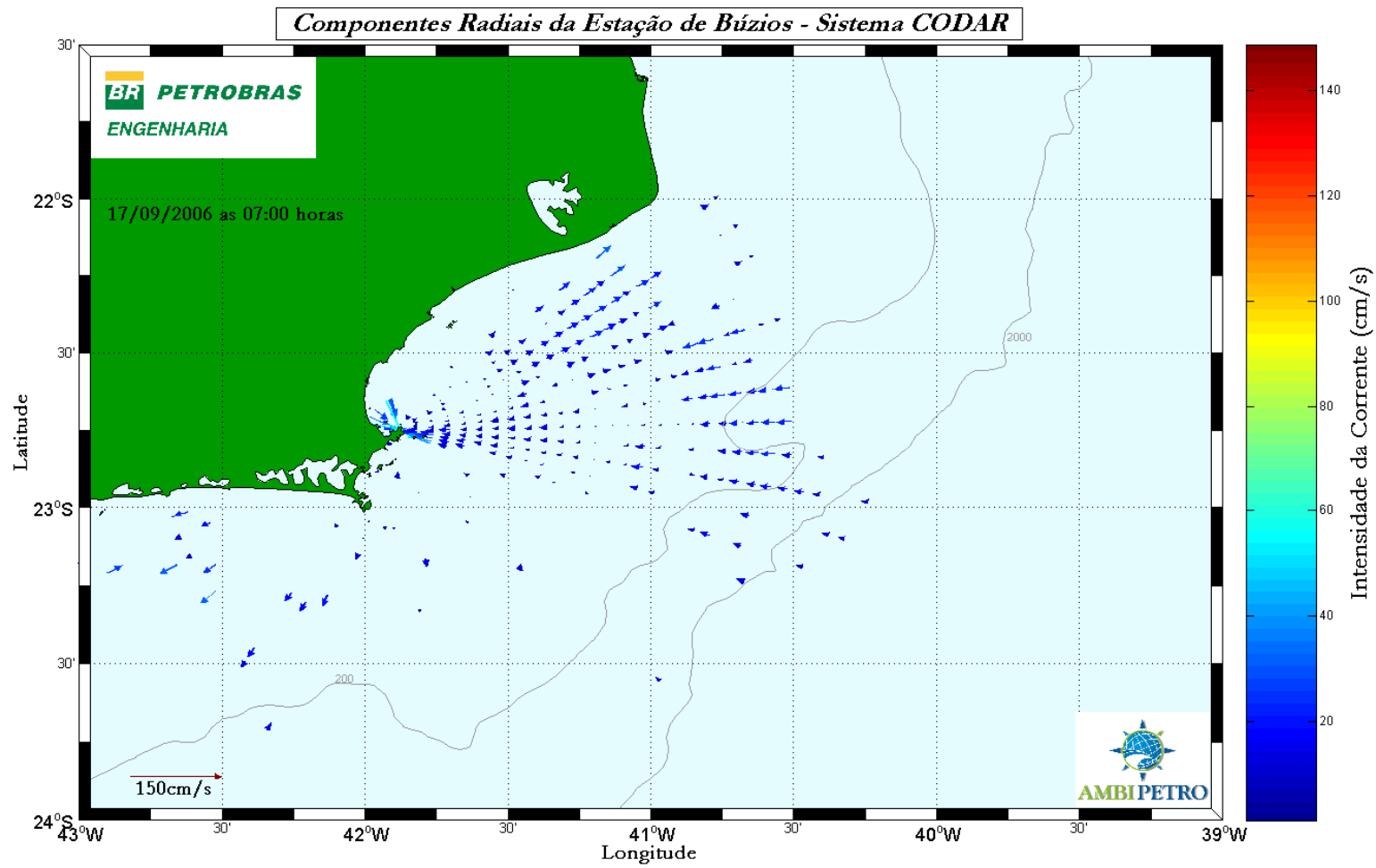


Figura 36 - Mapa Radial da Estação Búzios captado no dia 17/09/2006 às 07h00min.

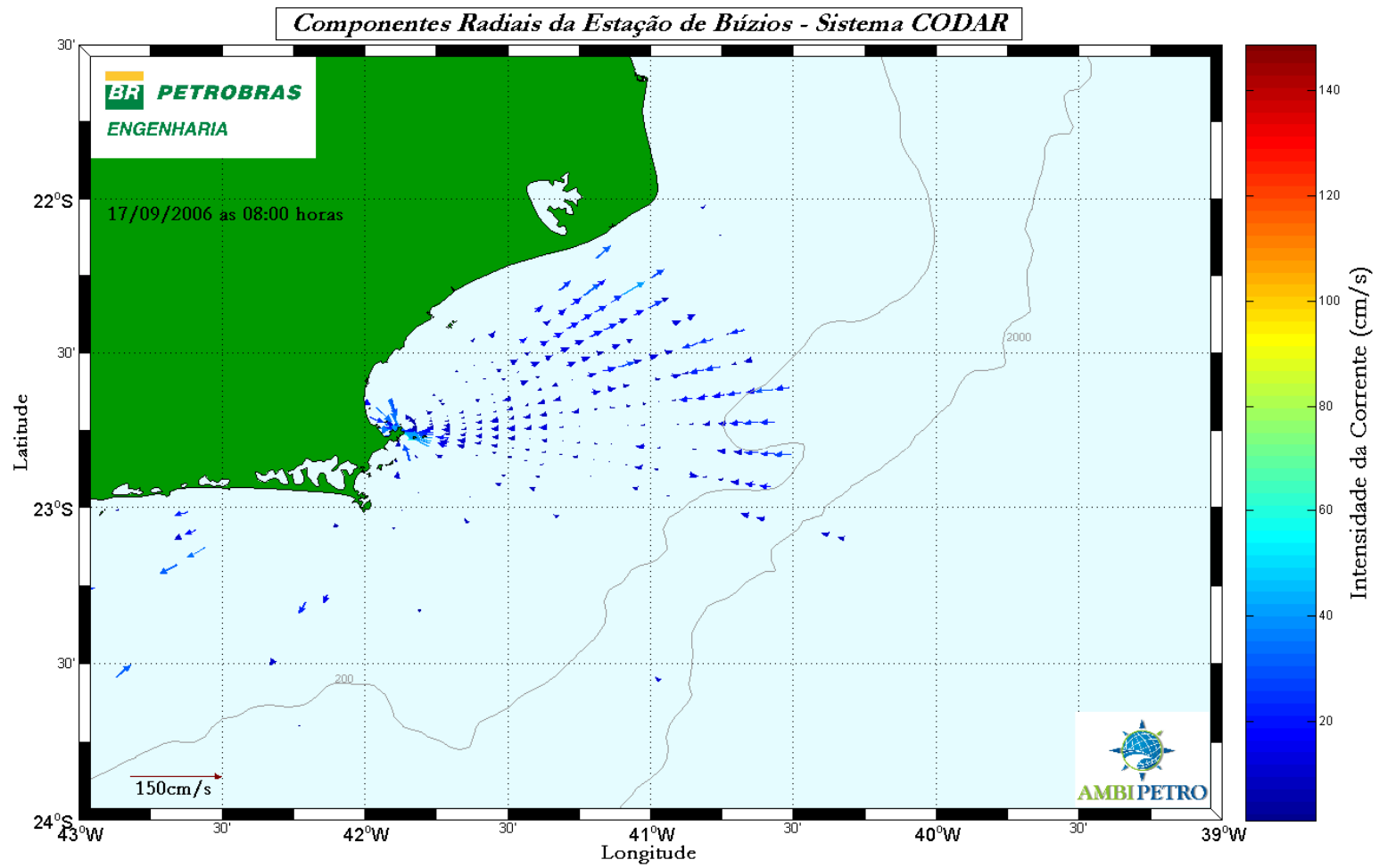


Figura 37 - Mapa Radial da Estação Búzios captado no dia 17/09/2006 às 08h00min.

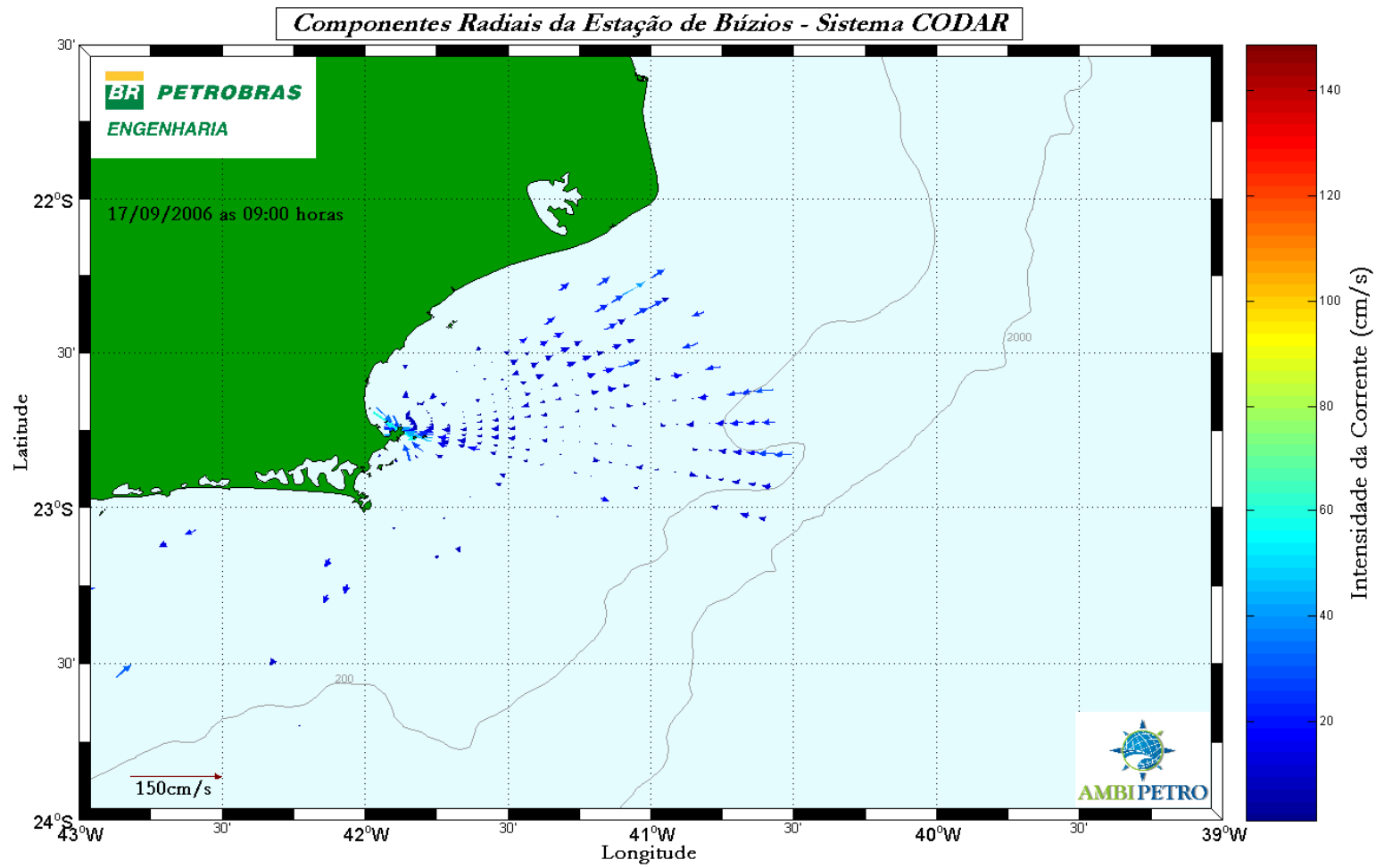


Figura 38 - Mapa Radial da Estação Búzios captado no dia 17/09/2006 às 09h00min.

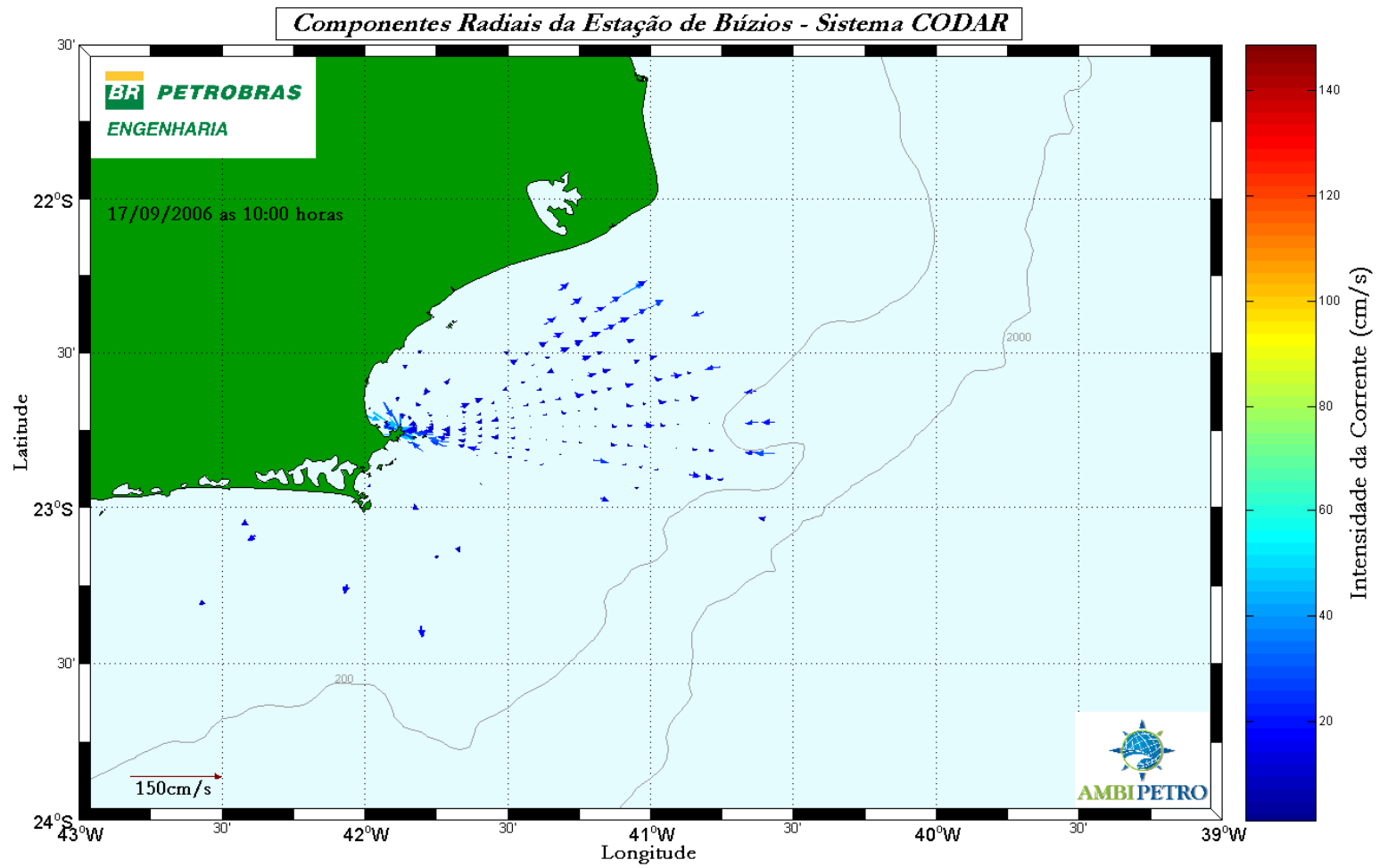


Figura 39 - Mapa Radial da Estação Búzios captado no dia 17/09/2006 às 10h00min.

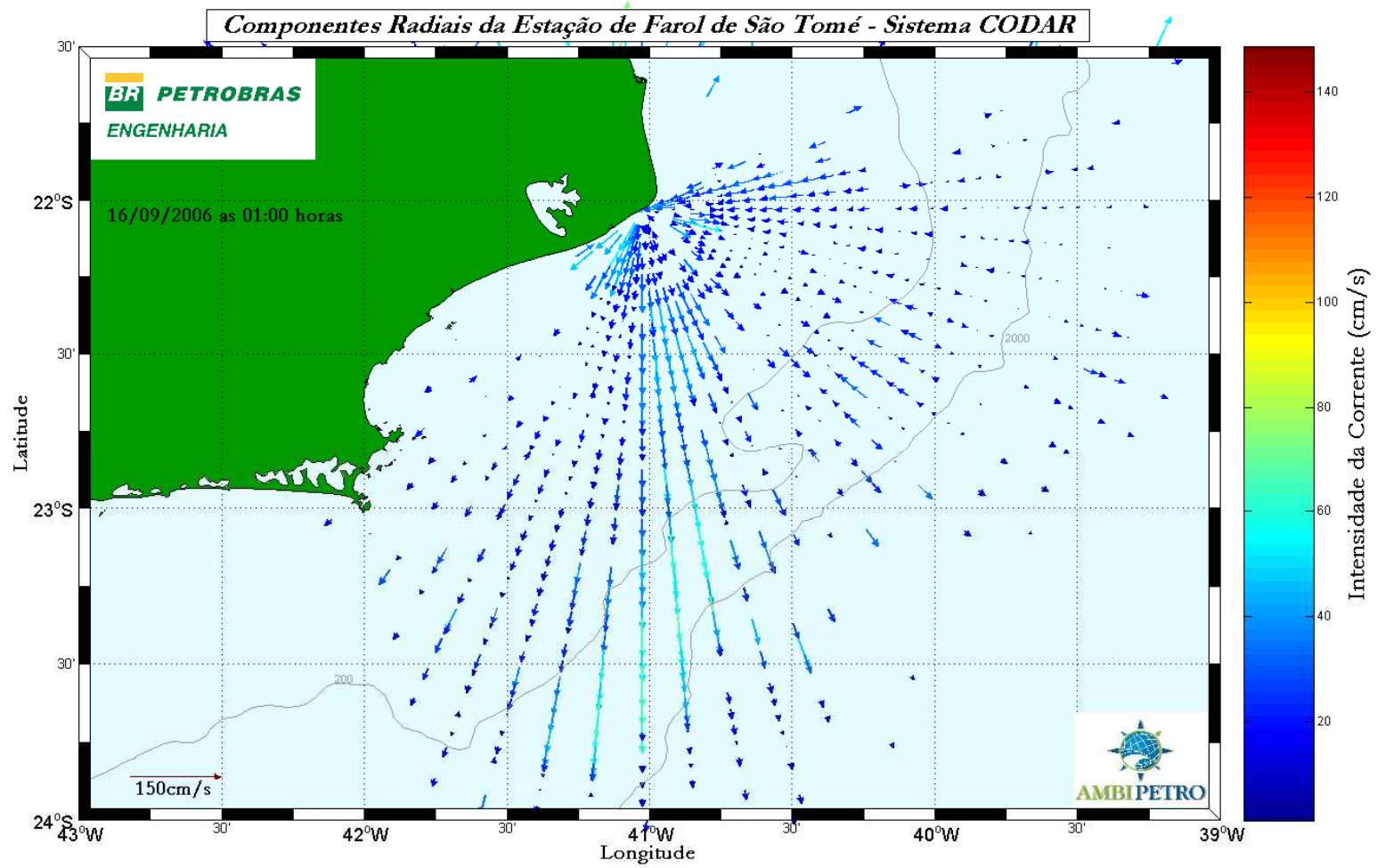


Figura 40 - Mapa Radial da Estação de Farol de São Tomé após a correção do padrão de irradiação, captado no dia 16/09/2006 às 01h00min.

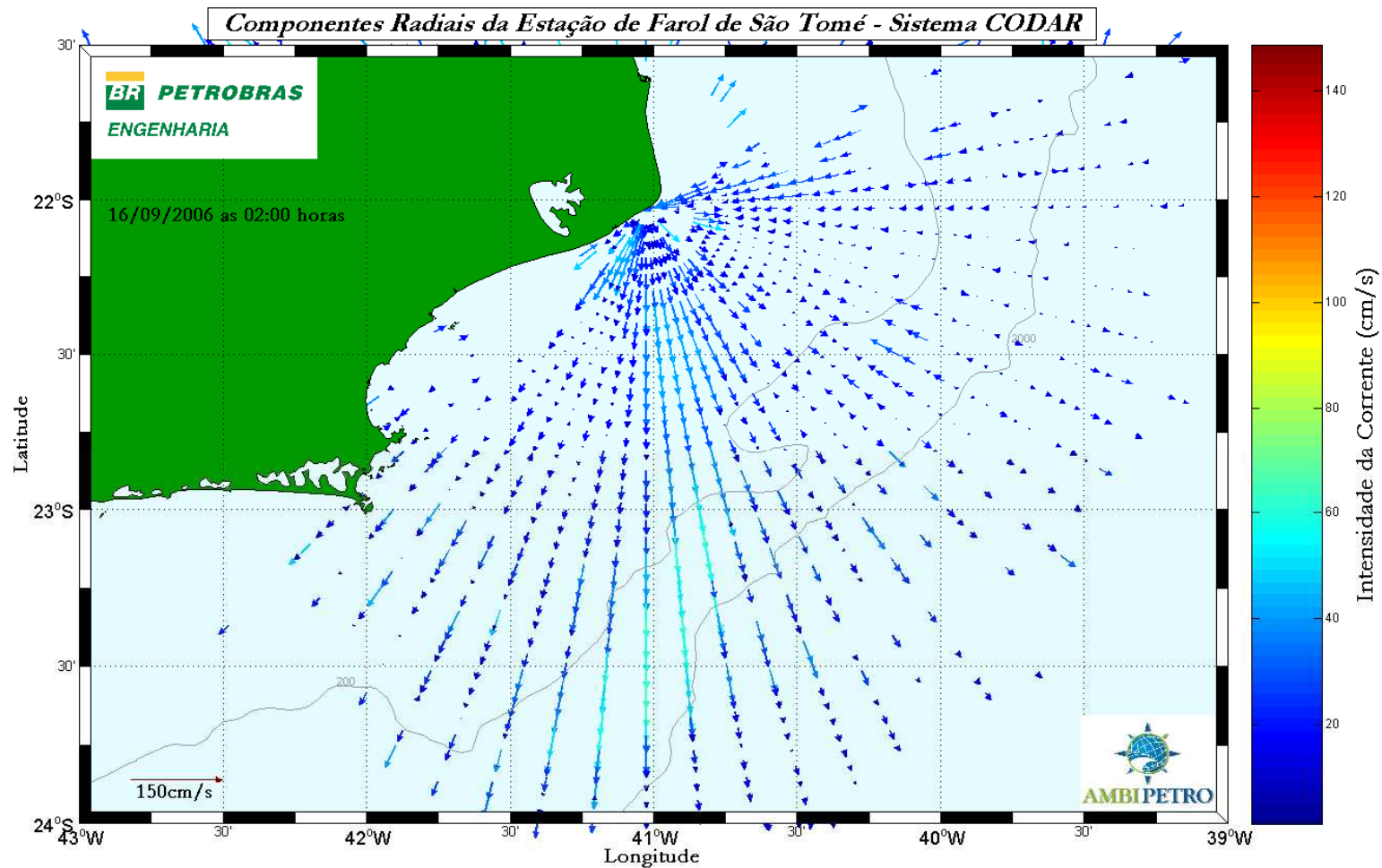


Figura 41 - Mapa Radial da Estação de Farol de São Tomé após a correção do padrão de irradiação, captado no dia 16/09/2006 às 02h00min.

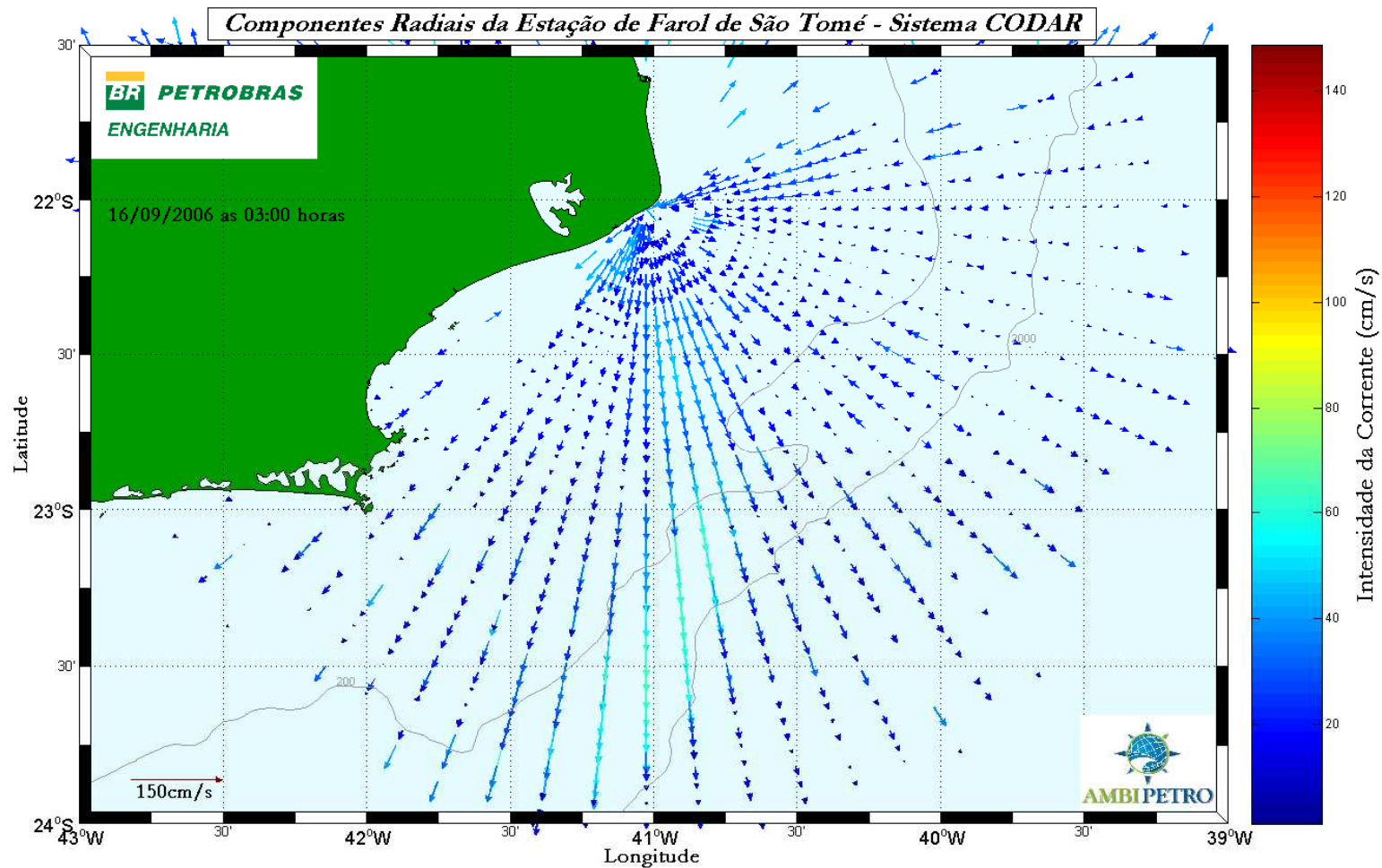


Figura 42 - Mapa Radial da Estação de Farol de São Tomé após a correção do padrão de irradiação, captado no dia 16/09/2006 às 03h00min.

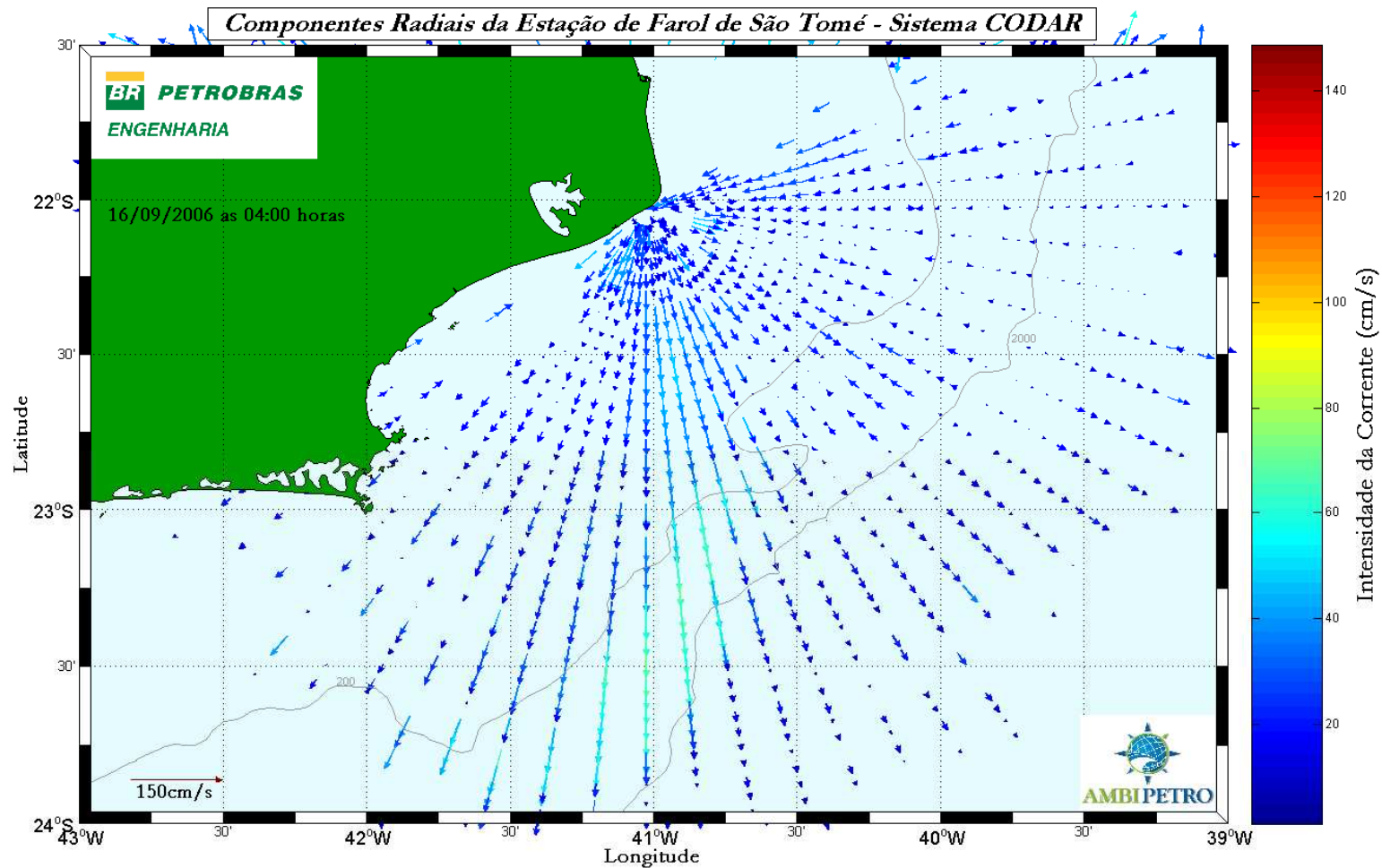


Figura 43 - Mapa Radial da Estação de Farol de São Tomé após a correção do padrão de irradiação, captado no dia 16/09/2006 às 04h00min.

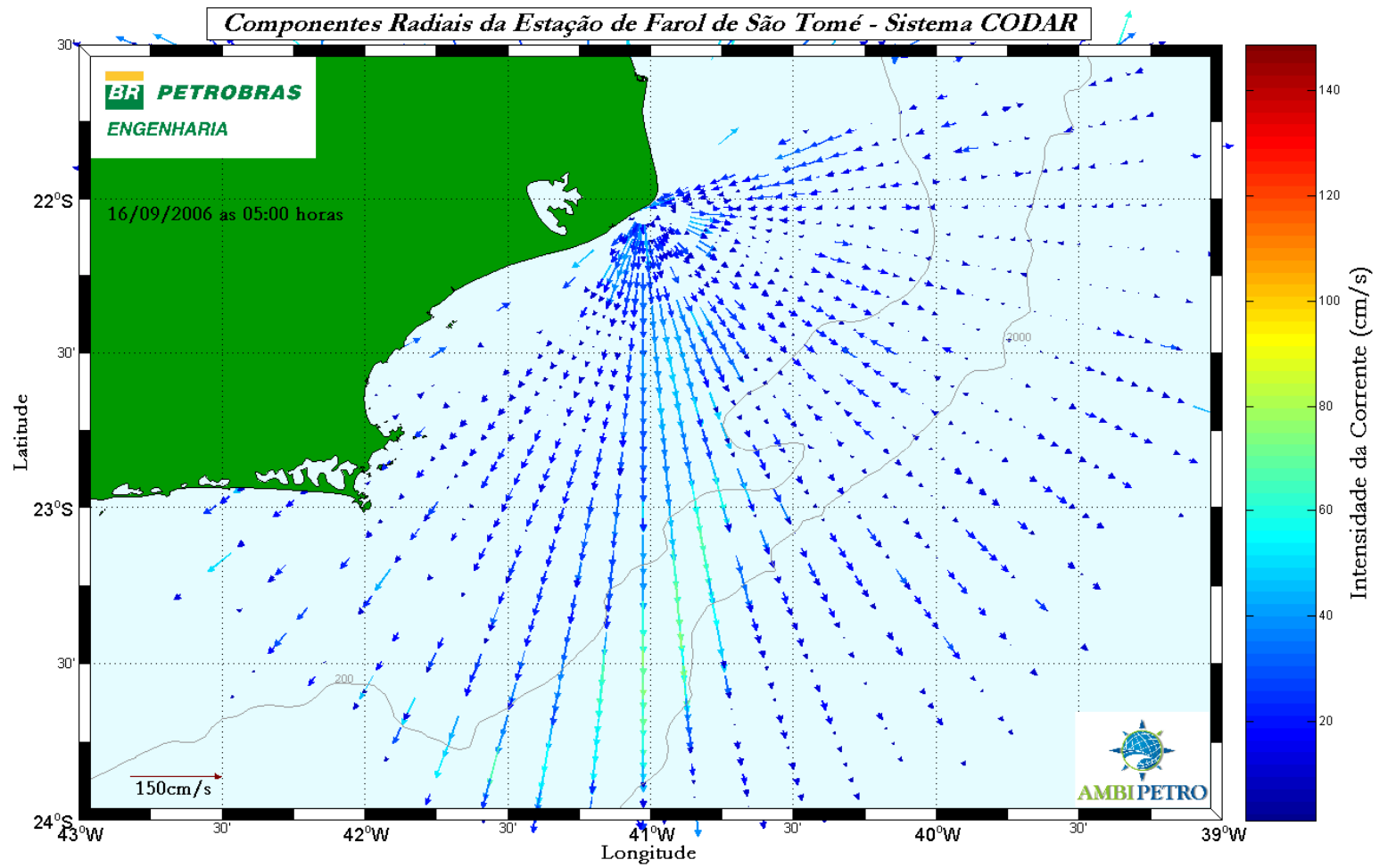


Figura 44 - Mapa Radial da Estação de Farol de São Tomé após a correção do padrão de irradiação, captado no dia 16/09/2006 às 05h00min.

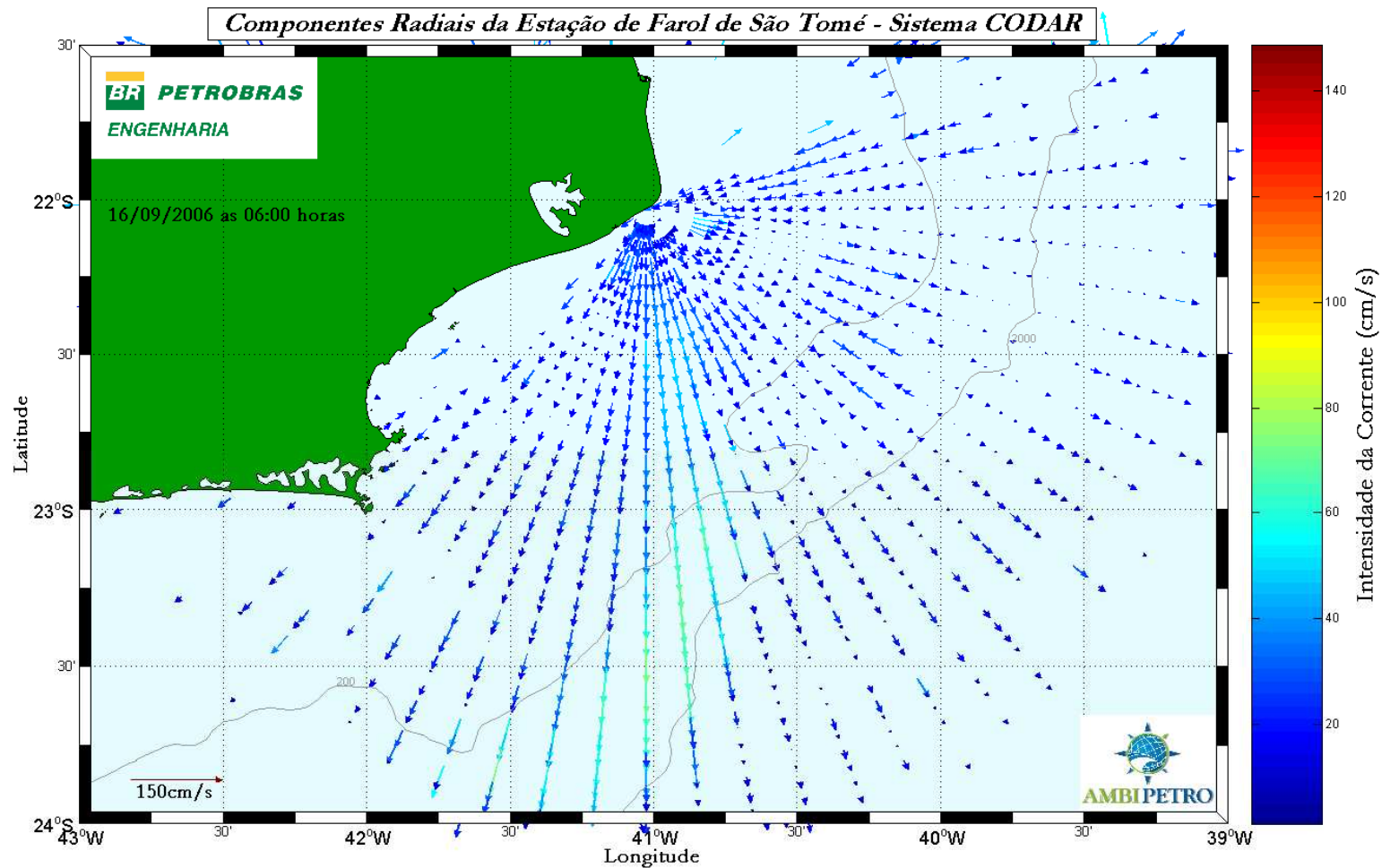


Figura 45 - Mapa Radial da Estação de Farol de São Tomé após a correção do padrão de irradiação, captado no dia 16/09/2006 às 06h00min.

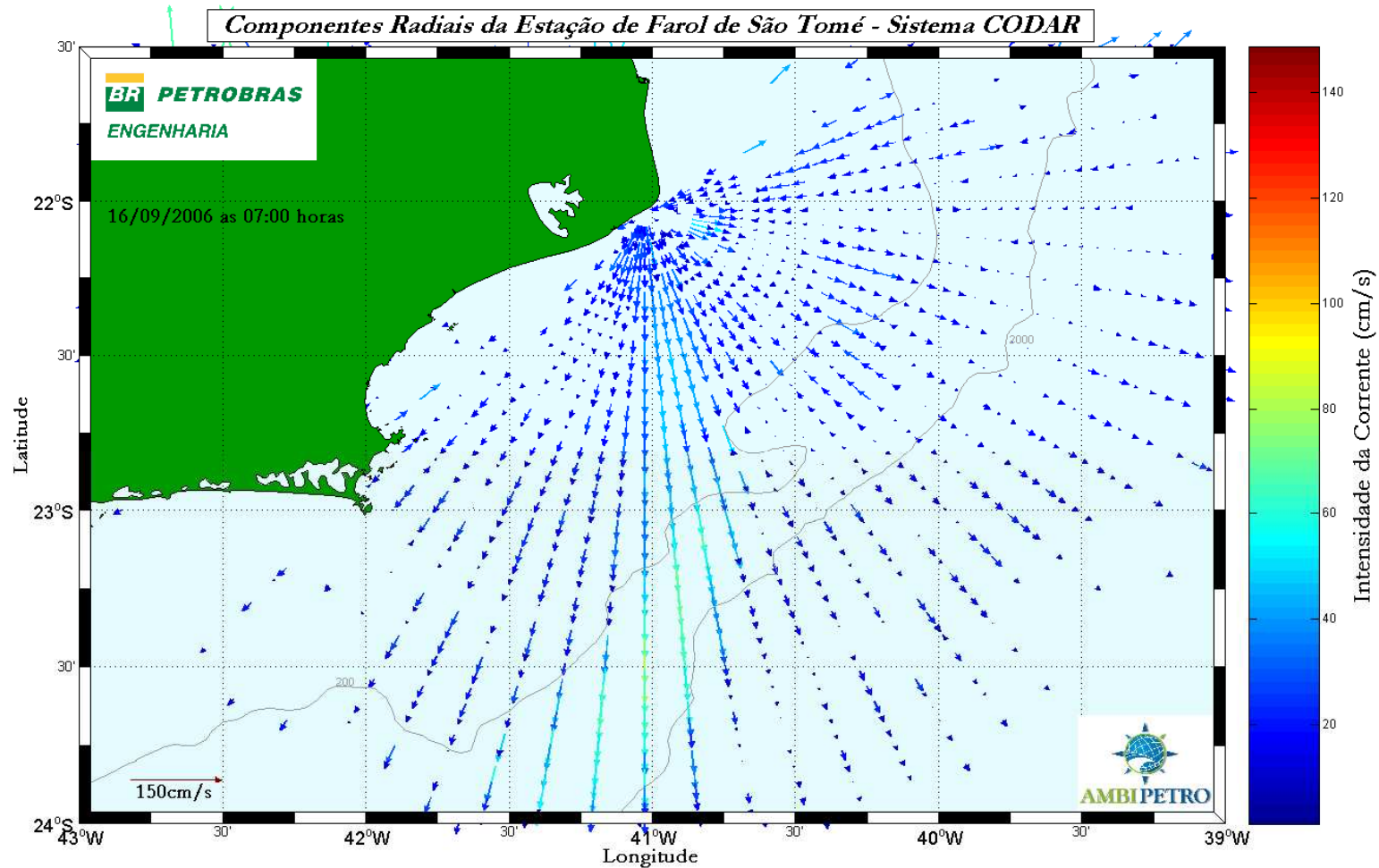


Figura 46 - Mapa Radial da Estação de Farol de São Tomé após a correção do padrão de irradiação, captado no dia 16/09/2006 às 07h00min.

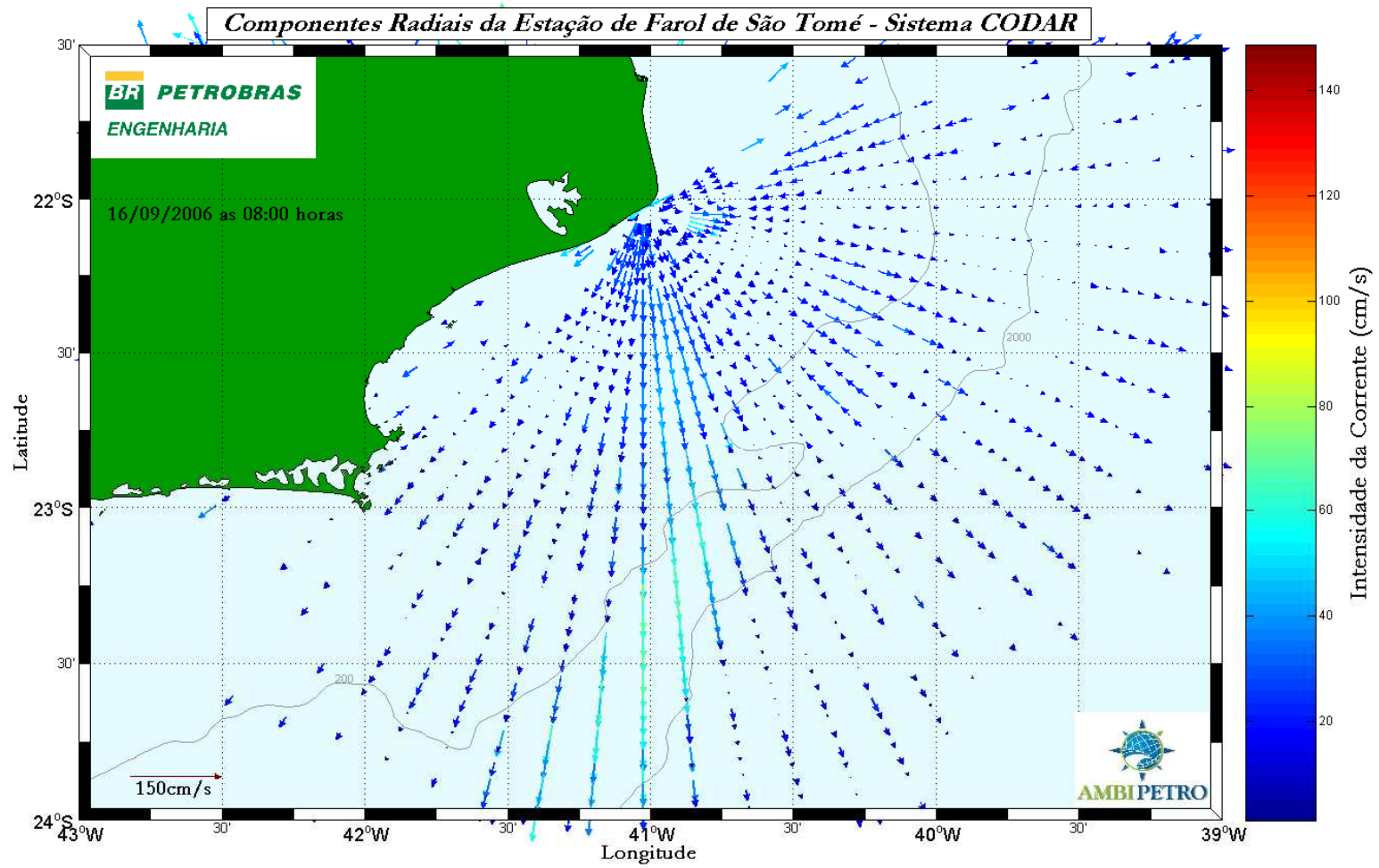


Figura 47 - Mapa Radial da Estação de Farol de São Tomé após a correção do padrão de irradiação, captado no dia 16/09/2006 às 08h00min.

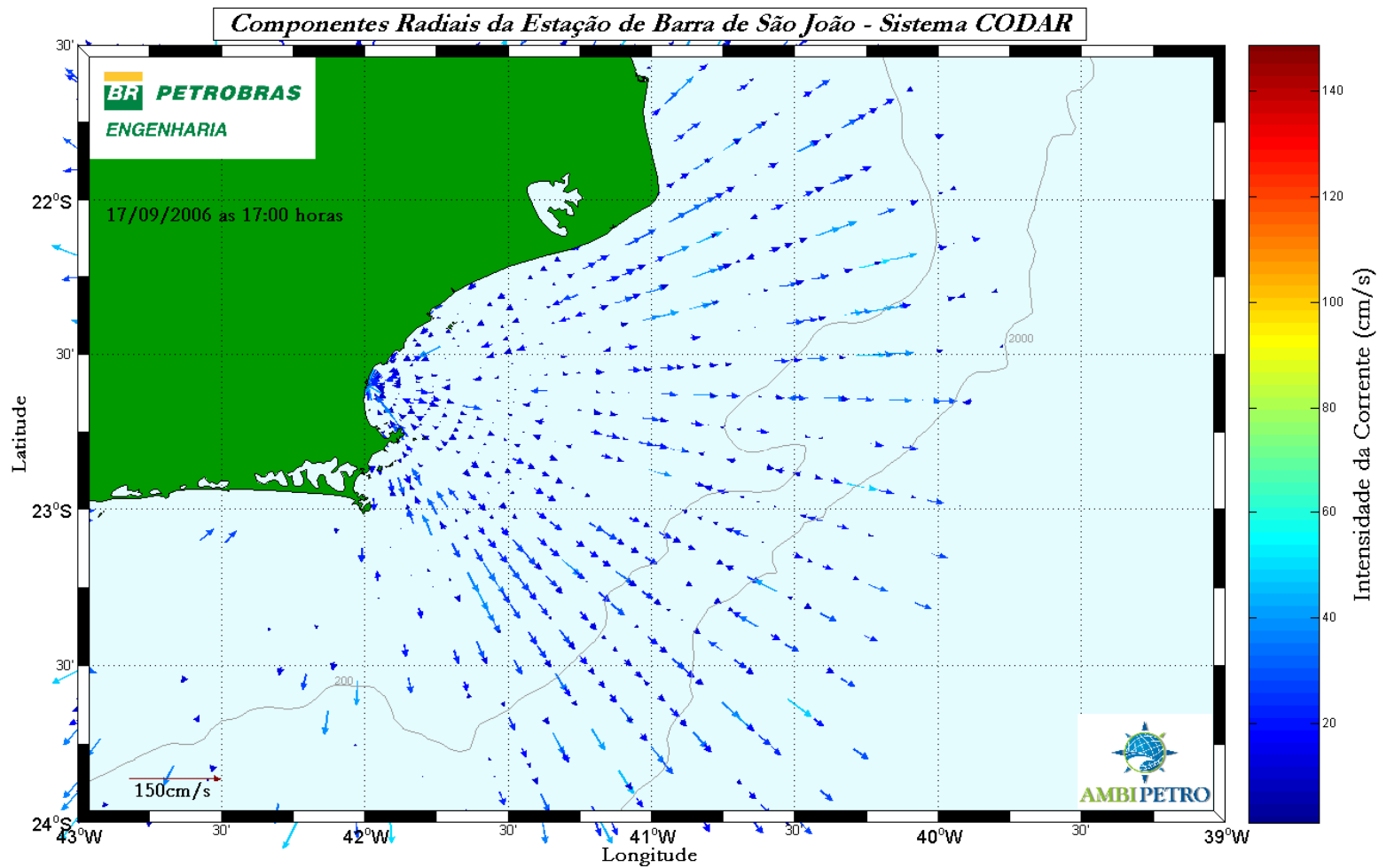


Figura 48 - Mapa Radial da Estação de Barra de São João após a correção do padrão de irradiação, captado no dia 17/09/2006 às 17h00min.

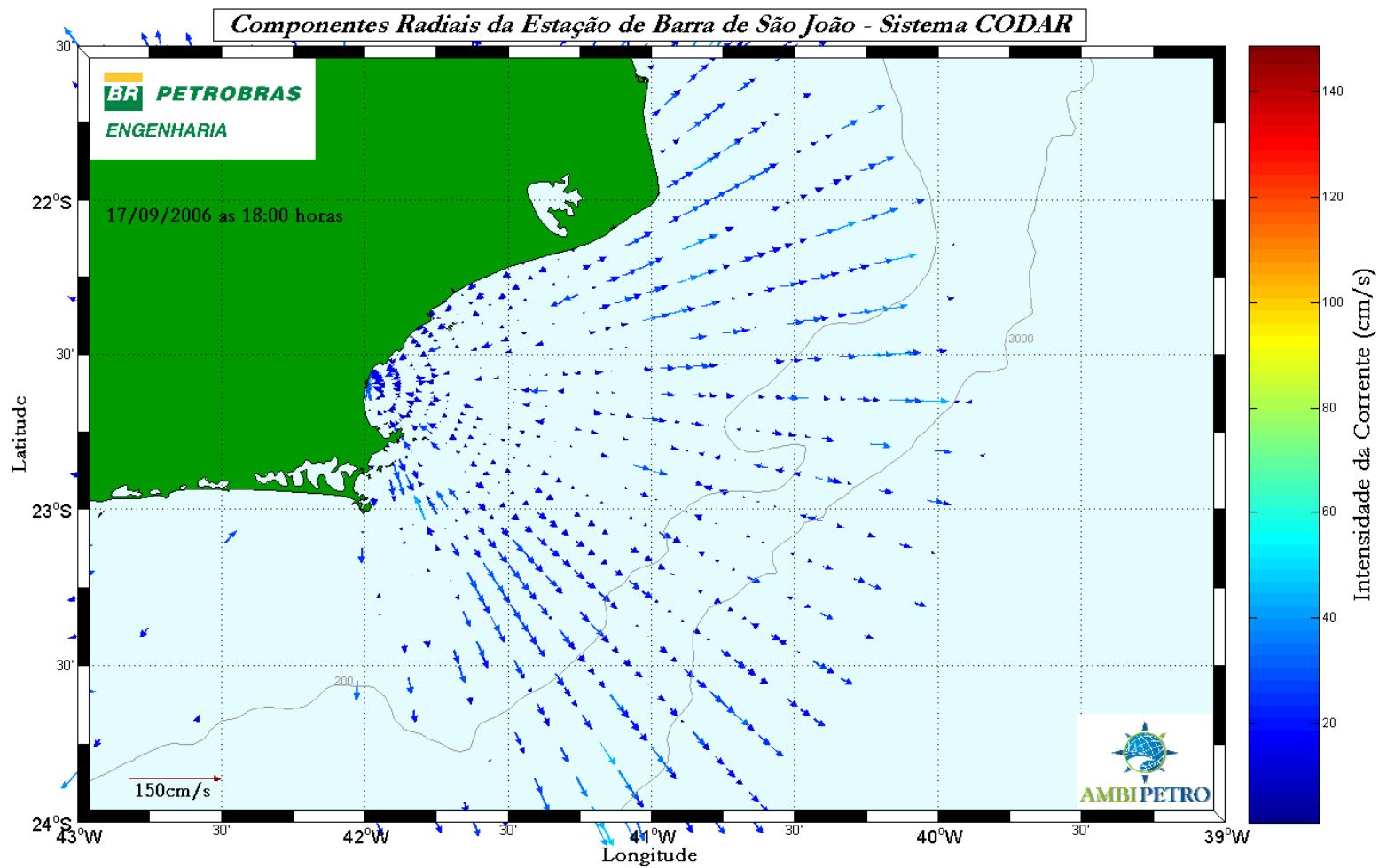


Figura 49 - Mapa Radial da Estação de Barra de São João após a correção do padrão de irradiação, captado no dia 17/09/2006 às 18h00min.

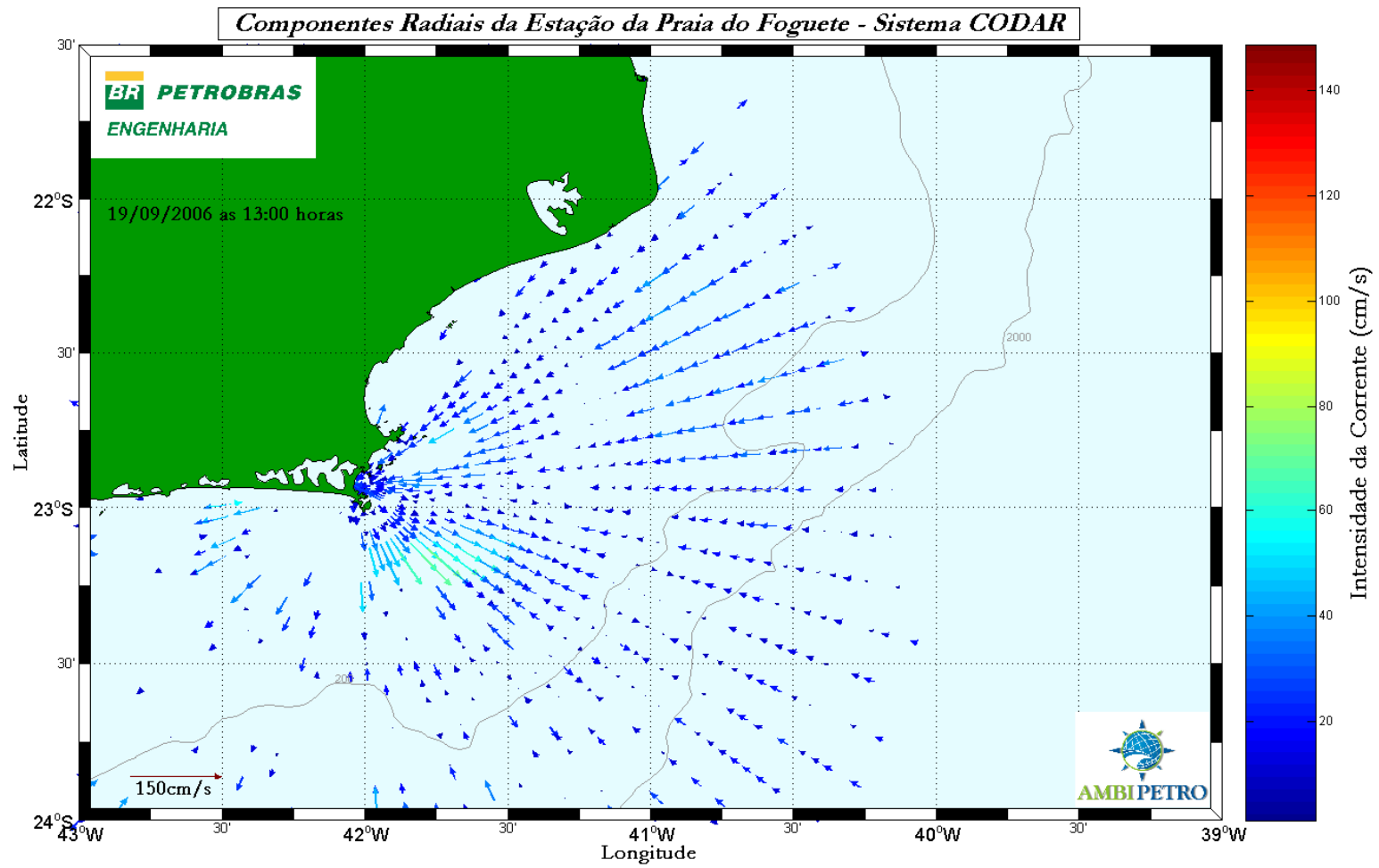


Figura 50 – Mapa Radial da Estação da Praia do Foguete após a correção do padrão de irradiação, captado no dia 19/09/2006 às 13h00min.

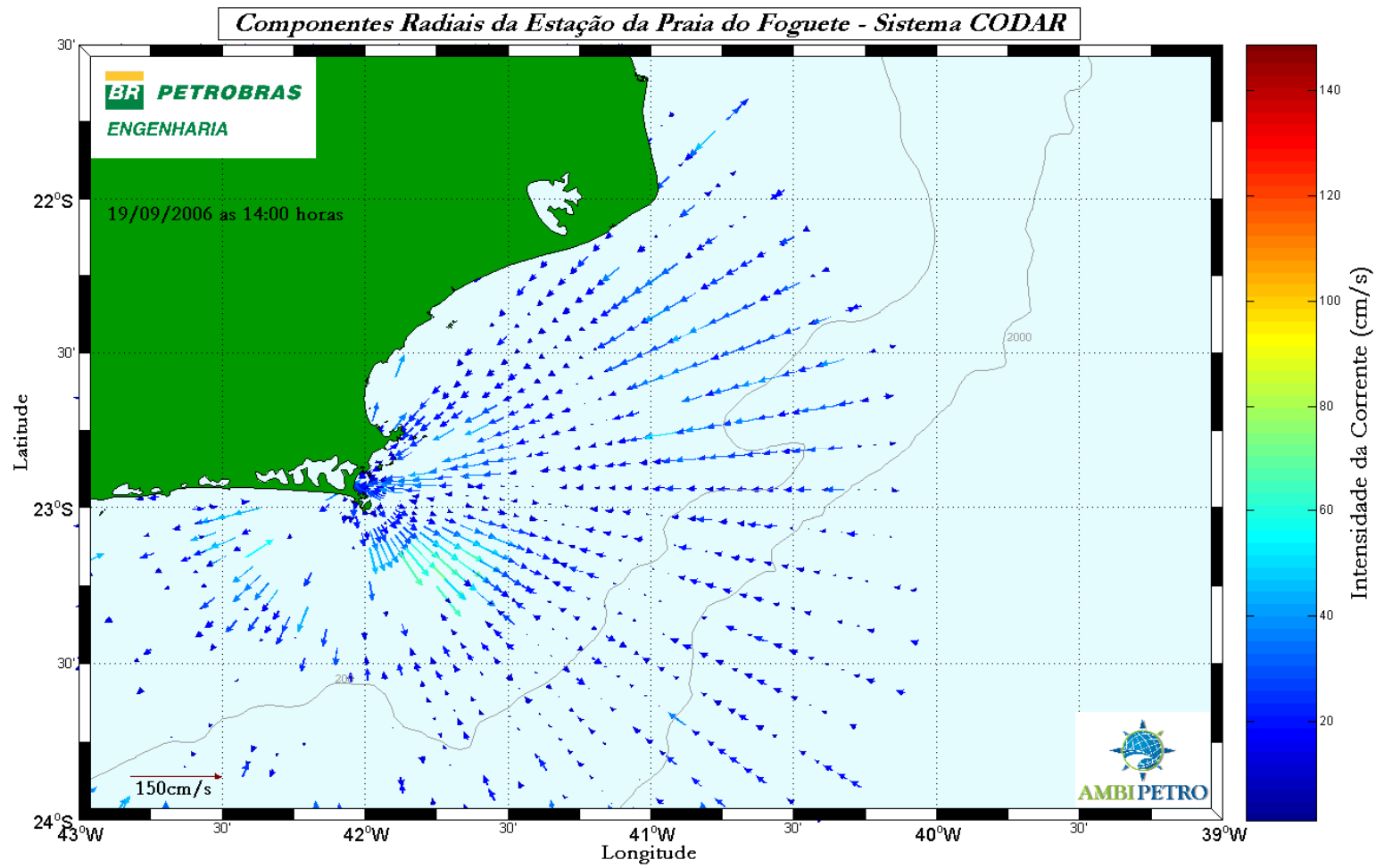


Figura 51 – Mapa Radial da Estação da Praia do Foguete após a correção do padrão de irradiação, captado no dia 19/09/2006 às 14h00min.

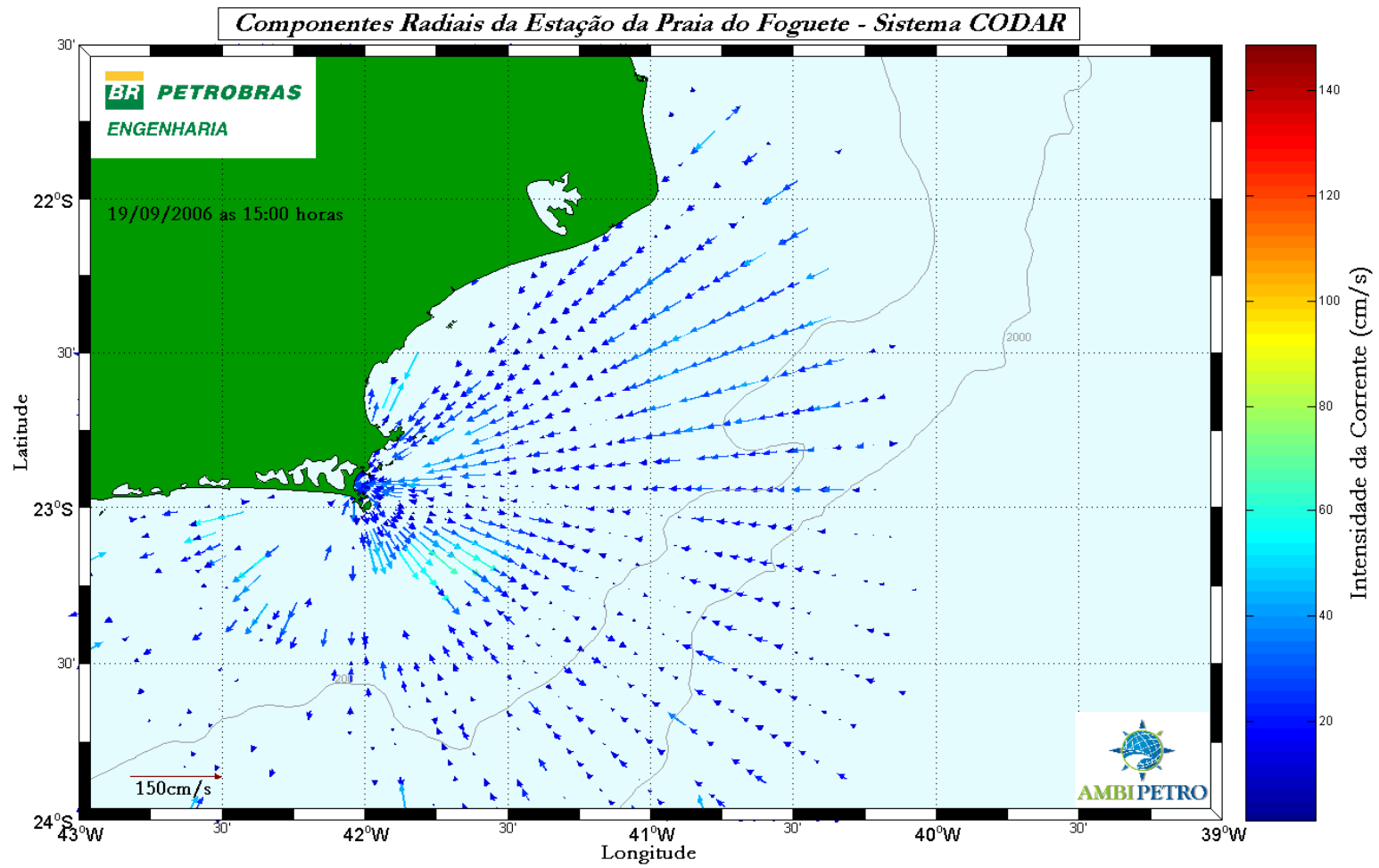


Figura 52 – Mapa Radial da Estação da Praia do Foguete após a correção do padrão de irradiação, captado no dia 19/09/2006 às 15h00min.

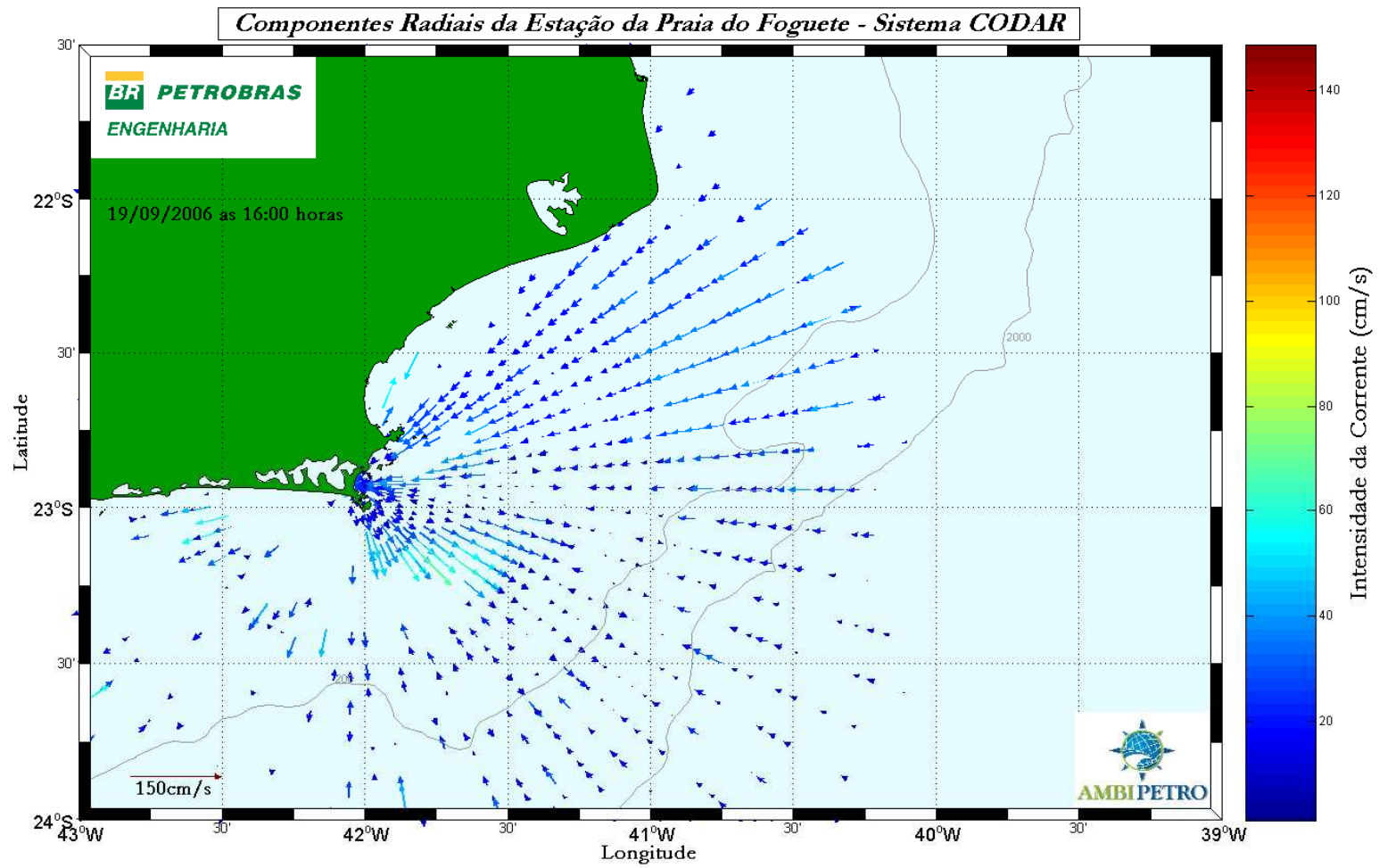


Figura 53 – Mapa Radial da Estação da Praia do Foguete após a correção do padrão de irradiação, captado no dia 19/09/2006 às 16h00min.

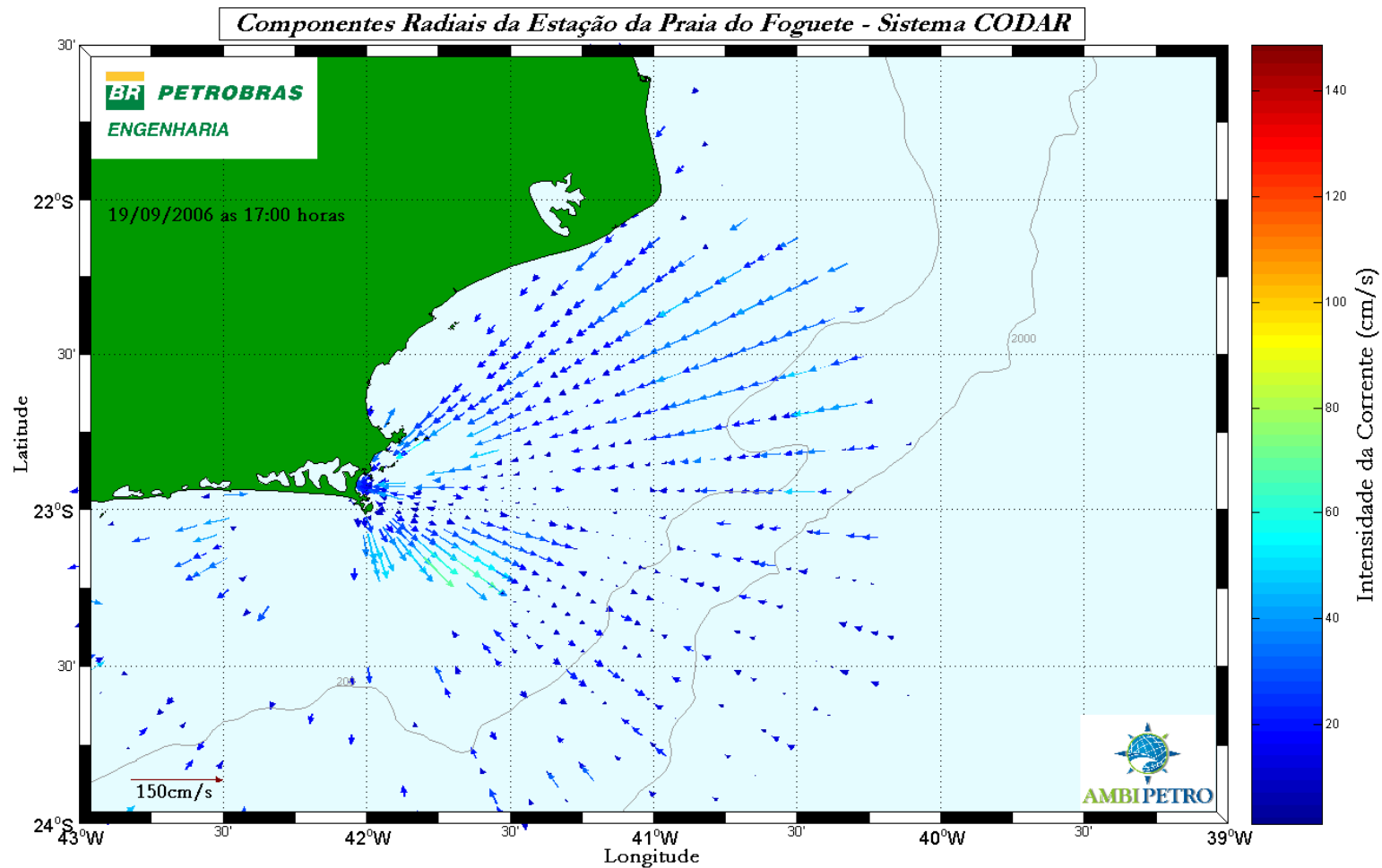


Figura 54 – Mapa Radial da Estação da Praia do Foguete após a correção do padrão de irradiação, captado no dia 19/09/2006 às 17h00min.

A estação de Búzios foi rejeitada devido à baixa qualidade dos dados nela obtidos. Isto pode ser constatado, através de seus mapas radiais, bem como observando o gráfico do espectro de frequência, onde as informações do sinal retroespalhado, ao contrário das demais estações, não foram satisfatórias, em decorrência do fraco sinal recebido.

Ao se observar os mapas radiais e os espectros das estações de Farol de São Tomé, Barra de São João e Praia do Foguete verifica-se uma melhora na qualidade do sinal retroespalhado, bem como uma maior cobertura espacial dos dados.

Finalmente, para visualização da cobertura final do sistema SeaSonde® Long Range, da CODAR Ocean Sensors, na Bacia de Campos, considerou-se as duas estações de melhor desempenho durante os testes, a saber: Farol de São Tomé e Praia do Foguete. Foi feita uma simulação de aquisição simultânea entre as estações por meio da alteração da hora, no arquivo bruto de dados, e do envio dos dados das duas estações (já com o mesmo horário) para o aplicativo de combinação dos dados para confecção de mapa total de correntes oceânicas, gerando assim os mapas de vetores totais que podem ser vistos nas Figuras 55 a 59.

A análise qualitativa dos dados deve ser feita com muita precaução tendo em vista que entre as coletas das duas estações ocorreu a passagem de uma frente fria, podendo, portanto, modificar o padrão das correntes superficiais na Bacia de Campos e assim os dados radiais obtidos podem ter sido coletados em períodos em que os campos de correntes superficiais eram diferentes. Entretanto, os dados, a despeito do acima descrito, apresentam bastante coerência, principalmente em relação às feições que podem ser associadas à Corrente do Brasil.

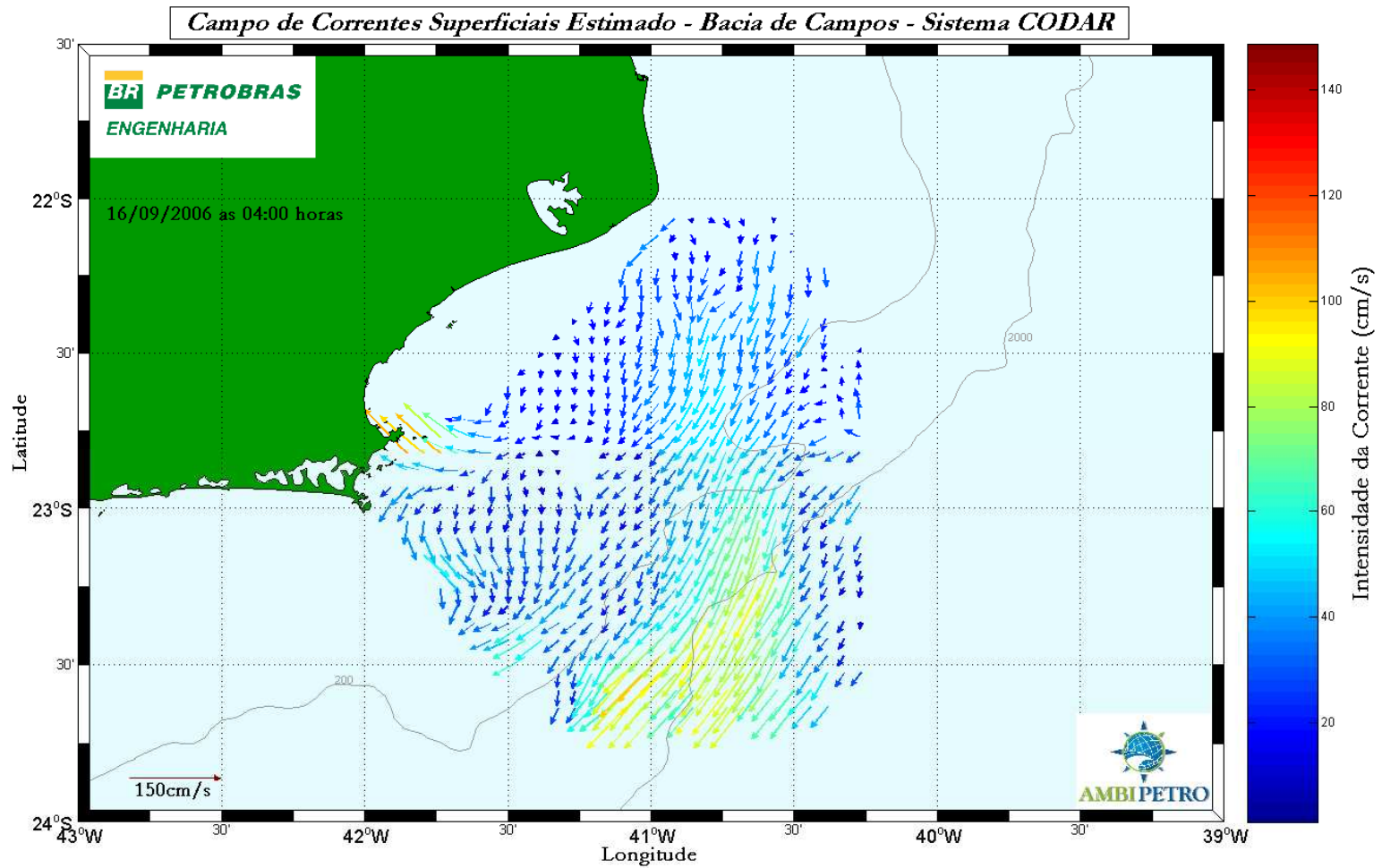


Figura 55 – Mapa estimado do campo de correntes superficiais na Bacia de Campos combinando as Estações de Farol de São Tomé e da Praia do Foguete.

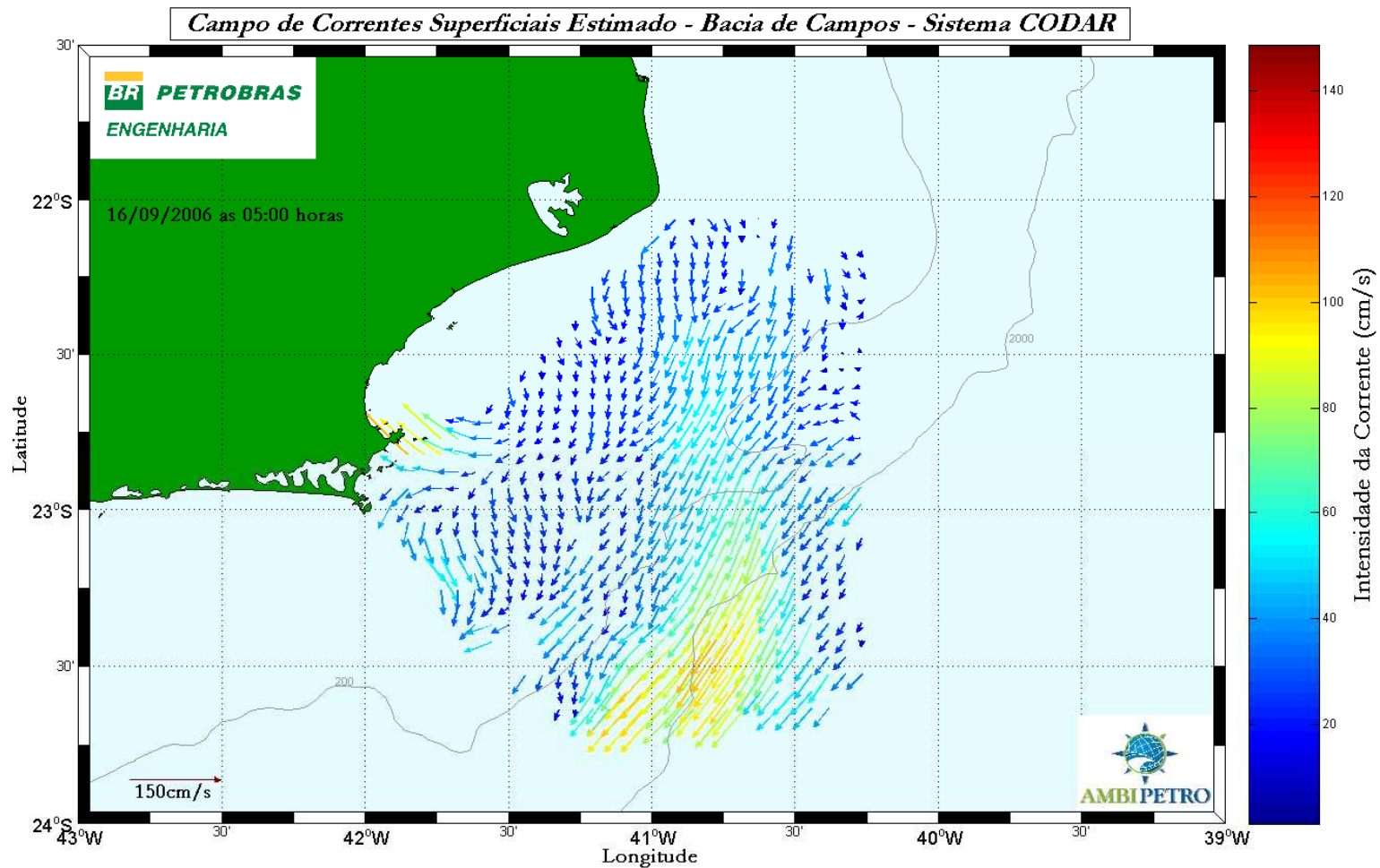


Figura 56 – Mapa estimado do campo de correntes superficiais na Bacia de Campos combinando as Estações de Farol de São Tomé e da Praia do Foguete.

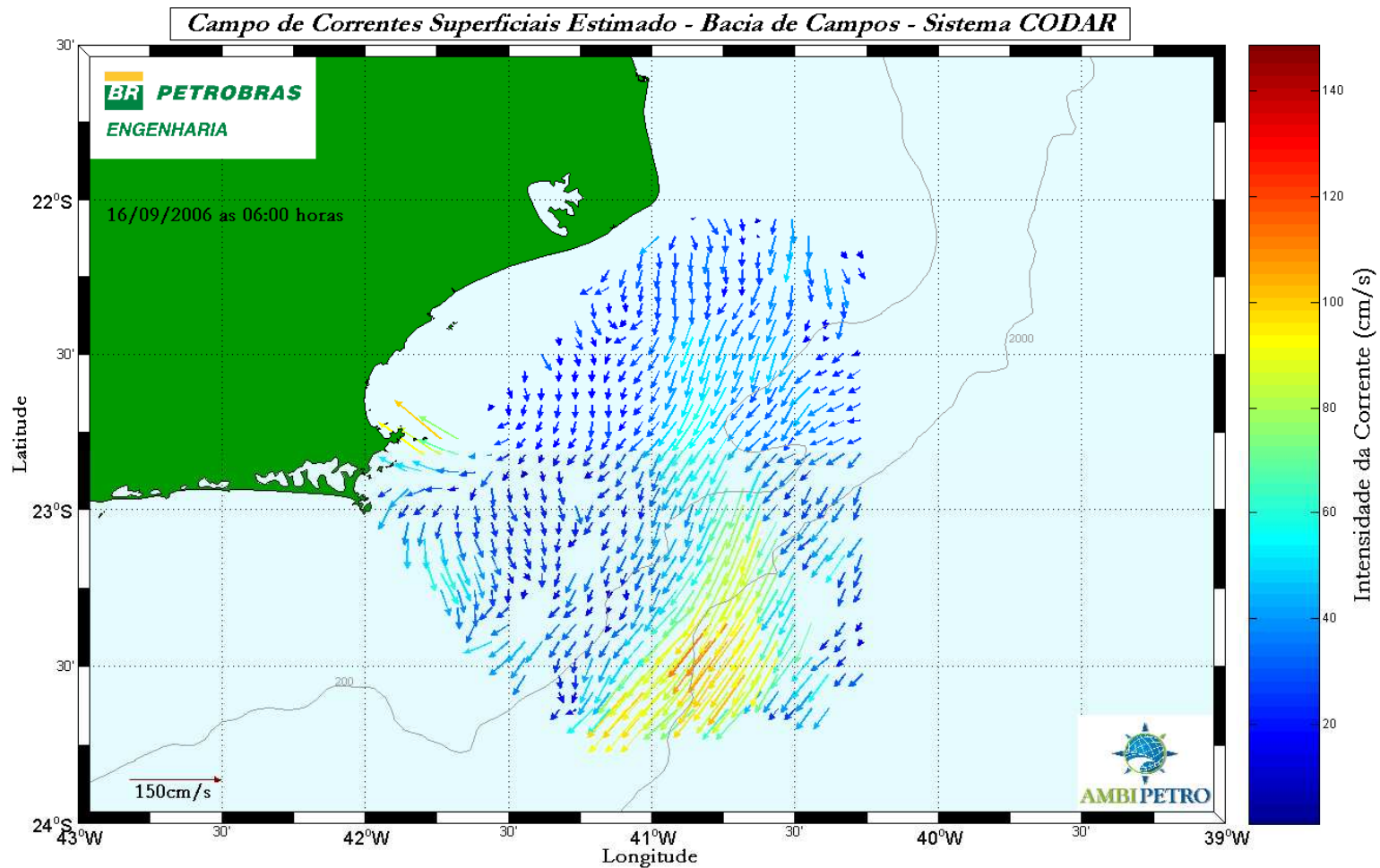


Figura 57 – Mapa estimado do campo de correntes superficiais na Bacia de Campos combinando as Estações de Farol de São Tomé e da Praia do Foguete.

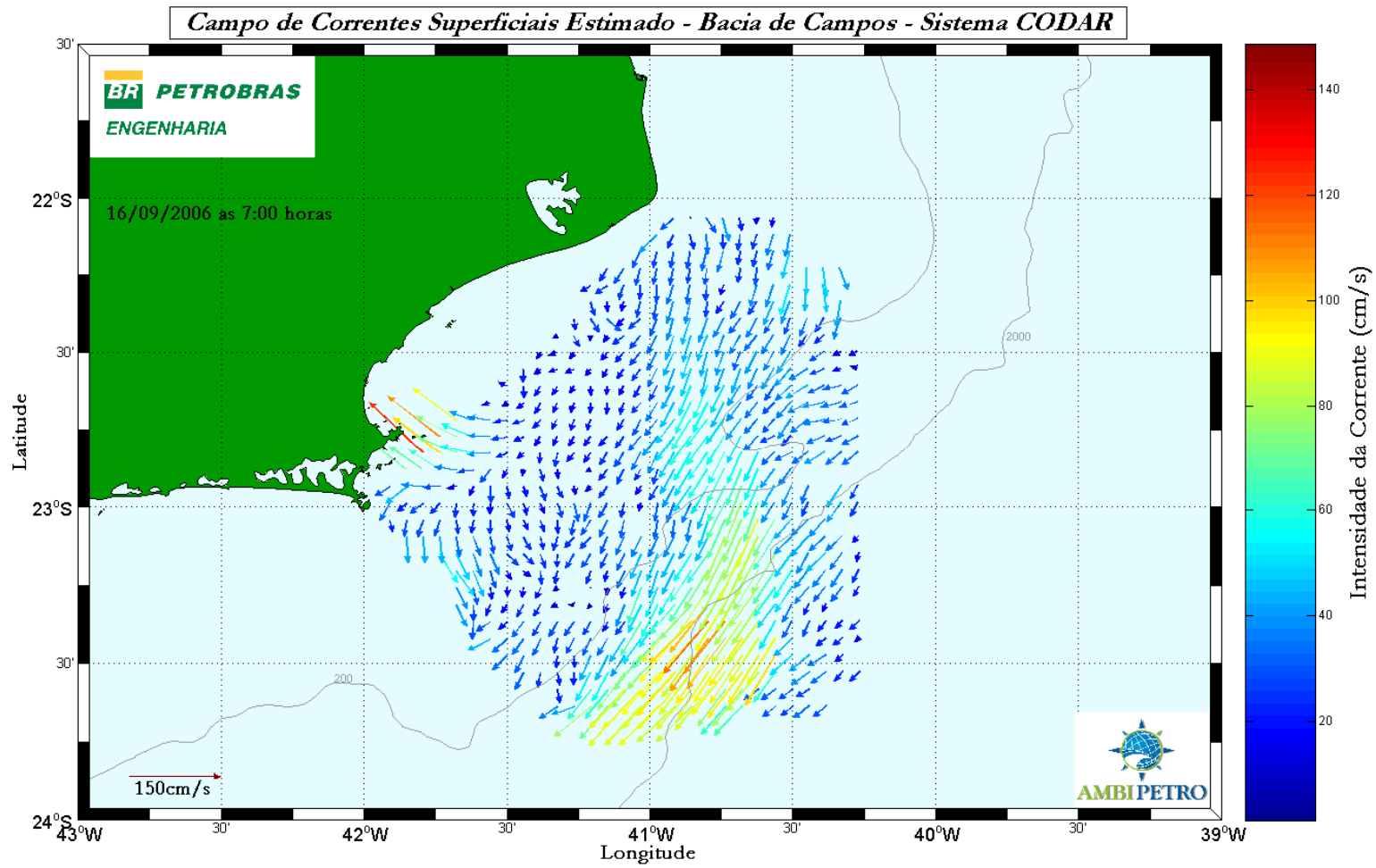


Figura 58 – Mapa estimado do campo de correntes superficiais na Bacia de Campos combinando as Estações de Farol de São Tomé e da Praia do Foguete.

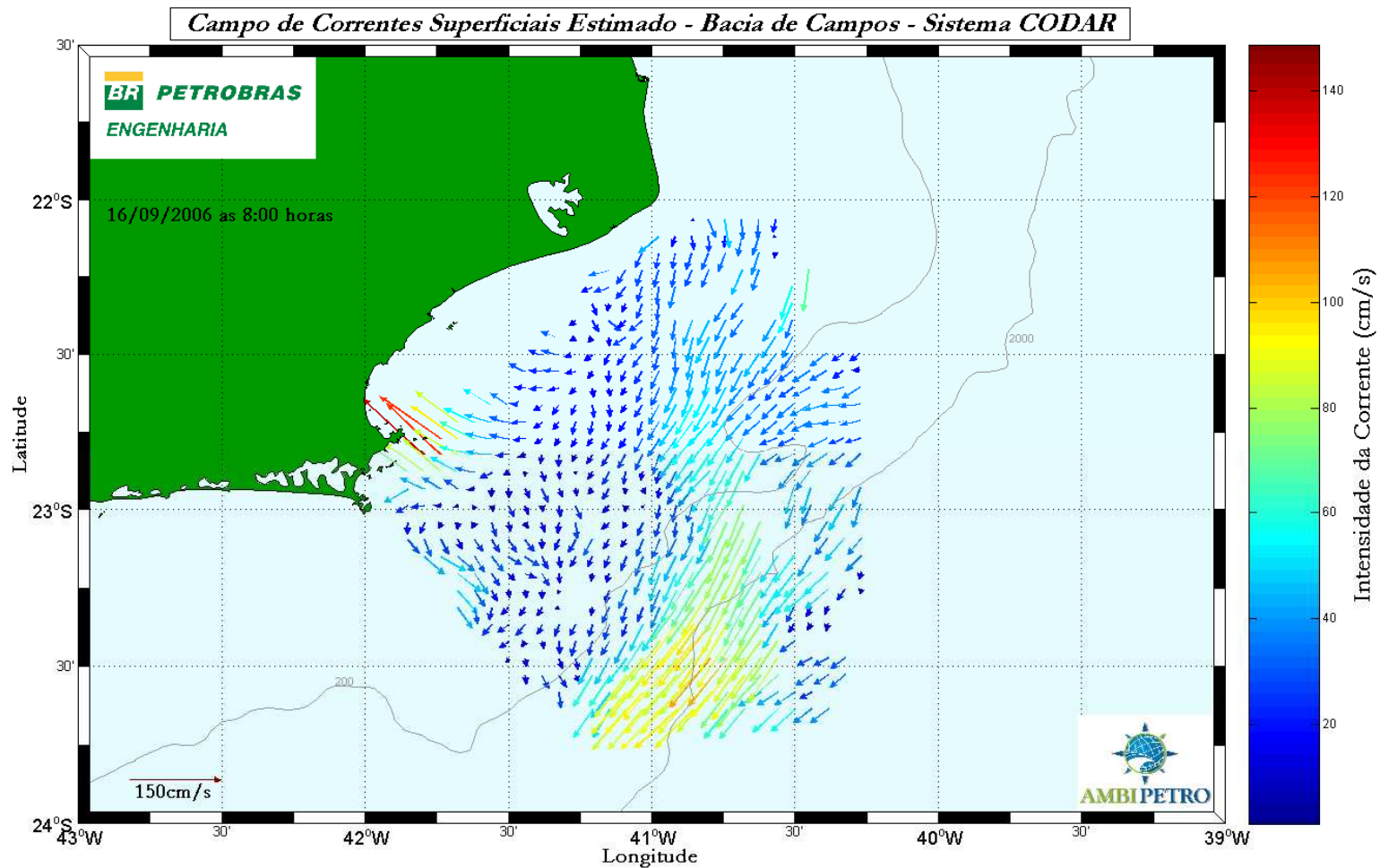


Figura 59 – Mapa estimado do campo de correntes superficiais na Bacia de Campos combinando as Estações de Farol de São Tomé e da Praia do Foguete.

5. Comparação com outros dados medidos

Para melhor ilustrar a qualidade dos dados obtidos a partir de radar de alta frequência cabe fazer uma comparação com dados medidos com outros equipamentos.

Em primeira instância pode ser feita uma comparação com dados de vento medidos por escaterômetro, que cobre uma vasta área do globo e pode dar uma visão das condições meteorológicas no período em que se estava aquisitando dados.

Os dados de direção e intensidade do vento utilizados neste trabalho, foram extraídos a partir dos dados do escaterômetro *QuikSCAT* (resolução espacial de aproximadamente 12,5 Km e 25 Km), disponíveis na página <http://podaac.jpl.nasa.gov/>, mantida pelo laboratório da NASA da PO.DAAC (*Physical Oceanography Distributed Active Archive Center*).

Estes dados foram adquiridos para as mesmas datas, e georeferenciados com os dados aquisitados nos testes do sistema CODAR na Bacia de Campos. Buscou-se nos dois conjuntos de dados *QuikSCAT* (diurno e noturno) aquele correspondente mais próximo espaço-temporalmente aos dados do CODAR. Os dados de direção do vento podem ser utilizados para visualizar a passagem de sistemas meteorológicos frontais (frente frias), e a influência destas na mudança no campo de correntes superficiais.

Ao se analisar o campo de vento entre os dias 15 e 20 de setembro de 2006 nota-se claramente que no dia 15, no período noturno, a situação era de “bom tempo” onde o vento soprava com grande intensidade vindo de nordeste (Figura 60).

No dia 16 percebe-se o início da passagem de um frente fria na região ao se observar no quadrante inferior esquerdo ventos vindo de sudoeste (Figura 61).

O campo de vento de grande intensidade apresentado nestes dois dias pode ter influenciado a intensidade das correntes apresentadas nos testes realizados na

estação de Farol de São Tomé e influenciando assim o resultado final do campo de correntes superficial estimado.

Nos dias 17, no período noturno, e no dia 18, no período diurno, o campo de vento se mostra de pouca intensidade em toda a área (Figuras 62 e 63).

Além de toda a problemática relacionada ao posicionamento da estação de Búzios, este cenário do campo de vento de pouca intensidade pode ter influenciado o mal resultado obtido nesta estação. Mas o fator intensidade do vento não se mostra tão relevante ao se analisar os dados da estação de Barra de São João, onde os testes foram realizados no dia 17 à tarde e apresentaram boa cobertura e qualidade.

Já no dia 18, no período noturno, o campo de vento aumenta a intensidade, principalmente no quadrante inferior direito, com ventos vindo de sudeste e sudoeste, em função da passagem do centro de alta pressão na região (Figura 64).

No dia 19, nos dois períodos, os ventos novamente se diminuem de intensidade e passam a vir de leste e nordeste completando o giro da passagem do sistema frontal na área (Figuras 65 e 66).

Mais uma vez o fator intensidade do vento não se mostra relevante ao se analisar os dados da estação da Praia do Foguete que apresentou excelente cobertura apesar da fraca intensidade do campo de vento presente durante os testes.

No dia 20, a situação de bom tempo é vista novamente com o campo de vento soprando predominantemente de nordeste em toda a área (Figura 67).

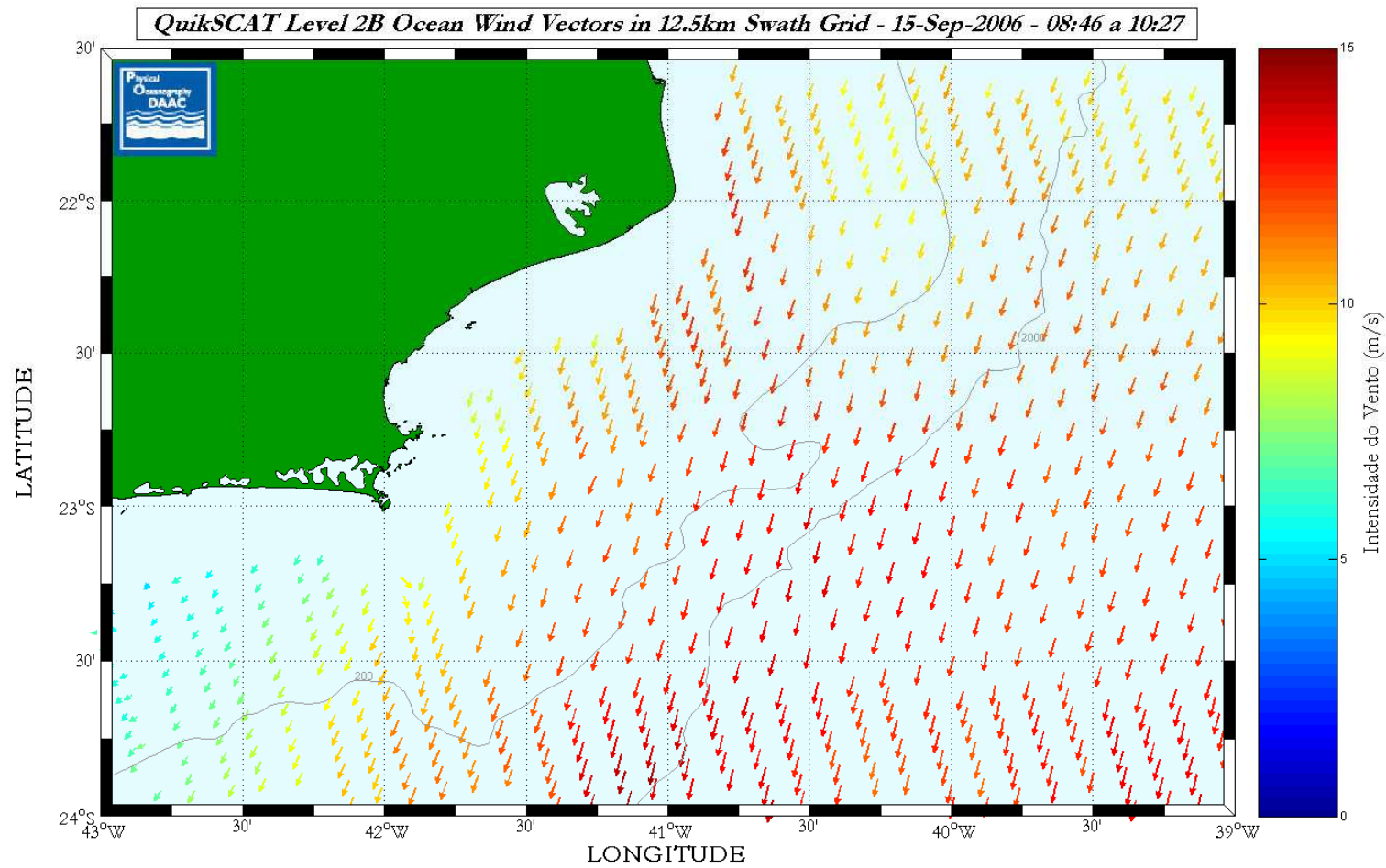


Figura 60 - Mapa do campo de vento na região da Bacia de Campos para o dia 15 de setembro de 2006 no período diurno.

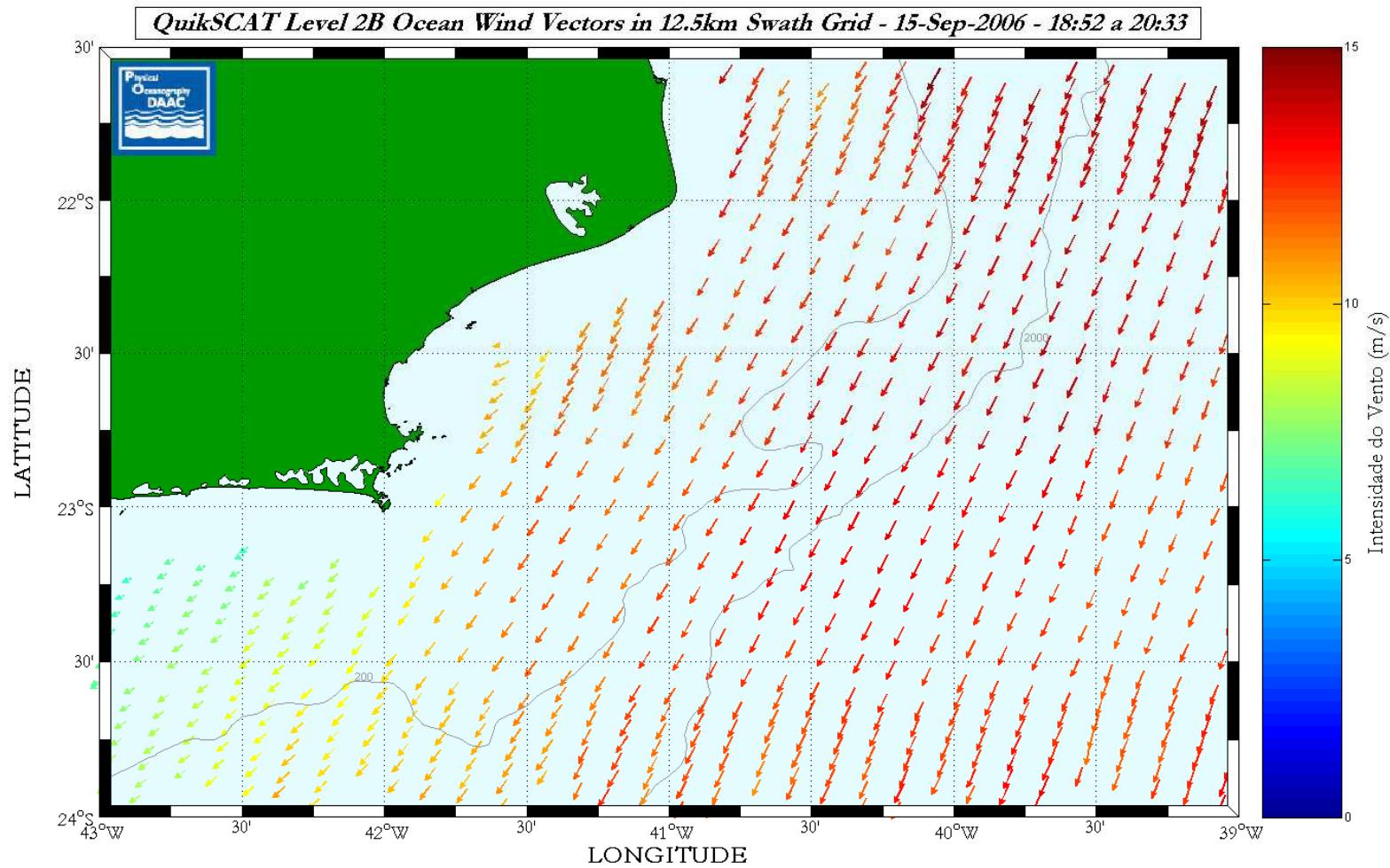


Figura 61 - Mapa do campo de vento na região da Bacia de Campos para o dia 15 de setembro de 2006 no período noturno.

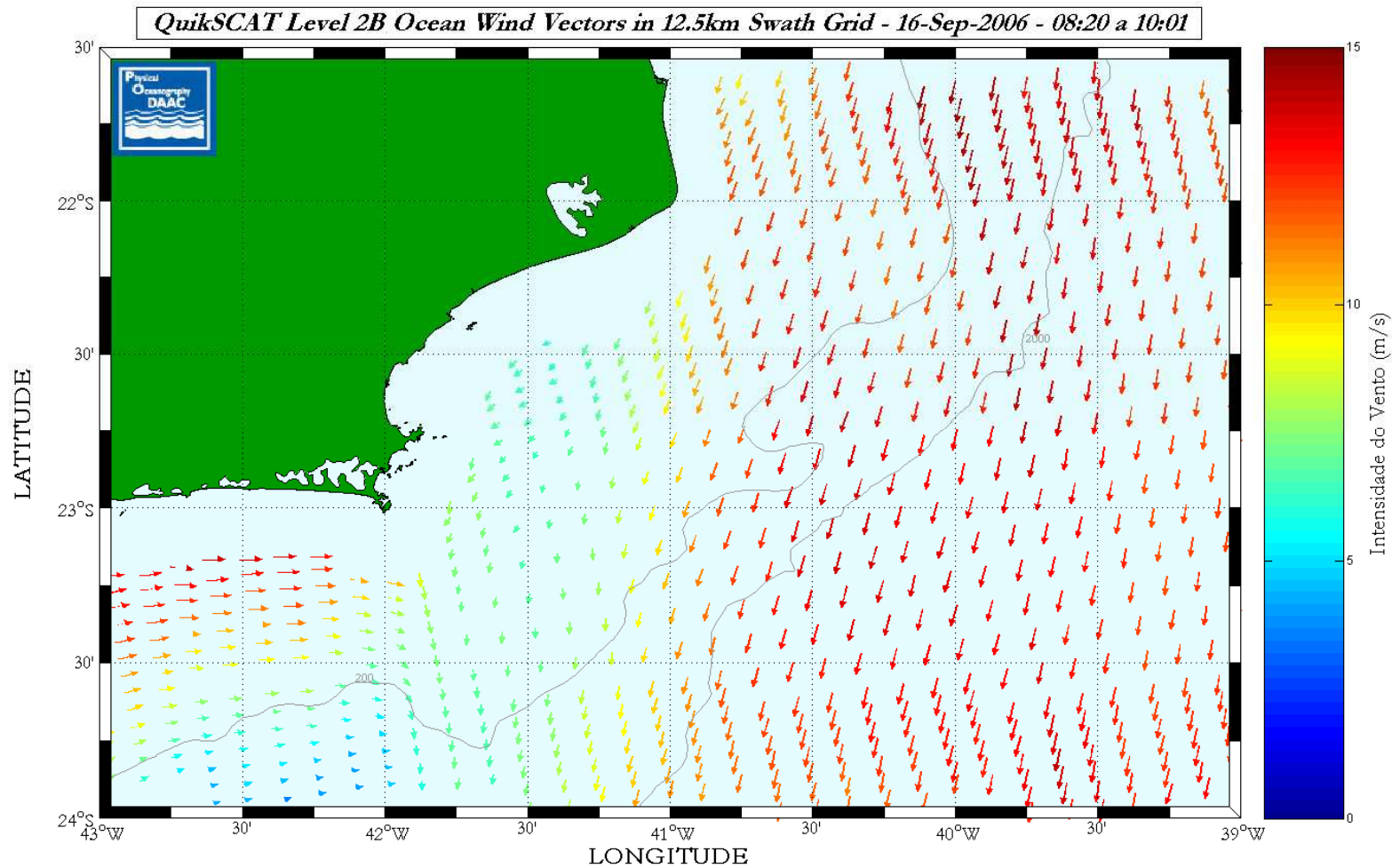


Figura 62 - Mapa do campo de vento na região da Bacia de Campos para o dia 16 de setembro de 2006 no período diurno.

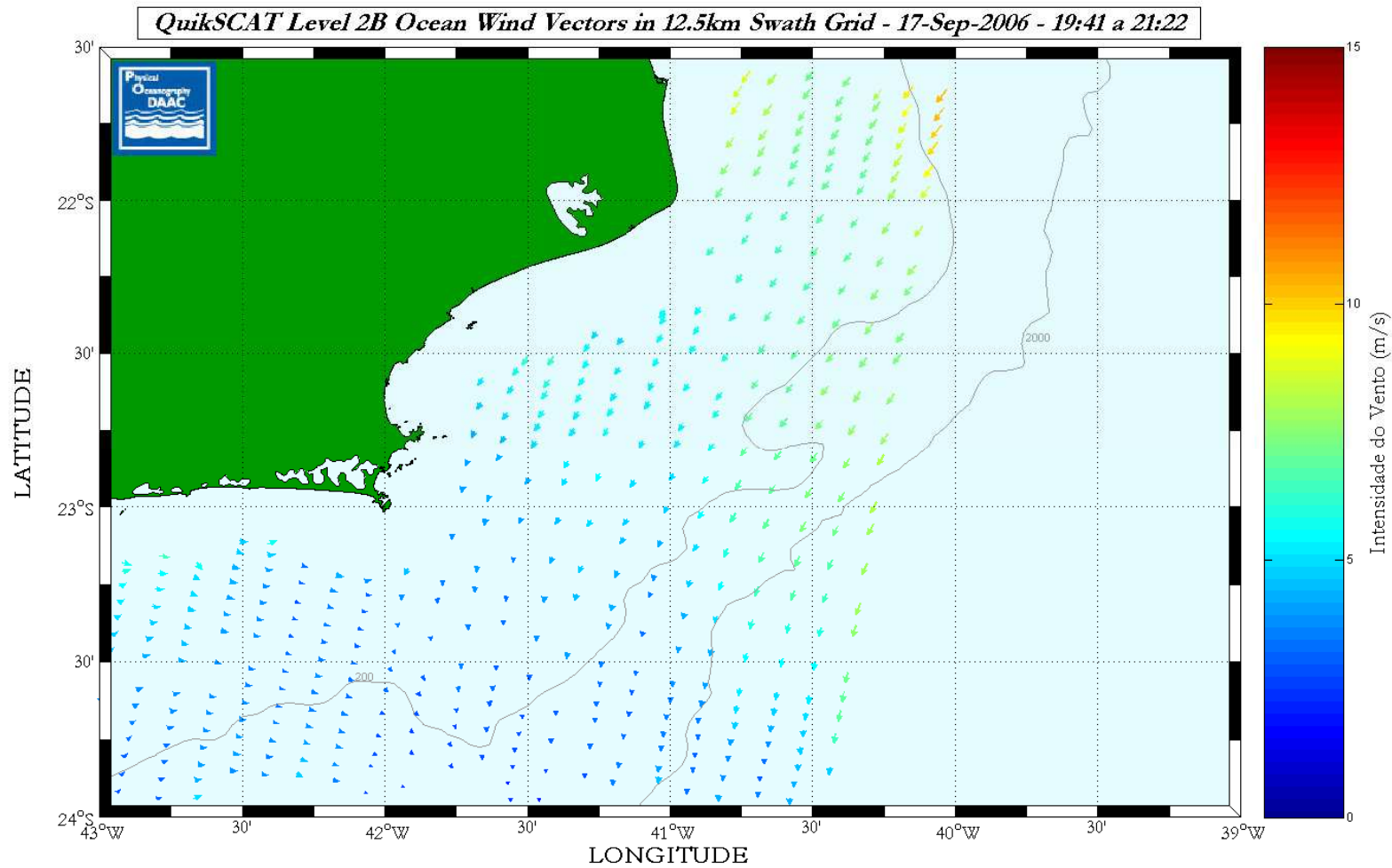


Figura 63 - Mapa do campo de vento na região da Bacia de Campos para o dia 17 de setembro de 2006 no período noturno.

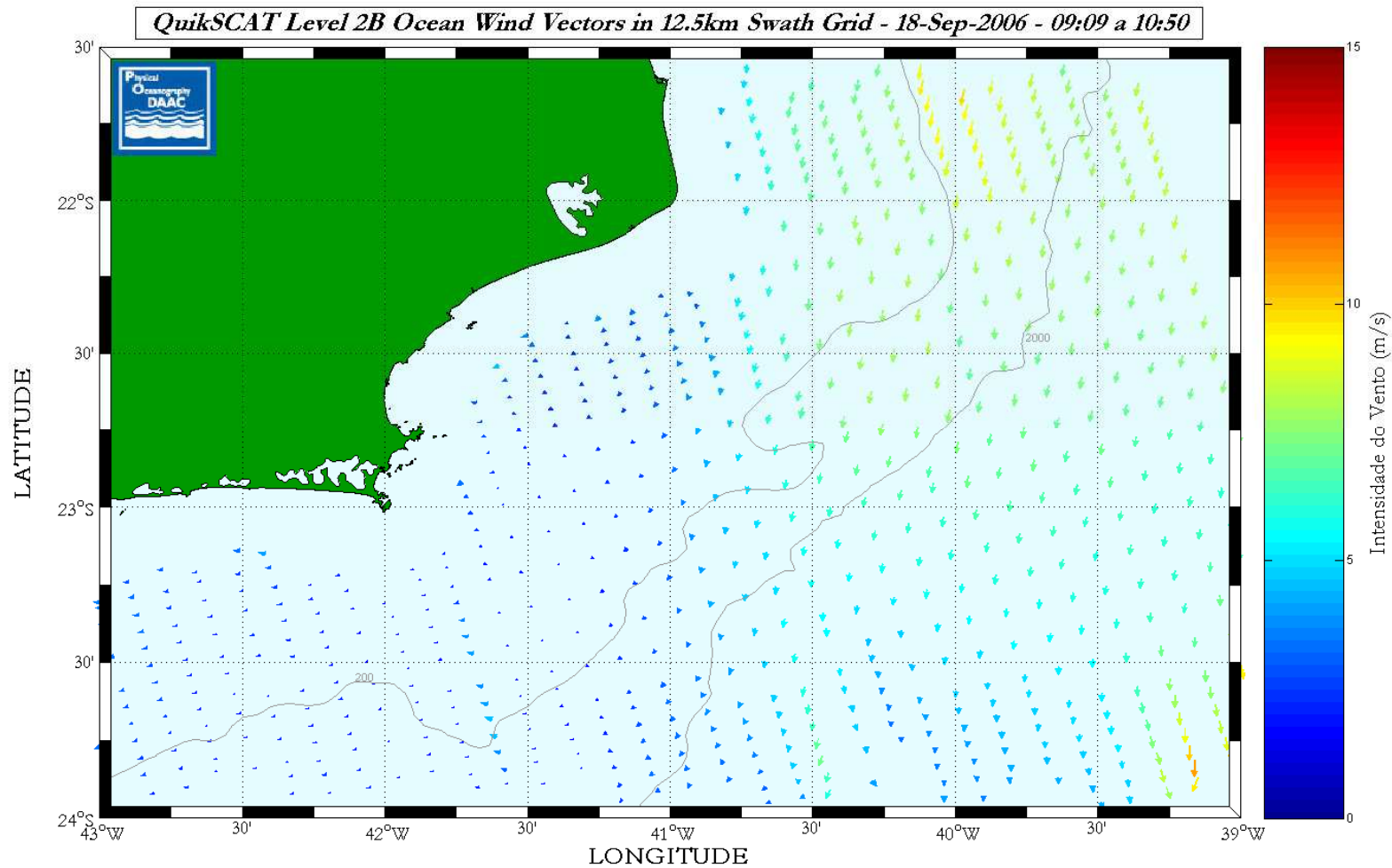


Figura 64 - Mapa do campo de vento na região da Bacia de Campos para o dia 18 de setembro de 2006 no período diurno.

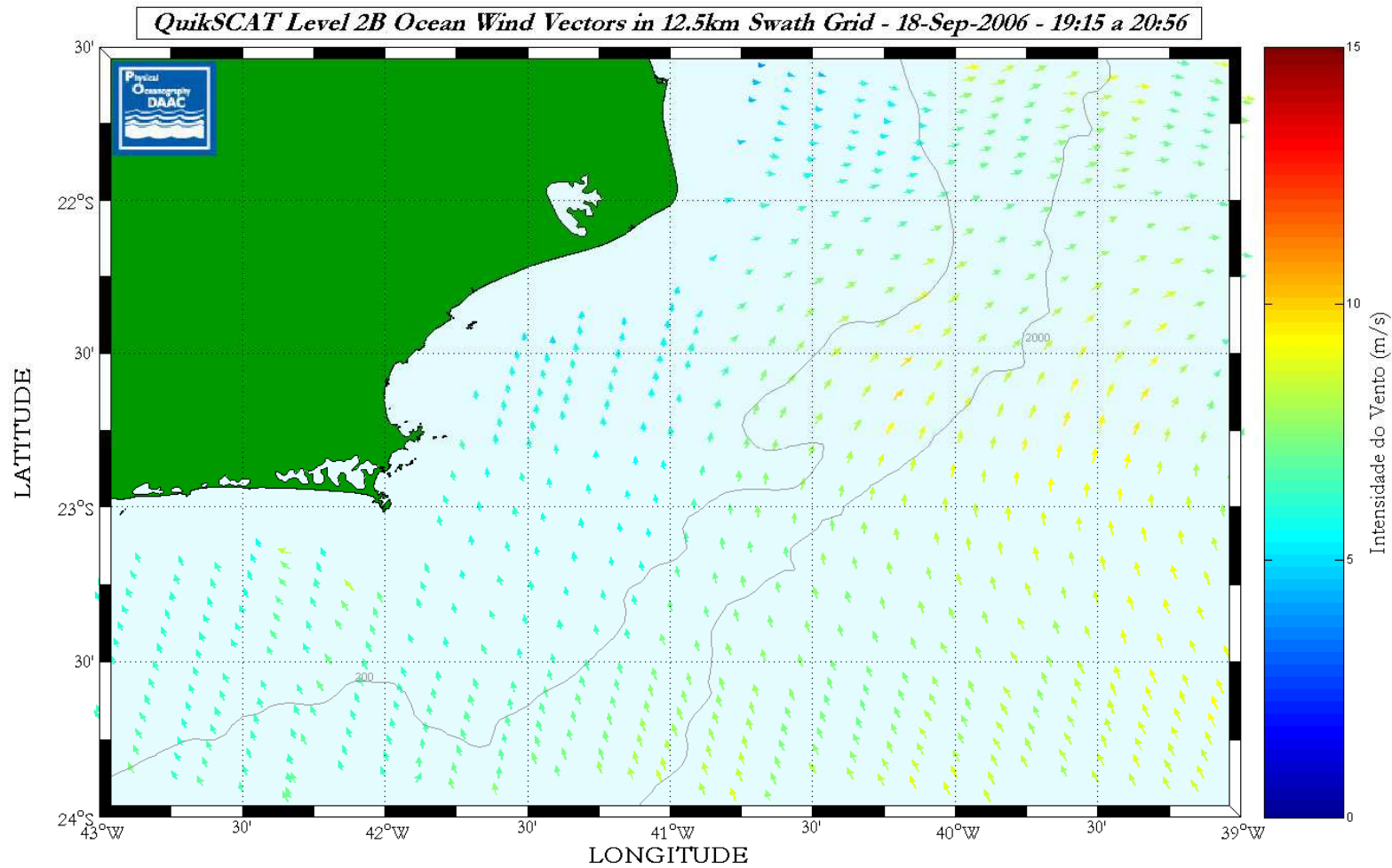


Figura 65 - Mapa do campo de vento na região da Baía de Campos para o dia 18 de setembro de 2006 no período noturno.

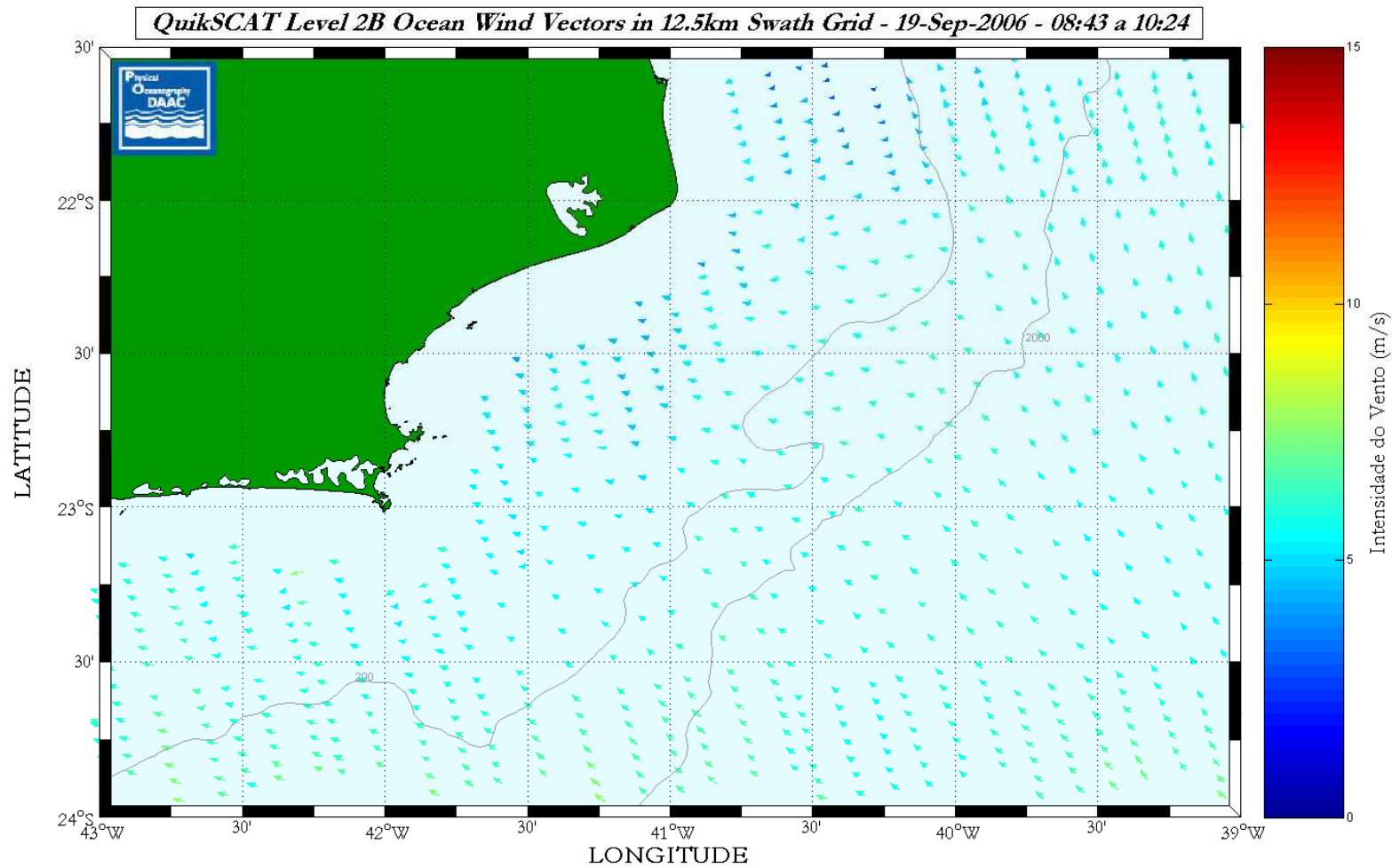


Figura 66 - Mapa do campo de vento na região da Baía de Campos para o dia 19 de setembro de 2006 no período diurno.

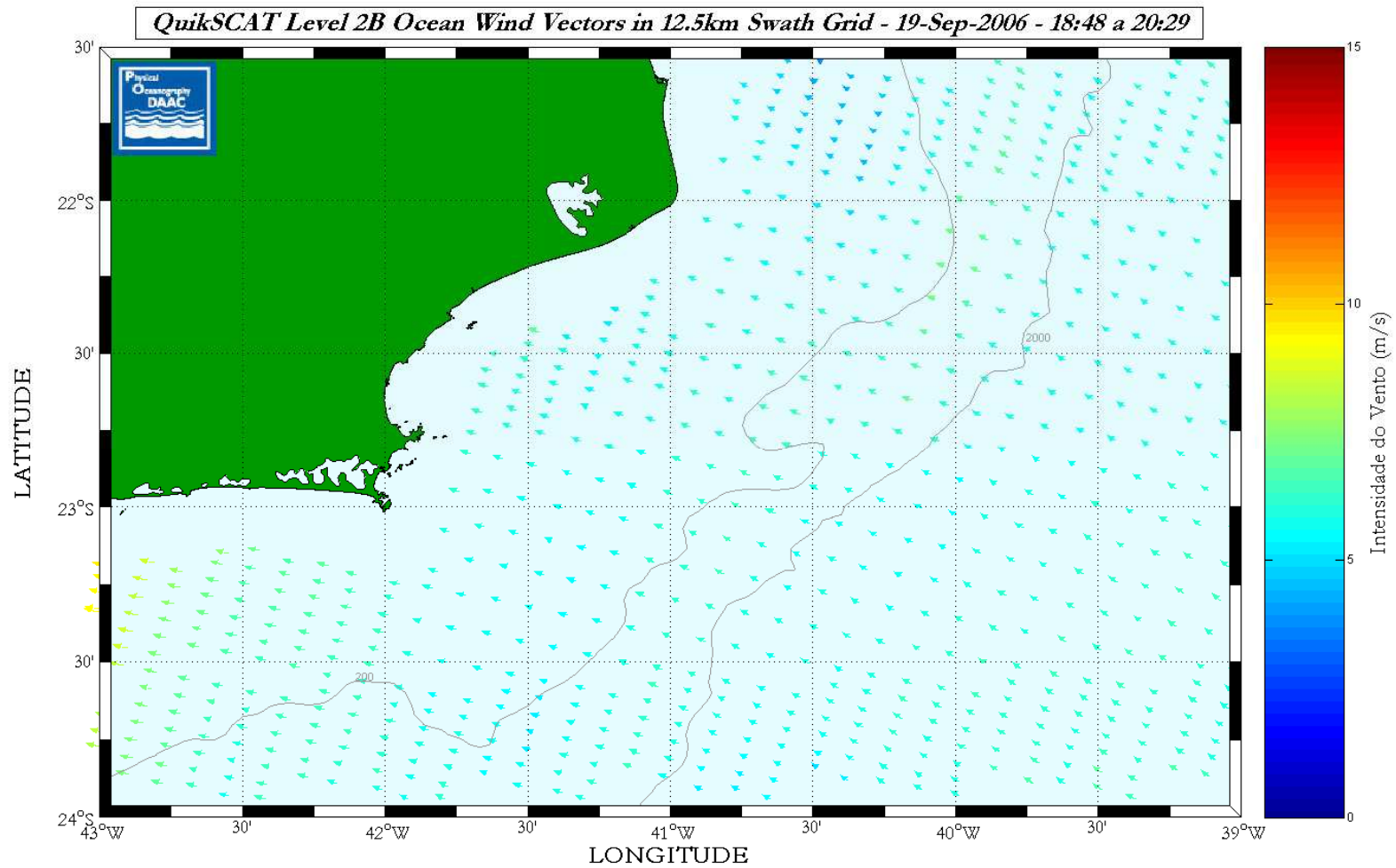


Figura 67 - Mapa do campo de vento na região da Bacia de Campos para o dia 19 de setembro de 2006 no período noturno.

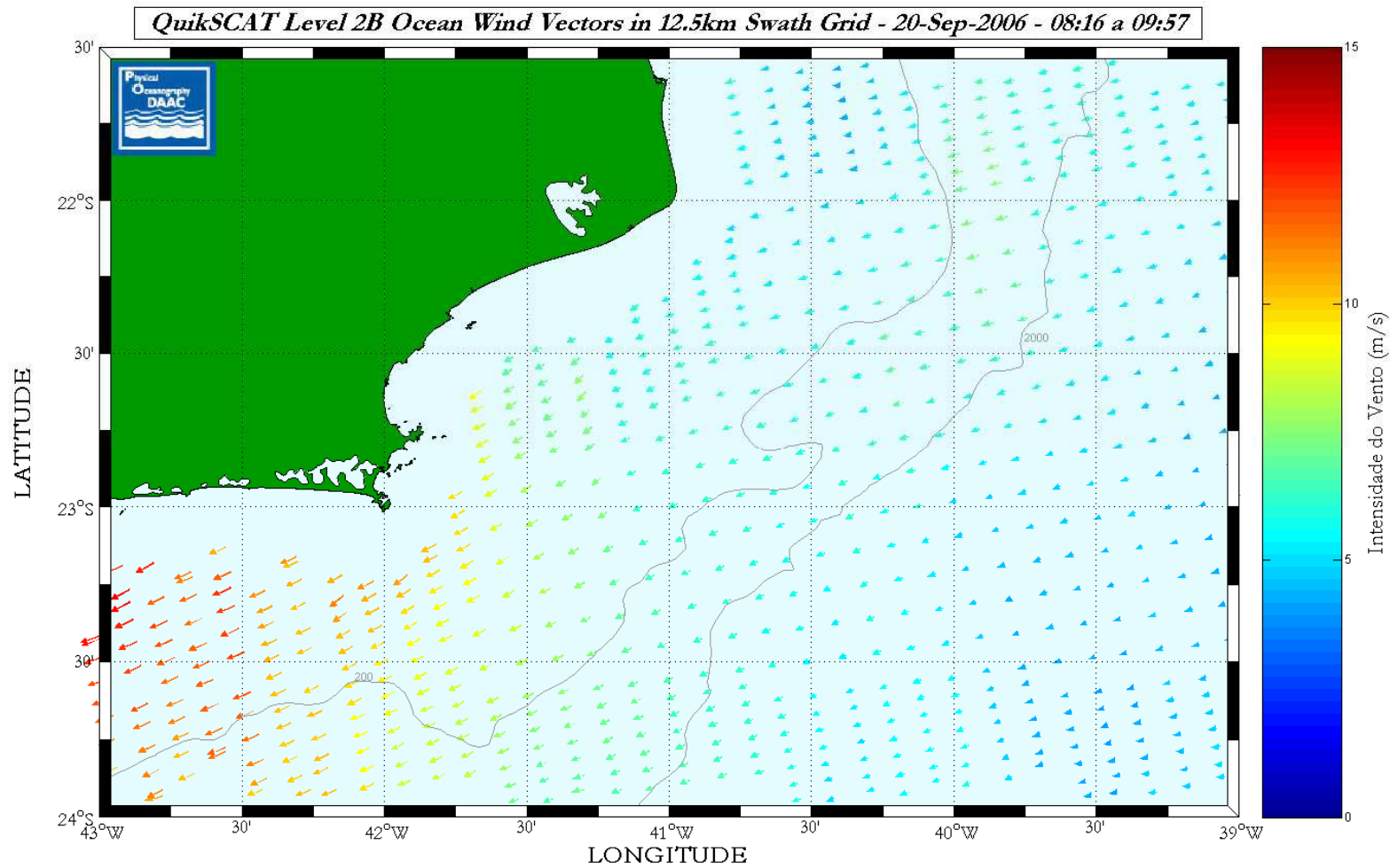


Figura 68 - Mapa do campo de vento na região da Bacia de Campos para o dia 20 de setembro de 2006 no período diurno.

6. Utilização de sistemas de radar de alta frequência no mundo

O uso de sistemas de radar de alta frequência para o monitoramento oceânico e costeiro tem se mostrado cada vez mais utilizado pela comunidade científica, bem como para a segurança de navegação e na produção/exploração petrolífera. Alguns casos de sucesso na utilização desses sistemas podem ser vistos a seguir.

- O BOON (*Bodega Ocean Observing Node* - www.bml.ucdavis.edu/boon/) é um sistema de observação oceânico e costeiro localizado no Laboratório Marinho da Baía de Bodega (Califórnia - EUA) e tem como foco o monitoramento da costa do norte da Califórnia. O BOON é um nó dentro de uma rede regional, nacional e mundial de sistemas que estão em desenvolvimento.

O objetivo do BOON é trabalhar na direção do desenvolvimento de produtos inovadores que beneficiam a sociedade e a economia através do exercício de uma relação sustentável entre os seres humanos e o oceano. Estes produtos são baseados nos dados derivados da implantação e funcionamento do estado-da-arte da tecnologia da observação oceanográfica.

O BOON opera cinco estações de radar de alta frequência localizadas na baía de Bodega, *Point Reyes*, *Salt Point* e *Point Arena*, todas na Califórnia. Os produtos apresentados, em tempo real, são campos de correntes superficiais, séries temporais de parâmetros de onda e campos de correntes superficiais acoplados a mapas provenientes do Google®.

- A Universidade de Rutgers (New Jersey / New York - EUA) por meio de seu Laboratório de observação oceânica costeira (Coastal Ocean Observation Laboratory – COOL - <http://marine.rutgers.edu/cool/>) opera

um sistema de radar de alta frequência fazer o monitoramento do campo de correntes superficiais da costa de Nova Iorque e Nova Jersey.

O COOL usa um sistema de longo alcance que consiste em quatro estações ao longo da costa de Nova Jersey. Estas estações são localizadas em *Sandy Hook*, *Loveladies*, *Tuckerton* e *Wildwood*. Essa rede de estações provê medições do campo de corrente superficial desde a costa até a área da quebra da plataforma continental, aproximadamente 100 km da costa.

Dois sistemas de médio alcance também são utilizados pelo COOL e consistem em duas estações instaladas em *Brant Beach* e *Brigantine* para o projeto LEO-15 (*Long-term Ecosystem Observatory*) e mais duas estações instaladas em *Sandy Hook* (NJ) e *Breezy Point* (NY) para dar suporte as pesquisas realizadas no rio Hudson. Estes sistemas disponibilizam mapas de correntes superficiais de maior resolução, porém de menor alcance aproximadamente 20 km.

Como produto final de seu trabalho o COOL apresenta o acoplamento de dados coletados por satélites, como temperatura superficial da água, dados coletados por radares de alta frequência e dados de equipamentos oceanográficos fundeados, bem como dados em tempo real do campos de correntes superficiais coletado pelos radares de alta frequência.

- O Programa Vigilância Costeira Oceanos Correntes (*Coastal Oceans Currents Monitoring Program - COCMP*) é uma colaboração multi-institucional, interinstitucional com o objetivo de monitorização integrada das correntes no litoral oceânico.

O principal objetivo do COCMP é fornecer informações essenciais para as agências responsáveis para a gestão da qualidade das águas costeiras.

No entanto, o núcleo de tecnologia do COCMP fornece informações sobre a circulação das águas superficiais. O movimento da superfície do mar desempenha um papel central no transporte de materiais orgânicos e inorgânicos (naturais e poluentes) e de distribuição das larvas de animais marinhos.

As informações do COCMP sobre circulação superficial podem ser usadas para monitorar e prever trajetórias de derrames de petróleo ou de esgoto, mas este sistema também é usado para: ajudar a gerir da pesca marítima; desenvolver parques marinhos e áreas de conservação ; melhorar os esforços para restabelecer as migrações do salmão e da truta (*steelhead*) hoje ameaçadas; responder aos perigos naturais como tempestades súbitas e eventos de erosão costeira; aumentar a precisão nas previsões meteorológicas e climáticas; aumentar da eficiência da navegação marítima; fornecer informações úteis para a região costeira oceânica e utilizações recreativas, tais como barcos de recreio e surf; ajudar a Guarda Costeira em operações de busca e salvamento; avaliar os impactos do aquecimento global sobre habitats costeiros.

- O SDCOOS (*San Diego Coastal Ocean Observing System*) oferece um portal, em tempo quase real, para dados oceanográficos, meteorológicos, e de qualidade da água para a região do litoral de San Diego na Califórnia. Fundado no âmbito da iniciativa de praias limpas, o sistema integra uma série de tecnologias emergentes utilizadas de sensoriamento oceanográfico e ambiental em uma rede regional de sensoriamento para prover uma maior consciência sobre o meio ambiente litoral. As parcerias estabelecidas com este programa têm permitido uma ligação direta entre as informações geradas por este sistema de observação e uma ampla

audiência dos utilizadores finais, incluindo as autarquias locais e agências regionais, bem como o público em geral. Os produtos apresentados neste projeto são similares aos mencionados anteriormente.

- A Faculdade Ciências Oceânicas e Atmosféricas (*College of Oceanic and Atmospheric Sciences – COAS*) da Universidade Estadual de Oregon - EUA (*Oregon State University - OSU*) por meio do laboratório de mapeamento de correntes oceânicas (Ocean Current Mapping Lab - <http://bragg.oce.orst.edu/>) também mantém um sistema de monitoramento de correntes superficiais com radar de alta frequência com produtos similares aos mencionados anteriormente.
- O Projeto SALMON (*Sea-Air-Land Modeling and Observing Network*) está localizado na Universidade do Alasca em *Fairbanks*. Em cooperação com outros institutos, o projeto SALMON proporciona de forma contínua, e em tempo quase real, observações de parâmetros oceanográficos físicos e liga estes dados à modelos numéricos para fornecer previsões oceânicas da mesma maneira como são feitas as previsões meteorológicas.

Atualmente o SALMON é especializado mapeamento de corrente superficial com radar de alta frequência, fundeios oceanográficos, e informações provenientes de satélites. As observações e previsões provenientes deste projeto, buscam melhorar e proteger os meios de subsistência de pessoas que usam e dependem de águas do Alasca e de seu ecossistema para a alimentação, sustento, recreação e transportes.

O Projeto SALMON opera quatro sistemas de radar de alta frequência no Alasca. Durante o verão de 2005 e 2006, dois radares estavam localizados no Oceano Ártico perto da baía de *Prudhoe* no Mar de *Beaufort*. Depois estes sistemas vieram a congelar-se às margens do Mar de *Beaufort*, em outubro de 2006, o sistema foi movido para baía de *Cook* até novembro de 2007. O projeto também mantém dois radares no canal *Prince William* que encontra-se atualmente desativado para o Inverno 2007/2008.

Este sistema de radar de alta frequência já proporcionou novos conhecimentos sobre a circulação do canal de *Prince William*, bem como informações sobre as correntes das marés na região.

Todos estes projetos estão vinculados ao *HFRadar Network* (HFRNet) que foi desenvolvido para gerenciar e distribuir em tempo quase real os campos de corrente superficial coletados por uma rede de sistemas de radares de alta frequência distribuída ao longo da costa Norte-americana. A HFRNet disponibiliza confiáveis telemetria, arquivamento e processamento integrado dos dados para uma lista crescente de produtos de tempo quase real da mesma forma que o crescente número de utilizadores da comunidade científica. A HFRNet é apoiada pelo Sistema Integrado de Observação Oceânica (*Integrated Ocean Observing System* - IOOS).

7. Conclusões e recomendações

Os testes preliminares de desempenho do sistema de radar de alta frequência foram realizados nos seguintes locais: Farol de São Tomé (local da antiga estação ARGO da Petrobras); Barra de São João; Elevado de João Fernandes (Búzios); e Praia do Foguete (Cabo Frio)

O Mapa Total de Correntes apresentado nas Figuras 55 a 59 mostram que a cobertura obtida com o sistema, na Bacia de Campos, a partir de estações costeiras situadas em: Farol de São Tomé – antiga estação ARGO da Petrobras (Campos dos Goytacazes) e Praia do Foguete (Cabo Frio) é bastante satisfatória para o monitoramento de correntes oceânicas superficiais. Estas estações foram escolhidas como as melhores para a instalação definitiva do sistema SeaSonde Long Range, na Bacia de Campos.

O alcance do sistema mostrou-se compatível com o anunciado pelo fabricante atingindo uma distância de 200 km da costa.

A inclusão de uma terceira estação costeira, em Barra de São João, não será capaz de prover dados costeiros para o sistema porquanto as demais estações costeiras não cobrem satisfatoriamente a área. Entretanto, é certo que tal estação contribuiria para uma melhor qualidade (diminuição do desvio padrão) na área em que houver interseção das 3 estações costeiras.

Os testes foram considerados de alto nível técnico e de extrema validade ao fim a que se destinavam, promovendo uma decisão balizada a cerca da posição final das estações costeiras do Projeto CODAR, ora em curso, para monitoramento de correntes oceânicas na Bacia de Campos.

Devido à pequena quantidade de dados existentes durante os testes preliminares, este trabalho não pôde apresentar uma análise de grande porte, com

parâmetros estatísticos tais como desvio padrão, variância, análise de frequência por histogramas, entre outros.

Para se alcançar este objetivo, fica como sugestão, para trabalhos futuros, que seja feita a coleta e análise de um maior volume de dados obtidos através de um sistema de radar de alta frequência, na Bacia de Campos e assim também se poder comparar estes dados com um maior volume de dados medidos com outros equipamentos.

8. Referencias bibliográficas

Barrick, D. E. (1972a): First-order theory and analysis of MF/HF/VHF scatter from the Sea IEEE Trans. Antennas Propagat. AP-20, 2-10.

Barrick, D. E. (1972b): Remote sensing of sea-state by radar. in Remote Sensing of the Troposphere, ed. V. E. Derr 12-1 to 12-46.

Barrick, D.E., B.J. Lipa, & R.D. Crissman, (1985) "Mapping surface currents with CODAR", Sea Technology, October, pp. 43-48.

Barrick, D.E. & B.J. Lipa (1986), An evaluation of least-squares and closed-form dual-angle methods for CODAR surface-current applications, IEEE J. of Oceanic Engr., vol. OE-11, pp. 322 - 326.

Fernandez, D.M., H.C. Graber, J.D. Paduan, & D.E. Barrick, (1997): Mapping wind direction with HF radar. Oceanography, 10, 93-95.

Ha, E.C., 1979: "Remote sensing of ocean surface current and current shear by HF backscatter radar". Ph.D. Dissertation, Stanford University, Tech. Rep. D415- 1.

Hashimoto, N, L. R. Wyatt & S. Kojima, (2003). Verification of a Bayesian method for estimating directional spectra from HF radar surface backscatter. Coastal Engineering Journal, 45, 255-274.

Hasselmann, K., (1971): Determination of ocean wave spectra from Doppler ratio return from the sea surface. Nature Phys. Sci., 229, 16-17.

Hasselmann, K. e Hasselmann, S., (1991), "On the Nonlinear Mapping of an Ocean Wave Spectrum Aperture Radar Image Spectrum and Its Inversion" Journal of Geophysical Research, v.96, n. c6(Jun), pp. 10.713-10.729.

Heron, M.L., P.E. Dexter, and B.T. McGann, 1985: Parameters of the air-sea interface by high-frequency ground-wave HF Doppler radar. Aust. J. Mar. Freshwater Res., 36,655-670.

Hisaki, Y., (1996). Nonlinear inversion of the integral equation to estimate ocean wave spectra from HF radar. *Radio Sci.* 31, 25-39.

Hisaki, Y., (1999). Correction of amplitudes of Bragg lines in the sea echo Doppler spectrum of an ocean radar. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 16, 1416-1433.

Howell, R. & J. Walsh, (1993). Measurement of ocean wave spectra using narrow-beam HF radar. *IEEE J. Eng., OE-18*, 296-305.

Kinsman, B., (1965): *Wind Waves*. Ch. 6. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

Lipa, B. J. & D. E. Barrick, (1982a). CODAR measurements of ocean surface parameters at ARSLOE – preliminary results, *IEEE Oceans '82 Conference Record*, 901-906.

Lipa B. J. & D. E. Barrick, (1982b), Analysis methods for narrow-beam high-frequency radar sea echo: NOAA Technical Report ERL 420-WPL 56.

Lipa B. J. & D. E. Barrick, (1983): Least-squares methods for the extraction of surface currents from CODAR crossed-loop data: application at ARSLOE: *IEEE Journal of Ocean Engineering*, JOE-8 , 226-253.

Lipa B. J. & D. E. Barrick, (1986): Extraction of sea state from HF radar sea echo: Mathematical theory and modeling: *Radio Science* 21, 81-100

Lipa B. J. & B. Nyden, (2006): Directional Wave Information from the SeaSonde: *IEEE Journal of Ocean Engineering*, JOE-8, 226-253.

Lyzenga D. R., (1991), "Interaction of Short Surface and Electromagnetic Waves with Ocean Fronts", *Journal of Geophysical Research*, v. 96, n. c6(Jun), pp. 10.765-10.772.

NOAA, 2004, *Synthetic Aperture Radar Marine User's Manual* . Washington D.C. , Chris Jackson and John Apel Editors.

Ochadlick, A. R., Cho, P. & Evans-Morgis, J., 1992, Synthetic Aperture Radar Observations of Currents Colocated With Slicks, *Journal of Geophysical Research*, v. 97, n. c4(Apr), pp 5325-5330.

Robinson I.S., (1985), *Satellite Oceanography, An Introduction for Oceanographers and Remote Sensing Scientists*. 1 ed. England, Ellis Horwood Limited.

Shearman, E.D.R., (1981): Remote sensing of ocean waves, currents and surface winds by deka metric radar. *Remote Sensing in Meteorology, Oceanography and Hydrology*. A.P. Cracknell, ed. Ellis Horwood, London, 312-335.

Schmidt, Ralph O. (1986): "Multiple Emitter Location and Signal Parameter - Estimation". *IEEE transactions on antennas and propagation*, vol. ap-34, no. 3, march 1986.

Wyatt L. R., (1987). Ocean wave parameter measurements using a dual-radar system: a simulation study. *International Journal of Remote Sensing*, 8, 881-891.

Wyatt L. R., (1988). Significant waveheight measurement with HF radar: *International Journal of Remote Sensing*, 9, 1087-1095.

Wyatt L. R., (1990). A relaxation method for integral inversion applied to HF radar measurement of the ocean wave directional spectrum. *International Journal of Remote Sensing*, 11, 1481-1494.

Wyatt, L. R., (1995). High order nonlinearities in HF radar backscattering from the ocean surface. *IEE Proc. Radar, Sonar Navig.*, 142, 293-300.

Wyatt L. R. & L. J. Ledgard, (1996). OSCAR wave measurements - some preliminary results. *IEEE Journal of Ocean Engineering*, 21, 64-76.