

Thalles Augusto Abreu Araújo

**Relação entre ondas de Rossby e variações na
concentração de clorofila no Atlântico Sul**

Monografia de Bacharelado apresentada ao
Instituto Oceanográfico da Universidade de São
Paulo como parte dos requisitos para obtenção do
grau de Bacharel em Oceanografia.

Orientador:

Prof. Dr. Paulo Simionatto Polito

São Paulo

Novembro de 2013

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO OCEANOGRÁFICO

**Relação entre ondas de Rossby e variações na
concentração de clorofila no Atlântico Sul**

Thalles Augusto Abreu Araújo

Monografia de Bacharelado apresentada ao Instituto Oceanográfico da
Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para obtenção do grau de
Bacharel em Oceanografia.

Aprovada em __/__/____ por

Prof. Dr. Paulo Simionatto Polito

Prof(a). Dr(a).

Prof(a). Dr(a).

São Paulo
Novembro de 2013

*A meus pais,
por todo o amor e dedicação
que me permitiram chegar até aqui.
É tudo para vocês, de vocês.
Foram vocês quem fizeram.*

Agradecimentos

Em primeiro lugar, quero agradecer, óbvio, a meus pais, por todo o amor, dedicação e diálogo, por nunca terem deixado me faltar comida, teto e educação. Eu sou o que eles me permitiram ser. Eu devo tudo a eles. Lhes daria o mundo. Tudo o que tenho pertence a eles também. Papai, muito obrigado por sempre me incentivar a fazer exatamente o que eu queria fazer ("*Your quest is your purpose, go on.*" – *In Quest For – Avantasia*). Mamãe, muito obrigado por me admirar tanto e deixar sempre isso tão claro, isso me faz muito bem. ("*Young and sweet, only seventeen.*" – *Dancing Queen – ABBA*). Eu os amo muito, admiro muito a história de vocês e tenho muito, muito orgulho de vocês ("*You can content to let me shine, you always walk a step behind.*" – *The Wind Beneath My Wings – Sonata Arctica*).

Agradeço também à minha irmã, Thalysa, pela amizade, a alma, de todas, que mais se parece comigo. Eu me orgulho *muito (!)* dela e sei que você sempre estará crescendo, porque sempre estará pensando. É a nossa maior característica comum: nós *pensamos* muito. Eu *amo* conversar com ela. (Ao som instrumental de *Impressionism – Bernard Fevre*)

Agradecimento deveras (!) especial para o meu orientador, Paulo Simionatto Polito, pela orientação extremamente presente e de altíssima qualidade, de 0 a 10, até hoje, nota 16 (um ponto extra para cada vez que ele foi mega camarada comigo). Admito que sou muito grato pelo fato de ele entender (mais do que ele gostaria, eu aposto) sobre relacionamentos à distância e compreender as minhas eventuais trocas de namoro à distância por trabalho à distância. Eu aprendi muito com ele e sou muito grato por toda a dedicação, camaradagem e amizade.

Agradecimentos também ao pessoal do LOS, o Laboratório de Oceanografia por Satélites. Wandrey, Sebastian, Carine, Patola, Bia, Guilherme, veteranos do LOS. Sou muito grato pelas frequentes ajudas computacionais e pelas conversas, algumas vezes indo até mais tarde do que gostaríamos. Agradecimento especial à professora Olga, pela amizade, pelas eventuais ajudas e pela energia boa que ela espalha pelo laboratório. Aproveito o parágrafo também para citar os veteranos do LaDO, o Laboratório de Dinâmica Oceânica. Brócolis (mesmo que por muito pouco tempo), Biló, Mestre, Cascão, Márcio, César (!) e Filipe. Passei muito tempo da minha graduação neste laboratório e aprendi bastante, muito graças a eles.

Agradeço aos meus amigos, os Jøkers! Os Jøkers são os meus amigos mais sólidos que

me acompanham desde 2007. Agradeço por todos os momentos **grandes** (e pequenos) que com certeza me ajudaram a me construir. Lucão, Gobatto, GG, Guigas, Ramai, Barossi e Gaba, estamos ficando velhos. A amizade verdadeira de vocês é completamente indispensável para o que eu sou hoje e para a minha vida! Valeu! (E que venha Marekas!)

Quero agradecer aos Meusprimos! Quero agradecer ao Philipe, Meuprimo que está agora do outro lado do mundo sendo um exemplo pra mim e pra todos os que não acreditaram nele, que antes de ir me falou para eu fazer o que eu quiser ("*Life is waiting for the ones who love to LIVE, and IT'S NOT A SECRET!*" – *Victoria's Secret – Sonata Arctica*). Vou sentir falta dele gritando "É meu primo!" quando chamarem meu nome na colação de grau. Primo, você é um irmão sem tamanho. Te admiro muito e aprendo muito com você. Quero agradecer ao Lucão, Meuprimo que agora está na cidade vizinha, também atolado com o fim de semestre, pela amizade infinita e eterna, pelo amor, pela consideração e pelas frequentes ligações só para saber como eu estou e dizer que está com saudades ("*Irmãos do mesmo Cristo, quero e não desisto.*" – *Lugar Ao Sol – Charlie Brown Jr.*). Não vou sentir falta dele gritando "É meu primo!" quando chamarem meu nome na colação de grau, porque ele *vai* estar lá. Tenho muitos motivos para sentir muito orgulho de vocês dois. ("*PP na Metô, Engenharia na FEI, Oceano na USP!*" – *Três primos mergulhando sete ondas durante o Réveillon de 2008 para 2009*)

Um abraço apertado e carinhoso também pra Lu, que eu já chamo de prima. ("*Não tenho medo do escuro, mas deixe as luzes acesas.*" – *Tempo Perdido – Legião Urbana*)

Quero agradecer à minha prima Ângela, a única outra uspiana da família até o momento, por ter me incentivado nessa vida de USP e sempre ter perguntado como estavam indo as coisas por aqui. Sempre que vou tomar um café no IME me lembro de você.

Quero agradecer à minha prima Isabel, ou, mais carinhosamente, Isa, que descobri que existe há um ano e conheci há um mês, a única outra oceanógrafa da família (geóloga, na verdade, mas tem formações e trabalha com oceanografia também), por estar constantemente me incentivando e ativamente me motivando dentro da oceanografia. Isa, eu adorei te conhecer!

Quero agradecer, de maneira geral, à minha **gigante (!)** família, todos, Abreus, Araújo, tios, primos, Tupã, Manduri. Muito obrigado por todo o incentivo e por toda a motivação de sempre, de antes, durante e, eu sei, de depois da faculdade também. Muito obrigado, tias e tios, pelos almoços deliciosos (!) de fins-de-semana e principalmente pela compreensão dos dias em que eu não fui para a casa de algum de vocês porque estava estudando. Em especial, um abraço bem apertado para o meu tio Sérgio, que também é formado em área científica, que já me disse uma vez que se emocionou quando ficou sabendo que eu tinha passado na USP e que sempre, sempre me pergunta como estou indo e como estão as coisas.

Em um parágrafo especial, ainda nesta seção família, quero agradecer, sim, aos meus avós, tanto os que eu conheci quanto os que eu não tive a oportunidade de conhecer, pela palavra ensinada, pela sabedoria constantemente transmitida, pelos votos de felicidade e pelas orações sinceras.

Quero agradecer ao Matheux, pela antiquíssima amizade, pelas risadas, pelas dormidas na casa dele ao longo de todos esses anos de graduação e, claro, pelas vezes em que ele me deixou com inveja só porque o bandeirão da EACH é mais gostoso. (*"Just a small town girl, living in a lonely world..." – Don't Stop Believing – Journey*)

Quero agradecer ao Chu, meu irmãozasso (!) que vai continuar igualzinho quando for um diretor famoso e indo pra Manduri comigo, por toda a simplicidade que existe no mundo. Acreditem, falta Chu nas pessoas.

Quero agradecer à Patty, amante da ciência também, por todas as conversas sobre ciência que já tivemos que muitas vezes me motivaram muito no estudo da oceanografia.

Quero agradecer à Belisa, a Belisa-Maravilha, antiquíssima também, com certeza absoluta uma das pessoas mais inteligentes e espertas que já conheci, por todo o carinho e dedicação extremos que me fazem admirá-la mesmo cada vez mais, pelo apoio emocional em horas que precisei. Bê-ê, vous êtes très spécial!

Quero agradecer à Áurea, de Maresias, que me viu estudando na beira da piscina no fim de 2008, às vésperas da FUVEST, e sempre me pergunta como está a faculdade, os planos e me incentiva a continuar a oceanografar.

Quero agradecer à Rose, daqui de casa, pelos almoços e jantares deliciosos, pelo café com leite quente toda manhã, pela roupa lavada toda semana e principalmente pelos bons papos diários de manhã pela cozinha enquanto eu tomo café.

(Falando em comida...) Quero agradecer à Bellita & família, por toda a amizade, pelo fato de Ubatuba e a Fazenda terem sido completamente memoráveis na minha graduação, pela quantidade infinita de irradiância positiva que aquela casa exala e que todas as pessoas daquela família emanam e, claro, pelas filadas (*deliciosas!*) de bóia à la cachorro magro, quando eles sempre me recebem muito, muito bem e eu tenho que voltar para o IO às 14 h. Vocês são muito especiais. (*"Como um anjo caído fiz questão de esquecer que mentir pra si mesmo é sempre a pior mentira."* – *Quase Sem Querer – Legião Urbana*)

E, claro, *claro* (!), o IO! Quero agradecer e deixar um abraço muito, muito apertado para toda a turma VIII, turma que, como todas no IO, se mostrou bem dispersiva ao longo da graduação, mas pela qual eu tenho um imenso carinho. Agradeço também, óbvio, a veteranos e

calouros, todos os que fazem parte dessa família oceanográfica que fez a diferença pra mim nesses anos. Valeu! Sentirei muitas saudades, especialmente das viagens de campo. Foram 5 anos muito, muito memoráveis.

Um valeu especial para o Du, que vai imprimir essas linhas que você está lendo em poucas horas pra mim, hahaha.

Quero agradecer aos integrantes da Bodega, onde tive a chance de morar com praticamente duas pessoas diferentes por ano. Agradeço à Lara e à Mari, as veteranas (junto comigo!), pela amizade que com certeza vai ultrapassar oceanos se for preciso ("*Eu vou te jogar num pano de guardar confetes.*" – *Chão de Giz* – *Zé Ramalho*). Agradeço à Débora, por quem eu tenho um carinho gigantesco e com quem eu *adorava* e ainda adoro conversar. Agradeço à Iza, pela consideração e pelo tempo de convivência. Agradeço à Ana Elisa, que ficou lá por menos tempo pra depois ir pro outro lado do mundo também. Agradeço ao Molico, cara super inteligente e um grande amigo que batia altos papos comigo a qualquer hora da madrugada. E, por fim, à Jéssica, a caloura que ainda tem bastante tempo de oceanografia. Morar com vocês todos em diferentes anos foi sem dúvida uma experiência extremamente marcante na minha graduação. Aprendi muito e tenho muitos momentos memoráveis guardados com muito, muito carinho. É sincero e bem grande: OBRIGADO!

Quero agradecer também pelo meu tempo de Lira! Lara, Mari e Ana Elisa (de novo) e Jú! Jú, você sempre será do IO e da nossa turma.

Um agradecimento muito, muito especial também a todos os professores da minha graduação que realmente acrescentaram e fizeram a diferença pra mim, por diferentes motivos. (Em ordem cronológica!) Belmiro, Moysés, Gaeta, Márcia, June, Malex (IME), Jorge Mancini (IQ), Mauro Bertotti (IQ), Brandini, Dottori, Michel, Daniel Cornejo (IF), Renato Ninguém (Geo), Daniela Mariz (IME), Paulo Sumida, Felipe, Harari, Vicente ("*O futuro é hoje!*" – *Vicente Gomes*), Ilana, Polito, Ricardo de Camargo (IAG), Luz Amélia, Mário, Daniel, Sueli, Silvia Helena, Ceci, Mary, Karen, Edmo, Olga, Rubens Mendes, Miranda, Eduardo e Turra! Muito (!) obrigado pelas excelentes aulas, pelo conhecimento e experiência transmitidos, pelas camaradagens, pelas conversas jogadas fora, sejam sobre ciência ou não. Sentirei falta de vocês também em viagens de campo. Obviamente, vocês fizeram toda a diferença.

Deixo um parágrafo separado para um professor não citado no de cima. Agradecimentos especiais ao professor Ilson Carlos Almeida da Silveira, meu orientador por alguns anos de IO, no LaDO, Laboratório de Dinâmica Oceânica. Muito obrigado pela experiência transmitida e pela amizade. Guardo com carinho a lembrança de uma conversa de celular que tivemos em uma noite de dia de semana qualquer lá pelo meu quarto ano. IC, você é uma pessoa por quem

eu tenho muita consideração.

Ainda falando de professores, agora que estou me formando da faculdade e se trata de um curso científico, devo agradecimentos muito especiais também à minha professora de ciências da 5ª e 6ª série, professora Michele Rascalha. Foi com a astronomia que ela, querendo ou não, me iniciou em ciências, me fez um amante da ciência. Valeu, Mi, por todo o incentivo e o apoio de sempre.

Ainda falando sobre ciência, quero agradecer a todos os caras envolvidos com a coleta e tratamento dos dados de satélite que eu usei, pelo esforço e pela disponibilidade gratuita na internet.

Aproveito para agradecer também a todos os funcionários do IO que trabalharam durante todos esses 5 anos de graduação para que tudo sempre corresse bem. Os da biblioteca: Vagner (com W?), Daniel, Marta, Cidinha. Os da comida (!): Didi e Bertão. Os da papelada: Laura, André, Evaldo, Gruda. Os dos computadores: Éder, Ricardo. O da xerox: Jair, que agora está lá na xerox da FAU. Os dos corredores: Nilson. O da grana (\$!): Alexandre. E por aí vai...

Quero agradecer ao IO, pela infraestrutura, e à USP, por ser absurdamente maravilhosa, por ter um ensino de muita qualidade, por ter muitas árvores (isso é muito, muito importante em uma cidade como São Paulo), por ter quatro bendejões, por ter um cinema, por ter o CEPE (!) e por ter várias e várias coisas legais e de graça ("*USP maravilhosa, cheio de encantos mil, USP maravilhosa, MELHOR ESCOLA DO BRASIL!*" – *Alunos uspianos*).

Ainda, certamente quero agradecer a alguém que eu infelizmente me esqueci de escrever aqui, porque isso não é difícil de ter acontecido, apesar do meu empenho. Não vai ter sido por mal. Sou muito grato a todas as pessoas que positivamente contrubuíram direta ou indiretamente para que eu pudesse estar onde estou. ("*Nem tão longe que eu não possa ver. Nem tão perto que eu possa tocar. Nem tão longe que eu não possa crer que um dia eu chego lá.*" – *A Montanha – Engenheiros do Hawaii*)

Para o final, para o último parágrafo, quero agradecer imensamente à minha namorada maravilhosa, Júlia de Lima Soares, que me incentiva e me motiva a sempre ser quem eu quero ser, a fazer as coisas que eu quero fazer e a ser uma pessoa melhor ("*Somos o que há de melhor!*" – *3x4 – Engenheiros do Hawaii*). Eu também (!) agradeço imensamente pelo suporte emocional ao longo desse ano e pelas conversas oceanográficas (ou não), que sempre ensinam e motivam a nós dois. Você aumentou *muito* o meu campo de visão. Valeu! Vem comigo, meu bem, não pergunte a ninguém o dono desse mar!

E, de resto, que venha o Rio, o cheiro de maresia e a areia nos pés!

*"Nasci no meio de milhares de pinheiros,
mas eu saquei, eu sou uma goiabeira."*

Dazaranha

Resumo

O presente trabalho visa a identificação de ondas de Rossby e a análise de seu papel na variação da biomassa fitoplanctônica entre as latitudes 25°S e 45°S do Atlântico Sul. O estudo foi conduzido através da comparação entre dados de altura da superfície do mar e de concentração de clorofila obtida, ambos obtidos por sensoriamento remoto. As propagações de pulsos para oeste tanto de altura quanto de clorofila foram caracterizadas em termos de escalas espaço-temporais. Tanto variâncias explicadas quanto diferenças de fase para componentes de diferentes períodos foram utilizadas para a interpretação dos processos físico-biológicos. Para tanto, diagramas de Hovmoller foram confeccionados e os dados foram submetidos a uma cadeia de filtros bidimensionais de resposta impulsiva finita (FIR2D) e a posteriores análises estatísticas, baseadas no ajuste de funções senoidais sobre as correlações cruzadas bidimensionais entre diagramas de Hovmoller de altura e de clorofila. Diferenças de fase em torno de 180° foram interpretados como tendo processos verticais dominando a interação entre altura e clorofila. Tanto processos de advecção vertical de nutrientes quanto de ascensão do máximo subsuperficial de clorofila pertencem a tal caso e são causados pela compressão da camada superior do oceano, processo oriundo da dinâmica desse tipo de onda. Diferenças de fase no intervalo entre 90° e 180° foram interpretadas como tendo processo horizontais dominando a interação entre altura e clorofila. Tanto advecções meridionais de nutrientes quanto advecções meridionais de clorofila propriamente dita pertencem a tal caso e são processos associados às anomalias das correntes geostróficas em relação às correntes médias, causadas pela passagem das ondas. Os resultados convergiram às conclusões de que ondas de Rossby de períodos 3 e 6 meses influenciam mais as anomalias da concentração de clorofila do que as de períodos superiores, de 12 e 24 meses. Entre ~25°S e ~30°S, os processos dominantes foram os verticais, entre ~30°S e ~35°S, os horizontais, e entre ~35°S e ~40°S, novamente os verticais. Não foram obtidos resultados conclusíveis para as latitudes entre ~40°S e ~45°S.

Descritores: ondas de Rossby, altura da superfície do mar, concentração de clorofila, cor do oceano, sensoriamento remoto.

Abstract

The current work aims the identification of Rossby waves and analyzes its role on the phytoplankton biomass variations between 25°S and 45°S in the South Atlantic. The study went through the comparison between sea surface height and chlorophyll concentration data, both obtained by remote sensing. The westward propagation of height and chlorophyll pulses were characterized in terms of spatial-temporal scales. Both explained variances and phase differences for waves with different periods were used for the interpretation of the physical-biological processes. Therefore, Hovmoller diagrams were made and the data was filtered by a two-dimensional finite impulse response (FIR2D) filter chain and subsequently submitted to statistical analysis, which were based on the adjustment of sinusoidal functions over the bidimensional cross-correlations between height and chlorophyll Hovmoller diagrams. Phase differences around 180° were interpreted as if vertical processes were ruling the interaction between height and chlorophyll. Such processes can be nutrients upwelling or uplifting of the subsurface chlorophyll maximum, both induced by the compression of the ocean's upper layers due to the passage of the waves. Phase differences between 90° and 180° were interpreted as if horizontal processes were dominating. These processes, induced by anomalies in the geostrophic velocities due to the passage of the waves, can be both meridional nutrients advection or meridional chlorophyll advection. The results converged to the conclusion that Rossby waves with periods of 3 and 6 months have a larger influence on chlorophyll concentrations anomalies than those with larger periods, of about 12 and 24 months. Between ~25°S and ~30°S, the main processes were the vertical ones, between ~30°S and ~35°S, the horizontal ones, and between ~35°S and ~40°S, again the vertical ones. No conclusive results were found for latitudes between ~40°S and ~45°S.

Key-words: Rossby waves, sea surface height, chlorophyll concentration, ocean color, remote sensing.

Sumário

Lista de Figuras	p. v
Lista de siglas	p. viii
1 Introdução	p. 1
2 Objetivos	p. 6
3 Metodologia	p. 7
3.1 Origem, discussão e tratamento inicial dos dados	p. 7
3.2 Decomposição dos sinais com o filtro de resposta impulsiva finita (FIR2D)	p. 8
3.3 Cálculo da variância explicada por cada componente	p. 10
3.4 Cálculo da covariância bidimensional	p. 11
3.5 Cálculo da diferença de fase entre as séries temporais	p. 11
3.6 O atraso de fase da componente sazonal	p. 13
3.7 Seleção dos resultados de diferença de fase em faixas de latitude	p. 13
4 Resultados e discussão	p. 15
4.1 Diagramas de Hovmoller	p. 15
4.2 A componente não-propagante sazonal (η_t e C_t)	p. 16
4.2.1 Variâncias explicadas	p. 16
4.2.2 Covariância bidimensional	p. 22
4.2.3 Diferença de fase	p. 22
4.3 A componente não-propagante de feições de mesoescala (η_E e C_E)	p. 25
4.4 As componentes propagantes (η_{24} a η_3 e C_{24} a C_3)	p. 27

4.4.1	Variâncias explicadas	p.27
4.4.2	Covariância bidimensional	p.28
4.4.3	Diferenças de fase	p.33
5	Conclusões	p.42
	Referências Bibliográficas	p.44

Lista de Figuras

- 1.1 Esquema de propagação de uma onda de Rossby curta. A onda é inicialmente forçada pelo vento e a conversação da vorticidade potencial q é resultado do balanço entre a vorticidade planetária f e a vorticidade relativa ζ p. 2
- 1.2 Região de estudo com variações espaciais da cor da superfície do mar, indicando variações na concentração de clorofila. Imagem confeccionada a partir dos dados do sensor MODIS interpolados para uma grade regular de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ para os dias 17 a 24 de junho de 2008, semana do solstício de inverno. As unidades estão expressas em $\log_{10}(\text{mg cm}^{-3})$ p. 3
- 1.3 Similar à Figura 1.2, só que para os dias 21 a 25 de dezembro de 2008, semana do solstício de verão. p. 4
- 4.1 Diagrama de Hovmoller da anomalia da altura da superfície do mar, filtrados a partir dos dados da AVISO (*reference* nível 3), para a latitude de **25,875°S** do Atlântico Sul (série temporal de abril de 2002 a outubro de 2012). Os valores estão em mm e são representados pela barra de cores à direita. η_0 representa a anomalia original da altura da superfície do mar, medida pelos satélites e interpolada, portanto dados de nível 3; η_S representa a soma das componentes filtradas; η_r é o sinal residual, dominado por fenômenos de pequena escala e alta frequência e por ruídos; η_t é o sinal não propagante, de escala de bacia; este sinal inclui, por exemplo, o ciclo sazonal e, no Pacífico, sinais não-propagantes decorrentes de El Niño/La Niña; η_{24} a η_3 compreendem as ondas de Rossby que se propagam para o oeste com períodos centrados em 24, 12, 6 e 3 meses; η_E compreende as feições de mesoescala não-propagantes, como vórtices, por exemplo. As retas pontilhadas indicam a velocidade de fase média para cada diagrama. p. 17
- 4.2 Similar à Figura 4.1, para clorofila. Os dados utilizados foram os dos sensores MODIS Aqua e SeaWiFS e as unidades são $\log_{10}(\text{mg cm}^{-3})$ p. 18
- 4.3 Similar à Figura 4.1, para a latitude $44,125^\circ\text{S}$. Note a ausência das componentes de períodos 6 e 3 meses devido ao alcance de suas latitudes críticas. p. 19

4.4	Similar à Figura 4.2, para a latitude $44,125^{\circ}\text{S}$. Note a ausência das componentes de períodos 6 e 3 meses devido ao alcance de suas latitudes críticas.	p. 20
4.5	Mapas e gráfico referentes às componentes sazonais , não-propagantes (η_t e C_t). . .	p. 21
4.6	Covariância bidimensional entre as componentes sazonais , não-propagantes, (η_t e C_t) na latitude de $25,875^{\circ}\text{S}$, a título de exemplo. O cálculo foi feito através dos diagramas de Hovmoller de η e C , com resolução de $0,25^{\circ} \times 0,25^{\circ}$. O atraso de fase foi calculado através da fase de uma função senoidal ajustada ao longo de $\tau_x = 0$. . .	p. 23
4.7	Variação meridional das diferenças de fase entre as componentes sazonais , não-propagantes (η_t e C_t). Valores em graus.	p. 24
4.8	Variação meridional dos atrasos de fase entre as componentes sazonais , não-propagantes, (η_t e C_t). Valores em meses.	p. 25
4.9	Mapas e gráfico referentes às componentes de mesoescala , não-propagantes (η_E e C_E).	p. 26
4.10	Mapas e gráfico referentes às componentes propagantes de período de 24 meses (η_{24} e C_{24}).	p. 29
4.11	Mapas e gráfico referentes às componentes propagantes de período de 12 meses (η_{12} e C_{12}).	p. 30
4.12	Mapas e gráfico referentes às componentes propagantes de período de 6 meses (η_6 e C_6).	p. 31
4.13	Mapas e gráfico referentes às componentes propagantes de período de 3 meses (η_3 e C_3).	p. 32
4.14	Covariâncias bidimensionais entre as componentes propagantes de períodos de 24 e 12 meses na latitude de $25,875^{\circ}\text{S}$, a título de exemplo.	p. 34
4.15	Covariâncias bidimensionais entre as componentes propagantes de períodos de 6 e 3 meses na latitude de $25,875^{\circ}\text{S}$, a título de exemplo.	p. 35
4.16	Diferenças relativas entre velocidades de fase e diferenças de fase entre as componentes propagantes de período de 24 meses	p. 36
4.17	Diferenças relativas entre velocidades de fase e diferenças de fase entre as componentes propagantes de período de 12 meses	p. 37
4.18	Diferenças relativas entre velocidades de fase e diferenças de fase entre as componentes propagantes de período de 6 meses	p. 38

4.19 Diferenças relativas entre velocidades de fase e diferenças de fase entre as componentes propagantes de **período de 3 meses**. p. 39

Lista de siglas

- **AASM**: anomalia da altura da superfície do mar
- **ACC**: anomalia da concentração de clorofila
- **ASM**: altura da superfície do mar
- **AVISO**: *Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic Data*
- **ERS-1/2**: *European Remote Sensing Satellite 1/2*
- **FIR2D**: filtro bidimensional de resposta impulsiva finita
- **MODIS**: *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*
- **NASA**: *National Aeronautics and Space Administration*
- **SeaWiFS**: *Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor*
- **TOPEX/Poseidon**: *The Ocean Topography Experiment Poseidon*

1 Introdução

Ondas de Rossby são ondas planetárias oceânicas de ocorrência quase global e com comprimentos de onda da ordem de centenas a milhares de quilômetros, períodos da ordem de meses a anos e amplitudes superficiais da ordem de centímetros. Sua natureza dinâmica propicia a propagação de grandes quantidades de energia ao longo da dimensão zonal das bacias oceânicas, influenciando diretamente a circulação de larga escala (ANDERSON; GILL, 1975) e, portanto, ainda que indiretamente, o clima global (SIEGEL, 2001).

Sua forçante principal é o bombeamento de Ekman de larga escala (POLITO, 1997), enquanto seu mecanismo restaurador é a conservação da vorticidade potencial q , ou seja, a condição

$$\frac{Dq}{Dt} = \frac{D}{Dt} \left(\frac{f + \zeta}{H} \right) = 0 \quad , \quad (1.1)$$

onde f é o parâmetro de Coriolis, ζ é a componente vertical da vorticidade relativa do escoamento e H é a altura da coluna de fluido (no caso barotrópico) ou da piconclina (no primeiro modo baroclínico para um modelo de 1,5 camadas). Tem-se que: $f = 2\Omega \sin(\theta)$, onde $\Omega = 7,27 \cdot 10^{-5} \text{ rad s}^{-1}$ é a velocidade angular de rotação da Terra e θ é a latitude; $\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$, onde u e v são respectivamente as velocidades zonais e meridionais do escoamento; $H = h + \eta$, onde h é a altura média da coluna d'água e η é a sua anomalia. Tal equação (1.1) se aplica a fluxos quase-geostróficos e é um modelo prognóstico, ou seja, dependente do tempo, onde os termos dominantes na equação do movimento horizontal são os da aceleração de Coriolis e os da aceleração por gradiente de pressão. O balanço ocorre predominantemente entre H e f para ondas longas e entre ζ e f para ondas curtas, portanto as ondas se configuram como oscilações da piconclina ao longo de uma mesma latitude. Ondas longas são não-dispersivas e, segundo a teoria linear, podem transportar energia potencial de leste para oeste ao longo de bacias inteiras e intensificar a borda oeste dos giros subtropicais (POLITO; LIU, 2003). Já as curtas são dispersivas e têm sido observadas na região equatorial como parte do processo de reflexão das ondas longas (POLITO *et al.*, 2000). Em sua versão mais simples, tal modelo considera as apro-

ximações do plano β , de águas rasas e de fundo plano e admite que os fluxos são barotrópicos e inviscídeos.

Devido à sua natureza dinâmica, sua propagação de fase acontece sempre no sentido leste-oeste e sua velocidade é predominantemente uma função da latitude do movimento. No caso de ondas longas, a propagação de energia (i.e. a velocidade de grupo) tem a mesma velocidade da propagação de fase, portanto ocorre sempre para oeste. Para ondas curtas, há propagação de energia com velocidades de grupo tanto para leste quanto para oeste, devido ao fato de serem dispersivas (GILL, 1982). Tais considerações presumem um oceano de fundo plano, sem correntes médias e sem a forçante do vento. A inclusão de quaisquer desses fatores aproximaria mais o modelo teórico da realidade, porém tal complexidade extrapolaria o escopo deste trabalho. O processo de propagação para uma onda de Rossby curta é esquematizado na Figura 1.1, onde nesse caso a conservação de q depende majoritariamente do balanço entre f e ζ . Porém, como descrito anteriormente, o mecanismo restaurador depende da conservação de q e, conseqüentemente, da variação meridional tanto de f quanto de ζ e H .

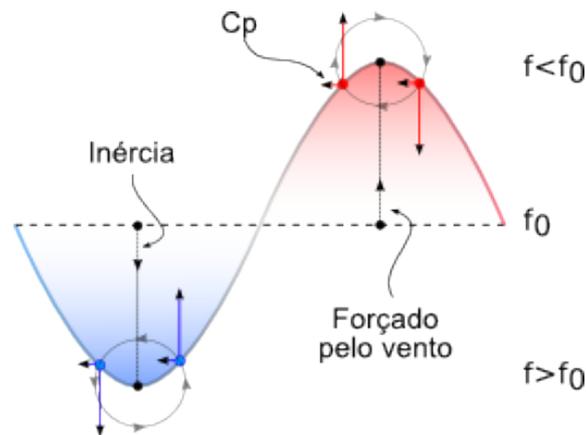


Figura 1.1: Esquema de propagação de uma onda de Rossby curta. A onda é inicialmente forçada pelo vento e a conservação da vorticidade potencial q é resultado do balanço entre a vorticidade planetária f e a vorticidade relativa ζ .

As conseqüências principais das características acima descritas são (a) a possibilidade de propagação meridional e (b) a possibilidade de que a velocidade de fase varia com a longitude. Com relação a (a), Polito e Cornillon (1997) mostraram que a propagação meridional é muito menos evidente que a zonal e tem uma relação sinal/ruído muito mais baixa que a zonal. Com relação a (b), a metodologia aqui proposta (POLITO; LIU, 2003) nos permite inferir quantitativamente essa variação de velocidade de fase.

A afirmação de que "ondas não transportam matéria, só energia" é muito comum e merece detalhamento. Elas não transportam quantidade significativa de matéria por uma distância maior que um comprimento de onda, como indica o esquema da Figura 1.1. Apesar disso,

durante a passagem de uma onda de Rossby, ocorrem transportes significativos na direção meridional, perpendicularmente à direção de propagação de fase da mesma. Este movimento é predominantemente geostrófico e portanto depende da inclinação das isóbaras. Tal transporte pode, então, advectar nutrientes e/ou clorofila horizontalmente, enquanto o movimento vertical da picnoclina, no caso das ondas do primeiro modo baroclínico, pode advectar nutrientes e/ou clorofila para dentro da camada eufótica, influenciando, dessa forma, a bomba biológica (GUTKNECHT *et al.*, 2010) o ciclo de vida de organismos marinhos e alimentando a produção primária fitoplanctônica (UZ *et al.*, 2001).

A região de estudo, o Oceano Atlântico entre 25°S e 45°S, é apresentada nas Figura 1.2 e 1.3 através de imagens espaciais da cor do mar e, conseqüentemente, da concentração de clorofila. A primeira mostra um caso de solstício de inverno e a segunda um caso de solstício de verão, evidenciando uma variação sazonal tanto nas concentrações de clorofila quanto na posição meridional de máximo gradiente, região próxima ao ramo sul do giro subtropical do Atlântico Sul, definido pela Corrente do Atlântico Sul (PETERSON; STRAMMA, 1991). As feições em azul escuro na borda sul do mapa da Figura 1.2 se referem a limitações no processo de interpolação dos dados de clorofila, devido à grande quantidade de nuvens nessa faixa de latitude durante esta estação do ano (GUTKNECHT *et al.*, 2010). Tal limitação refletirá na falta de resultados conclusivos para a região, como será discutido adiante.

Sabe-se que relações entre concentração de clorofila e de altura da superfície do mar podem ser observadas em todas as bacias oceânicas. Porém, para que suas relações sejam explicadas pela propagação de uma onda de Rossby, seus sinais devem se propagar com a mesma velocidade de fase (CIPOLLINI *et al.*, 2001). Observações da altura da superfície do mar na mesma região também mostram padrões zonais-temporais de oscilação, de modo que é possível que os dois fenômenos estejam relacionados através da dinâmica de ondas de Rossby. Os máximos subsuperficiais de clorofila para a região em questão estão localizados entre 10 e 30 metros de profundidade (CHARRIA *et al.*, 2004).

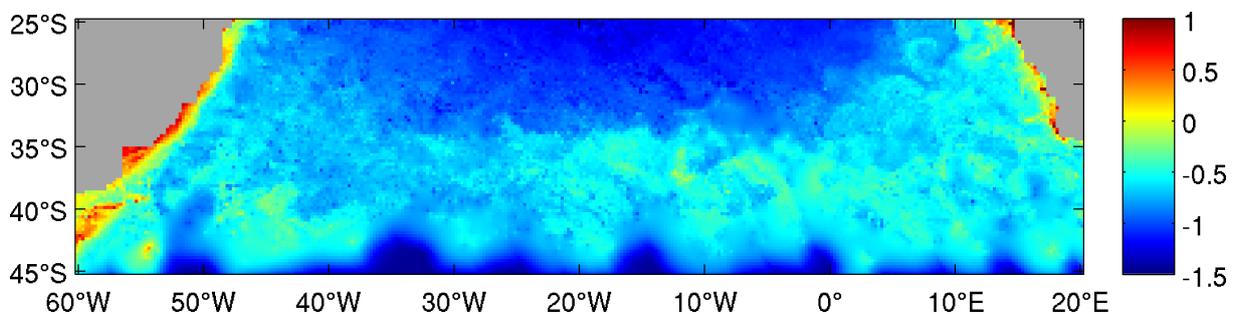


Figura 1.2: Região de estudo com variações espaciais da cor da superfície do mar, indicando variações na concentração de clorofila. Imagem confeccionada a partir dos dados do sensor MODIS interpolados para uma grade regular de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ para os dias 17 a 24 de junho de 2008, semana do solstício de

inverno. As unidades estão expressas em $\log_{10}(\text{mg cm}^{-3})$.

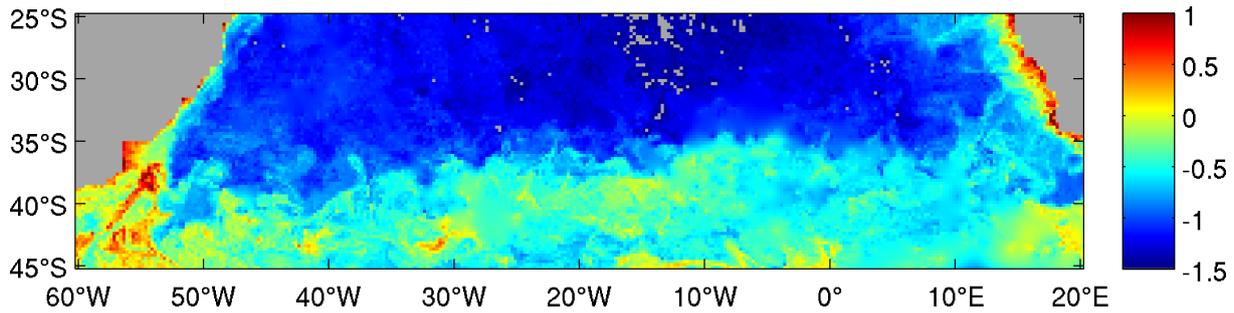


Figura 1.3: Similar à Figura 1.2, só que para os dias 21 a 25 de dezembro de 2008, semana do solstício de verão.

Contudo, não é sabido para a região qual é a contribuição relativa de cada uma das forçantes, para diferentes períodos, que propiciam a propagação dos pulsos regulares de máximos de clorofila juntamente com as frentes de onda. Uma quadratura de fase (diferença de fase 90°) teria sua origem na advecção *horizontal meridional* de nutrientes ou de clorofila, onde ambos os transportes são oriundos de uma faixa de latitude diferente da latitude de propagação da onda e transportados por correntes geostróficas causadas pela inclinação zonal da piconclina, associada à passagem de uma onda de Rossby baroclínica do primeiro modo. Isso porque se assumirmos uma solução senoidal para a onda de Rossby, isto é, $\eta = \hat{\eta} \sin(kx + \omega t)$, onde $\hat{\eta}$ é uma amplitude, a velocidade geostrófica em questão estaria associada a $\frac{d\eta}{dt} \propto \cos(kx + \omega t)$ e, portanto, η e C guardariam uma relação de quadratura de fase. Assim, neste caso, o processo depende do gradiente meridional de C . Entretanto, há outra possibilidade, a de ocorrência de processos *verticais*, relacionados ao afinamento da camada superior e também associados à passagem de uma onda de Rossby baroclínica do primeiro modo. Assim, tanto uma advecção vertical de nutrientes oriundos de camadas mais profundas quanto uma mera ascensão do máximo subsuperficial de clorofila poderiam influenciar as supostas concentrações de clorofila medidas pelos satélites. Neste segundo caso, C depende de η , e não mais de seu gradiente meridional. Dessa forma, sendo a anomalia de η de origem termostérica, quando a superfície do mar desce a termoclina sobe, e vice-versa, estando, assim em oposição de fase (diferença de fase 180°). Este raciocínio pressupõe termoclina e nutriclina subindo e descendo juntas.

Na prática, processos horizontais são observados quando a diferença de fase se encontra entre 90° e 180° , já os verticais, quando ela se encontra em torno de 180° (KILLWORTH *et al.*, 2004). Porém, tais valores são teóricos e podem variar no espaço uma vez que estão ligados a muitos processos oceanográficos (CHARRIA *et al.*, 2004), muitas vezes não atendendo a previsões. A amplitude dos intervalos se deve: (1) ao tempo levado para que ocorram difusões superficiais e subsuperficiais, (2) ao tempo levado pelo fitoplâncton para se desenvolver (SAKAMOTO *et al.*, 2004) e (3) ao tempo levado para que uma anomalia de clorofila retorne ao

equilíbrio (O'BRIEN *et al.*, 2013).

Dessa forma, o presente trabalho visa o estudo da relação entre altura e cor da superfície do mar em distintas frações do espectro de frequências. Isto será feito através da análise de diagramas de Hovmoller, que são representações gráficas de propriedades do oceano em termos de longitude e tempo e, portanto, muito úteis para o estudo de feições que se propagam zonalmente. A separação em bandas espectrais que permitem uma melhor definição de fase será feita através da utilização do filtro bidimensional de resposta impulsiva finita (FIR2D) elaborado por Polito e Liu (2003) e da análise da covariância dos diferentes sinais propagantes. A hipótese científica adotada é que (1) na região de estudo existem diferentes processos físico-biológicos de influência da passagem de ondas de Rossby baroclínicas do primeiro modo na concentração clorofila — os de advecção meridional e os de advecção vertical — e que (2) tais processos podem ser distintos pelas suas relações de fase.

2 *Objetivos*

O objetivo central deste trabalho é estimar as diferenças de fase entre pulsos de altura da superfície do mar e concentração de clorofila para componentes propagantes de frequências pré-estabelecidas. O estudo se baseará na análise da covariância entre diagramas espaço-temporais (ou "de Hovmoller") de anomalias de altura da superfície do mar (a partir daqui, η) e de concentrações de clorofila (C). As análises das componentes sazonais e de mesoescala obtidas pelo filtro descrito também serão observadas, porém não são o foco principal deste trabalho.

Os objetivos específicos para o teste da hipótese são:

- Reorganizar os dados de anomalias de η e C na forma de diagramas de Hovmoller;
- Decompor os sinais com a cadeia de filtros FIR2D;
- Calcular a variância explicada para cada componente;
- Calcular a covariância bidimensional entre as séries temporais das componentes propagantes de períodos similares;
- Estimar a diferença de fase entre os sinais.

3 *Metodologia*

3.1 **Origem, discussão e tratamento inicial dos dados**

Os dados de nível do mar são os do projeto *Reference Multimission Sea Level Anomaly*, semanais, fornecidos pela AVISO. Estes são obtidos pelos satélites altimétricos TOPEX/Poseidon, Jason-1, Jason-2, ERS-1, ERS-2 e Envisat, dois a dois, interpolados em uma grade de resolução espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ e quase-globais: de $67,5^\circ\text{S}$ a $67,5^\circ\text{N}$. São instrumentos que funcionam na banda de radar, enviando pulsos eletromagnéticos em direção ao oceano. Seu princípio físico de funcionamento se baseia no tempo de trânsito da onda eletromagnética: como sua velocidade é conhecida, o sensor mede o tempo levado para que um pulso de onda retorne ao satélite. São com tais valores que são estimadas a altura das superfícies do mar. Ademais, correções geofísicas e não geofísicas são necessárias antes da utilização dos dados. Tais correções, já aplicadas pela AVISO, fornecem uma precisão de 2 cm.

Os dados de concentração de clorofila foram fornecidos pela NASA e obtidos pelos sensores operantes na faixa da luz visível SeaWiFS e MODIS Aqua e distribuídos via *OceanColorWeb*. Sua resolução espacial inicial é de $9\text{ km} \times 9\text{ km}$ e a temporal é de 8 dias, porém, neste estudo eles foram interpolados bicubicamente (*cubic spline*) para mesma grade definida para η , de acordo com a metodologia descrita por Emery e Thomson (2001). Tais instrumentos funcionam nas frequências da luz visível e, diferentemente dos altímetros, são passivos, ou seja, não emitem ondas eletromagnéticas para depois captá-las de volta, mas simplesmente recebem as ondas eletromagnéticas vindas da Terra. Dessa forma, tais sensores medem a quantidade de radiação visível oriunda dos oceanos e algoritmos são aplicados a esses dados de modo a convertê-los em concentrações de clorofila. A unidade em que tais dados serão apresentados neste trabalho é $\log_{10}(\text{mg cm}^{-3})$. Note que não são dimensões de massa por unidade de área (massa por unidade de volume integradas verticalmente), mas sim concentrações propriamente ditas, representando a concentração média da quantidade de clorofila integrada verticalmente que foi detectada pelo sensor. Dessa forma, tais valores são representativos para apenas uma fração da camada eufótica, não representando a quantidade de clorofila presente em toda a co-

luna d'água. Por estes motivos, a precisão desses dados é bastante baixa, de aproximadamente 35% (HOOKER; MCCLAIN, 2000), o que introduz uma considerável incerteza para os mesmos.

A clorofila medida pelos sensores de cor é resultado de processos que ocorrem na camada eufótica, ao passo que os dados de ASM mostram um efeito integrado na coluna d'água inteira. Isso ocorre porque a ASM depende tanto da convergência de massa quanto da temperatura e da salinidade média da coluna d'água (POLITO; LIU, 2003), sendo que os processos que dominam sua variabilidade ocorrem geralmente acima da pycnoclina. De qualquer forma, é importante salientar que o presente trabalho relacionará processos que podem ocorrer em profundidades diferentes. Conseqüentemente, não esperamos obter correlações tão altas quanto as obtidas por Polito *et al.* (2000) (80–95%), pois naquele caso tratava-se de uma mesma variável física, o calor armazenado, integrada na coluna d'água. Uma analogia melhor é possível com o trabalho de Oliveira e Polito (2013), onde os autores compararam η com anomalias na temperatura da superfície do mar, que é medida na superfície, e foram obtidas correlações da ordem de 20–40% longe da origem.

Um fator adicional que pode vir a influenciar os dados aqui previstos é a cobertura de nuvens, pois esta varia periodicamente e portanto pode introduzir um viés estatístico. Por outro lado, o fitoplâncton não reage imediatamente ao aporte de nutrientes, o que pode afetar a diferença de fase estimada caso seu tempo de reação à chegada de nutrientes seja igual ou maior que a resolução temporal. Assim, consideraremos a concentração de clorofila como um traçador quase-passivo, levando em conta que fatores biológicos externos podem alterar sua distribuição, e que sua concentração máxima pode não estar em superfície, se encontrando entre 10 e 30 metros de profundidade para a área de estudo (CHARRIA *et al.*, 2004). As séries temporais utilizadas se iniciam em abril de 2002 e terminam em outubro de 2012.

3.2 Decomposição dos sinais com o filtro de resposta impulsiva finita (FIR2D)

Após a confecção dos diagramas espaço-temporais de Hovmoller, isto é, a reorganização dos dados em função da longitude e do tempo, os dados foram decompostos através de uma cadeia de filtros bidimensionais de resposta impulsiva finita (FIR2D) elaborados por Polito e Liu (2003). A decomposição é feita em sinais propagantes e não-propagantes. Os propagantes compreendem ondas de Rossby, de Kelvin e de instabilidade tropical. Os não-propagantes compreendem ruído, vórtices de mesoescala que não se propagam para oeste e, em componentes separadas, variabilidades anuais e interanuais na escala de bacias. Entre os propagantes, é feita a

separação das componentes em diversas bandas espectrais definidas por seus períodos centrais.

Como na região em questão não há a presença de ondas de Kelvin, de instabilidade tropical e de Rossby com períodos mais curtos que 3 meses, a decomposição completa para a área de estudo resulta na seguinte equação:

$$\eta_0 = \eta_t + \eta_E + \eta_{24} + \eta_{12} + \eta_6 + \eta_3 + \eta_r \quad , \quad (3.1)$$

onde:

- η_0 representa a anomalia original da altura da superfície do mar, medida pelos satélites e interpolada, portanto, dados de nível 3;
- η_t é o sinal não propagante, de escala de bacia; este sinal inclui, por exemplo, o ciclo sazonal e, no Pacífico, perturbações não-propagantes de escala sazonal devidos ao El Niño/La Niña;
- η_E compreende as feições de mesoescala não-propagantes, como vórtices, por exemplo;
- η_{24} a η_3 compreendem as ondas de Rossby que se propagam para o oeste com períodos centrados em 24, 12, 6 e 3 meses;
- η_r é o sinal residual, dominado por fenômenos de pequena escala e alta frequência e por ruídos.

Ainda, define-se que:

$$\eta_S = \eta_0 - \eta_r = \eta_t + \eta_E + \eta_{24} + \eta_{12} + \eta_6 + \eta_3 \quad , \quad (3.2)$$

ou seja, η_S representa a soma das componentes de fato filtradas, sendo η_r o resíduo desta em relação ao sinal original. Se o filtro fizer um bom trabalho, este resíduo deverá ser dominado por ruído randômico.

Tais filtros funcionam pelo princípio de convolução entre a série temporal e uma matriz-filtro, resultando em componentes ortogonais com largura de banda finita. Dessa forma, a variação sazonal que caracteriza bacias inteiras é separada sem haver interferência nos sinais propagantes, mesmo se as frequências forem similares. O período (T), o comprimento de onda (λ) e a amplitude (A) são estimados via ajuste de mínimos quadrados de uma função senoidal. A velocidade de fase (c_p) é estimada com base na transformada de Radon (POLITO; CORNIL-LON, 1997), através da rotação dos diagramas de Hovmoller a fim de se encontrar o ângulo θ da inclinação média das faixas, de modo que $c_p = \arctan(\theta)$.

Como os filtros operam simultaneamente no tempo e na direção zonal, a direção de propagação é postulada como puramente zonal e no caso das ondas de Rossby, o sentido é unicamente para oeste. Por causa da parametrização do tamanho do filtro em relação ao tamanho da onda, a largura das bandas é tal que (1) não existem espaços vazios entre uma determinada banda e a banda adjacente e, (2) devido à ortogonalidade das componentes filtradas, o mesmo sinal nunca faz parte de duas bandas diferentes.

Neste estudo, foram analisadas ondas de Rossby com períodos de 24, 12, 6 e 3 meses, pois as de menores períodos atingem suas latitudes críticas em regiões além dos limites de nossa área de estudo (GILL, 1982). A decomposição dos dados de C foi feita de maneira análoga à descrita para os de η . A única exceção a isso foi o fato de que as velocidades de fase iniciais admitidas para η antes da aplicação da transformada de Radon foram as mesmas admitidas pela teoria linear clássica, enquanto que as admitidas para C foram exatamente as obtidas para η depois da filtragem completa. Tal sutil diferença no processo de filtragem se deu exatamente pelo fato de que a incerteza dos dados de altura é consideravelmente menor do que a dos de clorofila, de modo que é mais certo impor a velocidade de fase determinada pelos dados altimétricos ao sinal de clorofila, uma vez que elas foram admitidas como relacionadas. Assim, com saltos discretos de $0,25^\circ$ em $0,25^\circ$, foi produzido um diagrama para cada latitude da área de estudo, de $24,875^\circ\text{S}$ a $45,125^\circ\text{S}$.

3.3 Cálculo da variância explicada por cada componente

O percentual de variância explicada por cada componente de altura para cada ponto (x, y) da área de estudo foi calculado da seguinte forma:

$$R^2(\eta_i)(x, y) = \left(1 - \frac{\sigma^2(\eta_0 - \eta_i)}{\sigma^2(\eta_0)}\right) 100\% \quad , \quad (3.3)$$

onde $\eta = \eta(x, y, t)$ é a série temporal da componente em questão em um determinado ponto da área de estudo, $\sigma^2(\eta_0 - \eta_i)$ é a variância da diferença entre as componentes η_0 e η_i , $\sigma^2(\eta_0)$ é a variância da componente η_0 e $i = t, E, 24, 12, 6, 3$. Dessa forma, $R^2(x, y)$ foi calculado tanto para os dados de altura quanto para os de clorofila e mapas com resolução $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ foram feitos para cada componente da Equação 3.1. Em tais mapas, regiões com profundidades inferiores a 1000 m foram mascaradas e só foram apresentados e considerados para fins de cálculo os valores percentences ao intervalo $[0, \mu(R^2) + 3\sigma(R^2)]$, onde μ e σ representam respectivamente médias e desvios-padrão.

Posteriormente, para a obtenção de valores representativos para cada latitude, médias zo-

nais (ao longo de latitudes fixas) de $R^2(x, y)$ foram calculadas, definindo $R^2(y)$. Desta vez, todo o domínio de $R^2(x, y)$ foi levado em questão e gráficos de tais variações meridionais foram confeccionados para cada componente de altura e clorofila. É de valia ressaltar que o somatório das variâncias explicadas por todas as componentes, tanto para η quanto para C , não necessariamente resultará em 100%, mas um valor próximo a isso. Isso se deve à estatística intrínseca ao processo de filtragem dos dados associada à incerteza dos mesmos. Tal somatório para η será consideravelmente mais próximo de 100% em relação ao de C exatamente por causa da diferença entre as incertezas dos dois conjuntos de dados.

3.4 Cálculo da covariância bidimensional

A covariância bidimensional entre η e C para cada componente para cada latitude em função dos atrasos espacial (τ_x) e temporal (τ_t) foi definida por:

$$(\eta \star C)(\tau_x, \tau_t) = \int_{-\tau_x}^{\tau_x} \int_{-\tau_t}^{\tau_t} \eta(T_x, T_t) C(T_x - x, T_t - t) dT_t dT_x \quad , \quad (3.4)$$

que pode ser assim discretizada:

$$(\eta \star C)(\tau_x, \tau_t) = \sum_{T_x = -\tau_x}^{\tau_x} \sum_{T_t = -\tau_t}^{\tau_t} \eta(T_x, T_t) C(T_x - x, T_t - t) \quad , \quad (3.5)$$

onde η e C representam diagramas de Hovmoller para as componentes propagantes e sazonal da equação 3.1. A resolução das covariâncias calculadas foi de $0,25^\circ \times 7$ dias.

3.5 Cálculo da diferença de fase entre as séries temporais

Admitindo-se que os diagramas de Hovmoller das diferentes componentes propagantes podem ser otimamente ajustados por funções oscilatórias do tipo

$$\begin{cases} \eta(x, t) = \hat{\eta} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x + \frac{2\pi}{T}t + \varphi_\eta\right) \\ C(x, t) = \hat{C} \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}x + \frac{2\pi}{T}t + \varphi_C\right) \end{cases} \quad (3.6)$$

e que os da componente sazonal, por funções do tipo

$$\begin{cases} \eta(t) = \hat{\eta} \cos\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_\eta\right) \\ C(t) = \hat{C} \cos\left(\frac{2\pi}{T}t + \varphi_C\right) \end{cases} \quad , \quad (3.7)$$

onde $\hat{\eta}$ e \hat{C} são amplitudes, o que queremos obter é $\Delta\varphi = \varphi_C - \varphi_\eta$.

Tais diferenças de fase foram obtidas através das covariâncias bidimensionais (equação 3.5), uma vez estas que exprimem a distância entre as cristas de diagramas de Hovmoller de η e C , propiciando tal cálculo. Dessa forma, foram feitos dois ajustes senoidais via método dos mínimos quadrados (EMERY; THOMSON, 2001), um para cada eixo das funções, isto é, ao longo de $\tau_x = 0$ e de $\tau_t = 0$. Utilizamos apenas os valores distantes à origem em no máximo uma distância de 1,5 ciclos, tanto no domínio do espaço quanto no do tempo, pois não só sua confiabilidade estatística é maior como a consistência física do problema é garantida: não faz sentido que C seja alterada por uma feição de η que esteja a uma distância muito maior do que 1 ciclo, seja no domínio do tempo ou do espaço. Dessa forma, os ajustes senoidais foram do tipo:

$$\begin{cases} f_x(\tau_x) = A \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}\tau_x + \phi_1\right) & \text{ao longo de } \tau_t = 0 \\ f_t(\tau_t) = B \cos\left(\frac{2\pi}{T}\tau_t + \phi_2\right) & \text{ao longo de } \tau_x = 0 \end{cases}, \quad (3.8)$$

onde A e B são amplitudes das covariâncias para o estudo e ϕ_1 e ϕ_2 são as respectivas fases ajustadas.

O ajuste senoidal ao longo de $\tau_t = 0$ forneceu ϕ_1 e o ao longo de $\tau_x = 0$ forneceu ϕ_2 . Então, como o raio de onda das funções $\eta(x, y)$ e $C(x, y)$ é constante, é de se esperar que $\phi_1 \cong \phi_2 \cong -\Delta\varphi$. Assim, a diferença de fase resultante foi definida como o oposto da média simples entre ϕ_1 e ϕ_2 e foi calculada da seguinte forma:

$$\Phi = \Delta\varphi = \begin{cases} -\arctan\left(\frac{\sin\phi_1 + \sin\phi_2}{\cos\phi_1 + \cos\phi_2}\right), & \text{se } \cos\phi_1 + \cos\phi_2 > 0 \\ -\arctan\left(\frac{\sin\phi_1 + \sin\phi_2}{\cos\phi_1 + \cos\phi_2}\right) + \pi, & \text{se } \cos\phi_1 + \cos\phi_2 < 0 \end{cases} \quad (3.9)$$

(JAMMALAMADAKA; SENGUPTA, 2001). Para o caso da componente sazonal, apenas o ajuste $f_t(\tau_t)$ foi utilizado e foi definido que $\Phi = \Delta\varphi = -\phi_2$, uma vez que ela é uma componente não propagante. O procedimento descrito acima foi feito para os sinais propagantes e sazonal ao longo de todas as latitudes.

Tem-se que $\Phi < 0$ para que o problema mantenha a sua consistência física, uma vez que um determinado pulso de C se apresenta atrasado tanto no domínio do espaço (está a leste) quanto no do tempo (vem depois) em relação à sua crista correspondente em η . Em outras palavras, uma linha tracejada em um diagrama Hovmoller de C está situada acima (ou à direita) de sua correspondente no diagrama de η . $\Phi < 0$ é a condição matemática que garante essa

consistência física e todos os valores de diferenças de fase encontrados neste trabalho obedecem a essa regra. Porém, mais adiante, apresentaremos $|\Phi| > 0$, simplesmente pela maior facilidade de interpretação.

É importante frisar que a metodologia aqui descrita não permite identificar se os processos verticais em questão são ressurgências de nutrientes ou a ascensões dos máximos subsuperficiais de clorofila. Ambos serão tratados como processos verticais, cujos valores de Φ rondarão 180° .

3.6 O atraso de fase da componente sazonal

Posteriormente, a partir da diferença de fase das componentes sazonais, um atraso temporal em dimensão de tempo foi calculado da seguinte maneira:

$$\Delta t = -\frac{\Phi}{2\pi} T, \quad (3.10)$$

onde T é o período da componente, ou seja, 12 meses, obtendo-se, assim, $\Delta t = -6\frac{\Phi}{\pi}$ quando Δt é expresso em meses. Como $\Phi < 0$, temos que $\Delta t > 0$. Tal atraso de fase, função da latitude, pode ser interpretado como o tempo levado para que uma crista de C surja após o surgimento de sua imediatamente anterior crista de η .

3.7 Seleção dos resultados de diferença de fase em faixas de latitude

Devido a limitações no filtro quanto ao cálculo das velocidades de fase dos sinais propagantes, às baixas variâncias explicadas pelas das componentes propagantes de C e à baixa precisão e pequenas profundidades de coleta de dados por parte dos sensores de cor do mar, uma seleção dos resultados de diferenças de fase entre os sinais se fez necessária. Tal seleção se baseou em diferenças entre velocidades de fase de pulsos de η e C e em valores mínimos de variância explicada por cada componente.

Em tese, só serão apresentados os resultados de diferenças de fase que satisfizerem simultaneamente as duas condições a seguir:

1. $|\Delta c_p| = \left| \frac{c_{p\eta} - c_{pC}}{c_{p\eta}} \right| \leq 0,5$, ou seja, a diferença relativa entre a velocidade de fase de um pulso de η e um de C não deve exceder 50%;
2. $R^2(y) \geq \mu(R^2(y)) - \sigma(R^2(y))$, ou seja, a variância explicada por uma componente em

uma determinada latitude, seja ela de η ou de C , deve ser maior do que sua média menos seu desvio-padrão ao longo de todas as latitudes;

4 Resultados e discussão

4.1 Diagramas de Hovmoller

As Figuras 4.1 a 4.4 apresentam exemplos de diagramas de Hovmoller obtidos tanto para η quanto para C para as latitudes $25,875^\circ\text{S}$, ao norte da área de estudo, e $44,125^\circ\text{S}$, ao sul. Uma análise inicial dos diagramas mostra que η_0 e η_5 são semelhantes (vide equação 3.2), o que indica que a maior parte do sinal total foi filtrado na forma de componentes cuja dinâmica é conhecida. Isso também pode ser afirmado pelo fato de η_r não apresentar grandes amplitudes e nem tendências ou padrões visíveis. η_t inclui a sazonalidade e sinais não propagantes da escala de bacia, como por exemplo El Niño/La Niña no caso do Oceano Pacífico. η_{24} a η_3 representam ondas de Rossby longas e o fato de terem aproximadamente a mesma velocidade de fase (isto é, aproximadamente a mesma inclinação das linhas tracejadas) corroboram esta hipótese, pois se são ondas de Rossby baroclínicas do primeiro modo, são não-dispersivas e, portanto, c_p não é função da frequência ω ou do número de onda k . A comparação entre as figuras de diferentes latitudes mostra uma variação progressiva da inclinação dos padrões, o que ilustra a dependência de c_p com a latitude: $c_p \propto \frac{\cos(\theta)}{\sin^2(\theta)}$ (POLITO; LIU, 2003), onde θ é a latitude. Por sua vez, η_E possui vórtices de mesoescala, porém ainda apresenta uma quantidade muito grande de ruído, o suficiente para que não consigamos fazer interpretações consistentes a seu respeito.

Na Figura 4.2, o domínio do sinal sazonal para os dados de clorofila é absolutamente evidente, uma vez que $C_t \approx C_0$, apresentando assim, como será quantificado adiante para todas as latitudes, uma variância explicada consideravelmente maior que a das outras componentes. Dessa forma, o sinal das componentes propagantes está fadado a explicar apenas uma pequena fração da variância total, e por isso está muito mais sujeito a erros. Isso explica, entre outras coisas, a decisão de impor a velocidade de fase determinada pelos dados altimétricos ao sinal de clorofila. A Figura 4.3, entre $\sim 55^\circ\text{W}$ e $\sim 25^\circ\text{W}$, apresenta feições relacionadas à alta turbulência da confluência Brasil–Malvinas, que é aparente ao longo de toda a série temporal. Há feições propagantes para leste ao leste de $\sim 25^\circ\text{W}$ em η_r , η_t e η_E , resultado de suas interações

com a Corrente do Atlântico Sul, que flui para leste. η_r e η_E apresentam uma quantidade alta de sinal com estrutura, provavelmente de vórtices advectados pelas correntes, portanto, escapando dos nossos objetivos. A Figura 4.4 também apresenta feições relacionadas à confluência Brasil–Malvinas. As feições horizontais nos diagramas de C_r e C_E na segunda metade da série temporal podem ser interpretadas como advecção por correntes zonais na superfície. C_t apresenta variações interanuais significativas e C_r apresenta muito ruído, de modo que não seria razoável esperar correlação significativa. Esses altos ruídos certamente têm relação com as feições em azul escuro presentes na Figura 1.2, oriundas de limitações no processo de interpolação pela presença de nuvens na borda sul da região de estudo.

4.2 A componente não-propagante sazonal (η_t e C_t)

4.2.1 Variâncias explicadas

A Figura 4.5 mostra $R^2(\eta_t)$ e $R^2(C_t)$, tanto na forma de mapas quanto na forma de variações latitudinais. $R^2(C_t)$ é cerca de três vezes maior que $R^2(\eta_t)$ para a região de estudo, sendo essas as únicas componentes que apresentam maiores valores de variância explicada pela componente de clorofila em relação à componente de altura. As médias obtidas foram: 15,4% para $R^2(\eta_t)$ e 45,5% para $R^2(C_t)$ (Figura 4.5(c)). Há variações latitudinais e longitudinais para $R^2(\eta_t)$ e variações praticamente latitudinais para a $R^2(C_t)$. Os valores de desvio-padrão são de 11,6% para $R^2(\eta_t)$ e de 18,0% para $R^2(C_t)$ (Figuras 4.5(a) e 4.5(b)). Apesar de tais variações existirem, obviamente as longitudinais não são explícitas nos gráficos de variações latitudinais.

Os valores encontrados para $R^2(C_t)$ (Figura 4.5(b)) são maiores no interior do giro subtropical, a norte de 38°S–40°S (STRAMMA; ENGLAND, 1999), região oligotrófica onde os processos verticais da influência de η sobre C são mais pronunciados do que em outras latitudes (GUTKNECHT *et al.*, 2010) porque lá a termoclina é mais rasa do que nas outras regiões da área de estudo e seus gradientes meridionais de C são baixos. Tais valores se mostram com mínimos locais na região próxima ao limite sul do giro subtropical e, mais ao sul, voltam a ter valores mais altos, porém ainda menores do que os observados para o interior do giro. Isso ocorre pois no limite sul do giro a Corrente do Atlântico Sul (STRAMMA; ENGLAND, 1999) introduz gradientes meridionais e verticais de velocidade. O cisalhamento introduzido pela corrente propicia o desenvolvimento de instabilidades de mesoescala que são visíveis nas Figuras 1.2 e 1.3 ao longo das referidas latitudes. Este sinal tem uma variância relativa comparativamente grande e isso reduz a parcela explicada pelo sinal sazonal. Observando-se sua variação latitudinal (Figura 4.5(c)), é possível dizer que tanto $R^2(\eta_t)$ quanto $R^2(C_t)$ apresentam, em mé-

AASM em 25.875°S (em mm)

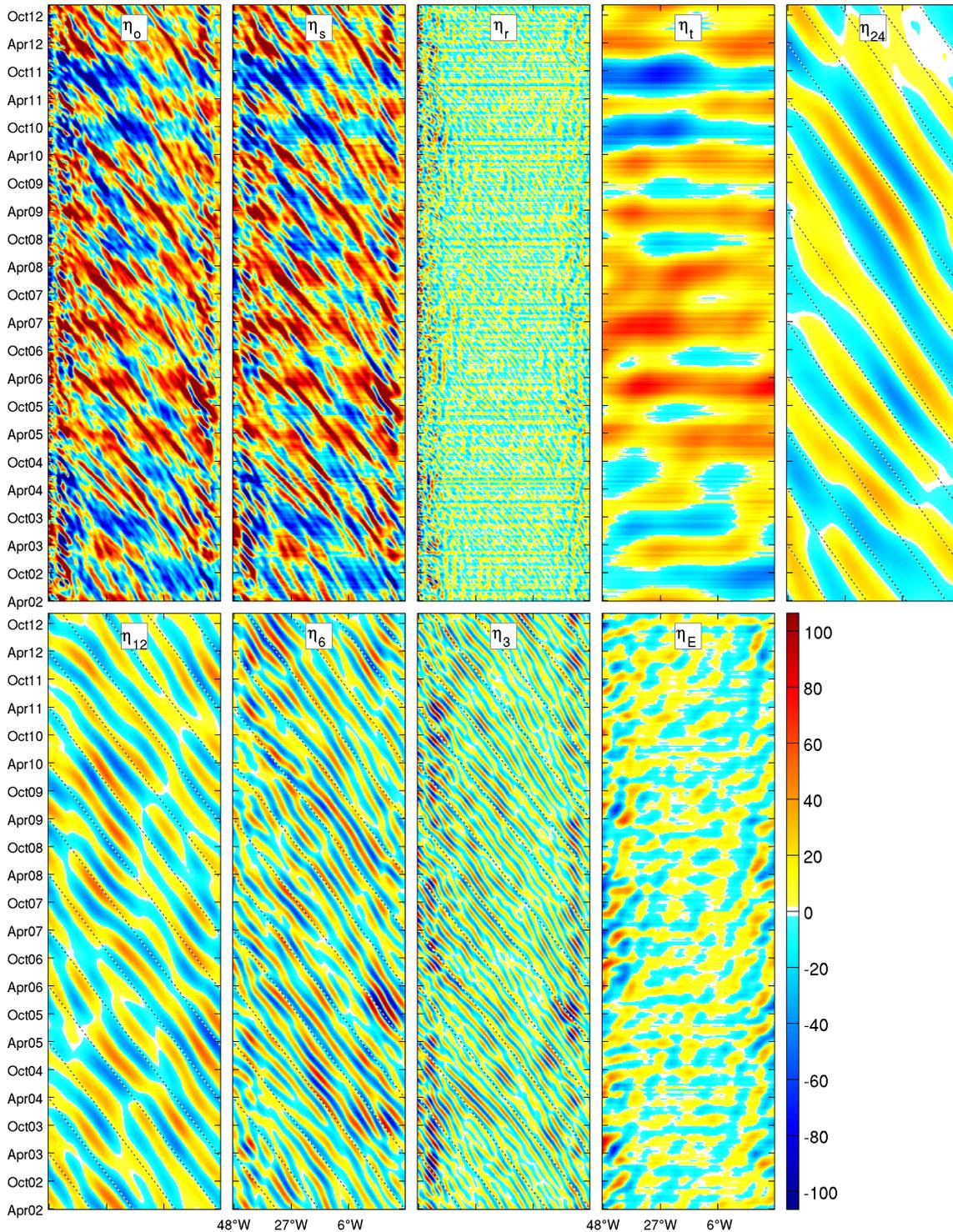


Figura 4.1: Diagrama de Hovmoller da anomalia da altura da superfície do mar, filtrados a partir dos dados da AVISO (*reference* nível 3), para a latitude de **25,875°S** do Atlântico Sul (série temporal de abril de 2002 a outubro de 2012). Os valores estão em mm e são representados pela barra de cores à direita. η_0 representa a anomalia original da altura da superfície do mar, medida pelos satélites e interpolada, portanto dados de nível 3; η_s representa a soma das componentes filtradas; η_r é o sinal residual, dominado por fenômenos de pequena escala e alta frequência e por ruídos; η_t é o sinal não propagante, de escala de bacia; este sinal inclui, por exemplo, o ciclo sazonal e, no Pacífico, sinais não-propagantes decorrentes de El Niño/La Niña; η_{24} a η_3 compreendem as ondas de Rossby que se propagam para o oeste com períodos centrados em 24, 12, 6 e 3 meses; η_E compreende as feições de mesoescala não-propagantes, como vórtices, por exemplo. As retas pontilhadas indicam a velocidade de fase média para cada diagrama.

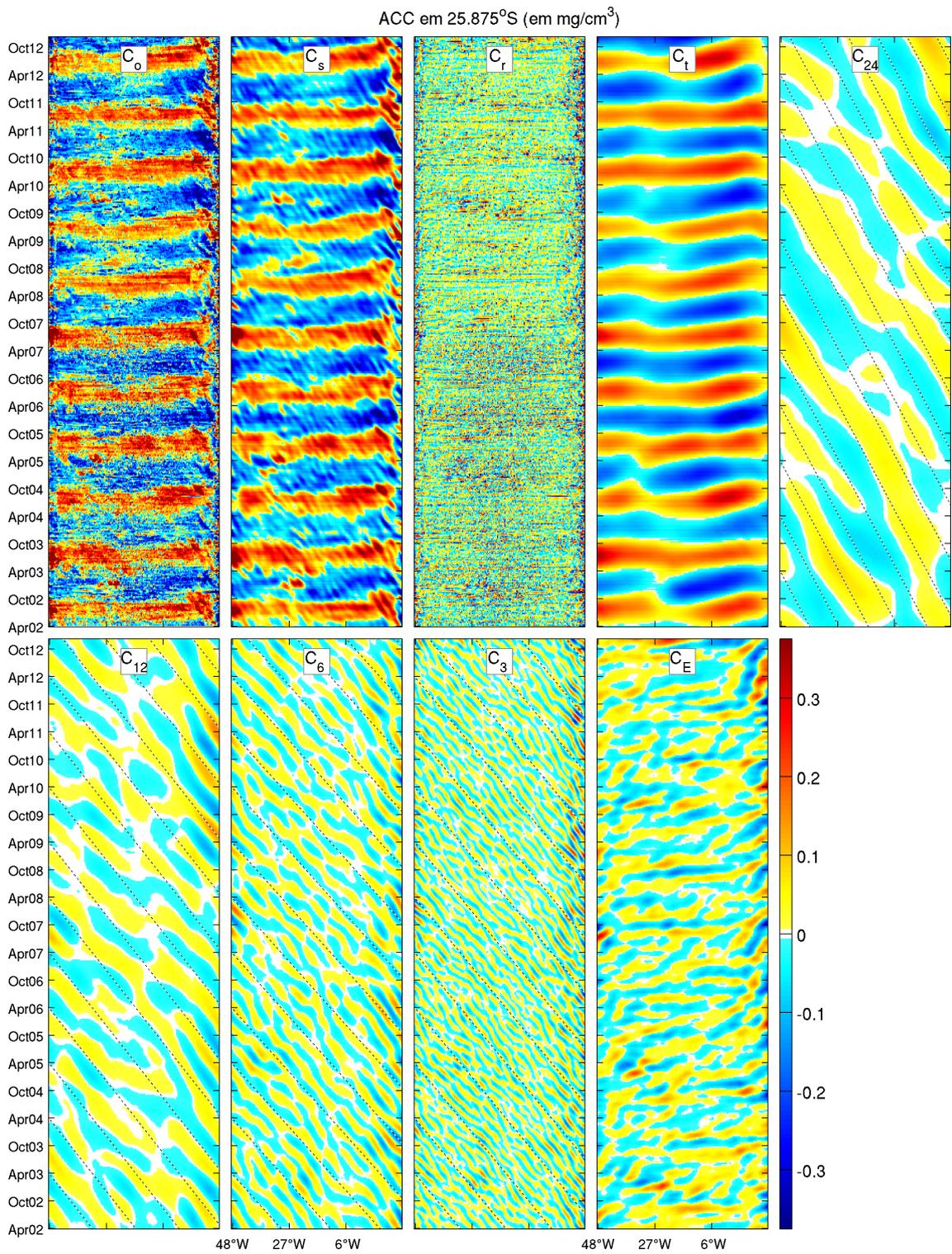


Figura 4.2: Similar à Figura 4.1, para clorofila. Os dados utilizados foram os dos sensores MODIS Aqua e SeaWiFS e as unidades são $\log_{10}(\text{mg cm}^{-3})$.

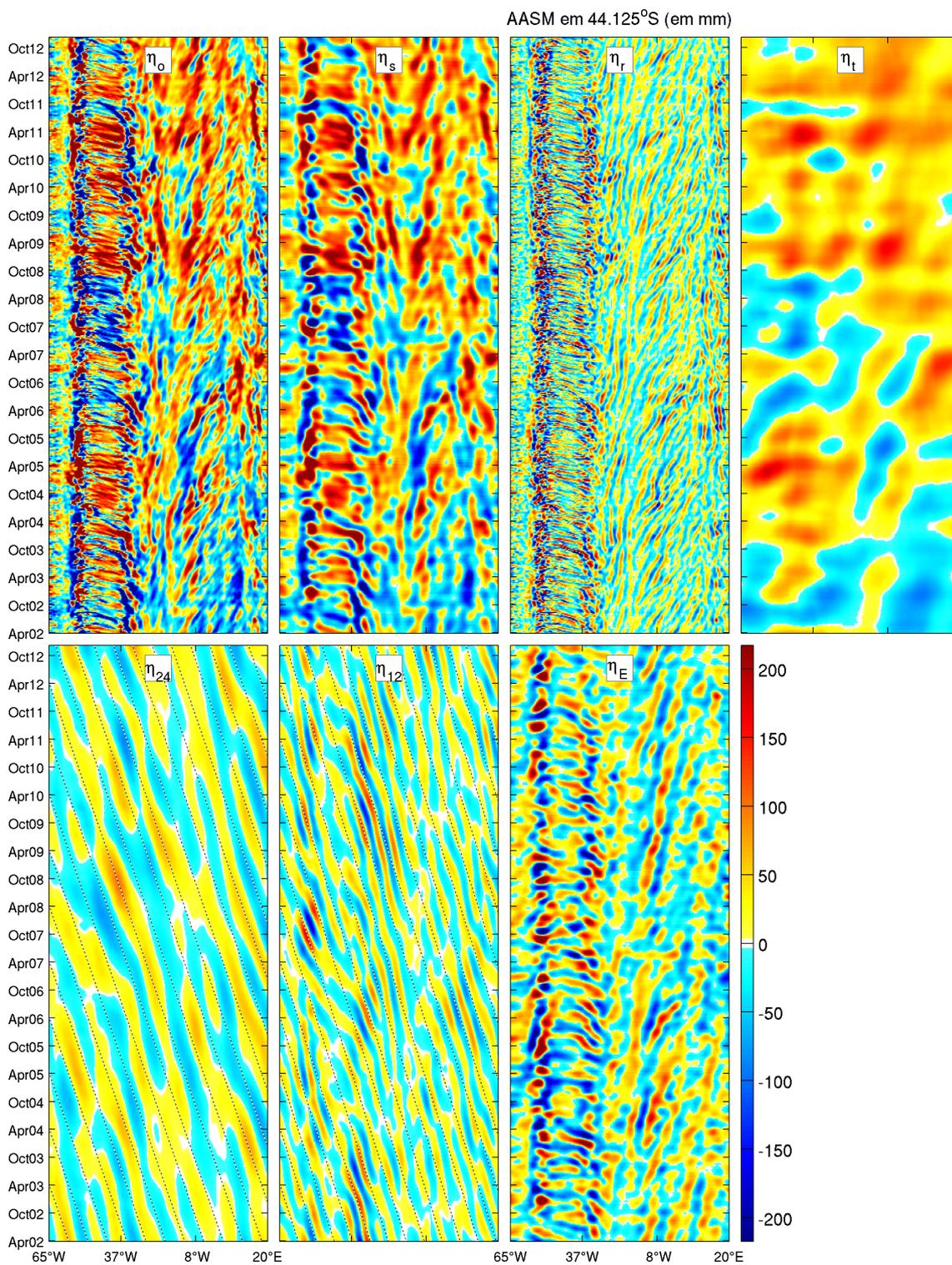


Figura 4.3: Similar à Figura 4.1, para a latitude 44,125°S. Note a ausência das componentes de períodos 6 e 3 meses devido ao alcance de suas latitudes críticas.

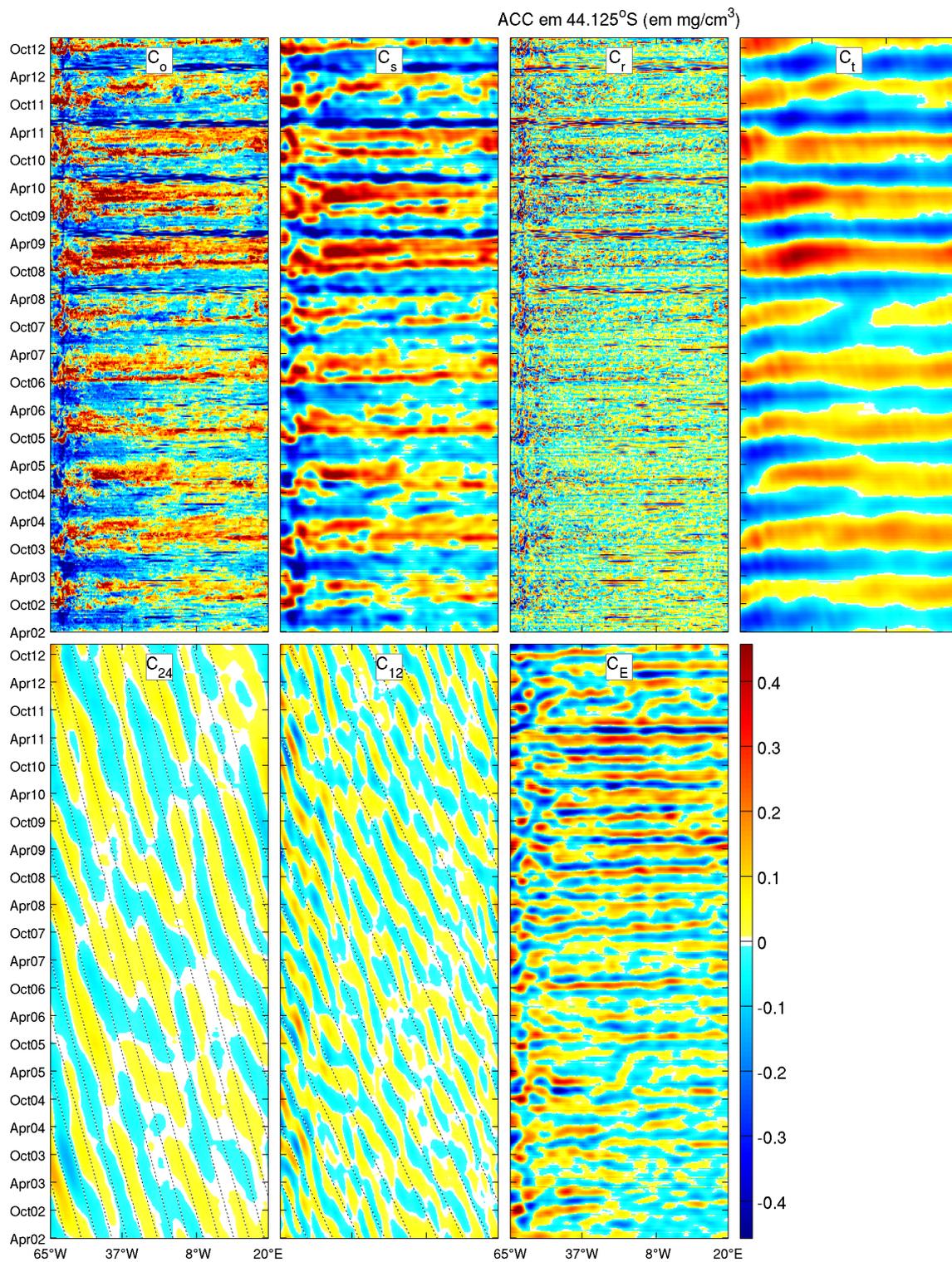
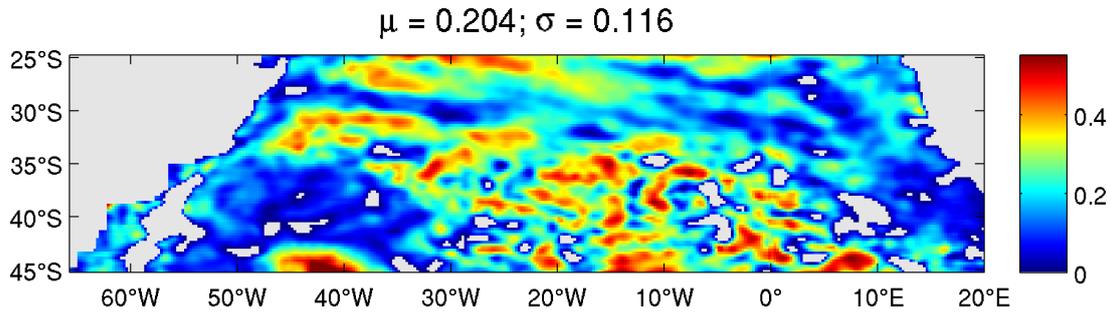
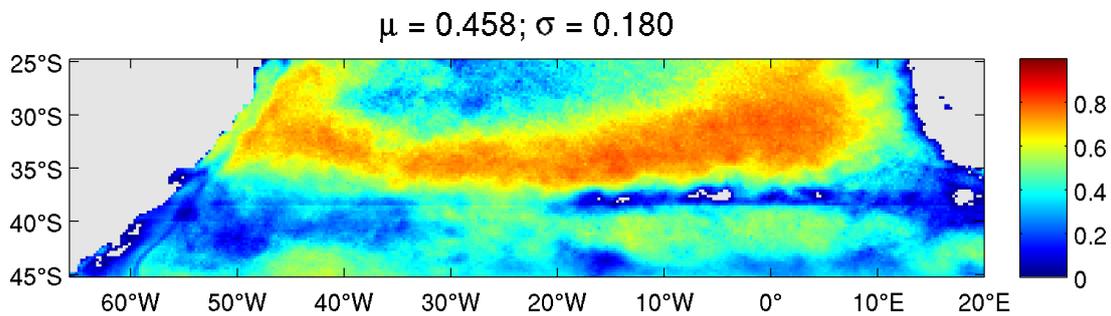


Figura 4.4: Similar à Figura 4.2, para a latitude 44,125°S. Note a ausência das componentes de períodos 6 e 3 meses devido ao alcance de suas latitudes críticas.

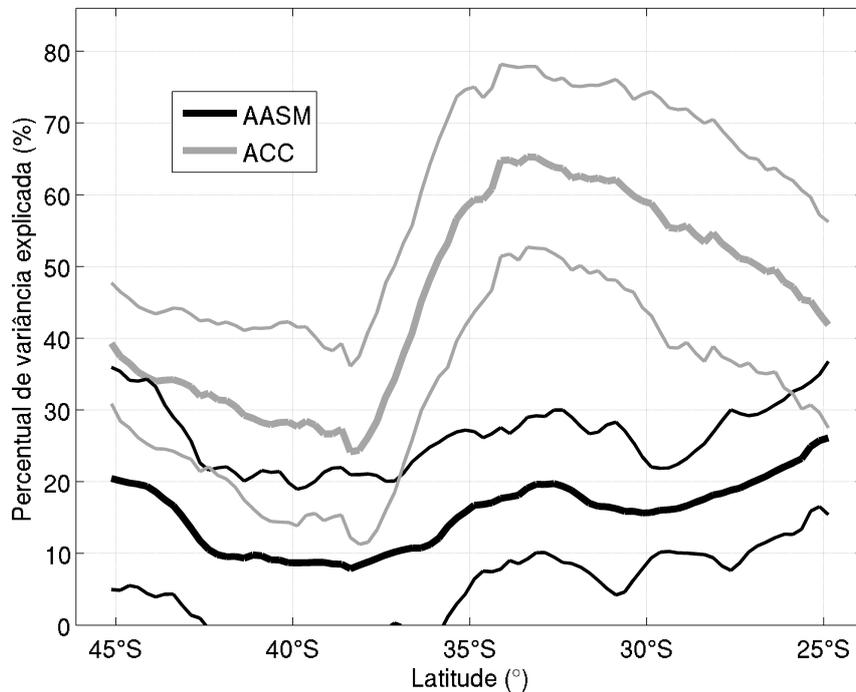


(a) Porcentagem de variância explicada pela componente sazonal, não-propagante, na altura da superfície do mar (η_t). Foram mascaradas as regiões com profundidades inferiores a 1000 m e cujos valores de variância se mostraram insignificantes.



(b) Similar à Figura 4.5(a), só que para clorofila (C_t).

$\eta: \mu = 15.4\%; \sigma = 4.8\% \mid C: \mu = 45.5\%; \sigma = 13.6\%$



(c) Variação meridional de médias zonais da variância explicada pelas componentes sazonais, não-propagantes (η_t e C_t). AASM se refere à anomalia da altura da superfície do mar e ACC à anomalia da concentração de clorofila. As curvas menos grossas representam a variabilidade zonal de cada latitude.

Figura 4.5: Mapas e gráfico referentes às **componentes sazonais**, não-propagantes (η_t e C_t).

dia, maiores valores em mais baixas latitudes do que em altas. Porém, sua correlação é alta somente em altas latitudes e é baixa nas baixas latitudes, provavelmente devido à característica oligotrófica do centro do giro subtropical.

Por fim, fica clara a forte influência de C pelo ciclo sazonal, restando, assim, pouca variância para que as outras componentes (propagantes e de mesoescala) expliquem: apenas 54,5% pela média obtida pela Figura 4.5(c). Analogamente, a variância restante para η é 84,6%. Adicionalmente, convém lembrar que as médias e os desvios-padrão apresentados nos mapas e nos gráficos são ligeiramente diferentes devido à diferença no seu cálculo (vide seção 3.3).

4.2.2 Covariância bidimensional

Um exemplo de covariância bidimensional para a componente sazonal, referente à latitude $25,875^\circ\text{S}$, é apresentado na Figura 4.6. Como descrito na seção 3.5, aqui são mostrados apenas os valores distantes da origem em no máximo uma distância de 1,5 ciclos, ou seja, os valores de fato utilizados para o cálculo da diferença de fase — tal observação também será válida a seguir para as componentes propagantes. Tal seleção de dados garante não só a sua confiabilidade estatística como a consistência física do problema, como descrito anteriormente. Adicionalmente, é importante frisar que apenas os quadrantes inferiores ($\tau_i < 0$) representam cristas de C temporalmente localizadas após suas respectivas cristas de η , pois queremos testar a influência do processo físico sobre o biológico, e não vice-versa (vide seção 3.5).

4.2.3 Diferença de fase

As diferenças de fase (Φ) temporais entre as componentes sazonais são apresentadas na Figura 4.7. Sua média é 199° e seu desvio-padrão é 68° . Φ apresenta valores entre 120° e 310° e é contínuo ao longo de todo o domínio. É observado um padrão crescente em direção a altas latitudes e a taxa de variação (derivada) desse crescimento é maior entre as latitudes $\sim 37,5^\circ\text{S}$ e $\sim 41^\circ\text{S}$, região coincidente com o limite sul do giro subtropical. Tal comportamento de sua derivada sugere a divisão da região em três regiões distintas no que se refere às componentes sazonais: dentro do giro subtropical, ao longo de seu limite sul e ao sul do giro.

O atraso temporal, calculado a partir da diferença de fase, é mostrado na Figura 4.8. Ele pode ser interpretado como o tempo levado para que um máximo de C se apresente a partir do momento em que o máximo de η correspondente (ou seja, o imediatamente anterior) foi observado.

Dessa forma, nossa interpretação dos resultados é que a variação do atraso de fase entre 4 e

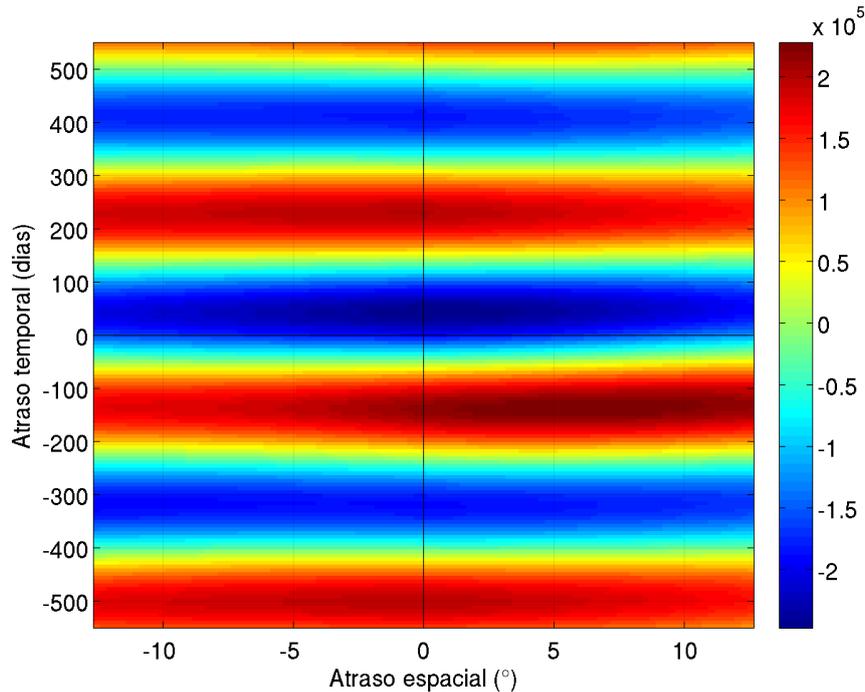


Figura 4.6: Covariância bidimensional entre as **componentes sazonais**, não-propagantes, (η_t e C_t) na latitude de $25,875^\circ\text{S}$, a título de exemplo. O cálculo foi feito através dos diagramas de Hovmöller de η e C , com resolução de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$. O atraso de fase foi calculado através da fase de uma função senoidal ajustada ao longo de $\tau_x = 0$.

6 meses entre $\sim 25^\circ\text{S}$ e $\sim 37,5^\circ\text{S}$ (interior do giro subtropical) se deve ao fato de que, no verão, a limitação de nutrientes inibe o aumento instantâneo da concentração de clorofila, uma vez que esta é uma região oligotrófica. Após 4–6 meses, o rebaixamento do nível do mar e consequente ascensão da pycnoclina propiciam a chegada de nutrientes alóctones à camada eufótica, gerando os máximos valores de C da região. Analogamente, para as regiões entre $\sim 41^\circ\text{S}$ e $\sim 45^\circ\text{S}$ (sul do giro subtropical), menos oligotróficas, o atraso entre 10 e 11 meses ocorre porque já pouco antes do solstício de verão há irradiância suficiente para que o fitoplâncton produza clorofila, uma vez que os nutrientes são menos limitantes nesta região e a radiação solar é o principal limitante. Isso indica que em altas latitudes, C é mais influenciado pela irradiância solar do que por η .

Uma variante dessa explicação é que ao invés de ressurgência de nutrientes gerando maiores taxas de fotossíntese, o processo vertical em questão seja unicamente a ascensão do máximo subsuperficial de clorofila, de modo que uma maior quantidade integrada de clorofila seja registrada pelos sensores dos satélites, sem que haja necessariamente variações nas quantidades de clorofila integradas ao longo de toda a coluna d'água.

Gutknecht *et al.* (2010) calcularam as contribuições relativas de processos de ressurgência de nutrientes e de ascensão do máximo subsuperficial de clorofila para componentes propa-

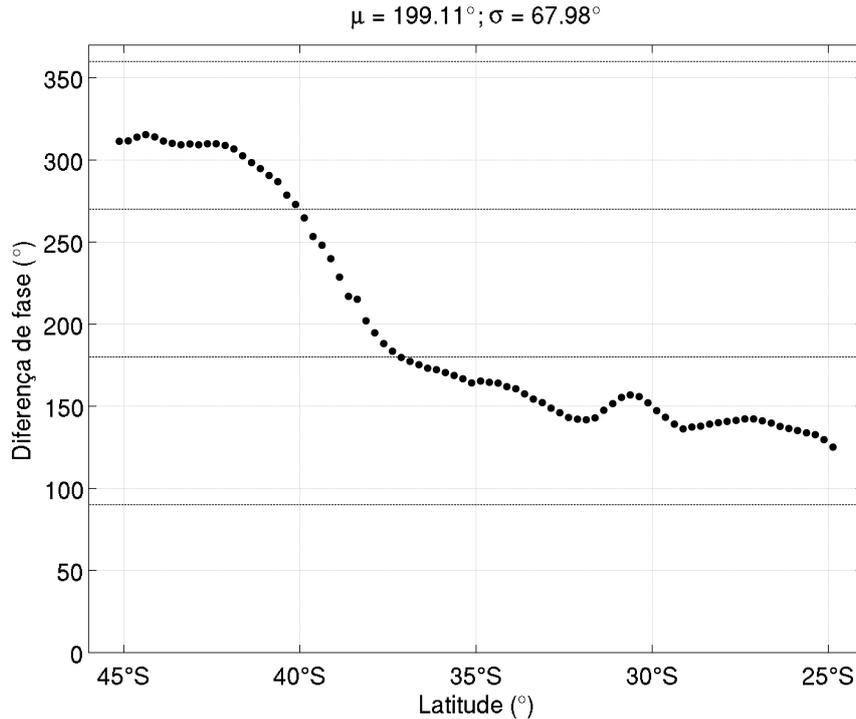


Figura 4.7: Variação meridional das diferenças de fase entre as **componentes sazonais**, não-propagantes (η_t e C_t). Valores em graus.

gantes no Atlântico Sul. Os valores obtidos por eles foram: 31% de ressurgência e 20,5% de ascensão para regiões dentro do giro subtropical e 31,5% para ressurgência e 9,7% para ascensão para regiões ao sul do giro subtropical. Isso totaliza 51,5% de processos verticais dentro do giro e 41,2% ao sul do giro. Os valores restantes para que os percentuais completem 100% se referem a advecções horizontais de clorofila por parte de correntes geostróficas geradas pelas componentes propagantes, discutidas mais adiante. Nossos resultados (Figura 4.7) foram: $90^\circ < \Phi < 180^\circ$ entre $\sim 25^\circ\text{S}$ e $\sim 35^\circ\text{S}$, $\Phi \sim 180^\circ$ entre $\sim 35^\circ\text{S}$ e $\sim 37,5^\circ\text{S}$ e $\Phi > 180^\circ$ ao sul de $\sim 37,5^\circ\text{S}$. Ou seja, para baixas latitudes, nossos resultados corroboram a conclusão obtida por eles porque por mais que Φ não tão próximo de 180° para as mais baixas latitudes, o gradiente meridional de C também é muito baixo no interior do giro (Figuras 1.2 e 1.3), diminuindo também a contribuição relativa de processos horizontais. Para a região ao sul do giro a conclusão obtida por eles também é corroborada por nossos resultados: além de Φ não estar em torno de 180° ao sul de $\sim 37,5^\circ\text{S}$, os maiores gradientes meridionais de C aumentam a contribuição relativa de processos horizontais.

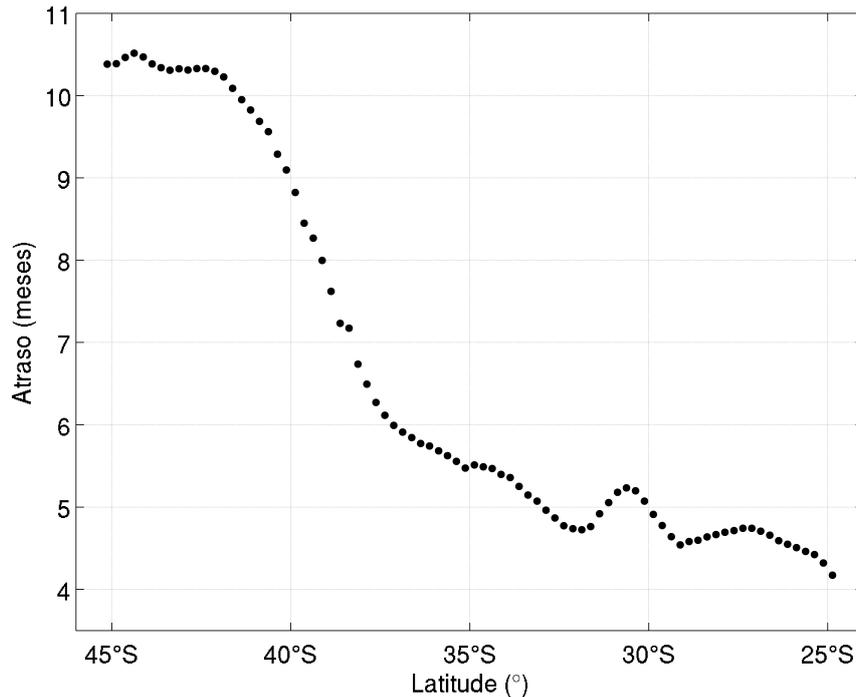


Figura 4.8: Variação meridional dos atrasos de fase entre as **componentes sazonais**, não-propagantes, (η_i e C_i). Valores em meses.

4.3 A componente não-propagante de feições de mesoescala (η_E e C_E)

De maneira análoga à análise apresentada anteriormente, a Figura 4.9 mostra as $R^2(\eta_E)$ e $R^2(C_E)$. Suas parcelas de variabilidade em η são cerca de 1,5 vezes maiores do que em C e as médias obtidas foram 20,7% para $R^2(\eta_E)$ e 13,4% para $R^2(C_E)$ (Figura 4.9(c)). Os valores de desvio-padrão são de 13,9% para a $R^2(\eta_E)$ e de 9,4% para a $R^2(C_E)$ (Figuras 4.9(a) e 4.9(b)). Um ponto interessante é como interpretamos as regiões mascaradas da Figuras 4.9(a) e 4.9(b), onde a variância explicada é insignificante. Nessas regiões o sinal filtrado não nos permite identificar localmente o fenômeno em foco, no caso, sinais de mesoescala.

$R^2(C_E)$ atinge seus valores máximos nas mais altas latitudes, ao sul do giro subtropical e ao longo do limite sul do mesmo, evidenciando uma alta variação de clorofila na região por parte de feições de mesoescala (GUTKNECHT *et al.*, 2010). Há variações latitudinais e longitudinais tanto para $R^2(\eta_E)$ quanto para $R^2(C_E)$, sendo que $R^2(C_E)$ apresenta fortes gradientes meridionais, obtendo valores máximos nas mais altas latitudes analisadas. Os valores encontrados para $R^2(\eta_E)$ possuem máximos locais localizados em regiões ao sul de $\sim 40^\circ\text{S}$ e próximos às bordas oeste e leste da área de estudo, onde há alta interação entre atividades de mesoescala e ondas de Rossby (CHARRIA *et al.*, 2003). Novamente, apesar de tais variações existirem, as

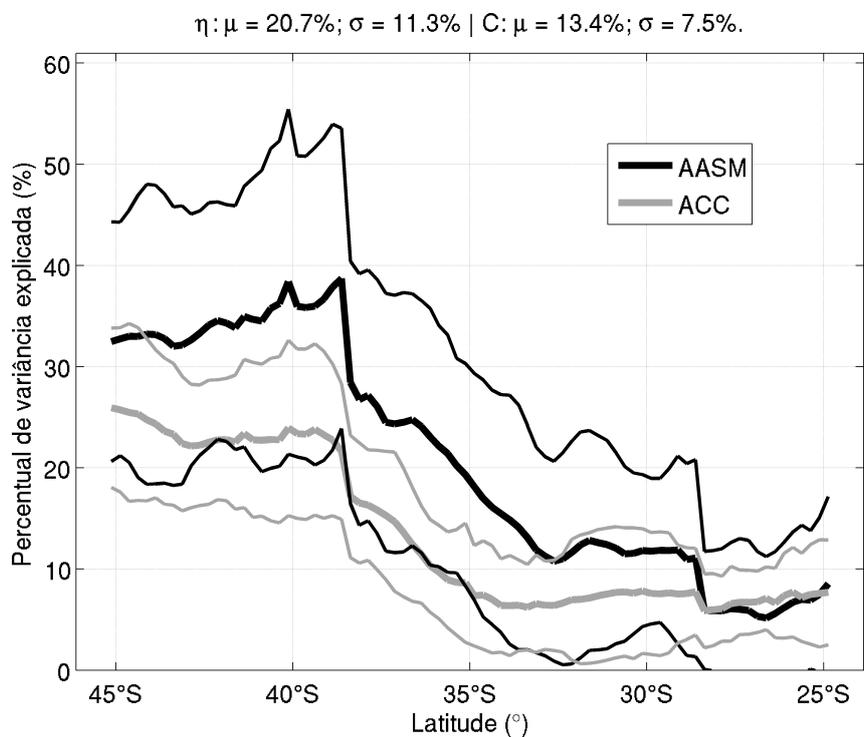
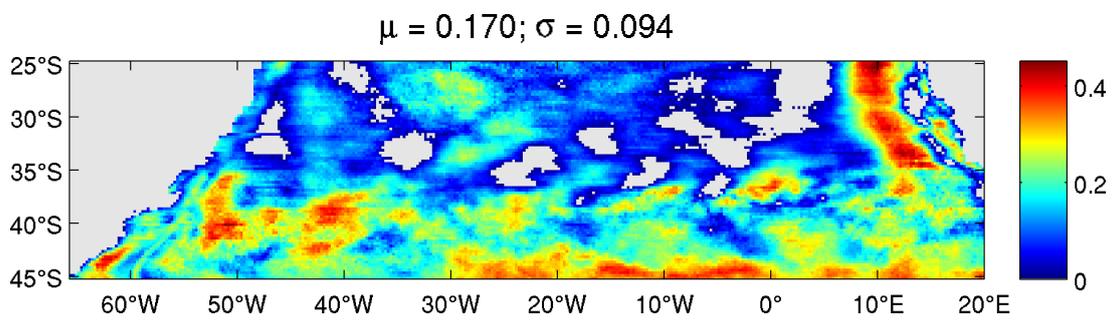
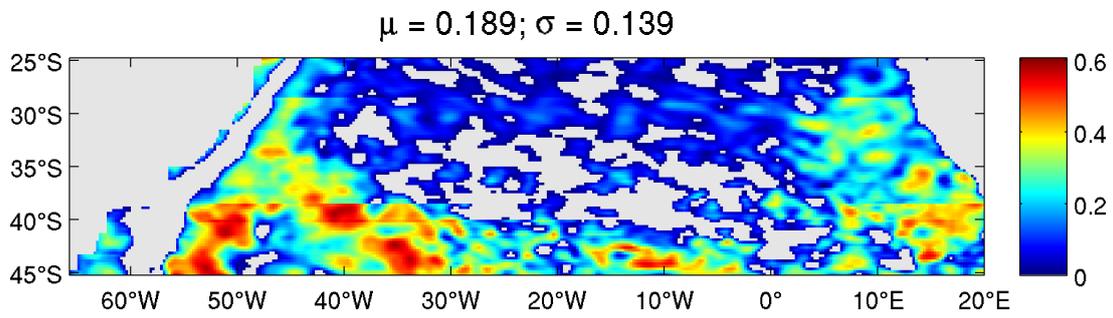


Figura 4.9: Mapas e gráfico referentes às **componentes de mesoescala**, não-propagantes (η_E e C_E).

longitudinais não são explícitas nos gráficos de variações latitudinais.

Observando-se sua variação latitudinal (Figura 4.9(c)), é possível dizer que ambas apresentam, em média, maiores valores em mais altas latitudes. Também, sua correlação é alta ao longo de todas as latitudes, o que pode indicar η influenciando significativamente C através de feições de mesoescala ao longo de todas as latitudes da área de estudo. Seus padrões "em degraus", localizados coincidentemente nas latitudes críticas para as ondas de Rossby em questão estabelecem uma estreita ligação com as mesmas (CHELTON *et al.*, 2007): a partir do momento em que, em uma determinada latitude, o oceano não mais responde a forçantes periódicas com ondas de Rossby, a energia é utilizada para a formação de feições de mesoescala. Isso ocorre porque os comprimentos das ondas diminuem com o aumento da latitude, assim, se equiparando cada vez mais ao raio de deformação de Rossby baroclínico local, que define aproximadamente o comprimento característico de processos de mesoescala. Com a redução desse comprimento, a variação meridional de f dentro da área compreendida pela anomalia forçada é pequena demais para que haja continuidade da propagação de fase. Isso também pode ser visualizado através do esquema da Figura 1.1.

Por fim, a variância do sinal restante depois de removidas as componentes não-propagantes (sazonal, Figura 4.5(c), e de mesoescala, Figura 4.9(c)) é de 63,9% da variância original para η e de 41,1% para a C . Novamente, convém lembrar que as médias e os desvios-padrão apresentados nos mapas e nos gráficos são ligeiramente diferentes destes, baseados nas matrizes de dados usadas nos diagramas de Hovmoller (Figuras 4.1 a 4.4), devido à diferença no seu cálculo (vide seção 3.3).

4.4 As componentes propagantes (η_{24} a η_3 e C_{24} a C_3)

4.4.1 Variâncias explicadas

De maneira análoga às análises apresentadas anteriormente, as Figuras 4.10 a 4.13 mostram as variâncias explicadas por cada componente propagante no sinal original. As componentes que mais influenciam η são as de períodos 6 e 3 meses, com médias de variância explicada de respectivamente 23,0% e 19,8%, seguidas pelas de 12 e 24 meses, com respectivamente 12,7% e 7,4% (Figuras 4.10(c) a 4.13(c)). Para C , a diferença de influência entre as componentes é menor: 5,0% de variância explicada média para a onda de período 3 meses, 4,2% para a de 6 meses, 4,0% para a de 12 meses e 2,4% para a de 24 meses. Assim, em média, para tais componentes, as variâncias explicadas por sinais ondulatórios de η são cerca de 3 a 5,5 vezes maiores do que as correspondentes em C . Isto se dá pois (*I*) o sinal sazonal responde

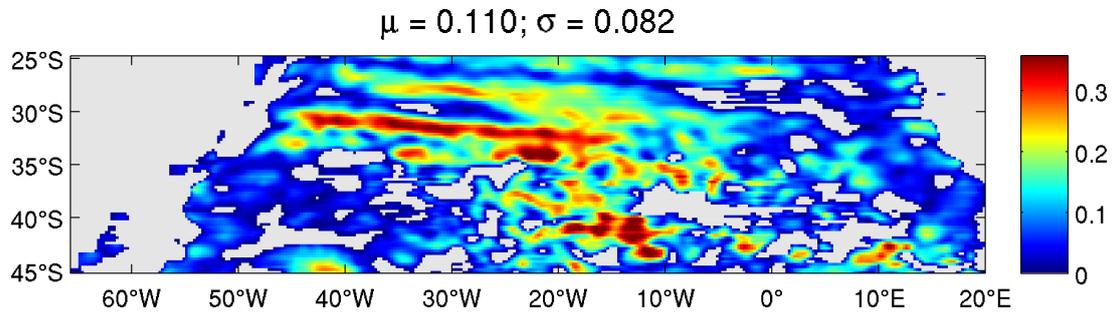
por muito mais variância no caso de C e (2) o efeito em η é físico, uma consequência direta do movimento quase-geostrófico, cujo efeito em C é indiretamente observado através de um traçador não passivo.

A variação longitudinal apresentada nos mapas é considerável, uma vez que apresentam desvios-padrão de cerca de 8,2% a 10,2% para $R^2(\eta_i)$ e de 2,9% a 5,8% para $R^2(C_i)$ (Figuras 4.10(a) e 4.10(b) a 4.13(a) e 4.13(b)). Há uma maior influência das componentes em C nas porções mais a leste da área de estudo, devido às maiores concentrações de clorofila presentes na região, oriundas de ressurgência. Também, nas baixas latitudes do lado leste, onde a termoclina e a nutriclina são mais rasas (KOLTERMANN *et al.*, 2011), o máximo de variância explicada para a clorofila é devido às componentes de 24 e 12 meses (Figuras 4.10(a) e 4.11(b)). Portanto, nessa escala de tempo, a amplitude das oscilações da termoclina são tais que o efeito biológico só se verifica de forma consistente do lado leste. Adicionalmente, os altos valores encontrados nas bordas oeste e leste também se devem à interação de feições de mesoescala com ondas de Rossby (CHARRIA *et al.*, 2003). $R^2(C_6)$ possui seus máximos valores a sudoeste da área de estudo. Neste caso, a amplitude de η_6 é grande o suficiente para levar nutrientes à zona eufótica. Esta região é um máximo de energia cinética turbulenta (OLIVEIRA; POLITO, 2013) e parte dessa energia está sob a forma de ondas de Rossby semi-aneais.

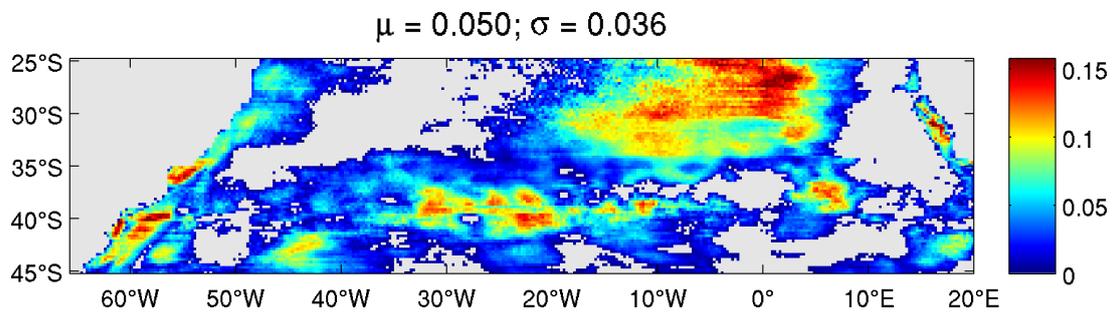
Por sua vez, a variação latitudinal das componentes (Figuras 4.10(c) a 4.13(c)) (à exceção da componente de período 3 meses, devido à pequena faixa de latitudes que esta abrange) se mostra de modo que mais $R^2(\eta_i)$ é explicada nas mais baixas latitudes enquanto que mais $R^2(C_i)$ é explicada nas mais altas latitudes. Para $R^2(\eta_i)$, isso pode ser explicado pelo fato de que as ondas de Rossby, em mais altas latitudes, se aproximam mais de suas latitudes críticas, perdendo assim sua continuidade de fase. Para $R^2(C_i)$, isso ocorre porque nas latitudes mais altas há maiores concentrações de clorofila, uma vez que a região se encontra ao sul do giro subtropical oligotrófico.

4.4.2 Covariância bidimensional

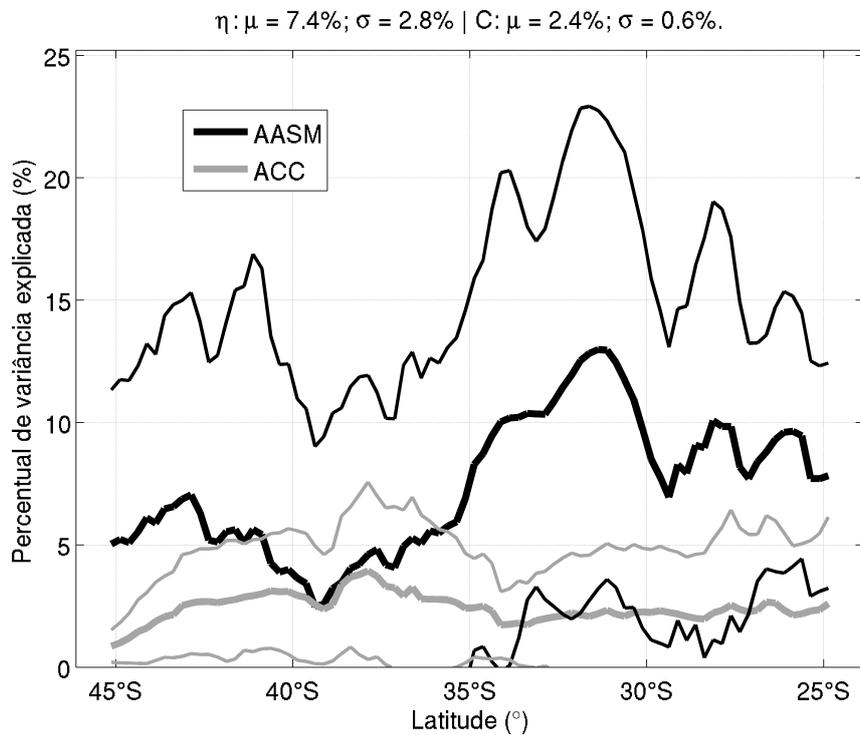
Exemplos de covariâncias bidimensionais típicas, referentes à latitude 25,875°S, para as componentes propagantes são apresentadas nas Figuras 4.14 e 4.15. Diferentemente do que é válido para as componentes sazonais, neste caso o quadrante que garante a consistência física do problema é o inferior à esquerda, com $\tau_x < 0$ e $\tau_t < 0$. Este é o quadrante que contém cristas de C localizadas tanto espacial quanto temporalmente após as respectivas cristas de η (vide seção 3.5). Os ajustes senoidais foram feitos ao longo de $\tau_x = 0$ e $\tau_t = 0$ e o padrão de faixas inclinadas, não observado para as componentes sazonais, se deve exatamente ao fato de que as



(a) Similar à Figura 4.5(a), só que para a componente propagante de 24 meses (η_{24}).

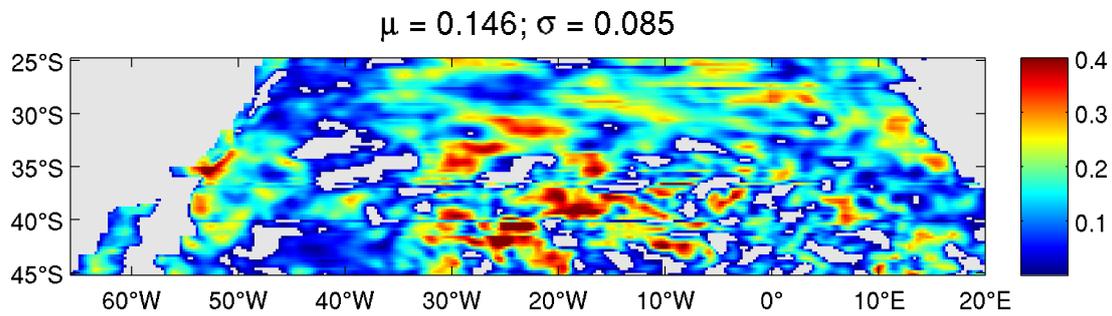


(b) Similar à Figura 4.5(b), só que para a componente propagante de 24 meses (C_{24}).

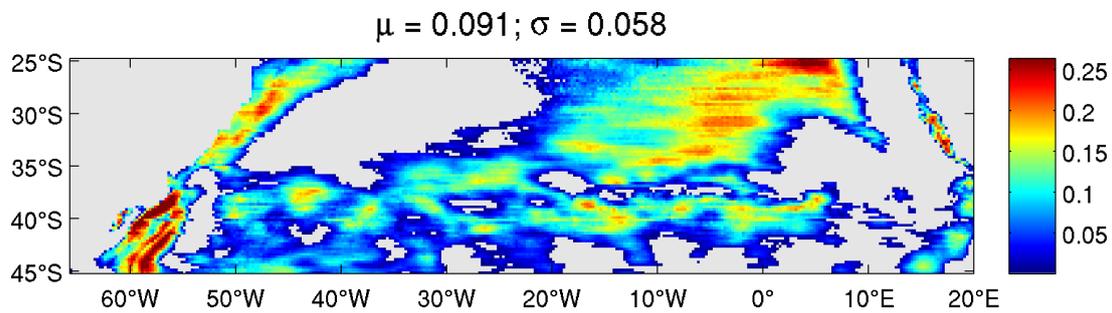


(c) Similar à Figura 4.5(c), só que para as componentes propagantes de 24 meses (η_{24} e C_{24}).

Figura 4.10: Mapas e gráfico referentes às componentes propagantes de **período de 24 meses** (η_{24} e C_{24}).

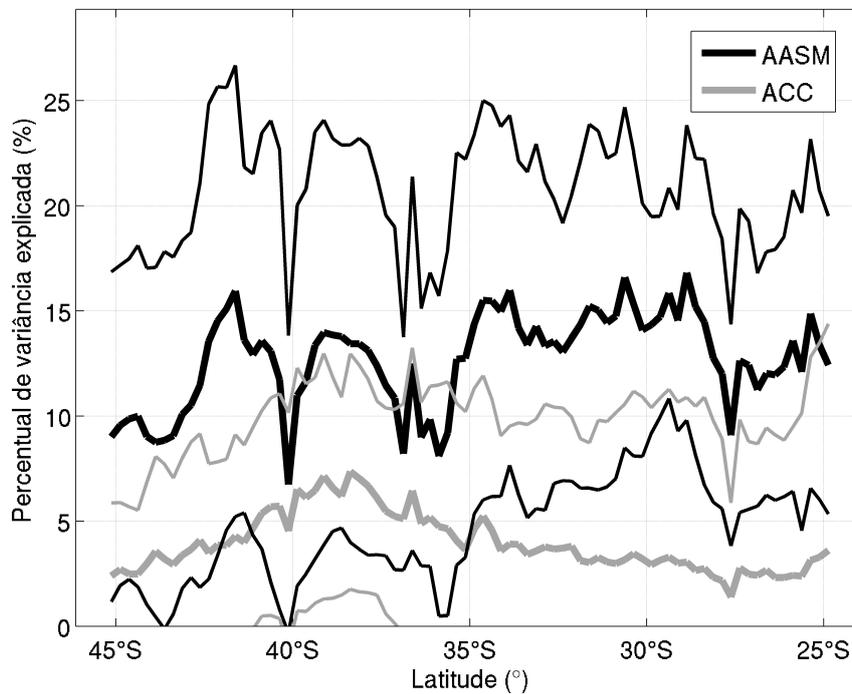


(a) Similar à Figura 4.5(a), só que para a componente propagante de 12 meses (η_{12}).



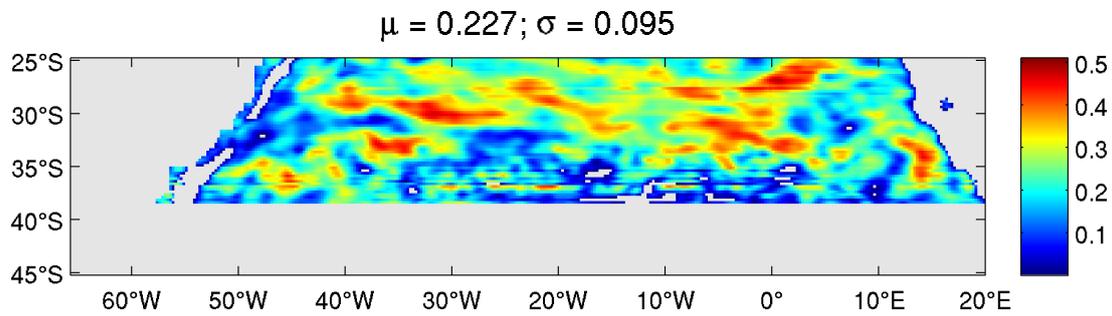
(b) Similar à Figura 4.5(b), só que para a componente propagante de 12 meses (C_{12}).

$\eta: \mu = 12.7\%; \sigma = 2.3\% \mid C: \mu = 4.0\%; \sigma = 1.4\%$.

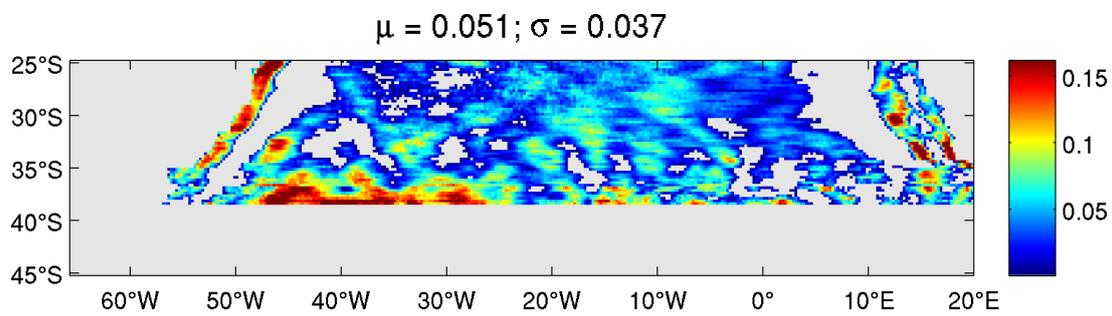


(c) Similar à Figura 4.5(c), só que para as componentes propagantes de 12 meses (η_{12} e C_{12}).

Figura 4.11: Mapas e gráfico referentes às componentes propagantes de **período de 12 meses** (η_{12} e C_{12}).

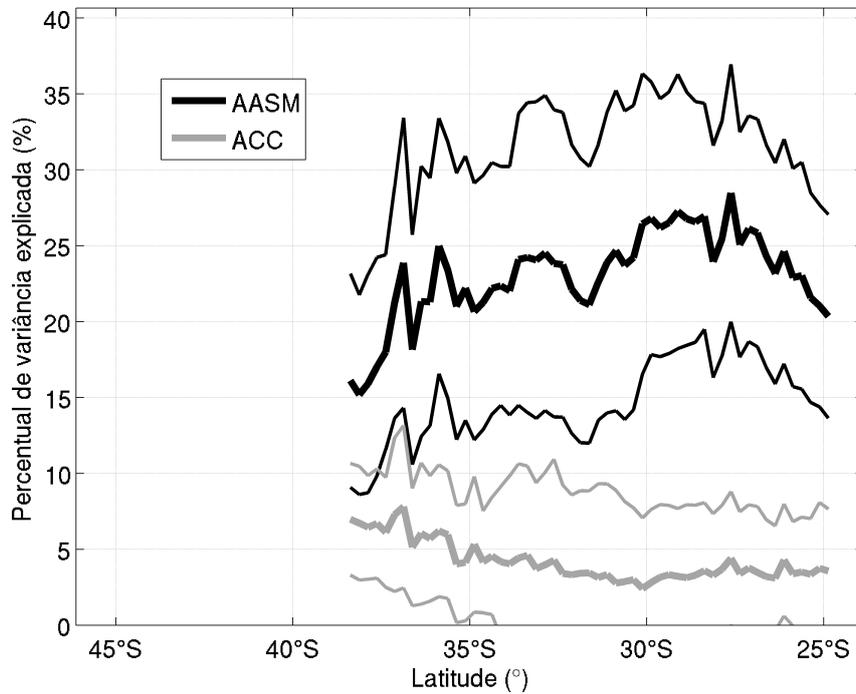


(a) Similar à Figura 4.5(a), só que para a componente propagante de 6 meses (η_6).



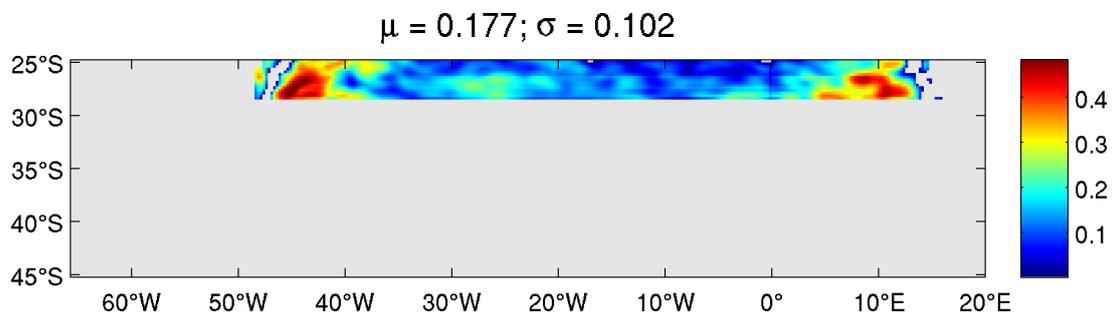
(b) Similar à Figura 4.5(b), só que para a componente propagante de 6 meses (C_6).

$\eta: \mu = 23.0\%; \sigma = 3.0\% \mid C: \mu = 4.2\%; \sigma = 1.3\%$.

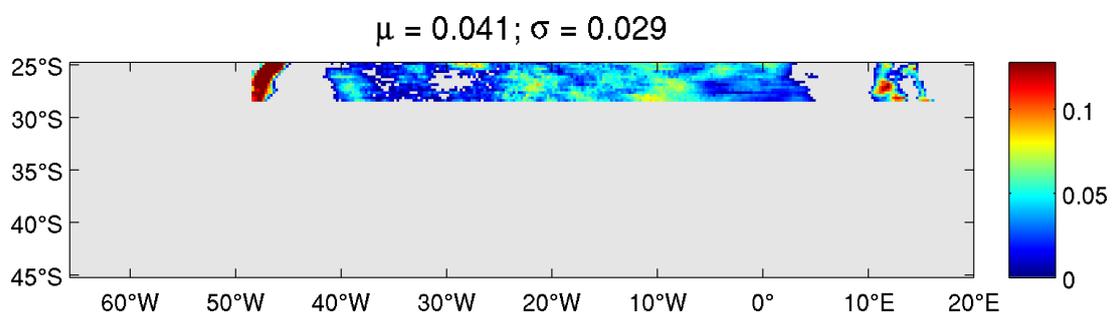


(c) Similar à Figura 4.5(c), só que para as componentes propagantes de 6 meses (η_6 e C_6).

Figura 4.12: Mapas e gráfico referentes às componentes propagantes de **período de 6 meses** (η_6 e C_6).

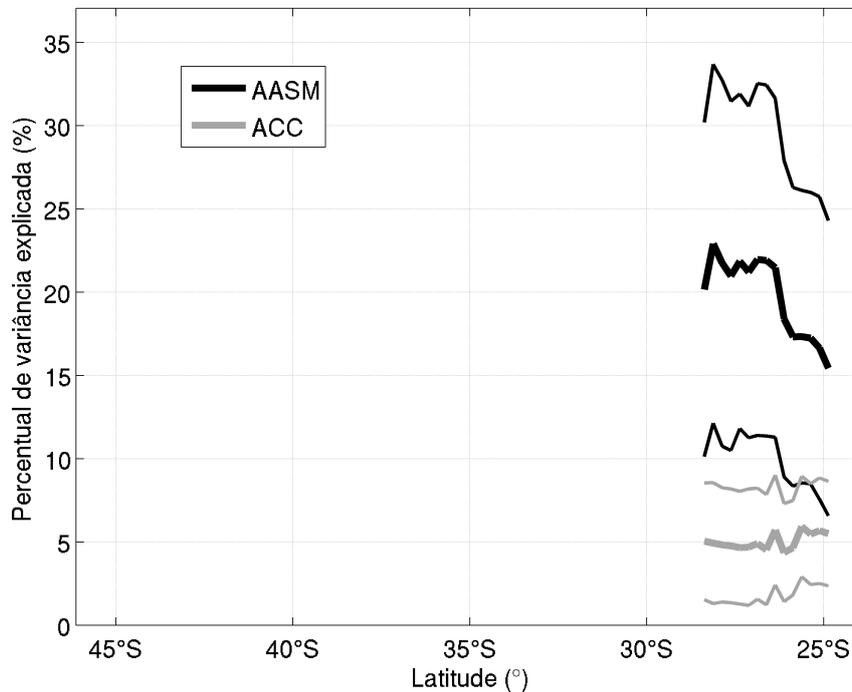


(a) Similar à Figura 4.5(a), só que para a componente propagante de 3 meses (η_3).



(b) Similar à Figura 4.5(b), só que para a componente propagante de 3 meses (C_3).

$\eta: \mu = 19.8\%; \sigma = 2.4\% \mid C: \mu = 5.0\%; \sigma = 0.5\%.$



(c) Similar à Figura 4.5(c), só que para as componentes propagantes de 3 meses (η_3 e C_3).

Figura 4.13: Mapas e gráfico referentes às componentes propagantes de **período de 3 meses** (η_3 e C_3).

componentes agora em questão são propagantes. Novamente, tal operação foi realizada para cada componente e para cada latitude.

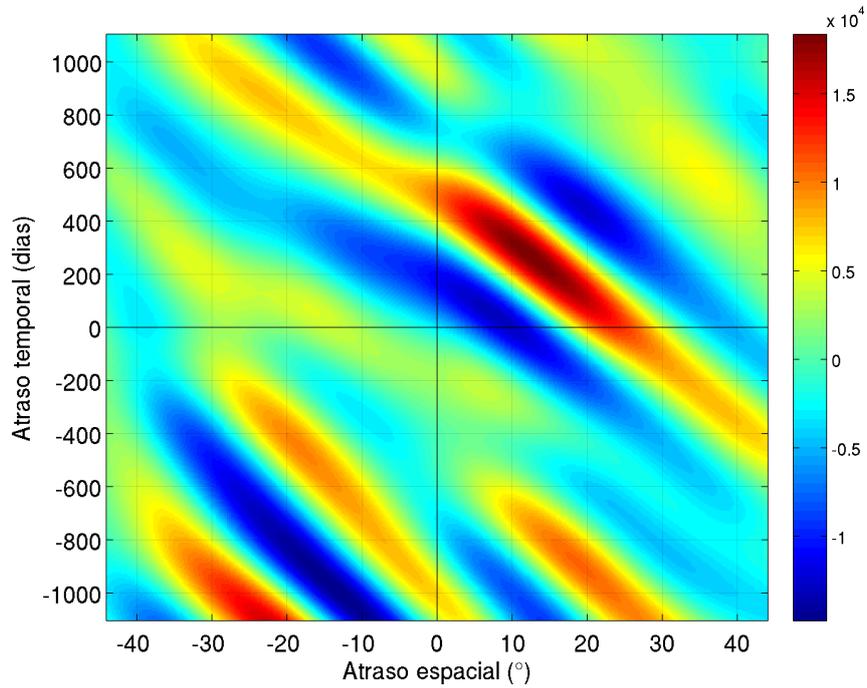
4.4.3 Diferenças de fase

Tanto as diferenças relativas entre velocidades de fase (Δc_p) quanto as diferenças de fase (Φ) de todas as componentes propagantes são apresentadas nas Figuras 4.16 a 4.19. Como descrito na seção 3.7, convém lembrar que os valores de Φ foram selecionados a partir de valores estatisticamente significativos tanto de Δc_p quanto de variâncias explicadas. Assim, nem todas as latitudes apresentarão valores correspondentes de Φ .

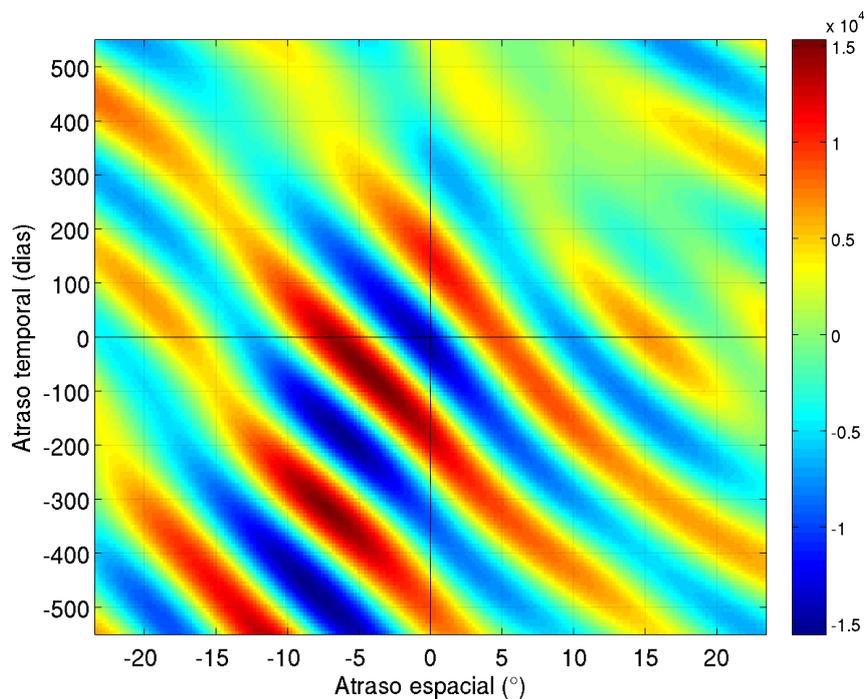
Os desvios-padrão de Δc_p para as componentes de períodos 24 e 12 meses (Figuras 4.16(a) e 4.17(a)) são praticamente iguais, sendo de $\sim 28\%$ para a de 24 e de $\sim 29\%$ para a de 12 meses. Por outro lado, os desvios-padrão referentes às componentes de 6 e 3 meses são progressivamente menores, sendo de respectivamente $\sim 12\%$ e $\sim 4\%$. Os maiores desvios-padrão de Δc_p para as componentes de 24 meses se devem à baixa amplitude do sinal tanto em η quanto em C . Já os de 12 meses podem apresentar inconsistências no caso da clorofila porque o sinal de η_t é muito robusto. Assim, uma fração deste sinal pode estar sendo interpretado pelo filtro como a componente anual das ondas de Rossby. Tais valores indicam uma maior relação entre C e ondas de Rossby de menores período. Tal hipótese também é corroborada pela maior continuidade de Φ ao longo das latitudes para as componentes de 6 e de 3 meses (Figuras 4.18(b) e 4.19(b)) e pelo fato de que $|\Delta c_p|$ só ultrapassou valores maiores que 0,5 (máximo aceitável) para as componentes de 24 e 12 meses.

As diferenças de fase de todas as componentes (Figuras 4.16(b) a 4.19(b)) apresentam médias entre 154° e 187° . Seus desvios-padrão, novamente, apresentam progressão para valores menores conforme a diminuição do período da componente: $\sim 86^\circ$ para a de período 24 meses, $\sim 27^\circ$ para a de 12 meses, $\sim 25^\circ$ para a de 6 meses e $\sim 6^\circ$ para a de 3 meses. Isso corrobora a hipótese de que para componentes de menores períodos, a variação latitudinal da relação entre η e C é menor, lembrando que as componentes de períodos 6 e 3 meses atingem suas latitudes críticas dentro da área de estudo.

Para a componente de período 24 meses (Figura 4.16(b)), Φ apresentou valores entre 0 e 360° , sem nítida concentração de valores em faixas de diferenças de fase além dos valores em torno de 180° para latitudes centrais, entre $\sim 34^\circ\text{S}$ e $\sim 37^\circ\text{S}$, onde as variâncias explicadas estão próximas a seus valores máximos. Os valores referentes às demais latitudes se mostraram dispersos: $R^2(\eta_{24})$ e $R^2(C_{24})$ possuem baixos valores tanto nas altas latitudes quanto nas baixas. Para a de 12 meses (Figura 4.17(b)), Φ se mostrou em torno de 180° nas latitudes centrais, entre

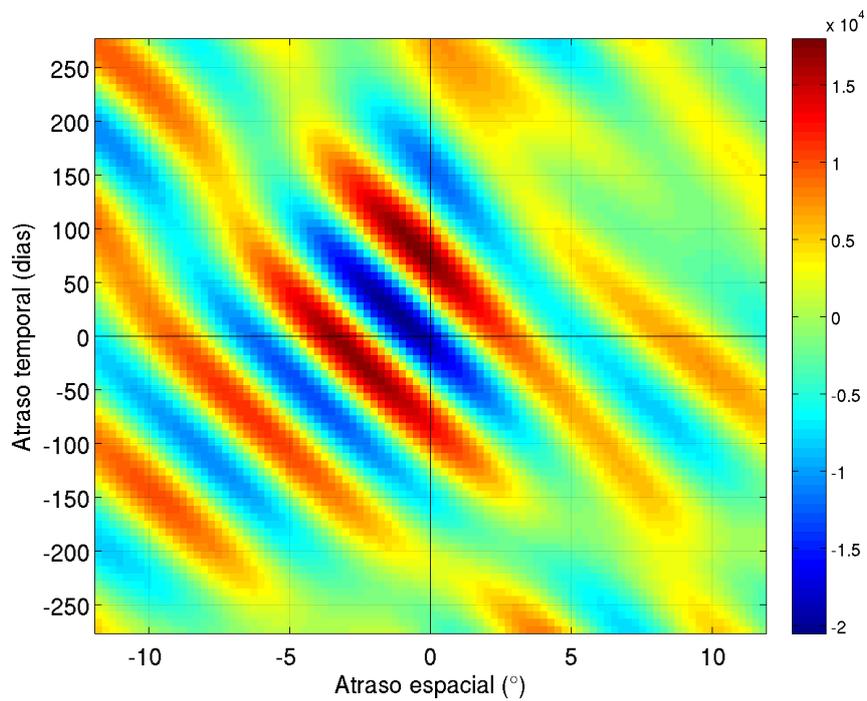


(a) Similar à Figura 4.6, só que para as componentes propagantes de 24 meses (η_{24} e C_{24}). Neste caso, dois atrasos de fase foram calculados, ao longo de $\tau_x = 0$ e de $\tau_t = 0$.

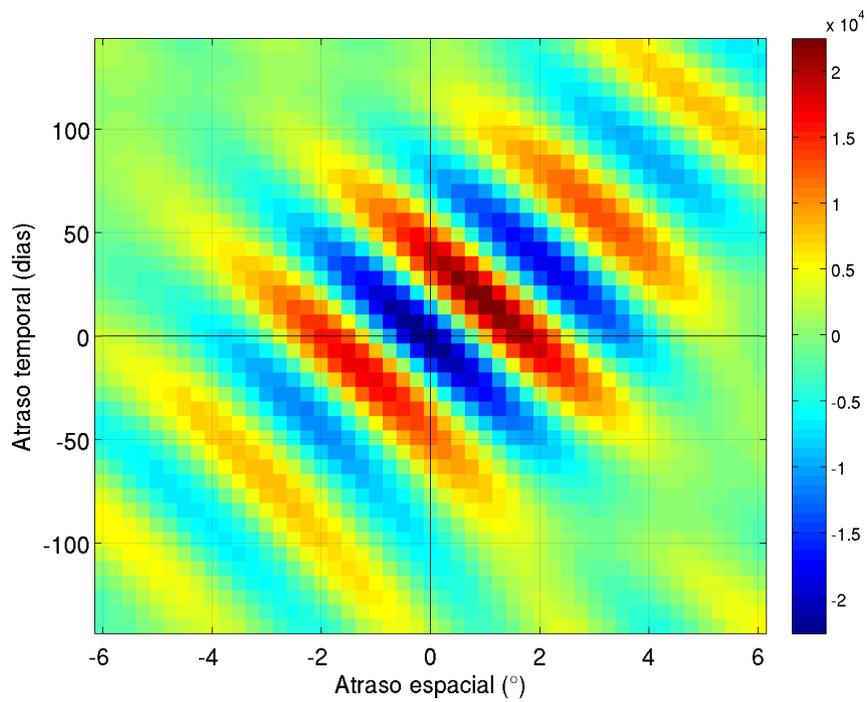


(b) Similar à Figura 4.14(a), só que para as componentes de 12 meses (η_{12} e C_{12}).

Figura 4.14: Covariâncias bidimensionais entre as componentes propagantes de **períodos de 24 e 12 meses** na latitude de **25,875°S**, a título de exemplo.

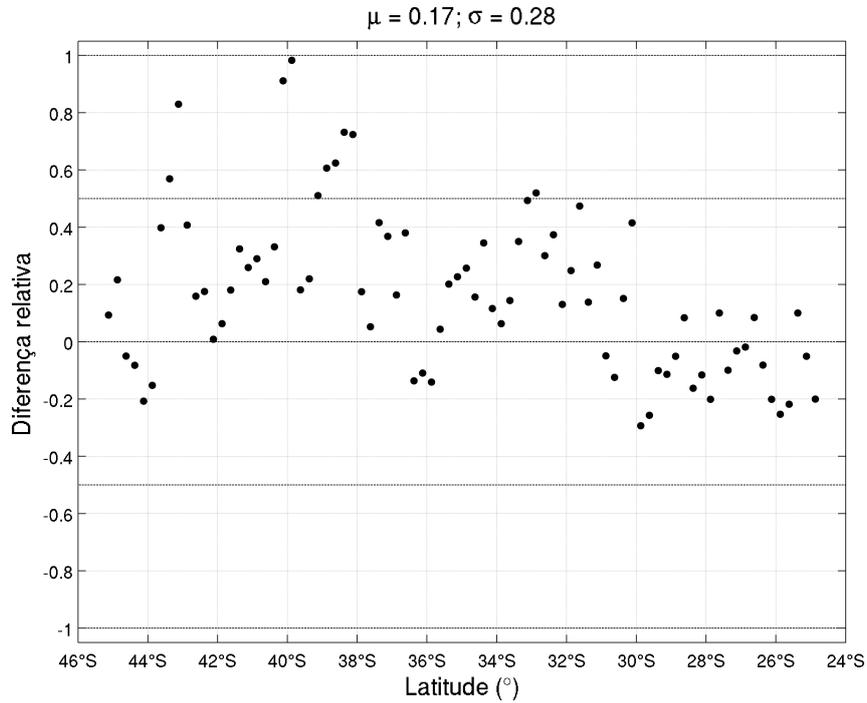


(a) Similar à Figura 4.14(a), só que para as componentes de 6 meses (η_6 e C_6).

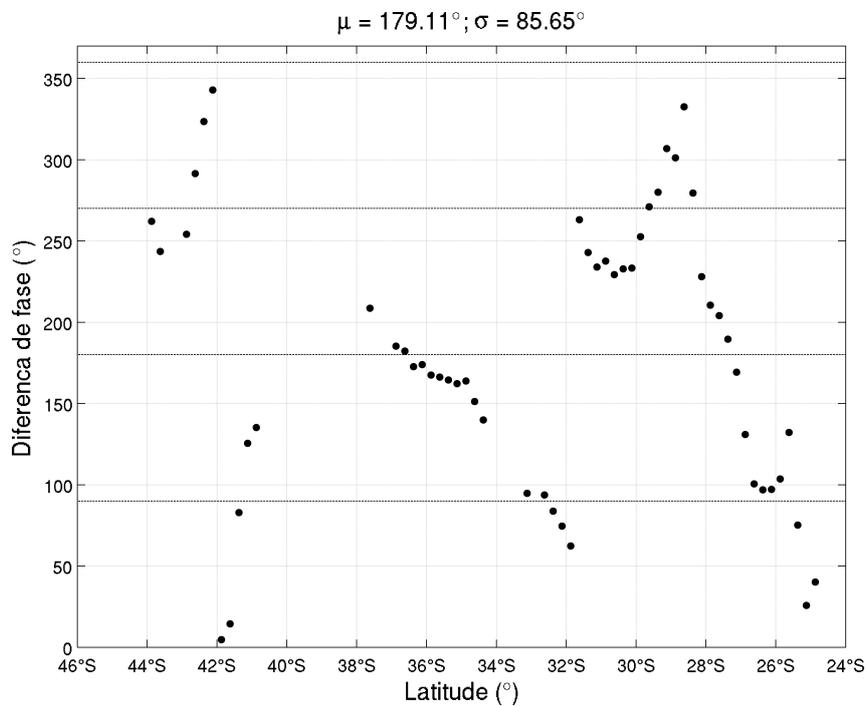


(b) Similar à Figura 4.14(a), só que para as componentes de 3 meses (η_3 e C_3).

Figura 4.15: Covariâncias bidimensionais entre as componentes propagantes de **períodos de 6 e 3 meses** na latitude de **25,875°S**, a título de exemplo.

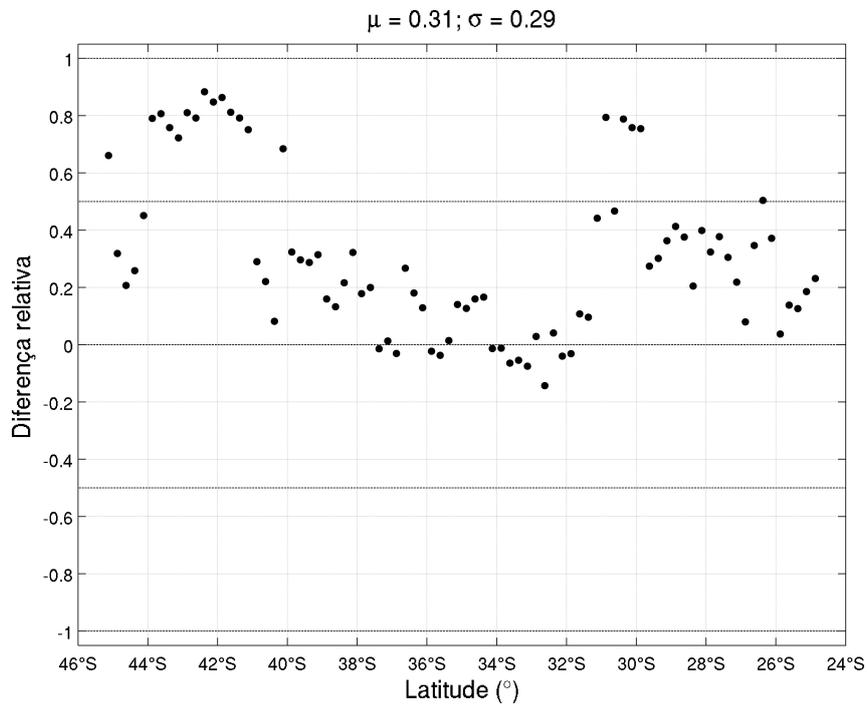


(a) Variação meridional das diferenças relativas entre velocidades de fase entre as componentes propagantes de período de 24 meses (η_{24} e C_{24}). Equação: $|\Delta c_p| = (c_{p\eta} - c_{pC})/c_{p\eta}$.

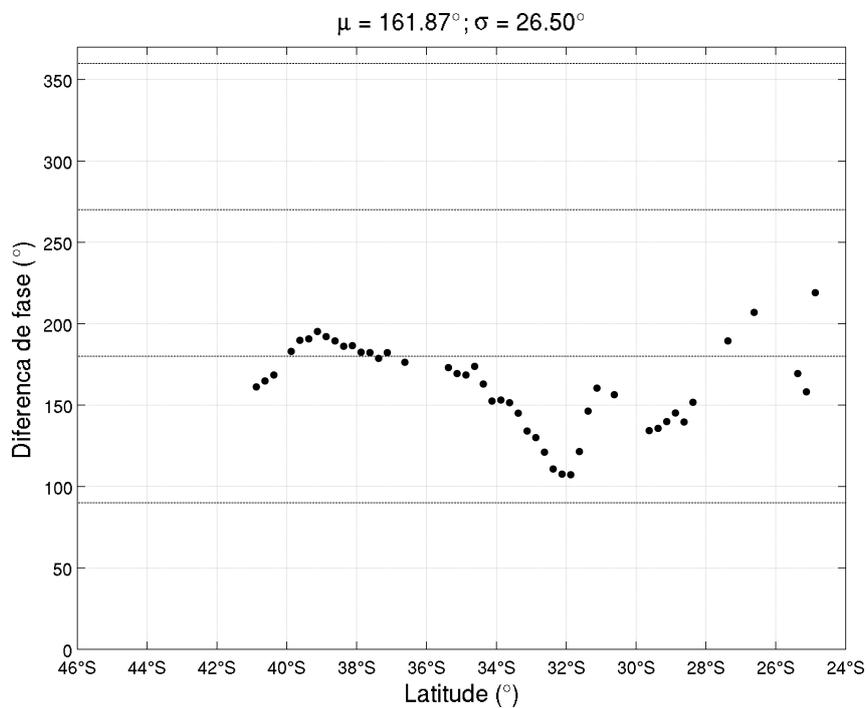


(b) Similar à Figura 4.7, só que para as componentes de 24 meses (η_{24} e C_{24}).

Figura 4.16: Diferenças relativas entre velocidades de fase e diferenças de fase entre as componentes propagantes de **período de 24 meses**.

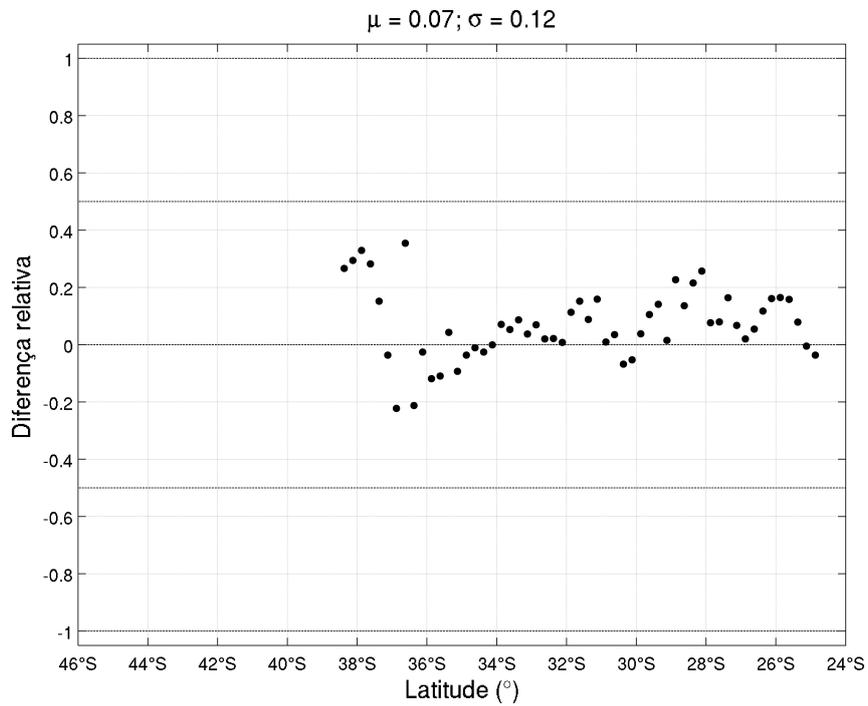


(a) Similar à Figura 4.16(a), só que para as componentes de 12 meses (η_{12} e C_{12}).

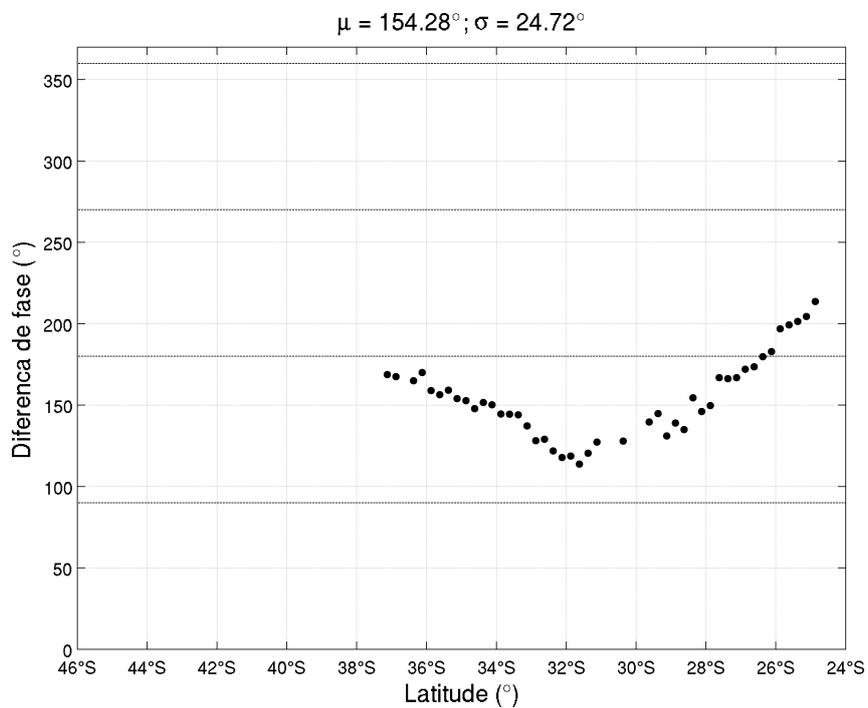


(b) Similar à Figura 4.7, só que para as componentes de 12 meses (η_{12} e C_{12}).

Figura 4.17: Diferenças relativas entre velocidades de fase e diferenças de fase entre as componentes propagantes de **período de 12 meses**.

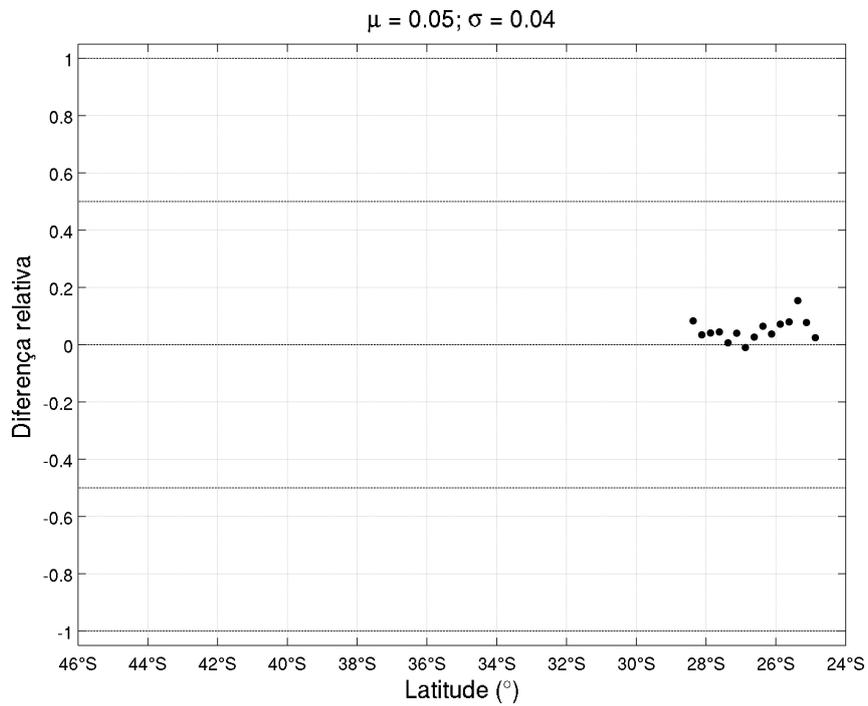


(a) Similar à Figura 4.16(a), só que para as componentes de 6 meses (η_6 e C_6).

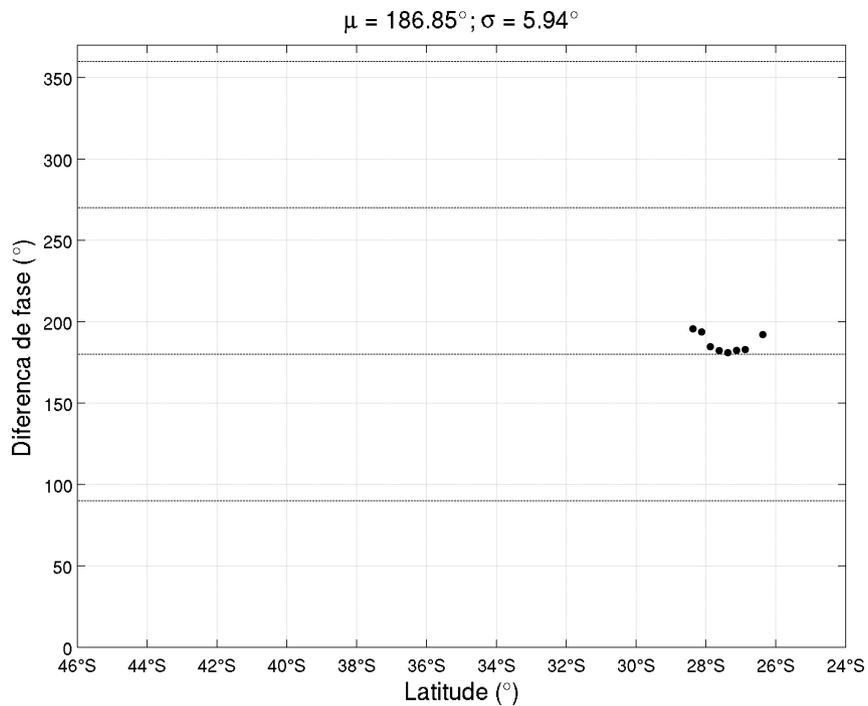


(b) Similar à Figura 4.7, só que para as componentes de 6 meses (η_6 e C_6).

Figura 4.18: Diferenças relativas entre velocidades de fase e diferenças de fase entre as componentes propagantes de **período de 6 meses**.



(a) Similar à Figura 4.16(a), só que para as componentes de 3 meses (η_3 e C_3).



(b) Similar à Figura 4.7, só que para as componentes de (η_3 e C_3).

Figura 4.19: Diferenças relativas entre velocidades de fase e diferenças de fase entre as componentes propagantes de **período de 3 meses**.

$\sim 35^\circ\text{S}$ e $\sim 41^\circ\text{S}$, e com valores entre 90° e 270° , com a maior parte de seus valores na faixa entre 90° e 180° . As mais baixas latitudes, onde a variância explicada por C é mínima, apresentaram valores dispersos. Para a de 6 meses (Figura 4.18(b)), Φ se mostrou consideravelmente mais contínuo em todo o domínio e com valores entre 90° e 270° , com a maior parte deles entre 90° e 180° . As mais baixas latitudes, com as maiores variâncias explicadas, apresentaram $\Phi \sim 180^\circ$. E, finalmente, para a de 3 meses (Figura 4.19(b)), Φ se apresentou também consideravelmente mais contínuo e somente na faixa entre 180° e 270° , com todos os seus valores muito mais próximos a 180° . Suas variâncias explicadas não variam significativamente com a latitude, uma vez que abrangem uma pequena fração da área analisada. Tais resultados obtidos para as componentes de menores períodos são mais confiáveis, uma vez que elas sofrem menos interferência do sinal sazonal, de grande amplitude, e assim, contém menos ruído de larga escala. Tal fato também é comprovado pelas suas mais altas variâncias explicadas em relação aos sinais de maiores períodos.

Tais resultados coincidem com o que foi encontrado por trabalhos pretéritos, que analisaram as componentes propagantes sem necessariamente separá-las em faixas de frequências. O'Brien *et al.* (2013), ao longo de todas as bacias oceânicas, também encontraram acúmulos valores de Φ entre 90° e 180° para latitudes coincidentes às aqui estudadas, evidenciando C influenciado principalmente por advecções meridionais de clorofila. Charria *et al.* (2004) encontraram que 70% do sinal do giro subtropical do Atlântico Norte é explicado por processos horizontais. Gutknecht *et al.* (2010) (Atlântico Sul) e Sakamoto *et al.* (2004) (Pacífico Norte) encontraram valores de Φ em torno de 180° para a região interna ao giro subtropical, evidenciando ação de fluxos verticais na região.

Tanto O'Brien *et al.* (2013) quanto Gutknecht *et al.* (2010) analisaram também gradientes meridionais de clorofila e concluíram que, em média, advecções meridionais de clorofila ($90^\circ < \Phi < 180^\circ$) são o principal processo que influenciam C . Quantitativamente, os valores encontrados por Gutknecht *et al.* (2010) para o Atlântico Sul são: no giro subtropical, 48,5% da variância de C se refere a processos horizontais e 51,5% se refere a processos verticais, enquanto que ao sul do giro, 58,8% se refere a processos horizontais e somente 41,2% se refere a processos verticais. Fica claro o aumento da dominância dos processos horizontais com o aumento da latitude. Processos puramente verticais ($\Phi \sim 180^\circ$) foram somente encontrados em regiões fortemente oligotróficas no interior do giro subtropical.

Tal discussão nos leva a crer que nas mais baixas latitudes da área de estudo os processos verticais são dominantes para as componentes propagantes, uma vez que $\Phi \sim 180^\circ$ e que a termoclina na região é mais rasa do que nas regiões mais ao sul. Isso é mais nitidamente observado para as componentes de menor período, medianamente observado para a componente

de período 12 meses e não válido para a componente de 24 meses, devido tanto à dispersão dos valores de Φ quanto aos altos valores de Δc_p nesta faixa de latitude. Entre $\sim 28^\circ\text{S}$ e $\sim 35^\circ\text{S}$, os processos de advecção horizontal são fortemente pronunciados pelas componentes de 12 e 6 meses, tendo a componente de 24 meses apresentado valores dispersos. Entre $\sim 35^\circ\text{S}$ e $\sim 41^\circ\text{S}$, processos verticais são forçados pela componente de período 12 meses e entre $\sim 35^\circ\text{S}$ e $\sim 37^\circ\text{S}$ o mesmo ocorre com a componente de 24 meses. Para latitudes inferiores às já descritas, os valores de Φ para a componente de 12 meses não passaram pelo controle estatístico de qualidade e os da componente de 24 meses apresentaram valores muito dispersos a ponto de não ser possível fazer conclusões consistentes a seu respeito, lembrando que nessa faixa as componentes de menores períodos já atingiram suas latitudes críticas.

5 *Conclusões*

As diferenças de fase entre as componentes sazonais (Figura 4.7), tratando-se de valores aproximados de latitudes, apresentaram valores entre 90° e 180° para a região entre 25°S e 35°S , em torno de 180° para a região entre 35°S e $37,5^\circ\text{S}$ e maior que 180° para a região ao sul de $37,5^\circ\text{S}$. A variação meridional de seus valores sugeriu a divisão da área em três regiões dominadas por processos diferentes: o interior do giro subtropical ao norte, o limite sul do giro subtropical atuando como zona de transição de processos, e a região ao sul do giro. As diferenças de fase observadas foram explicadas pelo seguinte raciocínio: no interior do giro a termoclina está muito profunda durante o verão, inibindo o aumento instantâneo das concentrações de clorofila; já ao sul, a irradiância solar dos meses que precedem o verão já são suficientes para propiciar anomalias positivas na concentração de clorofila.

Quanto às componentes propagantes, para as de períodos 6 e 3 meses, foram observadas muito altas influências da altura na clorofila e as menores discrepâncias entre velocidades de fase de altura e de clorofila (Figuras 4.18(a) e 4.19(a)). Tais componentes apresentaram, inclusive, diferenças de fase com menores variações latitudinais (Figuras 4.18(b) e 4.19(b)). Para as componentes de 12 meses, as influências da altura na clorofila observadas foram altas. Porém, tais componentes não apresentaram influências tão fortes por possuírem período anual, podendo ser, em parte, interpretadas como sinal sazonal. Suas diferenças entre velocidades de fase (Figura 4.17(a)) foram consideravelmente mais altas do que para as de período 6 e 3 meses. Foi observada uma influência muito baixa para a componente de período 24 meses, tendo apresentado as maiores diferenças entre velocidades de fase (Figura 4.16(a)) e as diferenças de fase menos contínuas (Figura 4.16(b)). Porém, importantes variações zonais foram encontradas para a influência da altura na clorofila para as componentes de 24 e 12 meses. A leste, em baixas latitudes, tais componentes apresentam uma alta influência da altura na clorofila enquanto que apresentam resultados mascarados (que não passaram pelo controle estatístico de qualidade) para as porções oeste das mesmas latitudes (Figuras 4.10(b) e 4.11(b)). Isso ocorre porque nestas escalas de tempo, a amplitude das oscilações da termoclina são tais que o efeito biológico só se verifica de forma consistente do lado leste, uma vez que na região, tanto a termoclina quanto a nutriclina são mais rasas.

Com base na análise das relações de fase (Figuras 4.16(b) a 4.19(b)) e tratando daqui em diante de valores aproximados de latitudes, podemos concluir que nas latitudes mais baixas da área de estudo, de 25°S a 28°S, em média, os processos verticais se mostraram fortemente dominantes para as componentes de períodos 6 e 3 meses e medianamente dominante para componentes de períodos 12 meses. Entre 28°S e 35°S, os processos dominantes foram os de advecção horizontal por parte das componentes de período 12 e 6 meses, influenciados pelo alto gradiente meridional de clorofila. Entre 35°S e 37°S, as componentes de períodos de 24 meses propiciam o ocorrência de processos verticais enquanto que o mesmo acontece com as componentes de períodos 12 meses entre 35°S e 41°S. Nenhum resultado conclusivo foi obtido para as latitudes superiores, entre 41°S e 45°S, devido tanto à intensa cobertura de nuvens durante o inverno quanto à alta quantidade de ruído de mesoescala (Figuras 4.9(a) e 4.9(b)), ruído esse relacionado não só às latitudes críticas das ondas de Rossby, mas também à Corrente do Atlântico Sul, que chega a deslocar feições para leste (Figuras 4.3 e 4.4).

Dessa forma, em resumo, concluímos que os processos dominantes entre 25°S e 30°S foram os verticais, aqui não distintos entre ressurgências de nutrientes ou ascensões dos máximos subsuperficiais de clorofila. Entre 30°S e 35°S, a dominância se deu por parte dos processos horizontais, ou seja, de velocidades geostróficas meridionais gerando as anomalias nas concentrações de clorofila observadas. E finalmente, entre 35°S e 40°S, a dominância se deu por parte de processos verticais, ressurgência de nutrientes e/ou ascensões dos máximos subsuperficiais de clorofila. Entre 40°S e 45°S os resultados obtidos não propiciaram a chegada à uma conclusão concreta. Dessa forma, a hipótese científica inicialmente adotada foi confirmada, mostrando que, de fato, para região de estudo existem diferentes processos dinâmicos associados a diferentes frequências de oscilações altura e clorofila que podem ser distintos pelas suas relações de fase.

Referências Bibliográficas

- ANDERSON, D. L. T.; GILL, A. E. Spin-up of a stratified ocean with applications to upwelling. *Deep-Sea Research*, v. 22, p. 583–596, 1975.
- CHARRIA, G. *et al.* Understanding the influence of Rossby waves on surface chlorophyll concentrations in the North Atlantic Ocean. *Journal of Marine Research*, v. 64, n. 1, p. 43–71, 2004.
- CHARRIA, G. *et al.* Rossby wave and ocean color: the cells uplifting hypothesis in the South Atlantic Subtropical Convergence Zone. *Geophysical Research Letters*, v. 30, n. 3, 2003.
- CHELTON, D. *et al.* Global observations of large oceanic eddies. *Geophysical Research Letters*, American Geophysical Union, v. 34, n. 15, p. L15606, 2007.
- CIPOLLINI, P. *et al.* *Geophysical Research Letters*, v. 28, n. 2, p. 323–326, 2001.
- EMERY, W. J.; THOMSON, R. E. *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. second. [S.l.]: Elsevier Science B. V., 2001.
- GILL, A. E. *Atmosphere-Ocean Dynamics*. San Diego, Calif.: Academic Press Inc., 1982. (International Geophysics Series, v. 30). 662 pp.
- GUTKNECHT, E. *et al.* Spatial and temporal variability of the remotely sensed chlorophyll-*a* signal associated with rossby waves in the south atlantic ocean. *Journal of Geophysical Research*, v. 115, 2010.
- HOOKER, S.; MCCLAIN, C. The calibration and validation of seawifs data. *Progress in Oceanography*, Elsevier, v. 45, n. 3, p. 427–465, 2000.
- JAMMALAMADAKA, S. R.; SENGUPTA, A. *Topics in circular statistics*. [S.l.]: World Scientific, 2001.
- KILLWORTH, P. D. *et al.* Physical and biological mechanisms for planetary waves observed in sea-surface chlorophyll. *Journal of Geophysical Research*, v. 109, p. C07002, 2004.
- KOLTERMANN, K. P.; GOURETSKI, V. V.; JANCKE, K. Hydrographic atlas of the world ocean circulation experiment (woce). *International WOCE Project Office*, Southampton, UK, v. 3, 2011.
- O'BRIEN, R. C.; CIPOLLINI, P.; BLUNDELL, J. R. Manifestation of oceanic Rossby waves in long-term multiparametric satellite datasets. *Remote Sensing of Environment*, v. 129, p. 111–121, 2013.
- OLIVEIRA, F. S. C.; POLITO, P. S. Characterization of westward propagating signals in the South Atlantic from altimeter and radiometer records. *Remote Sensing Environment*, v. 134, p. 367–376, April 2013.

- PETERSON, R. G.; STRAMMA, L. Upper-level circulation in the south atlantic ocean. *Progress in Oceanography*, Elsevier, v. 26, n. 1, p. 1–73, 1991.
- POLITO, P. S. *Observation of long first-mode baroclinic Rossby waves in the North Atlantic and their connection with wind forcing*. Tese (Doutorado) — University of Rhode Island, 1997. 101 pp.
- POLITO, P. S.; CORNILLON, P. Long baroclinic Rossby waves detected by TOPEX/Poseidon. *Journal of Geophysical Research*, v. 102, p. 3215–3235, 1997.
- POLITO, P. S.; LIU, W. T. Global characterization of Rossby waves at several spectral bands. *Journal of Geophysical Research C: Oceans*, v. 108, n. 1, p. 18–1, 2003. Disponível em: <<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-0038537549&partnerID=40&md5=35bb0da374e6496e8fb82308d6b1ec56>>.
- POLITO, P. S.; SATO, O. T.; LIU, W. T. Characterization and validation of heat storage variability from TOPEX/Poseidon at four oceanographic sites. *Journal of Geophysical Research*, v. 105, n. C7, p. 16,911–16,921, 2000.
- SAKAMOTO, C. M. *et al.* Influence of Rossby waves on nutrient dynamics and the plankton community structure in the North Pacific subtropical gyre. *Journal of Geophysical Research*, v. 109, 2004. Doi:10.1029/2003JC001976.
- SIEGEL, D. A. The rossby rototiller. *Nature*, v. 409, n. 2001, p. 576–577, 2001.
- STRAMMA, L.; ENGLAND, M. On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research*, v. 104, n. C9, p. 20863–20883, 1999.
- UZ, B. M.; YODER, J. A.; OSYCHNY, V. Pumping of nutrients to ocean surface waters by the action of propagating planetary waves. *Nature*, v. 409, n. 2001, p. 597–600, 2001.

São Paulo, 6 de dezembro de 2013.

De acordo,

Thalles Augusto Abreu Araujo

Aluno de Bacharelado em Oceanografia

Prof. Dr. Paulo Simionatto Polito

Orientador