LARISSA FELICIDADE WERKHAUSER DEMARCO

**Caracterização dos processos sedimentares em trecho do canal de
acesso ao Porto de Santos, por meio de métodos acústicos**

Dissertação apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Oceanografia, área de Oceanografia Geológica.

Orientador: Prof. Dr. Michel Michaelovitch de Mahiques

São Paulo

2019

Catálogo na publicação

Demarco, Larissa Felicidade Werkhauser

Caracterização dos processos sedimentares em trecho do canal de acesso ao Porto de Santos, por meio de métodos acústicos / Larissa Felicidade Werkhauser Demarco

São Paulo, 2019

103 f. il.

Dissertação apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Oceanografia, área de Oceanografia Geológica

Orientador: Prof. Dr. Michel Michaelovitch de Mahiques

I. Título. II. Mahiques, Michel Michaelovitch de (orientador) 1. Batimetria multifeixe 2. Chirp 3. Estuários 4. Processos sedimentares 5. Perfilagem Sísmica Contínua.

Universidade de São Paulo
Instituto Oceanográfico

**Caracterização dos processos sedimentares em trecho do canal de acesso ao
Porto de Santos por meio de métodos acústicos**

LARISSA FELICIDADE WERKHAUSER DEMARCO

Versão corrigida

Dissertação apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo,
como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências,
Programa de Oceanografia, área de Oceanografia Geológica

Julgada em ____/____/____

Prof. Dr. Michel Michaelovitch de Mahiques

Conceito

Prof. (a) Dr. (a)

Conceito

Prof. (a) Dr. (a)

Conceito

AGRADECIMENTOS

Por mais que essa dissertação seja um trabalho autoral, o incentivo e a motivação dos amigos foram essenciais para a conclusão dessa etapa... Afinal, já dizia Clarice Lispector “Quem caminha sozinho pode até chegar mais rápido, mas aquele que vai acompanhado, com certeza vai mais longe”. Por isso, eu não poderia deixar de agradecer a:

- a minha querida amiga Julinha, por sempre estar disposta a ler as várias versões do texto e sempre contribuir com algo, tanto no assunto do trabalho quanto no assunto da vida!
- ao bonitinho, por também me ajudar a concluir mais essa etapa! Obrigada por toda a ajuda e pela motivação! Gratidão pelos empurrões, pontapés e pelo apoio, te amo!
- ao meu amado grupo “Troca dilhos” - Marcola, Kacique, Pri, Fifi, Aroldin, Gramani..., se não fosse por vocês eu certamente não teria ido tão longe! Gratidão pelos empurrões, pontapés e pelas piadas!
- aos demais amigos do IPT, por sempre me desejarem coisas boas e torcerem por mim! Especialmente ao Fabricio, por me dar todo apoio oficial, extraoficial e emocional (rsrs) durante o processo.
- a amiga Mari, mais uma que o IPT me apresentou, por estar sempre com os dois ouvidos dispostos a me ouvir e, por me motivar de alguma forma.
- a minha família, em especial a minha mãe e a minha vó, por sempre estarem torcendo por mim.
- a minha querida sogrinha, Fernanda, por sempre me motivar e me incentivar a ir adiante, obrigada!
- as amigas (Evy, Juh e Mah) de Toledo pelo apoio, mesmo que distante sempre torcendo por mim e, em especial à Mah pela correção do português.
- a Edna, colega do IPT, que me auxiliou no árduo trabalho de formatar o texto, obrigada pela ajuda e pelo conhecimento repassado.
- a Luciana, colega do IPT, por fazer a revisão final do português, mesmo estando muito atarefada e tendo feito durante o feriado de carnaval!! Gratidão.
- a disponibilidade dos meus orientadores (Michel e Laps) em me auxiliar no trabalho ao longo dos dois anos de mestrado.
- ao Ivo por no início do trabalho me ajudar com o desenvolvimento do plano de trabalho e pelas palavras de incentivo.
- a “O Algo / Alguém” superior, que cuida de nós por aí e que tem me proporcionado cada dia o desenvolvimento do meu quem sou eu!

RESUMO

Sistemas estuarinos são locais de transição entre ambientes marinhos e fluviais, cujas forçantes influenciam a dinâmica e a distribuição das propriedades químicas, biológicas e sedimentares. Aproximadamente 60 % de todas as grandes cidades se desenvolveram ao redor de estuários que, por serem ambientes abrigados, favorecem a navegação e instalação de portos. O objetivo geral do trabalho foi de identificar os processos sedimentares atuantes em um trecho do canal de acesso ao Porto de Santos (Trecho 1 do Porto organizado), compreendendo 12 km de comprimento desde a embocadura da baía de Santos até a entrada no Canal do Porto, utilizando um conjunto de dados de diferentes períodos (entre 2010 e 2016), provenientes de diferentes fontes acústicas, visando contribuir para a melhor compreensão da dinâmica sedimentar do Sistema Estuarino de Santos. Foram utilizados dados obtidos com um duplo *chirp* (frequências entre 2-8 kHz e 10-20 kHz) e dados de batimetria multifeixe. A metodologia consistiu na comparação de levantamentos batimétricos (executados em diferentes períodos) e de forma complementar foram utilizados os dados obtidos com a fonte acústica *chirp*. As análises proporcionaram a identificação de indícios de erosão e de assoreamento no Trecho 1 do canal do Porto de Santos. Em alguns locais, foi possível relacionar os padrões de erosão e de assoreamento com a hidrodinâmica local e, assim, sugerir tendências nos processos sedimentares atuantes na área de estudo. Sem dragagem a tendência do Trecho 1 do Porto de Santos é de assoreamento. O Trecho 1 foi dividido em 2 setores com comportamento distintos. O setor A (próximo à embocadura do canal) é, naturalmente, mais profundo, o sedimento de fundo não é depositado em grande quantidade nesse local devido à intensidade da velocidade das correntes que ocorrem no setor. Há indícios de instabilidade das encostas no trecho mais estreito do canal, da ocorrência de lama fluida e de gás raso nesse local. O setor B era, naturalmente, mais raso em 1960, período em que o canal passou a ter a sua configuração atual, sugerindo a formação de um delta de maré vazante no setor, onde a velocidade das correntes são mais lentas, quando comparadas com o setor A.

Palavras-chave: batimetria multifeixe, *chirp*, estuários, processos sedimentares, Perfilagem Sísmica Contínua.

ABSTRACT

Estuarine systems are sites of transition between marine and fluvial environments, whose forcing influences the dynamics and distribution of chemical, biological and sedimentary properties. Approximately 60% of all large cities have developed around estuaries because they are sheltered environments, allowed the navigation and harbors installation. The objective of the study was to identify the sedimentary processes in a section of Santos Harbor channel, comprising 12 km in length from the mouth of the bay to the entrance in the Port Channel. It was used a data set from different periods (2010-2016), from different acoustic sources, aiming to contribute to a better understanding the sedimentary dynamics in the Santos Estuary System. It was used a double chirp data with frequencies between 2-8 kHz and 10-20 kHz and multibeam bathymetry data. The methodology consisted in the comparison of bathymetric surveys performed in different periods and in a complementary way used the data obtained from a double chirp. The analyzes allowed an identification of erosion and silting in Section 1 of Santos Port Channel. It was possible to relate erosion and silting patterns to local hydrodynamics and to suggest trends in sedimentary processes in the study region. Without dredging, the trend of Section 1 from the Santos Harbor was of silting. The Section 1 it was divided into 2 sectors with different behavior. Sector A is naturally deeper; the sediment is not deposited in large quantities at this location because of the currents velocities that occurring there. In this site there is evidence of instability of the slopes in the channel's narrowest section, the occurrence of fluid mud and shallow gas. Sector B was naturally shallower in 1960, when the canal became its current configuration, suggesting the formation in this site of an ebb tide delta, where the currents velocities are slower when compared to sector A.

Key-words: multibeam, chirp, estuaries, sedimentary processes, Continuous Seismic Profiling.

1 INTRODUÇÃO

Sistemas estuarinos são locais de transição entre ambientes marinhos e fluviais, cujas forçantes influenciam a dinâmica e a distribuição das propriedades químicas, biológicas e sedimentares (PERILLO, 1996). Segundo Miranda, Castro e Kjerfve (2002), aproximadamente, 60 % de todas as grandes cidades se desenvolveram ao redor de estuários que, por serem ambientes abrigados, favorecem a navegação e instalação de portos.

Dentro de um sistema estuarino atuam agentes biológicos, químicos e hidrodinâmicos, entre outros. Com relação aos hidrodinâmicos, as principais forças atuantes no sistema são os ventos, as ondas, a maré, as correntes marinhas e o aporte sedimentar (proveniente da deriva litorânea e/ou da descarga fluvial). A relação entre esses agentes proporciona diferentes interações e estados de equilíbrio, de forma a modificar não somente os processos sedimentares mas, também, os processos químicos e biológicos de um sistema estuarino.

Segundo Silva e Gomes (2012) alterações da dinâmica sedimentar de um sistema estuarino podem comprometer tanto as atividades econômicas que ocorrem no local quanto os serviços ecossistêmicos proporcionados por esse ambiente (habitat, fonte de alimento e área de proteção de diversos organismos).

Os portos são importantes para o desenvolvimento econômico da região onde estão inseridos e para o país. Devido à sua importância são alvos de estudos interdisciplinares tais como: governança portuária (VIEIRA et al., 2014), transporte, manejo e armazenamento de cargas (GOMES; SEREGATI, 2009, PETRAGLIA et al., 2013), logística portuária (HILSDORF; NOGUEIRA NETO, 2015) e gestão ambiental aplicada aos portos (KITZMANN; ASMUS, 2006; BARROS; WASSERMAN; LIMA, 2010; KOEHLER; ASMUS, 2010).

Dentre os portos brasileiros destaca-se o Porto de Santos, que é considerado o maior porto da América Latina e contribui para o desenvolvimento industrial do Estado de São Paulo e do Brasil. A somatória de suas transações comerciais realizadas com o mercado externo corresponde a 70 % do PIB e 56 % da Balança Comercial Brasileira (HILSDORF; NOGUEIRA NETO, 2015).

O estudo do Porto de Santos apresenta alta complexidade, pois o mesmo está inserido em um ambiente que contempla um sistema estuarino, um polo industrial e uma cidade turística. Estudar os processos costeiros atuantes na área contribui para o entendimento da dinâmica sedimentar do sistema estuarino, bem como para a verificação da tendência de evolução dos processos sedimentares atuantes ali. De maneira mais específica, essas informações podem auxiliar os gestores em suas tomadas de decisões sobre, por exemplo, a escolha de obras necessárias para a manutenção da estabilidade do canal portuário que, além de apresentarem um alto custo, quando mal planejadas, podem ocasionar impactos ambientais negativos.

1.1 Histórico de estudos na Região Metropolitana da Baixada Santista e no sistema estuarino de Santos

Rocha (2003), em sua dissertação fez um resumo do histórico de estudos desenvolvidos na Baixada Santista entre as décadas de 1960 e 1980, destacando-se o estudo realizado pelo EPUSP/DAEE sobre o assoreamento da região portuária de Santos e os trabalhos realizados pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) sobre as características sedimentares do canal e da Baía de Santos. Resultados parciais desses trabalhos foram publicados por Fúlfaro e Ponçano (1976), Fúlfaro et al. (1976), Ponçano e Fúlfaro (1976). Os mapas geológicos e geomorfológicos da região também foram elaborados pelo IPT (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 1981a; 1981b) na década de 1980. Suguio e Martin (1978) contribuíram, ainda, com o estudo da geomorfologia da Baixada Santista.

Fúlfaro e Ponçano (1976) propuseram um modelo de circulação e sedimentação no estuário e na Baía de Santos. A Baía de Santos foi caracterizada por duas zonas preferenciais de movimentação de sedimentos, separadas por um contato longitudinal. A metade oeste dominada por correntes de maré e a leste por movimentação, predominantemente, unidirecional, resultante de correntes, originalmente fluviais que eram, posteriormente, canalizadas por meio do canal do Porto de Santos.

Em estudos posteriores, alguns autores como Harari e Camargo (1998) e Harari, Camargo e Miranda (2001) estudaram a circulação da área costeira de Santos utilizando modelagem numérica. Rocha (2003), utilizando parâmetros

granulométricos, estimou o transporte residual de sedimentos na baía de Santos. A autora verificou uma tendência de transporte que saía do Canal do Porto em direção ao mar e em direção à área oeste da baía e, também, encontrou algumas diferenças na composição sedimentar da baía de Santos, com relação ao descrito por Fúlvaro e Ponçano (1976).

Alguns estudos citam impactos negativos gerados por atividades antrópicas como o “engordamento” artificial da Ponta da Praia (ITALIANI, 2014), as atividades de dragagem (TORRES et al., 2009), a contaminação da área por metais pesados (FUKUMOTO, 2007) e, estudos sobre as modificações causadas pela elevação do nível do mar na dinâmica (FIEDLER, 2015) e na região estuarina como inundações costeiras, alterações na linha de costa, erosão costeira (ALFREDINI; ARASAKI; AMARAL, 2008; ALFREDINI et al., 2013; ALFREDINI et al., 2014).

1.2 Importância dos estuários e agentes hidrodinâmicos atuantes

Cada agente hidrodinâmico citado anteriormente é responsável por compor a dinâmica sedimentar de um estuário. A maré é responsável pelas vazões sólidas e líquidas, de origem marinha, (transporte bidirecional) que adentram ao sistema estuarino. Modificações do canal de navegação, como as atividades de dragagem, podem alterar a propagação da maré no local e, assim, modificar as vazões “naturais” do sistema, ocasionando, por sua vez, modificações na morfologia do canal ou até mesmo criando uma nova morfologia de fundo (ROSMAN; NEVES FILHO; MELLO, 1992).

Além da vazão sólida atribuída à propagação da maré, também deve ser considerado o aporte sedimentar resultante dos processos litorâneos. O transporte litorâneo ocorre ao longo da praia e passa pela entrada do canal estuarino, sendo influenciado pelo regime de ondas predominantes na área costeira. Modificações estruturais e o aporte fluvial podem alterar a quantidade de sedimento que passa pela embocadura do canal e, com isso, o balanço sedimentar da região pode ser modificado (ROSMAN; NEVES FILHO; MELLO, 1992).

Durante o cálculo de determinadas obras costeiras, a viabilidade da instalação deveria atender a relação entre a propagação da maré e o transporte litorâneo, relações descritas por Bruun e Gerritsen (1962) e Bruun (1978). Também deveria ser

considerado o tempo necessário para um canal dragado retornar às condições naturais ou qual seria o novo ajuste da morfologia adquirido por esse. O balanço sedimentar do sistema estuarino também é sensível às alterações causadas por eventos extremos, como grande volume de chuvas que alteram a descarga fluvial e, ressacas causadas por eventos de tempestade.

1.3 Importância da utilização de métodos acústicos em regiões estuarinas

Uma das ciências que pode auxiliar no entendimento do contexto de modificação dos processos costeiros atuantes em ambientes estuarinos é a geofísica, por ser uma ciência que estuda as propriedades físicas da Terra de maneira indireta. Existem diversos métodos geofísicos de investigação: elétricos, gravimétricos, magnetométricos e acústicos. Alguns deles contribuem, diretamente, para a melhor compreensão da dinâmica sedimentar. A partir dos produtos obtidos da aplicação de métodos geofísicos, é possível inferir sobre os processos costeiros, pretéritos e atuais e, assim, compreender a influência desses no remodelamento de zonas costeiras.

Dentre os métodos acústicos aplicáveis em estudos de áreas submersas destacam-se a batimetria, a sonografia e a perfilagem sísmica contínua (PSC). A batimetria utiliza as propriedades relativas à propagação das ondas acústicas na água, em especial, da velocidade de propagação do som para medir a espessura da coluna de água. Técnicas de levantamentos batimétricos são empregadas nas ciências marinhas desde o início do século XIX.

Os instrumentos denominados monofeixes são aqueles que coletam dados da espessura da coluna d'água em uma sequência de pontos na superfície de fundo na posição vertical, diretamente, abaixo do transdutor, enquanto que aqueles denominados multifeixes e multifases (ilustrado na **Figura 1**) que permitem a coleta de dados em uma larga faixa transversal à rota de navegação, possibilitando cobrir uma faixa da superfície de fundo, à medida que a embarcação se desloca (SOUZA, 2006).

A partir de levantamentos batimétricos é possível estudar a lama fluida (CARNEIRO et al. 2017) e auxiliar na determinação da profundidade náutica em portos; verificar a profundidade após dragagens em canais de acesso aos mesmos,

estimar taxas de assoreamento e de erosão em determinadas áreas costeiras se comparando os dados obtidos em diferentes períodos.

Figura 1 – exemplo de mapa batimétrico construído a partir de dados de um ecobatímetro multifase, com cobertura de 100 % da superfície de fundo. Parte do reservatório Taiacupeba, em Suzano, SP; à direita, a escala (espessura da coluna d'água em metros).

Fonte: Souza et al. (2016)

Outro exemplo de método acústico que tem importância no estudo de ambientes submersos é a Perfilagem Sísmica Contínua (PSC), que se baseia no princípio físico de reflexão das ondas acústicas, emitidas por uma fonte repetitiva de sinais acústicos que se propagam na água e penetram no substrato. Quando da ocorrência de contrastes de velocidade de propagação e de densidade, ou seja, contrastes de impedância acústica entre dois estratos, parte da energia das frentes de onda é refletida na interface deles (definindo os chamados refletores) e retorna à superfície onde é captada pelos sensores denominados de hidrofones (SOUZA, 2006; SOUZA et al., 2016).

A PSC possibilita a determinação da profundidade do embasamento rochoso, a delimitação da arquitetura de pacotes e estratos sedimentares, conforme ilustrados na **Figura 2**, informações que auxiliam os estudos de dinâmica costeira (PAOLO; MAHIQUES, 2008), distribuição de gás raso em regiões estuarinas (LAFFERTY; QUINN; BREEN, 2006; FELIX, 2012; WESCHENFELDER et al., 2016) e a busca de jazidas de areia para a regeneração de praias.

A PSC, em conjunto com levantamentos batimétricos, contribui também com os estudos sobre lama fluida em portos (CARNEIRO et al., 2017) e, na construção civil, auxilia em projetos de quebra-mares, dutos, pontes e túneis. Os produtos da PSC são utilizados em pesquisas estratigráficas (D'AGOSTINI et al., 2011; FRIEDERICHS et al., 2013), uma vez que a interpretação dos registros contribui para o melhor entendimento dos eventos que ocorreram em diferentes períodos de oscilação do nível do mar ou em períodos mais recentes.

Figura 2 – exemplo de perfil sísmico obtido com uma fonte de alta resolução do tipo *chirp* mostrando as camadas sedimentares subsuperficiais (de até 5 m de espessura) do fundo do canal de São Sebastião, em São Paulo. À esquerda, registro original de campo; à direita, registro sísmico interpretado; em azul, o fundo do canal; em vermelho, o contorno do topo do embasamento rochoso.

Fonte: Souza et al. (2016)

Andrade et al. (2004) e Quinn e Boland (2010) com uma metodologia semelhante àquela que será aplicada neste trabalho, estudaram os processos sedimentares em suas áreas de estudo (Colômbia e Irlanda, respectivamente). Andrade et al. (2004), analisaram alterações na profundidade de uma região da baía de Cartagena utilizando dados de levantamentos batimétricos realizados nos anos de 1935, 1987 e 2004. Os resultados mostraram que a distribuição dos sedimentos na parte interna da baía deve-se a duas estruturas antrópicas e que o delta da região avançou mais de um quilômetro para norte comprometendo, assim, a profundidade do canal de navegação em locais específicos da baía de Cartagena.

No trabalho de Quinn e Boland (2010), além da comparação de levantamentos batimétricos (monofeixe e multifeixe), foi utilizado um sonar de varredura lateral. Nesse estudo os autores demonstraram a eficiência da comparação de dados oriundos de diferentes períodos de levantamentos batimétricos em estudos de monitoramento de ajustes morfológicos em locais com naufrágios, na costa leste da Irlanda.

Os trabalhos desses autores indicam que os métodos acústicos auxiliam na descrição e no entendimento dos processos sedimentares atuantes na região costeira possibilitando, a partir de um conjunto de dados adquiridos em diferentes períodos, tecer considerações sobre o balanço sedimentar de uma determinada área. Os produtos obtidos com o emprego dos métodos acústicos tornam possível a estimativa das taxas de erosão ou de assoreamento e, a partir disso, verificar-se a existência, ou não, de alguma tendência nos processos sedimentares atuantes na área em questão.

2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do trabalho é identificar os processos sedimentares atuantes em um trecho do canal de acesso ao Porto de Santos de aproximadamente 12 km de comprimento desde a embocadura da baía até a entrada no Canal do Porto, utilizando um conjunto de dados de diferentes períodos (entre 2010 e 2016), provenientes da aplicação de diferentes métodos acústicos, visando contribuir para a melhor compreensão da dinâmica sedimentar do Sistema Estuarino de Santos.

2.1 Objetivos específicos

- Identificar as áreas com tendências de processos de erosão e de assoreamento no trecho em destaque;
- relacionar os padrões de erosão e assoreamento à hidrodinâmica local;
- verificar tendências erosivas e de assoreamento nos processos sedimentares atuantes na área de estudo.

3 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo faz parte da Região Metropolitana da Baixada Santista (RMBS) sendo caracterizada por intensa urbanização, por receber elevado número de turistas, por ser uma região de elevada industrialização, devido ao polo industrial de Cubatão e ao crescimento do Porto de Santos. O Porto de Santos, considerado o maior porto da América Latina em quantidade de transporte de carga, está compreendido em uma porção do Sistema Estuarino de Santos.

O Porto de Santos é setorizado em trechos, conforme indicado na **Figura 3**, sendo o Trecho 1 o correspondente à área de estudo deste trabalho. O Sistema Estuarino de Santos está limitado a leste pelo Oceano Atlântico e a oeste pela Serra do Mar. O canal de acesso ao Porto de Santos possui uma extensão de aproximadamente 26 km, entre os trechos 1 e 4, com largura variável entre 200 m, nos locais mais estreitos e, cerca de, 600 m próximo ao terminal de contêineres (COMPANHIA DOCAS DO ESTADO DE SÃO PAULO 2017a; 2017b). No trecho em estudo a cota batimétrica de 15 m é mantida por meio de dragagens.

Figura 3 – Localização do canal de acesso ao Porto de Santos. Em verde a área correspondente ao Trecho 1, local de realização do estudo.

Fonte: elaborado pela autora

3.1 Geologia e geomorfologia na área de estudo

O mapa geológico da Bacia Hidrográfica da Baixada Santista foi elaborado com base no mapa geológico do Estado de São Paulo, elaborado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, em 1981. Dois grupos compõem o substrato geológico: as rochas do embasamento, granitos, granodioritos e migmatitos, cujas idades datam do Pré-Cambriano ao início do Paleozóico, e as coberturas cenozoicas (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 1981a). Com relação à geomorfologia, existem duas unidades: as escarpas da serra do Mar e a planície costeira. A região é geomorfologicamente heterogênea contendo planícies costeiras, mangues, terraços marinhos, entre outras unidades (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 1981b).

Segundo Roversi, Rosman e Harari (2016), o Sistema Estuarino de Santos apresenta uma configuração morfológica complexa, com múltiplas cabeceiras, extensas áreas alagáveis com formação de manguezais e bancos de lama e diferentes ligações com o oceano adjacente. Os autores citam que o sistema hidrográfico pode ser subdividido em três estuários e uma baía: o Estuário do Canal de Bertioga, com extremidades entre os municípios de Guarujá e Bertioga, separando a Ilha de Santo Amaro do continente; o Estuário do Canal do Porto de Santos e o Estuário de São Vicente, os dois últimos com suas embocaduras na Baía de Santos, no entorno da Ilha de São Vicente. A **Figura 4** mostra o sistema estuarino de Santos e seus subsistemas hidrográficos.

Figura 4 – Sistema Estuarino de Santos e seus subsistemas hidrográficos.

Fonte: Extraído de Roversi, Rosman e Harari (2016)

A região se constitui em um ambiente frágil por apresentar lençol freático pouco profundo e estar sujeita a inundações periódicas (COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DA BAIXADA SANTISTA, 2000). Entre a década de 1980 e o período atual, as mudanças que aconteceram e impactaram a região foram ocasionadas por intensos processos de urbanização e industrialização (polo industrial de Cubatão e crescimento do Porto de Santos), que levaram à ocupação e à degradação das planícies costeiras, áreas de proteção permanente, zonas intermarés, entre outros tipos de ambientes.

Na área do Estuário do Porto de Santos, os sedimentos de fundo são compostos, principalmente, por uma camada espessa de sedimentos finos não consolidados (silte e argila) com uma pequena porção de areia (TORRES et al., 2009). Rocha (2003) indicou que a porção oeste da baía de Santos tem predomínio arenoso e lamoso e, na porção leste, os sedimentos finos estão confinados na desembocadura do canal do Porto.

3.2 Agentes hidrodinâmicos atuantes na área de estudo

Segundo Roversi, Rosman e Harari (2016) o sistema faz parte da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) da Baixada Santista (UGRHI 07), composta por vinte e uma sub-bacias hidrográficas e possui uma área de drenagem de, aproximadamente, 2.788,82 km². Das 21 sub-bacias que compõe a UGRHI 7, 12 contribuem com vazões líquidas para o sistema, totalizando uma vazão de 54 m³/s, em condições típicas de verão e, de 13 m³/s, em condições de estiagem. A chuva nas cabeceiras das bacias de drenagem pode disponibilizar mais sedimento para o estuário. O gráfico da **Figura 5** indica a chuva total mensal entre os anos de 2012 e 2016 para a área da ponta da Praia.

Por estar orientada para sul, a baía de Santos está exposta à ação de ondas geradas pelos sistemas frontais, oriundas do quadrante sul e, em relação à sua posição latitudinal, esta região sofre influência de ventos vindos dos sistemas tropicais e dos sistemas polares (FARINNACCIO; CAZOLLI-GOYA; TESSLER, 2009). Segundo Farinnaccio, Cazolli-Goya e Tessler (2009) devido a essas características climáticas e à ausência de expressivas bacias de drenagem o regime pluvial apresenta grande importância em relação ao transporte de água continental e de sedimentos para o oceano.

Segundo Tessler et al. (2006), a orientação do litoral paulista (NNE-SSO), junto com a predominância de ondas de NE-E, resultam no predomínio de correntes litorâneas com sentido sudoeste. Em condições onde há o predomínio de ciclogênese ligada aos Anticiclones Polares Migratórios (APM), com ondas provenientes de S-SE, a deriva passa a se propagar para nordeste.

Figura 5 - Chuva total (mm/mês) para o período em análise. Os gráficos em vermelho indicam os meses considerados na análise batimétrica do trabalho, os em amarelo os meses em que ocorreram atividades de dragagem.

Fonte: Estação Ponta da Praia (02346642) 23°58'51.60"S; 46°18'0.00"O. Sistema Nacional de Informações Sobre Recursos Hídricos (2019)

Rocha (2003), utilizando parâmetros granulométricos, estimou o transporte residual de sedimentos na baía de Santos. Foi verificada uma tendência de transporte partindo do Canal do Porto em direção ao mar aberto e em direção à porção oeste da baía. Rocha (2003) constatou correlação entre o transporte residual de sedimentos na baía de Santos com o modelo de circulação de água para a mesma região.

Há uma tendência de transporte de leste para oeste a partir do canal do Porto e há uma grande zona de deposição na porção centro-oeste, onde ocorre confluência entre o transporte residual de sedimento oriundos dos canais de São Vicente e do Porto. O transporte L-O, na embocadura da baía de Santos, está, provavelmente, relacionado com as correntes de fundo que possuem mesma direção, já que a área tem predomínio de areias que são transportadas por tração junto ao fundo (ROCHA, 2003).

O regime de marés é do tipo micromareal misto, com predominância semidiurna (ROVERSI, 2012). Segundo Harari e Camargo (1998), os padrões de correntes de verão e de inverno gerados pelo vento são semelhantes, de modo que a maré representa a principal condicionante da circulação dentro do sistema estuarino. Os autores também propuseram que as correntes de vazantes possuem predomínio na área. Carneiro et al. (2014) estimou velocidade de correntes da ordem de 0,25 e 0,3 m/s no Estuário de Santos, com valores máximos observados no canal do Porto de Santos. Os autores também estimaram, a partir de modelagem numérica, que as velocidades das correntes de maré são maiores na sizígia quando comparando com os valores obtidos em quadratura, com máximos de 0,2 e 0,05; respectivamente.

Um exemplo de estudo referente às alterações na dinâmica sedimentar no canal do Porto de Santos é apresentado por DHI (2008) que discute alguns resultados do Estudo de Impacto Ambiental (EIA) referente à atividade da dragagem do Canal do Porto de Santos. No estudo, foram realizadas modelagens hidrodinâmica e de transporte de sedimentos finos, que objetivaram avaliar o impacto do aprofundamento na entrada do canal sobre a hidrodinâmica local. Algumas das conclusões desse trabalho incluem o aumento do aporte sedimentar em direção ao estuário, o assoreamento em taxas mais rápidas do canal de acesso e o aumento das condições para a deposição de sedimentos finos.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O conjunto de dados necessários para a realização deste estudo foi disponibilizado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) e pelo Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IO-USP). Foram utilizados dados obtidos de levantamentos batimétricos multifeixes e dados proveniente de uma fonte acústica do tipo duplo *chirp* com frequências entre 2 kHz e 8 kHz e, 10 kHz e 20 kHz.

Os dados de batimetria multifeixe foram disponibilizados para o IO-USP pela CODEPSP no formato “.xyz”, já contendo as correções da variação da maré e do perfil da velocidade do som na coluna d’água. Foram cedidos os arquivos contendo a batimetria multifeixe, que compreendem o período de 2012 até 2016, a área de localização dos dados batimétricos, que compreende o Trecho 1 (área verde) da **Figura 3**.

A **Figura 6** indica a localização dos perfis lineares de dados de Perfilagem Sísmica Contínua (PSC) utilizados nesse trabalho. Os dados foram adquiridos entre os anos de 2010 e 2014 (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2010; 2012). Os dados de PSC do tipo *chirp* foram processados e interpretados em software específico denominado MDPS (Marine Data Processing System - Meridata®). O processamento básico consiste no ajuste de ganhos (TVG, AGC, entre outros) e aplicação de filtros.

Em um trecho específico da área de estudo, localizada entre a Fortaleza de Santa Cruz (Guarujá) e a Ponta da Praia (Santos), foram utilizados os dados de Sonar de Varredura Lateral, adquiridos no ano de 2011, para complementar a discussão dos resultados.

A metodologia utilizada neste estudo foi semelhante àquela descrita por Andrade et al. (2004) e Quinn e Boland (2010) que utilizaram o procedimento de comparação de levantamentos batimétricos, executados em diferentes períodos, para tecer considerações sobre as alterações nos processos sedimentares em suas áreas de estudo (Colômbia e Irlanda, respectivamente). A **Figura 7** mostra o fluxograma contendo as etapas de desenvolvimento da metodologia aplicada na pesquisa.

Figura 7– Fluxograma da metodologia proposta para o desenvolvimento do estudo.

Fonte: elaborado pela autora

A escolha dos arquivos batimétricos, adequados ao desenvolvimento desse estudo, foi feita com base nos meses em que não ocorreram dragagens no Trecho 1 do canal de acesso ao Porto de Santos. Para isso, foi necessária a compilação dos períodos e da quantidade de material sedimentar dragado no referido trecho. Esses dados foram obtidos nos documentos disponibilizados pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais (IBAMA) (TETRA TECH, 2015). O Quadro 1 resume os dados utilizados no desenvolvimento do trabalho: batimetria multifeixe, Perfilagem Sísmica Contínua (*chirp*) e volume de material sedimentar dragado no Trecho 1.

No período de desenvolvimento do trabalho, entre fevereiro de 2012 e outubro de 2016, ocorreram atividades de dragagem do tipo “manutenção” no Trecho 1 do canal de acesso ao Porto de Santos. A partir da leitura dos relatórios disponibilizados pelo IBAMA não é possível identificar de qual pedaço do Trecho 1 o material sedimentar foi dragado. Até 2018 (período que esse trabalho foi desenvolvido) a área de despejo do material dragado no canal de acesso ao Porto está indicada na **Figura 7**.

Quadro 1 – meses correspondentes aos dados, provenientes de diversas fontes, utilizados no trabalho: batimetria – azul (**batimetria**), chirp – vermelho (**chirp**), dragagem – verde (**dragagem**), chuva – cinza (**cinza**), sonar de varredura lateral (**sonar**) – marrom.

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
jan				X	X		X
fev			X	X	X		X
mar			X	X	X		X
abr			X	X	X		X
maio		X	X	X	X	X	X
jun			X	X	X	X	X
jul	X	X	X	X	X	X	X
ago			X	X	X	X	X
set		X	X	X	X	X	X
out		X	X	X	X	X	X
nov		X	X	X	X	X	X
dez			X	X	X	X	X

Figura 8 – Área de despejo do material dragado no canal de acesso ao porto de Santos.

Fonte: extraído de TETRA TECH, 2015

Durante o processo de análise dos dados ocorreu à exclusão dos pontos que apresentaram valores anômalos de profundidade e foram gerados histogramas para análise da frequência de distribuição das cotas na área de estudo (Trecho 1 da **Figura 3**). A etapa seguinte consistiu na interpolação das cotas dos arquivos selecionados. A partir da espacialização dos dados, foram definidos os limites e a resolução para a interpolação. Mediu-se o espaçamento entre os pontos cotados e, com base nesse procedimento, decidiu-se pela resolução espacial de 10 m. O software utilizado foi o *Surfer* (versão 9.0) e o método de interpolação foi o “Vizinho Natural”, pois esse algoritmo não extrapola contornos além da área de localização dos dados. Esse algoritmo utiliza uma média ponderada das observações vizinhas, em que os pesos são proporcionais à área adjacente (SIBSON, 1980; 1981; WATSON, 1994). Os arquivos interpolados são denominados *grids* e foram utilizados de duas formas:

- a) traçar os perfis batimétricos transversais e gerar os mapas mensais da profundidade da área de estudo e;
- b) realizar as operações matemáticas entre os *grids*.

Por serem etapas distintas os *grids* foram duplicados, ou seja, foram definidos dois *grids* para um mesmo mês. Na etapa a), os *grids* tiveram seus valores de profundidade multiplicados por “-1”, a profundidade passou a ser negativa para esses arquivos. Após esse procedimento, foram traçados os perfis batimétricos transversais e plotados os mapas mensais de profundidade da área. Por sobre os *grids* mensais, cujas profundidades são negativas, foram traçados perfis batimétricos transversais com a finalidade de comparar as variações dos dados batimétricos ao longo dos meses (entre fevereiro de 2012 e outubro de 2016) e de compará-los com perfis obtidos com a técnica geofísica de Perfilagem Sísmica Contínua.

Na etapa b), os *grids* positivos foram utilizados nas operações matemáticas que consistiu no cálculo das diferenças intra-anual e interanual na área de estudo. Para isso, calculou-se a diferença (em metros) entre as duas superfícies batimétricas (entre dois “*grids*”) e a diferença de volume entre as mesmas duas superfícies (entre os mesmos dois “*grids*”). Nos cálculos diferenças positivas indicam processos de assoreamento e diferenças negativas indicam processos de erosão. Os resultados foram apresentados na forma de mapas. Nesses mapas foi plotada a diferença batimétrica calculada entre dois *grids*, descritos o volume calculado entre as mesmas superfícies batimétricas e o volume de material sedimentar dragado no período analisado.

5 RESULTADOS

A evolução da morfologia de fundo no Trecho 1 do canal do Porto de Santos pode ser observada nos mapas elaborados a partir dos *grids* batimétricos. Entre as **Figuras 9 a 22** está ilustrada a variação da morfologia de fundo, do Trecho 1 do canal do Porto de Santos, no período de fevereiro de 2012 a outubro de 2016. O **Quadro 2** indica os meses utilizados para essa análise e para as operações matemáticas de cálculo de volumes. Maiores alterações na topografia do fundo foram observadas na porção estreita do canal, entre a Fortaleza de Santa Cruz (Guarujá) e a Ponta da Praia (Santos).

Os períodos e a quantidade de material dragado no Trecho 1 do Porto de Santos, foram compilados e resumidos na **Tabela 1**. A **Tabela 2** indica os valores obtidos no cálculo do volume entre os *grids* dos meses selecionados. No estabelecimento da metodologia, optou-se por se comparar *grids* batimétricos entre meses que não ocorreram atividades de dragagem. Para as análises realizadas assumiu-se que a quantidade dragada entre setembro de 2011 e novembro de 2012 corresponde ao volume dragado no ano de 2012. Para definição da variação natural do sistema são necessários dados em períodos sem influência de dragagem. No Trecho 1 do Porto de Santos esses dados são provenientes do ano de 2013.

Quadro 2 - Meses que ocorrem levantamentos batimétricos que foram utilizados na metodologia do trabalho.

Meses nos quais foram realizados levantamentos batimétricos	
2012_fev	2013_maio
2012_mar	2013_jun
2012_dez	2013_set
2013_jan	2014_maio
2013_fev	2014_out
2013_mar	2015_maio
2013_abril	2016_out

Figura 9 – Dados batimétricos de Fevereiro de 2012.

Fonte: elaborado pela autora

Figura 10 - Dados batimétricos de Março de 2012.

Fonte: elaborado pela autora

Figura 11 - Dados batimétricos de Dezembro de 2012.

Fonte: elaborado pela autora

Figura 12 - Dados batimétricos de Janeiro de 2013.

Fonte: elaborado pela autora

Figura 13 - Dados batimétricos de Fevereiro de 2013.

Fonte: elaborado pela autora

Figura 14 - Dados batimétricos de Março de 2013.

Fonte: elaborado pela autora

Figura 15 - Dados batimétricos de Abril de 2013.

Fonte: elaborado pela autora

Figura 16 - Dados batimétricos de Maio de 2013.

Fonte: elaborado pela autora

Figura 17 - Dados batimétricos de Junho de 2013.

Fonte: elaborado pela autora

Figura 18 - Dados batimétricos de Setembro de 2013.

Fonte: elaborado pela autora

Figura 19 - Dados batimétricos de Maio de 2014.

Fonte: elaborado pela autora

Figura 20 - Dados batimétricos de Outubro de 2014.

Fonte: elaborado pela autora

Figura 21 - Dados batimétricos de Maio de 2015.

Fonte: elaborado pela autora

Figura 22 - Dados batimétricos de Outubro de 2016.

Fonte: elaborado pela autora

Tabela 1 - Compilação do material dragado no Trecho 1 do Porto de Santos.

Período da dragagem	Volume dragado (m³)
nov/12	789.158,00
Total set-nov/2011 mais abril-nov/2012	1.807.964,40
jan-abril/2014	943.864,38
set/14	504.242,30
Total jan-set/2014	1.448.106,68
jun/15	587.897,14
jul/15	270.297,54
ago/15	337.212,46
out/15	277.054,98
Total jun-out/2015	1.472.462,12
fev/16	801.117,00
mar/16	454.313,11
nov/16	478.325,21
dez/16	41.473,28
Total jan-dez/2016	1.775.228,60
TOTAL set/2011-dez/2016	6.503.761,80

Fonte: elaborado pela autora

Tabela 2 - Volume calculado entre os *grids* selecionados.

Período analisado	Cálculo da diferença de volume entre os <i>grids</i> analisados (m³)
Out/2016 e fev/2012	-466.395,41
Out/2016 e maio/2015	-1.528.623,93
Maio/2015 e maio/2014	1.964.406,96
Out/2014 e maio/2014	277.018,21
Maio/2014 e fev/2012	-905.209,63
Set/2013 e fev/2012	930.892,27
Maio/2013 e fev/2012	-358.165,95
Fev/2013 e fev/2012	-420.727,28
Out/2016 e maio/2014	451.339,16
Out/2014 e fev/2012	-630.595,82
Dez/2012 e fev/2012	-598.970,45

Fonte: elaborado pela autora

5.1

5.2 Análise do período sem dragagem no Trecho 1

Durante o ano de 2013 o Trecho 1 sofreu influência do aporte sedimentar que é proveniente dos rios, da deriva litorânea, das correntes de maré e de outras ações antrópicas, como a dragagem em outros trechos do porto. Na **Figura 23** encontra-se a variação dos volumes (m^3) calculados entre *grids* batimétricos. Nesse gráfico, as setas vermelhas indicam a tendência de erosão e as setas verdes indicam a tendência de assoreamento.

Mapas de assoreamento e de erosão foram elaborados entre diferentes meses do ano de 2013 para avaliar tendências intra-anuais. Entre as **Figuras 24 a 30** estão indicadas as variações dos dados batimétricos e dos volumes calculados entre *grids* durante o período entre dezembro de 2012 e setembro de 2013. Os mapas apresentados e o gráfico da **Figura 23** indicam que a tendência geral no Trecho 1 é de assoreamento. Porém, entre fevereiro-março e abril-junho há indícios de erosão.

Figura 23 - Gráfico ilustrando a diferença do volume calculado entre *grids* dos mapas batimétricos. As setas vermelhas indicam tendência de erosão e as verdes de assoreamento. A cor vermelha das colunas indica o volume erodido entre dois *grids* e a cor verde indica o volume assoreado entre dois *grids*

Fonte: elaborado pela autora

Figura 24 - Diferença entre os *grids* batimétricos dos meses de janeiro de 2013 e dezembro de 2012. As cores da legenda representam a diferença entre dois *grids* batimétricos.

Fonte: elaborado pela autora

Figura 25 - Diferença entre os *grids* batimétricos dos meses de fevereiro de 2013 e janeiro de 2013. As cores da legenda representam a diferença entre dois *grids* batimétricos.

Fonte: elaborado pela autora

Figura 26 - Diferença entre os *grids* batimétricos dos meses de março de 2013 e fevereiro de 2013. As cores da legenda representam a diferença entre dois *grids* batimétricos.

Fonte: elaborado pela autora

Figura 27 - Diferença entre os *grids* batimétricos dos meses de abril de 2013 e março de 2013. As cores da legenda representam a diferença entre dois *grids* batimétricos.

Fonte: elaborado pela autora

Figura 28 - Diferença entre os *grids* batimétricos dos meses de maio de 2013 e abril de 2013. As cores da legenda representam a diferença entre dois *grids* batimétricos.

Fonte: elaborado pela autora

Figura 29 - Diferença entre os *grids* batimétricos dos meses de junho de 2013 e maio de 2013. As cores da legenda representam a diferença entre dois *grids* batimétricos.

Fonte: elaborado pela autora

Figura 30 - Diferença entre os *grids* batimétricos dos meses de setembro de 2013 e junho de 2013. As cores da legenda representam a diferença entre dois *grids* batimétricos.

Fonte: elaborado pela autora

5.3 Análise entre *grids* no período entre set/2011 e set/2013, considerando o volume dragado entre set/2011 e nov/2012

Aproximadamente, 1.807.960 m³ de material sedimentar foi dragado entre setembro de 2011 e novembro de 2012 no Trecho 1 do canal do Porto de Santos. A diferença de volume (m³) entre os levantamentos batimétricos de diferentes períodos, entre fevereiro de 2012 e setembro de 2013, pode ser observada no gráfico da **Figura 31** e na **Tabela 3**. Indica-se que há uma tendência de assoreamento no período analisado, compreendido entre setembro de 2013 e fevereiro de 2012. Os mapas das **Figuras 32 a 35** também indicam processos de assoreamento em diferentes locais do Trecho 1. Infere-se que, provavelmente, existam locais com indicativos de erosão na porção estreita do canal, entre a área da Fortaleza da Santa Cruz (Guarujá) e o promontório próximo à Ponta da Praia (Santos).

Tabela 3 – Volume calculado entre *grids* no período de entre fevereiro de 2012 e setembro de 2013 e o volume dragado entre setembro de 2011 e novembro de 2012.

Período utilizado no cálculo do volume	Volume calculado (m ³)	Período dragado	Volume dragado (m ³)
Dez/2012-fev/2012	-598.970,45	set/2011-nov/2012	1.807.964,40
Fev/2013-fev/2012	-420.727,28		
Mai/2013-fev/2012	-358.165,95		
Set/2013-fev/2012	930.892,27		

Fonte: elaborado pela autora

Figura 31 - Gráfico ilustrando a diferença do volume calculado entre *grids* no período de fevereiro/2012 a setembro/2013 e a quantidade de volume de sedimento dragado (em azul) entre setembro/2011 e novembro/2012. A cor vermelha das colunas indica o volume erodido entre dois *grids* e a cor verde indica o volume assoreado entre dois *grids*. A seta verde indica a tendência de assoreamento do Trecho 1 do canal do Porto de Santos, no período analisado.

Fonte: elaborado pela autora

Figura 32 - Diferença entre os *grids* batimétricos dos meses de dezembro de 2012 e fevereiro de 2012. As cores da legenda representam a diferença entre dois *grids* batimétricos.

Fonte: elaborado pela autora

Figura 33 - Diferença entre os *grids* batimétricos dos meses de fevereiro de 2013 e fevereiro de 2012. As cores da legenda representam a diferença entre dois *grids* batimétricos.

Fonte: elaborado pela autora

Figura 34 - Diferença entre os *grids* batimétricos dos meses de maio de 2013 e fevereiro de 2012. As cores da legenda representam a diferença entre dois *grids* batimétricos.

Fonte: elaborado pela autora

Figura 35 - Diferença entre os *grids* batimétricos dos meses de setembro de 2013 e fevereiro de 2012. As cores da legenda representam a diferença entre dois *grids* batimétricos.

Fonte: elaborado pela autora

5.4 Análise entre *grids* entre maio/2014 e maio/2015, considerando o volume de material sedimentar dragado em setembro de 2014

Aproximadamente, 504.242,30 m³ de material sedimentar foi dragado entre maio de 2014 e maio de 2015 no Trecho 1 do canal do Porto de Santos. O gráfico da **Figura 36** e a **Tabela 4** indicam a diferença de volume (m³) calculado entre os *grids* de diferentes períodos. Observou-se uma tendência de assoreamento do trecho nesse período. Entre maio de 2014 e maio de 2015 o trecho foi dragado apenas em setembro de 2014. No ano de 2015 a dragagem foi retomada em junho, com o menor volume dragado no período entre maio/2014 e maio/2015, o canal apresenta tendência de assoreamento. Os mapas indicados pelas **Figuras 37 e 38** também possibilitam essa interpretação.

Tabela 4 – Volume calculado entre *grids* no período entre maio de 2014 e maio de 2015 e o volume de material sedimentar dragado em setembro de 2014.

Período utilizado no cálculo do volume	Volume calculado (m ³)	Período da dragagem	Volume dragado (m ³)
Out/2014-maio/2014	277.018,21	Set/14	504.242,30
Maio/2015-maio/2014	1.964.406,96		

Fonte: elaborado pela autora

Figura 36 - Diferença do volume calculado entre *grids* no período entre maio/2014 e maio/2015 e o volume sedimentar dragado (em azul) em setembro/2014. A cor verde das colunas indica o volume assoreado entre dois *grids*. A seta verde indica a tendência de assoreamento do Trecho 1 do canal do Porto de Santos.

Fonte: elaborado pela autora

Figura 37 - Diferença entre os *grids* batimétricos dos meses de maio de 2015 e maio de 2014. As cores da legenda representam a diferença entre dois *grids* batimétricos.

Fonte: elaborado pela autora

Figura 38 - Diferença entre os *grids* batimétricos dos meses de outubro de 2014 e maio de 2014. As cores da legenda representam a diferença entre dois *grids* batimétricos.

Fonte: elaborado pela autora

5.5 Análise dos *grids* entre maio de 2015 e outubro de 2016, considerando o volume dragado entre junho-outubro de 2015 e fevereiro-março de 2016

Aproximadamente, 2.727.892 m³ de material sedimentar foi dragado entre junho de 2015 e março de 2016 no Trecho 1. A **Figura 39** e a **Tabela 5** contém a diferença do volume (m³) calculado entre os *grids* de diferentes meses. Indica-se, com o auxílio da **Figura 40**, indícios de erosão no trecho analisado, o que condiz com a comparação dos volumes calculados. Durante esse período foi dragada uma quantidade de sedimento superior (5,5 vezes maior quando comparada ao período anterior, entre maio/2014 e maio/2015) às quantidades dragadas em outros períodos, de modo que a quantidade removida de sedimento foi maior que aquela que o sistema poderia repor naturalmente.

Figura 39 – Em vermelho, a diferença de volume calculado entre outubro/2016 e maio/2015. Em azul, a quantidade de volume sedimentar dragado no período junho-outubro/2015 e fevereiro-março/2016

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 5 - Volume calculado entre *grids* no período entre maio/2015 e outubro/2016 e o volume dragado entre junho-outubro/2015 e fevereiro-março/2016

Período indicado para cálculo do volume	Volume calculado (m ³)	Período da dragagem	Volume dragado (m ³)
Out/2016-maio/2015	-1.528.623,93	Jun-out/2015	1.472.462,12
		Fev-mar/2016	1.255.430,11

Fonte: elaborado pela autora

Figura 40 - Diferença dos *grids* batimétricos entre outubro de 2016 e maio de 2015. No mapa constam o volume calculado entre os *grids* e a quantidade de material dragado no mesmo período. Ambas quantidades expressas em m³. As cores da legenda representam a diferença entre dois *grids* batimétricos, expressa em metros

Fonte: Elaborado pela autora

5.6 Análise entre *grids* no período: outubro de 2016 e fevereiro de 2012; outubro de 2016 e maio de 2014; outubro de 2014 e fevereiro de 2012 e o volume de material sedimentar dragado no mesmo período

Separaram-se 3 períodos (outubro/2016-fevereiro/2012; outubro/2014-fevereiro/2012; outubro/2016-maio/2014) que possuíam um maior período entre os meses para se avaliar as variações morfológicas e batimétricas no Trecho 1. Na **Tabela 6** encontra-se a quantidade de material dragado durante os períodos selecionados.

Analizando as **Figuras 41 e 42**, pode-se supor que ocorreram modificações na morfologia de fundo e na profundidade do trecho analisado, principalmente, na área da embocadura, próxima à Fortaleza de Santa Cruz (Guarujá) e à Ponta da Praia (Santos). As variações são da ordem de 2 m na área da Ponta da Praia e de 2-5 m no lado do Guarujá, na porção indicada próximo aos flancos e taludes dessa área e de ambos lados da embocadura, ressalta-se todavia que as diferenças maiores entre os dados batimétricos analisados ocorrem do lado do Guarujá. Os mapas elaborados indicam processos erosivos nos locais citados.

A **Figura 43** indica modificações na morfologia de fundo e na profundidade na área da embocadura, próxima à Fortaleza de Santa Cruz (Guarujá) e a Ponta da Praia (Santos), porém verificou-se diferença da ordem de 1-2 m entre os *grids* batimétricos analisados. Em alguns pontos há indícios de erosão e em outros de assoreamento.

Tabela 6 – Volume de material sedimentar dragado no período analisado

Período da dragagem	Volume dragado no período indicado (m ³)
Set/2011-set/2014	3.256.071,08
Maio/2014-mar/2016	3.232.134,53
Fev/2012-mar/2016	5.983.963,31

Fonte: elaborado pela autora

Figura 41 - Diferença entre os *grids* batimétricos dos meses de outubro de 2016 e fevereiro de 2012. As cores da legenda representam a diferença entre dois *grids* batimétricos.

Fonte: elaborado pela autora

Figura 42 - Diferença entre os *grids* batimétricos dos meses de outubro de 2014 e fevereiro de 2012. As cores da legenda representam a diferença entre dois *grids* batimétricos.

Fonte: elaborado pela autora

Figura 43 - Diferença entre os *grids* batimétricos dos meses de outubro de 2016 e maio de 2014. As cores da legenda representam a diferença entre dois *grids* batimétricos.

Fonte: elaborado pela autora

5.7 Variação da topografia e da morfologia de fundo a partir da análise conjunta entre dados de Perfilagem Sísmica Contínua e perfis batimétricos transversais

As análises anteriores indicam que, para o período compreendido entre fevereiro de 2012 e outubro de 2016, ocorreram na área de estudo os seguintes processos:

- a) variações topográficas na área da embocadura do canal, próximo à Fortaleza de Santa Cruz (Guarujá) e à Ponta da Praia (Santos) e;
- b) uma área de assoreamento localizada na porção do canal mais a jusante na porção central da Baía de Santos, local onde a profundidade é da ordem de 12-15 m.

Para se aprofundar na análise desses dois tópicos foram traçados perfis batimétricos transversais sobre os *grids* de diferentes meses. Para agregar conteúdo na análise, foram utilizados dados oriundos da aplicação da técnica de Perfilagem Sísmica Contínua, empregando uma fonte do tipo *chirp*. Os perfis selecionados foram obtidos com um equipamento duplo *chirp* e possuem dois pares de frequência: 2-10 kHz e 10-20 kHz.

A **Figura 44** indica a posição dos perfis batimétricos transversais (entre fevereiro de 2012 e outubro de 2016) e a localização dos dados de Perfilagem Sísmica Contínua. A legenda da figura indica os meses em que os dados de *chirp* foram adquiridos e se, nesses meses, ocorreram dragagens no Trecho 1 do canal do Porto de Santos. Com exceção dos perfis batimétricos transversais A-A' e B-B', os demais perfis foram traçados em posições próximas aos perfis já existentes de PSC. Entre as **Figuras 54 a 64** são mostrados os perfis batimétricos transversais, cujas localizações estão indicadas na **Figura 44** pelas letras de A a K. Os perfis batimétricos transversais e os de PSC possuem o traçado na mesma direção, de Santos (A até K) para Guarujá (A' até K').

Figura 44 – Disposição dos perfis batimétricos transversais, à esquerda, e dos perfis de Perfilagem Sísmica Contínua, à direita. Na legenda constam os meses de aquisição dos dados e a indicação da ocorrência de dragagens.

Fonte: elaborado pela autora

Os perfis adquiridos com a fonte acústica *chirp* estão indicados entre as **Figuras 54 a 64** (C-C' a H-H'). Esses perfis mostram, em ambas frequências, a presença de lama fluida sobre o leito do canal. Material dessa natureza já foi descrito ao longo da área de estudo por Carneiro et al. (2017), sendo comumente encontrado em regiões estuarinas e tem sido estudado visando a melhor compreensão da navegabilidade em portos. Da análise dos registros sísmicos foi possível delimitar refletores em subsuperfície, que podem indicar material sedimentar depositado durante o período quaternário.

Os perfis obtidos com o *chirp* de frequência maior (entre 10 kHz e 20 kHz) tem melhor resolução na caracterização da lama fluida e dos refletores em subsuperfície, justamente porque a fonte acústica emprega maiores frequências e, assim, possibilita melhor resolução.

Os perfis do tipo *chirp*, indicados entre as **Figuras 51 a 53** (I-I', J-J', K-K') não mostraram a presença de refletores em subsuperfície e nem a existência de lama fluida. A área é constantemente dragada. Desse modo, o sedimento depositado é removido e, por isso, não existem refletores indicativos de material depositado. A formação de lama fluida depende de fatores hidrodinâmicos, tipos de material sedimentar e parâmetros físico-químicos que podem não ter ocorrido, pelo fato dessa área estar localizada mais a jusante, no meio da baía, se comparada com os perfis de C-C' a H-H'.

Figura 45 – Perfil de Perfilagem Sísmica Contínua C-C'. À direita, perfil de 10-20 kHz; à esquerda, perfil 2-10 kHz. O retângulo em vermelho indica a lama fluida depositada no leito do canal. A linha azul indica o fundo do canal, as linhas verdes indicam sedimento depositado em subsuperfície. A profundidade está expressa em metros. Localização do perfil na **Figura 44**.

Fonte: Adaptado pela autora de Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (2012)

Figura 46 – Perfil de Perfilagem Sísmica Contínua D-D'. À direita, perfil de 10-20 kHz; à esquerda, perfil 2-10 kHz. O retângulo em vermelho indica a lama fluida depositada no leito do canal. A seta verde indica zona de ocorrência de gás raso. A linha azul indica o fundo do canal. As linhas amarelas indicam sedimento em subsuperfície. A profundidade está expressa em metros. Localização do perfil na **Figura 44**

Fonte: Adaptado pela autora de Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (2012)

Figura 47 - Perfil de Perfilagem Sísmica Contínua E-E'. À direita, perfil de 10-20 kHz; à esquerda, perfil 2-10 kHz. O retângulo vermelho indica a lama fluida depositada no leito do canal. A linha azul indica o fundo do canal. As linhas amarelas indicam sedimento em subsuperfície. A profundidade está expressa em metros. Localização do perfil na **Figura 44**.

Fonte: Adaptado pela autora de Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (2012)

Figura 48 - Perfil de Perfilagem Sísmica Contínua F-F'. À direita, perfil de 10-20 kHz; à esquerda, perfil 2-10 kHz. O retângulo vermelho indica a lama fluida depositada no leito do canal. A linha azul indica o fundo do canal. As linhas amarelas indicam sedimento em subsuperfície. A profundidade está expressa em metros. Localização do perfil na **Figura 44**.

Fonte: Adaptado pela autora de Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (2012)

Figura 49 - Perfil de Perfilagem Sísmica Contínua G-G'. À direita, perfil de 10-20 kHz; à esquerda, perfil 2-10 kHz. Os retângulos vermelhos indicam a lama fluida depositada no leito do canal. A linha azul indica o fundo do canal. A linha verde indica sedimento em subsuperfície. A profundidade está expressa em metros. Localização do perfil na **Figura 44**.

Fonte: elaborado pela autora

Figura 50 - Perfil de Perfilagem Sísmica Contínua H-H'. À direita, perfil de 10-20 kHz; à esquerda, perfil 2-10 kHz. A linha azul indica o fundo do canal. A linha verde indica sedimento em subsuperfície. A profundidade está expressa em metros. Localização do perfil na **Figura 44**.

Fonte: elaborado pela autora

Figura 51 - Perfil de Perfilagem Sísmica Contínua I-I'. À direita, perfil de 10-20 kHz; à esquerda, perfil 2-10 kHz. A linha azul indica o fundo do canal. A profundidade está expressa em metros. Localização do perfil na **Figura 44**.

Fonte: Adaptado pela autora de Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (2010)

Figura 52 - Perfil de Perfilagem Sísmica Contínua J-J'. À direita, perfil de 10-20 kHz; à esquerda, perfil 2-10 kHz. A linha azul indica o fundo do canal. A profundidade está expressa em metros. **Localização do perfil na Figura 44.**

Fonte: Adaptado pela autora de Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (2010)

Figura 53 - Perfil de Perfilagem Sísmica Contínua K-K'. À direita, perfil de 10-20 kHz; à esquerda, perfil 2-10 kHz. A linha azul indica o fundo do canal. A profundidade está expressa em metros. Localização do perfil na **Figura 44**.

Fonte: Adaptado pela autora de Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (2010)

Os perfis batimétricos transversais estão indicados pelas **figuras 54 a 64** a localização dos perfis está indicada na **Figura 44**. O perfil A-A' (**Figura 54**) indica modificações na profundidade do talude da margem localizada próximo à Fortaleza de Santa Cruz (Guarujá). Na área central dessa figura, indicada pelos retângulos vermelhos, há uma inversão (ao longo dos meses) de assoreamento para aprofundamento na direção A-A'. Foram escolhidos exageros verticais de 10x e 30x nos perfis. Optou-se por essas escolhas por fatores estéticos, de forma a favorecer visualmente as variações no eixo da profundidade.

Os perfis B-B', C-C' e D-D' (**Figuras 55 a 57**) indicam modificações na profundidade (da ordem de 4 m no perfil D-D', 8-10 m nos perfis B-B' e C-C') do talude da margem localizada próxima à Fortaleza de Santa Cruz (Guarujá). No perfil B-B' há modificações no talude da margem (da ordem de 6 m na comparação entre alguns meses) próxima à Ponta da Praia (Santos).

O perfil D-D' indica uma tendência de assoreamento da ordem de 1-1,5 m na comparação entre alguns meses. Os perfis E-E', F-F', G-G', H-H' (**Figuras 58 a 61**) indicam uma alteração na margem do canal do lado de Santos, da ordem de quase 20 m, se comparando outubro de 2016 com os outros meses no perfil H-H'.

Os perfis I-I', J-J' e K-K' (**Figuras 51 a 53**) indicam variações batimétricas da ordem de 1-1,5 m na profundidade do canal. Essas variações da profundidade ao longo dos meses, em que não ocorreram dragagens, indicam uma variação temporal dos processos sedimentares na área.

Figura 54 – Perfil Transversal batimétrico A-A'. A seta e retângulos em vermelho indicam as áreas de mudanças na topografia de fundo. Eixos de profundidade e distância em metros. Localização do perfil na **Figura 44**.

Fonte: elaborado pela autora

Figura 55 - Perfil Transversal batimétrico B-B'. As setas em vermelho indicam as áreas de mudanças na topografia de fundo. Eixos de profundidade e distância em metros. Localização do perfil na **Figura 44**.

Fonte: elaborado pela autora

Figura 56 – Perfil Transversal batimétrico C-C'. As setas em vermelho indicam as áreas de mudanças na topografia de fundo. Eixos de profundidade e distância em metros. Localização do perfil na **Figura 44**.

Fonte: elaborado pela autora

Figura 57 – Perfil Transversal batimétrico D-D'. A seta e o retângulo em vermelho indicam as áreas de mudanças na topografia de fundo. Eixos de profundidade e distância em metros. Localização do perfil na **Figura 44**.

Fonte: elaborado pela autora

Figura 58 - Perfil Transversal batimétrico E-E'. O retângulo em vermelho indica área de mudanças na topografia de fundo. Eixos de profundidade e distância em metros. Localização do perfil na **Figura 44**.

Fonte: elaborado pela autora

Figura 59 - Perfil Transversal batimétrico F-F'. O retângulo em vermelho indica área de mudanças na topografia de fundo. Eixos de profundidade e distância em metros. Localização do perfil na **Figura 44**.

Fonte: elaborado pela autora

Figura 60 – Perfil Transversal batimétrico G-G'. As setas em vermelho indicam as áreas de mudanças na topografia de fundo. Eixos de profundidade e distância em metros. Localização do perfil na **Figura 44**.

Fonte: elaborado pela autora

Figura 61 – Perfil Transversal batimétrico H-H'. O retângulo em vermelho indica área de mudanças na topografia de fundo. Eixos de profundidade e distância em metros. Localização do perfil na **Figura 44**.

Fonte: elaborado pela autora

Figura 62 - Perfil Transversal batimétrico I-I'. O retângulo em vermelho indica área de mudanças na topografia de fundo. Eixos de profundidade e distância em metros. Localização do perfil na **Figura 44**.

Fonte: elaborado pela autora

Figura 63 – Perfil Transversal batimétrico J-J'. O retângulo em vermelho indica a área de mudanças na topografia de fundo. Eixos de profundidade e distância em metros. Localização do perfil na **Figura 44**.

Fonte: elaborado pela autora

Figura 64 - Perfil Transversal batimétrico K-K'. O retângulo em vermelho indica a área de mudanças na topografia de fundo. Eixos de profundidade e distância em metros. Localização do perfil na **Figura 44**.

Fonte: elaborado pela autora

6 DISCUSSÃO

Autores que desenvolveram trabalhos em vários estuários discutem que as alterações antrópicas (atividade de dragagens, retificação de canais, construção de barragens, ocupações de zonas intermarés e de manguezais) tendem a aumentar a taxa de sedimentação, favorecendo o assoreamento (MONGE-GANUZAS; CEARRETA; EVANS, 2013; WILLIAMS; DELLAPENNA; LEE, 2014; TRAINI et al., 2015; VAN MAREN et al., 2015).

Algumas atividades antrópicas como o aprofundamento de canais podem aumentar a concentração de sedimentos em suspensão por ampliar a capacidade de transporte na superfície do estuário (VAN MAREN et al., 2015) e por modificar o padrão de penetração da cunha salina (SILVA; GOMES, 2012). A retificação de canais pode proporcionar um aumento na capacidade de transporte das correntes e, com isso, transportar mais sedimento (MONGE-GANUZAS; CEARRETA; EVANS, 2013; VAN MAREN et al., 2015).

Em um canal retificado, sem meandros, a dissipação de energia durante a vazante tende a ser menor (diminuição das velocidades de corrente de maré) e, sem canais evasivos (acessórios), o canal principal poderia ter maior deposição de sedimentos (MONGE-GANUZAS; CEARRETA; EVANS, 2013). A ocupação das áreas intermarés e de manguezais, faz com que o estuário tenda à diminuição de seus sumidouros de sedimentos e, assim, uma maior quantidade de sedimentos em suspensão pode favorecer o assoreamento em trechos do estuário (WILLIAMS; DELLAPENNA; LEE, 2014; VAN MAREN et al., 2015; TRAINI et al., 2015).

Algumas teorias afirmam que atividades antrópicas podem: alterar a dinâmica do prisma de maré (geralmente, diminuindo a área de atuação da maré), modificando assim, as velocidades de enchente ou as de vazante, fazendo com que o sedimento seja transportado em diferentes taxas (maiores, se velocidades maiores; menores, se velocidades menores) (MONGE-GANUZAS; CEARRETA; EVANS, 2013; WILLIAMS; DELLAPENNA; LEE, 2014; TRAINI et al., 2015); alterar a circulação estuarina (MONGE-GANUZAS; CEARRETA; EVANS, 2013; WILLIAMS; DELLAPENNA; LEE, 2014; VAN MAREN et al., 2015); modificar o transporte de sedimentos por alterar a zona máxima de turbidez (TRAINI et

al., 2015) e a concentração de sedimento em suspensão (VAN MAREN et al., 2015).

O Complexo Estuarino de Santos e a Baía de Santos são estudados há pelo menos 50 anos. Trabalhos da década de 70 já discutiam temas como o assoreamento do Estuário de Santos; padrões de circulação e do transporte de sedimento; circulação induzida pela maré.

Fúlfaro e Ponçano (1976) propuseram o primeiro modelo de circulação e sedimentação (transporte residual de leste para oeste) no estuário e na Baía de Santos. Eles caracterizaram a área do canal do porto de Santos como tendo uma movimentação, predominantemente, unidirecional, resultado de correntes, originalmente, fluviais que eram, posteriormente, canalizadas através do canal do Porto.

Ponçano e Gimenez (1985) já haviam discutido sobre indícios de assoreamento em locais próximos aos atuais trechos 3 (final) e 4 do canal do Porto de Santos. Segundo os autores, a dominância de material em suspensão durante a vazante poderia ocasionar assoreamento na região do canal de Bertioga e na embocadura do Rio Diana-Sandi (nas proximidades do trecho 3). Os autores concluíram que o equilíbrio morfológico regional associado às baixas concentrações de material em suspensão, explicavam as baixas taxas de assoreamento na área compreendida pelo atual Trecho 1.

Os autores atribuíram, como justificativa ao assoreamento na porção mais a montante do estuário (final do trecho 3 e trecho 4), três fatores:

- 1) a quebra de gradiente fluvial, perda de energia do meio transportador e, então, a deposição das frações granulométricas mais grossas;
- 2) coagulação eletrolíticas das frações finas e;
- 3) fixação do material depositado por efeito físico (coesão, velocidades críticas de deposição e erosão) e biológico (crescimento de vegetação do mangue).

Com o crescimento econômico na região da Baixada Santista, a partir da década de 60, ocorreram modificações paisagísticas que, provavelmente, alteraram os processos sedimentares locais, como por exemplo:

- a) a ampliação da área portuária e, com isso, a necessidade do estabelecimento de um canal cuja profundidade do leito passou a ser mantida por dragagens contínuas;
- b) a ocupação das áreas intermarés e dos manguezais pelas expansões do porto, indústrias e urbanização (moradias) e;
- c) o aumento do despejo de efluentes domésticos e industriais nos rios que desagüam e compõe o Estuário de Santos.

Rocha (2003) discutiu que, até o início da década de 80, o material dragado no canal do Porto de Santos era despejado nas proximidades da ponta da Munduba, na ilha de Santo Amaro. Havia registros de que parte do material retornava às praias. A autora discutiu um padrão de circulação de sedimentos diferente daquele definido por Fúlfaro e Ponçano (1976). Rocha (2003) encontrou diferenças na granulometria do sedimento de fundo e nas áreas de deposição do sedimento.

Apesar da direção do fluxo (leste para oeste) ser a mesma em ambos trabalhos, a autora (ROCHA, 2003) sugeriu que as diferenças encontradas poderiam ser explicadas pela influência da passagem de sistemas frontais ou por eventual influência antrópica, que tenha se refletido no sistema. Dentre as influências antrópicas, considerou aquelas causadas pela barreira hidráulica proporcionada pelo fluxo do emissário submarino José Menino (indicado na **Figura 3**), pelos processos de dragagem no Canal do Porto de Santos e pela disposição de tal material nas proximidades da Ponta da Munduba (indicado na **Figura 3**).

O canal do Porto de Santos começou a ser estabelecido na sua configuração atual a partir da década de 60. Para comparar as modificações na profundidade local e na morfologia da superfície de fundo da área, objeto deste estudo, foi digitalizada uma carta náutica do ano de 1960, que é anterior ao estabelecimento do canal. A **Figura 65** mostra uma carta náutica de 2018 e uma carta náutica de 1960. Nessa figura podem ser observadas as modificações que ocorreram na porção rasa da área. Uma análise comparativa entre esses mapas permite inferir (setas vermelhas da **Figura 65**) que houve uma expansão das áreas rasas ao entorno do Morro da Barra (Guarujá).

A **Figura 66** mostra o modelo batimétrico de 1960, a carta náutica de 2018 e o modelo batimétrico do Trecho 1 de outubro de 2016. Nota-se que

a profundidade original da porção rasa do Trecho 1 era, em média, entre 8-12 m. O período da análise batimétrica deste estudo ocorreu entre fevereiro de 2012 e outubro de 2016. Nesse período a cota do canal do Trecho 1 era mantida em 15 m, por dragagens. Na porção mais estreita do canal entre a Fortaleza de Santa Cruz e próximo à Ponta da Praia (áreas previamente identificadas no texto na **Figura 3**), indicado pelo retângulo verde da **Figura 66**, a profundidade era, naturalmente, maior que 15 m e, comumente, maior que 20 m.

Possivelmente, a porção do Trecho 1 que recebeu as atividades de dragagem (no período de análise deste estudo) está compreendida dentro da área representada pelos retângulos vermelhos da **Figura 66**. Essa área já apresentava, no ano de 1960, profundidades superiores a 15 m. Naturalmente, o local que era mais raso (no Trecho 1) tenderá a restaurar o equilíbrio anterior, apresentando uma predisposição natural ao assoreamento.

Considerando que no ano de 2013 o Trecho 1 do canal do Porto de Santos não foi dragado, a sua tendência de assoreamento pode ser atribuída aos fatores hidrodinâmicos da região e a outras ações antrópicas (atividades de dragagem nos outros três trechos, por exemplo). A partir da análise conjunta dos mapas apresentados nas **Figuras 24 a 30** e do gráfico da **Figura 23**, indica-se que a tendência geral no Trecho 1 do canal é de assoreamento. Entre abril e junho, período do outono, verificaram-se indícios de erosão, época em que a área é afetada por ciclogênese.

Frentes frias, aliadas a ondulações da direção sul tendem a remobilizar o sedimento fazendo com que esse seja transportado ao longo e para fora do sistema. Ondulações que incidem, perpendicularmente, nas praias da baía de Santos tendem a intensificar o transporte litorâneo o que poderia transportar o sedimento, longitudinalmente, retirando-o do Trecho 1. Nesses meses também se verificou uma menor quantidade de chuvas na região, diminuindo o aporte sedimentar fluvial que adentra ao estuário (**Figura 67**).

A perda de volume sedimentar, na área da Ponta da Praia, foi descrito no trabalho de Itolini (2014). A autora observou que durante a passagem de frente fria o trecho estudado teve a maior redução do volume sedimentar quando comparado com períodos em que não houve a passagem de sistemas frontais.

Figura 65 - à direita, a carta náutica de 2018; à esquerda, a carta náutica do ano de 1960. As setas vermelhas indicam a porção da baía onde infere-se que houve alterações na morfologia.

Fonte: elaborado pela autora

Figura 67 - Gráfico indicando a chuva total por mês no ano de 2013.

Fonte: Estação Ponta da Praia (02346642) 23°58'51.60"S; 46°18'0.00"O. Sistema Nacional de Informações Sobre Recursos Hídricos (2019)

A **Tabela 7** mostra o resumo do cálculo do volume entre *grids*, durante o período compreendido entre fevereiro de 2012 e outubro de 2016, e o volume de material dragado no mesmo período. A **Figura 68** indica a relação entre os valores indicados nessa tabela e indica que, após as atividades de dragagem, o trecho tende a assorear, com exceção do período entre setembro de 2013 e maio de 2014. Nesse período, ocorreu algum evento (cuja origem não foi possível verificar nesse trabalho), provavelmente, não relacionado à dragagem do Trecho 1, que removeu material sedimentar do local. Entre maio de 2015 e outubro de 2016 também houve uma tendência erosiva, mas esse evento está, provavelmente, relacionado com a grande quantidade de material dragado (2.727.892,23 m³) no período junho-outubro de 2015 e fevereiro-março de 2016.

Tabela 7– Volume calculado entre *grids* para os diferentes períodos utilizados nas análises batimétricas, período e volume dragado.

Meses utilizados no cálculo de volume entre <i>grids</i>	Cálculo da diferença de volume entre <i>grids</i> (m ³)	Período da dragagem	Volume dragado (m ³)
dez/2012-fev/2012	-598.970,45	set/2011-nov/2012	1.807.964,40
fev/2013-fev/2012	-420727,28		
maio/2013-fev/2012	-358165,95		
set/2013-fev/2012	930892,27		
out/2014-maio/2014	277.018,21	set/14	504.242,30
maio/2015-maio/2014	1.964.406,96	jun-out/2015+fev-mar/2016	2.727.892,23
out/2016-maio/2015	-1.528.623,93		

Fonte: elaborado pela autora

Figura 68 - Volume calculado entre *grids* no período fevereiro/2012-outubro/2016, volume de material sedimentar dragado em diferentes períodos. As setas verdes indicam a tendência de assoreamento e as vermelhas de erosão. A cor vermelha das colunas indica o volume erodido entre dois *grids*, a cor verde indica o volume assoreado entre dois *grids* e a cor azul indica o volume de material sedimentar dragado no Trecho 1 em diferentes períodos.

Fonte: elaborado pela autora

Atividades de dragagem requerem estudos prévios à execução dessa atividade. Outro exemplo de estudo envolvendo o transporte de sedimentos na área de estudo, o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) realizado pela Fundação Ricardo Franco (FRF) envolveu a contratação de um estudo abrangente por modelagem matemática tridimensional do Estuário de Santos (estudo feito pela empresa DHI em 2008) para avaliar o impacto do aprofundamento do canal de navegação do Porto de Santos, em relação aos aspectos hidrodinâmicos (vazões, níveis de água e correntes no sistema estuarino), salinidade (intrusão da cunha salina e estratificação) e sedimentos (dispersão e balanço dos sedimentos).

Com relação ao tópico envolvendo a dispersão e o balanço de sedimentos, o estudo (DHI, 2008) teve como um de seus objetivos estabelecer o balanço de sedimentos no Estuário de Santos e fornecer uma avaliação das possíveis mudanças após o aprofundamento do canal de navegação. Considerou-se os efeitos de várias condições meteorológicas e de vazões nos principais cursos d'água. O impacto do aprofundamento do canal de navegação na dinâmica do escoamento e no comportamento do sedimento fino, que foi objeto da modelagem matemática (DHI, 2008).

Estimou-se a deposição anual de sedimentos (com base em cálculos de balanço de sedimento) em cada uma das áreas (**Figura 69**) na situação atual (em 2008) e na situação após o aprofundamento. Com base nos números apresentados na **Figura 69** sugere-se que, devido à dragagem, uma quantidade razoavelmente grande de deposição adicional de sedimentos ocorreu no canal de navegação (Áreas 1-3). Algumas conclusões desse estudo foram:

- a) o aporte de sedimento para o estuário aumentará em aproximadamente 2%, mas não uniformemente por toda a área;
- b) o canal de acesso assoreará com uma taxa mais rápida e os manguezais crescerão mais lentamente. No entanto, o padrão de erosão/deposição não mudará. Só as taxas anuais se alterarão com grandezas entre 2% e 26%;

- c) os resultados mostraram que, em geral, o estuário está assoreando lentamente, porém pode ocorrer alguma erosão localizada;
- d) A sedimentação será maior na área a jusante da bacia de evolução e menor nas regiões a montante. O canal e a bacia de evolução atuam como um sumidouro e, então, mais sedimento decanta aqui e menos sedimento está disponível a montante;
- e) O principal processo responsável pelo decréscimo da taxa de sedimentação na área interna do estuário é o aprofundamento da bacia de evolução do Porto de Santos. O aumento da profundidade dessa seção do canal faz com que a velocidade do fluxo diminua, e consequentemente, haveria maior deposição sedimentar. Dessa maneira, menos sedimento fica disponível a montante dessa zona.

Figura 69 – Visão geral das taxas de sedimentação de acordo com as áreas definidas para gerar o modelo. O retângulo vermelho indica a área do Trecho 1.

Fonte: extraído de DHI (2008)

Para facilitar a discussão dos resultados, considerando os tópicos que abordaram a comparação entre os *grids* batimétricos e o volume de material sedimentar dragado (do **item 5.3** ao **item 5.7**), a área de estudo foi separada em dois setores do Trecho 1 do Porto de Santos (**Figura 70**):

- a) o setor A, a montante e indicado na figura pelo retângulo verde;
- b) o setor B, a jusante e indicado na figura pelo retângulo vermelho.

A área foi dividida considerando os resultados obtidos pela análise conjunta dos mapas, dos gráficos, dos perfis topográficos batimétricos e dos perfis de *chirp*. O setor A apresentou variações topográficas e morfológicas na porção estreita do canal, entre a Fortaleza de Santa Cruz (Guarujá) e a Ponta da Praia (Santos). No setor B, localizado mais ao centro da Baía de Santos, houveram indícios de assoreamento.

Figura 70 - Divisão por setores da área de estudo. O retângulo verde indica o Setor A e o retângulo em vermelho o Setor B.

Fonte: elaborado pela autora

6.1 Setor A

Nesse setor, na porção estreita do canal localizada entre à Fortaleza de Santa Cruz (Guarujá) e a Ponta da Praia (Santos), observaram-se variações topográficas de alguns metros (2-5 m) na comparação entre diferentes meses. Tanto os mapas gerados a partir do cálculo da diferença entre *grids* quanto os perfis batimétricos transversais indicaram essas variações topográficas.

O mapa da **Figura 41** (pag. 52) indica a diferença entre os grids de outubro de 2016 e de fevereiro de 2012. O mapa da **Figura 42** (pag. 52) indica a diferença entre os grids de outubro de 2014 e de fevereiro de 2012. Observam-se, nesses mapas, na porção estreita do canal, modificações na morfologia de fundo e na batimetria. A análise desses mapas indica processos erosivos na porção estreita do canal do Porto. Ocorreram variações da ordem de alguns metros nesse local, próximo aos flancos e taludes e de ambos lados da embocadura, as diferenças maiores entre os dados batimétricos analisados ocorrem do lado do Guarujá (2 m lado da Ponta da Praia - Santos; 2-5 m do lado do Guarujá).

A **Figura 43** (pag. 53) também indica modificações na morfologia de fundo e na batimetria na porção estreita do canal, porém verificou-se uma diferença da ordem de 1-2 m entre os grids batimétricos analisados. Em alguns pontos há indícios de erosão e em outros indicativos de assoreamento.

Os perfis topográficos batimétricos A-A', B-B' e C-C', indicados nas **Figuras 54** (pag. 67), **55** (pag. 68), **56** (pag. 69), indicam modificações na profundidade do talude da margem localizada próximo ao Morro da Barra (Guarujá). Essas alterações podem indicar uma instabilidade daquela margem. Uma hipótese seria a turbulência ocasionada pelo deslocamento dos navios que trafegam no porto ou por modificações no ângulo de incidência de ondas.

Traini et al. (2015) sugeriu em seu estudo do Estuário Vilaine (França), que uma das hipóteses para a erosão das áreas de marismas do estuário poderia ser causada pelo aumento do tráfego de barcos na área, uma vez

que as ondas geradas pelas embarcações poderiam erodir os marismas e disponibilizar o sedimento fino para a água. O sedimento ficaria disponível para ser transportado e depositado em outros locais do estuário, podendo favorecer o assoreamento em outros trechos.

As condições hidrodinâmicas e oceanográficas no estuário de Santos são diferentes daquelas do estuário francês (TRAINI et al., 2015), principalmente, porque no Estuário Vilaine foi construída uma barragem, em 1970. Mas, a hipótese de que as ondulações geradas pelo tráfego de navios, na porção estreita do canal, poderiam estar incidindo nos taludes e flancos desse local favorecendo a erosão e a instabilidade pode ser sugerida para o Estuário de Santos.

Complementarmente, foi analisado um mosaico gerado a partir de dados de sonar de varredura lateral (freq. 500 kHz) obtido na área de estudo no ano de 2011 (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS, 2012). Os dados foram adquiridos na área da embocadura, próximo aos promontórios. No mosaico existem indícios de blocos de rochas dispersos no local e foram encontrados dois exemplos que podem ser classificados como blocos de rochas. O que poderia exemplificar a hipótese da instabilidade do local. As imagens estão indicadas na **Figura 71**.

Na área central da **Figura 54** (pag. 67), indicada pelos retângulos vermelhos no perfil A-A', há uma inversão (ao longo dos meses) de assoreamento para aprofundamento na direção de A para A'. O aprofundamento na área central pode ter correlação com a velocidade das correntes no local e indica-se que as maiores profundidades encontradas nesse trecho estão relacionadas com o fluxo mais intenso que é ocasionado pelo estrangulamento entre os promontórios e, portanto, o local é naturalmente mais profundo (como já foi discutido na comparação entre a carta náutica atual e a carta náutica de 1960). Há um estrangulamento no local devido à presença dos dois promontórios, fazendo com que o fluxo fique mais intenso e, com isso, há mais remobilização de sedimento e subsequentemente o transporte dele. Após o estrangulamento, há uma diminuição na velocidade e parte do sedimento passa a ser depositado na baía.

Figura 71 – Mosaico gerado a partir de dados de sonar de varredura lateral (modelo Klein 3000, frequência 500 kHz). No detalhe dois exemplos de blocos de rochas dispersos nas proximidades da embocadura do canal e dos promontórios da área.

Fonte: adaptado de Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (2012)

O perfil D-D' (**Figura 57**, pag. 70) indica uma tendência de assoreamento, (da ordem de 1-1,5 m na comparação entre alguns meses) o que poderia ser explicado pelo fato de que nesse local a velocidade de corrente diminui após passar pelo estrangulamento causado pelos promontórios, como a velocidade da corrente diminui existe a possibilidade de depósito de material sedimentar na área do retângulo vermelho do perfil transversal batimétrico traçado.

Verifica-se, utilizando o perfil D-D', que a tendência na porção central, localizada a montante e após a embocadura, é de continuar o aprofundamento ao longo dos anos. E, na porção central externa, quando a velocidade da corrente diminui, a tendência é de assorear ao longo dos anos. Isso também foi observado nos mapas das **Figuras 40** (pag. 50), **41** (pag. 52), e **43** (pag. 53).

Roversi, Rosman e Harari (2016) descreveram que os resultados das simulações hidrodinâmicas, calculadas a partir das velocidades médias na coluna d'água calculadas pelo SisBahia, permitiram a representação da circulação existente no Complexo Estuarino de Santos. Os padrões de correntes em instantes de meia maré de enchente e de meia maré de vazante estão indicados nas **Figuras 72 e 73**, respectivamente. Os autores indicam que o Canal do Porto de Santos apresenta, em todos os instantes, as velocidades mais intensas de todo o domínio do modelo e que na área próxima à embocadura as velocidades chegam até 1,4 m/s na sizígia e até 0,7 m/s na quadratura. Nota-se, que logo após o estrangulamento, a jusante, a velocidade da corrente diminui.

Esse setor não é caracterizado, pela literatura disponível, por apresentar tendências de assoreamento devido às características hidrodinâmicas locais. Ponçano e Gimenez (1985) haviam indicado áreas de assoreamento na área interna no porto, próximo aos trechos 3 e 4. Os autores justificavam que pelo estuário ter domínio de vazante o sedimento não era depositado nesse local do canal. Porém, como comentado anteriormente o estudo de modelagem apresentado por DHI (2008) mostra que a dragagem pode favorecer o assoreamento da área de estudo.

Recentemente, Carneiro et al. (2014) concluíram que a assimetria de maré oscila entre os domínios de vazante e de enchente, apresentando domínio de vazante nas embocaduras dos canais principais (setor A – Trecho 1) e se

tornando mais positiva à medida que a maré se propaga a montante (trechos 3 e 4). Esse comportamento poderia explicar porque o assoreamento ocorre, predominantemente, nos canais internos do Porto de Santos (trechos 3 e 4).

Os perfis E-E', F-F', G-G', H-H' (**Figuras 58 a 61**, pag. 71-74), indicam uma alteração na margem H do canal (na ordem de quase 20 m quando comparado outubro de 2016 com outros meses, no perfil H-H') do lado de Santos. Uma hipótese para explicar essa alteração pode ser a intensidade da velocidade das correntes nessa porção convexa.

A corrente “cavaria” a margem H, removendo mais sedimento e, assim, tornando o canal mais largo. As **Figuras 40** (pag. 50) e **43** (pag. 53) também indicam essas variações na morfologia do fundo e na batimetria nesse trecho. A hipótese da velocidade das correntes não teve sua confirmação nos trabalhos dos autores supracitados. Harari e Camargo (1998), Carneiro et al. (2014) e Roversi, Rosmane e Harari (2016) não indicaram, em seus estudos, uma maior velocidade das correntes no referido trecho. Os perfis de *chirp* não mostraram indícios para comprovar essa hipótese.

Os perfis de *chirp* C-C' a H-H' (**Figuras 45 a 50**; pag. 57-63) indicaram em ambas as frequências a presença de lama fluida sobre o leito do canal (espessura variável entre 0,5-2 m). Em um trecho específico, correspondente ao perfil D-D', foi observada zona de ocorrência de gás raso. Os perfis de *chirp* de frequência maior, entre 10-20 kHz, têm uma melhor resolução na caracterização da lama fluida e dos refletores em subsuperfície, justamente, porque a fonte acústica emprega maiores frequências.

Ocorrências de gás raso são comuns em estuários e baías. Felix (2012) discutiu sobre a formação e a distribuição dessa feição no Sistema Estuarino de Santos. A lama fluida foi descrita por Carneiro et al. (2017) no referido estuário, este tipo de material é, comumente, encontrado em regiões estuarinas e é estudado para compreender e determinar a navegabilidade em portos. Estudos sobre lama fluida podem levar a reduções de dragagem e à liberação de tráfego de navios com calados maiores. Carneiro et al. (2017) mostraram a variabilidade espacial da lama fluida com o aumento da sua espessura em direção às partes internas do canal do Porto (trechos 3 e 4).

Figura 72 - Padrão de correntes em instante de meia maré de enchente (sizígia)

Fonte: extraído de Roversi, Rosmane e Harari (2016)

Figura 73 - Padrão de correntes em instante de meia maré de vazante (sizígia)

Fonte: extraído de Roversi, Rosmane e Harari (2016)

6.2 Setor B

Os perfis de *chirp* I-I', J-J' e K-K' (**Figuras 51 a 53**, pag. 63-65) não mostraram a presença de refletores em subsuperfície e nem a existência de lama fluida. A área é dragada constantemente, portanto, o material sedimentar é removido do local. Assim, não existem refletores indicativos de depósito sedimentar nos perfis de *chirp*. A formação de lama fluida depende de fatores hidrodinâmicos, tipos de material sedimentar e parâmetros físico-químicos que podem não ter ocorrido pelo fato do setor estar localizado mais o centro da baía, quando comparado com o setor A.

Os perfis batimétricos transversais I-I', J-J' e K-K' (**Figuras 62, 63 e 64**; pag. 75-78), indicam uma variação topográfica da ordem de 1-1,5 m na profundidade do canal. Essa variação da profundidade ao longo dos meses, que não ocorreram dragagens, indica a variação temporal dos processos sedimentares na área.

A análise das **Figuras 24** (pag. 38) e **30** (pag. 41) indica uma tendência de assoreamento no setor B, período no qual o Trecho 1 não foi dragado. Na década de 60 a cota desse setor era mais rasa entre 08-12 m (**Figuras 65 e 66**, pag. 82-83) e, assim, a tendência desse trecho seria de reestabelecimento do equilíbrio para uma situação mais rasa. Outra hipótese apresentada seriam as baixas velocidades de correntes nessa área (**Figuras 72 e 73**, pag. 94), que poderiam favorecer a deposição dos sedimentos que são transportados para o local pela descarga fluvial, pelo transporte litorâneo e pelas correntes de maré.

DHI (2008) sugeriu que a sedimentação na área a jusante da bacia de evolução é maior quando comparada com as regiões a montante. Pois o canal e a bacia de evolução atuam como um sumidouro. O aumento da profundidade dessa seção do canal faz com que a velocidade do fluxo diminua, e com isso há maior deposição sedimentar.

Outra hipótese sugerida nesse setor seria o estabelecimento de um delta de maré vazante. O canal principal do Estuário de Santos possui domínio de maré vazante (CARNEIRO et al., 2014). Como a velocidade da corrente diminui, após passar pelo estrangulamento da porção estreita do canal, o sedimento que está sendo transportado pelas correntes de maré, pelo transporte litorâneo e pelo transporte fluvial pode ser depositado no setor B, estimulando o assoreamento do local.

7 CONCLUSÕES

As análises realizadas a partir da comparação entre levantamentos batimétricos, obtidos em diferentes períodos e da interpretação dos dados de *chirp*, pelo método da Perfilagem Sísmica Contínua, proporcionaram a identificação de indícios de erosão e de assoreamento no Trecho 1 do Porto de Santos. Em alguns trechos, foi possível relacionar os padrões de erosão e de assoreamento com a hidrodinâmica local e, assim, sugerir tendências nos processos sedimentares atuantes na área de estudo.

Sem dragagem a tendência do Trecho 1 do Porto de Santos é de assoreamento, mas o trecho apresenta 2 setores com comportamento distintos. O setor A é, naturalmente, mais profundo, vide comparação entre a carta náutica de 2018 e a da década de 60. O sedimento não é depositado em grande quantidade nesse local devido à intensidade da velocidade das correntes que ali ocorrem.

Existe uma área restrita de assoreamento nesse setor devido à diminuição da velocidade das correntes quando estas passam pelo estrangulamento causado pelos promontórios na embocadura. O domínio de maré vazante também não favorece a deposição sedimentar no setor A.

Os dados de *chirp* indicaram a ocorrência de lama fluida e de gás raso nesse setor. Há indícios de instabilidade das encostas no trecho mais estreito do canal. As instabilidades podem ser resultado de modificações no ângulo de incidência das ondulações que atingem os promontórios localizados próximos a Ponta da Praia e a Fortaleza de Santa Cruz. Ou pode resultar das ondulações ocasionadas pelo tráfego de navios no local, com as ondas refletindo nos taludes dos promontórios, favorecendo o seu deslocamento.

O setor B era, naturalmente, mais raso em 1960, período em que o canal passou a ter a sua configuração atual, sugerindo a formação de um delta de maré vazante no setor, onde a velocidade das correntes é menor, quando comparadas com o setor A. Dessa forma, provavelmente, há uma provável deposição de sedimento nesse setor.

Dificuldades encontradas e sugestões para trabalhos futuros

As dificuldades e as sugestões para trabalhos futuros são descritas a seguir:

Dificuldades:

- disponibilidade de dados obtidos através de medidas *in situ* e não apenas de dados oriundos de modelagem;
- de relacionar o processo de erosão com as atividades de dragagem, pois com a leitura dos relatórios do IBAMA não foi possível inferir as localidades exatas de onde era retirado o material sedimentar;
- de encontrar bibliografia referente a informações recentes sobre a área de estudo e sobre a região do entorno (como mapas faciológicos da distribuição sedimentar);
- organizar todas as informações reunidas no trabalho (dados diversos, informações e dados provenientes de diferentes bibliografias) de maneira coerente, lógica e científica;

Para trabalhos futuros sugiro:

- explorar mais profundamente os dados e as informações disponibilizados nos relatórios do IBAMA (<http://licenciamento.ibama.gov.br/Dragagem/>) sobre o monitoramento das atividades de dragagem. Nesses documentos existem diversas informações que são interessantes tanto para fins acadêmicos quanto para fins “comerciais / profissionais”;
- incluir nas análises o volume de material sedimentar dragado nos outros três trechos do canal de acesso ao Porto de Santos;
- incluir uma abordagem regional e macrorregional na discussão dos resultados e não apenas uma abordagem “local” de um único estuário;
- incluir na discussão a questão temporal (escalas de tempo: instantâneas, engenharia, geológica) das análises e o seu relacionamento com a dinâmica costeira, fluvial, meteorológica;
- tentar valorar (economicamente) de que maneira os diversos setores da sociedade (gestor do porto, comunidades que moram no entorno, ambientes costeiros e seus serviços ecossistêmicos, gestor público, sociedade no geral já que se trata do maior porto da América Latina) são impactados pelas atividades de dragagem e qual seria a consequência de cálculos de estimativas (de assoreamento e de erosão) não correspondentes com a realidade da dinâmica sedimentar para esses diversos setores;
- discutir alternativas atuais para atividades de dragagem com foco no conceito “construindo com a natureza” (*building with the nature*), como o reestabelecimento de meandros no sistema estuarino, criação de áreas como “lagos” para aumentar o prisma da maré, etc.

REFERÊNCIA

ALFREDINI, Paolo; ARASAKI, Emilia; AMARAL, Rogério Fernando do. Mean sea-level rise impacts on Santos Bay, Southeastern Brazil – physical modelling study. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 144, n. 1-3, p. 377–387, 2008.

ALFREDINI, Paolo; ARASAKI, Emilia; PEZZOLI, Alessandro; ARCORACE, Mauro; CRISTOFORI, Elena; SOUSA JUNIOR, Wilson Cabral de. Exposure of Santos Harbor Metropolitan Area (Brazil) to Wave and Storm Surge Climate Changes. **Water Quality, Exposure and Health**, v. 6, n. 1-2, p. 73–88, June 2014.

ALFREDINI, Paolo; ARASAKI, Emilia; PEZZOLI, Alessandro; FOURNIER, C. P. Impact of climate changes on the Santos Harbor, São Paulo State (Brazil). **TransNav The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation**, v. 7, n. 4, p. 609- 617, Dec. 2013.

ANDRADE, C.; THOMAS, Y.; LONIN, S.; PARRA, C.; KUNESCH, S.; MENANTEAU, L.; ANDRIAU, A.; PIÑEROS, C.; VELASCO, S. Aspectos morfodinámicos de la bahía de Cartagena. **Boletín Científico CIOH**, v. 22, p. 90-104, 2004.

BARROS, S. R. S; WASSERMAN, J. C.; LIMA, J. B. A. Risco Ambiental na zona costeira: uma proposta interdisciplinar de gestão participativa para os Planos de Controle a Emergências dos portos brasileiros. **Revista da Gestão Costeira Integrada**, v. 10, n. 2, p. 217-227, 2010.

CARNEIRO, J. C.; FONSECA, D. L.; VINZON, S. B.; GALLO, M. N. Strategies for Measuring Fluid Mud Layers and Their Rheological Properties in Ports. **Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering**, v. 143, n. 4, 2017.

CARNEIRO, J. C.; MOLINAS, E.; NEMES, D. D.; GALLO, M. N.; VINZÓN, S. B.; ARAÚJO, A. A. M. Hydrodynamic modeling and residual velocities in Santos Estuarine Complex (SP, Brazil). In: CONFERENCE PHYSICS OF ESTUARIES AND COASTAL SEAS, 17., 2014, Porto de Galinhas. **Proceedings...** [S.l.: sn.], 2014.

COELHO, T. M. **Análise do transporte de sedimentos na região central da Baixada Santista (SP) através de modelagem numérica**. 2011. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Física) - Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DA BAIXADA SANTISTA. **Minuta Preliminar do Relatório de Situação dos Recursos Hídricos da UGRHI 7**. Santos: CBH-BS, 2000. 239 p. Disponível em: <<http://www.sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents/6491/relbsseg.pdf>>. Acesso em: 1 fev. 2018.

COMPANHIA DOCAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - CODESP. **Panorama do Porto de Santos**. Disponível em:

<http://www.portodesantos.com.br/down/imprensa/panorama_porto.pdf>.

Acesso em: 10 fev. 2017b.

COMPANHIA DOCAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - CODESP. **Plano de Desenvolvimento e Zoneamento do Porto de Santos**. Disponível em:

<www.portodesantos.com.br/documentacao.php>. Acesso em: 10 fev. 2017a.

D'AGOSTINI, D. P.; BASTOS, A. C.; LEAL, C. A.; GODINHO, E.; TSCHIEDEL, F. E. Evolução sismoestratigráfica holocênica da Baía de Vitória. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 12., 2011, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Tulsa, OK: Society of Exploration Geophysicists, 2011. p. 1-5.

DHI. **Porto de Santos: Modelagem do transporte de sedimentos**. 2008.

Disponível em: <http://licenciamento.ibama.gov.br/Dragagem/Dragagem%20-%20Porto%20de%20Santos/EIA_Dragagem_Porto_Santos2/Anexo%20C%20-%20Modelagem%20Matem%C3%A1tica/Modelagem%20Matem%C3%A1tica%20do%20Transp%20Sedimentos.pdf>.

FARINNACCIO, A.; CAZOLLI-GOYA, S.; TESSLER, M. G. Variações da linha de costa nas baías de Santos e São Vicente. **Quaternary and Environmental Geosciences**, v.1, p. 42-48, 2009.

FELIX, César Alexandre. **Evolução quaternária superior e formação de gás raso em ambiente estuarino tropical: o caso do canal de Bertioiga, São Paulo**. 2012. 111 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

FIEDLER, Maria Fernanda Mendes. **Dinâmica estuarina em cenários de aumento do nível do mar: estuário de Santos, SP**. 2015. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

FRIEDERICHS, Y. L.; REIS, A. T.; SILVA, C. G.; TOULEMONDE, B.; GUERRA, J. V. Arquitetura Sísmica do Sistema Fluvio-estuarino da Baía de Sepetiba Preservado na Estratigrafia Rasa da Plataforma Interna Adjacente, Rio de Janeiro. **Brazilian Journal of Geology**, v. 43, n. 1, p. 124-138, 2013.

FUKUMOTO, Marina Midori. **Determinação da história deposicional recente do Alto Estuário Santista, com base nos teores de metais e na susceptibilidade magnética dos sedimentos**. 2007. 134 f. Tese (Doutorado) - Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

FÚLFARO, V. J.; PONÇANO, W. L. Sedimentação atual do estuário e baía de Santos: um modelo geológico aplicado a projetos de expansão da zona portuária. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 1, 1976, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, ABGE, 1976. v. 2, p. 85-110.

FULFARO, V.; PONÇANO, W. L.; BISTRICHI, C. A.; STEIN, D. P. Escorregamentos de Caraguatatuba: expressão atual, e registro na coluna sedimentar da planície costeira adjacente. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 1976. **Anais...** Rio de Janeiro: ABGE, 1976. v. 2, p. 341-350.

GOLDEN SOFTWARE. **Manual do Software:** Surfer versão 9.0. Golden, Colorado: Golden, 2009.

GOMES, C. R.; SEREGATI, E. P. As implicações no transporte de açúcar a granel no Porto de Santos: “Empresa A”. **Revista Eletrônica de Negócios Internacionais da ESPM**, v. 4, n. 2, p. 32-47, 2009.

HARARI, Joseph; CAMARGO, Ricardo. Modelagem numérica da região costeira de Santos (SP): Circulação de maré. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 46, n. 2, p. 135-156, 1998.

HARARI, Joseph; CAMARGO, Ricardo; MIRANDA, Luiz Bruner de. Modelagem numérica hidrodinâmica tridimensional da região costeira e estuarina de São Vicente e Santos (SP). **Pesquisa Naval (SDM)**, Rio de Janeiro, Suplemento, v.15, p.79-97, 2001.

HILSDORF, W. C.; NOGUEIRA NETO, M. S. Port of Santos: prospection on the causes of access difficulties. **Gestão & Produção**, São Carlos, v. 23, n. 1, p. 219-231, Mar. 2016.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Levantamento Geofísico (Sonar de Varredura Lateral e Perfilagem Sísmica Contínua) do Canal de Santos**. São Paulo: IPT, 2010. (Relatório 118066-205).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Levantamentos geofísicos na ponta da praia, Santos, SP**. São Paulo: IPT, 2012. (Relatório 125832-205).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Mapa geológico do Estado de São Paulo:** Escala. 1; 500.000. São Paulo: IPT, 1981a. v. 1- 2

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo:** escala 1:1 000.000. São Paulo: IPT, 1981b. v. 1- 2.

ITALIANI, Diana Melo. **Resposta morfodinâmica à alimentação artificial da Ponta da Praia, Santos, SP**. 2014. 93 f. Dissertação (Mestrado) –Instituto Oceano gráfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

KITZMANN, D.; ASMUS, M. Gestão ambiental portuária: desafios e possibilidades. **Revista de Administração Pública**, Rio de Janeiro, v. 40, n. 6, p. 1041-1060, dez. 2006.

KOEHLER, P. R. W.; ASMUS, M. L. Gestão ambiental integrada em Portos Organizados: uma análise baseada no caso do porto de Rio Grande, RS – Brasil. **Revista da Gestão Costeira Integrada**, v. 10, n. 2, p. 201-215, 2010.

LAFFERTY, B.; QUINN, R.; BREEN, C. A side-scan sonar and high-resolution Chirp sub-bottom profile study of the natural and anthropogenic sedimentary record of Lower Lough Erne, northwestern Ireland. **Journal of Archaeological Science**, v. 33, n. 6, p. 756-766, 2006.

MIRANDA, L. B.; CASTRO, B. M.; KJERFVE, B. **Princípios de oceanografia física de estuários**. São Paulo: EDUSP, 2002. 417 p.

MONGE-GANUZAS, M.; CEARRETA, A.; EVANS, G. Morphodynamic consequences of dredging and dumping activities along the lower Oka estuary (Urdaibai Biosphere Reserve, southeastern Bay of Biscay, Spain). **Ocean & Coastal Management**, v. 77, p. 40-49, 2013.

PAOLO, F. S.; MAHIQUES, M. M. Utilização de métodos acústicos em estudos de dinâmica costeira: exemplo na desembocadura lagunar de Cananéia. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo, v. 26, n. 2, p. 211-225, jun. 2008.

PERILLO, G. M. E. **Geomorphology and sedimentology of estuaries**. Amsterdam: Elsevier, 1996. 471 p.

PETRAGLIA, J.; YU, A.; NASCIMENTO, P. T.; WECHSLER, A. M. G. Análise do processo decisório na ampliação da armazenagem de etanol no porto de Santos: um estudo de caso. **Revista de Gestão**, v. 21, n. 3, p. 361-377, 2014.

PONÇANO, W. L.; FÚLFARO, V. J. Sedimentação atual nas adjacências da Ponta de Itaipu e Baía de Santos: Implicações na escolha de locais de lançamento de material dragado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 1, Rio de Janeiro, 1976. **Anais...** São Paulo: ABGE, 1976. v. 2, p. 85-110.

PONÇANO, W. L.; GIMENEZ, A. F. Sobre o Padrão de circulação do Estuário Santista. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 15, n. 4, p. 317-321, 1985.

QUINN, R.; BOLAND, D. The role of time-lapse bathymetric surveys in assessing morphological change at shipwreck sites. **Journal of Archaeological Science**, v. 37, n. 11, p. 2938–2946, Nov. 2010.

ROCHA, A.C. **Aplicação de métodos diretos e indiretos na análise de sedimentos na Baía de Santos – SP**. 2003. 70 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

ROSMAN, P. C. C. **Aspectos morfológicos de rios e estabilidade de canais de maré**. 1992. 14 p. (Notas de aula).

ROSMAN, P. C. C.; NEVES FILHO, C.; MELLO, E. M. **Solução Conjunta dos Problemas de Erosão na Praia de Ipanema – Leblon e Qualidade de Água**

na Lagoa Rodrigo de Freitas – RJ: Relatório Final. Rio de Janeiro: Fundação Coppetec 1992. 353 p. (ET-170172).

ROVERSI, F.; ROSMAN, P. C. C.; HARARI, J. Análise da renovação das águas do Sistema Estuarino de Santos usando modelagem computacional. **Revista Ambiente & Água**, v. 11, n. 3, p. 566-585, 2016.

SIBSON, R. A brief description of natural neighbor interpolation. In: BARNETT, V. (Ed.). **Interpreting Multivariate Data**. New York: John Wiley and Sons, 1981. p. 21-36.

SIBSON, R. A Vector Identity for the Dirichlet Tessellation. **Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society**, v. 87, n. 1, p. 151-155, Jan. 1980.

SILVA, Orlando Roque da; GOMES, Marise de Barros Miranda. Impactos das atividades portuárias no Sistema Estuarino de Santos. **Revista Metropolitana de Sustentabilidade**, São Paulo, v 2, n. 2, p. 64-81, 2012.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE RECURSOS HÍDRICOS - SNIRH. **Apresentação do Portal HidroWeb**. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/apresentacao.jsf>>. Acesso em: 01 maio 2019.

SOUZA, L. A. P. **Revisão crítica da aplicabilidade dos métodos geofísicos na investigação de áreas submersas**. 2006. 311 f. Tese (Doutorado) - Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

SOUZA, L. A. P.; DEMARCO, L. F. W.; FALCETTA, A. M.; COSTA, S. B. Mapeamento acústico de rios e reservatórios: Estado da arte. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS, 12., 2016, Porto Velho, Rondônia. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2016. p. 1-11.

SUGUIO, K.; MARTIN, L. **Mapas Geológicos do Litoral de São Paulo, Escala 1: 100 000**. São Paulo: Secretaria de Obras e Meio Ambiente / Departamento de Águas e Energia Elétrica, 1978.

TETRA TECH. **Caracterização dos Sedimentos dos Berços de Atracação, suas Áreas de Acesso e Canal de Navegação do Porto Organizado de Santos**. São Paulo: TetraTech, 2015. 3758 p. Disponível em: <http://licenciamento.ibama.gov.br/Dragagem/Dragagem%20-%20Porto%20de%20Santos/Relatorios%20de%20Monitoramentos/Relatorios_Monit_Dragagem_PSantos/Relatorios_2015/>. Acesso em: 20 jan. 2018.

TORRES, R. J.; ABESSA, D. M. S.; SANTOS, F. C.; MARANHÃO, L. A.; DAVANSO, M. B.; NASCIMENTO, M. R. L.; MOZETO, A. A. Effects of dredging operations on sediment quality: contaminant mobilization in dredged sediments from the Port of Santos, SP, Brazil. **Journal of Soils Sediments**, v. 9, p. 420-432, 2009.

TRAINI, C.; PROUST, J. N.; MENIER, D.; MATHEW, M. J. Distinguishing Natural Evolution and Human Impact on Estuarine Morpho-sedimentary

Development: A Case Study from the Vilaine Estuary, France. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v.163 (B), p. 143-155, 2015.

VAN MAREN, D.S.; VAN KESSEL, T.; CRONIN, K.; SITTONI, L. The Impact of channel deepening and dredging on estuarine sediment concentration. **Continental Shelf Research**, v. 95, p. 1-14, 2015.

VIEIRA, G. B. B.; KLIEMANN NETO, F. J.; SILVA, R. M.; SENNA, L. A. D. S. Modelo de governança portuária pela ótica dos gestores: um estudo no porto de Santos. **Revista Gestão & Tecnologia**, v. 14, n. 3, p. 32-55, 2014.

WATSON, D. **Nngridr - An Implementation of Natural Neighbor Interpolation**. Claremont, Australia, 1994.

WESCHENFELDER, J.; CORRÊA, I. C. S.; ALIOTTA, S.; PEREIRA, C. M.; VASCONCELLOS, V. E. B. Shallow gas accumulation in sediments of the Patos Lagoon, southern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 78, n. 3, p. 607-614, 2006.

WILLIAMS, J.; DELLAPENNA, T.; LEE, G.; L., P. Sedimentary impacts of anthropogenic alterations on the Yeongsan Estuary, South Korea. **Marine Geology**, v.357, p. 256-271, 2014.