



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CAMPUS TRINDADE  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA

Fábio Barros Curado Fleury

**MAPEAMENTO E CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA DA REDE DE VALES  
SUBMARINOS PRESERVADA NA PORÇÃO NORTE DA BACIA DE SANTOS**

Florianópolis, SC

2022

Fábio Barros Curado Fleury

**MAPEAMENTO E CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA DA REDE DE VALES  
SUBMARINOS PRESERVADA NA PORÇÃO NORTE DA BACIA DE SANTOS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação  
em Oceanografia da Universidade Federal de Santa  
Catarina para obtenção de título de mestre em  
Oceanografia.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Henrique da Fontoura  
Klein

Co-Orientador: Prof. Dr. Deivid Cristian Leal Alves

Florianópolis, SC

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Fleury, Fábio

MAPEAMENTO E CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA DA REDE DE VALES  
SUBMARINOS PRESERVADA NA PORÇÃO NORTE DA BACIA DE SANTOS /  
Fábio Fleury ; orientador, Antonio Henrique da Fontoura  
Klein, coorientador, Deivid Cristian Leal Alves, .  
110 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro de Ciências Físicas e Matemáticas,  
Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, Florianópolis, .

Inclui referências.

1. Oceanografia. 2. Geologia Marinha. 3. Geofísica  
Marinha. 4. Geomorfologia Marinha. 5. Geomática. I. da  
Fontoura Klein, Antonio Henrique . II. Cristian Leal  
Alves, Deivid. III. Universidade Federal de Santa  
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Oceanografia. IV.  
Título.

Fábio Barros Curado Fleury

**Mapeamento e caracterização geológica da rede de vales submarinos  
preservada na porção norte da Bacia de Santos**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca  
examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Jarbas Bonetti Filho, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Luis Americo Conti, Dr.

Universidade de São Paulo

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi  
julgado adequado para obtenção do título de mestre em Oceanografia.

---

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

---

Prof. Antonio Henrique da Fontoura Klein, Dr.(a)

Orientador(a)

Florianópolis, 2022.

Em memória a todos os brasileiros que perderam suas  
vidas em decorrência da pandemia de Covid-19.

## RESUMO

Este trabalho apresenta resultados da aplicação de ferramenta de modelagem hidrológica em Sistema de Informação Geográfica para mapeamento da Rede de Vales Submarinos Interconectados (RVSI) “*onshore – offshore*” preservada na Bacia de Santos. O objetivo foi o mapeamento dos caminhos preferenciais de transporte gravitacional de sedimentos (*across shore sediment transfer*) entre o continente e talude continental inferior, de forma a subsidiar a prospecção de feições canalizadas e prover informações para análise de perigos geológicos em águas profundas. Para tanto, foi gerado um Modelo Digital Topobatimétrico (MDTB) de resolução espacial de 1000 m para a margem continental sudeste do Brasil, o qual foi confrontado à dados de batimetria mono e multifeixe, resultando em Incertezas Verticais Médias (IVM) de 2% entre as batimetrias. A partir desse MDTB foram extraídas as drenagens que, por sua vez, foram validadas por interpretação de perfis sísmicos de fonte monocal (CHIRP) e multicanal que cortam essas drenagens, além de dados da literatura. Essa validação foi feita entre as isóbatas de 10 e 2200 m. Após a validação da existência (ou não) das drenagens, essas foram classificadas geologicamente quanto à sua expressão sísmica. Predominantemente, as drenagens que ocorrem na Plataforma Continental apresentam expressão sísmica de vales incisos, por vezes preenchidos. No talude, em sua maior parte as drenagens não apresentam correlação com baixos (vales) batimétricos observados nos perfis sísmicos, evidenciando a necessidade da validação desse produto. Porém, no extremo Sul e Norte da área de estudos, a existência das drenagens coincide com sistemas de cânions e Depósitos de Movimento de Massa canalizados para porções do talude médio, associado a falhas regionais halocinéticas. Conclui-se que esse produto é eficaz no mapeamento de Redes de Vales Submarinos Interconectados, porém deve ser acompanhado de validação por dados sísmicos para confirmação da ocorrência real das drenagens. A interpretação desse produto, entretanto, não é direta, considerando a natureza relíquia e palimpsesta do relevo submarino, em que uma mesma drenagem, em diferentes isóbatas, apresentará controles geológicos distintos para sua existência.

**Palavras-chave:** Geomorfologia Marinha, Topobatimetria, Geomática.

## ABSTRACT

This work presents the results of the application of a hydrological modeling tool in a Geographic Information System to map the “onshore – offshore” onshore-offshore Interconnected Submarine Valley Network (ISVN) preserved in the Santos Basin. The objective was to map the preferential paths for the gravitational transport of sediments (across shore sediment transfer) between the continent and the lower continental slope, in order to support the prospection of channeled features and provide information for the analysis of geological hazards in deep waters. For that, a Digital Topobathymetric Model (DTBM) with a spatial resolution of 1000 m was generated for the southeastern continental margin of Brazil, which was confronted with single and multibeam bathymetry data, resulting in Average Vertical Uncertainties (AVU) of 2% between the bathymetries. From this DTBM, drainages were extracted, which, in turn, were validated by interpreting single-channel (CHIRP) and multi-channel seismic profiles that cut these drainages, in addition to data from the literature. This validation was carried out between the isobaths of 10 and 2200 m. After validating the existence (or not) of the drainages, they were geologically classified as to their seismic expression. Predominantly, the drainages that occur in the Continental Shelf present seismic expression of incised valleys, sometimes filled. On the slope, for the most part, the drainages do not present a correlation with low bathymetric (valleys) observed in the seismic profiles, evidencing the need for the validation of this product. However, in the extreme south and north of the study area, the existence of drainage coincides with systems of canyons and Mass Movement Deposits channeled to portions of the middle slope, associated with regional halokinetic faults. It is concluded that this product is effective in mapping Interconnected Submarine Valley Networks, but it must be accompanied by validation by seismic data to confirm the actual occurrence of drainages. The interpretation of this product, however, is not straightforward, considering the relict and palimpsest nature of the submarine relief, in which the same drainage, in different isobaths, will present different geological controls for its existence.

**Key words:** Marine Geomorphology, Topobathymetry, Geomatics.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Mapa de localização da área de estudo. Fonte da superfície batimétrica: LEPLAC. Fonte da superfície topográfica: ETOPO 1 .....	29
Figura 2.2 Reconstrução paleogeográfica esquemática das sequências Continental, Transicional Evaporítica e Plataforma Carbonática. Fonte: Chang et al. (1992). ....	31
Figura 2.3 Perfil strike de dados de CHIRP (0,5 - 5.5 kHz; acima) e perfil interpretativo esquemático (abaixo) na Plataforma Continental da Bacia de Santos. Redução da espessura das sequências Sq3 e Sq4 nos corredores plataformais evidenciam significativa erosão que resultam em depressões alongadas que cortam a porção Intermediária e Externa da Plataforma Continental. Tr: Unidades Transgressivas; FSST: Trato de Sistema de Mar Baixo; S3-S5: Incondormidades. Modificado de Dos Reis <i>et al.</i> (2013).....	34
Figura 2.4 Principais feições geomorfológicas mapeadas por Dos Reis <i>et al.</i> 2013. (Modificado).....	35
Figura 2.5 Santos Drift System. Linha sísmica interpretada cruzando a porção central da Bacia de Santos, do Talude Superior ao Platô de São Paulo. Duarte e Viana, 2007. ....	37
Figura 3.1 Desenho esquemático do funcionamento do algoritmo utilizado para elaboração do Índice de Posição Batimétrica. Fonte: modificado de Weiss (2001). ....	42
Figura 3.2 Desenho esquemático da diferenciação de áreas de declividade constante e planícies (ambos IPB = 0) pela caixa de ferramentas Benthic Terrain Modeler. Fonte: modificado de Weiss (2001).....	43
Figura 3.3. Índice de Posição Batimétrica computado em escala local e regional. Fonte: modificado de Weiss (2001).....	44
Figura 3.4 Desenho esquemático representando preenchimento de células-simidouro espúrias por ferramentas de pré-processamento. Adaptado de ArcMap 10.1. ....	45
Figura 3.5 Desenho esquemático representando a geração de um Mapa de Direção de Fluxo à partir de um Modelo Digital de Elevação. Adaptado de Arcmap 10.1. ....	46
Figura 3.6 Desenho esquemático representando a geração de um Mapa de Acumulação de Fluxo a partir de um Mapa de Direção de Fluxo. Adaptado de Arcmap 10.1.....	46
Figura 3.7 Diferentes tipos de terminação de refletores sísmicos em uma seção sísmica idealizada. Fonte: traduzida de Mitchum Jr. et al. (1977). ....	48
Figura 3.8 Tipos de configuração interna de refletores sísmicos. ....	50
Figura 3.9 Tipos mais comuns de refletores sísmicos progradantes. ....	51



Figura 3.10 Exemplos de refletores sísmicos com padrão caótico de reflexão e sem reflexão. Fonte: traduzida de Mitchum et al. (1977).	52
Figura 3.11 Formas externas de unidades de fácies sísmicas: camadas horizontais, onduladas, cunhas e lentes. Fonte: traduzida de Mitchum et al. (1977).	53
Figura 3.12 Formas externas de unidades de fácies sísmicas: alguns tipos de montes submarinos. Fonte: Mitchum et al. (1977)	54
Figura 3.13 Formas externas de unidades de fácies sísmicas: alguns tipos formas de preenchimento. Fonte: traduzida de Mitchum et al. (1977).	54
Figura 4.1 a) Modelo Digital Batimétrico “LEPLAC”. b) Mapa de localização dos dados acústicos utilizados na geração do MDB “LEPLAC”. Fonte: Alberoni <i>et al.</i> (2019).	56
Figura 4.2 Localização dos dados acústicos utilizados para balisar a interpolação dos dados de batimetria predita por satélite. Fonte: Tozer <i>et al.</i> (2019).	58
Figura 4.3 Mapa de localização das batimetrias de referência utilizadas no controle de qualidade dos MDBs LEPLAC e SRTM 15+ V 2.0. Perfil A-B indica localização da Figura 4.4.	59
Figura 4.4 Etapas do processamento dos dados de batimetria monofeixe utilizando o software <i>Cloud Compare</i> . a) Nuvem de pontos bruta; b) Nuvem de pontos filtrada manualmente; c) Nuvem de pontos filtrada por filtro estatístico após filtragem manual; d) Feições interpretadas a partir da nuvem de pontos. Localização indicada no mapa da Figura 4.3.	62
Figure 5.1 Adapted Recommended Workflow for Analysis of Bathymetric Surfaces. Blue Boxes represent the steps executed by the scientific community (UFSC and IOUSP). Green box represents the step taken by the LEPLAC team.	67
Figure 5.2 Location Map of the Reference Data	69
Figura 5.3 Multiseries Plot of the Samples "LEPLAC Vertical Uncertainty", "Updated LEPLAC Vertical Uncertainty" and "SRTM15+ V 2.0 Vertical Uncertainty", in percentage of the reference data depth.	72
Figure 5.4 Vertical Uncertainty Map of the LEPLAC DBM and identified Artifacts.	73
Figure 5.5 Bathymetric profiles depicting Artifacts 1 and 2 in the LEPLAC DBM. Profiles located in Figure 5.4.	73
Figure 5.6 Difference Surface Map between the Updated and the former LEPLAC DBM.	74

Figure 5.7 Difference Surface Map between the Updated LEPLAC DBM and the SRTM15+ V 2.0 DBM. .... 75

Figure 6.1 Location map of the study area. Bathymetric and CHIRP datasets acquired by Alpha Crucis Oceanographic Vessel, multichannel seismic datasets provided by the National Agency of Oil, Gas and Biofuels (ANP), seismogenic events compiled by the Brazilian Seismographic Network (2022) and transcurrent salt faults mapped by Meisling et al. (2001). Black lines represent the Western and Eastern Corridors mapped by Dos Reis *et al.* (2013). 82

Figura 6.2 General flowchart of the research. .... 86

Figure 6.3 A) Map of the non-validated TBDEM-derived valley network superposed by the geographic location of reference data used to validate and classify the streams. Point features represents the geographic location of valley features already identified in literature. White and yellow dashed lines represent the geographic location of the newly-interpreted multiscale seismic data. Blue lines represent the TBDEM-derived valleys prior to validation. Red lines represent the deleted TBDEM valley artifacts. B) Map of validated TBDEM-derived valleys and its geological significance interpreted from multiscale seismic data. Blue lines represent the validated valleys, blue dashed lines represent the inferred valley stretches that are interpreted to have been eroded away and reworked by contour currents. Triangles and colored lines represent the interpreted geological controls of each validated valley, interpreted from the seismic lines and literature data shown in A). Transcurrent halokinetic faults from Meisling *et al.* (2001). NRSI: Natural Resources Satellite Imagery (Landsat 8 under Google Earth environment)..... 94

Figure 6.4 Examples of the different CHIRP data expressions of the validated TBDEM-derived streams, located in the map. Pink lines feature incised-infilled channels and green triangles features channel and canyon-like features. A) Incised-infilled channel in the inner continental shelf with no local occurrence of bathymetric low; B) Incised-infilled channel complex in the mid continental shelf, featuring a complex of bathymetric lows above it; C) Canion-like features in the upper continental slope, with no significant sound wave penetration due to wave properties and water depth. .... 96

Figure 6.5 Map of validated TBDEM-derived streams in the continental area by High Resolution Satellite Imagery observation. A) Present-day continental streams that correspond to the mapped streams in the Southern subbasin; B) Present-day continental streams that correspond to the mapped streams in the Central and Northern subbasins. Imagery: Landsat 8 in Google Earth environment. .... 98

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Principais parâmetros geomorfométricos geométricos .....	41
Table 5.1 Spatial Resolution of the Dataset Used in the Present Work. ....	70
Table 5.2 Statistical Summary of the Vertical Uncertainties between the analyzed DBMs and Reference Data, in percentage.....	71
Table 6.1 Descriptive statistics of the vertical uncertainties of the Digital Topobathymetric Model compared to the reference data.....	90
Table 6.2 Main features of the present-day TBDEM-derived catchments in Northern Santos Basin. CSh: Continental Shelf; UCSI: Upper Continental Slope; LCSl: Lower Continental Slope; MTD: Mass Transport Deposit.....	93

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

C	Continente
PC	Plataforma Continental
TC	Talude Continental
SC	Sopé Continental
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDB	Modelo Digital Batimétrico
MDTB	Modelo Digital Topobatimétrico
IVT	Incertezas Verticais Totais
RVI	Rede de Vales Interconectados
SDS	Santos Drift System
TIN	Triangular Irregular Net
IPB	Índice de Posição Batimétrica
IPT	Índice de Posição Topográfica
BTM	Benthic Terrain Modeler
VLS	Velocidade Local do Som
CSh	Continental Shelf
ICSh	Inner Continental Shelf
ImCSh	Intermediate Continental Shelf
OCSH	Outer Continental Shelf
CSl	Continental Slope
UCSl	Upper Continental Slope
LCSl	Lower Continental Slope

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>24</b>
1.1	PERGUNTAS DE PESQUISA .....	26
1.2	HIPÓTESE .....	27
1.3	OBJETIVO GERAL .....	27
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	27
1.5	FORMATO DA DISSERTAÇÃO .....	27
<b>2</b>	<b>ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>29</b>
2.1	EVOLUÇÃO TECTÔNICA.....	29
2.2	GEOMORFOLOGIA .....	33
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>37</b>
3.1	MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO.....	37
3.2	GEOMORFOMETRIA .....	39
<b>3.2.1</b>	<b>Parâmetros do relevo.....</b>	<b>40</b>
<b>3.2.2</b>	<b>Parâmetros e objetos de relevo em hidrologia .....</b>	<b>44</b>
3.3	SISMOESTRATIGRAFIA.....	47
<b>3.3.1</b>	<b>Sequência sísmica .....</b>	<b>47</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Fácies sísmicas.....</b>	<b>49</b>
3.3.2.1	<i>Configuração interna dos refletores.....</i>	50
3.3.2.2	<i>Forma externa .....</i>	52
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>55</b>
4.1	ANÁLISE DOS MODELOS DIGITAIS BATIMÉTRICOS.....	55
<b>4.1.1</b>	<b>LEPLAC .....</b>	<b>55</b>
<b>4.1.2</b>	<b>SRTM 15+ V 2.0.....</b>	<b>57</b>
4.2	Batimetrias de referência .....	58
<b>4.2.1</b>	<b>Batimetria Multifeixe .....</b>	<b>59</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Batimetria Monofeixe.....</b>	<b>61</b>

<b>5</b>	<b>ARTIGO PUBLICADO DURANTE O EVENTO “17th Brazilian Symposium of Geophysics (SBGf)”: COMMUNITY-BASED IMPROVEMENT OF THE DIGITAL BATHYMETRIC MODEL “LEPLAC”</b> .....	<b>63</b>
5.1	INTRODUCTION .....	65
5.2	METHOD .....	66
<b>5.2.1</b>	<b>Recommended Workflow for Analysis of Bathymetric Surfaces</b> .....	<b>66</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Quantitative and Qualitative Analysis Tools</b> .....	<b>67</b>
5.2.2.1	<i>Statistical summary and Histograms</i> .....	67
5.2.2.2	<i>Regression Analysis and Calculation of Correlation Coefficient</i> .....	68
5.2.2.3	<i>Vertical Uncertainty Map</i> .....	68
5.2.2.4	<i>Bathymetric Profile Graphs</i> .....	68
5.2.2.5	<i>Difference Surface Maps</i> .....	69
<b>5.2.3</b>	<b>Reference Data</b> .....	<b>69</b>
5.3	RESULTS .....	70
<b>5.3.1</b>	<b>Statistical Summary of the Differences between the assessed DBMs and the Reference Data</b> .....	<b>70</b>
<b>5.3.2</b>	<b>Artifacts Identification</b> .....	<b>72</b>
<b>5.3.3</b>	<b>Update and Reassessment of the LEPLAC DBM</b> .....	<b>74</b>
<b>5.3.4</b>	<b>Advances Brought by the LEPLAC DBM to the Southeastern Margin of Brazil</b> <b>74</b>	
5.4	CONCLUSIONS .....	76
<b>6</b>	<b>ARTIGO SUBMETIDO À REVISTA “GEO MARINE LETTERS”: TBDEM-derived network of valleys in North Santos Basin and it’s geological expression</b> <b>77</b>	
6.1	INTRODUCTION .....	79
6.2	GEOLOGICAL SETTING .....	81
6.3	PHYSIOGRAPHY AND SHALLOW STRATIGRAPHY .....	83
6.4	DATABASE AND METHODS .....	85
6.5	RESULTS .....	90

<b>6.5.1</b>	<b>Quality Assessment of the Digital Topobathymetric Model.....</b>	<b>90</b>
<b>6.5.2</b>	<b>TBDEM-derived streams .....</b>	<b>93</b>
<b>6.6</b>	<b>DISCUSSION.....</b>	<b>101</b>
<b>6.7</b>	<b>CONCLUSION .....</b>	<b>103</b>
<b>7</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>105</b>
<b>8</b>	<b>CONTIBUIÇÕES CIENTÍFICAS .....</b>	<b>107</b>
<b>9</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>108</b>
<b>10</b>	<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>109</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>110</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As bacias da margem Sudeste brasileiras hospedam as maiores reservas de petróleo do país e, por isso, vem sendo principal objeto de estudo de empresas do setor de óleo e gás nas últimas quatro décadas (DUARTE; VIANA, 2007). Desde a realização das primeiras seções sísmicas de refração que identificaram as bacias no fim da década de 60 (EWING; LEYDEN; EWING, 1969), diversas abordagens foram utilizadas para alcançar o entendimento que se tem, atualmente, em relação à essas bacias, com foco principal na prospecção de alvos exploratórios de hidrocarbonetos. Tais abordagens são, principalmente, caracterização litoestratigráfica (OJEDA, 1982), tectono-estrutural (CHANG; KOWSMANN, 1987; MACEDO, 1989, 1990; MOHRIAK; MACEDO; CASTELLANI, *et al.*, 1995; MEISLING; COBBOLD; MOUNT *et al.*, 2001) e estratigráfica-sedimentar (PEREIRA; MACEDO, 1990; PEREIRA, 1994; MODICA; BRUSH, 2004; DUARTE; VIANA, 2007). A caracterização regional geomorfológica das bacias da margem sudeste do Brasil, em especial a Bacia de Santos, apesar de ser de suma importância para a compreensão dos controles da compartimentação fisiográfica dessa região do país, evolução paleoceanográfica recente e desenvolvimento de projetos de engenharia submarina, é menos abundante na literatura do que as abordagens citadas anteriormente. Atualmente, o conhecimento da geomorfologia dessas bacias se apoia nos trabalhos de Zemruski & Chaves (1979), Mahiques & Souza (1999), Artusi & Figueredo (2006), Conti & Furtado (2006) Conti (2009), Conti & Furtado (2009), Maia *et al.* (2010), Dos Reis & Silva (2013), Marino *et al.* (2013), Lopes *et al.* (2013), Friederichs *et al.* (2013), para a Plataforma Continental (PC); e nos trabalhos de Zemruski, 1979, Viana & Faugeres (1998), Duarte e Viana (2007), Viana *et al.* (2012), Coelho (2014), Schattner *et al.* (2019), Ramos *et al.* (2020) e Mahiques *et al.* (2022) para Talude Continental (TC).

A utilização de drenagens (vales) extraídas a partir de Modelos Digitais de Elevação (MDE) para prospecção e delimitação de paleocanais associados à paleorede de drenagem fluvial na porção submersa da Bacia de Santos é encontrada nos trabalhos de Artusi & Figueiredo (2006), Conti & Furtado (2006) Conti (2009), Conti & Furtado (2009). Apesar de pioneiros e de suma importância tanto para ampliação do conhecimento sobre a ferramenta, quanto para o conhecimento geomorfológico da bacia, são, em via de regra, restritos à plataforma continental e não abrangem o talude continental e Platô de São Paulo..



Ao contrário de áreas Continentais (C), no caso de bacias sedimentares submersas, a interpretação das drenagens delimitadas a partir de Modelos Digitais Batimétricos (MDB) e, principalmente, correlação com a paleodinâmica hidrológica e fluvial não é direta. Isso pois, geralmente, essa Rede de Vales Interconectados (RVI) derivado de MDB representam, na verdade, estruturas palimpsestas, como interpretado por Harris et al. (1996) e Francis et al. (2014). Estruturas palimpsestas são associadas à paisagem palimpsestas, onde as diferentes formas de relevo e feições geomorfológicas observadas não são formadas no mesmo intervalo de tempo geológico, sendo algumas muito recentes (formadas atualmente/ estruturas ativas) e outras mais antigas (formadas por condições climáticas e/ ou processos que não atuam ou não predominam atualmente) (BLOOM, 2002). Na Plataforma Continental, as estruturas que representariam a paleorede de drenagens referente ao último episódio de máxima exposição subaérea encontram-se retrabalhadas e recobertas em diferentes níveis, resultado da última transgressão marinha, episódios de oscilação do nível do mar de mais alta frequência e ação de correntes de fundo (CONTI; FURTADO, 2006; CONTI, 2009; MAIA et al., 2010; DOS REIS et al., 2013). Já no Talude Continental, os entalhes que outrora recebiam sedimentos dos paleocanais plataformais e serviam de corredores de transposição (*by-pass*) sedimentar entre PC e Sopé Continental (SC), perdem sua conexão com fontes sedimentares continentais após afogamento da plataforma que culminou na linha de costa atual. Ainda, TC e SC estão sujeitos à intenso retrabalhamento por episódios de ruptura de pacote sedimentar e ação de intensas correntes de contorno (e.g. COELHO, 2014; DUARTE; VIANA, 2007). Por último, a direta interpretação da RVI como equivalente à paleorede de drenagem fluvial de uma bacia sedimentar submersa também é prejudicada pela, geralmente, menor qualidade (resolução espacial e amostral), quando comparado a áreas continentais.

Apesar do exposto, mesmo sem necessariamente haver correlação direta entre a RVI presente atualmente em bacias sedimentares submersas e seus respectivos paleoregimes fluviais, este produto pode sim estar associado à paleorede de drenagens, como demonstraram Conti & Furtado (2006), Conti (2009) e demais citados anteriormente. Para tal, se faz necessário o cruzamento dos dados batimétricos e da RVI com dados sísmicos, de forma a se observar o controle estratigráfico dos vales que se interconectam, como no caso dos trabalhos mencionados. Ainda, a RVI, principalmente quando validada e caracterizada sismoestratigraficamente, é um produto promissor para outras importantes aplicações, como por exemplo: mapeamento de compartimentos geomorfológicos, bem como falhas e contatos

geológicos (PROUD'HOMME, 1972) e mapeamento dos corredores preferenciais de transferência de sedimentos entre áreas rasas (C e PC) e áreas profundas (TC e SC), conforme interpretado por Francis et al. (2014).

No tocante à Bacia de Santos, as aplicações mencionadas representam especial importância, visto que essa, assim como as demais bacias da margem sudeste, apresenta evidências de movimentação tectônica nos dias atuais, caracterizada pelo registro de dezenas de eventos sísmicos significativos nas últimas décadas (BOLETIM DO CATÁLOGO BRASILEIRO – SISBRA, 2022; ASSUMPÇÃO *et al.*, 2011; MESLING; COBBOLD; MOUNT, 2001). Tais sísmicos são ainda pouco estudados, porém foram interpretados por Meisling et al. (2001) e referências por ele citadas como sendo consequência da acomodação eustática do sal em resposta ao aporte sedimentar subjacente e eventos relacionados à neotectônica compressional Andina. Dessa forma, a identificação de possíveis falhas que influenciem a morfologia do fundo marinho, assim como a delimitação dos principais corredores de transferência sedimentar por gravidade entre áreas mais rasas e mais profundas é de suma importância para a manutenção e instalação de obras de engenharia para suporte a empreendimentos em águas profundas e ultra profundas.

Dentro desse contexto, o presente trabalho visou mapear a Rede de Vales Interconectados extraídos a partir de um Modelo Digital Topobatimétrico (MDTB) que engloba a porção Norte da Bacia de Santos (porção submersa e áreas continentais adjacentes) e correlacionar esse produto à dados de sísmica multiescala (fonte monocanal CHIRP e multicanal *post-stack* migrada), de forma a determinar os possíveis controles geológicos e oceanográficos locais dos vales mapeados.

## 1.1 PERGUNTAS DE PESQUISA

- a) Qual melhor Modelo Digital Batimétrico regional para delimitação geomorfométrica de drenagens existentes na margem sudeste do Brasil?
- b) Onde estão localizados atualmente os principais caminhos preferenciais de transporte sedimentar (RVI) via gravidade (*across shore sediment pathways*) entre C e o SC na Bacia de Santos?
- c) Quais os controles geológicos e oceanográficos locais desses vales?

## 1.2 HIPÓTESE

A hipótese que conduz este trabalho é que é possível identificar, ao menos parcialmente, as estruturas relictas e eventos geológicos que controlam a arquitetura da RVI que conecta a porção continental da Bacia de Santos ao platô de São Paulo. Espera-se que esses controles variem tanto lateralmente, quanto em profundidade, resultado dos episódios de variação eustática do nível do mar, reativação tectônica de estruturas do embasamento, tectônica salina e ações de correntes de fundo, resultando em uma paisagem palimpsesta.

## 1.3 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho apresenta o mapeamento e interpretação dos controles estruturais e sedimentológicos da Rede de Vales Interconectados entre o Continente e o Sopé Continental impressos na topobatimetria atual da Bacia de Santos, de forma a prover informações a respeito da evolução geomorfológica da bacia.

## 1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Comparação entre o Modelo Digital Batimétrico “LEPLAC” e o Modelo Digital Batimétrico “SRTM 15+ V2.0”;
- b) Geração de Modelo Digital Topobatimétrico para costa sudeste do Brasil e avaliação de suas Incertezas Verticais para sua porção batimétrica;
- c) Delimitação da Rede de Vales Interconectados que conecta a parte Continental da Bacia de Santos ao Platô de São Paulo a partir do MDTB gerado;
- d) Validação da RVI extraídas do MDTB e interpretação da sua expressão sísmica em subsuperfície;

## 1.5 FORMATO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação apresentará o artigo “*Community-based Improvement of the Digital Bathymetric Model “LEPLAC” in Southeastern Brazil*” apresentado no *17th International Congress of the Brazilian Geophysical Society* para explicar a metodologia e resultados referentes à comparação entre os Modelos Digitais Batimétricos “LEPLAC” e “SRTM 15+ V2.0” (1.4 item “a”). A metodologia, resultados e conclusões do restante do trabalho será apresentada no artigo “*TBDEM-derived streams in North Santos Basin and it’s geological significance*”, submetido à revista *Geo-Marine Letters*.

## 2 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo é localizada no Oceano Atlântico Sul e abrange as bacias de Santos e Campos, entre as latitudes  $-19^\circ$  e  $-28^\circ$  e longitudes  $-38^\circ$  e  $-46^\circ$  (Figura 2.1). Estende-se entre as cotas altimétricas de 1200 m e isóbata de 2800 m, com área de 314.851 km<sup>2</sup>, entre o Continente e o Platô de São Paulo (Sopé Continental).

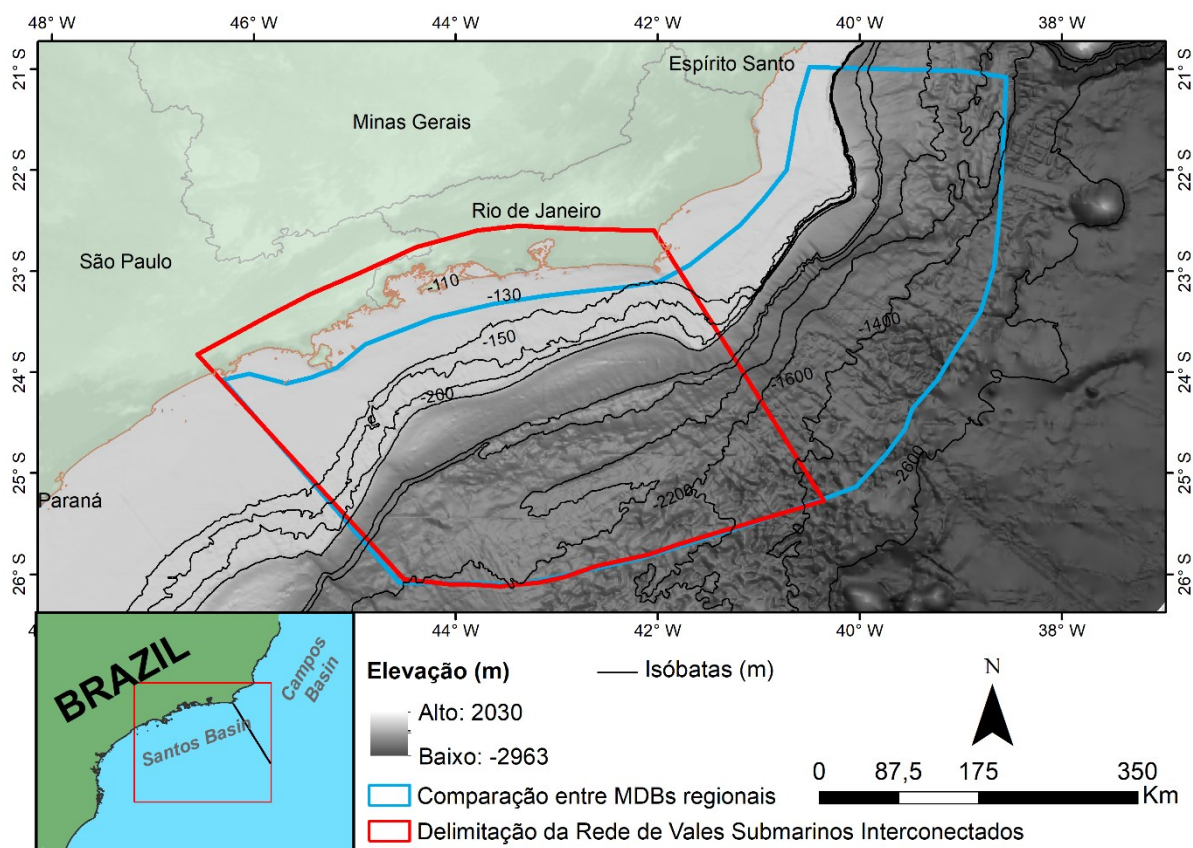


Figura 2.1 Mapa de localização da área de estudo. Fonte da superfície batimétrica: LEPLAC. Fonte da superfície topográfica: ETOPO 1

### 2.1 EVOLUÇÃO TECTÔNICA

As bacias da margem continental sudeste brasileira hospedam as principais reservas de petróleo do país e vem sendo foco de atenção da indústria petrolífera há pelo menos 20 anos (DUARTE; VIANA, 2007). As bacias – Espírito Santo, Campos, Santos e Pelotas – se desenvolveram sobre o contexto geológico de núcleos cratônicos paleoproterozoicos amalgamados ao longo de faixas móveis durante a Orogênese Brasileira/ Panafricana (0,95 –

0,50 Ga), caracterizado por estilo estrutural predominante transpressivo de transporte dextral. Seus desenvolvimentos durante o Jurássico – Cretáceo inferior foram fortemente influenciados pela geometria e heterogeneidades do embasamento Neoproterozoico, expresso por estruturas de direção principal NE-SW e NNE-SSW (SCHALLER, 1973; ALMEIDA; BRITO NEVES; FUCK, 1981; CHANG et al., 1992;). Estruturas de direção NW-SE também ocorrem e são associadas a falhas de transferência (COBBOLD; MEISLING; MOUNT, 2001 e MEISLING; COBBOLD; MOUNT., 2001), importantes atrizes na determinação e estruturação dos depocentros em bacias de margem continental (GIBBS, 1984).

De maneira geral, essas bacias passaram pela fase rifte, entre os estágios Hauteviano e Barremiano, seguido por uma fase transicional caracterizada por extensa camada evaporítica durante o Aptiano e desde então encontram-se no estágio marinho – *drift* (DUARTE; VIANA, 2007; PEREIRA; MACEDO, 1990). Esse rifteamento foi iniciado de sul para norte, na porção mais austral da atual África do Sul, no Triássico superior – Jurássico inferior (220 – 200 Ma) (DUARTE; VIANA, 2007; SZATMARI et al., 1985). Apesar de ainda controversa, a abertura do Oceano Atlântico Sul é interpretada como sendo fruto de afinamento crustal por estiramento litosférico, seguido de subsidência estimulada pela atividade térmica do *hotspot* Tristão da Cunha e Santa Helena (SZATMATI et al., 1985; ROYDEN; KEEN, 1980; MCKENZIE, 1978). O *underplating* magmático durante o estiramento litosférico foi responsável pelo soerguimento regional, condicionando parte da deposição da seção pré-rifte. A diminuição da atividade magmática resultou na terceira fase de subsidência, dessa vez por resfriamento (MEISLING; COBBOLD; MOUNT, 2001).

Durante o rifteamento do Supercontinente Gondwana, importantes zonas de transferência foram desenvolvidas, sendo essas as zonas de transferência Rio de Janeiro, Curitiba e Florianópolis. A primeira está situada na passagem da Bacia de Santos para a Bacia de Campos; a segunda divide a Bacia de Santos em dois setores: Norte e Sul; a terceira separa a Bacia de Santos da Bacia de Pelotas, a sul (DUARTE; VIANA, 2007; COBBOLD; MEISLING; MOUNT, 2001).

Chang *et al.* (1992) dividem estratigraficamente as bacias de margem leste brasileiras em cinco Megassequências (Figura 2.2): *Continental (Sin-Rifte)*, *Transicional Evaporítica*, *Plataforma Carbonática Rasa*, *Marinha Transgressiva* e *Marinha Regressiva*. Essas Megassequências, são separadas por inconformidades regionais, exceto pela passagem da fase

evaporítica para a fase carbonática de água rasa, que ocorre de forma transicional (GUARDADO; GAMBOA, LUCCHESI, 1990).

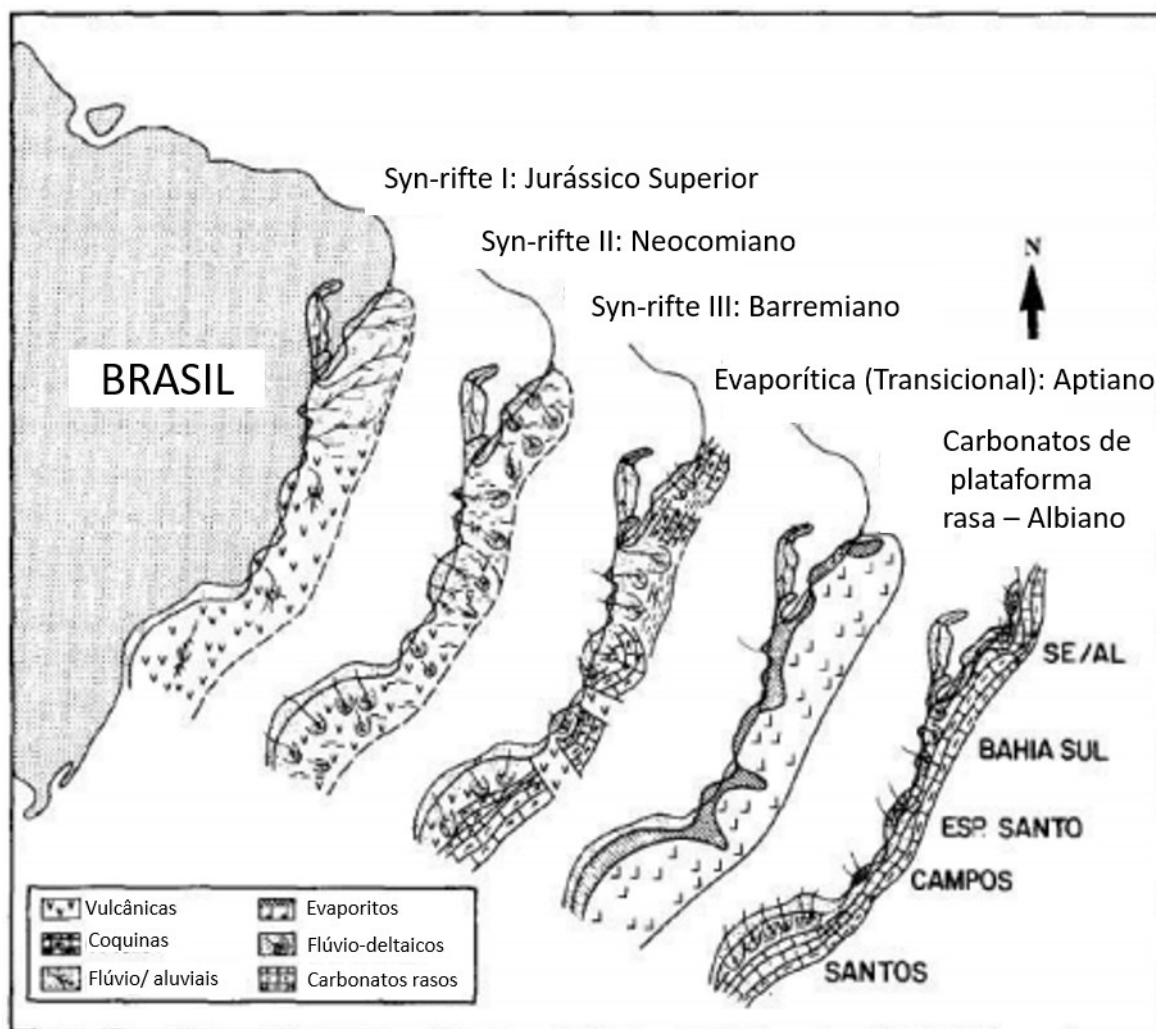


Figura 2.2 Reconstrução paleogeográfica esquemática das sequências Continental, Transicional Evaporítica e Plataforma Carbonática. Fonte: Chang et al. (1992).

A *Megassequência Continental* (MC) é dividida em três sequências, denominadas *Sequência Syn-rifte I*, *Sequência Syn-rifte II* e *Sequência Syn-rifte III*. As rochas da Seq. I são encontradas apenas nas bacias de Camamu Almada, Recôncavo-Tucano e Sergipe Alagoas. São interpretadas como depósitos fluviais, leques aluviais e arenitos eólicos de idade neojurássica. A Seq. II é constituída por rochas vulcânicas e rochas representativas de depósitos lacustres, resultantes de distensão crustal acelerada associada a meio grábens. A Seq. III é marcada por

sedimentação predominantemente fluvio deltaica, lacustre e de leques aluviais, com sedimentação de coquinas sobre altos estruturais.

A *Megassequência Transicional Evaporítica* (MTE) foi depositada durante o Aptiano durante período de relativa quiescência tectônica – fase *sag* – sobre a discordância Pré Aptiana Superior, que limita o topo da Megassequência Continental (DIAS, 2005). Consiste de depósitos associados a mar continental restrito a depósitos continentais. A cadeia vulcânica de direção E-W, conhecida como Dorsal de São Paulo, restringiu topograficamente a circulação d'água nas bacias da margem sudeste brasileira (KUMAR; GAMBOA, 1979). A entrada intermitente de água salgada e constante evaporação resultou na geração de águas hipersalinas e precipitação de extensas camadas evaporíticas. A sedimentação carbonática e de leques aluviais também é significativa, possivelmente possibilitada por extensa topografia rasa e condições de hipersalinidade d'água. Também são encontrados depósitos turbidíticos, que ocorrem em duas principais formas: canalizados, controlados pelas minibacias associadas à halocinese; e em lençol.

A *Megassequência Plataforma Carbonática Rasa* (MPCR) caracteriza o início do estágio marinho franco – *drifte* – depositado durante o Albiano. É caracterizada por uma plataforma carbonática extensa, comum a todas as bacias da margem leste do Brasil. De acordo com o modelo de Spadini *et al.* (1988), essa Megassequência seria uma rampa carbonática típica, que posteriormente foi deformada pela halocinese, controlando a distribuição faciológica dos carbonatos de água rasa e bancos de oólitos e oncolitos. É marcada por uma plataforma que alterna sucessões de trato de mar alto – caracterizado por deposição de carbonatos de alta energia – e tratos de sistema transgressivo – deposição de carbonatos de mais baixa energia.

A *Megassequência Marinha Transgressiva* foi depositada entre o final do Albiano e o Maastrichiano. É consequência de um progressivo afundamento da bacia, estimulada pela subida eustática global do nível do mar. Esse evento transgressivo resultou no afogamento da plataforma carbonática, associado a deposição de sedimentos de baixa energia, como folhelhos, margas e calcilutitos.

Por fim, a *Megassequência Marinha Regressiva* (MMR) é consequência da constante descida do nível do mar até o que se observa nos dias atuais. É caracterizada pela ocorrência de sucessões flúvio-deltaicas, com a ocorrência de leques deltaicos, plataformas siliciclásticas e turbiditos.



## 2.2 GEOMORFOLOGIA

A fisiografia da Bacia de Santos foi descrita pela primeira vez por Zemruski (1979), que definiu as principais províncias (PC, TC e Platô de São Paulo) e mapeou as feições geomórficas mais conspícuas em um mapa em escala 1:3500000. A associação da janela do Pleistoceno ao Holoceno aos controles na topografia de baixa frequência da plataforma foi discutida pela primeira vez por Kowsmann et al. (1977), que identificou evidências de preenchimento de canal, nivelamento topográfico e redeposição. No entanto, a estratigrafia sísmica do Pleistoceno ao Quaternário (~300 ms) da plataforma continental seria formalmente caracterizada apenas cerca de 4 décadas depois por Maia et al. (2010), como tal tem influência na topografia de alta frequência da plataforma continental (Dos Reis et al. 2013).

Maia *et al.* (2010) identificaram 2 conjuntos principais de sequências sísmicas, Conjunto I (SqA-SqC) e Conjunto II (Sq1-Sq5), interpretados como uma sucessão de sequências deposicionais e superfícies erosivas induzidas por ciclos glacioeustáticos repetidos dentro da janela Plio-Quaternária. Correlação entre os dados do autor e as “curvas de nível do mar” isotópicas de  $\delta^{18}O$  apresentadas por Rabineau *et al.* (2006) sugeriram que as sequências Sq1-Sq4 são sequências de regressão forçada de quarta ordem que registram ciclos glacioeustáticos de 100-120 kyr para os últimos 440-500 kyr, enquanto a unidade mais rasa Sq5 corresponderia à deposição transgressiva e de nível alto durante o Holoceno. A interpretação arquitetônica das Sequências Sq4 e S5 de Maia *et al.* (2010) foi revisada e reinterpretada por Dos Reis *et al.* (2013) com base em perfis CHIRP de alta resolução (Figura 2.3). Os autores interpretaram Sq4 como um trato de sistema de mar alto em *overlap* por uma superfície formada por regressão forçada durante os estágios MIS 3 e MIS 2. Por outro lado, Sq5 é por eles interpretada como uma camada siliciclástica transgressiva, que cobre toda a plataforma até a isóbata de 150 m, sendo o produto da última deposição gradual do Pleistoceno-Holoceno resultante da última glaciação. Além disso, os padrões de preenchimento de incisão fluvial generalizados reconhecidos no setor de plataforma oeste da bacia de Santos na Sq4 e a ocorrência de espessamento da Sq5 neste mesmo local indicam fornecimento de sedimentos relativamente maior para este setor após o Último Máximo Glacial (~20 kyr). Na plataforma interna, Sq5 é expressa como feições prismáticas nas isóbatas de 20, 30 e 40 m da Baía de Guanabara e degraus de maior gradiente alongados e lateralmente descontínuos nas isóbatas de 50, 60 e 70 m.

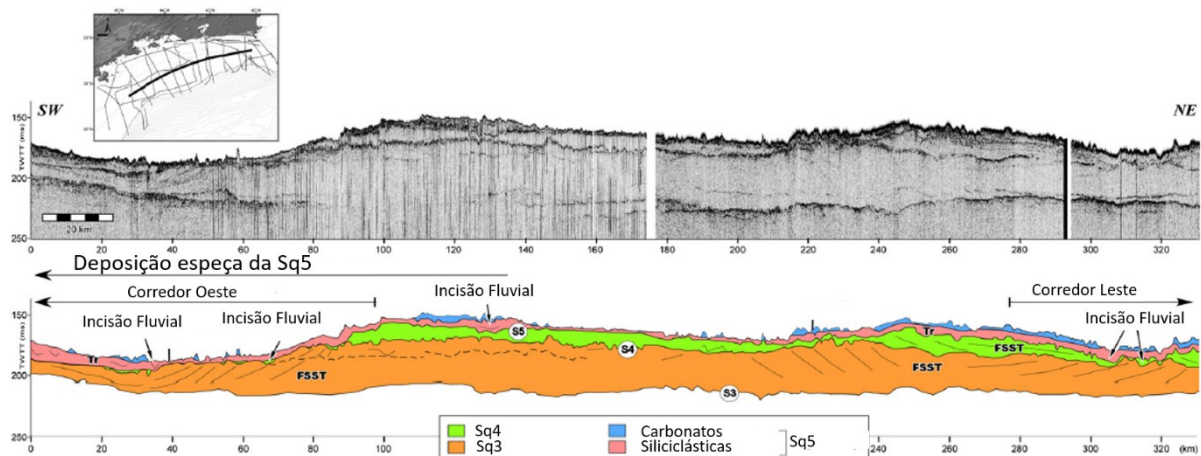


Figura 2.3 Perfil strike de dados de CHIRP (0,5 - 5.5 kHz; acima) e perfil interpretativo esquemático (abaixo) na Plataforma Continental da Bacia de Santos. Redução da espessura das sequencias Sq3 e Sq4 nos corredores plataformais evidenciam significativa erosão que resultam em depressões alongadas que cortam a porção Intermediária e Externa da Plataforma Continental. Tr: Unidades Transgressivas; FSST: Trato de Sistema de Mar Baixo; S3-S5: Incondormidades. Modificado de Dos Reis *et al.* (2013)

Dos Reis *et al.* (2013) também identificaram 3 grandes escarpas regionais que coincidem com as isóbatas de 110, 130 e 150 m (Figura 2.4). A isóbata de 100 m apresenta uma clara transição de estilos morfológicos de escala regional no atual fundo oceânico da plataforma continental, limitando as plataformas interna e média para externa. É marcado pela presença de um degrau de fundo marinho de alto gradiente ( $0,2^\circ$ ) que divide a morfologia lisa e lobada em direção à terra da morfologia “*step-like*” em direção à bacia. Entre o Continente e a isóbata de 100 m, a morfologia da plataforma é lobada e lisa, interpretada como a impressão da deposição de nível alto da Sq4, apresentando uma sucessão de 9 corpos sedimentares alongados a semicirculares aproximadamente nas isóbatas 20/30, 40/50 e 60/70, especialmente nas baías da Ilha Grande, Sepetiba e Guanabara. A partir da isóbata de 100 m até a quebra da plataforma (média de 170 m na área de estudo), o gradiente da plataforma diminui para cerca de  $0,023^\circ$  a  $0,051^\circ$ , e o fundo do mar apresenta 3 grandes escarpas regionais ao longo das plataformas média e externa.

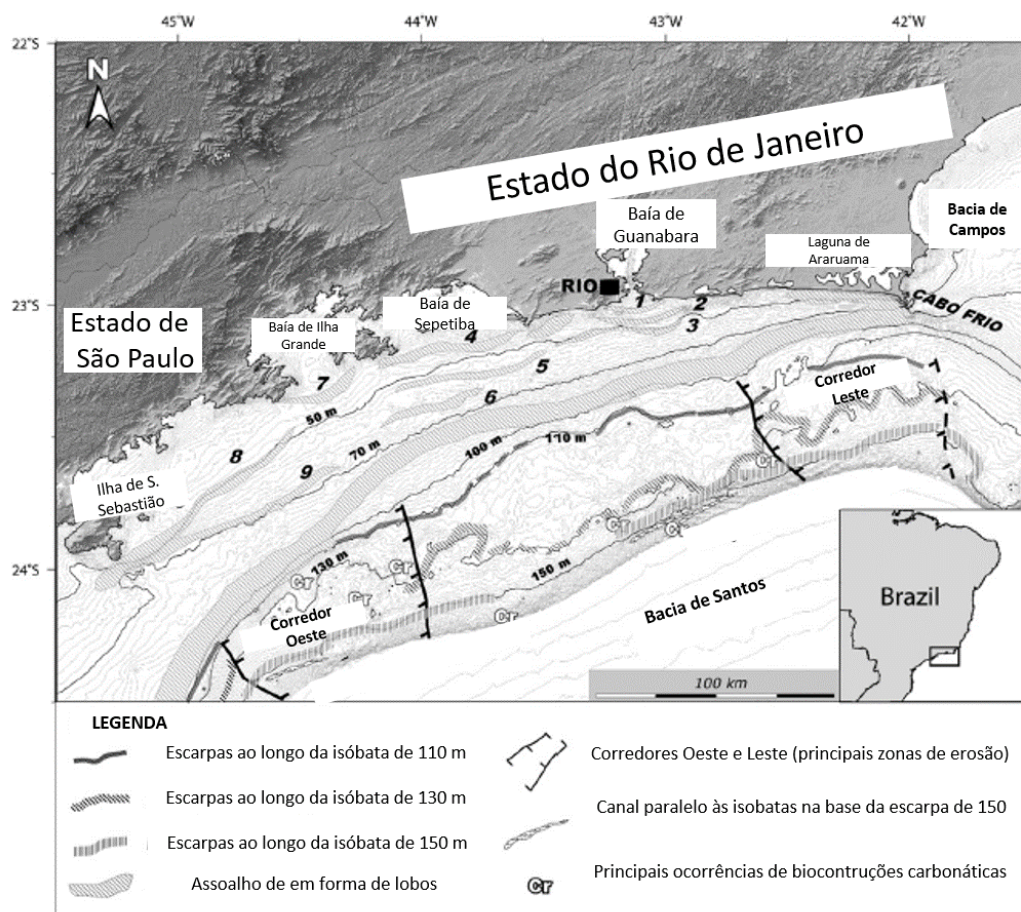


Figura 2.4 Principais feições geomorfológicas mapeadas por Dos Reis *et al.* 2013. (Modificado)

Essas escarpas em forma de degraus são interpretadas como relacionadas à migração em direção à bacia das linhas costeiras do Pleistoceno Superior ao longo da plataforma continental, formadas em um cenário regressivo sob oscilação e queda relativa do nível do mar durante o último ciclo glacial. Os degraus apresentam características semelhantes a terraços bastante contínuos localizados nas isóbatas de 110, 130 e 150 m. A escarpa da isóбата de 110 m é interpretada como impressão erosiva de cunhas regressivas forçadas escalonadas; a escarpa de 130 m é interpretada como registro da posição da linha de costa durante o Último Máximo Glacial; e a escarpa da isóбата de 150 m é interpretada como uma resposta erosiva à migração da Corrente do Brasil em direção à PC, resultante da elevação do nível do mar durante a última transgressão marinha (Dos Reis *et al.*, 2013). Os autores também identificaram duas principais depressões alongadas de orientação NW-SE na plataforma continental meio-externa,

denominadas Corredores Oeste e Leste, interpretadas como zonas de maior erosão fluvial da sequência Sq4. Os corredores parecem desempenhar um papel no controle da sinuosidade e continuidade lateral das escarpas acima mencionadas, sugeridas pelo traçado mais sinuoso das escarpas -110 e -130 m dentro do Corredor Leste, e ausência total de ambas no Corredor Oeste. Outra evidência para o aumento da erosão dentro desses corredores é o padrão sísmico de incisão-preenchimento fluvial que se espalha da plataforma interna para a externa.

O papel da ação regional e de longo prazo das correntes geostróficas no controle da sedimentação e na formação da batimetria atual da bacia de Santos, principalmente no Talude Superior, desde meados do Mioceno até a margem sudeste do Brasil é bastante significativo, e é discutido nos trabalhos de Viana (2002), Duarte & Viana (2007), Schaettner *et al.* (2018), Araújo *et al.* (2021) e suas referências. O talude continental da área de estudo apresenta uma conspícua calha em forma de canal de 100 km de extensão que marca a divisão das vertentes superior e inferior, conhecida como “canal de Santos”, em torno da isóbata de 1400 m. Outra estrutura semelhante a um canal erosivo regional é vista no Planalto de São Paulo, o Canal de São Paulo. Sua gênese é interpretada como relacionada à transferência forçada para isóbatas mais profundas do eixo principal da corrente de fundo que erodiu o Canal de Santos após a reorganização da fisiografia da margem continental brasileira. Associados a esses canais estão dois grandes *drifts* contorníticos que se acumularam em resposta às diferentes combinações de posição do eixo da corrente de fundo e fisiografia da inclinação (DUARTE & VIANA, 2007; VIANA, 2002). O sistema de sedimentação composto pelos canais de Santos e São Paulo e seus *drifts* sedimentares contorníticos associados que compõe a maior parte do talude continental norte da bacia santista é denominado *Santos Drift System* (SDS), e é interpretado como resultado da ação de longo prazo das correntes geostróficas (Viana 2002; Duarte & Viana 2007).

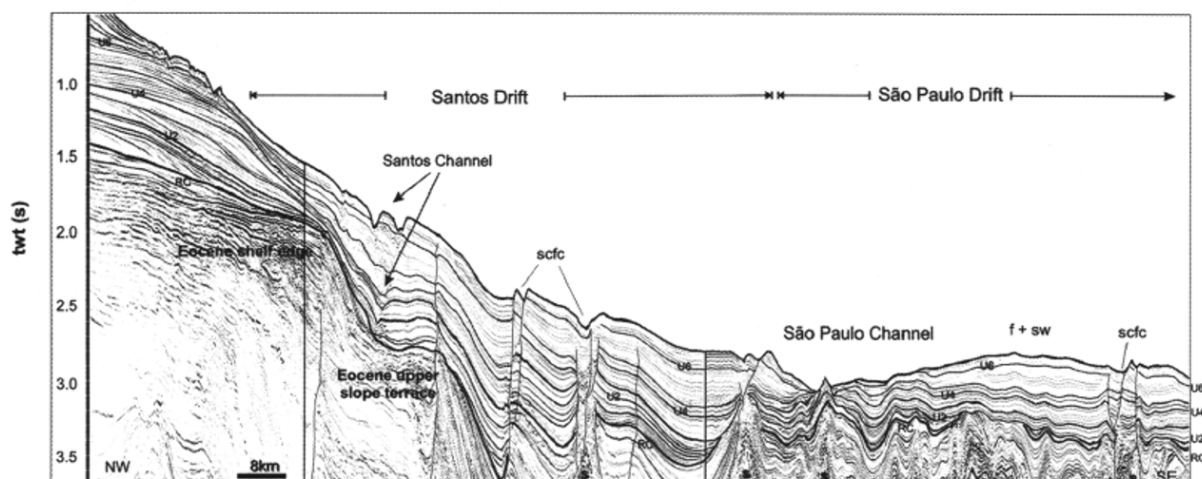


Figura 2.5 Santos Drift System. Linha sísmica interpretada cruzando a porção central da Bacia de Santos, do Talude Superior ao Platô de São Paulo. Duarte e Viana, 2007.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO

Modelos Digitais de Elevação (MDE) são representações digitais visualmente contínuas da superfície terrestre, o que significa que dados de elevação estão disponíveis em qualquer ponto da área de interesse (HENGL; GUTH, 2018). Modelos Digitais de Elevação podem representar tanto a superfície terrestre (Modelo Digital de Terreno) quanto o fundo marinho (Modelo Digital Batimétrico). Assim, à semelhança do utilizado por Pike *et al.* (2008) e Lecours *et al.* (2016), neste trabalho serão utilizados os termos Modelo Digital Batimétrico (MDB) ou superfície digital batimétrica para denominar uma grade quadrada de dados de profundidade que represente computacionalmente o fundo do mar. Os MDEs podem ser categorizados em dois grupos, considerando sua construção: regulares – ou matriciais, *grid*, *raster* – e discretos – vetoriais (RANA, 2004). Como as altitudes e/ ou profundidades devem ser acessíveis para toda a área modelada, todos os tipos de MDEs podem ser transformados em um conjunto de dados de pontos ( $x, y, z$ ).

Modelos vetoriais são geralmente utilizados quando os dados de entrada são irregularmente espaçados, apesar de também poderem ser utilizados para amostras regularmente espaçadas. São tradicionalmente construídos por triangulação dos pontos

amostrais, que envolve o cálculo de triângulos que tenham seus vértices localizados nos pontos de elevação  $(x, y, z)$  de entrada (AKIMA, 1978). O resultado é uma Rede Irregular de Triângulos, mais conhecida como TIN – *Triangulated Irregular Network*. Um TIN comumente é construído seguindo os critérios de Delaunay, em que os triângulos são posicionados de forma que estes estejam próximos à triângulos de aberturas angulares de valores similares (OKABE; BOOTS; SUGIHARA, 2001, HENGL, 2009). São vantajosos em descrever mudanças abruptas de elevação no terreno, utilizando o mesmo número de pontos utilizados em um modelo regular. Estes podem apresentar menor espaçamento entre pontos em áreas de terreno acidentado e maior espaçamento onde a variação topográfica é suave (HENGL; EVANS, 2009).

Modelos regulares – *grids* – possuem os dados de elevação topográfica armazenados em uma estrutura regular simples e absolutamente consistente em toda porção da área de estudo. Trata-se de uma matriz (grade ou *grid*) regular de dados de elevação, as quais suas coordenadas planas  $(x, y)$  podem ser calculadas *on the fly* devido ao espaçamento regular dos pontos do *grid*. Essa matriz apresenta estrutura espacial uniforme e quase todas suas propriedades podem ser descritas unicamente pelo tamanho de célula (HENGL, 2006; HENGL; EVANS, 2009). O fato de que quase todas as características de um MDE matricial podem ser descritas em função da resolução espacial é particularmente atrativa ao usuário. A resolução espacial é aqui expressa como a distância horizontal, normalmente em metros, entre dois vértices (ou centroides) de um *grid*. A escolha da resolução espacial de um *grid* é geralmente baseada na quantidade e distribuição espacial dos dados de entrada. Porém, o tamanho da área de estudos, objetivo final da análise e o poder de desempenho do computador disponível para processamento e visualização do modelo não podem ser deixados de lado (HENGL, 2006; HENGL; EVANS, 2009).

Por fim, o conceito de escala espacial é importante quando se trata de Modelagem Digital de Elevação e mapeamento geomorfológico baseado em um MDE. Bishop *et al.* (2012) comenta que erroneamente o conceito de escala é reduzido apenas à representação da informação em mapa. De acordo com os autores, o termo “escala” pode ser utilizado sob diferentes perspectivas, sendo essas:

- a) Escala geográfica: cobertura espacial ou tamanho de objetos;
- b) Escala cartográfica: distribuição areal e detalhe de informação representada em um produto cartográfico;

c) Escala de mensuração: menor área possível capaz de representar partes de um objeto;

d) Escala computacional: escala sob a qual um dado é analisado computacionalmente.

Nesse trabalho, os conceitos de “escala” serão utilizados conforme sugerido por Bishop et al. (2012).

### 3.2 GEOMORFOMETRIA

Geomorfometria é a ciência que analisa quantitativamente as variações topográficas na superfície terrestre (PIKE, 1995, 2000; RASEMANN et al., 2004). Anteriormente tida como um campo multidisciplinar resultante da interação das ciências da terra e a matemática, atualmente a geomorfometria se consolidou como uma disciplina própria (PIKE, 1995). De acordo com Tobler (1976, 2000) e Pike *et al.* (2008), trata-se de uma abordagem computacional analítico-cartográfica de caracterização e análise de dados topográficos contínuos, preferencialmente em formato matricial (*raster*). O foco operacional da geomorfometria é a extração de **parâmetros** e **objetos** da superfície terrestre a partir de Modelos Digitais de Elevação (PIKE *et al.*, 2008).

Para Evans (1972) e Lecours *et al.* (2016), a geomorfometria pode ser dividida em dois grandes grupos: geral e específica. A geomorfometria geral trata da extração de parâmetros do relevo, caracterizados por serem medidas descritivas da forma da superfície (Índice de Posição Batimétrica (IPB), declividade, rugosidade, aspecto, etc); já a geomorfometria específica busca caracterizar e/ ou extrair feições discretas do relevo, conhecidas como objetos do relevo, que, após interpretadas sob ponto de vista dos controles de sua estruturação, podem ser classificadas geomorfologicamente (Ex.: drenagens, *pockmarks*, cânions, cicatrizes de movimentos de massa, etc). Os parâmetros do relevo são melhores representados em formato matricial, enquanto os objetos do relevo são melhores representados na forma vetorial. Em outras palavras, parâmetros e objetos de relevo são as duas entidades primordiais da geomorfometria. Ambos são preferencialmente extraídos a partir de um Modelo Digital de Elevação matricial (PIKE; EVANS, 2008).

Os procedimentos computacionais utilizados para extrair a maior parte dos parâmetros de superfície de terreno (ou superfície batimétrica) e objetos a partir de um MDE são chamadas

“operações de vizinhança”. Seu cálculo é baseado em uma pequena janela amostral móvel regular de elevações (ou profundidades), calculadas ao redor de cada pixel do MDE, resultando em um mapa temático completo. Essa janela amostral móvel também é conhecida como “grade amostral” – *sampling grid*, ou “escala computacional”, segundo Bishop *et al.* (2012). Por isso, a estrutura simples dos MDE matriciais (*raster*) é melhor adequada à implementação de algoritmos de geomorfometria, em despeito dos MDEs em formato vetorial.

Como parâmetros e objetos do relevo baseados em um MDE podem ser gerados a partir de algoritmos e estratégias de amostragem distintos, além de variarem em resposta à variação de escala cartográfica e computacional, nenhum mapa geomorfométrico é considerado definitivo. Ainda, é importante que, ao ser mencionado um parâmetro ou objeto de relevo extraído de um MDE, seja mencionado também o algoritmo, tamanho da matriz amostral (escala computacional) e resolução espacial (relacionada à escala cartográfica) do MDE utilizado em sua confecção (PIKE; EVANS, 2008). Em caso de resolução amostral não homogênea ao longo do MDE, como nos Modelos Digitais Batimétricos regionais/ globais, em que partes do MDB são baseadas em dados batimétricos acústicos, enquanto partes são mapeadas por batimetria satelital ou sísmica, juntamente com os produtos geomorfométricos, devem ser providenciados: 1. Mapa da amostragem das altitudes (ou profundidades, para ambientes submersos) anteriormente ao gradeamento do MDE; 2. Uma avaliação das IVTs baseada em dados de referência de alta resolução. Dessa forma, ficam claras as áreas de melhor e pior amostragem do MDE utilizado nas análises morfométricas, auxiliando na compreensão e confiabilidade dos produtos geomorfométricos derivados da superfície topográfica/ batimétrica digital gerados.

### 3.2.1 Parâmetros do relevo

Os principais parâmetros geomorfométricos do relevo utilizados na descrição quantitativa da paisagem, são: *declividade*, *orientação de vertentes* (ou *aspecto*), *curvatura* e *rugosidade do terreno*, conhecidos como *parâmetros geomorfométricos geométricos* (OLAYA, 2008; LECOURE *et al.*, 2016). Suas principais aplicações em geomorfometria marinha são descritas na Tabela 3.1:



Tabela 3.1 - Principais parâmetros geomorfométricos geométricos

	<b>Declividade</b>	<b>Orientação de Vertentes</b>	<b>Curvatura</b>	<b>Índice de Posição Batimétrico</b>
<b>Relevância geomorfológica</b>	Estabilidade de pacotes sedimentares (tamanho de grão); aceleração local de correntes (erosão, movimento de sedimentos, criação de formas de fundo)	Expressão das direções dos processos geomorfológicos dominantes (correntes, cânions, fluxos sedimentares, falhas geológicas)	Sedimentação, erosão, fluxo, canalização de fluxos sedimentares e correntes	Realce de feições de relevo por meio do destaque cristas e vales;
<b>Tipo de parâmetro</b>	Geométrico	Geométrico	Geométrico	Geométrico

Fonte: Modificado de Lecours *et al.* (2016).

Um parâmetro geomorfométrico importante e não tão comumente utilizado para o estudo de superfícies digitais batimétricas é o Índice de Posição Batimétrica (IPB), implementado na extensão *Benthic Terrain Modeler 3.0* (BTM) para ArcGIS. Originalmente baseado no Índice de Posição Topográfico (IPT) criado por Weiss (2001), modificado para ambientes marinhos (RINEHART *et al.*, 2004). Ele classifica o relevo submersa baseado na mudança de comportamento da declividade em diversas escalas computacionais, à gosto do usuário. O IPB quantifica cada célula em uma superfície batimétrica relativamente às células vizinhas, resultando na identificação de feições geomorfológicas como cristas, vales, depressões, planícies e declives (Figura 3.1). É calculado utilizando a diferença entre o valor de elevação de determinada célula e o valor de elevação média das células de uma janela amostral de formato anelar ao redor da mesma. A utilização de uma janela amostral de formato anelar resulta na desconsideração de células imediatamente adjacentes ao calcular a média das elevações próximas à célula (WALBRIDGE *et al.*, 2018; RINEHART *et al.*, 2004; WEISS, 2001).

O algoritmo utilizado para o cálculo do IPB é descrito por Lundblad (2006) como:

$$IPB<fator de escala> = int ((MDB - média focal (MDB, anel, raio i, raio e)) + 0,5$$

Sendo:

*fator de escala* = raio externo em unidades de mapa \* resolução espacial do MDB

*raio i* = raio interno da janela amostral anelar

*raio e* = raio externo da janela amostral anelar

*MDB* = Modelo Digital Batimétrico

Células que apresentem valores de elevação inferiores à média calculada para a janela amostral anelar são classificadas como “vales”, enquanto células que apresentam valores superiores são classificadas como “cristas”, de acordo com a Figura 3.1.

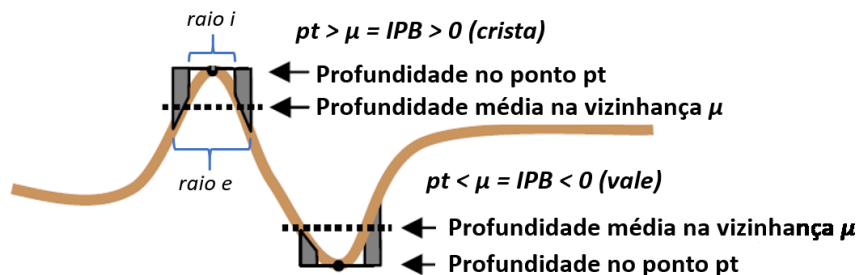


Figura 3.1 Desenho esquemático do funcionamento do algoritmo utilizado para elaboração do Índice de Posição Batimétrica. Fonte: modificado de Weiss (2001).

Valores de IPB próximos ou iguais a “zero” podem ocorrer em dois tipos de cenário: *planícies* ou *áreas de declividade constante*, como evidenciado na Figura 3.2. Para diferenciar os dois tipos de cenários e evitar uma classificação errônea do terreno, a caixa de ferramentas BTM compara os valores de IPB próximos à zero com o *raster* de declividade gerado em etapa anterior. *Planícies* são definidas quando os valores de IPB e declividade são próximos a “zero”, enquanto *áreas de declividade constante* apresentam valores de IPB próximos a zero e declividades significativamente superiores a zero (WEISS, 2001).

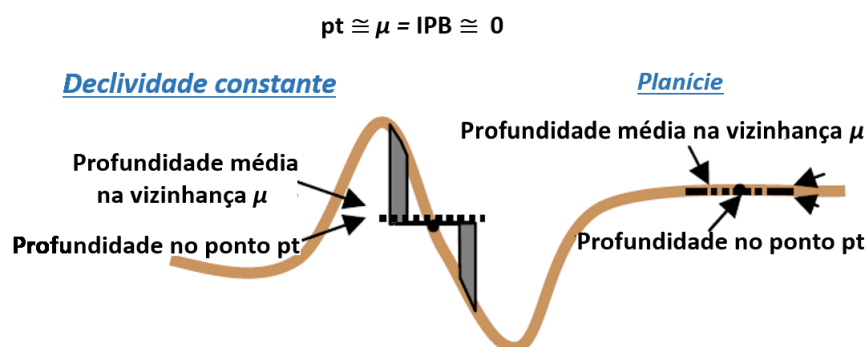


Figura 3.2 Desenho esquemático da diferenciação de áreas de declividade constante e planícies (ambos  $IPB = 0$ ) pela caixa de ferramentas Benthic Terrain Modeler. Fonte: modificado de Weiss (2001).

O resultado do IPB é dependente da escala computacional, ou seja, escalas distintas resultam em classificações distintas do terreno. Para execução do fluxograma de processamento padronizado do BTM e obtenção do Mapa de Classes Geomorfológicas é necessária a geração de dois IPB: regional e local. O IPB regional se utiliza de uma matriz de vizinhança de raio maior, objetivando identificar os grandes compartimentos geológicos/ geomorfológicos da área de estudo. Já o IPB local, utilizando uma matriz de vizinhança de raio menor, fornece informações de maior detalhe a respeito da variação topográfica do assoalho oceânico. A Figura 3.3 demonstra as diferenças entre os cálculos de IPB regional e local para mesma área de estudo. Notar que a mesma célula, quando analisado em escalas computacionais distintas, pode receber classificações distintas.

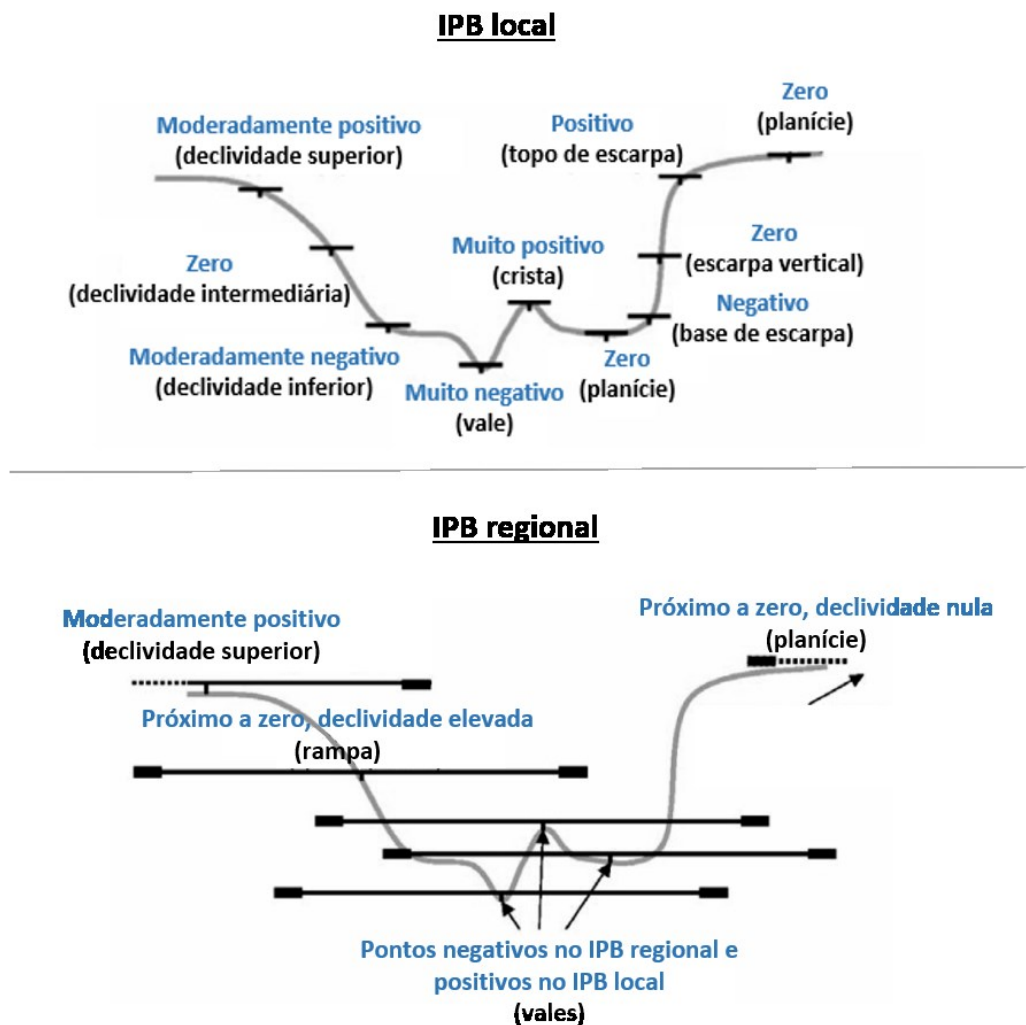


Figura 3.3. Índice de Posição Batimétrica computado em escala local e regional. Fonte: modificado de Weiss (2001).

### 3.2.2 Parâmetros e objetos de relevo em hidrologia

Hidrologia é o estudo do movimento, distribuição e qualidade d'água no Planeta Terra. Apesar do tipo de material sobre o qual o curso d'água flui sobre/ por entre, o movimento dos cursos d'água, assim como outros processos que moldam a paisagem, são majoritariamente controlados pela gravidade. De maneira geral, quanto maior a declividade, maior o efeito da gravidade sobre o fluxo d'água. O efeito gravitacional no controle do movimento d'água no relevo pode ser muito bem aproximado por MDEs. Dessa forma, com a facilidade de acesso a essas superfícies digitais que se tem atualmente, as ferramentas de geomorfometria para análise,

parametrização e previsão de fenômenos relacionados ao fluxo d'água se mostram bastante poderosas (GRUBER; PECKHAM, 2008).

Anteriormente à modelagem do escoamento d'água a partir de um MDE, é recomendada a identificação e correção de células-sumidouro espúrias (valores locais de elevação mínima, que não possuam células vizinhas de elevação menor), para que seja possível a extração de rede fluvial totalmente conectada. Para tal, são aplicadas ferramentas de pré-processamento que identificam quaisquer células-sumidouro espúrias que possam existir nessa superfície digital. Em seguida, as células-sumidouro identificadas são “preenchidas”. A abordagem de “preenchimento de sumidouros” é a mais antiga e ainda a mais comumente usada para remover sumidouros espúrios, e é feita aumentando o valor de elevação da célula-sumidouro espúria até atingir a elevação de seu ponto de saída mais baixo, possibilitando a identificação de um fluxo contínuo (Figura 3.4) (TARBOTON; BRAS; RODRIGUEZ-ITURBE, 1991. PLANCHON; DARBOUX, 2002).

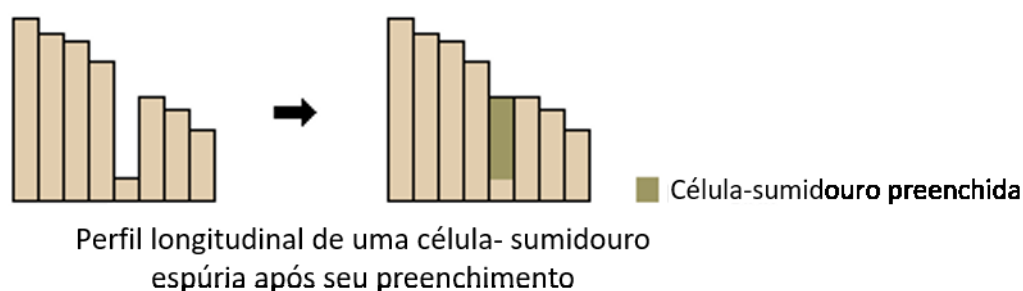


Figura 3.4 Desenho esquemático representando preenchimento de células-simidouro espúrias por ferramentas de pré-processamento. Adaptado de ArcMap 10.1.

Após a aplicação das ferramentas de pré-processamento, a direção de fluxo de cada célula é calculada. Esse cálculo é baseado no algoritmo “D8”, também conhecido como “método da descida mais íngreme” (O’CALLAGHAN; MARK, 1984 & GRUBER; PECKHAM, 2009). Para cada célula, todo o fluxo é extravasado para a célula vizinha que apresenta o mais acentuado gradiente descendente, resultando em 8 direções de drenagem possíveis - daí o nome “D8”. Essas direções são codificadas em uma matriz como: 64 = norte, 128 = nordeste, 1 = leste, 2 = sudeste, 4 = sul, 8 = sudoeste, 16 = oeste e 32 = noroeste (Figura 3.5). É um método especialmente capaz de modelar a convergência de fluxos (diversas células drenam em direção à uma única célula).

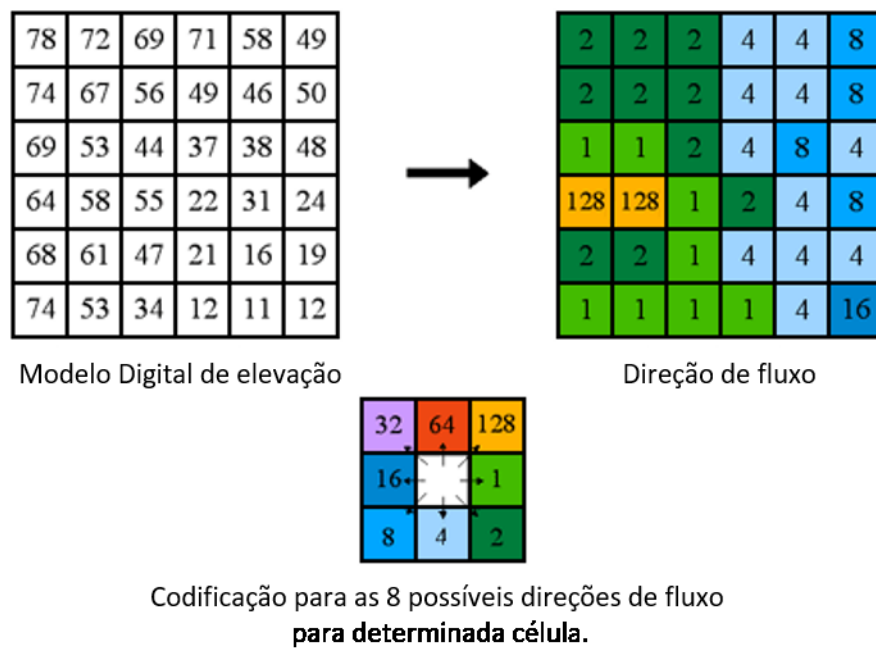


Figura 3.5 Desenho esquemático representando a geração de um Mapa de Direção de Fluxo à partir de um Modelo Digital de Elevação. Adaptado de Arcmap 10.1.

Com base na matriz de direção de fluxo, obtém-se a superfície de acumulação de fluxo (Figura 3.6). Esta superfície representa o número de células que cada célula da matriz de direção de fluxo determinada célula drena. As células de valores mais altos em uma grade de Acumulação de Fluxo são definidas como córregos, enquanto as células de valores mais baixos são definidas como possíveis superfícies de suprimento de sedimentos (superfície de escoamento) (TARBOTON; BRAS; RODRIGUEZ-ITURBE, 1991).

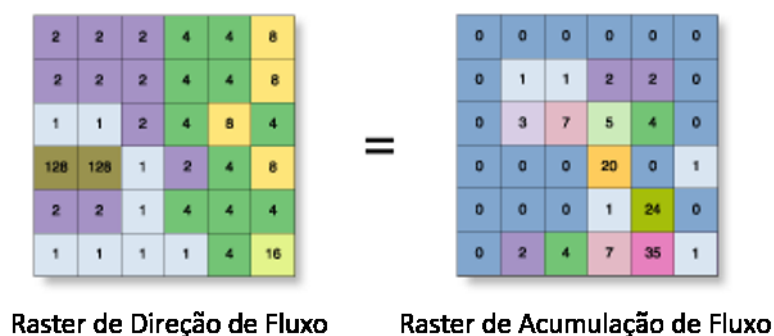


Figura 3.6 Desenho esquemático representando a geração de um Mapa de Acumulação de Fluxo a partir de um Mapa de Direção de Fluxo. Adaptado de Arcmap 10.1.

Por fim, o objeto de relevo “rede de drenagem” é definido vetorialmente a partir da aplicação de algoritmo que utiliza a superfície que define uma rede de drenagem linear (Acumulação de Fluxo) e a direcionalidade desse fluxo (“Direção de Fluxo”). A utilização de um raster de Direção de Fluxo nessa vetorização automática otimiza a vetorização de células adjacentes ou que se intersectam. Como resultado, é uma opção melhor do que a simples utilização de ferramentas de conversão matriz – vetor mais simplificadas, que utilizem apenas o raster de Acumulação de Fluxo (TARBOTON; BRAS; RODRIGUEZ-ITURBE, 1991).

### 3.3 SISMOESTRATIGRAFIA

A sismoestratigrafia se vale de dados de sísmica de reflexão para a interpretação de padrões de estratificação da geologia em subsuperfície. A forma como os refletores sísmicos são arranjados, assim como suas diferentes terminações, resultam no reconhecimento de *sequências sísmicas* – sequências deposicionais identificadas em uma seção sísmica (VAIL; MITCHUM Jr., 1977). O termo *sequência deposicional* é atribuído à uma unidade estratigráfica definida objetivamente, composta de estratos geneticamente correlatos e limitados por inconformidades e suas conformidades correlatas. Logo, é possível realizar correlações cronoestratigráficas utilizando padrões dos refletores sísmicos (MITCHUM Jr.; VAIL; SANGREE, 1977).

O guia de interpretação sismoestratigráfica mais utilizado até então é descrito por Mitchum Jr. *et al.* (1977) e este é baseado na identificação e análise de sequências e fácies sísmicas. Como dito anteriormente, sequências sísmicas são grupos de refletores sísmicos concordantes separados por superfícies erosivas e interpretadas como sequências deposicionais. A nomenclatura *fácies sísmicas* é utilizada para designar sequências sísmicas que apresentem refletores com configuração, continuidade, amplitude, frequência e intervalos de velocidade semelhantes entre si. Tais padrões são interpretados baseados em estimativas de ambientes geológicos e litotipos.

A seguir serão descritos os principais critérios utilizados por Mitchum Jr. *et al.* (1977) para caracterizar os principais tipos de sequências e fácies sísmicas.

#### 3.3.1 Sequência sísmica

As sequências sísmicas têm seus limites definidos principalmente pela forma da terminação dos refletores sísmicos que a constituem. Os diferentes tipos de terminações em uma seção sísmica idealizada podem ser observados na Figura 3.7 e serão descritos a seguir.

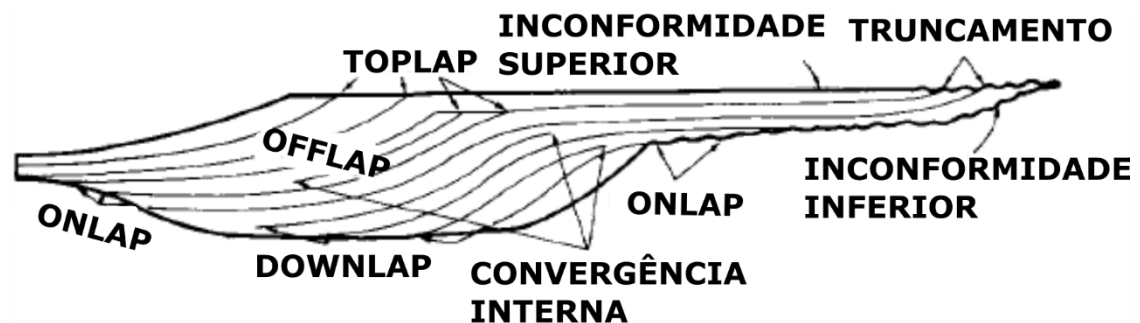


Figura 3.7 Diferentes tipos de terminação de refletores sísmicos em uma seção sísmica idealizada. Fonte: traduzida de Mitchum Jr. et al. (1977).

- a) Truncamento erosivo: tipo de discordância de topo mais confiável para determinação de um limite de sequência sísmica. É interpretada como deposição de estratos e sua remoção subsequente ao longo de uma inconformidade. O reconhecimento de terminações desse tipo pode ser direto, quando refletores são observados em alto ângulo com a superfície erosiva, ou menos trivial quando estes se apresentam subparalelos à dita superfície. Por fim, a própria superfície erosiva pode produzir um refletor sísmico;
- b) *Toplap*: assim como o truncamento erosivo, terminações do tipo *Toplap* são discordâncias de topo. São interpretadas como estratos abaixo de uma superfície erosiva resultante de não deposição – superfície de *bypass* – com erosão relativamente pouco significativa;
- c) *Onlap*: tipo de terminação que indica relações de discordâncias de base. Os refletores sísmicos são interpretados como estratos inicialmente horizontais que terminam progressivamente contra uma superfície inicialmente inclinada. Também são considerados terminações do tipo *onlap* estratos inclinados que possuem terminações progressivamente *updip* contra uma superfície de maior



inclinação. Terminações desse tipo são consideradas o critério mais confiável para definição de uma discordância de base que delimita uma sequência sísmica;

- d) *Downlap*: também são consideradas como terminações que indica relações de discordâncias de base. São refletores sísmicos interpretados como estratos inicialmente inclinados que terminam *downdip* contra uma superfície inclinada ou horizontal;
- e) *Offlap*: por fim, são terminações interpretadas como padrões de refletores sísmicos que progradam em direção à bacia.

### 3.3.2 Fácies sísmicas

Fácies sísmicas são descrições e interpretações geológicas dos parâmetros de reflexão de sequências sísmicas. Tais parâmetros são: configuração (interna e externa), continuidade, amplitude, frequência e velocidade de intervalo. Cada parâmetro provê informação considerável a respeito da geologia em subsuperfície. O agrupamento desses parâmetros em unidades de fácies sísmicas mapeáveis – conjunto de refletores cujos parâmetros diferem daqueles de fácies sísmicas adjacentes – permitem a interpretação em função dos ambientes deposicionais, fontes de sedimento e arcabouço geológico. Os parâmetros mais importantes para o objetivo dessa dissertação são a *forma externa* e *configuração interna dos refletores*. Ambos devem ser descritos para entender a interrelação geométrica e o ambiente deposicional de determinada fácies sísmica. Essa análise deve ser realizada preferencialmente em linhas *dip*.

### 3.3.2.1 Configuração interna dos refletores

*Paralelos e subparalelos:* sugerem taxas uniformes de deposição em substrato que subsiduiu de maneira também uniforme. Refletores de configuração interna paralela ou subparalela tendem a ocorrer com formas externas variáveis, porém comumente são camadas horizontais ou levemente onduladas, assim como feições sedimentares de preenchimento em geral (Figura 3.8).

*Divergentes:* sugerem variações laterais na taxa de deposição sedimentar, ou basculamento progressivo da superfície de deposição. Geralmente apresentam forma externa de cunha, sendo o espessamento lateral da sequência sísmica associado ao espessamento individual de refletores (Figura 3.8).

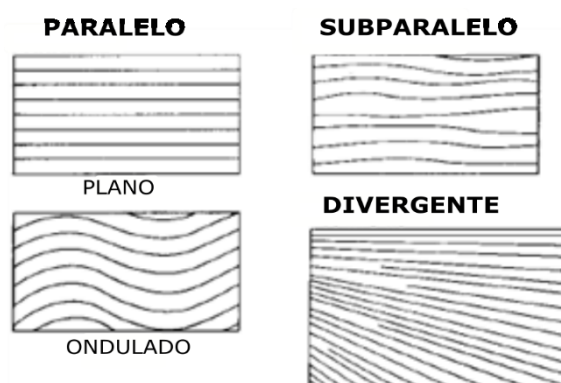


Figura 3.8 Tipos de configuração interna de refletores sísmicos.

*Progradantes:* existem diversos tipos de configurações progradantes de refletores sísmicos, sendo esses: sigmoidal, oblíquo, complexo, *hummocky* e em telhas. Por característica, todos desenvolvem progressivamente superfícies deposicionais suavemente inclinadas em direção à bacia, chamadas de *clinoformes* (Figura 3.9).

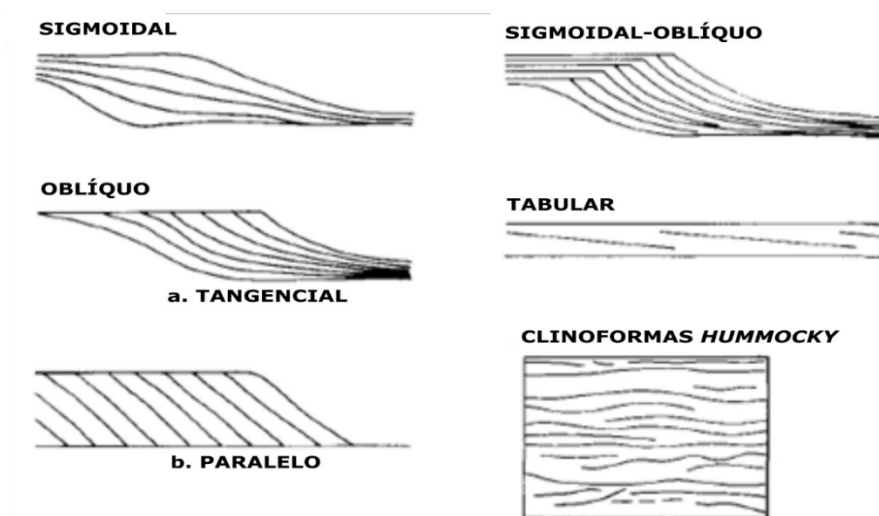


Figura 3.9 Tipos mais comuns de refletores sísmicos progradantes.

*Caóticos*: são reflexões descontínuas e discordantes que sugerem um arranjo desordenado das superfícies refletoras. São interpretadas como estratos que se depositaram em ambientes de alta energia, ou então como a deposição de um estrato anteriormente contínuo que foi deformado, como no caso de um rompimento e deposição de uma camada sedimentar em um deslizamento de massa. No último caso, geralmente é possível ao intérprete identificar os padrões de reflexão pretéritos ao rompimento da camada e os padrões de reflexão associados ao evento (Figura 3.10).

*Áreas sem reflexão*: Pacotes litológicos ou sedimentares altamente homogêneos, não estratificados ou então verticalizados podem ser expressos como áreas sem reflexão interna em dados sísmicos. Corpos ígneos relativamente grandes, domos de sal ou camadas espessas de rochas sísmicamente homogêneas podem apresentar esse tipo de configuração interna (Figura 12).

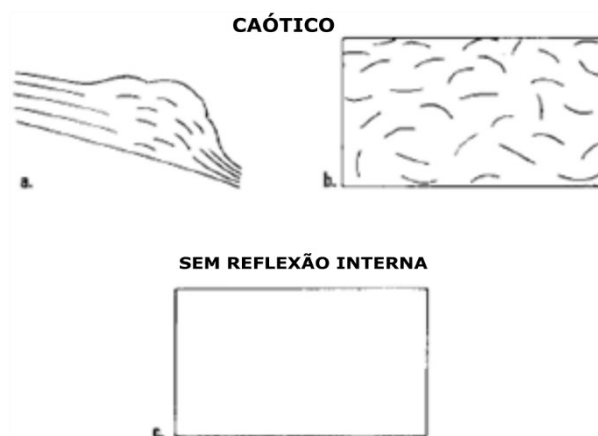


Figura 3.10 Exemplos de refletor sísmico com padrão caótico de reflexão e sem reflexão. Fonte: traduzida de Mitchum et al. (1977).

### 3.3.2.2 Forma externa

A caracterização tridimensional quanto às formas externas das unidades de fácies sísmicas é uma etapa importante na interpretação sísmica. Camadas horizontais, cunhas ou bancos são feições comumente encontradas na plataforma continental e podem apresentar diferentes tipos de configuração interna de refletor. Camadas onduladas com reflexões internas paralelas são interpretadas como estratos sendo estratos depositados de maneira uniforme em ambiente de baixa energia, geralmente em ambientes marinhos profundos. Lentes são comumente reconhecidas como a forma externa de unidades progradantes de fácies sísmicas, porém podem ocorrer em diversos outros cenários (Figura 3.11).

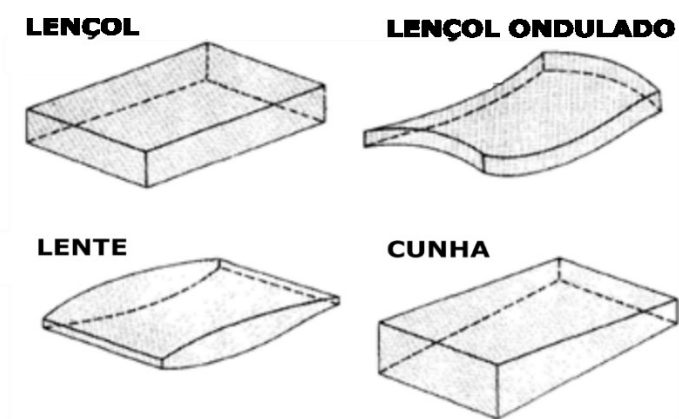


Figura 3.11 Formas externas de unidades de fácies sísmicas: camadas horizontais, onduladas, cunhas e lentes. Fonte: traduzida de Mitchum et al. (1977).

Já as estruturas montiformes são configurações de reflexões interpretadas como estratos deposicionais que resultam em elevações acima das elevações observadas nos estratos adjacentes. Em sua maioria, montes são interpretados como empilhamentos topográficos resultados de processos deposicionais clásticos, vulcânicos ou orgânicos. As diferentes gêneses das diversas estruturas montiformes resultam em formas externas e configuração interna de refletores variadas (Figura 3.12).

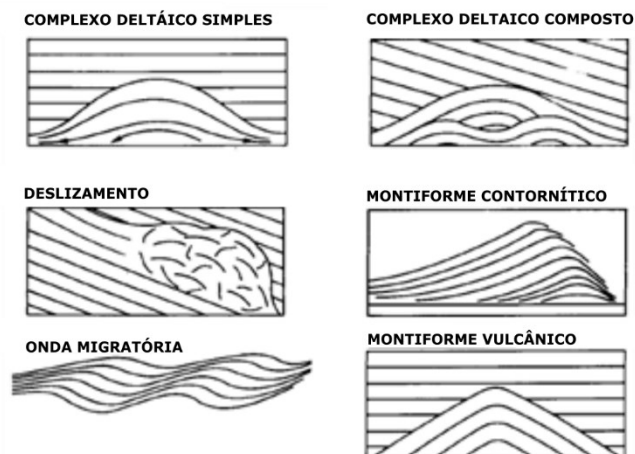


Figura 3.12 Formas externas de unidades de fácies sísmicas: alguns tipos de montes submarinos. Fonte: Mitchum et al. (1977)

Por fim, formas externas de preenchimento são estruturas podem também ter origem diversa, como canais erosivos, preenchimento de cânions, preenchimento de fossas estruturais, leques, escorregamentos e outros (Figura 3.13).

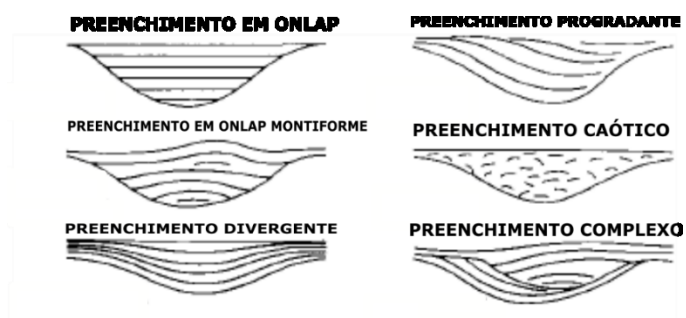


Figura 3.13 Formas externas de unidades de fácies sísmicas: alguns tipos formas de preenchimento. Fonte: traduzida de Mitchum et al. (1977).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Visando o cumprimento dos objetivos, responder as perguntas e testar a hipótese propostas neste trabalho, foram seguidas as seguintes etapas:

- a) Controle de Qualidade do Modelo Digital Batimétrico “LEPLAC” e comparação dessa superfície batimétrica à superfície “SRTM 15+ V2.0”;
- b) Geração de Modelo Digital Topobatimétrico da margem Sudeste do Brasil;
- c) Extração automática de Rede de Vales Interconectados derivada de Modelo Digital Topobatimétrico;
- d) Validação e classificação da Rede de Vales Interconectados por interpretação sísmica.

A seguir são apresentados os Modelos Digitais Batimétricos regionais analisados, assim como os dados de referência utilizados para sua avaliação. A metodologia, bem como resultados, conclusões e interpretações referentes ao item “4 a)” serão expostos no item “5 COMMUNITY-BASED IMPROVEMENT OF THE DIGITAL BATHYMETRIC MODEL “LEPLAC”” em formato de artigo publicado no evento *17th Brazilian Symposium of Geophysics (SBGf)*. Já a metodologia, resultados e conclusões referentes aos itens “4 b)”, “4 c)” e “4 d)” são apresentados no item “6 TBDEM-DERIVED STREAMS IN NORTH SANTOS BASIN AND IT’S GEOLOGICAL SIGNIFICANCE” em formato de artigo submetido à revista *GeoMarine Letters*.

### 4.1 ANÁLISE DOS MODELOS DIGITAIS BATIMÉTRICOS

#### 4.1.1 LEPLAC

O Modelo Digital Batimétrico “LEPLAC” (Figura 4.1) é a mais nova superfície digital batimétrica da margem continental brasileira, publicada em 2019 por Alberoni *et al.* (2019). Esse MDB é um dos diversos frutos de algumas décadas de extensa coleta de dados geofísicos (batimétricos, sísmicos mono e multicanal, magnetométricos e gravimétricos) realizados ao

longo de toda a costa brasileira pela Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) da Marinha do Brasil, no âmbito do Programa de Levantamento da Plataforma Continental Brasileira – LEPLAC. Foram coletados mais de 770.000 km de dados geofísicos, de forma a subsidiar a extensão da plataforma continental legal brasileira sob os requerimentos especificados no Artigo 76 da UNCLOS (Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar) (ALBERONI *et al.*, 2019).

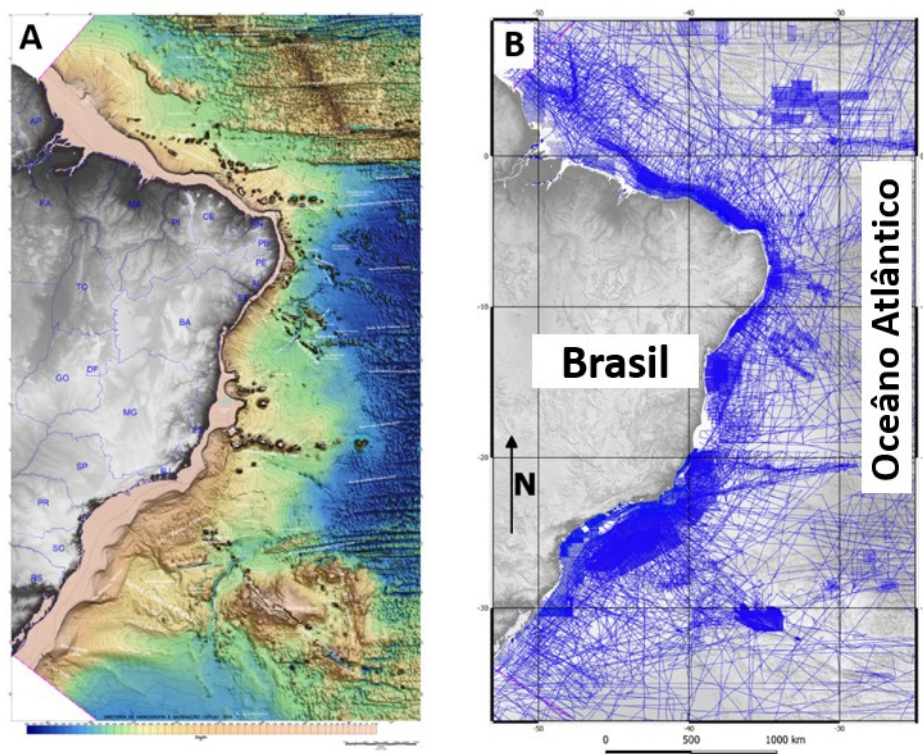


Figura 4.1 a) Modelo Digital Batimétrico “LEPLAC”. b) Mapa de localização dos dados acústicos utilizados na geração do MDB “LEPLAC”. Fonte: Alberoni *et al.* (2019).

Além dos dados de batimetria coletados pela DHN durante as campanhas do programa LEPLAC, foram utilizados também dados de ecobatímetros mono e multifeixes de outras instituições, como Petrobras e Agência Nacional de Óleo, Gás e Biocombustíveis (ANP); além de dados de domínio público de instituições brasileiras e estrangeiras, sendo principalmente provenientes do *National Geophysical Data Centre* (NGDC), *database* do GEODAS e da *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), processados e validados pela DHN. Para as altitudes de áreas continentais, assim como para profundidades de porções



oceânicas distais, onde dados batimétricos acústicos são escassos, foram utilizados dados extraídos do MDT SRTM 30+ (ALBERONI *et al.*, 2019).

O MDB LEPLAC está disponível para *download* no endereço eletrônico do Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO) da DHN <https://www.marinha.mil.br/chm/bndo> em formato GeoTIFF e resolução espacial de 2500 m. O MDB LEPLAC analisado e utilizado nesse trabalho apresenta resolução espacial de 900 m. O gradeamento de 900 m para área de estudos foi possível pela abundância de dados batimétricos acústicos (multifeixe, monofeixe e oriundos do *Bottom Tracking* de dados sísmicos) na região, o que muitas vezes não é realidade para outras regiões da plataforma continental jurídica brasileira. O método de interpolação utilizado pela DHN no gradeamento do MDB foi o da Superfície de Mínima Curvatura, similar ao proposto por Swain (1976) e Briggs (1974), que tende a se ajustar à amostragem irregularmente espaçadas dos dados de entrada originais (ALBERONI *et al.*, 2019).

#### 4.1.2 SRTM 15+ V 2.0

O MDE SRTM 15+ V2.0 é na verdade um Modelo Digital Topobatimétrico (MDTB), onde as porções continentais apresentam resolução espacial de 15m, com altitudes oriundas de dados de interferometria por radar de abertura sintética adquiridas durante a missão *Shutter Radar Topography Mission* (SRTM), da NASA; e porção marinha, de grade com resolução espacial de 15 segundos de arco, aproximadamente 500 m na linha do equador, oriunda de dados de batimetria satelital por inversão gravimétrica, utilizando dados acústicos para balizamento da interpolação, quando disponíveis (TOZER *et al.*, 2019). A batimetria satelital por inversão gravimétrica se deu primeiramente quando Smith & Sandwell (1994), apoiados em trabalhos anteriores como Dixon *et al.* (1983) e Haxby *et al.* (1983), desenvolveram um método de transformação das mensurações de declividade da superfície dos mares adquiridos por satélites altimétricos em predições batimétricas do assoalho marinho (TOZER *et al.*, 2019).

A porção batimétrica do MDTB SRTM 15+ V2.0 é fruto do contínuo trabalho de aprimoramento das superfícies SRTM 30+ e SRTM 15+, publicados por Becker *et al.* (2008) e Olsen *et al.* (2014). A diferença da porção batimétrica dos MDTBs SRTM 30 + e 15+ está, principalmente, na resolução amostral dos dados acústicos de entrada, que passa a ser de 15 arcossegundos no SRTM 15+. Para geração do MDB SRTM 15+ V2.0 foram incorporados seis (6) anos a mais de medições de altimetria satelital provenientes dos satélites Cryosat-2,

SARAL/AltiKa e Jason-2, além de 33,6 milhões pontos de sondagens por ecobatímetros multi e monofeixes coletados por diversas instituições, como a *National Geospatial-Intelligence Agency* (NGIA), *Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology* (JAMSTEC), *Geoscience Australia*, *Center for Coastal and Ocean Mapping* e O Instituto de Oceanografia Scripps, não utilizados na versão antiga do SRTM 15+ (Figura 4.2). O resultado é um MDB com maior cobertura espacial de dados acústicos e com resolução amostral de 15 arcosegundos, além de uma significativa melhora na predição batimétrica por inversão gravimétrica, alcançando resoluções amostrais de 5,9 km.

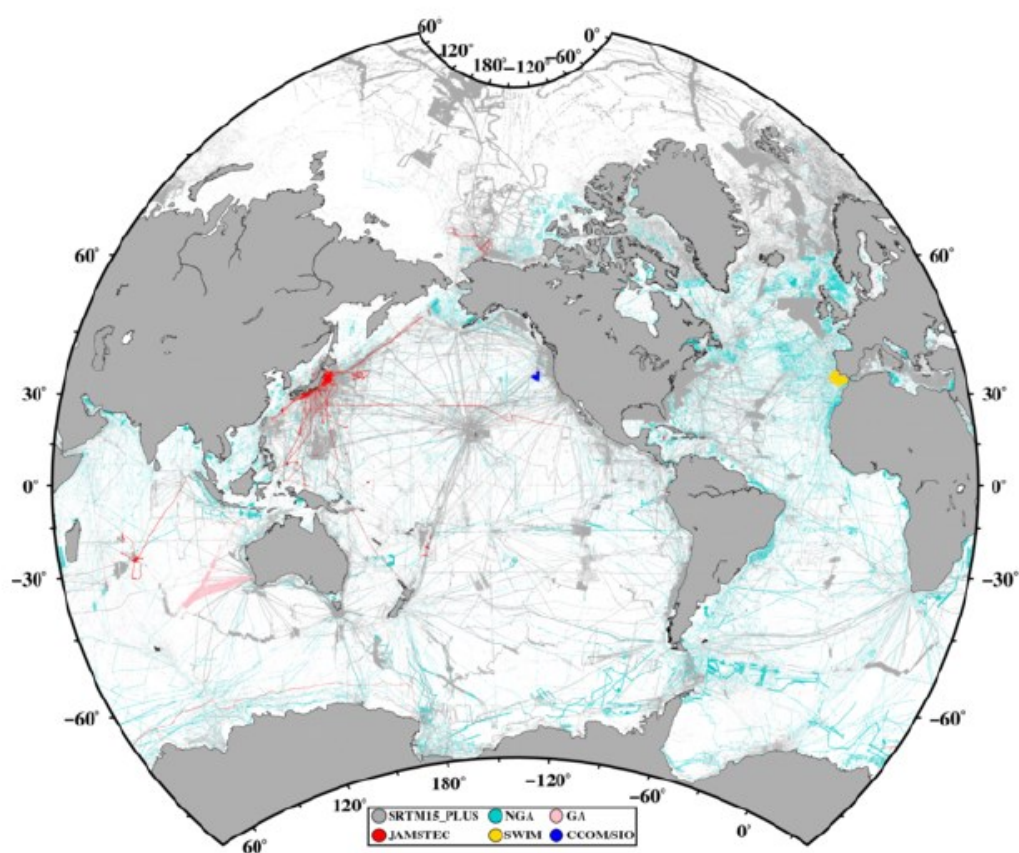


Figura 4.2 Localização dos dados acústicos utilizados para balisar a interpolação dos dados de batimetria predita por satélite. Fonte: Tozer *et al.* (2019).

## 4.2 BATIMETRIAS DE REFERÊNCIA

As batimetrias multifeixe e monofeixe utilizadas como referência neste trabalho foram adquiridas em julho de 2019 pelo NPqOc Alpha Crucis durante o primeiro cruzeiro do Projeto

OBS: “Monitoramento Sismológico e Oceanográfico de um Segmento na Margem Sudeste do Brasil: Norte da Bacia de Santos ao Sul da Bacia do Espírito Santo”, da qual essa dissertação faz parte. Os dados batimétricos foram coletados navegando em velocidades entre 4 e 8 nós durante o deslocamento do navio. Os dados estão dispostos em perfis e abrangem cotas batimétricas de 20 m a 2800 m, abrangendo a PC, TC e parte do Platô de São Paulo nas bacias de Santos e Campos, conforme a Figura 4.3. Parte dos dados batimétricos multi e monofeixes são coincidentes (sobrepostos), possibilitando a avaliação dos pixels de parte dos MDBs por referências batimétricas distintas e independentes.

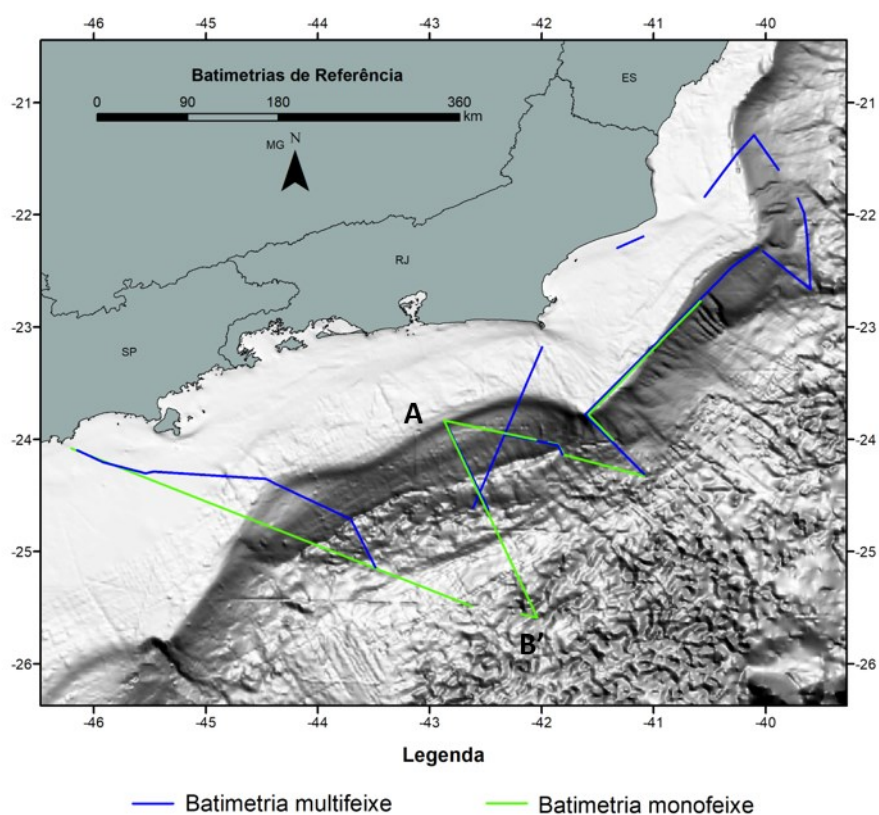


Figura 4.3 Mapa de localização das batimetrias de referência utilizadas no controle de qualidade dos MDBs LEPLAC e SRTM 15+ V 2.0. Perfil A-B indica localização da Figura 4.4.

#### 4.2.1 Batimetria Multifeixe

Os dados de batimetria multifeixe foram adquiridos com o perfilador de fundo SEABAT 8160 da Reson com 126 feixes acústicos de 1,5° de abertura transversal, operando na frequência central de 50kHz. A configuração dos feixes é capaz de cobrir áreas (*swath coverage*) com larguras de até 4 vezes a profundidade alcançada, limitada entre 3m e 2750 m. O *software* de aquisição utilizado foi o PDS 2000.

O transdutor do equipamento encontrava-se montado no casco do navio, portanto considerou-se que a geometria do transdutor não foi alterada e assim inseriu-se os valores de *roll*, *pitch* e *heading* verificados no *patch test* realizado durante a instalação do instrumento. Os valores de *roll*, *pitch*, *heading* e latência obtidos foram respectivamente 2,3°, 1,5°, 9° e 0,06ms.

O processamento dos dados de multifeixe foi realizado no *software* *SonarWiz 7.0*. Compreendeu etapas de correções de movimentos de navegação e altitude, inserção de perfis de velocidade de propagação da onda sonora, filtragem dos dados e eliminação de valores extremos e desviantes de profundidade. Correções de maré não foram aplicadas devido às profundidades atingidas serem em grande parte em oceano profundo (*offshore*) e as possíveis variações (0,5m a 1m) serem aceitáveis ao levantamento batimétrico realizado. Todas as etapas, somadas à análise estatística mais adequada para a interpolação dos pontos, auxiliaram no objetivo final: a confecção do mapa batimétrico.

Os dados reconhecidos como espúrios ou gerados por ruídos passaram por filtragem e eliminados manualmente. A quantidade de pontos espúrios percebida aumentou conforme a espessura da coluna d'água, resultado estimativa equivocada da velocidade do som com os três perfis de velocidade disponíveis que torna o erro mais significativo com a profundidade. Atrelado a isso, pressupôs-se um desalinhamento do sensor de movimento em relação aos eixos da embarcação o qual pode ter sido a causa de oscilações entre picos e depressões observados nas bordas da faixa levantada, enquanto o nadir não foi afetado.

Em virtude disso, a exatidão dos feixes externos de varredura em sua maioria foi comprometida por ruídos, fenômenos de refração do som ou imprecisão dos movimentos rotacionais da embarcação. Assim, eventualmente, optou-se por eliminar as extremidades ou trechos inteiros comprometidos da faixa de varredura. Após a eliminação dos pontos desviantes, iniciou-se a geração das grades de interpolação.

A determinação do tamanho de célula da grade final levou em conta a resolução dos feixes acústicos, ou largura de faixa, que varia com a profundidade. Considerou-se o maior valor de profundidade dos pontos adquiridos, aproximadamente 2400 m, para o cálculo da

célula. A resolução da faixa sondada foi considerada como o dobro do valor da tangente de  $0,75^\circ$  (metade do ângulo de cada feixe do transdutor transversal), multiplicada pela maior profundidade resultante após o processamento, equivalente à 2400 m. Através do cálculo, o tamanho da célula conferida a todas as grades de interpolação correspondeu à 62m. A resolução utilizada não foi suficiente para capturar além de informações de profundidade, nem feições importantes e de menores escalas, principalmente àquelas localizadas na plataforma continental, mas possibilitou a diminuição do excesso de artefatos e ruídos na coluna d'água.

#### 4.2.2 Batimetria Monofeixe

A ecossonda utilizada no levantamento de batimetria monofeixe foi a Simrad EA600, da marca Kongsberg, operando em frequência de 12kHz, totalizando 1058 km de dados batimétricos em perfil. A Velocidade Local do Som (VLS) ao longo da coluna d'água foi mensurada utilizando um Perfilador de Velocidade do Som da marca AML, modelo Plus X SVP, anteriormente à aquisição dos dados batimétricos. A aquisição da batimetria monofeixe foi realizada com o *software* HYPACK, onde foi inserida a média das medições de VLS, anteriormente ao início do levantamento.

Para processamento dos dados, optou-se pela transformação dos dados brutos do formato proprietário Kongsberg para o formato XYZ, possibilitando a utilização dos dados no *software* livre de edição e comparação de nuvens de pontos *Cloud Compare v2 10.2*. A exclusão de dados espúrios para identificação correta do fundo oceânico foi realizada por filtragem manual, baseada na exclusão visual de dados espúrios, assim como pela ferramenta “*Statistical Outlier Filter*”, onde as profundidades que se encontravam com distâncias maiores que três (3) desvios padrões da média das distâncias entre seis (6) pontos vizinhos foram consideradas espúrias e excluídas (Figura 4.4).

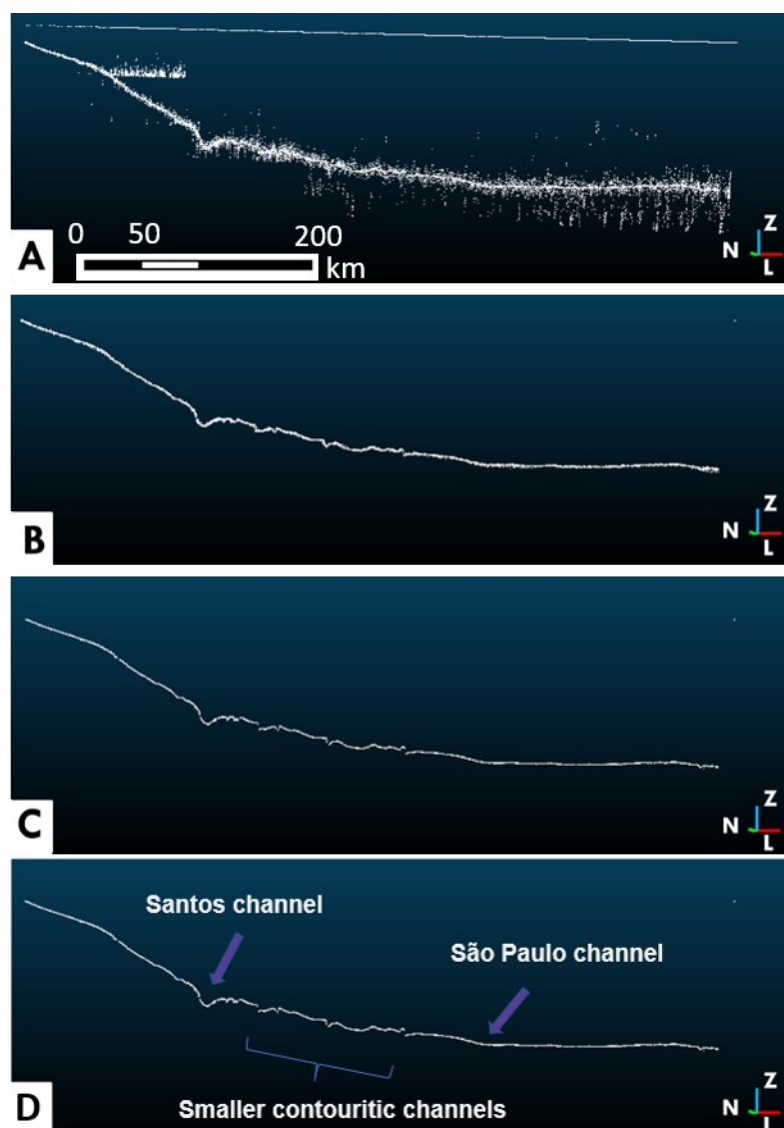


Figura 4.4 Etapas do processamento dos dados de batimetria monofeixe utilizando o software *Cloud Compare*. a) Nuvem de pontos bruta; b) Nuvem de pontos filtrada manualmente; c) Nuvem de pontos filtrada por filtro estatístico após filtragem manual; d) Feições interpretadas a partir da nuvem de pontos. Localização indicada no mapa da Figura 4.3.

Por último, para minimizar possíveis incertezas associadas ao processamento puramente estatístico e visual dos dados, sem a utilização de ecograma para auxílio na interpretação do fundo, foram realizadas médias circular de raio 50m. A batimetria final apresentou resolução espacial de 100 m e foi exportada em formato *XYZ* e posteriormente convertida para *shapefile* para manipulação dos dados em Sistema de Informação Geográfica.

**5 ARTIGO PUBLICADO DURANTE O EVENTO “17TH BRAZILIAN SYMPOSIUM  
OF GEOPHYSICS (SBGF)”: COMMUNITY-BASED IMPROVEMENT OF THE  
DIGITAL BATHYMETRIC MODEL “LEPLAC”**

Fábio Barros Curado Fleury<sup>1</sup>, Ana Angélica Aberoni<sup>2</sup>, Luiz Carlos Torres<sup>2</sup>, Michel Michaelovitch de Mahiques<sup>3</sup>, Deivid Cristian Leal Alves<sup>4</sup>, Antonio Henrique da Fontoura Klein<sup>1</sup>. <sup>1</sup>Coastal Oceanography Laboratory of the Federal University of Santa Catarina; <sup>2</sup>LEPLAC – Continental Shelf Program, DHN – Directorate of Hydrography and Navigation – Brazilian Navy; <sup>3</sup>Oceanographic Institute of the São Paulo University; <sup>4</sup>State University of Mato Grosso do Sul.

Esta seção é destinada a apresentação do artigo em evento publicado e apresentado no *17th International Congress of the Brazilian Geophysical Society* realizado no Rio de Janeiro, entre os dias 8 e 16 de Novembro de 2021.

Florianópolis, SC

2022

### **ABSTRACT**

This work presents the process of updating the LEPLAC<sup>1</sup> Digital Bathymetric Model (DBM) in the southeastern margin of Brazil, following the Recommended Workflow for Analysis of Bathymetric Surfaces used by the Brazilian Navy. As a result of the application of comparative quantitative and qualitative analysis between the reference data and the LEPLAC DBM, two regions of occurrence of bathymetric artifacts were identified, both in the shelf break. Such results were presented to the Brazilian Navy, which confirmed its existence and updated the depth values in these locations. The updated version of the LEPLAC DBM were, then, reanalyzed. A Difference Surface Map of the two versions of the LEPLAC DBM was generated, in order to spatialize the improvements done by the surface updating procedure. The same analysis workflow were conducted to the SRTM15+ V 2.0 DBM, in order to compare the quantitative and qualitative indicators of both bathymetric surfaces. Lastly, a Difference Surface Map of the LEPLAC and SRTM15+ V 2.0 DBMs were generated, in order to quantify the advances brought to the national bathymetry by the LEPLAC DBM in the study area. The digital surfaces were evaluated by univariate and bivariate statistical techniques, regression analysis, Difference Surface Maps, topographic profile graphs and histograms. The reference data consists of 2778 km of linear bathymetric data from multi-beam and single-beam echosounders, ranging from depths from 10 to 2500 m, in addition to two multibeam DBM. These data were collected by N/Oc Alpha Crucis in surveys of the University of São Paulo and the Federal University of Santa Catarina and are independent of the model confection.



## 5.1 INTRODUCTION

The LEPLAC Digital Bathymetric Model (DBM) is the newest regional digital bathymetric surface available for the Atlantic Ocean. Published in 2019, it revolutionized the understanding of the geomorphological diversity and compartmentation of the Brazilian margin seabed. Its construction was due to the need to suit the regulations contained in Article 76 of the United Nations Division for Ocean Affairs and Law of the Sea (UNCLOS, 1994 and UNITED NATIONS, 1999), in order to support the Brazilian Submission for the extension of the continental shelf beyond 200 nautical miles (ALBERONI; JECK; SILVA; TORRES, 2019). The DBM is the result of more than two decades of extensive and rigorous work in the acquisition and quality control of acoustic data from various sources (mono and multi-beam echosounders; bathymetry derived from seismic) by the Directorate of Hydrography and Navigation (DHN) of the Brazilian Navy, under the LEPLAC. In total, more than 770.000 km of bathymetric data were collected across the entire Brazilian continental margin, from the country's northern border with French Guiana to its lower border with Uruguay. In addition, acoustic data provided by Petrobras, Brazilian National Agency of Oil, Gas and Biocombustibles (ANP) and several Brazilian and foreign institutions were used, as well as data from public databases from international institutions such as the National Geophysical Data Center (NGDC), GEODAS and the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). In regions where acoustic data is scarce (mainly in deep water) depth values from the DBM SRTM30+ were used (LEPLAC, 2015; MOHRIAK; TORRES, 2017; ALBERONI; JECK; SILVA; TORRES, 2019).

The motivation for this work arose from the knowledge of the Recommended Workflow of Bathymetric Surface Analysis (FLORENTINO; PIMENTAL; NETO, 2019). The “Recommended Workflow” suggests that, having access to the original input bathymetric data, after the comparative evaluation of regional DBMs against reference data, the “Bathymetric Surface Update” should be done. As suggested by the author and presented by Weatherall *et al.* (2015), updating bathymetric grids is a common practice aimed at enriching information and improving the DBM in use. The “Recommended Workflow” is used to update the LEPLAC surface by the Navy since its launch, as new data is acquired and validated by DHN. This work presents the update of the LEPLAC DBM by applying the “Recommended Workflow” of Bathymetric Surface Analysis by joint action between the scientific community

(Federal University of Santa Catarina, Oceanographic Institute of São Paulo University and State University of Mato Grosso do Sul) and the DHN. Two spurious data regions, named "Artifact 1" and "Artifact 2", were identified in the shelf break. The existence of the artifacts was presented to the LEPLAC team, which confirmed their existence and updated the depth values in these regions. Then, the updated LEPLAC surface was re-evaluated and compared to the SRTM 15+ V2.0 bathymetric surface.

## 5.2 METHOD

### 5.2.1 Recommended Workflow for Analysis of Bathymetric Surfaces

The methodology used to evaluate the bathymetric surfaces in this work is an adaptation of the “Recommended Workflow” of Regional Bathymetric Surface Analysis, proposed by Florentino *et al.* (2019) (Figure 5.1). Overall, this workflow uses quantitative and qualitative tools to assess regional digital surfaces against reference data. The workflow implies that, after evaluating and interpreting the results found and having access to the original incoming bathymetric data, the bathymetric surface under analysis should be updated. The workflow recommends that, after the bathymetric surface is updated, it should be re-evaluated by the same tools. As a way to quantify the changes resulting from the DBM update, the author suggests the creation of a Difference Surface Map between the original DBM and the updated DBM. In this work, in addition to the steps mentioned, a Bathymetric Difference Map between the updated LEPLAC DBM and the SRTM15+ V 2.0 DBM was generated. The objective of this last step is to quantify the advances brought by the creation of the LEPLAC DBM in the study area.

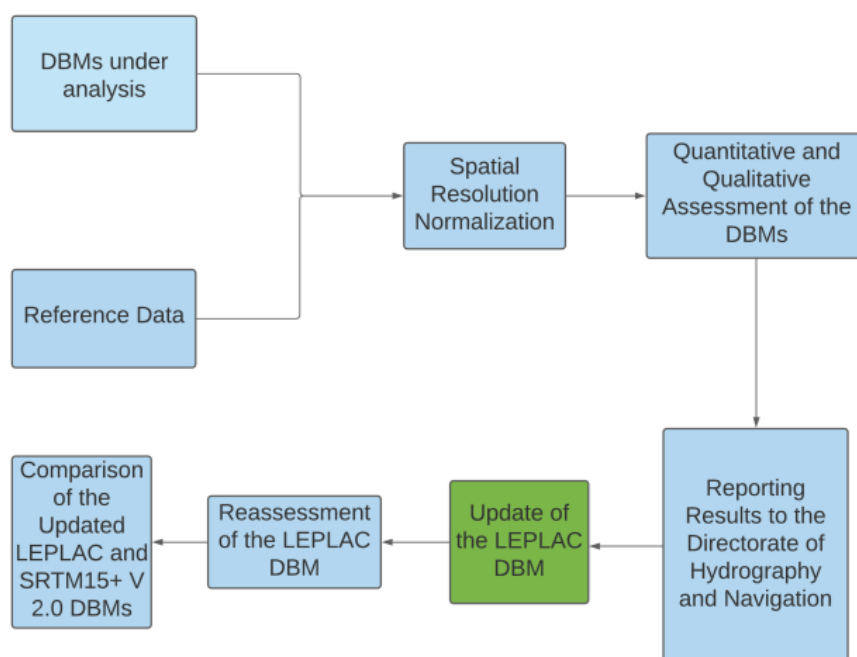


Figure 5.1 Adapted Recommended Workflow for Analysis of Bathymetric Surfaces. Blue Boxes represent the steps executed by the scientific community (UFSC and IOUSP). Green box represents the step taken by the LEPLAC team.

## 5.2.2 Quantitative and Qualitative Analysis Tools

The analysis undertaken are summarized as follow:

### 5.2.2.1 Statistical summary and Histograms

Important inferences can be made about the adherence of Digital Bathymetric Models to reference data from the comparison of their statistical summaries (OLEA, 2009; MUKHERJEE *et al.* 2012; FLORENTINO; PIMENTEL; NETO, 2019). In this work, descriptive statistics (maximum, minimum, mean, median, mode, standard deviation, vertical Root Mean Square deviation and kurtosis) of the discrepancies between the analyzed DBM and the reference bathymetric data were computed and compared. A multiseries plot are also presented for better visualization of the results.

#### 5.2.2.2 *Regression Analysis and Calculation of Correlation Coefficient*

Regression analysis and calculation of Spearman's correlation coefficient are bivariate statistical that measure the statistical dependence (or adherence) between an independent variable "x" and a dependent variable "y", resulting in a linear mathematical model of association between the variables (TRAUTH, 2015; BUSSAB; MORETTIN, 2017). In this work, such analyzes were applied to measure the linear dependence between the DBM under test and the reference bathymetric data. Although useful and widely disseminated in the literature, care must be taken when using these statistical tools. It should be considered that these are only preliminary indicators of the straightness with which two variables are related (TRAUTH, 2015).

#### 5.2.2.3 *Vertical Uncertainty Map*

This step consisted of locating on a map the magnitude and spatial distribution of vertical uncertainties between the digital surfaces under test and the reference data. It was chosen to use the module of percentages related to the depths of the reference data to quantify the uncertainties. Thus, the uncertainty map represents the adherence of the analyzed pixels of the DBM to the reference data, in percentage. The representation of discrepancies in magnitude (meters) is less interesting, since an error of 10 m at a real depth of 20 m represents a difference of 50%, resulting in a very wrong estimate of reality. The same error of 10 m at a depth of 2000 m represents 0.5%, resulting in a depth estimate of two orders of magnitude closer to reality.

#### 5.2.2.4 *Bathymetric Profile Graphs*

With the application of the technique, it is possible to visually compare the adhesion of the modeled surfaces to the reference data, as well as the correlation of the DBMs and reference data with each other. According to Florentino *et al.* (2019), the comparison can be made visually, by direct measurements on the profiles arranged in the same graph, or even by calculating the areas below and above the reference profile compared to the other profiles. For this work, the topographic profiles were compared only visually and by direct measurements on profiles arranged in the same graph, since the other applied DBM analysis tools provide enough material for proper evaluation of the DBMs.

### 5.2.2.5 Difference Surface Maps

As mentioned before, the Difference Surface Maps were generated in two moments. First, it was made to quantify the changes in the LEPLAC DBM arising from the surface update after applying the analysis tools. At the end of the study, another Difference Surface Map was generated, this time aiming to quantify and spatially localize the advances brought to Brazilian bathymetry by the launch of the LEPLAC DBM for the study area.

### 5.2.3 Reference Data

In order to carry out the comparative analyses, 2778 km of linear data from multi- and single-beam echosounders were used, ranging from bathymetric elevations from 20 to 2500 m, in addition to two DBM from multi-beam bathymetry on the slope of the Santos Basin (Mount Alpha Crucis and Campos de Pockmarks, published in de Mahiques *et al.*, 2017 and MALY *et al.*, 2019) (Figura 5.2). These data were collected by N/Oc Alpha Crucis in surveys from the University of São Paulo and the Federal University of Santa Catarina and are independent of the LEPLAC surface production.

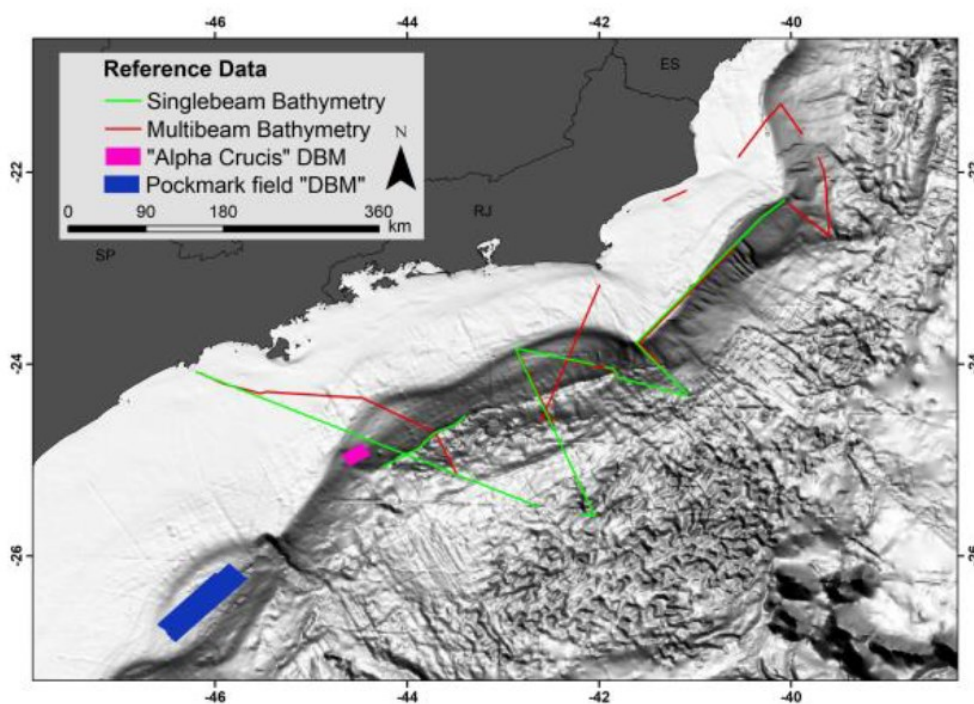


Figure 5.2 Location Map of the Reference Data

To apply the analysis tools 1, 2 and 3, the spatial resolutions of the DBM (Table 5.1) under test and the reference data were normalized, according to Marks *et al.* (2011) and Abramova (2012). The need for this step is based on the assumption that each pixel under analysis of the DBM were compared to only one (1) measure of each reference data. Likewise, for the comparison of results found for the different bathymetric surfaces analyzed to make sense, these must be applied to corresponding locations in all DBM. For this purpose, the data with the highest spatial resolution were subsampled for the resolution of the LEPLAC DBM (900 m) by applying spatial averages.

Table 5.1 Spatial Resolution of the Dataset Used in the Present Work.

<b>Data</b>	<b>Spatial Resolution (m)</b>
LEPLAC	900
SRTM15+ V 2.0	400
Multibeam bathymetry (OBS)	50
Singlebeam bathymetry (OBS)	100
Alpha Crucis DBM	50
Pockmark Field DBM	30

### 5.3 RESULTS

For this publication, the description of the results found is succinct and summarized. Therefore, it is divided into 4 sub-items: Statistical Summary of the Analyzed Bathymetries; Artifacts Identification, Update and Reassessment of the LEPLAC DBM and Advances Brought by the LEPLAC DBM to the Southeastern Margin of Brazil.

#### 5.3.1 Statistical Summary of the Differences between the assessed DBMs and the Reference Data

The statistical summary and their respective multiseriers plot of uncertainties between analysed DBMs and reference data are shown in Table 5.2 and Figure 5.3. The values of central tendency close to zero show that both the LEPLAC DBM and the SRTM15+ V 2.0 DBM are well suited to the reference data. The presence of spurious data in the LEPLAC DBM is

evidenced mainly by the minimum discrepancy value (-310.9%) and the high dispersion measurement “range” (328.2%). But also, relatively high standard deviation and RMS (17.8% and 27.7%, respectively) suggest that the discrepancies are somehow heterogeneous in relation to the trend measures central.

The multiseriess plot shows that the dispersion measurements of the LEPLAC DBM are highly influenced by the presence of few outliers. Despite the uncertainty of maximum magnitude of the SRTM15+ V 2.0 is lower than the observed for the LEPLAC DBM, the uncertainties of the first surface are more heterogeneous than the second, presenting more times uncertainties of intermediate magnitude.

The updated LEPLAC DBM statistical summary and the multiseriess plot of the uncertainties sample indicates a consistent improvement in these parameters, achieving superior results compared to the other DBMs.

Table 5.2 Statistical Summary of the Vertical Uncertainties between the analyzed DBMs and Reference Data, in percentage.

<b>“n” = 2298</b>	<b>Reference – LEPLAC (%)</b>	<b>Reference – Updated LEPLAC (%)</b>	<b>Reference – SRTM15+ V 2.0 (%)</b>
Minimum	-310.9	-55.7	-139,1
Maximum	17.3	18.75	28.6
Average	-2.0	0.9	-2.5
Median	-0.4	-0.3	-0.3
Mode	0	0	0
Standard Deviation	19.2	4.95	16
Range	328.2	74.5	167.7
Root Mean Square	27.7	5	16.14

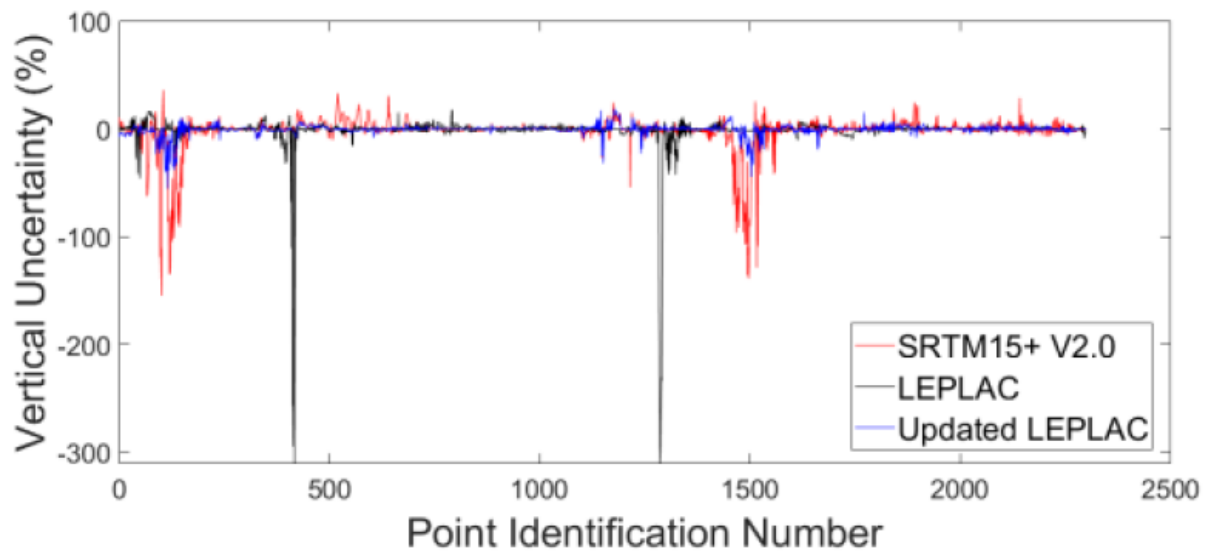


Figura 5.3 Multiseries Plot of the Samples "LEPLAC Vertical Uncertainty", "Updated LEPLAC Vertical Uncertainty" and "SRTM15+ V 2.0 Vertical Uncertainty", in percentage of the reference data depth.

### 5.3.2 Artifacts Identification

The map identification of the spurious depth regions was possible mainly due to the analyzes of the Vertical Uncertainty Map and the Bathymetric Profile Graphs, shown in Figures 5.4 and 5.5.



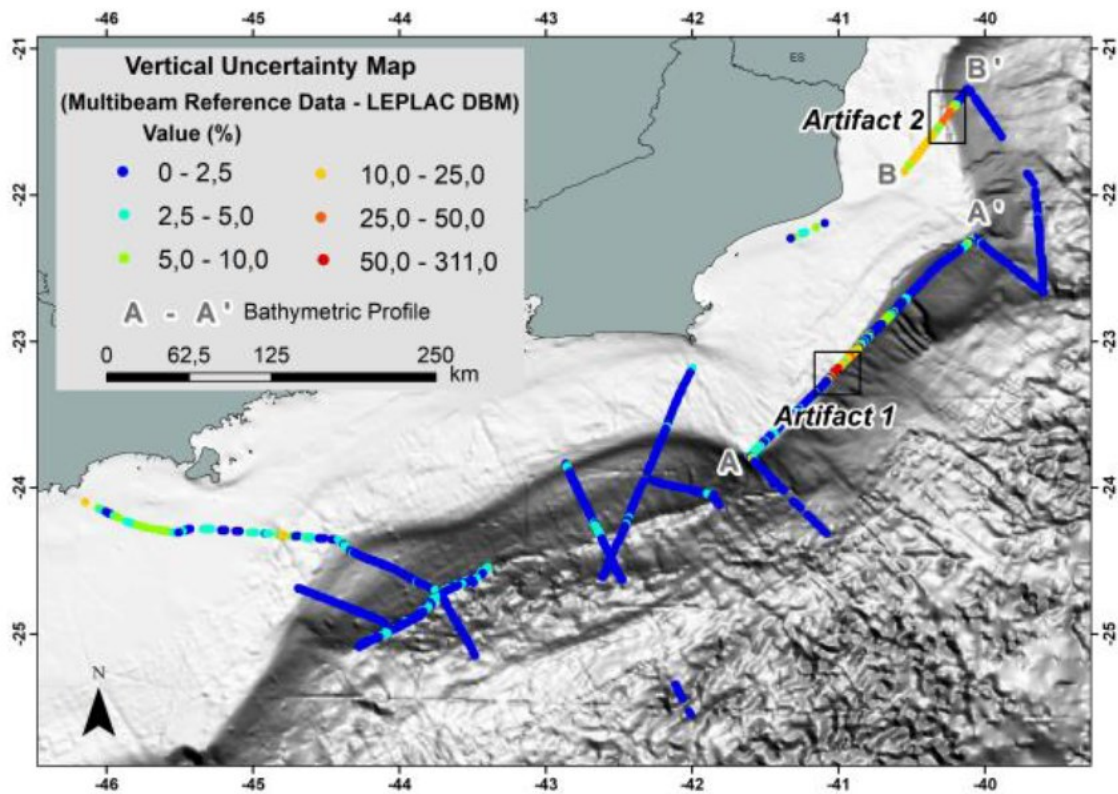


Figure 5.4 Vertical Uncertainty Map of the LEPLAC DBM and identified Artifacts.

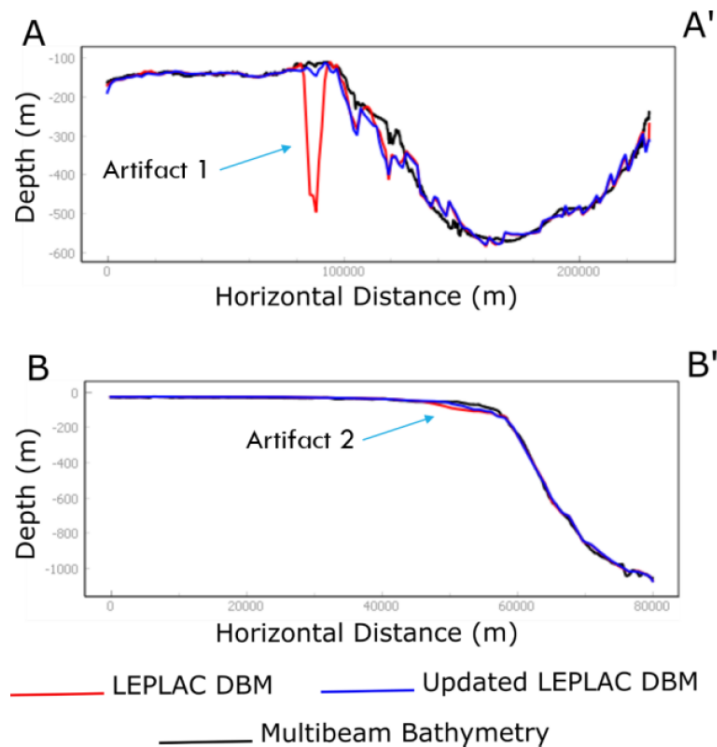


Figure 5.5 Bathymetric profiles depicting Artifacts 1 and 2 in the LEPLAC DBM. Profiles located in Figure 5.4.

### 5.3.3 Update and Reassessment of the LEPLAC DBM

After communicating the existence of the two possible artifacts in the LEPLAC DBM to DHN, they investigated and confirmed their existence. A new 1000 x 1000 m spatial resolution grid was generated containing, in which in addition to artifact correction, some new input data from acoustic soundings were also used.

The reassessment of the Updated LEPLAC DBM showed significant improvement in the region analyzed by the reference data, as shown in the Bathymetric Profile Graphs shown in Figure 5.6 and Difference Surface Map shown in Figure 5.7.

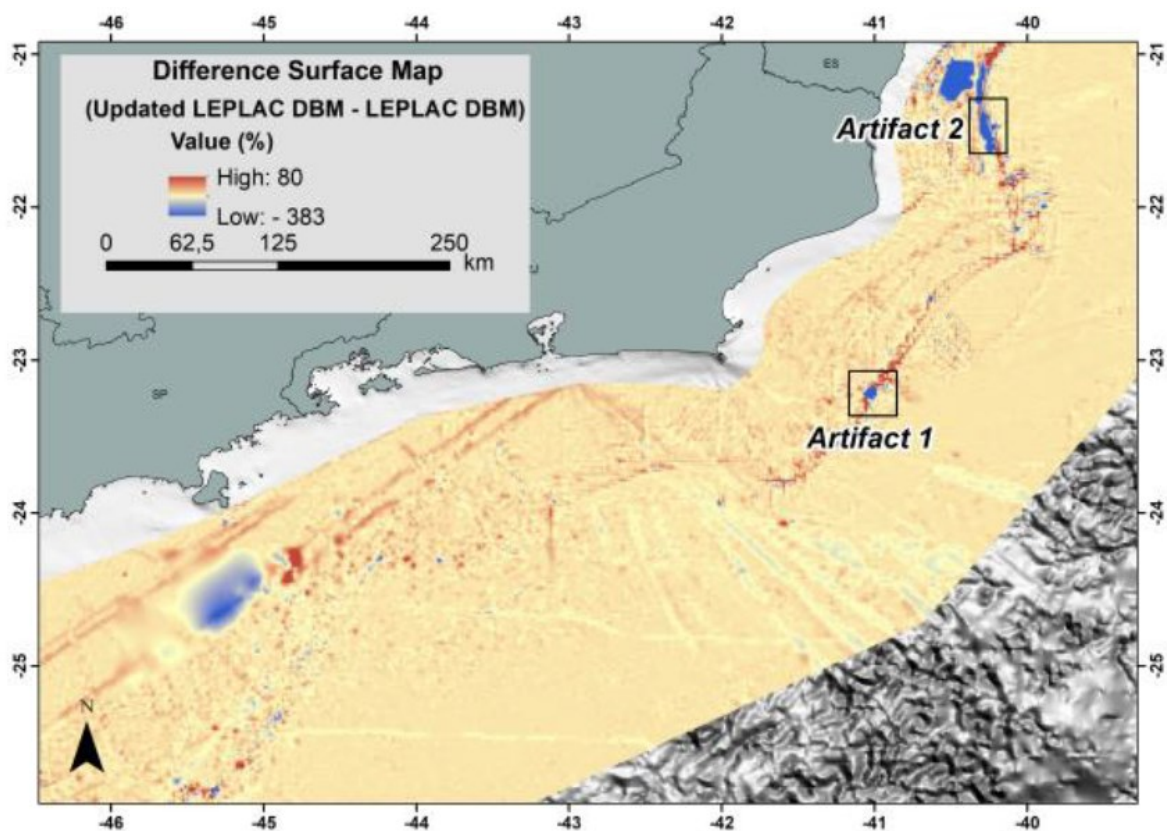


Figure 5.6 Difference Surface Map between the Updated and the former LEPLAC DBM.

### 5.3.4 Advances Brought by the LEPLAC DBM to the Southeastern Margin of Brazil

LEPLAC DBM showed better qualitative and quantitative indicators in all tests performed, compared to the SRTM15+ V 2.0 DBM. For this reason, it was taken as a reference, from which the SRTM15+ DBM was subtracted, resulting in the Difference Surface Map (Figure 7).

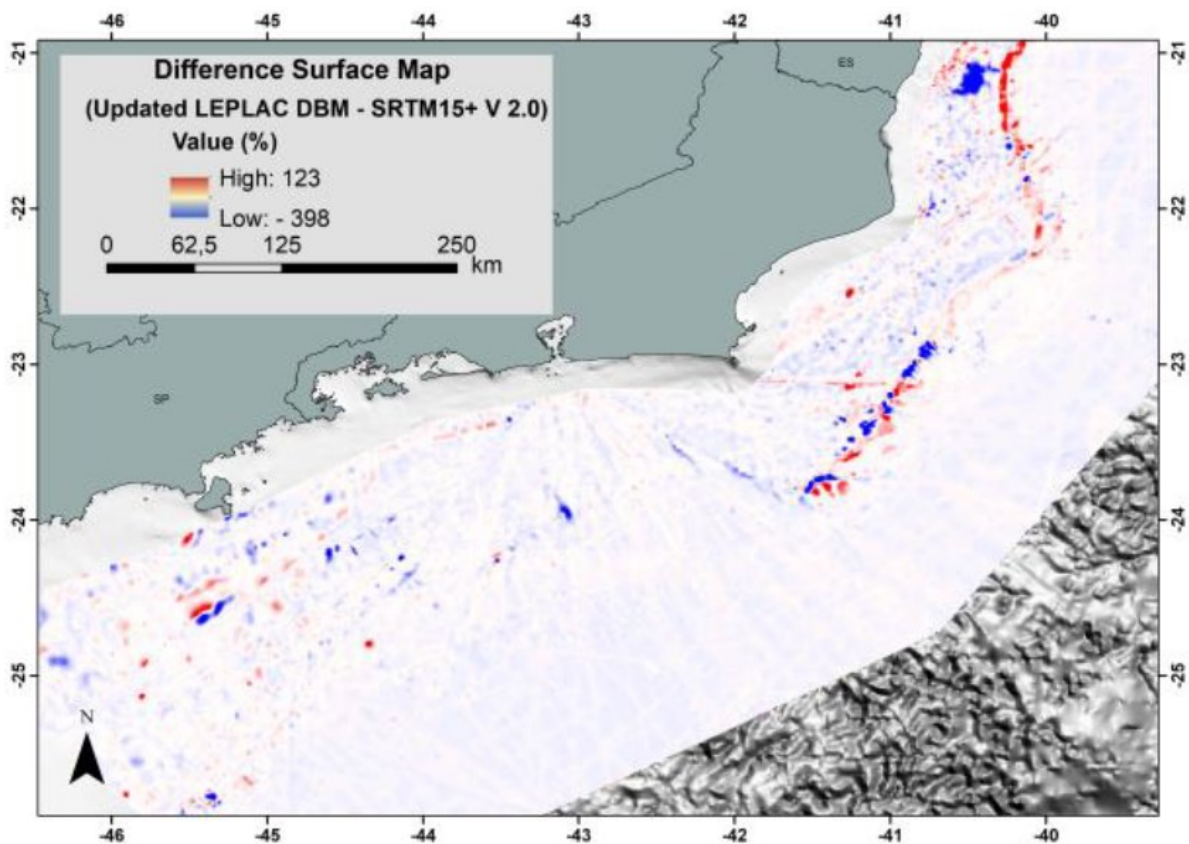


Figure 5.7 Difference Surface Map between the Updated LEPLAC DBM and the SRTM15+ V 2.0 DBM.

The results show negative differences of more than 390% and positive differences of more than 80% between the two surfaces. The DBM SRTM15+ V 2.0 shows up with numerous linear artifacts from oversampling of acoustic sounding data, compared to depths from inversion of altimetric radar data in adjacent areas. These artifacts have depths close to 60 m and are distributed throughout the study area. This analysis demonstrates some of the greatness of the advances for Brazilian marine cartography arising from the publication of the LEPLAC DBM in 2019, the result of decades of joint effort by several Brazilian institutions, under the tutelage of the DHN. Furthermore, it demonstrates the importance of promoting long-term strategic scientific projects to achieve solid results.

#### 5.4 CONCLUSIONS

The application of the Recommended Workflow for Analysis of Bathymetric Surfaces managed to identify two specific artifacts, in the region of the shelf break, which were immediately corrected by LEPLAC team. The results and experience were positive and of interest of both parts, university and the LEPLAC team.

Considering the extension of the Brazilian continental margin, the high cost and difficulties of acquiring new acoustic data, and the intensive volume of acoustic bathymetry data collected annually by universities, the authors consider that this type of interaction must be encouraged and could happen more often, benefiting both sides.

**6 ARTIGO SUBMETIDO À REVISTA “GEO MARINE LETTERS”: TBDEM-  
DERIVED NETWORK OF VALLEYS IN NORTH SANTOS BASIN AND IT’S  
GEOLOGICAL EXPRESSION**

Fábio Barros Curado Fleury<sup>1</sup>, Deivid Cristian Leal Alves<sup>2</sup>, Antonio Henrique da Fontoura Klein<sup>1</sup>. <sup>1</sup>Coastal Oceanography Laboratory of the Federal University of Santa Catarina; <sup>2</sup>State University of Mato Grosso do Sul.

Esta seção é destinada a apresentação do artigo científico desenvolvido e submetido a revista: *GeoMarine Letters*, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de mestre em Oceanografia pela Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, SC

2022

## ABSTRACT

This research investigates the applicability of a hydrological modeling tool in a Geographic Information System for mapping the “onshore - offshore” Drainage Network preserved in the Santos Basin. The objective was to map the Network of Interconnected Submarine Valleys (NISV) between the continent and the lower slope, in order to subsidize the prospection of channeled features and provide insights into the geological hazards in deep waters. For that, a Digital Topobathymetric Model (MDTB) with a spatial resolution of 1000 m was generated for the southeastern margin of Brazil, which was confronted with single and multibeam bathymetry data, resulting in Average Vertical Uncertainties of 2% between the bathymetries. From this MDTB, NIV were extracted, which, in turn, were validated by multiscale seismic datasets that cut these drainages, in addition to data from the literature. This validation was carried out between the isobaths of 10 and 2200 m. After locally validating the existence (or not) of the valleys, they were geologically classified according to their seismic expression. Predominantly, the drainages that occur in the Continental Shelf present seismic expression of incised valleys, sometimes filled. On the contouritic dominated Continental Slope, for the most part, the drainages do not present a correlation with low bathymetric (valleys) observed in the seismic profiles. However, in the extreme south and north of the study area, the existence of drainage coincides with conspicuous canyon systems and channeled Mass Transport Deposits for portions of the middle slope, associated with regional halokinetic faults. It is concluded that this product is effective in mapping Underwater Valleys Network, but it must be accompanied by validation by seismic data to confirm the actual local occurrence of valleys. The interpretation of this product, however, is not straightforward, considering the palimpsest nature of the submarine relief, in which the same drainage, in different isobaths, will present different geological controls for its existence.

## 6.1 INTRODUCTION

Digital Elevation Models (DEM) are widely used in continental areas in order to delineate streams, rivers and basins (eg. OLIVEIRA *et al.*, 2019; WU *et al.*, 2019; BIGELOW; PENDA; PEARCE, 2016). However, in submerged environments this technique is not so commonly used, since the interpretation for this type of environment is not as trivial as in continental environments, being even quite controversial. The difficulty in interpreting these products in submerged environments is related to the fact that the Network of Interconnected Submarine Valleys (NISV) are generally relics and/ or palimpsest structures (HARRIES *et al.*, 1996; FRANCIS *et al.*, 2014). That is, the different landforms that result in the present-day NISV are not formed in the same geological time interval. Some of these structures are currently formed (structures formed by current/active processes), while others were formed by ancient processes (structures formed by climatic, oceanographic and/or tectonic conditions that do not act in present days or do not predominate in the present days) and other are the result of ancient processes reworked by processes that take place nowadays (BLOOM, 2002).

In Santos Basin, the extraction of the present-day NISV based on DEM on Continental Shelf (CSh) setting and its geological significance have been addressed by few authors (e.g. CONTI; FURTADO, 2006; ARTUSI; FIGUEREDO, 2007; CONTI, 2009; and others). Broadly, they have interpreted the present-day NISV to be related to the drainage systems associated to the Last Glacial Maximum (LGM), when the CSh had its maximal exposure and the continental rivers used to discharge sediments on the Continental Slope (CSl) But, as the referred authors suggests, these structures that would represent the paleo drainage network referring to the last episode of maximum subaerial exposure are much like to be reworked and covered at different levels and different types of sediments, as a result of the Last Marine Transgression (LMT), episodes of higher frequency sea level oscillations and action of bottom currents. Although no scientific paper have been published regarding the present-day NISV on the Upper/ Lower Continental Slope (UCSl/ LCSl), it's broadly known that the notches that once received sediments from the shelf's paleochannels and served as sedimentary bypass corridors between CSh and Continental Slope Foot (CSlF), have lost their connection with continental sedimentary sources after drowning of the shelf that culminated in the present-day shoreline (E.g. COELHO, 2014). Furthermore, CSl and CSlF are subject to intense reworking

by episodes of sedimentary rupture resulting in Mass Transport Deposits (MTD) and action of intense bottom currents (e.g. COELHO, 2014).

In addition to all these interpretation difficulties, it is known that the Santos Basin has several significant geological faults and present-day geomorphology associated with salt tectonics (MOHRIAK; MACEDO; CASTELLANI, 1995; MEISLING; COBBOLD; MOUNT, 2001; COBBOLD, MEISLING; MOUNT, 2001; DUARTE; VIANA, 2007; MOHRIAK; SZATMARI; ANJOS, 2009; MAHIQUES *et al.*, 2022) and, in the last 40 years, numerous earthquakes have been identified and mapped (MEISLING; COBBOLD; MOUNT, 2001; COBBOLD, MEISLING; MOUNT, 2001; ASSUMPÇÃO *et al.*, 2011; REIS *et al.*, 2013; REDE BRASILEIRA DE SISMOLOGIA, 2022). The interpretation of the meaning of the present-day NISV is still hampered by the fact that regional submerged DEMs generally have lower spatial resolution than the DEMs of continental areas. Also, as found in the works of Conti & Furtado (2006) and Conti (2009), submarine valleys tend to be found infilled in the CSh. Finally, it can be said that the assessment of the geological and hydrological significance of the NISV (generally based on indirect data such as seismic or high-resolution bathymetry) is much more complex than the validation of continental drainage networks (generally based on direct sampling in the field).

The objective of this work is to map and interpret the geological significance of the present day NISV that connects the adjacent Continental areas of Santos Basin to the Lower Continental Slope/ São Paulo Plateau. The hypothesis that motivates this work is that the present NISV derived from a regional TBDEM may serve as a cartographic guide for prospecting paleochannels (buried channels) in the Continental Shelf, as canyons, Mass Transport Deposits, salt domes and basins, as also outcropping faults in the Continental Slope.

The hypothesis was tested by confronting the geographic location of the Digital Topobathymetric Model (DTBM)-derived NISV to multiscale seismic data. The confrontation was meant to, at first, confirm (validate) if the location of the extracted valleys (streams) corresponds to a real bathymetric low in the seafloor. Second, to interpret (classify) the subsurface geological structure that may control the validated topographic lows, checking for the occurrence of buried channels, canyons and outcropping faults associated to the streams or other geological structures.

The Upper and Lower Continental Slopes (UCSl & LCSl) of the study area are inhabited by a vast number of anthropogenic structures built to meet the demands of oil



exploration fields and plays. The major geological structures that control the geometry and bathymetry of this part of the basin are controlled by salt tectonics, which in turn has its major fault structures been in part controlled by reactivation of basement faults inherited from the precambrian crystalline basement during the rift stage (MEISLING; COBBOLD; MOUNT, 2001; COBBOLD, MEISLING; MOUNT, 2001). This region of the Brazilian margin, which coincides with the extension of the São Paulo Plateau, has been reported to be tectonically quite active in distinct periods, including present day (MEISLING; COBBOLD; MOUNT, 2001; COBBOLD, MEISLING; MOUNT, 2001; ASSUMÇÃO *et al.*, 2011; ALMEIDA; KOWSMANN, 2015; REDE BRASILEIRA DE SISMOLOGIA, 2022). Also, this region has conspicuous erosional and depositional features associated to the persistent action of strong bottom currents (VIANA 2002; DUARTE; VIANA, 2007; DOS REIS *et al.*, 2013; MAHIQUES *et al.*, 2022) and with common occurrence of Mass Transport Deposits (MTD) (ASHABRANNER; TRIPSANAS; SHIPP, 2010). In addition to mapping paleochannels associated with the Last Glacial Cycle (LGC) on the CSh, the final product of this work is also an useful regional cartographic product for understanding and predicting the dynamic of regional gravitational driven processes that may pose risk for anthropogenic structures related to oil exploration in deep waters.

## 6.2 GEOLOGICAL SETTING

The study area is located in the Southeastern margin of Brazil (Figure 6.1), offshore Rio de Janeiro and northern São Paulo States. It's limited to the West by the 1200 m high Serra do Mar coast-parallel ranges and extends to -3200 m offshore, in the São Paulo Plateau. It lies mostly in the geological context of the northern Santos Basin, an Early Cretaceous-to-present sedimentary basin that hosts a significant amount of the Brazilian oil reserves. Santos basin is part of an oil-rich large igneous-carbonate-salt province of the South Atlantic rift that progressively, from south to north, divided the Gondwana Supercontinent into Western and Eastern Gondwana blocks (FETTER, 2009; SZATMARI; MILANI, 2016). The rifting structures and its subsequent episodes of reactivation from the Albian to the Miocene, including salt tectonics, inherited the main Proterozoic orogenic trends (NE - SW & NNE - SSW) and heterogeneities of the Ediacaran Ribeira Belt, as so Vitória-Colatina Belt (SCHALLER, 1973; ALMEIDA; BRITO NEVES; FUCK, 1981; CHANG; KOWSMAN; FIGUEIREDO;

BENDER, 1992; FETTER, 2009; MEISLING; COBBOLD; MOUNT, 2001; COBBOLD, MEISLING; MOUNT, 2001; SZATMARI; MILANI, 2016).

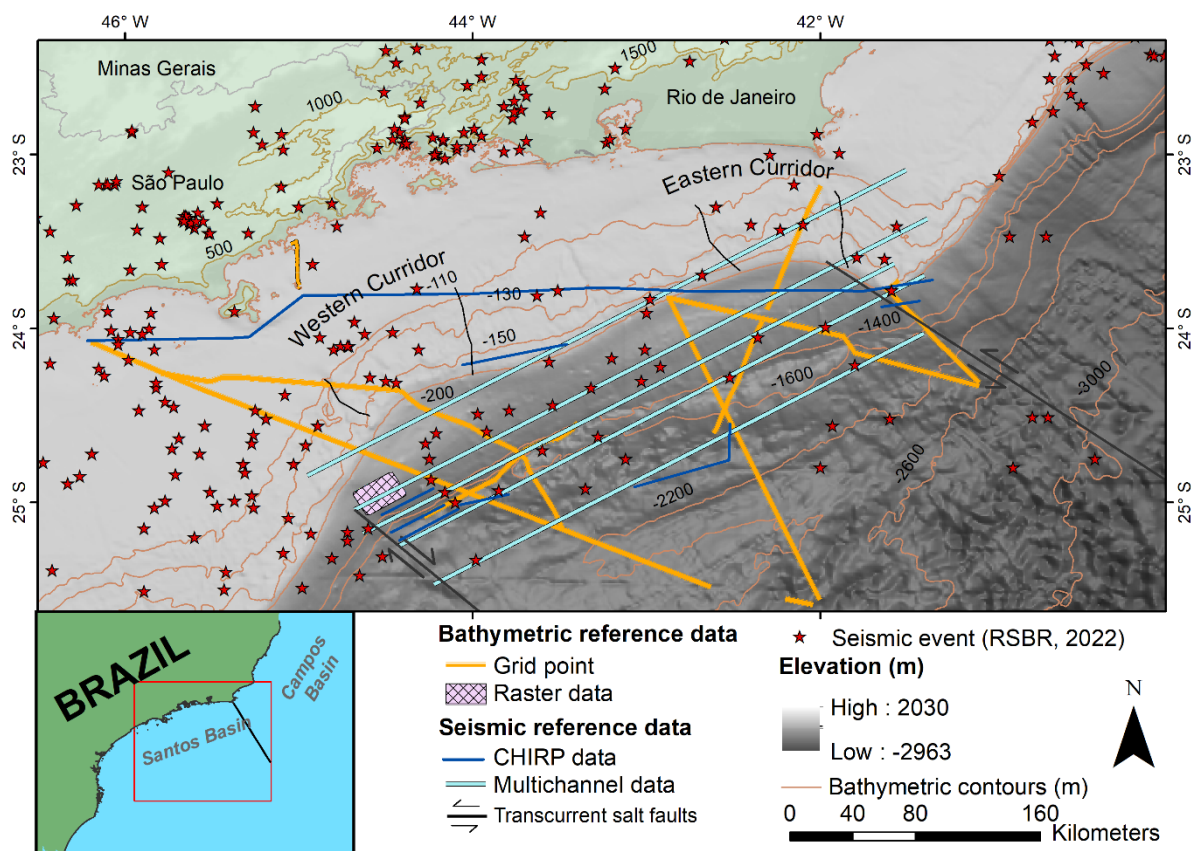


Figure 6.1 Location map of the study area. Bathymetric and CHIRP datasets acquired by Alpha Crucis Oceanographic Vessel, multichannel seismic datasets provided by the National Agency of Oil, Gas and Biofuels (ANP), seismogenic events compiled by the Brazilian Seismographic Network (2022) and transcurrent salt faults mapped by Meisling et al. (2001). Black lines represent the Western and Eastern Corridors mapped by Dos Reis *et al.* (2013).

The basin records a rift stage, between the Hauteruvian and Barremian Stages, followed by a transitional stage, characterized by extensive evaporite deposition during the Late Albian, and, since then, it's under open marine stage conditions (PEREIRA; MACEDO, 1990; MODICA; BRUSH, 2004; DUARTE; VIANA, 2007). The sediment fill history of the open marine stage is complex and was strongly controlled by the non-orogenic uplift of the Serra do Mar in the Late Cretaceous. The uplift resulted in the capture and reorganization of the Paraíba do Sul Drainage System (PSDS) off to Campos Basin (COBBOLD, MEISLING; MOUNT,

2001; MANTOVANELLI *et al.* 2018), in the north, and Paraná River, in the west (RICCOMINI; SANT'ANNA; FERRARI, 2004; COGNÉ *et al.*, 2012), culminating in the present day geometry of the coast-parallel drainage system (MODICA; BRUSH, 2004). After the capture of the PSDS, the central and northern Santos Basin was starved and drowned, presenting shelf edge backstepping of more than 50 km (COBBOLD, MEISLING; MOUNT, 2001; MODICA; BRUSH, 2004; COGNÉ *et al.*, 2012). Despite this post-Miocene deprivation of a major fluvial sources of siliciclastic sediments, the external continental shelf, shelf break and slope of the basin accumulated thick sedimentary successions of terrigenous sediment since Late Paleogene (DUARTE; VIANA, 2007; MAIA *et al.*, 2010; DOS REIS *et al.*, 2013), shaped as sigmoidal clinoform sediment drifts, interpreted as depocenters of sediments transported by persistent geostrophic and wind driven currents (DUARTE & VIANA, 2007; SCHAEFFNER *et al.*, 2018), mostly originally derived from the De la Plata Estuary (MAHIQUES *et al.*, 2008; MOLLER; PIOLA; FREITAS; CAMPOS, 2008; NAGAI *et al.*, 2014).

### 6.3 PHYSIOGRAPHY AND SHALLOW STRATIGRAPHY

The physiography of Santos basin was first described by Zembruski & Chaves (1979), which defined the major provinces (continental shelf, upper and lower slope and São Paulo Plateau) and mapped the most conspicuous geomorphic features in a 1:3500000 scale map. The association of the Pleistocene to Holocene window to the controls on the shelf's low frequency topography was first discussed by Kowsmann *et al.* (1979), which identified evidences of channel infilling, topographic levelling and redepositions. However, Pleistocene to Quaternary stratigraphy (~300 msec) of the continental shelf would be formally characterized only around four decades later by Maia *et al.* (2010), as such it's influence on the high frequency topography of the continental shelf (DOS REIS *et al.*, 2013).

Maia *et al.* (2010) identified two major sets of seismic sequences Set I (SqA-SqC) and Set II (Sq1-Sq5), interpreted as a succession of depositional sequences and erosive surfaces induced by repeated glacioeustatic cycles within the Plio-Quaternary window. Correlation between the author's data and the  $\delta^{18}\text{O}$  isotopic "sea-level curves" presented by Rabineau *et al.* (2006) suggested that sequences Sq1-Sq4 are fourth-order forced regression sequences that record 100-120 kyr glacioeustatic cycles for the last 440-500 kyr, while the uppermost unit Sq5 would correspond to transgressive and highstand deposition during Holocene. The architectural

interpretation of Sequences Sq4 and S5 from Maia *et al.* (2010) was revised and reinterpreted by Dos Reis *et al.* (2013) based on newly obtained high-resolution CHIRP profiles. The authors interpreted Sq4 as a Highstand System Tract topped by a surface formed by forced-regression during MIS 3 and MIS 2. On the other hand, Sq5 is interpreted as a transgressive siliciclastic sheet, which covers the entire shelf landward of the 150 m isobath, being the product of the latest Pleistocene-Holocene gradual deposition resulted from the last glaciation. Also, the widespread fluvial incision-infilling patterns recognized on the western shelf sector of Santos basin in Sq4 and the thicker Sq5 in this same place, indicate relatively higher sediment supply to this sector after the Last Glacial Maximum (~20 kyr). In the inner shelf, Sq5 is expressed as prism like features at 20, 30 and 40 m isobath off Guanabara Bay and elongated and laterally-discontinuous higher-gradient steps at the 50, 60 and 70 m isobaths.

Dos Reis *et al.* (2013) also identified three major regional escarpments that coincides with the 110, 130 and 150 m isobaths. The 100 m isobath features a clear transition of regional scale morphological styles in present-day continental shelf seafloor, limiting the inner and mid-to-outer shelves. It is marked by the presence of a high gradient ( $0.2^\circ$ ) seafloor step that divides the landwards smooth and lobate morphology from the basinwards “step-like” morphology. Landwards of the isobath, shelf morphology is lobate and smooth, interpreted as the imprint of the highstand deposition of Sq4, featuring a succession of nine elongated to semicircular sediment bodies roughly at the 20/30, 40/50 and 60/70 isobaths, specially off Ilha Grande, Sepetiba and Guanabara bays. From the 100 m isobath to the shelf break (average of 170 m in the study area) the shelf gradient decreases to about  $0.023^\circ$  to  $0.051^\circ$ , and the seafloor features three major regional step-like escarpments along the mid and outer shelves.

These step-like escarpments are interpreted to be related to the basinward migration of Late Pleistocene coastlines along the continental shelf, formed in a regressive scenario under oscillating and relative slow sea level fall during the Last Glacial cycle. The steps are fairly continuous terrace-like features located in the 110, 130 and 150 m isobaths. The 110 m isobath escarpment is interpreted as erosional imprint of offlapping stepped forced regressive wedges; the 130 m escarpment is the register of the shoreline position during the Last Glacial Maximum; and the 150 m isobath escarpment is interpreted to be an erosional response to the shelfward migration of the Brazil Current, resulted from the sea-level rise during the last transgression (Dos Reis *et al.*, 2013). The authors also identified two main NW-SE oriented elongated depressions in the mid-outer continental shelf, named Western and Eastern Corridors,

interpreted as zones of enhanced fluvial erosion of the sequence Sq4. The corridors seem to play a role in controlling sinuosity and lateral continuity of the afore mentioned escarpments, suggested by the more sinuous trace of the -110 and -130 m escarpments within the Eastern Corridor, and total absence of both within the Western Corridor. Another evidence for the enhanced erosion within these corridors is the seismic pattern of fluvial incision-infilling that are widespread from the inner to the outer shelf.

The role of regional and long-term action of geostrophic currents in controlling sedimentation and shaping present-day bathymetry of Santos basin from mid-Miocene to present in the Southeastern margin of Brazil is quite significant, and is discussed in the papers of Viana (2002), Duarte & Viana (2007), Schaettner *et al.* (2018) and Araújo *et al.* (2021) and references therein. The Continental Slope of the study area features a conspicuous 100 km long channel-like gutter that marks the division of upper and lower slopes, known as “Santos channel”, at around the isobath of 1400 m. Another regional erosive channel-like structure is seen in the São Paulo Plateau, the São Paulo Channel. Its genesis is interpreted to be related to the forced transfer to deeper isobaths of the main axis of the bottom current that eroded the Santos Channel after the reorganization of the margin physiography. Associated with those channels are two major contouritic drifts that accumulated in response to the different combinations of bottom current axis position and slope physiography (Duarte & Viana, 2007; Viana *et al.* 2002). Secondarily to its contouritic origin, Santos Channel has been reported to locally play a role as gravitational sediment trap, as the partially captured multidirectional Mass Transport Deposit (MTD) mapped by Ashabanner *et al.* (2010) suggests. The sedimentation system composed by both Santos and São Paulo channels and its associated contouritic sediment drifts that makes up most of northern Santos basin continental slope is called Santos Drift System (SDS), and is interpreted as the result of long-term action of geostrophic currents (VIANA, 2002; DUARTE; VIANA, 2007).

#### 6.4 DATABASE AND METHODS

This work was conducted according to the flowchart presented in Figure 6.2. All cartography, spatial analysis and spatial scale normalization were conducted in ArcGIS 10.2, while the uni and bivariate statistics and graphs were generated in MATLAB R2014a.

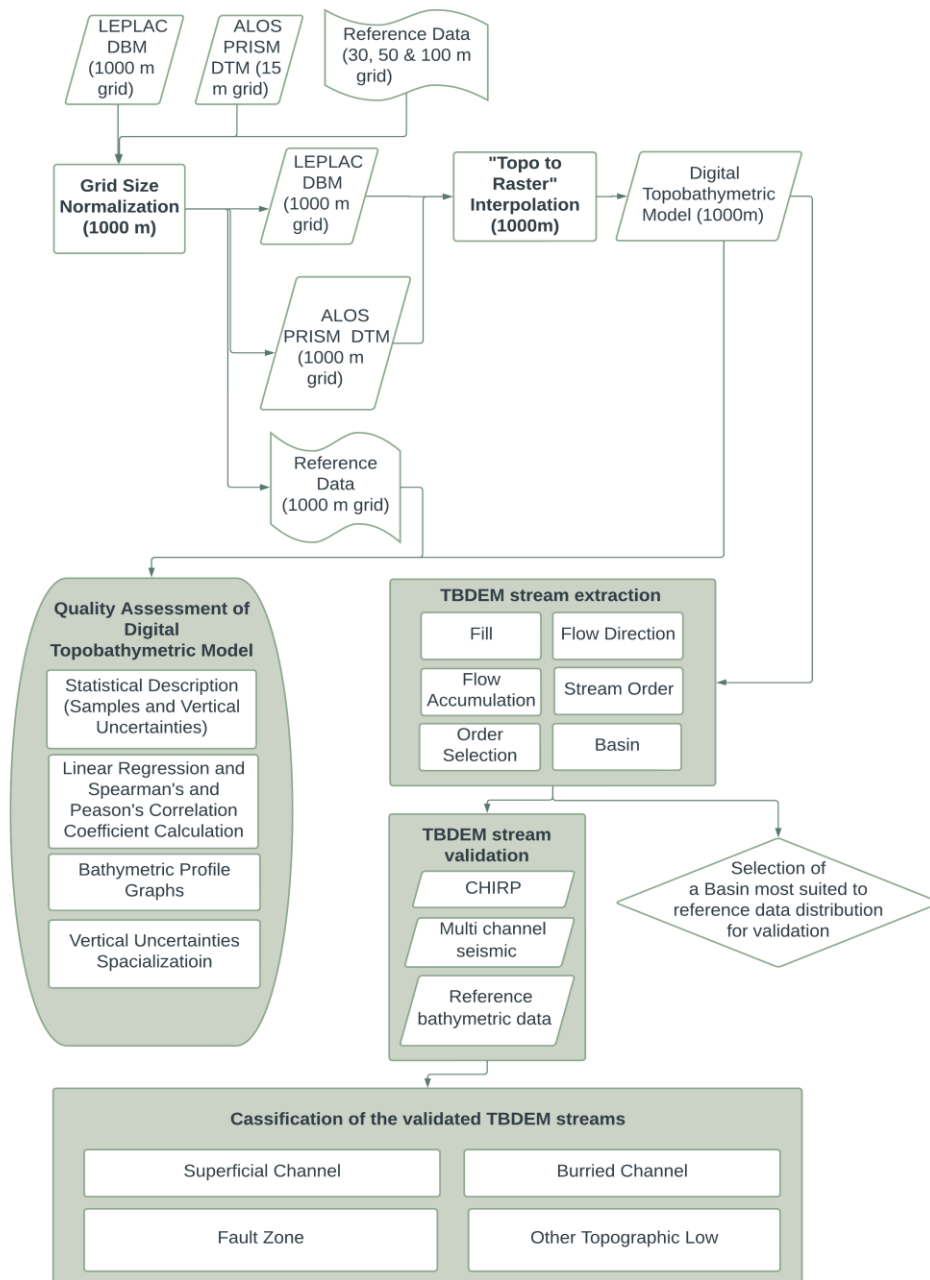


Figura 6.2 General flowchart of the research.

In order to build a seamless digital elevation surface that connects the inland and offshore Santos Basin, a 1 km grid Topobathymetric Digital Elevation Model of Southwest Brazil (TBDEM) was generated. The topographic and bathymetric elevation data used to build the TBDEM was, respectively, the 15 m spatial resolution ALOS PRISM Digital Elevation Model (ALOS DEM) (TODONO *et al.*, 2014) and the 1000 m grid of the latest available version of the LEPLAC Digital Bathymetric Model (LEPLAC DBM) (ALBERONI; JECK; SILVA;

TORRES, 2019). The interpolation between both ALOS DEM and LEPLAC DBM was done using ESRI's "Topo to Raster", an interpolation tool based on the ANUDEM interpolator (HUTCHINSON, 1989; HUTCHINSON; XU; STEIN, 2011). This tool uses a multi-scale iterative finite difference interpolation technique (ANUDEM) that tries to eliminate spurious sinks (cells that have an undefined drainage direction) and voids (patches of missing values in the raw DEM) (REUTER; HENGL; GESSLER; SOILLE, 2009). Also, a drainage enforcement algorithm that infer drainage lines from the lower saddle point in the drainage area surrounding each spurious sinks can be also applied by checking the "Reinforce Drainage" box. The theoretical result of the interpolation is a hydrologically corrected DEM, with a connected drainage network (MAIDMENT; MOREHOUSE, 2002).

Prior to the interpolation, in order to normalize the spatial resolution of the digital surfaces, the ALOS DEM was resampled for a 1000 m pixel size, by converting the raster file to points file, applying a rectangular focal statistics of 1000 m for both x and y, and finally converting the points file to raster file again.

Previous to the streamlines extraction, a quality assessment of the vertical uncertainties of the TBDEM was performed, based on the methodology proposed by Florentino *et al.* (2018). This assessment was accomplished based on the comparison of the bathymetric values of the TBDEM to the values found in high resolution bathymetric reference data by applying assessment tools. The assessment tools are mentioned in the box "Quality Assessment of Digital Topobathymetric Models" in Figure 6.2 and a detailed description of each is present in Florentino *et al.* (2018) and Fleury *et al.* (2021).

The high resolution bathymetric reference data used in this study is consisted of single and multibeam datasets acquainted in three distinct geophysical surveys aboard the Alpha Crucis Oceanographic Vessel, from the Oceanographic Institute of São Paulo University (IO-USP): A 50 m spatial resolution and 563 km<sup>2</sup> multibeam grid from the upper slope's elongated "Alpha Crucis Carbonatic Ridge" associated with hydrothermal fluid escape from fracture zones, better described at Maly *et al.* (2018); and 1595 km of 50 m resolution linear single and multibeam data acquainted during the displacement of the vessel during the second geophysical survey of the project "Seismological and Oceanographic Monitoring a Segment in Southeastern Brazil: From Santos Basin's North to Espirito Santo Basin's South".

The same kind of spatial resolution normalization described in the second paragraph of this section was also applied to the reference data, resulting in a 1000 m pixel size version

for each high-resolution bathymetric reference data. This was done in order to have only one reference value for each tested pixel of the TBDEM making it possible to compare the statistical summaries of the samples and build the Vertical Uncertainties Map.

The derivation of NISV out of the TBDEM, cartographically represented by streamlines, was conducted following the steps shown in the box “TBDEM Stream Extraction” (Figure 6.2). The preprocessing tool “Sink” was applied to the TBDEM to identify any spurious sink cells that may exist in this digital surface. The identified sink cells were then filled by applying the “Fill” tool. It’s mandatory to remove all the spurious sinks before modelling water (or sediment) run-off out of a DEM, in a way that a fully connected river network can be extracted (Reuter et al. 2009). The “sink filling” approach is the oldest and still the most commonly used for removing spurious sinks, and it’s done by increasing the spurious sink cell elevation value until the elevation of their lowest outflow point is reached (REUTER; HENGL; GESSLER; SOILLE, 2009).

Following the application of the “sink” and “fill” preprocessing tools, the flow direction of each cell was calculated using the Spatial Analyst “Flow Direction” tool. This tool is based on the “D8” algorithm, also referred to as the method of the steepest descent (O’CALLAGHAN; MARK, 1984; GRUBER; PECKHAM, 2009), and results in an output “Flow Direction grid”. The “Flow Accumulation” tool was used to calculate how many cells drain into each cell of a Flow Direction grid, resulting in a “Flow Accumulation grid”. In this grid, each cell value represents the number of cells that drain into it (MAIDMENT; MOREHOUSE, 2002). Cells of higher values in a Flow Accumulation grid are defined as streams, while cells of lower values are defined as possible sediment supply surface (runoff surface). Finally, the “Stream to Feature” tool was applied, using the classified Stream grid as input, in order to have the streams as vector lines. The basin compartmentation of the drainage network was generated with the “Basin” tool, resulting in a “Basin grid” output, which was later on converted into a “Basin vector” file. The “Basin vector” output was used to delineate the limits of the present Northern Santos Basin’s subbasin and to guide the location of the mono channel seismic acquisition campaigns.

The validation of the TBDEM-derived streams was undertaken through the comparison of geographic locations of the streams to High Resolution Satellite Imagery (HRSI) from Google Earth in the continental portion of the TBDEM and multiscale seismic data (multichannel and CHIRP) in the marine portion of the model. Seismic data was also used for



the classification of the validated streams regarding its geological characteristics. Multichannel seismic data consists of eight strike direction post stack seismic profiles adding up to 1990 km, roughly in strike direction, extending from the outer shelf to the lower slope, with vertical resolution around 25 m (frequency between 10 and 20 Hz), provided by the National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels (ANP). CHIRP profiles (3.5 to 210 kHz) makes up a total of 850 km, roughly in strike Direction, in the CSI and CSI. These data were acquired during one of the geophysical campaigns of the project that “Seismological and Oceanographic Monitoring a Segment in Southeastern Brazil: From Santos Basin’s North to Espirito Santo Basin’s South”.

In the topographic portion of the TBDEM, the objective of the validation process was to check if the location of the TBDEM-derived streams corresponds or not to a present-day river or channel; in the bathymetric portion of the TBDEM, the validation process was meant to check if the location of the TBDEM-derived streams corresponds to a bathymetric low at the sea bottom, and if it does, to classify it according to its geological control. The different classes observed in this work are: superficial channel, infilled channel, pockmark, fault, cropping fault and channelized Mass Transport Deposit (MTD). In both cases, the limitations of resolution (horizontal and vertical) of both the TDBEM and the validation data might be taken into consideration. If a certain TBDEM-derived stream didn’t satisfy the above-mentioned criteria, it was then deleted from the final map and this drainage line was considered to be a result of artifacts in the TBDEM or misjudgment of the hydrological algorithms.

A Bathymetric Position Index (BPI) of the marine portion of the TBDEM was generated in order to highlight the main valleys and hills of the Continental Slope. This product was also used as an indirect way of validating the stream lines of this portion where seismic data are absent. BPI is a geomorphometric product implemented in the ArcGIS tool Benthic Terrain Modeller (RINEHART *et al.*, 2004). Based on the Topographic Position Index (WEISS, 2001), BPI quantifies the landscape structure based on the change in slope position over two scales (ring shaped sampling matrix bounded by two concentric circles that limits the internal and external sampling areas). It results in a quantification of in a relative position index related to where determined location on a bathymetric surface is in relation to the overall seascape (WALBRIDGE *et al.*, 2018). The number of pixels of the internal and external radius of the sampling annulus used in this work was 15 and 60, respectively.

## 6.5 RESULTS

### 6.5.1 Quality Assessment of the Digital Topobathymetric Model

The results of the quality assessment of the Digital Topobathymetric Model generated from the interpolation of the “LEPLAC” Bathymetric Model and the ALOS PRISM Terrain Model are summarized at Table 6.1 and Figure 6.3. It suggests that most of the analyzed pixels of the TBDEM features homogeneously low values of Vertical Uncertainties, expressed by the central tendency measurements and standard deviation values close to zero. Also, minor occurrence of spurious data of maximum magnitude close to 15% of the reference data’s local depth can be inferred from the dispersion measurements. The aforementioned can also be deduced from the numerical values and leptocurtic geometry (kurtosis = 7.79) of the Distribution Histogram of the Vertical Uncertainties (Figure 6.3B). The distribution histogram features skewness values of -0.10, reflecting it’s almost normal-like zero-centered symmetry, with small trend of concentration of negative VU values. It suggests that the TBDEM doesn’t have a distinguished tendency to under or overestimate the sea bottom depth, in comparison to reference data, doing it both with the relatively same frequency.

Table 6.1 Descriptive statistics of the vertical uncertainties of the Digital Topobathymetric Model compared to the reference data.

<b>Number of assessed pixels:</b>	<b>Reference data – DTBM</b>	<b>Reference data – DTBM</b>
<b>2113</b>	<b>(m)</b>	<b>(%)</b>
Minimum	-120	-14.71
Maximum	147	15.15
Average	2.3	-0.21
Median	1	-0.17
Mode	-1	0
Standard Deviation	20.72	2.3
Range	267	29.9

The Vertical Uncertainties Maps (Figure 6.3A) demonstrate spatially the behavior of the VU presented in the statistical description: the TBDEM features a homogeneous relation to the reference data with a low percentage of pixels of higher VU magnitudes. 47.1% of the

analyzed pixels presented VU between 0 – 1% range; 30.9% presented VU between 1 – 2.1% range; 14% between the 2.1 – 4.3% range; 6.8% between the 4.3 – 7.6% range and 1.2 % between the 7.6 – 15.1% range. The magnitude of the VU appears not to be related to specific isobaths interval, as the pixels of higher magnitude occurs throughout all the TBDEM. The same can be inferred from the linear correlation analyzis and calculated correlation coefficients.

The quality assessment of the TBDEM suggests that, in general, this digital surface is homogeneously adhered to the reference data, with fewer local occurence of pixels of higher VU magnitude (outliers). The behavior of the VU values evidence that the TBDEM can, sometimes, flattens a topographic high and skip a topographic low. The apparently disperse spatial distribution of the pixels of higher VU magnitudes suggests that the digital surface may feature local occurrence of bathymetric anomalies (artifacts), probably related to the heterogeneous spatial distribution and nature of the input data used in the gridding processes of “LEPLAC” DBM. These artifacts may result in erroneous derived streams, which may be validated or rejected.

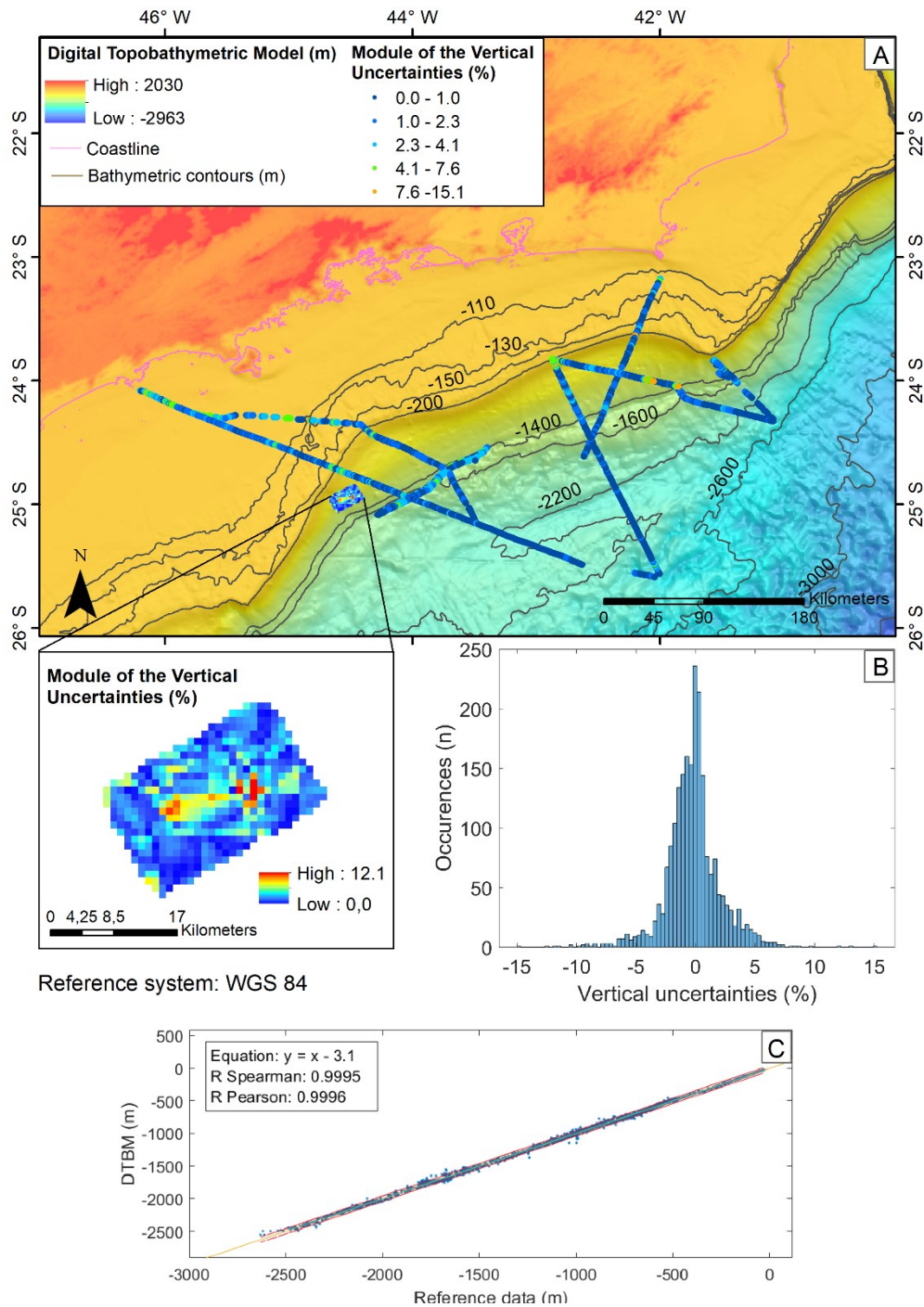


Figure 6.3 A) Vertical Uncertainty Maps between reference data and the TBDM, in module of the reference data's local depth; B) Distribution histogram of the vertical uncertainties, in percentage of the reference data's local depth; C) Linear correlation of the DTBM depth and reference data's depth and respective Spearman's and Pearson's correlation coefficients.

### 6.5.2 TBDEM-derived streams

The extraction of streamlines (NISV) based on the TBDEM resulted in the delineation of a 191187 km<sup>2</sup> basin, subdivided in three catchments, which main features are summarized in Table 6.2. Broadly, the extracted streamlines presented good match to the continental rivers (Figure 6.4 & 6.5) and seismic-interpreted valleys of the study area (Figures 6.5, 6.6 and 6.7).

Table 6.2 Main features of the present-day TBDEM-derived catchments in Northern Santos Basin. CSh: Continental Shelf; UCSI: Upper Continental Slope; LCSI: Lower Continental Slope; MTD: Mass Transport Deposit.

<i>Catchment</i>	<i>Area</i>	<i>Present-day Sediment Sources</i>	<i>Observed Geological Structures</i>
Southern	78774 km <sup>2</sup>	Guaratuba, Jequeriquere, Escuro, Tavares & Grande, Quiririm, Perequê-Açu, Pequeno, Mambucaba, Bracuí, Ariró & Jurumirim, Furado, Itá, Piração.	Superficial and infilled channels (CSh, UCSI & LCSI), faults (UCSI & LCSI), outcropping faults (UCSI & LCSI), channalized MTD (UCSI & LCSI), pockmarks, inferred/ reworked strems, limited by regional halokinetic fault.
Central	38284 km <sup>2</sup>	Itaguaçu, Saracuruna, Macau & Bonito.	Superficial and infilled channels (CSh, UCSI & LCSI), faults (CSh, UCSI & LCSI), outcropping faults (CSh, UCSI & LCSI), channalized MTD), pockmarks, inferred/ reworked streams.
Northern	74129 km <sup>2</sup>	Bacaxá, São João, Macaé, Macabu, São Pedro.	Superficial and infilled channels (CSh, UCSI & LCSI), faults (CSh, UCSI & LCSI), outcropping faults (CSh, UCSI & LCSI), channalized MTD (LCSI), limited by regional halokinetic fault

Figure 6.4A depicts the geographic location of the datasource used during the validation and geologic characterization of the TBDEM-derived streams. Figure 6.4B depicts only the validated streams and it's interpreted geological significances.

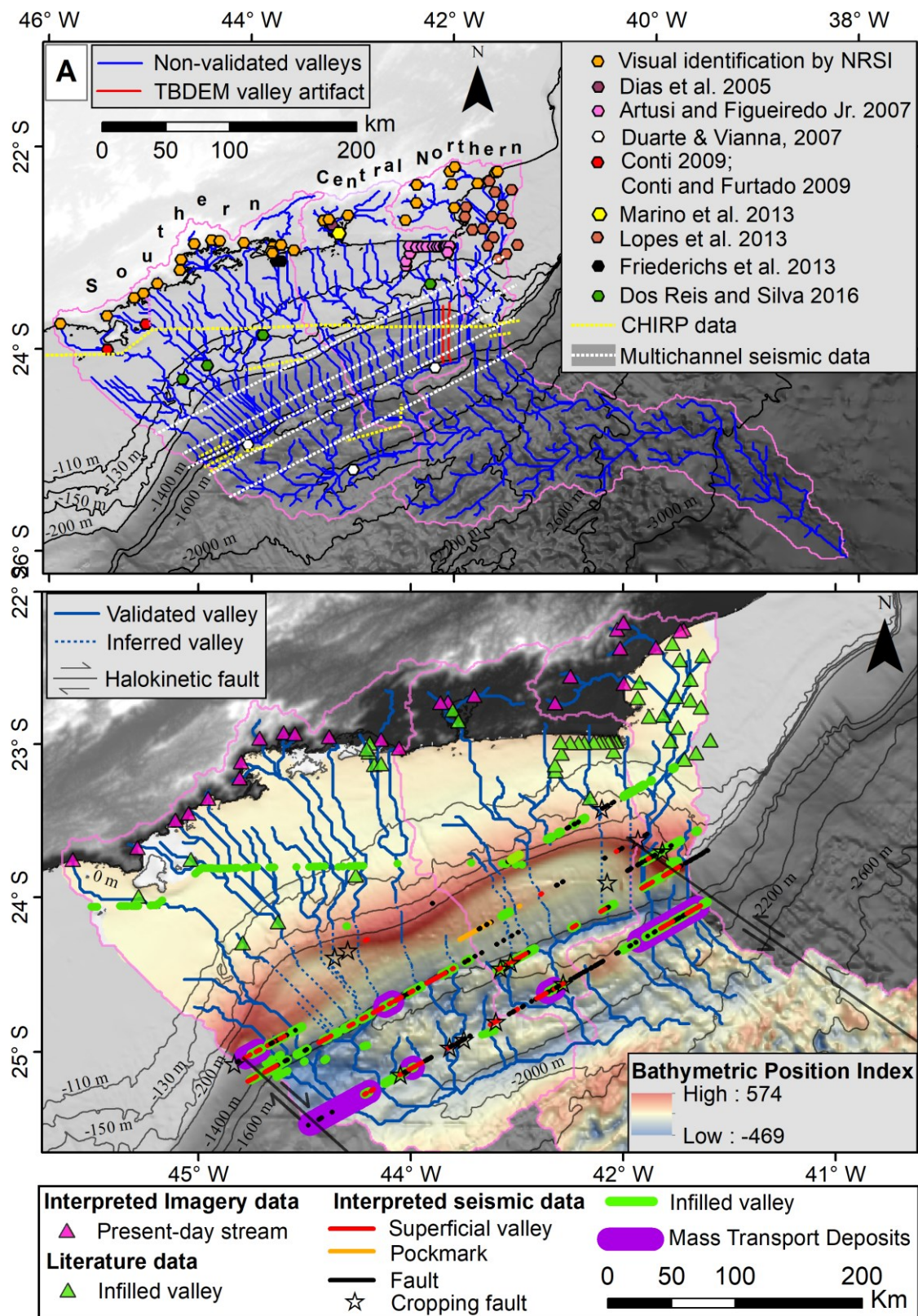


Figure 6.3 A) Map of the non-validated TBDEM-derived valley network superposed by the geographic location of reference data used to validate and classify the streams.

Point features represents the geographic location of valley features already identified in literature. White and yellow dashed lines represent the geographic location of the newly-interpreted multiscale seismic data. Blue lines represent the TBDEM-derived valleys prior to validation. Red lines represent the deleted TBDEM valley artifacts. B) Map of validated TBDEM-derived valleys and its geological significance interpreted from multiscale seismic data. Blue lines represent the validated valleys, blue dashed lines represent the inferred valley stretches that are interpreted to have been eroded away and reworked by contour currents. Triangles and colored lines represent the interpreted geological controls of each validated valley, interpreted from the seismic lines and literature data shown in A). Transcurrent halokinetic faults from Meisling *et al.* (2001). NRSI: Natural Resources Satellite Imagery (Landsat 8 under Google Earth environment).

The continental shelf features streamlines of mostly planar geometry with local occurrence of deflection in the direction of the valleys, characteristic of a meander drainage anomaly. In the Inner Continental Shelf (ICSh), the TBDEM-derived NISV features geographic consistence with the occurrence of paleochannels (incised-infilled valleys) mapped in the literature and by the newly available interpreted CHIRP data (Figure 6.5). However, in this domain, superficial channels (local bathymetric lows) are absent over the incised valleys (Figure 6.5A). The seafloor in this setting depicts sediment wave/ dune-like seafloor morphology, suggesting a morphology controlled by shelf drowning associated to marine transgression and sediment reworking/ erosion by bottom currents and redeposition over the incised valleys in this area. These relict infilled incised valleys are decametric in size, ranging from 30 to 100 m horizontally and from 8 to 20 m vertically and their occurrence is geographically close one to another.

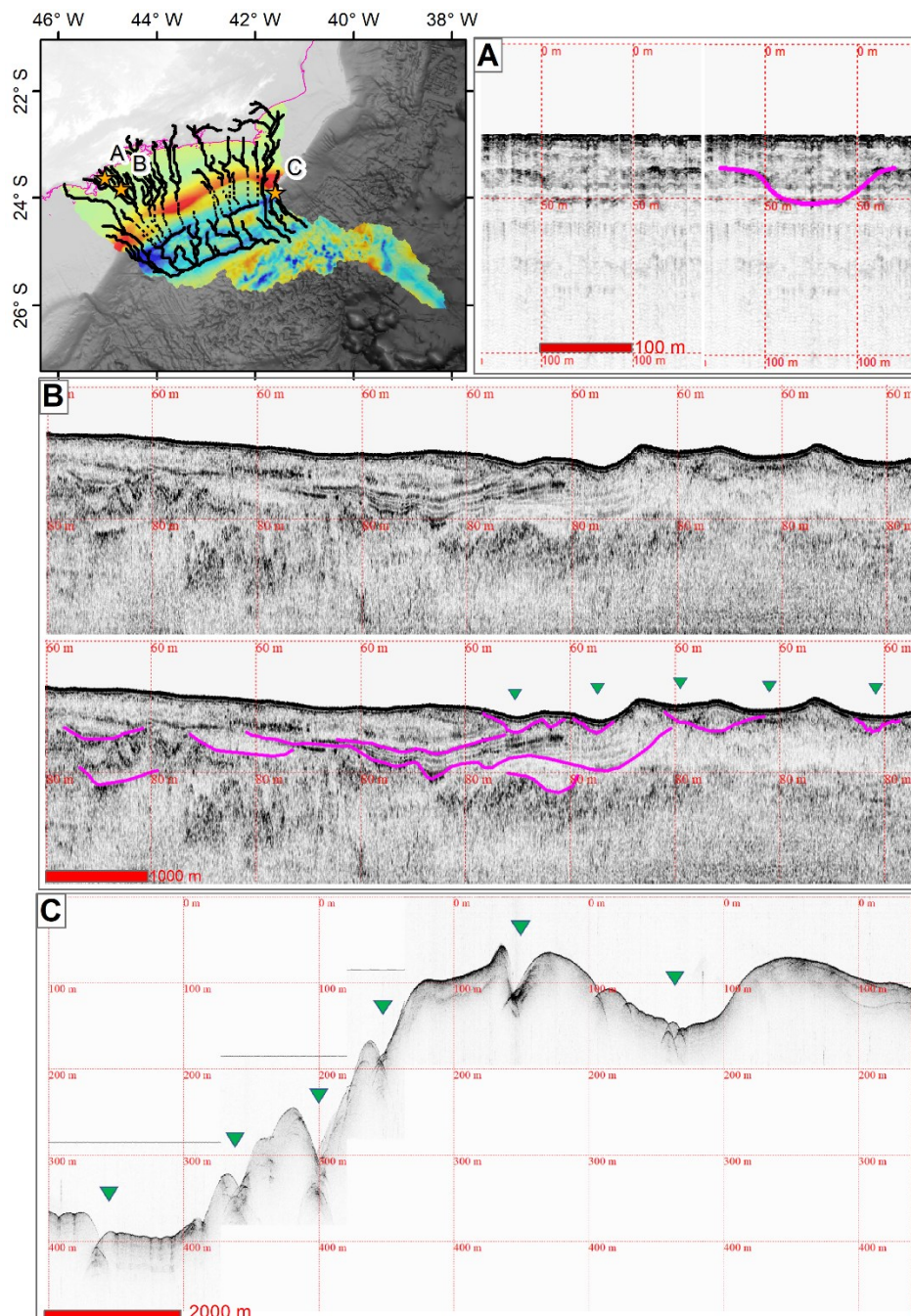


Figure 6.4 Examples of the different CHIRP data expressions of the validated TBDEM-derived streams, located in the map. Pink lines feature incised-infilled channels and green triangles features channel and canyon-like features. A) Incised-infilled channel in the inner continental shelf with no local occurrence of bathymetric low; B) Incised-infilled channel complex in the mid continental shelf, featuring a complex of bathymetric lows above it; C) Canyon-like features in the upper continental



slope, with no significant sound wave penetration due to wave properties and water depth.

In the Intermediate Continental Shelf (ImCSh), the TBDEM-derived streams closely represents the behaviour of the shelf morphology described by Dos Reis *et al.* (2013). In this domain, wide (1 to 5 km) channel systems are observed, associated to present-day bathymetric lows, suggesting a preserved morphology controlled by the regression episodes of the LGM, differently of the observed in the ICSh. Both Southern and Central Catchments features drainage anomalies (inflections) in the 110, 130 and 150 m isobaths, where lies the bathymetric escarpments interpreted to be related to the basinward migration of Late Pleistocene coastlines along the continental shelf of Santos Basin by the authors. The TBDEM-derived NISV that compose the continental shelf of the Northern Catchment was mostly validated by Lopes *et al.* (2016) seismic data, presenting very good geographic correlation between both datasets. However, our map partially disagrees with the authors in respect to the association of the seismic-mapped channels to present-day continental rivers, connecting the mapped submarine incised-infilled channels only to the Macaé and São João rivers, and it's respective affluents, without contribution of the Paraíba do Sul and Una river systems.

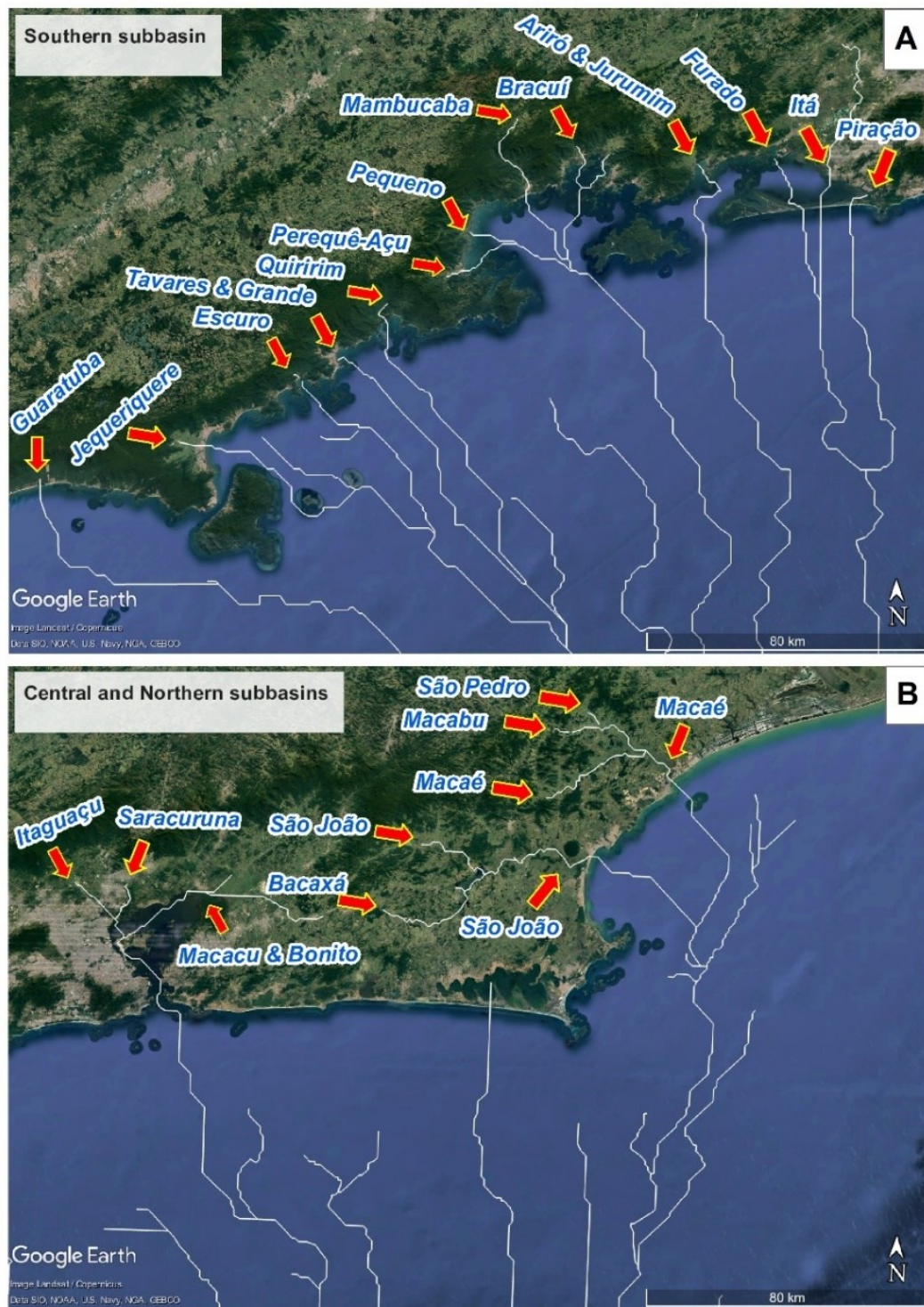


Figure 6.5 Map of validated TBDEM-derived streams in the continental area by High Resolution Satellite Imagery observation. A) Present-day continental streams that correspond to the mapped streams in the Southern subbasin; B) Present-day

continental streams that correspond to the mapped streams in the Central and Northern subbasins. Imagery: Landsat 8 in Google Earth environment.

In the OCSH and Upper Continental Slope (UCSI), the streamlines become quite retilinear and mostly don't correspond to topographic lows in the seismic data available (represented by dashed streams in the maps), except by the Southern and Northern limits of the mapped basin. This behavior is observed to most of the OCSH and UCSI in the study area (from 44.5 W 24.7S to 42 W 24 S) and persists until the -2000 m isobath, where lies the last axis of the Santos Channel, dividing the continental slope in Upper and Middle Continental Slope (MCSI). In this portion, two (2) streams were considered to be the result of a TBDEM artifact and were deleted, since they're located on regions of higher VU (up to 15%) (Red lines in Figure 6.3 A).

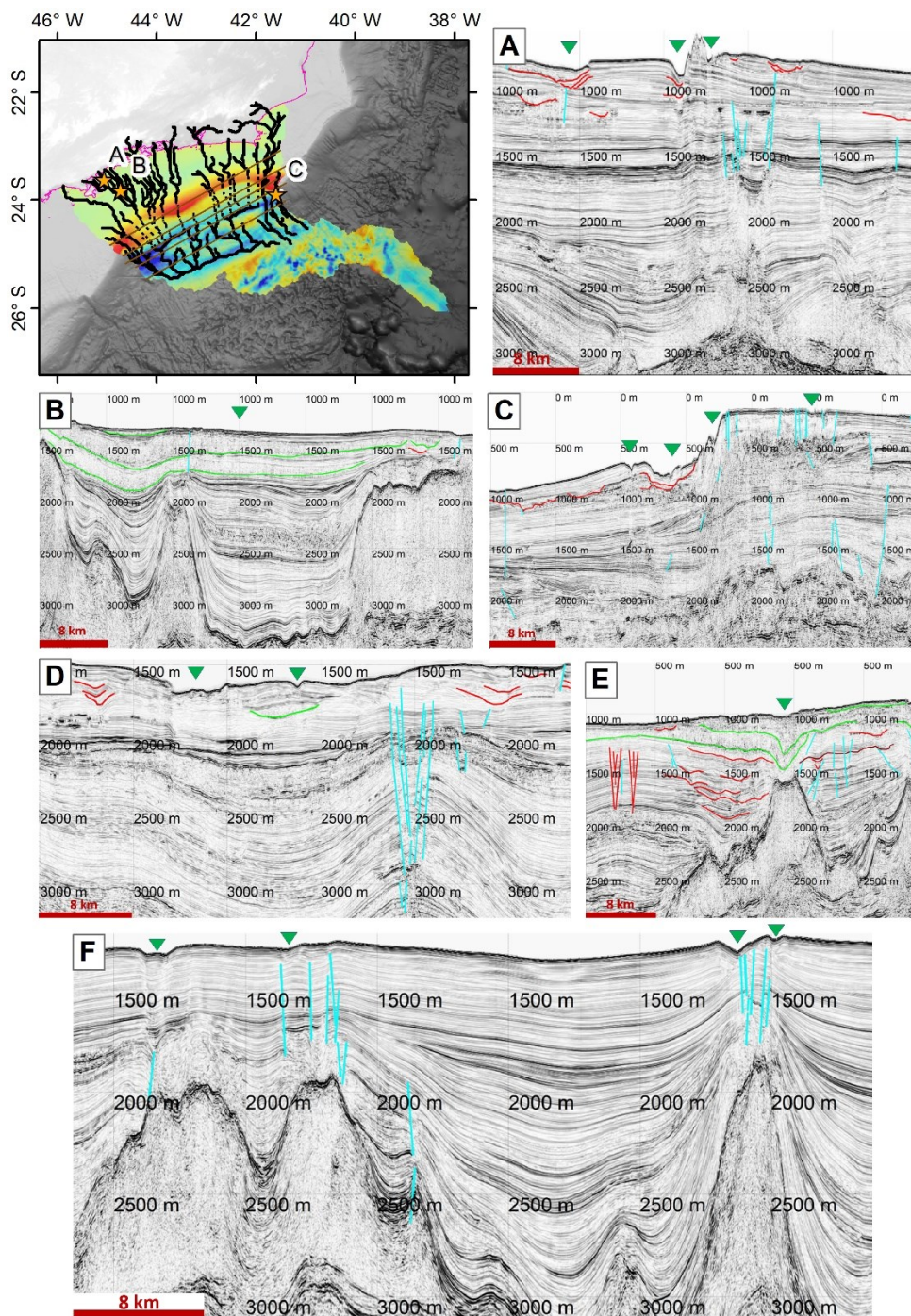


Figure 6.7 Examples of the different CHIRP data expressions of the validated TBDEM-derived streams, located in the map. Yellow stars represent the location of the seismic profile, red lines represent the base of incised-infilled channels, green lines represent the base of channelized Mass Transport Deposits, blue lines represent faults and green triangles represent superficial channels and canyons.

Despite this general contouritic-controlled bathymetry of the OCSH and UCSI, the southernmost and northernmost regions of the basin features conspicuous topographic lows associated to major canyon systems (Figures 6.5C, 6.7A & 6.7C) and geological faults (both blind and outcropping faults) (Figures 6.7A & 6.7C.). Downslope to these canyons systems, in the MCSI domain, TBDEM-derived streams are associated to bathymetric lows of seismic facies of chaotic internal configuration, channelized (trapped) between the underneath salt-folded sediments (Figure 6.7B & E). The Southern canyon system – chaotic deposit system (Figures 6.7 A & B, respectively) is associated to the present-day Guaratuba river, while the Northern system (Figure 6.7C & E) are associated to the Macaé and São João rivers. It's still unclear if the origin of these systems is driven by the paleo sediment discharge of the mentioned river systems, or tectonically controlled or both. Local smaller topographic lows that coincide with the mapped NISV are found in the central part of the MCSI (area of contouritic-controlled topography) (Figure 6.7D & F).

In the Continental Slope setting, the Bathymetric Position Index maps validated the spatial continuity of the seismic validated valleys in the deep areas of the basin where no seismic data was available. The maps featured great correlation to the TBDEM-derived streams, clearly highlighting both Southern and Northern canyon systems, Santos and São Paulo Channels, salt walls and mini basins, as also as salt creastal fault channels. In the Continental Shelf setting these products haven't successfully highlighted channelized features, since the slope and depth variations in this region vary much less than the annulus sampling matrix utilized was able to detect.

## 6.6 DISCUSSION

The transition area between continental to submarine setting in the TBDEM is smooth and seamless, showing no significant height/depth artifact, demonstrating that the topobathymetric gridding of the DEMs to the generation of the TBDEM was successful, with inconsistency between datasets being smaller than the spatial resolution of the final product. Despite the large pixel size of the TBDEM, the digital surface was successful revealing submarine valleys associated to multiple types of geologic control. The mapped NISV represents the present-day preferential sediment pathways of the basin. It can be used for foreseen and model episodic sediment transfer resulted from earthquake-triggered mass waste

events in the Continental Slope setting. Considering the interpreted geologic control of the seafloor morphology in this area (present-day seismicity, faulted seafloor, salt tectonics, strong bottom currents & regional MTD), it's likely the occurrence of this kind of event. The importance of the Quality Assessment of the TBDEM during the process of TBDEM stream extraction was demonstrated in this work, where two stream lines were deleted due to their artifact related origin.

The direction of inflection of the stream anomalies throughout the CSh escarpments (westwards in the Southern Catchment and mostly eastwards in the Northern Catchment) suggests the occurrence of a regional bathymetric high that would have been responsible for the regional antiform that resulted in the drainage divide. Despite representing a larger erosional area, Southern and Central Catchments can be directly associated to the Western and Eastern Corridors mapped by Dos Reis *et al.* (2013), which, in turn, can be directly associated to the occurrence of clusters of seismogenic events in the last 20 years.

The observed smooth bathymetry in the OCSH and UCSI is the result of the erosion of most of the bathymetric registers of the across-shore channelized flux in this domain and it's replacements by contouritic sedimentary drift structures associated to long term along-shore sediment transfer systems. (e.g. DUARTE; VIANA, 2007; DOS REIS *et al.*, 2013; MAHIQUES *et al.*, 2022). The canyon systems and local faults observed in the UCSI present in the southern and northernmost ends of the study area are geographically related and in the same azimuthal trend to regional transfer halokinetic faults mapped by Meisling *et al.* (2001) and seismic events mapped in the last two decades by the Brazilian Seismographic Network (RSBR, 2022) (Figure 6.4B & 6.7C). The deposits of chaotic internal configuration channelized between salt walls are connected by the NISV to the upslope canyon systems, also evidenced by the BPI maps (Figures 6.4B, 6.6A, B, C & E) and are interpreted as Mass Transport Deposits, possibly associated to earthquake-triggered mass waste events. The overall coincidence of the NISV (at the mapping scale of this study) to the presence of the regional halokinetic faults and seismogenic events (from the CSh to the LCSH) suggests that the occurrence and geometry of the present-day NISV is at least partially related to neotectonics seismogenic events.

In addition to its contouritic characteristic, the NE-SW oriented Santos Channel present-day bathymetry suggests that this geomorphological feature may also act as a preferential sediment pathway that captures the NW-SE across shore sediment transfer, deflecting it to the SW direction in the Southern and Central Catchments, as locally observed

by Ashabranner *et al.* (2010). The bathymetric high that divides both catchments is responsible for the predominant NW-SE across shore sediment transport in this region, cross cutting and obliterating the channel in this region. In the MCSI, elongated NW-SE channels predominates cross cutting contouritic drifts and salt crestal faults channels, acting as small bypass corridors that gravitationally connects the sediment transfer from MCSI Santos Channel to LCSI São Paulo Channel. According to the mapped NISV, this last channel acts as a major SW to NE lower continental slope pathway of gravitationally transported sediment from Southern and Central Catchments, with sediment recharging channels all along its geographic occurrence.

The mapped NISV represents the present-day preferential sediment pathways of the basin. It can be used for foreseen and model episodic sediment transfer resulted from earthquake-triggered mass waste events in the Continental Slope setting. Considering the interpreted geologic control of the seafloor morphology in this area (present-day seismicity, faulted seafloor, salt tectonics, strong bottom currents & regional MTD), it's likely the occurrence of this kind of event.

## 6.7 CONCLUSION

The objective of this work of mapping, validating and interpreting the geological significance of the network of submarine valleys that currently connects the adjacent continental areas of Santos Basin to the salt dominated landscape of the São Paulo Plateau (Lower Continental Slope) was successfully achieved. The hypothesis that the present-day onshore-offshore NISV would serve as a cartographic guide for prospecting paleochannels (infilled-incised valleys) in the Continental Shelf and canyons, Mass Transport Deposits and outcropping faults in the Continental Slope was confirmed. The data presents good correlation to literature data present in the study area (DIAS, 2005; CONTI; FURTADO, 2006; ARTUSI; FIGUEIREDO JR., 2007; CONTI, 2009; MARINO; SANTOS; SILVA, 2013; LOPES; DOS REIS; SILVA, 2013; FRIEDERICHS *et al.*, 2013; DOS REIS; SILVA, 2016) and also agree with the conclusions from Harries *et al.* (1996) and Francis *et al.* (2014), that the use of submarine DEM-derived streams are not straightforward and should be used carefully, due to the palimpsest nature of the seafloor morphology. This is especially true in settings with such an intense morphological/ sedimentological control associated to the distinct factors, as the action of bottom currents, neotectonics and across shore sediment discharge. Being that said,

we highly recommend the use of validation data (seismic and/ or high-resolution bathymetry) to determine the real existence of the TBDEM-derived stream. In this work, that was proved of great importance, since numerous numbers of streams didn't really correspond to a local bathymetric low in the seafloor and could easily be wrongly interpreted as a channel without the validation of the dataset (Figure 6.4).

.



## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho foi capaz de cumprir com os objetivos propostos e responder as perguntas que motivaram esta pesquisa. Como produto principal, foi gerado um mapa da Rede de Vales Submarinos Interconectados (RVSI) presentes na Bacia de Santos, obtido a partir da delimitação da rede de drenagem proveniente de Modelo Digital Topobatemétrico. Esse mapa resultou na identificação de três sub-bacias (Sul, Central e Norte) que demonstram a interconexão de diferentes sistemas fluviais continentais atuais ao Talude Continental Inferior e Platô de São Paulo. Foi demonstrado que, para refinamento e interpretação geológica desse produto, este deve ser confrontado à dados sísmicos, de forma a ser validada ou rejeitada a existência dos vales mapeados.

Contatou-se que, na Plataforma Continental, a RVSI coincide geograficamente com sistemas de paleocanais de extensão decamétrica a hectométrica, em sua maioria preenchidos. Na região da quebra da Plataforma ao Talude Superior Continental, essa rede de vales apresenta dois comportamentos distintos: na parte central da bacia, a RVSI não coincide com baixos batimétricos nos produtos sísmicos, resultado do domínio dos processos de transporte (erosão e deposição) por correntes de fundo neste local; Já nas extremidades Sul e Norte da Bacia, a RVSI coincide com a presença de sistemas de cânion hectométricos, além de falhas que afloram no fundo marinho, evidenciando o controle por processos gravitacionais nessas regiões. A RVSI na região do Talude Continental Inferior central é coincidente com canais contorníticos regionais (Canais de Santos e São Paulo), vales encaixados entre domos salinos soerguidos e falhas (aflorantes e cegas) resultantes do abatimento desses domos. Nas porções Sul e Norte do Talude Continental Inferior, associados aos sistemas de cânions e falhas mapeados no Talude Continental Superior, foram mapeados extensos (hectométricos) Depósitos de Movimento de Massa canalizados entre domos de sal soerguidos. Esses sistemas “cânion – DMM” estão próximos à importantes falhas transcorrentes halocinéticas regionais mapeadas por Meisling *et al.* 2001, sugerindo controle tectônico sobre essas feições sedimentares.

Como produto secundário dessa dissertação, foi realizada a atualização do Modelo Digital Batimétrico “LEPLAC”, em ação conjunta com a Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil. Essa atualização se deu após apresentarmos à DHN a localização de regiões onde as profundidades dessa superfície batimétrica apresentavam Incertezas Verticais Totais (IVT) de até 311%, quando comparada à dados de batimetria de alta resolução

(monofeixe e multifeixe). Além da atualização da superfície batimétrica “LEPLAC”, foi demonstrada a aplicabilidade da utilização dos extensos dados coletados anualmente pelas diversas universidades brasileiras para avaliação das IVT e posterior atualização dessa superfície, estimulando a cooperação DHN – universidades para melhoria contínua desse produto.

## 8 CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS

- a) Mapeamento da Rede de Vales Submarinos Interconectados entre a área Continental adjacente à Bacia de Santos e o Talude Continental Inferior dessa bacia;
- b) Caracterização geológica dos vales mapeados;
- c) Indicativos de controles neotectônicos na sedimentação nos limites Sul e Norte da bacia.
- d) Atualização do Modelo Digital Batimétrico “LEPLAC”;
- e) Estimular a cooperação DHN – universidades para melhoria contínua do Modelo Digital Batimétrico “LEPLAC” (relação “ganha – ganha”).

## 9 TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, é sugerida a utilização de Modelos Digitais Batimétricos de maior resolução espacial, quando disponíveis, para determinar um mapa da Rede de Vales Submarinos Interconectados cada vez mais acurado. A utilização de mais linhas sísmicas multicanal pode ajudar a melhor definir os controles geológicos da RVSI mapeada. Em especial, a interpretação de linhas sísmicas multicanal paralelas à linha de costa na Plataforma Continental, de forma a determinar os controles geológicos dos divisores de águas entre as três sub-bacias mapeadas é interessante. Fica sugerido, também, a execução de mapeamentos de alta resolução baseados em batimetria multifeixe e *subbottom* (CHIRP e *Sparker*), especialmente se adquiridos por AUVs, de “locais-chave” mapeados, como os sistemas de “cânions – DMM” mapeados nos limites Sul e Norte da área de estudo.

## 10 AGRADECIMENTOS

Agradeço o apoio da Petrobras por meio do financiamento do projeto 'Monitoramento Sismológico e Oceanográfico de um Segmento no Sudeste do Brasil: Norte da Bacia de Santos ao Sul da Bacia do Espírito Santo' na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e Observatório Nacional/MCTI, e a importância estratégica do apoio da ANP por meio do regulamento de arrecadação de P&D, processo: 2015/00515-6. Agradeço também os Comandantes Ana Angélica Alberoni e Luiz Carlos Torres pela cessão de dados e efetiva participação no trabalho, assim como os Professores Jarbas Bonetti (Universidade Federal de Santa Catarina), Iran Correa (Universidade Federal do Rio Grande do Sul), Michel Mahiques (Universidade de São Paulo), Arthur Ayres (Universidade Federal Fluminense) e ao Arthur Machado (Universidade Federal da Bahia). Por fim, agradeço à equipe e pesquisadores do R/V Alpha Crucis (USP) pela aquisição dos dados de batimetria e CHIRP utilizados nessa pesquisa.

## REFERÊNCIAS

ABRAMOVA, Anastasia S. Comparison and evaluation of global publicly available bathymetry grids in the Arctic. 2012.

AKIMA, H., 1978. A method of bivariate interpolation and smooth surface fitting for irregularly distributed data points. **ACM Transactions on Mathematical Software** 4 (2), 148–159.

ALBERONI, A. A. L, JECK, I. K., SILVA, C. G., TORRES, L. C. The new Digital Terrain Model (DTM) of the Brazilian Continental Margin: detailed morphology and revised undersea feature names. **Geo-Marine Letters**, v. 40, n. 6, p. 949-964, 2020.

ALMEIDA, F. F. M., BRITO NEVES, B. B., FUCK, R., 1981. Brazilian structural provinces: an introduction. **Earth-Science Reviews**, 17, 1-29.

DE ALMEIDA, Anderson Gomes; KOWSMANN, Renato Oscar. Geomorfologia do talude continental e do Platô de São Paulo. In: *Geologia e Geomorfologia*. Campus, 2015. p. 33-66.

ANP-COPPE/UFRJ, 2008. Mapeamento e modelagem dos sistemas petrolíferos das bacias de Cumuruxatiba e Espírito Santo. Superintendência DE Definição DE Blocos, RELATÓRIO INTERNO. FRANÇA, R. L. et al, “Bacia DO Espírito Santo”. Boletim de Geociências

da Petrobras, RIO DE JANEIRO, V.15, N.02, P.501-509, JAN./MAR. 2007.

ARIA, M. & CUCCURULLO, C. (2017). Bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis, **Journal of Informetrics**, 11(4), pp 959-975, Elsevier, DOI: 10.1016/j.joi.2017.08.007.

ARTUSI, L.; FIGUEIREDO JR, A. G. Sismoestratigrafia rasa da plataforma continental de Cabo Frio-Araruama-RJ. **Revista Brasileira de Geofísica**, 25: 7-16, 2007.

ASHABRANNER, L. B.; TRIPSANAS, E. K.; SHIPP, R. C. Multi-direction flow in a mass-transport deposit, Santos Basin, offshore Brazil. In: **Submarine mass movements and their consequences**. Springer, Dordrecht, 2010. p. 247-255.

ASSUMPCÃO, M.; DOURADO, J. C.; RIBOTTA, L. C.; MOHRIAK, W. U.; DIAS, F. L.; & BARBOSA, J. R. (2011). The São Vicente earthquake of 2008 April and seismicity in the continental shelf off SE Brazil: further evidence for flexural stresses. **Geophysical Journal International**, 187(3), 1076-1088.

BIGELOW, P.; BENDA, L.; PEARCE, S. Delineating incised stream sediment sources within a San Francisco Bay tributary basin. *Earth Surface Dynamics*, v. 4, n. 3, p. 531-547, 2016.

BECKER, J. J. et al. Global bathymetry and elevation data at 30 arc seconds resolution: SRTM30\_PLUS. **Marine Geodesy**, v. 32, n. 4, p. 355-371, 2009.

BEZERRA, Francisco Hilário Rego. DOMÍNIOS MORFOESTRUTURAIS DA PLATAFORMA CONTINENTAL DO ESTADO DO CEARÁ. 2004. Tese de Doutorado. INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS.

BLOOM, A. L. Teaching about relict, no-analog landscapes. **Geomorphology**, v. 47, n. 2-4, p. 303-311, 2002.

BISHOP, M. P.; JAMES, L. A.; SHRODER Jr, J. F.; WALSH, S. J.. Geospatial technologies and digital geomorphological mapping: Concepts, issues and research. **Geomorphology**, v. 137, n. 1, p. 5-26, 2012.

BOLETIM DO CATÁLOGO BRASILEIRO – SISBRA. <http://moho.iag.usp.br/eq/bulletin>.

BRIGGS, Ian C. Machine contouring using minimum curvature. **Geophysics**, v. 39, n. 1, p. 39-48, 1974.

BRUSH, Eugene et al. The Rio Doce canyon system in the northern Espírito Santo basin, offshore Brazil: a model for interpreting ancient deep-water sand transportation fairways. **American Association of Petroleum Geologists Search and Discovery Article**, v. 30028, 2004.

BUSSAB, W. O.; MORETIN, P. A. Estatística Básica. 5ª edição, **Editora Sariva**, S. 2004.

CATUNEANU, O., ABREU, V., BHATTACHARYA, J.P., BLUM, M.D., DALRYMPLE, R.W., ERIKSSON, P.G., FIELDING, C.R., FISHER, W.L., GALLOWAY, W.E., GIBLING, M.R., GILES, K.A., HOLBROOK, J.M., JORDAN, R., KENDALL, C.G.StC., MACURDA, B., MARTINSEN, O.J., MIALL, A.D., NEAL, J.E., NUMMEDAL, D., POMAR, L., POSAMENTIER, H.W., PRATT, B.R., SARG, J.F., SHANLEY, K.W., STEEL, R.J., STRASSER, A., TUCKER, M.E., WINKER, C., 2009. Towards the standardization of sequence stratigraphy. **Earth Sci. Rev.** 92, 1–33

CHANG, H. K.; KOWSMANN, R.O.; FIGUEIREDO, A.M.F. & BENDER, A.A. 1992. Tectonics and stratigraphy of the East Brazil Rift System: an Overview. **Tectonophysics**, 213 (1-2): 97138.

CHANG, H. K. & KOWSMANN, R. O. 1987. Interpretação genética das sequências estratigráficas das bacias da margem continental brasileira. **Revista Brasileira de Geociências**, 17, 74-80.

COBBOLD, P. R, MEISLING, K.R., MOUNT, V.S. 2001. Reactivation of na obliquely rifted margin, Campos and Santos basins, Southeastern Brazil. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, 85, 1925-1944.

COELHO, V. C. B. G. Prefácio. Kowsmann, R.O., editor. Geologia e Geomorfologia. Rio de Janeiro: Elsevier. **Habitats**, v. 1, p. 99-136, 2014.

COGNÉ, N.; GALLAGHER, K.; COBBOLD, P.R.; RICCOMINI, C.; GAUTHERON, C., 2012. Post-breakuptectonics in Southeast Brazil from thermochronological data and combined inverseforward thermal history modeling. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth** 117, B11413.

CONTI, L. A.; FURTADO, V. V. Geomorfologia da plataforma continental do Estado de São Paulo. **Brazilian Journal of Geology**, v. 36, n. 2, p. 305-312, 2006.

CONTI, L. A. Evidências da evolução dos sistemas de paleodrenagens na plataforma continental da região de São Sebastião (litoral norte do estado de São Paulo). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 10, n. 2, 2009.

CONTI, L. A.; FURTADO, V. V. Topographic registers of paleo-valleys on the southeastern Brazilian continental shelf. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 57, p. 113-121, 2009.

DIAS, J.L. Tectônica, estratigrafia e sedimentação no Andar Aptiano da margem leste brasileira. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, 13: 7-25, 2005.

DIXON, T. H.; NARAGHI, M.; MCNUTT, M. K.; SMITH, S. M. Bathymetric prediction from Seasat altimeter data. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 88, n. C3, p. 1563-1571, 1983.

DOS REIS, A. T., MAIA, R. M. C., SILVA, C. G., RABINEAU, M., GUERRA, J. V., GORINI, C.; TARDIN, R. et al. Origin of step-like and lobate seafloor features along the continental shelf off Rio de Janeiro State, Santos basin-Brazil. **Geomorphology**, v. 203, p. 25-45, 2013.

DUARTE, C. S. L.; VIANA, A. R. Santos Drift System: stratigraphic organization and implications for late Cenozoic palaeocirculation in the Santos Basin, SW Atlantic Ocean. **Geological Society, London, Special Publications**, v. 276, n. 1, p. 171–198, 2007.

EVANS, I. S. An integrated system of terrain analysis and slope mapping. Final Report (Report 6) on Grant DA-ERO-591-73-G0040. Statistical characterization of altitude matrices by computer. **Department of Geography, University of Durham**, 192 pp, 1979.

EVANS, I. S. General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. In: Chorley, R.J. (Ed.), **Spatial Analysis in Geomorphology**. Harper & Row, pp. 17–90, 1972.



EWING, J., LEYDEN, R. & EWING, M. Refraction shooting with expendable sonobuoys. **AAPG Bulletin**, 53, 174-181, 1969.

FETTER, M. The role of basement tectonic reactivation on the structural evolution of Campos Basin, offshore Brazil: Evidence from 3D seismic analysis and section restoration. **Marine and Petroleum Geology**, v. 26, n. 6, p. 873-886, 2009.

FLORENTINO, LCDR C.; PIMENTEL, LCDR VB; NETO, A. Methodology for quality analysis of Regional Bathymetric Surfaces: From Brazilian South Coast to Hunter Channel. **The International Hydrographic Review**, 2019.

FRANCIS, J. M; DANIELL, J. J.; DROXLER A. W.; DICKENS, G. R.; BENTLEY, S. J.; PETERSON, L. C.; BEAUFORT, L. Deep water geomorphology of the mixed siliciclastic-carbonate system, Gulf of Papua. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, v. 113, n. F1, 2008.

FRIEDERICHS, Y. A.; DOS REIS, A. T.; SILVA, C. G.; TOULEMONDE, B. C. M; GUERRA, J. V. Arquitetura sísmica do sistema fluvio-estuarino da Baía de Sepetiba preservado na estratigrafia rasa da plataforma adjacente, Rio de Janeiro, Brasil. **Brazilian Journal of Geology**, v. 43, n. 1, p. 124-138, 2013.

GUARDADO, L. R., GAMBOA, L. A. P., LUCCHESI, C. F. 1990. Petroleum geology of the Campos Basin, Brazil, a model for a producing Atlantic-type basin, in J. D. Edwards and P. A. Santogrossi, eds., *Divergent/passive margin basins: AAPG Memoir* 48, p. 3–79.

GIBBS, A. D. Structural evolution of extensional basin margins. **Journal of the Geological Society of London**, 141, 609-620, 1984.

GRUBER, S.; PECKHAM, S. Land-surface parameters and objects in hydrology. **Developments in Soil Science**, 33: 171-194, 2009.

HARRIS, P. T.; PATTIARATCHI, C. B.; KEENE, J. B.; DALRYMPLE, R. W.; GARDNER, J. W.; BARKER, E. K.; SCHROEDER, W. W.. Late Quaternary deltaic and carbonate sedimentation in the Gulf of Papua foreland basin; response to sea-level change. **Journal of Sedimentary Research**, v. 66, n. 4, p. 801-819, 1999

HAXBY, W. F.; KARNER, G. D.; LABRECQUE, J. L; WESSEL, K. K. Digital images of combined oceanic and continental data sets and their use in tectonic studies. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, 64.52: 995-1004, 1983.

HENGL, T.; GUTH, P. Preface to “Marine Geomorphometry” in *Marine Geomorphometry: An Introduction to the Special Issue*. **Geosciences**, 8, 477, 2018.

HENGL, T.; EVANS, I. S. Mathematical and digital models of the land surface. **Developments in soil science**, v. 33, p. 31-63, 2009.

- HENGL, T. Finding the right pixel size. **Computers & Geosciences** 32 (9), 1283–1298, 2006.
- HOUGH, G.; GREEN, J.; FISH, P.; MILLS, A.; MOORE, R. A geomorphological mapping approach for the assessment of seabed geohazards and risk. **Marine Geophysical Research**, v. 32, n. 1-2, p. 151-162, 2011.
- HUTCHINSON, M.F. A new method for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. **Journal of Hydrology** 106: 211-232, 1989.
- HUTCHINSON, M. F.; XU, T.; STEIN, J. A. Recent progress in the ANUDEM elevation gridding procedure. **Geomorphometry**, 19-22, 2011.
- KOWSMANN, R. O.; VICALVI, M. A.; COSTA, M. P. A. Considerações sobre a sedimentação quaternária na plataforma continental brasileira entre Cabo Frio e o rio Itabapoana. **Comunicação técnica REMAC** 001/78, 1979.
- KOWSMANN, R. O.; DA COSTA, A. M.; AMARAL, C. S. Shear-strength signatures of mass movements, continental slope of Campos Basin, Brazil. In: **Submarine Mass Movements and Their Consequences**. Springer, Dordrecht, p. 239-246, 2003.
- KUMAR, N. & GAMBOA, L.A.P. Evolution of the São Paulo Plateau (Southeastern Brazilian Margin) and Implications for the Early History of the South Atlantic. **Geological Society of America Bulletin**, Boulder, Colorado, 90: 281-293. part.1, 1979.
- LECOURS, V., DOLAN, M. F., MICALLEF, A., LUCIEER, V. L. A review of marine geomorphometry, the quantitative study of the seafloor. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 20, n. 8, p. 3207, 2016.
- LEPLAC - BRAZILIAN CONTINENTAL SHELF SURVEY PROJECT. Brazilian Partial Revised Submission to the Commission on the Limits of the Continental Shelf: Brazilian Southern Region (in progress). Directorate of Hydrography and Navigation (DHN), 2015.
- LOPES, M. C.; DOS REIS, A. T.; SILVA, C. G. Paleodrenagem e estratigrafia dos sistemas deposicionais Pleistoceno Superior-Holoceno da plataforma norte fluminense, bacia de Campos. **VII Simpósio Brasileiro de Geofísica**, 2016.
- LUNDBLAD, E. R., WRIGHT, D. J., MILLER, J., LARKIN, E. M., RINEHART, R., NAAR, D. F., DONAHUE, B.T., ANDERSON, S. M., BATTISTA, T. A benthic terrain classification scheme for American Samoa. **Marine Geodesy**, v. 29, n. 2, p. 89-111, 2006.
- MACEDO, J. M. Evolução tectônica da Bacia de Santos e áreas continentais adjacentes. **Boletim de Geociências da Petrobras**, 3, 159-173, 1989.
- MACEDO, J. M. Evolução tectônica da Bacia de Santos e áreas continentais adjacentes. In: GABAGLIA, G. P. R. & MILANI, E. J. (eds) **Origem e Evolução de Bacias Sedimentares**. Petrobras, Rio de Janeiro, 361-376, 1990.

MAIA, R. M. C.; REIS, A. T. D.; ALVES, E. D. C.; SILVA, C. G.; GUERRA, J. V.; GORINI, C. ARANTES-OLIVEIRA, R. Architecture and stratigraphic framework of shelf sedimentary systems off Rio de Janeiro state, Northern Santos Basin-Brazil. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 58, p. 15-29, 2010.

MAIDMENT, D. R.; MOREHOUSE, S. Arc Hydro: GIS for water resources. **ESRI, Inc.**, 2002.

MAHIQUES, M. M.; SOUZA, L. A. P. Shallow seismic reflectors and upper Quaternary sea level changes in the Ubatuba region, São Paulo State, Southeastern Brazil. **Revista Brasileira de Oceanografia**, v. 47, n. 1, p. 01-10, 1999.

MAHIQUES, M. M.; LOBO, F. J.; SCHATTNER, U.; LÓPEZ-QUIRÓS, A. ROCHA, C. B. DIAS, R. J. S.; VIEIRA, A. C. B. Geomorphological imprint of opposing ocean bottom currents, a case study from the southeastern Brazilian Atlantic margin. **Marine Geology**, v. 444, p. 106715, 2022.

MALY, M.; SCHATTNER, U.; LOBO, F. J.; DIAS, R. J. S.; RAMOS, R. B.; COUTO, D. D. M.; MAHIQUES, M. M. The Alpha Crucis Carbonate Ridge (ACCR): discovery of a giant ring-shaped carbonate complex on the SW Atlantic margin. **Scientific reports**, 9(1), 1-10, 2019.

MANTOVANELLI, S. S.; TASSINARI, C. C.; MAHIQUES, M. M. D.; JOVANE, L.; BONGIOLO, E. Characterization of Nd radiogenic isotope signatures in sediments from the Southwestern Atlantic margin. **Frontiers in Earth Science**, 74, 2018.

MARINO, I. K.; SANTOS, M. A. C.; SILVA, C. G. Processing of High-Resolution, Shallow Seismic Profiles, Guanabara Bay-Rio de Janeiro State, Brazil. **Brazilian Journal of Geophysics**, v. 31, n. 4, p. 579-594, 2013.

MARKS, K. M.; SMITH, W. H. F. An evaluation of publicly available global bathymetry grids. **Marine Geophysical Researches**, v. 27, n. 1, p. 19-34, 2006.

MCKENZIE, R.P. Some Remarks on the Development of Sedimentary Basins. **Earth and Planetary Science Letters**, 40: 25-32, 1978.

MEISLING, K. E., COBBOLD, P. R., MOUNT, V. S. Segmentation of an obliquely rifted margin, Campos and Santos basins, Southeastern Brazil. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, 85, 1903-1924, 2001.

MILANI, E. J. Cratonic interior. In: CORDANI, U. G., MILANI, E. J., THOMAS FO, A. & CAMPOS, D. A. (eds) Tectonic Evolution of South America. XXXI International Geological Congress, Rio de Janeiro. **IUGS Special Publication**, 392-449, 2000.

MITCHUM JR, R. M.; VAIL, P. R. R.; SANGREE, J. B. Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level , Part 6 : Stratigraphic Interpretation of Seismic Reflection Patterns in. In: **AAPG Memoir** 26, 1977.

MODICA, C. J. & BRUSH, E. R. Postrift sequence stratigraphy, paleogeography, and fill history of the deep-water Santos Basin, offshore southeast Brazil. **AAPG Bulletin**, 88, 923-945, 2004.

MÖLLER Jr, O. O.; PIOLA, A. R.; FREITAS, A. C.; CAMPOS, E. J. The effects of river discharge and seasonal winds on the shelf off southeastern South America. **Continental shelf research**, 28(13), 1607-1624, 2008.

MOORE, I.D., GRAYSON, R.B. Terrain-based catchment partitioning and runoff prediction using vector elevation data. **Water Resources Research** 27, 1177–119, 1991.

MOHRIAK, W. U., MACEDO, J. M., CASTELLANI, R. T., Er AL 1995. Salt tectonics and structural styles in the deep-water province of the Cabo Frio region, Rio de Janeiro, Brazil. In: JACKSON, M. P. A., ROBERTS, D. G. & SNELSON, S. (eds) Salt Tectonics: a Global Perspective. **AAPG Memoirs**, 65, 273-304, 2008.

MOHRIAK, W.; SZATMARI, P.; ANJOS, S. M. C.. Sal Geologia e tectônica. **Terrae Didactica**, 4: 90-91, 2009.

MUKHERJEE, S., JOSHI, P. K., MUKHERJEE, S., GHOSH, A., GARG, R. D., MUKHOPADHYAY, A. Evaluation of vertical accuracy of open source Digital Elevation Model (DEM). **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 21, p. 205-217, 2013.

NAGAI, R. H.; FERREIRA, P. A. L.; MULKHERJEE, S. V. M. M.; MARTINS, M. V.; FIGUEIRA, R. C. L.; SOUSA, S. H. M.; & MAHIQUES, M. M. Hydrodynamic controls on the distribution of surface sediments from the southeast South American continental shelf between 23 S and 38 S. **Continental shelf research**, 89, 51-60, 2014.

OJEDA, A. H. Structural framework, stratigraphy, and evolution of Brazilian marginal basins. **AAPG Bulletin**, 66, 732-749, 1982.

OKABE, A., BOOTS, B., SUGIHARA, K. Spatial Tessellations: Concepts and Applications of Voronoi Diagrams, 2nd edition. **Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics**. Wiley, New York, 696 pp, 2001.

O'CALLAGHAN, J. F.; MARK, D. M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. **Computer vision, graphics, and image processing**, 28.3: 323-344, 1984.

OLAYA, V. Basic land-surface parameters. **Developments in Soil Science**, v. 33, p. 141-169, 2009.

OLIVEIRA, E., PIRES, R. S., OLIVEIRA, R. S., FURTADO, V., HERMANN, H. J., ANDRADE, J. S. A universal approach for drainage basins. **Scientific reports**, v. 9, n. 1, p. 1-10, 2019.

OLSON, Christopher Jackson; BECKER, Joseph J.; SANDWELL, David T. A new global bathymetry map at 15 arcsecond resolution for resolving seafloor fabric: SRTM15\_PLUS. In: **AGU Fall Meeting Abstracts**. p. OS34A-03, 2014.

PEREIRA, Mario Luiz Martins; BONETTI FILHO, Jarbas. Caracterização geomorfológica do relevo submarino de áreas marinhas protegidas brasileiras com base em técnicas de análise espacial. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 19, n. 1, 2018.

PEREIRA, M. J. Sequências deposicionais de 2a/3a ordens (50 a 2Ma) e tectono-estratigrafia no Cretáceo de cinco bacias marginais do Brasil: comparações com outras áreas do globo e implicações geodinâmicas. **Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, Porto Alegre, 1994.

PEREIRA, M. J.; MACEDO, J. M. A Bacia de Santos: perspectivas de uma nova província petrolífera na plataforma continental sudeste brasileira. **Boletim Geociências da Petrobrás**, v. 4, p. 3-11, 1990.

PIKE, R. J.; EVANS, I. S.; HENGL, T. In: HENGL, Tomislav; REUTER, Hannes I. (Ed.). **Geomorphometry: concepts, software, applications**. Newnes, 2008.

PIKE, R.J. Geomorphometry — diversity in quantitative surface analysis. **Progress in Physical Geography** 24 (1), 1–20, 2000.

PIKE, R.J. Geomorphometry—progress, practice, and prospect. **Zeitschrift für Geomorphologie**, Supplementband 101, 221–238, 1995.

PLANCHON, O.; DARBOUX, F.. A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models. **Catena**, v. 46, n. 2-3, p. 159-176, 2002.

PRUD'HOMME, R. Analyse morphostructurale appliquée à l'Aquitaine Occidentale et au Golfe de Gascogne: Définition d'une méthodologie cartographique interprétative. **Université I**, 1972.

RAMOS, R. B.; SANTOS, R. F., SCHATNER, U.; FIGUEIRA, R. C. L; BICEGO, M. C.; MAHIQUES, M. M. Deep pockmarks as natural sediment traps: a case study from southern Santos Basin (SW Atlantic upper slope). **Geo-Marine Letters**, v. 40, n. 6, p. 989-999, 2020.

RANA, S. (Ed.), Topological Data Structures for Surfaces: **An Introduction for Geographical Information Science**. Wiley, New York, 214 pp, 2004.

RASEMANN, S., SCHMIDT, J., SCHROTT, L., DIKAU, R. Geomorphometry in mountain terrain. In: BISHOP, M.P., SHRODER, J.F. (Eds.), **GIS & Mountain Geomorphology**. Springer, Berlin, pp. 101–145, 2004.

RABINEAU, M.; BERNÉ, S.; ASLANIAN, D.; OLIVET, J. L.; JOSEPH, P.; GUILLOCHEAU, F.; BOURRILLET, J. F.; LEDREZEN, E.; GRANJEAN, D. Sedimentary sequences in the Gulf of Lions: a record of 100,000 years climatic change. **Marine and Petroleum Geology**, v. 22, n. 6-7, p. 775-804. 2005.

REIS, Á. F.; BEZERRA, F. H.; FERREIRA, J. M.; do NASCIMENTO, A. F.; & LIMA, C. C. Stress magnitude and orientation in the Potiguar Basin, Brazil: Implications on faulting style and reactivation. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, 118(10), 5550-5563, 2013.

REUTER, H. I., HENGL, T., GESSLER, P., SOILLE, P. Preparation of DEMs for geomorphometric analysis. **Developments in Soil Science**, v. 33, p. 87-120, 2009.

RICCOMINI, C.; SANT'ANNA, L. G.; FERRARI, A. L. Evolução geológica do Rift Continental do Sudeste do Brasil, in *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*, edited by V. Mantesso Neto et al., pp. 383-405, **Edições Beca**, São Paulo, Brazil, 2004.

RINEHART, R., WRIGHT, D. J., LUNDBLAD, E. R., LARKIN, E. M., MURPHY, J., & CARY-KOTHERA, L. ArcGIS 8. x benthic terrain modeler: Analysis in American Samoa. In **Proceedings of the 24th Annual ESRI User Conference**, San Diego, CA, 2004.

ROYDEN, L. & KEEN, C.E. Rifting Processes and Thermal Evolution of the Continental Margin of Eastern Canada Determined from Subsidence Curves. **Earth & Planetary Science Letters**, 51: 343-361, 1980.

SCHALLER, H. Estratigrafia da Bacia de Campos in: **27º Congresso Brasileiro de Geologia. Aracajú**, Anais, 3, 246-258, 1973.

SCHATTNER, U.; LOBO, F. J.; LÓPES-QUIRÓS, A. DOS PASSOS NASCIMENTO, J. L.; MAHIQUES, M. M. What feeds shelf-edge clinoforms over margins deprived of adjacent land sources? An example from southeastern Brazil. *Basin Research*, v. 32, n. **Clinofoms and Clinothems: Fundamental Elements of Basin Infill**, p. 293-301, 2020.

SOUZA, K. G. La marge continentale bresilienne sub-orientale et les domaines oceaniques adjacents: structure et dvolution. PhD dissertation, **Université Pierre et Marie Curie**, 1991

SPADINI, A.R.; ESTEVES, F.R.; DIAS-BRITO, D.; AZEVEDO, R.L.M. & RODRIGUES, R. The Macaé Formation, Campos Basin, Brazil: Its Evolution in the Context of the Initial Historial of South Atlantic. **Revista Brasileira de Geociências**, 18 (3): 261-272, 1988.

SWAIN, C. J. A FORTRAN IV program for interpolating irregularly spaced data using the difference equations for minimum curvature. **Computers & Geosciences**, v. 1, n. 4, p. 231-240, 1976.

- SZATMARI, P., MILANI, E., LANA, M., CONCEICAO, J. & LOBO, A. How South Atlantic rifting affects Brazilian oil reserves. **Oil & Gas Journal**, 83, 107-113, 1985.
- TARBOTON, D. G.; BRAS, R. L.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. On the extraction of channel networks from digital elevation data. **Hydrological processes**, v. 5, n. 1, p. 81-100, 1991.
- TADONO, T.; ISHIDA, H.; ODA, F.; NAITO, S.; MINAKAWA, K.; & IWAMOTO, H. Precise global DEM generation by ALOS PRISM. **ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, 2(4), 71, 2014.
- TOBLER, W. R. The development of analytical cartography — a personal note. **Cartography and Geographic Information Science** 27 (3), 189–194, 2000.
- TOBLER, W. R. Analytical cartography. **The American Cartographer** 3 (1), 21–31, 1976.
- TOZER, B., SANDWELL, D. T., SMITH, W. H., OLSON, C., BEALE, J. R. WESSEL, P. Global bathymetry and topography at 15 arc sec: SRTM15+. **Earth and Space Science**, v. 6, n. 10, p. 1847-1864, 2019.
- TRAUTH, Martin H. et al. MATLAB recipes for earth sciences. Berlin: **Springer**, 2007.
- UNITED NATIONS DIVISION FOR OCEAN AFFAIRS AND LAW OF THE SEA - UNCLOS. 3rd United Nations Convention on the Law of the Sea. p. 7–208, 1994.
- UNITED NATIONS - UN. CLCS/11 - Scientific and Technical Guidelines of the Commission on the Limits of the Continental Shelf. Division for Ocean Affairs and the Law of the Sea. Commission on the Limits of the Continental Shelf (CLCS), 1999.
- VAIL, P. R.; MITCHUM, J. R. Seismic Stratigraphy and Global Changes of Sea Level, Part 1: Overview. **Exxon Production Research**, p. 51–52, 1977.
- VIANA, A. R., HERCOS, C. M., ALMEIDA, W. Jr, MAGALHÃES, J. L. C. & ANDRADE, S. B. Evidence of bottom current influence on the Neogene to Quaternary sedimentation along the northern Campos slope, SW Atlantic margin. In: STOW, D. A. V., FAUGIÈRES, J.-C., HOWE, J. A., PUDSEY, C. J. • VIANA, A. R. (eds) **Deep-Water Contourite Systems: Modern Drifts and Ancient Series, Seismic and Sedimentary Characteristics**, 2002.
- VIANA, A. R. & FAUGÈRES, J.-C. Upper slope sand deposits: the example of Campos Basin, a latest Pleistocene/Holocene record of the interaction between along-slope and downslope currents. In: STOKER, M. S., EVANS, D. & CRAMP, A. (eds) **Geological Processes on Continental Margins: Sedimentation, Mass-Wasting and Stability**. **Geological Society, London, Special Publications**, 29, 287- 316, 1998.
- WALBRIDGE, S., SLOCUM, N., POBUDA, M. WRIGHT, D. Unified geomorphological analysis workflows with Benthic Terrain Modeler. **Geosciences**, v. 8, n. 3, p. 94, 2018.

WEISS, A.D. Topographic Position and Landforms Analysis. In **Proceedings of the Esri User Conference**, San Diego, CA, USA, 26–30, 2001.

WU, T., LI, J., LI, T., SIVAKUMAR, B., ZHANG, G., WANG, G. High-efficient extraction of drainage networks from digital elevation models constrained by enhanced flow enforcement from known river maps. **Geomorphology**, v. 340, p. 184-201, 2019.

ZEMBRUSCKI, S. G. CHAVES, H. A. F. Geomorfologia da margem continental sul brasileira e das bacias oceânicas adjacentes. *In*: Chaves, H. A. F. (Ed.) **Geomorfologia da margem continental brasileira e das bacias oceânicas adjacentes**, Rio de Janeiro, Petrobras. V. 7, p. 129 – 177, 1979.