

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**A HIDRODINÂMICA E SEDIMENTOLOGIA DO RIO GUAÍBA
ANALISADOS POR SENSORES GEOACÚSTICOS E
ORBITAIS**

FERNANDO COMERLATO SCOTTÁ

ORIENTADOR – Prof. Dr. Jair Weschenfelder (UFRGS)

Volume I

Porto Alegre – 2018

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS**

**A HIDRODINÂMICA E SEDIMENTOLOGIA DO RIO GUAÍBA
ANALISADOS POR SENSORES GEOACÚSTICOS E
ORBITAIS**

FERNANDO COMERLATO SCOTTÁ

ORIENTADOR – Prof. Dr. Jair Weschenfelder (UFRGS)

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Iran Carlos Stalliviere Corrêa - Instituto de Geociências,
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dra. Tatiana Silva da Silva - Instituto de Geociências, Universidade
Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Felipe García Rodríguez - Universidad de la República de Uruguay

Tese de Doutorado apresentada como requisito
parcial para a obtenção do Título de Doutor em
Ciências.

Porto Alegre – 2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Rui Vicente Oppermann

Vice-Reitora: Jane Fraga Tutikian

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Diretor: André Sampaio Mexias

Vice-Diretor: Nelson Luiz Sambaqui Gruber

Scottá, Fernando Comerlato

A hidrodinâmica e sedimentologia do rio Guaíba analisados por sensores geoacústicos e orbitais. / Fernando Comerlato Scottá. – Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2018.

[127 f.] il.

Tese (Doutorado). - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Geociências. Instituto de Geociências. Porto Alegre, RS - BR, 2018.

Orientador: Jair Weschenfelder

1. Sedimentos em suspensão. 2. Descarga líquida 3. Sedimentologia 4. Rio Guaíba. I. Título.

CDU 556.536

Catálogo na Publicação
Biblioteca Instituto de Geociências - UFRGS
Sônia Teresinha Duarte de Oliveira

CRB 10/2310

*"A abordagem do guerreiro é dizer "sim" para a vida:
dizer "sim" para tudo,
participar alegremente das tristezas do mundo.
Nós não podemos curar as tristezas do mundo,
mas podemos escolher viver em alegria.
Quando falamos em consertar os problemas do mundo,
estamos latindo para a árvore errada.
O mundo é perfeito. É uma bagunça. Sempre foi uma bagunça.
Nós não vamos mudar isso.
Nosso trabalho é endireitar as nossas próprias vidas."*

Joseph Campbell

DEDICATÓRIA

*Dedico aos meus pais,
Alcides Scottá e Elisabete Comerlato Scottá*

AGRADECIMENTOS

Uma pesquisa de grande magnitude como esta envolveu o tempo e dedicação de muitas pessoas. Esta tese não seria realizada sem a ajuda de um grupo de professores, técnicos e alunos que abraçaram e fizeram este trabalho acontecer.

Além disso, a estrutura prévia dos laboratórios e equipamentos do Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (CECO/UFRGS) permitiu a viabilidade desta tese. Quero agradecer a todos os pesquisadores, técnicos e alunos que ao longo de muitos anos de esforços fizeram o CECO ser uma referência de pesquisas.

Agradeço ao meu orientador Jair Weschenfelder, pela confiança no meu trabalho e tranquilidade em lidar com o processo de construção da tese. Esses fatores foram importantíssimos para que um trabalho longo pudesse avançar de forma gradual e com bastante segurança.

Agradeço aos técnicos José Carlos Nunes e Gilberto Silveira dos Santos, que me ajudaram muito na organização de campo e processamento dos dados em laboratório. Também quero agradecer as discussões e ao aprendizado ao longo desses anos que tive professores Elírio Toldo Júnior e Nelson Sambaqui Gruber.

Agradeço aos meus colegas e amigos que fiz no CECO. Vários desses amigos literalmente embarcaram no Guaíba comigo nos trabalhos de campo: Mauro Michelena, Natacha de Oliveira, Volney Bitencourt, Erick Antal, Cristiano Fick, Ana Rita de Oliveira, Rafael Mastracusa e Vicente Oliveira.

Um agradecimento mais que especial vai ao meu grande amigo e colega de pós-graduação Mauro Michelena Andrade. A ajuda e parceria foram fundamentais para a realização desta tese. Muito obrigado!

Também agradeço aos amigos Andrea Lemos (vários trabalhos de campo!), Vagner Paz Mengue, Luiz Felipe Velho e Charles Tebaldi, que gentilmente me ajudaram nos trabalhos de campo.

Quero agradecer a todos os mestres que tive dentro da UFRGS. Desde 2006, quando ingressei na graduação em Geografia tive a oportunidade de aprender muito. Vários professores, como Luiz Felipe Velho, Jorge Arigony Netto, Francisco Eliseu Aquino, Ulisses Bremer, Eliana Lima da Fonseca e Jefferson Cardia Simões foram mestres que me instigaram pela busca científica e me motivaram a seguir esse caminho.

Quero agradecer a minha inquietação, que me mantém cronicamente insatisfeito. Todavia, é a mesma fonte de busca ao meu desenvolvimento pessoal e foi o meu principal impulso para o desenvolvimento da tese.

Quero agradecer a minha família, minha mãe, Elisabete Comerlato Scottá, e meu pai, Alcides Scottá. O investimento deles na minha educação culminou em diversos anos dedicados a ciência e na construção desta tese. Esse trabalho ficará eternamente entrelaçado com tudo que vivi nos últimos anos com minha família. Muitas dores, perdas, esforços e muito aprendizado.

Agradeço a todas as pessoas que torcem por mim. A jornada valeu a pena.

RESUMO

Esta Tese aborda a hidrodinâmica e a sedimentologia de fundo, subfundo e em suspensão no Guaíba utilizando sensores geoacústicos e orbitais. Foram realizados 26 campanhas para coletas de diferentes conjuntos de dados: sísmica de fundo e subfundo, amostras de fundo *in situ*, corrente e vazão com um perfilador acústico de correntes por Doppler (PADC), sedimento em suspensão *in situ*. Diferentes embarcações foram utilizadas, a depender da natureza do trabalho realizado. Os dados de sedimentos em suspensão serviram de entrada a dois modelos de regressão para estimar a concentração de sedimentos em suspensão (CSS), ambos feitos com dados do satélite Landsat 8, sensor OLI (*Operational Land Imager*), e do PADC. Os dados do PADC, além da regressão, serviram para fornecer informações sobre a corrente e vazão. Os dados sísmicos (perfilador sísmico Stratabox 10 kHz e Sonar de Varredura Lateral) serviram para um mapeamento sistemático dos padrões geoacústicos para reconhecimento dos processos hidrodinâmicos e sedimentares atuantes. Todos os conjuntos de dados indicam que a corrente do Guaíba tem predomínio de Norte para Sul. As formas de fundo como *ripples* e dunas subaquosas assimétricas, presentes nos registros sísmicos, confirmam esse predomínio e indicam um comportamento fluvial do sistema aquático. Essas formas de fundo foram mapeadas na entrada, exutório e em áreas do canal de navegação, nas seções longitudinais com menor extensão. Essa presença sugere diferentes tipos de ambientes que são influenciados basicamente pela seção longitudinal. Seções mais estreitas provocam as maiores velocidades das correntes e uma maior competência do sistema para o transporte de sedimentos. As áreas no interior do Guaíba, sob o ponto de vista das correntes, possuem menor competência de transporte e são, portanto, ambientes com menor energia hidrodinâmica comparadas com as áreas de entrada e saída desse sistema. Esse comportamento também foi observado nos perfis de corrente de PADC e nas plumas de sedimento dos mapas de CSS nas condições de maiores descargas líquidas. A ação de ventos e geração de ondas também é uma forçante presente nesse sistema. As áreas mais rasas, principalmente na margem oeste e sudoeste do Guaíba, apresentaram maiores concentrações em algumas datas com os mapas de CSS, resultado da resuspensão do sedimento pelas ondas. Essas áreas, sob o ponto de vista da influência das ondas, possuem alta energia hidrodinâmica e são ambientes de erosão. Dessa forma, o Guaíba está sujeito às forçantes vento/onda e descarga líquida de forma coexistente. O comportamento do sedimento é influenciado por esses dois fatores de forma simultânea ou apenas por uma forçante, a depender da descarga líquida dos rios tributários, da intensidade do vento e geração de ondas. Além disso, a profundidade, o tamanho e posição do sedimento também influenciam o comportamento do sedimento. Embora tenha forçantes distintas, a predominância do fluxo de Norte para Sul, com correntes atuando em toda a coluna d'água sugere que o Guaíba possui declividade no canal, condição para definir um canal fluvial. Esses fatores são condições que permitem concluir que esse sistema possui predomínio de comportamento de rio.

ABSTRACT

This thesis approaches the hydrodynamics and sedimentology of the bottom, subbottom, and in suspension in the Guaíba using geoacoustic and orbital sensors. Twenty-six campaigns were carried out to sample different datasets: bottom and sub-bottom seismics, field bottom samples, currents and river discharge measured by an acoustic Doppler current profiler (ADCP), and field suspended sediment. Different vessels were used depending on the nature of the conducted work. The suspended sediment data served as input to the two regression models for estimating sediment suspension concentration (SSC), both made with data from the Landsat 8 satellite, OLI (Operational Land Imager), and PACD. The ADCP data in addition to the regression analysis provided information on currents and river discharge. Seismic data (acquired by a 10-kHz Stratabox seismic profiler and a Side-Scan Sonar) were used to systematically map the geoacoustic patterns in order to identify hydrodynamic and sedimentary processes. All datasets indicate that the Guaíba river current has a predominant north-to-south direction. The bottom forms such as ripples and asymmetrical subaquatic dunes present in seismic records confirmed this predominance and indicated a river behavior. These background undulations were mapped at the upstream end, river mouth, and in the navigation channel areas in short longitudinal sections. The presence of subaqueous dunes correspond to different types of environments that are mainly influenced by the longitudinal section. Narrower sections lead to higher current velocities and a greater system competence for sediment transport. The interior areas from the Guaíba River showed less transportation competence when considering its currents. Therefore, these are environments with lower hydrodynamic energy when compared to the upstream end and river mouth areas. This behavior was also observed in the ADCP current profiles and in the sediment plumes from the SSC maps under higher net river discharges. Winds and the wave generation are also important forces present in this system. Mainly the shallower areas at the western and southwestern margins of the Guaíba River presented higher concentrations on the SSC maps on some dates, which were a result of the sediment resuspension driven by waves. These areas have high hydrodynamic energy and are erosional environments when considering the wave influence. Thus, the Guaíba River is simultaneously subjected to wind/wave forcing and net river discharge. The sediment behavior is concurrently influenced by these two forces or only by one depending on the net discharge from the tributary rivers, wind intensity, and generation of waves. Furthermore, the sediment depth and size also influence the sediment behavior. Although it has distinct forcing, the predominant north-to-south direction of the flow with currents reaching the entire water column suggests that the Guaíba system has a slope in the channel, a condition that defines a river channel. These factors are the requirements that allow to conclude that this system has a prevailing river behavior.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAR - ambientes de águas rasas.

APP - Áreas de Preservação Permanente.

CSS - concentração de sedimentos em suspensão.

MPS - material particulado em suspensão.

Qliq - descarga líquida

Qss - descarga sólida em suspensão

K-S - Kolmogorv-Smirnov normality test

NIR - near-infrared band

PACD - perfilador acústico de correntes por Doppler.

OLI - Operational Land Imager.

SSC - suspended sediment concentration

SR - surface reflectance

SVL - sonar de varredura lateral.

SWIR - medium-infrared band

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1. Localização e batimetria do Guaíba	20
Figura 2. Embarcações utilizadas nos trabalhos de campo.....	26
Figura 3. Modelo esquemático simplificado da tese.....	27

CAPÍTULO 2

<i>Figure 1. Location of the Guaíba river and the nine sub-basins that drain in the system.....</i>	<i>49</i>
<i>Figure 2. Illustration of the SR extraction for the three datasets: central pixel (CP), mean, and median</i>	<i>50</i>
<i>Figure 3. Flowchart of the performed statistical analyses</i>	<i>51</i>
<i>Figure 4. Exponential regressions between SSC (mg.L^{-1}) and the bands (SR) from the CP dataset. The red lines represent the prediction intervals of the models.....</i>	<i>52</i>
<i>Figure 5. CSS maps from August 22, 2016, and January 13, 2017.....</i>	<i>53</i>
<i>Figure 6. Regression analysis between the SSC field data and corresponding maps</i>	<i>54</i>
<i>Figure 7. Maps of modeled SSC</i>	<i>55</i>
<i>Figure 8. Map of the sedimentary environments of the Guaíba system.....</i>	<i>56</i>
<i>Figure 9. Image from January 13, 2017, in the composition of the visible 4R3G2B.....</i>	<i>57</i>

CAPÍTULO 3

Figura 1. Localização do sistema Guaíba e das nove sub-bacias afluentes	65
Figura 2. Mapa das seções de monitoramento realizadas com o sensor PADC.....	68
Figura 3. Etapas para estimação de CSS e Qss.....	71
Figura 4. Qliq medidas na Ponta do Gasômetro durante o período em estudo.	73
Figura 5. Relação entre NA e Qliq.	73

Figura 6. Comparação entre os dados de Qliq dos 4 principais tributários do rio Guaíba (linha em preto) e dados de Qliq medidos na seção Ponta do Gasômetro (pontos em vermelho).....	74
Figura 7. Perfis de medições das velocidades na Ponta do Gasômetro e Ponta do Dionísio, e o mapa de localização das seções com as correntes vetorizadas na direção preferencial do escoamento.....	77
Figura 8. Registros da inversão do fluxo em 13/01/2016. Cores quentes representam o sentido predominante Norte-Sul e as cores frias representam fluxo Sul-Norte (a esquerda). Mapa das seções com as correntes vetorizadas (a direita).	79
Figura 9. Relação entre a CSS (mg.l^{-1}) e RA.....	80
Figura 10. Correlação e diferença da CSS (mg/L^{-1}) das amostras coletadas por PACD comparadas com os dados de Andrade Netto et al. (2012).....	81
Figura 11. Séries temporais e dados de PACD das variáveis Qliq, CSS e Qss.....	83

CAPÍTULO 4

<i>Figure 1. Location of the study area.....</i>	<i>92</i>
<i>Figure 2. Classification of echo-characters from the NS of the Guaíba River</i>	<i>96</i>
<i>Figure 3. Classification of the echo-characters from the CS of the Guaíba River</i>	<i>97</i>
<i>Figure 4. Subaqueous dunes profile in the NS from the Guaíba system.....</i>	<i>98</i>
<i>Figure 5. Cross-section at Gasômetro. (Top panel) Velocity vectors from the surface layer. (Bottom panel) Side view of the cross-section.....</i>	<i>100</i>
<i>Figure 6. Location and seismic profile (3.5 kHz) of subaqueous dunes mapped at the Guaíba river mouth in Itapuã. The north and south orientations is indicated in the profile.....</i>	<i>100</i>
<i>Figure 7. Echogram associated with echo 3. Presence of large troughs on the bed and dredging disposals between the troughs.....</i>	<i>101</i>
<i>Figure 8. Comparison between the 1960s Brazilian Navy nautical chart (CNH, 2017) and the bathymetric map using the seismic profiler data from this work.....</i>	<i>102</i>
<i>Figure 9. Profile showing the echo 4 areas.....</i>	<i>102</i>

<i>Figure 10. Profile showing echo-character 5 and sub-bottom strata.....</i>	<i>103</i>
<i>Figures 11. Echo-character 6 and its variations (6A, 6B, and 6C) in the CS of the Guaíba River.....</i>	<i>104</i>
<i>Figures 12. Echogram representative of Echo 7. Presence of flat relief and concordant reflectors on the right. An echo-1 area is shown on the left</i>	<i>105</i>

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

Tabela 1. Datas das campanhas e tipo de aquisição de dados realizados	25
---	----

CAPÍTULO 2

<i>Table 1. Campaign dates and number of samples (n) to develop the model</i>	<i>58</i>
---	-----------

<i>Table 2. Spearman's correlations.....</i>	<i>59</i>
--	-----------

<i>Table 3. Results from the regression analyses performed for the bands in the three datasets..</i>	<i>60</i>
---	-----------

CAPÍTULO 3

Tabela 1. Datas de coleta de campo e quantidade de amostras utilizadas.....	69
---	----

Tabela 2. Qliq (m ³ /s) nas 3 seções transversais no rio Guaíba.	75
--	----

CAPÍTULO 4

Table 1. Types of classified echo-characters in the Guaíba River	95
--	----

SUMÁRIO

ESTRUTURA DA TESE	16
CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO	17
1.1 - QUALIFICAÇÃO DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVA.....	20
1.2 – OBJETIVOS.....	23
1.3 - HIPÓTESES DO ESTUDO	24
1.4 - MATERIAL E MÉTODOS.....	24
1.4.1 - Trabalho de campo e embarcações utilizadas	24
CAPÍTULO 2 – <i>EMPIRICAL MODELS TO ESTIMATE THE SUSPENDED SEDIMENT CONCENTRATION IN THE GUAÍBA RIVER WITH LANDSAT 8 SATELLITE DATA</i>	28
CAPÍTULO 3 – DESCARGA LÍQUIDA E SÓLIDA EM SUSPENSÃO DO SISTEMA GUAÍBA	61
CAPÍTULO 4 – <i>GEOACUSTIC PATTERNS OF THE GUAÍBA RIVER BOTTOM AND SUBBOTTOM AND THEIR RELATIONSHIP WITH SEDIMENTARY AND HYDRODYNAMIC PROCESSES</i>	88
CAPÍTULO 5 – SÍNTESE INTEGRADORA	111
5.1 - OBJETIVOS ALCANÇADOS	112
5.1.1 - Criação de um modelo empírico para estimar a CSS com o sensor OLI, satélite Landsat 8 – o Modelo B4-CSS-exp	112
5.1.2 - Estudo de correntes, Q _{liq} , CSS, Q _{ss} com um sensor PACD	112
5.1.3 – Mapeamento Sísmico.....	113
5.2 - O SISTEMA GUAÍBA: RIO GUAÍBA.....	113
5.3 - RECOMENDAÇÕES E POSSIBILIDADES DE TRABALHOS FUTUROS	116
5.3.1 - Avaliação e expansão do modelo B4-CSS-exp.....	116
5.3.2 - Mapeamento de dados sísmicos e a reconstrução paleogeográfica do Guaíba no Guaíba.....	117
5.3.3 - Fundeio de PACD e criações de séries temporais para estudos de corrente e descarga líquida.....	117
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	118

ESTRUTURA DA TESE

Esta Tese de Doutorado está estruturada de acordo com a Norma 103 do Programa de Pós-graduação em Geociências (PPGGEO) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). O capítulo 1 da Tese é composto por um texto introdutório da pesquisa. Os capítulos 2, 3 e 4 são artigos científicos submetidos a periódicos indexados. O capítulo 5 é um texto integrador final seguido de referências bibliográficas dos capítulos 1 e 5.

Capítulo 1 – Aborda os temas introdutórios da tese. Contém os objetivos, a justificativa, as hipóteses e os métodos.

Capítulo 2 – apresenta artigo do modelo empírico (B4-CSS-exp) realizado para estimar a CSS por imagens do sensor OLI, satélite Landsat 8. O artigo é intitulado de “*Empirical models to estimate the suspended sediment concentration in the Guaíba River with Landsat 8 satellite data*” e foi submetido à revista GIScience and Remote Sensing.

Capítulo 3 – aborda em artigo as variáveis Qliq, CSS e Qss realizadas com um sensor PACD. O título do artigo é “Descarga líquida e sólida em suspensão do sistema Guaíba” e foi submetido à revista Pesquisas em Geociências.

Capítulo 4 – é o artigo que aborda os processos hidrodinâmicos e geológicos atuantes no Guaíba com enfoque sísmico. O artigo foi submetido à revista Brasileira de Geofísica com o título “*Geoacoustic patterns of the Guaíba river bottom and subbottom and their relationship with the sedimentary and hydrodynamic processes*”.

Capítulo 5 – aborda os temas dos capítulos anteriores, na forma de um texto integrador da temática da tese. As referências bibliográficas citadas nos capítulos 1 e 5 se encontram no final deste capítulo. As referências bibliográficas citadas nos artigos são apresentadas ao final de cada um dos mesmos.

CAPÍTULO 1- INTRODUÇÃO

Ambientes de águas rasas (AAR) são áreas de contato entre terra e mar, lagos e rios, podendo ser considerados entre os mais dinâmicos ambientes da superfície terrestre, pois estão sujeitos a rápidos fluxos de transporte de sedimentos (MISSIAEN *et al.*, 2008; 2005). Além dos processos naturais atuantes, esses ambientes moldam e são moldados por atividades humanas, como atividades comerciais e de lazer (BLONDEL, 2009). A definição de AAR não é simples, porém uma definição frequentemente aceita é de ‘áreas cobertas de água com profundidades inferiores a 200 metros’ (BLONDEL, 2009), estando incluídas nesses casos áreas costeiras, plataforma continental interna, rios, lagos naturais ou artificiais (SOUZA, 2006).

O mapeamento dos habitats aquáticos é extremamente importante para pesquisadores e gestores desse tipo de ambiente (KAESER *et al.*, 2012). O gerenciamento integrado da zona costeira e de ambientes associados requer conjuntos de dados espaciais precisos, cobrindo áreas grandes, os quais às vezes são inacessíveis por métodos diretos de amostragem (KOTILAINEN & KASKELA, 2017).

Além disso, nos ambientes aquáticos, o monitoramento dos fluxos superficiais e a confiabilidade na predição de vazões são de extrema importância para fins de gestão (SALLA *et al.*, 2015). Avaliações contínuas, precisas e automáticas da descarga líquida dos rios sob várias condições de fluxo, incluindo condições de seca e inundação, são de vital importância (NIHEI & KIMIZU, 2008). Dessa forma, o monitoramento (aquisição temporal) e mapeamento (aquisição espacial) são fatores fundamentais e complementares em AAR, devido à estreita ligação entre variáveis sedimentológicas, biológicas e o ambiente hidrodinâmico (VAN OVERMEEREN *et al.*, 2009).

A utilização de sensores de diversas naturezas e com fontes de energia distintas é uma forma comum de investigação sobre AAR. Dados de sensoriamento remoto com base de fonte de energia na radiação eletromagnética, a bordo de satélites, permitem o monitoramento da superfície dos corpos aquáticos, onde é possível estimar concentração de sedimento em superfície (ROBERT *et al.*, 2016; MONTANHER *et al.*, 2014, 2013; MERTES *et al.*, 1993), concentração de plâncton (TYLER *et al.*, 2006) e concentração de poluentes na superfície da água (KOPAČKOVÁ & HLADÍKOVÁ, 2014). A vantagem da utilização desses sensores remotos está na maior capacidade de fornecer informações em maior escala quando comparada com métodos *in situ*, que possui amostragem espacial pontual (RITCHIE *et al.*, 2003). No entanto, a alta absorção da radiação eletromagnética pela água limita ou mesmo impede a aquisição de informações da superfície de fundo dos ambientes aquáticos.

Outra possibilidade consiste em utilizar métodos geoacústicos, nos quais o eco é utilizado na aquisição de informações do ambiente aquático, tanto da coluna d'água como do fundo e do subfundo. Diversos tipos de dados com diferentes informações são adquiridos, como imagens de fundo, ecogramas de superfície e subsuperfície de fundo, dados sobre a velocidade das partículas da água com perfiladores acústicos de correntes por Doppler (PACD). Basicamente, os ensaios geofísicos empregados na investigação de áreas submersas são desenvolvidos por meio de uma embarcação, que traz no seu interior um sistema para registro e armazenamento de dados e uma fonte de sinais que normalmente é rebocada na superfície da água a certa distância da embarcação (SOUZA, 2006).

No Brasil, diversos estudos com métodos geoacústicos foram executados em áreas de baías, lagos, rios e estuários (BARROS *et al.*, 2017; SILVA *et al.*, 2014; MARINO *et al.*, 2013; QUARESMA *et al.*, 2011; VERONEZ JR *et al.*, 2009a; VERONEZ JR *et al.*, 2009b; PAOLO & MAHIQUES, 2008; HATUSHIKA *et al.*, 2007; CATANZARO *et al.*, 2004; QUARESMA *et al.*, 2000). No Rio Grande do Sul, diversos trabalhos com levantamentos sísmicos foram realizados na Lagoa dos Patos (BORTOLIN *et al.*, 2018; BORTOLIN, 2017; SANTOS-FISHER *et al.*, 2016; WESCHENFELDER *et al.*, 2014; BAITELLI, 2012; WESCHENFELDER *et al.*, 2010; 2006; TOLDO JR *et al.*, 2000; 1994) e em áreas em plataforma continental interna do Rio Grande do Sul (OLIVEIRA, 2017; SILVA, 2009; ABREU & CALLIARI, 2005; BUCHMANNI *et al.*, 2001) com o objetivo de construir um modelo evolutivo paleogeográfico. Apesar dos trabalhos desenvolvidos, outros corpos hídricos nos ambientes costeiros internos do Rio Grande do Sul carecem de estudos sísmicos.

O Guaíba é formado pela junção dos rios Jacuí, Sinos, Caí e Gravataí, recebendo o deságue de nove sub-bacias que se estendem pelo centro e nordeste do Rio Grande do Sul (Figura 1), em uma área de aproximadamente 84.763 km², que abrange mais de 250 municípios (NICOLODI *et al.*, 2010). Esse sistema possui área de 496 km², com início na Usina do Gasômetro e percorrendo aproximadamente 50 km, quando encontra a Lagoa dos Patos, em Itapuã. Além disso, também recebe as águas de arroios situados na sua margem, entre eles o Arroio Dilúvio, sendo o de maior extensão (DMAE, 2018). Possui profundidade média de 2 metros (NICOLODI, 2007), registrando valores maiores que 30 metros próximos em Itapuã. O canal apresenta maiores profundidades, variando entre 4 a 8 metros (DNAEE, 1983).

No município de Porto Alegre, a água bruta é captada integralmente no Guaíba (DMAE, 2017). Além disso, o Guaíba também abastece os municípios de Viamão,

Eldorado do Sul e Guaíba. Possui despejo de efluentes residenciais, industriais e transporte de pessoas, cargas (GUAÍBA DADOS, 2017), além de atividades de lazer. Dessa forma, o conhecimento científico e o manejo correto desse corpo d'água são de fundamental importância devido a forte pressão antrópica nele exercido.

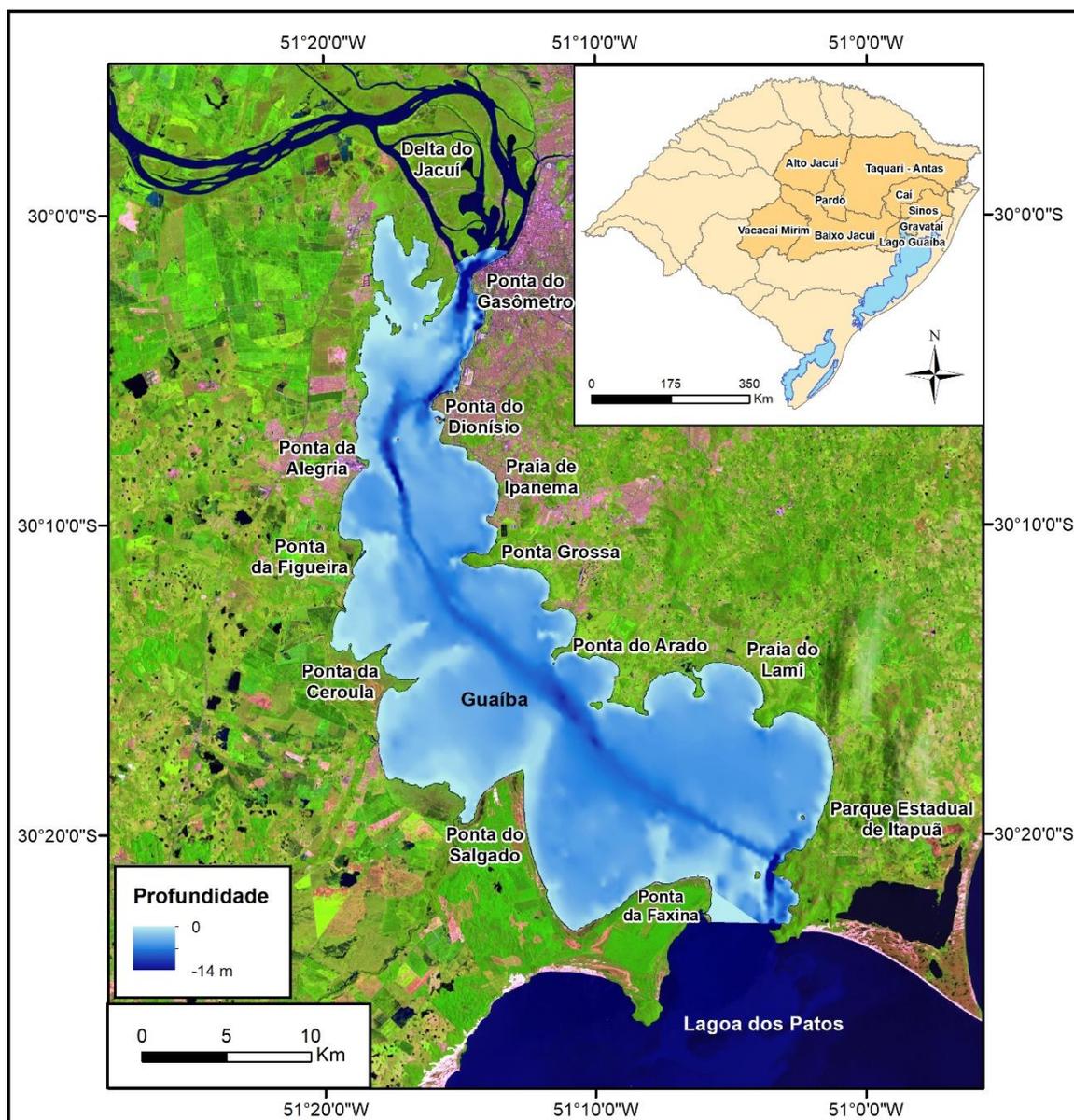


Figura 1. Mapa de localização e batimetria do Guaíba, bem como das bacias hidrográficas que desaguam nele. Dados de batimetria de Nicolodi (2007).

1.1 - QUALIFICAÇÃO DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVA

Além dos múltiplos usos previamente comentados sobre o Guaíba, a definição de rio ou lago é objeto de discussão na sociedade gaúcha, atingindo o meio acadêmico e

recebendo atenção da imprensa (SUL 21, 2016). O Guaíba é definido oficialmente como um lago pela prefeitura municipal de Porto Alegre (DMAE, 2018) e rio pela Marinha do Brasil (CHM, 2017). Menegat e Carraro (2009) definem o Guaíba como um lago pela principal razão que um rio nunca se origina antes de um depósito deltaico e a presença do Delta do Jacuí inviabiliza a classificação como um rio. Também afirmam que o fluxo de escoamento ocorre apenas de forma superficial, característica comum de lagos.

Toldo Jr. e Almeida (2012) definem o Guaíba como um rio por apresentar fortes fluxos de escoamentos, diferente de um lago ou laguna, que são locais onde a circulação da água favorece a deposição dos sedimentos. Os fluxos são expressivos de forma que o tempo de residência médio das águas é de 10 dias. Outro fator apontado pelos autores é por apresentar um canal principal de escoamento, com a ocorrência de sedimentos finos depositados nesse local, sendo um fator que não é o modo de escoamento observado em lagoas.

O debate sobre essa questão também tem influência na gestão da orla do Guaíba, isto porque a legislação ambiental brasileira determina Áreas de Preservação Permanente (APP) com dimensões diferentes para rios e lagos (SUL 21, 2016). Às áreas no entorno de lagos e lagoas naturais determina APPs com dimensões de 30 metros de faixa para zonas urbanas, ao passo que para rio com a largura do Guaíba seria de 500 metros (MELO, 2014).

Outro debate frequente é sobre a viabilidade de extração de areia do Guaíba para a construção civil (CORREIO DO POVO, 2015; SUL 21, 2013; SMARJA, 2011; CORREIO DO POVO, 2010) devido a falta de disponibilidade de areia no rio Jacuí nos últimos anos (GLOBO, 2014). No caso da extração da areia, avaliações sobre o leito são de fundamental importância para a elaboração de critérios técnicos para a gestão do Guaíba. Soma-se a isso o fato de que na porção SE do lago localiza-se o Parque Estadual de Itapuã, uma unidade de conservação que representa a última amostra significativa de ecossistemas originais da região metropolitana de Porto Alegre (NICOLODI, 2007), que poderia estar ameaçado com a extração de areia no Guaíba.

Outro problema ambiental ocorrido nos últimos anos foi a formação de bancos de areia na superfície do Guaíba através da dragagem feita para acomodar a tubulação que transporta o esgoto até a estação de tratamento da Serraria, na zona Sul de Porto Alegre (ZERO HORA; 2012). A formação dos bancos provocou transtornos e riscos para a navegação, havendo a interdição da navegabilidade nas áreas de formações

dos bancos (POPA; 2015). Entende-se que um maior conhecimento sobre a morfologia e dinâmica do fundo do Guaíba poderia ter evitado ou amenizado esses problemas.

Recentemente o estudo de Reckziegel (2018), organizou de forma pioneira um histórico de ocorrências de inundação e avaliou a distribuição espacial e temporal destes eventos no Delta do Jacuí e no Guaíba, registrando 46 eventos classificados como de baixa e média intensidade. As áreas com risco de inundação estão localizadas nas ilhas do Delta do Jacuí e porções dos bairros em Porto Alegre, Eldorado do Sul e Guaíba.

O trabalho de Andrade Netto *et al.* (2012) apresenta uma estimativa de quantificação da concentração de sedimentos em suspensão no Guaíba. Apesar disso, os dados de sedimentos adquiridos são provenientes de dados de turbidez de apenas uma estação de bombeamento do DMAE. Dessa forma, não existe um estudo que abrange a estimativa de concentração de sedimentos em suspensão considerando todo o corpo d'água.

O uso de sensoriamento remoto orbital apresenta a possibilidade de uma estimativa de quantificação e monitoramento da concentração de sedimentos em suspensão nos rios, lagos e reservatórios considerando todo o curso d'água em questão. Diversos trabalhos foram realizados em vários cursos d'água do planeta, mostrando aplicabilidade de estimar sedimentos em suspensão com imagens orbitais (ROBERT *et al.*, 2016; MONTANHER *et al.*, 2014; PINTO *et al.*, 2014; SRIWONGSITANON *et al.*, 2011; TYLER *et al.*, 2006; RITCHIE *et al.*, 2003; HAN, 1997;). Outra forma de estimar sedimentos em suspensão é com a utilização de perfiladores acústicos de correntes por Doppler (PACD, em inglês: ADCP). Esses sensores permitem estimar a concentração de material particulado em suspensão (MPS), uma vez que a medida do retroespalhamento desse sinal é proporcional à quantidade de partículas na água (ÁVILA *et al.*, 2014; ZALESKI & SCHETTINI, 2006; GARTNER, 2004).

A estimativa da concentração de sedimentos em suspensão é uma variável importante porque tem influência nos processos ecológicos dos sistemas aquáticos (DONOHUE & MOLINOS, 2009), bem como os processos geomorfológicos da construção do relevo e evolução da planície de inundação (PIERCE & KING, 2008; MERTES *et al.*, 1993). O aporte sedimentar influencia a navegação, o assoreamento dos reservatórios e portos bem como o aumento do potencial destrutivo das inundações (ANDRADE NETTO *et al.*, 2012), além de sua distribuição ser um indicador

de qualidade ambiental (HEISE & FÖSTNER, 2007; HEININGER *et al.*, 2007), devido sua tendência de agregar poluentes.

Até o momento, o trabalho de Bachi *et al.* (2000) identificou as diferenças na distribuição dos tamanhos dos sedimentos e sua composição a partir de 187 amostras utilizando uma draga tipo Van Veen. Outros estudos analisaram a influência do vento na geração de ondas e no padrão espacial de ressuspensão de sedimentos (NICOLODI *et al.*, 2013; NICOLODI *et al.*, 2011). Apesar disso, não existe um mapeamento por imagens para identificar os principais tipos de fácies sedimentares da superfície de fundo do Guaíba. O uso de sensores geoacústicos, como perfiladores sísmicos e imagem de fundo por Sonar de Varredura Lateral (SVL), tem encontrado crescente uso, pois pode fornecer cobertura em grande escala que não é possível com os instrumentos tradicionais de amostragem (JACKSON & RICHARDSON, 2007).

Em AAR, o uso de sensores geoacústicos apresenta crescente uso desde o final da década de 90 (CLARKE *et al.*, 1996). Embora estivessem disponíveis desde a década de 70 e o potencial de investigação científica esteja documentado (PERRY, 1982), a dificuldade de processamento de grandes volumes de dados e dificuldades de posicionamento espacial limitava o uso dessa tecnologia (CLARKE *et al.*, 1996). Atualmente, com o avanço da capacidade de processamento de dados, novos estudos mostraram a maior viabilidade do uso desses sensores em AAR para a investigação da morfologia de fundo (*e.g.* SILVA *et al.*, 2014; KAESER *et al.*, 2012; PAPTAEODOROU *et al.*, 2012). Além disso, o avanço da tecnologia também contribuiu para uma maior portabilidade dos equipamentos geofísicos, possibilitando o desenvolvimento de estudos em áreas restritas, que antes eram inacessíveis com o uso de grandes embarcações (SOUZA, 2006), facilitando o levantamento de dados em AAR.

1.2 – OBJETIVOS

O **objetivo geral** é analisar a hidrodinâmica e a sedimentologia na superfície de fundo, subfundo e em suspensão no Guaíba utilizando dados de sensores geoacústicos e orbitais.

Os **objetivos específicos** são:

Realizar um modelo empírico para estimar a concentração de sedimentos em suspensão por imagens de sensoriamento remoto orbital.

Estimar a descarga líquida e sólida em suspensão com o uso de um PACD.

Identificar os principais tipos de fácies sedimentares no fundo do Guaíba utilizando sensores geoacústicos.

Realizar um estudo da hidrodinâmica e sedimentologia do Guaíba a partir dos sensores geoacústicos e orbitais.

Caracterizar o Guaíba, com base nos dados de coletados, a sua característica predominante de ambiente fluvial ou lagunar, contribuindo com a discussão sobre rio e lago.

1.3 - HIPÓTESES DO ESTUDO

A partir do atual conhecimento disponível sobre o Guaíba, observa-se que ainda carecem a utilização de sensores para o monitoramento e investigação da dinâmica dos sedimentos no fundo e em suspensão. Portanto, as hipóteses deste estudo são:

- A identificação dos padrões geoacústicos de fundo e subfundo vai permitir inferir processos hidrodinâmicos e sedimentológicos desse sistema.

- A utilização de PACD para medição de correntes, descarga líquida e sólida possibilitará uma caracterização geral sobre a circulação desse sistema.

- A modelagem empírica da CSS com imagens de satélite vai parametrizar e viabilizar um estudo espaço-temporal dessa variável no Guaíba.

- Os conjuntos de dados coletados se mostram complementares e proporcionarão uma análise integrada do sistema, permitindo uma definição mais clara das características ambientais e classificação do Guaíba.

1.4 - MATERIAL E MÉTODOS

1.4.1 - Trabalho de campo e embarcações utilizadas

Foram realizados 26 campanhas para coletas de diferentes tipos de dados: sísmica de fundo e subfundo, amostras de fundo, corrente e vazão, sedimento em suspensão *in situ* (Tabela 1). Diferentes embarcações foram utilizadas, dependendo do tipo de trabalho que foi realizado.

Tabela 1. Datas das campanhas e tipo de aquisição de dados realizados.

*Campanhas com dados de sedimento em suspensão descartados.

	<i>Data</i>	<i>Sísmica</i>	<i>Amostras de fundo</i>	<i>Corrente e vazão</i>	<i>Sedimento em suspensão</i>
1	01/09/2015			X	X
2	08/11/2015				X
3	11/01/2016	X	X	X	X
4	12/01/2016	X	X		
5	13/01/2016	X	X		
6	27/01/2016			X	X
7	16/04/2016				X
8	08/06/2016	X	X	X	X
9	09/06/2016	X	X	X	X
10	13/06/2016	X	X		
11	14/06/2016	X	X		
12	15/06/2016	X	X	X	X
13	05/07/2016*				X
14	22/08/2016			X	X
15	23/09/2016*				X
16	22/10/2016			X	X
17	10/11/2016				X
18	26/11/2016				X
19	12/12/2016				X
20	13/01/2017				X
21	26/01/2017			X	X
22	29/01/2017*				X
23	20/02/2017	X			
24	21/02/2017	X			
25	02/03/2017				X
26	18/03/2017*				X

A maior embarcação utilizada foi uma de médio porte, com aproximadamente 10 metros de comprimento e motor de 120 hp (Figura 2). Essa embarcação possui espaço e estrutura para a fixação dos equipamentos sísmicos, além do armazenamento de baterias para fornecer energia para o funcionamento dos equipamentos sísmico. Embarcações menores foram utilizadas (Figura 2), estas relacionadas com os dias de trabalho de coleta de sedimentos em suspensão, que não necessitaram de muitos equipamentos e possibilitaram a navegação com embarcações menores.



Figura 2. Embarcações utilizadas nos trabalhos de campo. A - Embarcação de médio porte. B – Bote motorizado. C – Bote não motorizado.

1.4.2 - Panorama geral da tese

O panorama geral desse trabalho (Figura 3) foi dividido em quatro etapas: dados coletados (A), dados prévios (B), processamento e resultados (C) e integração da sedimentologia e hidrodinâmica (D).

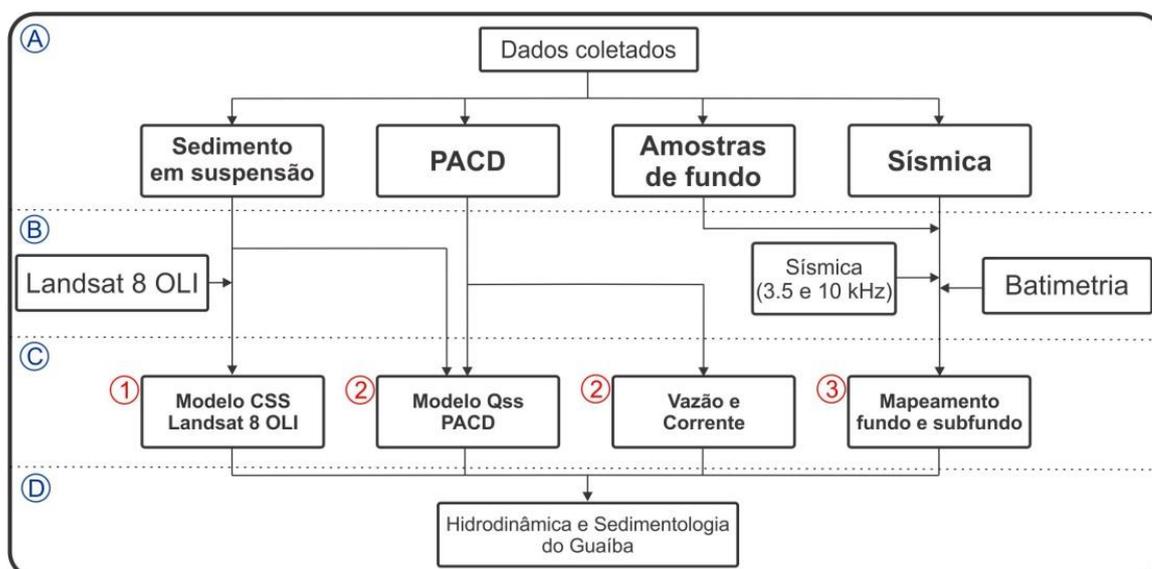


Figura 3. Modelo esquemático simplificado da tese. A- Dados coletados. B – Dados utilizados que não foram coletados neste trabalho. C – Processamentos e resultados. D – Síntese integradora. Os números representam a ordem dos artigos submetidos aos periódicos.

Foram coletados 4 tipos de dados: sedimento em suspensão, PACD, amostras de sedimentos de fundo, dados sísmicos. Os dados de sedimentos em suspensão serviram de entrada para os dois modelos de regressão realizados, com dados do satélite Landsat 8, sensor OLI, e com os dados de retroespalhamento acústicos do PACD. Os dados do PACD, além da regressão, serviram para fornecem informações sobre a corrente e vazão do Guaíba.

Os dados sísmicos correspondem a dois equipamentos: perfilador sísmico Stratabox 10kHz e Sonar de Varredura Lateral Humminbird (SSS) 798ci SI (frequência de 455 kHz), acoplados com um sistema DGPS (Differential Global Positioning System). Foram coletadas 42 amostras de fundo para auxiliar na interpretação dos dados sísmicos, juntamente com o uso da batimetria de Nicolodi (2007). Também foram interpretados dados sísmicos (perfiladores sísmicos de 3,5 e 10kHz) previamente coletados pelo CECO (Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica). Maiores informações sobre os dados e processamentos realizados são encontradas nos artigos submetidos dos capítulos 2, 3 e 4 desta tese.

**CAPÍTULO 2 – EMPIRICAL MODELS TO ESTIMATE THE SUSPENDED
SEDIMENT CONCENTRATION IN THE GUAÍBA RIVER WITH LANDSAT
8 SATELLITE DATA**



Fernando Scottá <fcscotta@gmail.com>

Submission Confirmation for Empirical models to estimate the suspended sediment concentration in the Guaíba River with Landsat 8 satellite data

1 mensagem

GIScience & Remote Sensing <em@editorialmanager.com>
 Responder a: GIScience & Remote Sensing <ersgis@unist.ac.kr>
 Para: Fernando Comerlato Scotta <fcscotta@gmail.com>

3 de setembro de 2018 21:59

Sep 03, 2018

Dear Mr Scotta,

Your submission entitled "Empirical models to estimate the suspended sediment concentration in the Guaíba River with Landsat 8 satellite data" has been received by journal GIScience Remote Sensing

You will be able to check on the progress of your paper by logging on to Editorial Manager as an author. The URL is <https://tgrs.editorialmanager.com/>.

Please verify the following information is accurate:

Additional Information

1. Fernando Comerlato Scotta, M.D.

Question

Response

Has this manuscript been submitted previously to this journal? No

Periódicos

ISSN	Título	Área de Avaliação	Classificação
1548-1603	GISCIENCE AND REMOTE SENSING	GEOCIÊNCIAS	B1

Empirical models to estimate the suspended sediment concentration in the Guaíba River with Landsat 8 satellite data

Empirical models using *Operational Land Imager* (OLI) sensor data from the LANDSAT 8 satellite were developed to estimate the suspended sediment concentration (SSC) in the Guaíba river. One hundred forty-four field water samples were collected on the surface and later filtered by the gravimetric method in the laboratory to determine SSC. Surface reflectance was extracted from the central pixel correspondent to the samples and from the adjacent pixels so that the results could be compared. Regression analyzes were performed among the SSC data and for the blue, green, red, near-infrared (NIR), and two medium infrared bands (SWIR1 and SWIR2). In the regression analysis, the R-square (R^2), significance of coefficients, and the Kolmogorv-Smirnov test were tested for the normality of residuals. The best-fit model corresponded to the red band in an exponential relationship and was called B4-SSC-exp. The model allowed the image parameterization and comparison among the net river discharge data from the tributary rivers. The transport in the channel and adjacent areas was more intense during higher net tributary discharges. Other periods presented the highest SSC located at the margins, corresponding to the sediment resuspension caused by wind-driven waves. This behavior evidences that SSC in the Guaíba river is significantly subjected to wind/wave forcing and net river discharge.

Keywords: remote sensing, geoprocessing, empirical modeling, hydrodynamics, sedimentology

Introduction

The mapping of aquatic habitats is extremely important for researchers and managers of this type of environment (Kaeser, 2012). The investigation of sediment composition and quantification, and the morphology of the bottom and biological communities are examples of data that can be mapped. As these characteristics are highly controlled by hydrodynamics, there is often a close link among them (Van Overmeeren et al. 2009).

The suspended sediment concentration (SSC) in inland continental waters is an important variable since it influences the ecological processes of aquatic systems (Donohue & Molinos, 2009) as well as the geomorphological processes of relief and floodplain development (Pierce & King, 2008; Mertes et al. 1993). The sedimentary input affects navigation, sedimentation of reservoirs and ports, and the increase of the destructive potential of floods (Andrade Neto et al.

2012), besides the fact that its distribution can be an indicator of environmental quality, pollution, and public health (Robert et al. 2016; Heise & Föstner, 2007; Heininger et al. 2007).

The SSC evaluation usually requires surveys with vessels, which depend on the weather conditions and on an experienced work team. Furthermore, the quality of field monitoring depends on the number of samples, their spatial representativeness, and frequency of measurements (Robert et al. 2016). Thus, sampling is not often sufficient in quantity to create a significant distribution map in extensive water bodies (Kroger et al. 2005; Ritchie et al. 2003).

An alternative to these studies is the use of orbital remote sensing images. Research and monitoring of the surface of aquatic environments are possible because the substances present in water alter the radiation proportion that is reflected (Novo, 2010). SSC is visibly represented in aerial images. The suspended solids in water resemble the soil behavior, present a distinct behavior from pure water, and allow these materials to be differentiated (Lillesand et al. 2007).

The great advantage of using these sensors onboard satellites is the larger spatial sampling capacity when compared to field methods (Ritchie et al. 2003). The use of satellite imagery allows the monitoring of the surface of aquatic bodies, where it is possible to estimate, for example: SSC (Montanher et al. 2014; Montanher et al. 2013; Sriwongsitanon et al. 2011; Mertes et al. 1993), and the concentration of plankton (Fu et al. 2016; Tyler et al. 2006) and pollutants on the water surface (Kopačková & Hladíková, 2014).

Most studies that aim at estimating SSC with remote sensing are based on empirical models, i.e., on the relationship between sediment concentration and the surface reflectance (SR) for a specific sensor (Ritchie et al. 2003). This relationship is usually specific to a particular site (Liu et al. 2003) and cannot be extrapolated to other water bodies with different characteristics. Despite the area limitation, the use of a consistent equation to relate field observations to satellite data is preferable since it easily allows the comparison of results from different images of the same area over time (Kloiber et al. 2002).

The Guaíba system is formed by the junction of the Jacuí, Taquari, Sinos, Caí, and Gravataí rivers, receiving the drainage of nine sub-basins that extend through the center and northeast of the state of Rio Grande do Sul (Figure 1), in an area of 84,763 km² that covers more than 250 cities (Nicolodi et al. 2010). The water body under study has an area of 496 km² and is approximately 50 km long. Its initial and final borders are in the so-called Ponta do Gasômetro and Ponta de Itapuã, respectively; the latter is the site where the study area meets Patos Lagoon.

Figure 1 near here

Figure 1. Location of the Guaíba river and the nine sub-basins that drain in the system. Red dots show the 171 field samples collected in order to develop the model.

In terms of bathymetry, the Guaíba river presents an average depth of 2 m (Nicolodi, 2007), showing recorded values that are greater than 30 m near the Itapuã river mouth. Except for the mentioned site, the greatest depths are found in the channel (Figure 1), varying between 4 and 8 meters (DNAEE, 1983).

Guaíba is officially defined as a lake by the city hall of Porto Alegre (DMAE, 2018). However, the Brazilian Navy defines this system as a river in its nautical charts (CNH, 2017). In the academic community, its definition as lake or river is controversial (Menegat & Carraro, 2009; Toldo Jr & Almeida, 2009). However, the predominance of a north-to-south flow with currents moving throughout the water column suggests that the Guaíba system has a slope in the channel, a condition that defines a river channel. These factors are the conditions that allow us to conclude that this system has a predominant river behavior (Scottá et al. submitted).

This work aimed at developing empirical models to estimate the suspended sediment concentration (SSC) in the Guaíba river using Landsat 8 satellite data – *Operational Land Imager* (OLI) sensor – as well as at characterizing the SSC spatial distribution in the studied area.

Material and Methods

Field work, field data sampling and processing

Nine field campaigns were carried out onboard a vessel to sample field data from November 2015 to March 2017 (Table 1) on the days the satellite was covering the study area, when the cloudiness was low or inexistent. One hundred seventy-one water samples were collected, 27 of which were discarded due to cloud interference in the scenes or problems in the sample filtration, thus remaining 144 samples to adjust the model. Samples were collected at a 2-hour interval before and after the satellite coverage, which occurs at 10:25am local time (USGS, 2017). In the three final campaigns, the samplings were conducted throughout the day and the acquisition time exceeded the 2-hour interval due to the larger number of samples.

Table 1. Campaign dates and number of samples (n) to develop the model.

Table 1 near here

The samples were collected on the water surface and positioned with a Garmin 78S GPS. Subsequently, the GPS geographical coordinates were used to extract SR from the pixels in the images. Figure 1 shows the location of the SSC data sampling for the nine campaigns. The higher concentration of sampling sites in the northern sector of the Guaíba system and in the areas of the Jacuí river delta and Sinos river mouth is due to logistic factors associated with the vessel and navigation safety.

The water samples were filtered in the laboratory by applying the gravimetric method until the moment when the filter saturation was reached. A vacuum pressure pump and 45- μm cellulose nitrate filters with a diameter of 47 mm were used. The filters were weighed on a precision scale before and after filtration in order to obtain the material mass. We followed the

method described in Baumgarten et al. (2010) in this step. Finally, the mass was multiplied by the volume of the filtered sample, resulting in SSC for each sampling site.

Satellite imagery and extraction of reflectance values

Images from the Landsat 8 satellite, *Operational Land Imager* (OLI) sensor, were acquired for the Guaíba river area (Path 221, Row 81). The data were downloaded free of charge from the USGS website (<https://espa.cr.usgs.gov/>) by requesting the images in SR values with geometric and atmospheric correction (USGS, 2017). This sensor was launched on February 11, 2013, and has a spatial and temporal resolution of 30 m and 16 days, respectively, with nine available spectral bands.

The SF values were extracted from the Envi application. The coordinates of the stations were used to locate the pixel where the data was collected. The central (CP) and peripheral pixels (Figure 2) were acquired for the blue (B2), green (B3), red (B4), near-infrared (NIR, B5), and medium-infrared (SWIR1 and SWIR2, B6 and B7, respectively) bands. The mean and median of the nine pixels extracted for each of the bands were calculated. Thus, three datasets were created to be compared with the SSC data: CP bands, mean bands, and median bands.

Figure 2 near here

Figure 2. Illustration of the SR extraction for the three datasets: central pixel (CP), mean, and median.

Statistical analyses

Initially, Kolmogorv-Smirnov (KS) normality tests were performed for all datasets. The Spearman's correlation (Figure 3) between the CP, mean, and median bands was used to know the "spatial dependence" of the values between CP and peripheral pixels. The level of significance was $\alpha = 0.01$.

Regression analyses were conducted between the SSC data and the three datasets for each band. The R-square (R^2), significance of coefficients, and the K-S test were checked for the normality of residuals. For the coefficient and K-S tests, a significance of $\alpha = 0.1$ was considered.

Figure 3 near here

Figure 3. Flowchart of the performed statistical analyses.

Map generation and model validation

The images from August 22, 2016, and January 13, 2017, were selected to create SSC maps from the developed models. In order to validate the models, in addition to providing visual analyses to verify the model overview, comparisons regarding the mean and correlation ($\alpha = 0.1$) were made between the field data maps from the two dates.

Environmental interpretation

Thirteen SSC maps were generated for the red band (B4) aiming at a hydrodynamic interpretation of the study area. A comparison was made between the SSC maps and the net discharges from the four main tributaries of the Guaíba river (Jacuí, Taquarí, Caí, and Sinos rivers), which were acquired from the Brazilian National Water Agency (BNWA) Hidroweb website (<http://hidroweb.ana.gov.br/>). Data corresponding to ten days prior to the date of each map were selected. The location of the flow stations can be seen in Figure 1.

Furthermore, the image from January 13, 2017, was more broadly discussed regarding the landslide events that occurred in the city of Rolante, state of Rio Grande of Sul (GLOBO, 2017), which affected the SSC in the study area.

Results and Discussion

Normality test and correlations

In the K-S test, only the blue band data presented significance, which indicated a normal behavior. The other bands and the SSC data showed a non-normal behavior. As the data did not show a normal behavior, Spearman's non-parametric correlation was calculated to compare the CP to peripheral pixels (Table 2). The results showed a strong association between the data, with values above 0.99. This indicates that SR does not practically change for the surrounding pixels.

Table 2. Spearman's correlations. "***" means statistical significance for $\alpha = 0.01$.

Table 2 near here

Regression models

The regression models developed for the three datasets (CP, Mean, and Median) for each band are shown in Table 3. Initially, we observed that there is no statistical difference among the models from the three datasets. This can be explained by the strong correlation found when using the Spearman's coefficient, which indicated that SR was very similar in the surrounding pixels. This strong SR spatial dependence did not significantly change the regression results among the datasets.

Table 3. Results from the regression analyses performed for the bands in the three datasets.

"*" and "***" means significant values of 95% and 99% of confidence, respectively, in the K-S test.

Table 3 near here.

The coefficient tests were significant for all visible and NIR bands. The Blue, Green, and NIR bands presented statistical significance in the coefficients, but the K-S test analysis did not

result in the normality of residuals, which indicates problems with these models. Since this test is recommended for the validation of regression models (Field, 2009), it allowed us to separate and select the bands with the best results in this study.

The red band showed statistical significance for the intercepts and normality of residuals for the three datasets. Besides that, this band presented the best fit (R^2). In the regression analysis for the CP dataset (Figure 4c), it is also possible to observe that the red band showed the best fit. The SWIR1 (Figure 4e) and SWIR2 (Figure 4f) bands presented low R^2 values and were disregarded in the model development.

Figure 4 near here

Figure 4. Exponential regressions between SSC ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) and the bands (SR) from the CP dataset. The red lines represent the prediction intervals of the models.

The best relationships between SSC and spectral data are in the visible (0.4-0.7 μm) and NIR (0.7-1.1 μm) ranges (Robert et al. 2016; Pinto et al. 2014; Sriwongsitanon et al. 2011; Tyler et al. 2006; Kloiber et al. 2002; Han, 1997; Choubey, 1994), but it is difficult to know which spectral bands would yield the best models beforehand. The solution proposed by many authors is the development of models based on the empirical statistical relationship between field data and the orbital data bands (Montanher et al. 2013).

Although it is not known which band will have the best results in advance, studies show that the red and NIR bands are the most propitious regions to estimate SSC (Robert et al. 2016; Ritchie et al. 2003; Lodhi et al. 1997). Each water body transports eroded sediments with local specificities (color, amount of organic matter etc.) from its watershed and causes variation between the bands that present the best models.

The Guaíba river watershed has clay soils and latosols (Streck et al. 2002), which are eroded and transported by its tributaries to the Guaíba river. These soils have an increase in

reflectance from the visible to the NIR spectral range (Genú & Demattê, 2011), which explains the larger correlation in the red (B4) and NIR (B5) spectral bands than in the green and blue bands, causing a greater contrast with pure water. Lodhi et al. (1997) analyzed sediments from clay soils present in water and found larger changes in these same spectral bands as well.

SSC maps and a hydrodynamic and sedimentological analysis

From the generated regression models, the red band (B4) was chosen as the most suitable model to develop the SSC maps. The equation from Figure 4 in the red band was used and the corresponding model was named B4-SSC-exp. Figure 5 shows two maps from August 22, 2016, and January 13, 2017. For each image, the graphs with the daily sum of the net discharge from the tributary rivers corresponding to ten days before the respective date are shown. Due to the large amplitude among the recorded SSC, these dates were chosen for the comparison between the field data and data from the B4-SSC-exp model.

Figure 5 near here

Figure 5. CSS maps from August 22, 2016, and January 13, 2017. The graphs represent the net river discharge ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) that was standardized from zero to $5,000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Figure 6 shows the correlation between the SSC field and modeled data, which had a strong correlation ($R = 0.86$). The mean deviation was $10.53 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, with minimum and maximum values of 0.31 and $47.63 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, respectively, indicating a good agreement between those two variables.

Figure 6 near here

Figure 6. Regression analysis between the SSC field data and corresponding maps. “***” means statistical significance for $\alpha = 0.01$.

Figure 7 shows the SSC maps also generated by the B4-SSC-exp model and the net river discharge graphs. By analyzing all maps, it can be observed that there was a large SSC variability over time. SSC on some dates was higher than 50 mg.L^{-1} in some areas, which indicates the water flow by the form of the suspended sediment plumes. In other maps, a homogeneous SSC behavior was observed, with values ranging from 0 to 20 mg.L^{-1} in the entire area of the Guaíba system, such as on March 3, 2017, for example.

The transport of higher SSC through the Guaíba channel can be considered a standard for some dates as for example on August 20, 2014, or in the channel and adjacent areas as on June 22, 2017, and on January 1, 2017. These conditions evidenced that sediment transport preferentially occurs through the Guaíba channel and can be associated with periods of higher net river discharge. It can be observed in the map from August 20, 2014, that the net river discharges reached approximately $7,500 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, which was the maximum discharge of this dataset. On June 22, 2017, and January 13, 2017, there were net river discharges over $2,500 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, higher than the annual historical mean ($1,534 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$) for the last 30 years (from 1987 to 2017).

At lower net river discharges, SSC was also lower such as on March 3, 2017, and July 24, 2017. Conditions of different net river discharges over time and that outlined the SSC variations from this system were spotted on August 22, 2016, and on April 3, 2017. The map from April 3, 2017, showed net river discharges lower than $1,000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ for the previous ten days. However, an analysis for the previous sixteen days resulted in values over $3,000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, and that can be associated with the higher SSC that was present in the southern areas of the Guaíba system and of Patos Lagoon. Therefore, for that date, the variations of SSC also followed the variations of net river discharges, showing a condition of rapid response from this system.

Figure 7 near here

Figure 7. Maps of modeled SSC. The graphs represent the net river discharge ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) that was standardized from zero to $5,000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ except for October 20, 2014, when it was staggered up to

7,500 m³.s⁻¹. * The areas in red (> 50 mg.L⁻¹) on the maps from October 9, 2016, and March 3, 2017, corresponded to cloudiness in the scenes and overestimated SSC. The net river discharge from November 13, 2017, and December 31, 2017, were not available.

Another pattern observed on the maps is the higher SSC present at the margins of the Guaíba river. This condition is caused by a combination of factors, such as by wind-driven waves and the bathymetry. Nicolodi (2007) used the SWAN model to simulate the wave generation and sediment resuspension in the Guaíba system. The results show the generation of waves up to 0.55 m high following the pattern of wind intensity and direction.

In the shallower areas up to 1.9 m deep, the incident waves have the capacity to create turbulence near the bottom and resuspend sediment (Nicolodi, 2007), causing the absence of fine sediments in those areas (Nicolodi, 2007; Bacchi et al. 2000; CECO, 1999).

Based on the information on sedimentary distribution, wave characteristics, boundary layer, and initiation of turbulent flow, Nicolodi et al. (2007) classified the Guaíba system in three sedimentary environments: erosional, transitional, and depositional (Figure 8). The erosional bottom corresponds to the conditions of erosion or non-deposition of fine sediments, while the transitional bottom is basically composed of sand and silt with the possibility of remobilization associated with wind-driven waves with speeds equal or greater than 11 m.s⁻¹. The depositional bottom consists of low hydrodynamic energy environments that facilitates the deposition of fine sediments (Nicolodi et al. 2010).

Figure 8 near here

Figure 8. Map of the sedimentary environments of the Guaíba system. Source: adapted from Nicolodi *et al.* (2013).

The sediment resuspension patterns at the margins found in the SSC maps are similar to the sedimentary maps from Nicolodi *et al.* (2010), corroborating previous studies that indicate the absence of fine sediments in shallower areas (Bacchi *et al.* 2000; CECO, 1999). Higher concentrations of suspended sediment were mainly found at the west margin (Figure 5 and 7), which is an area predominantly shallower than the eastern margin. On the maps from October 9, 2016, and April 3, 2017, for example, it is possible to observe higher concentrations at practically the entire west margin, which reflects a standard for the Guaíba system.

At the eastern margin of the southern portion of the Guaíba system, resuspension plumes were also found on Lami Beach and Itapuã Village as it can be observed on the maps from August 22, 2016, October 9, 2016, and November 13, 2017. These areas (Figure 8) are classified as erosional and transitional bottom according to Nicolodi *et al.* (2010). At the eastern margin of the Guaíba river, these areas are shallower and have a longer bottom portion with erosive potential when compared to areas near Ipanema Beach and Ponta Grossa Hill. Furthermore, Nicolodi *et al.* (2010) also discusses the location of the old water catchment station at Lami Beach (Figure 1). This station was deactivated in 2006 and is classified as a site with high potential for sediment resuspension, which is corroborated by the SSC maps.

Case study on the scene from January 13, 2017

The scene from January 13, 2017 (Figure 9) corresponded to 8 days after the landslide event in the city of Rolante (state of Rio Grande do Sul), caused by strong rainfall events (GLOBO, 2017) that took place on January 5, 2017. Thus, it was possible to identify the sediment transport through the Sinos river and subsequently towards the Guaíba river with the sediment plume located at the eastern margin. SSC higher than 100 and 50 mg.L⁻¹ at the Sinos river mouth and eastern margin of the Guaíba river, respectively. These values were measured through field samples and also simulated by the B4-SSC-exp model.

Two causes explain the location of the sediment plume at the Guaíba river eastern margin: the position of the Sinos river mouth, which is responsible for accumulating sediment at the Jacuí river eastern margin (Figure 9), and the high net river discharge from the system, which corresponded to $2,704 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ on that day by the sum of the other tributaries. Since the flow was more intense in the channel area and occurred from north to south, the plume with the highest concentrations was trapped at the eastern margin, and the channel served as a barrier to the dispersion of the high concentrated sediments.

The sediment residence time since the landslide event in Rolante until the entrance in Patos Lagoon was 8 days. This time is demonstrated by the image itself, as it is possible to observe the sediment plume entering the Patos Lagoon.

It is possible to affirm that this sediment transport event was atypical in terms of the amount of the sedimentary contribution from the Sinos river and its location at the Guaíba river eastern margin. The other modeled SSC maps do not show this kind of behavior. In addition, the Sinos river together with the Gravataí river have a lower sediment load when compared to the Jacuí and Taquari rivers.

Although these values were not quantified in terms of solid discharge, the net river discharges from the Jacuí and Taquari rivers have annual mean values of 801 and $452 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, respectively (Vaz et al. 2006), corresponding to a contribution of approximately 85 % of the total volume input into the Guaíba river (Herz, 1977).

The remainder is added by the Sinos, Caí, and Gravataí rivers, which are located at the Jacuí river eastern margin and contribute with an average of $230 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Vaz et al. 2006). The net discharges of the Guaíba tributary rivers are distinct in magnitude (Andrade Neto et al. 2012) and evidence the greater sediment supply capacity of the Jacuí and Taquari rivers.

Figure 9 near here

Figure 9. Image from January 13, 2017, in the composition of the visible 4R3G2B. The highest concentrations were located in Sinos river and at the eastern margin of the Guaíba river.

Conclusion

The use of the B4-SSC-exp model allowed the quantification of the suspended sediment concentration (SSC) in the Guaíba river. The relationship found in the red spectral range was expected due to the other empirical models from the literature that were developed for other water bodies. The use of the K-S test to evaluate the normality of residuals was adequate to filter the bands that had the best results in the regression analysis.

The data presented a great spatial dependence of the central pixel with the surrounding pixels (3x3 grid), indicating that there was practically no SSC variation in an area of 8,100 m² (0.81 ha). The spatial dependence of the SSC data on the Guaíba system was a variable that was not known before the campaigns were conducted.

The B4-SSC-exp model allowed us to quantify different spectral images and parameterize SSC among scenes. Thus, from that it was possible to compare the parameterized maps with the net river discharge data.

Transportation through the channel and adjacent areas was more intense during higher net tributary discharges. Other periods presented the highest SSC located at the margins, which corresponds to sediment resuspension caused by wind-driven waves. This behavior evidences that SSC in the Guaíba system is significantly subjected to wind/wave forcing and net river discharge.

Acknowledgments

FCS and MMA are grateful for the PhD grants from CNPq and Capes, respectively. The authors would like to thank the students who assisted in the field work and the Landsat program.

References

- Andrade Neto, J. S., Rigon, L. T., E. E. Toldo Junior, and C. A. Schettini, 2012. "Solid suspended discharge of the Guaíba river system, RS, and its temporal variability." [in Portuguese] *Pesquisas em Geociências* 39(2):161-171.
- Bachi, F. A., E. G. Barboza, and E. E. Toldo Junior. 2000. "Study of Guaíba sedimentation." [in Portuguese] *Ecossistemas* 17: 32-35.
- Baumgarten, M. G. Z., M., Wallner-Kersanach, and L. F. H. Niencheski. 2010. "Manual de análises em oceanografia química" Rio Grande: FURG.
- CECO. Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica. 1999. "Projeto Sedimentação do Complexo Guaíba." Porto Alegre, Convênio CECO/UFRGS - DVP/DEMAE.
- CNH. Centro de Hidrografia da Marinha. "de Itapuã a Porto Alegre." 2013. Accessed 09 jan 2017. https://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-cartas-raster/raster_disponiveis.htm
- Choubey, V. K. 1994. "The effect of properties of sediment type on the relationship between suspended sediment concentration and radiance." *Hydrological Sciences Journal* 39(5): 459-470.
- DMAE. Departamento Municipal de Água e Esgotos. 2018. "Lago Guaíba." Accessed 13 feb 2018. http://www2.portoalegre.rs.gov.br/dmae/default.php?p_secao=197
- DNAEE. Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica. 1983. "Mecânica de Correntes do Guaíba: Relatório Síntese." Porto Alegre: Ministério das Minas e Energia,.
- Donohue, I., and J. G. Molinos. 2009. "Impacts of increased sediment loads on the ecology of lakes." *Biological Reviews* 84: 517-531.
- Field, A. 2009. *Descobrimos a Estatística usando o SPSS*. [Uncovering Statistics using SPSS] Translated and edited by Lori Viali. Porto Alegre: Artmed.
- Fu, Y., S. Xu, and J. Liu. 2016. "Temporal-spatial variations and developing trends of Chlorophyll-a in the Bohai Sea, China." *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 173: 49-56.
- Genú, A. L., and J. A. Demattê. 2012. "Soil spectroradiometry and comparison with orbital sensors." [in Portuguese] *Bragantia* 71:82-89.

- GLOBO, 2017. “Deslizamentos de terra em Rolante atingiram 230 hectares, diz estudo.” *O Globo*. Accessed 13 sept. 2017. <http://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2017/01/deslizamentos-de-terra-em-rolante-atingiram-230-hectares-diz-estudo.html>
- Han, L. 1997. “Spectral reflectance with varying suspended sediment concentrations in clear and algae-laden waters.” *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 63(6): 701-705.
- Heise, S., And U. Forstner, 2007. “Risk assessment of contaminated sediments in river basins—theoretical considerations and pragmatic approach.” *Journal of Environmental Monitoring* 9: 943-952.
- Heininger, P., Höss, S., Claus, E., J. Pelzer, and W. Traunspurger. 2007. “Nematode communities in contaminated river sediments.” *Environmental Pollution* 146: 64-76.
- Herz, R. 1977. “Circulação das águas de superfície da Lagoa dos Patos.” [in Portuguese]. Phd diss., University of São Paulo.
- Kaesler, A. J., T. Litts, and T. W. Tracy. 2012. Using low-cost side-scan sonar for benthic mapping throughout the lower Flint River, Georgia, USA. “*River Research and Applications*” 29: 634-644.
- Kloiber, S., Brezonik, P. L., L. G. Olmanson, and M. G. Bauer. 2002. “A procedure for regional lake water clarity assessment using Landsat multispectral data.” *Remote Sensing of Environment* 82: 38-47.
- Kopačková, V., And L. HLADÍKOVÁ. 2014. “Applying spectral unmixing to determine surface water parameters in a mining environment.” “*Remote Sensing*” 6:11204-11224.
doi:10.3390/rs61111204
- Kroger, S. And L. R. Law. 2005. “Sensing the sea.” *Trends in Biotechnology* 23(5): 250-256.
- Lillesand, T., R. W. Kiefer, and J. Chipman. 2007. *Remote Sensing and Image Interpretation*. New York: Wiley.
- Liu, Y., M. A. Islam, and J. Gao. 2003. “Quantification of shallow water quality parameters by means of remote sensing.” *Progress in Physical Geography* 27: 24-43.

- Lodhi, M. A., Rundquist, D. C., L. Han, and M. S. Kuzila. 1997. "The potential for remote sensing of loess soils suspended in surface water." *Journal of the American Water Resources Association* 33(1):111-117.
- Mertes, L. A. K., M. O. Smith, And J. B. Adams, J. B. 1993. "Estimating suspended sediment concentrations in surface waters of the Amazon River wetlands from Landsat images." *Remote Sensing of Environment* 43: 281-301.
- Montanher, O. C., C. C. F. Barbosa, and E. M. L. Novo. 2013. "Integration of TM / Landsat data and in situ measurements for the suspended sediments estimation in Amazonian rivers: a feasibility study." [in Portuguese] *Geografia (Rio Claro)* 38(1): 175-188.
- Montanher, O. C., Novo, E. M. L. M., Barbosa, C. C. F., C. D. Rennó, and T. F. S. Silva. 2014. "Empirical models for estimating the suspended sediment concentration in Amazonian white water rivers using Landsat 5/TM." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 29: 67-77.
- Nicolody, J. L. 2007. "O padrão de ondas no Lago Guaíba e sua influência nos processos de sedimentação." [in Portuguese] Porto Alegre, 179p. Phd diss., University Federal of Rio Grande do Sul.
- Nicolodi, J. L., E. E. Toldo Junior, L. and Farina. 2010. Dynamics and resuspension by waves in Lake Guaíba and its implications in water catchment areas for human supply. [in Portuguese] *Pesquisas em Geociências* 37(1): 25-39.
- Nicolodi, J. L., E. E. Toldo Junior, L. and Farina. 2013. "Dynamic and resuspension by waves and sedimentation pattern definition in low energy environments. Guaíba Lake (Brazil)." *Brazilian Journal of Oceanography* 61: 55-64.
- Novo, E. 2010. Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações. [Remote Sensing: principles and applications.] São Paulo: Edgard Blucher.
- Pierce, A. R., and S. King, 2008. "Spatial dynamics of overbank sedimentation in floodplain systems." *Geomorphology* 100: 256-268.
- Pinto, C., Menezes, P. H. B. J., Martinez, J., H. L. Roig, and R. A. E. Villar. 2014. "MODIS images to monitor the sediment flow in the Três Marias reservoir." [in Portuguese]. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 18(5): 507-516.

Ritchie, J. C., P. V. Zimba, and J. H. Everitt, J. H. 2003. "Remote sensing techniques to assess water quality." *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 69(6): 695-704.

Robert, E., Grippa, M., Kergoat, L., Pinet, S., Gal, L., G. Cochonneau, and Jm. M. Martinez. 2016. "Monitoring water turbidity and surface suspended sediment concentration of the Bagre Reservoir (Burkina Faso) using MODIS and field reflectance data." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52: 243–251. DOI: 10.1016/j.jag.2016.06.016

Scottá, F.C., Andrade, M.M., Silva Junior, V.O., Oliveira, N., J. Weschenfelder, J., E. Bortolin and J. C. Nunes. Geoacoustic patterns of the Guaíba river fund and sub-fund and their relations as sedimentary and hydrodynamic processes. Brazilian Journal of Geophysics. Unpublished.

Sriwongsitanon, N., K., Surakit, and S. Thianpopirug. 2011. "Influence of atmospheric correction and number of sampling points on the accuracy of water clarity assessment using remote sensing application." *Journal of Hydrology* 401: 203-220. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.02.023

Streck, E. 2002. *Solos do Rio Grande do Sul* [Soils of Rio Grande do Sul] Porto Alegre: Editora da UFRGS.

Tyler, A. N., Svab, E., Preston, T., M. Présing, and K. A. Kovács. 2006. "Remote sensing of the water quality of shallow lakes: a mixture modeling approach to quantifying phytoplankton in water characterized by high-suspended sediment." *International Journal of Remote Sensing* 27(8): 1521-1537. DOI: 10.1080/01431160500419311

USGS. United States Geological Survey. 2017. "Landsat Missions." Accessed 27 July 2017. <https://landsat.usgs.gov/how-can-i-find-acquisition-time-image>.

Van Overmeeren, R., Craeymeersch, J., Van Dalfsen, J., Fey, F., S. Van Heteren, and E. Meesters. 2009. "Acoustic habitat and shellfish mapping and monitoring in shallow coastal water – Sidescan sonar experiences in The Netherlands." *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 85: 437-448.

Vaz, A. C., O. O. Möller, and T. L. Almeida. 2006. "Quantitative analysis of the discharge of the tributaries of the Patos Lagoon." [in Portuguese] *Atlântica* 28(1): 13-23.

Image list:

Figure 1. Location of the Guaíba river and the nine sub-basins that drain in the system. Red dots show the 171 field samples collected in order to develop the model.

Figure 2. Illustration of the SR extraction for the three datasets: central pixel (CP), mean, and median.

Figure 3. Flowchart of the performed statistical analyses.

Figure 4. Exponential regressions between SSC (mg.L^{-1}) and the bands (SR) from the CP dataset. The red lines represent the prediction intervals of the models.

Figure 5. CSS maps from August 22, 2016, and January 13, 2017. The graphs represent the net river discharge ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) that was standardized from zero to $5,000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$.

Figure 6. Regression analysis between the SSC field data and corresponding maps. “***” means statistical significance for $\alpha = 0.01$.

Figure 7. Maps of modeled SSC. The graphs represent the net river discharge ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) that was standardized from zero to $5,000 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ except for October 20, 2014, when it was staggered up to $7,500 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$. * The areas in red ($> 50 \text{ mg.L}^{-1}$) on the maps from October 9, 2016, and March 3, 2017, corresponded to cloudiness in the scenes and overestimated SSC. The net river discharge from November 13, 2017, and December 31, 2017, were not available.

Figure 8. Map of the sedimentary environments of the Guaíba system. Source: adapted from Nicolodi *et al.* (2013).

Figure 9. Image from January 13, 2017, in the composition of the visible 4R3G2B. The highest concentrations were located in Sinos river and at the eastern margin of the Guaíba river.

Figure 1. Location of the Guaíba river and the nine sub-basins that drain in the system.

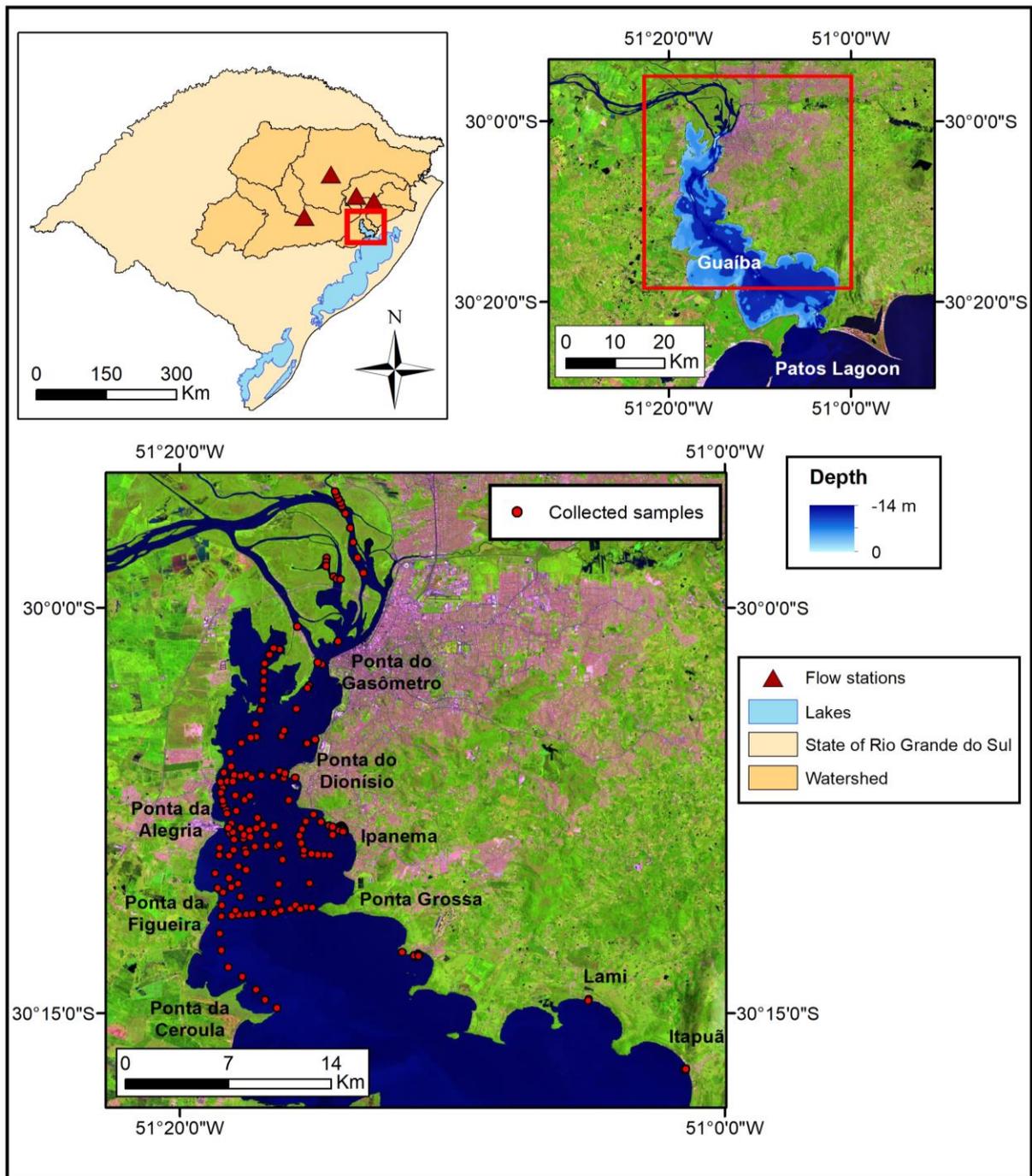


Figure 2. Illustration of the SR extraction for the three datasets: central pixel (CP), mean, and median.

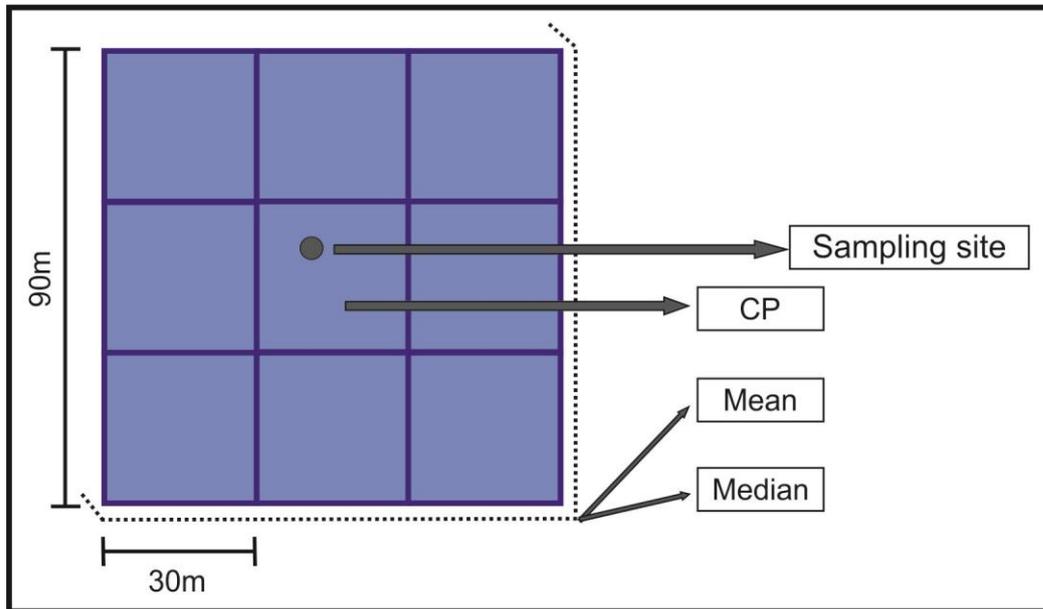


Figure 3. Flowchart of the performed statistical analyses.

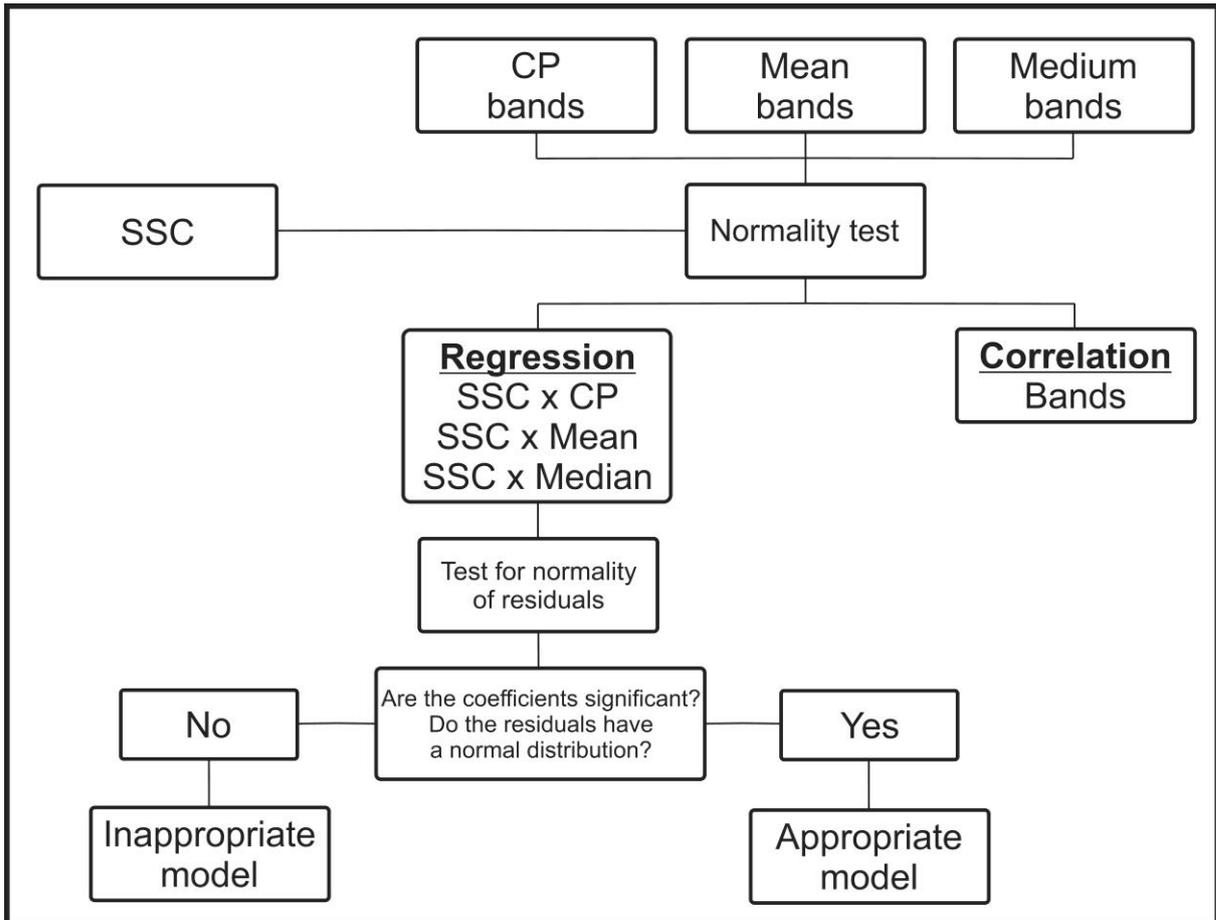


Figure 4. Exponential regressions between SSC ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) and the bands (SR) from the CP dataset. The red lines represent the prediction intervals of the models.

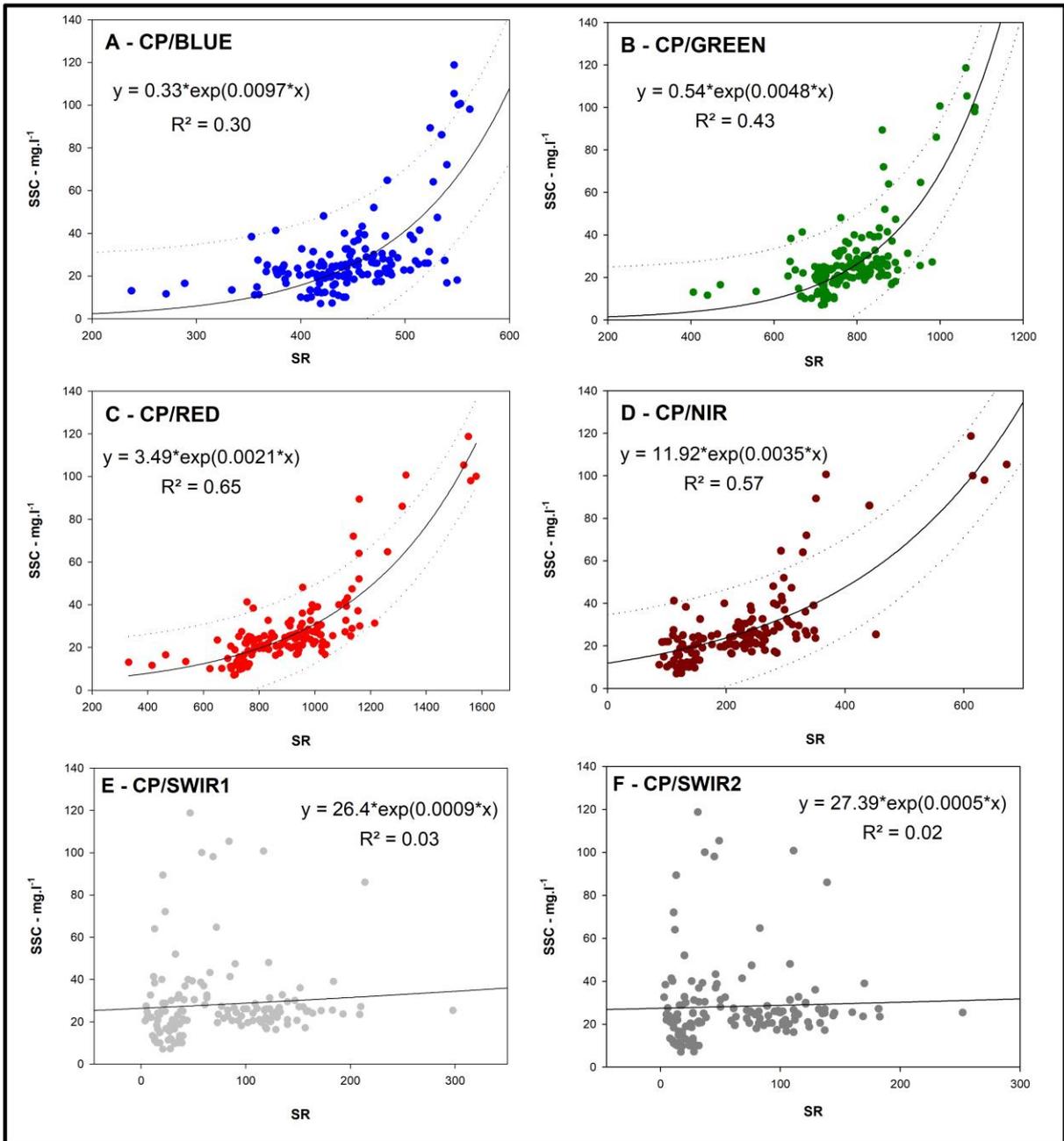


Figure 5. CSS maps from August 22, 2016, and January 13, 2017.

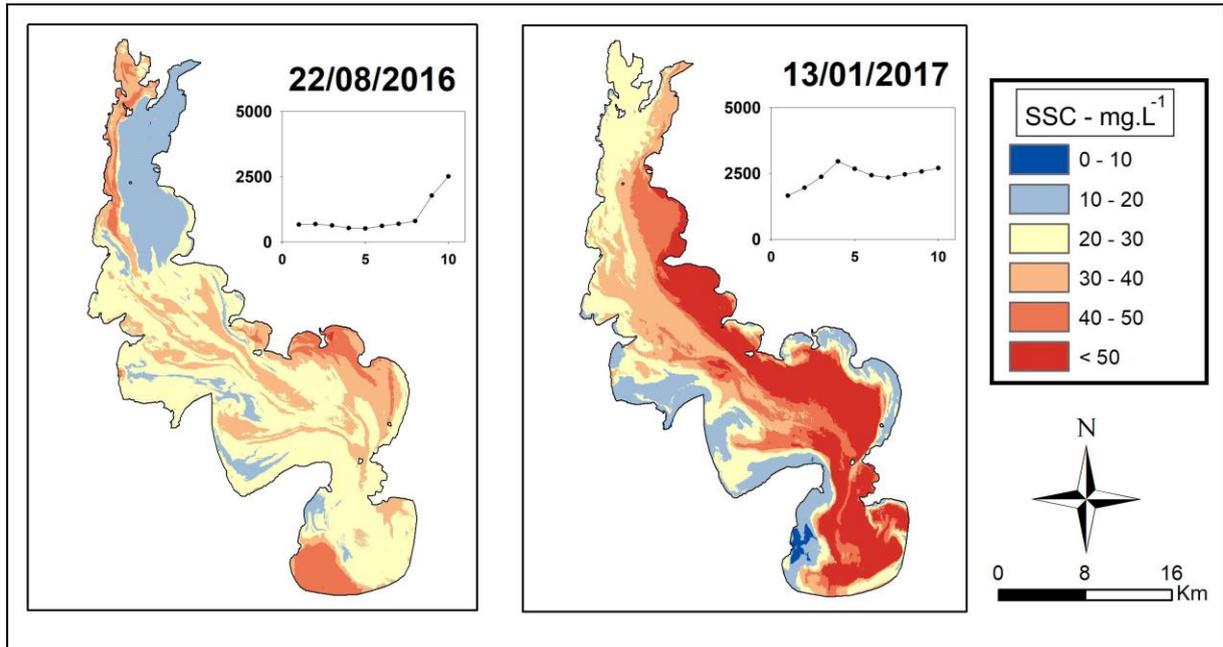


Figure 6. Regression analysis between the SSC field data and corresponding maps.

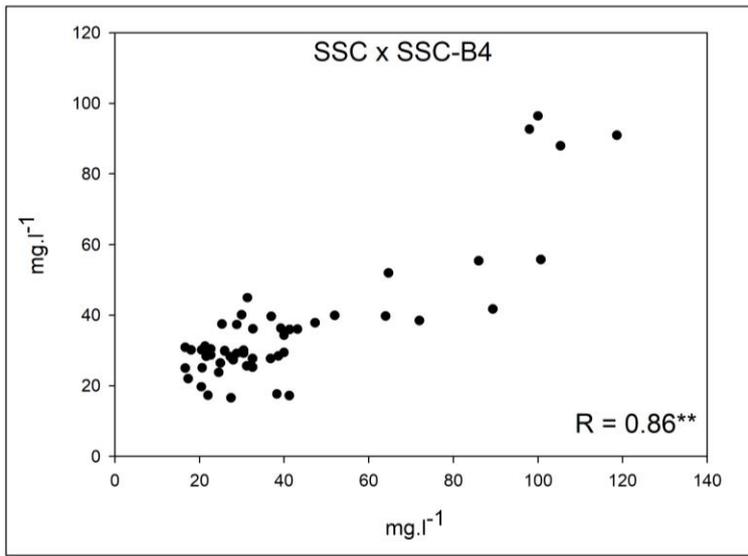


Figure 7. Maps of modeled SSC.

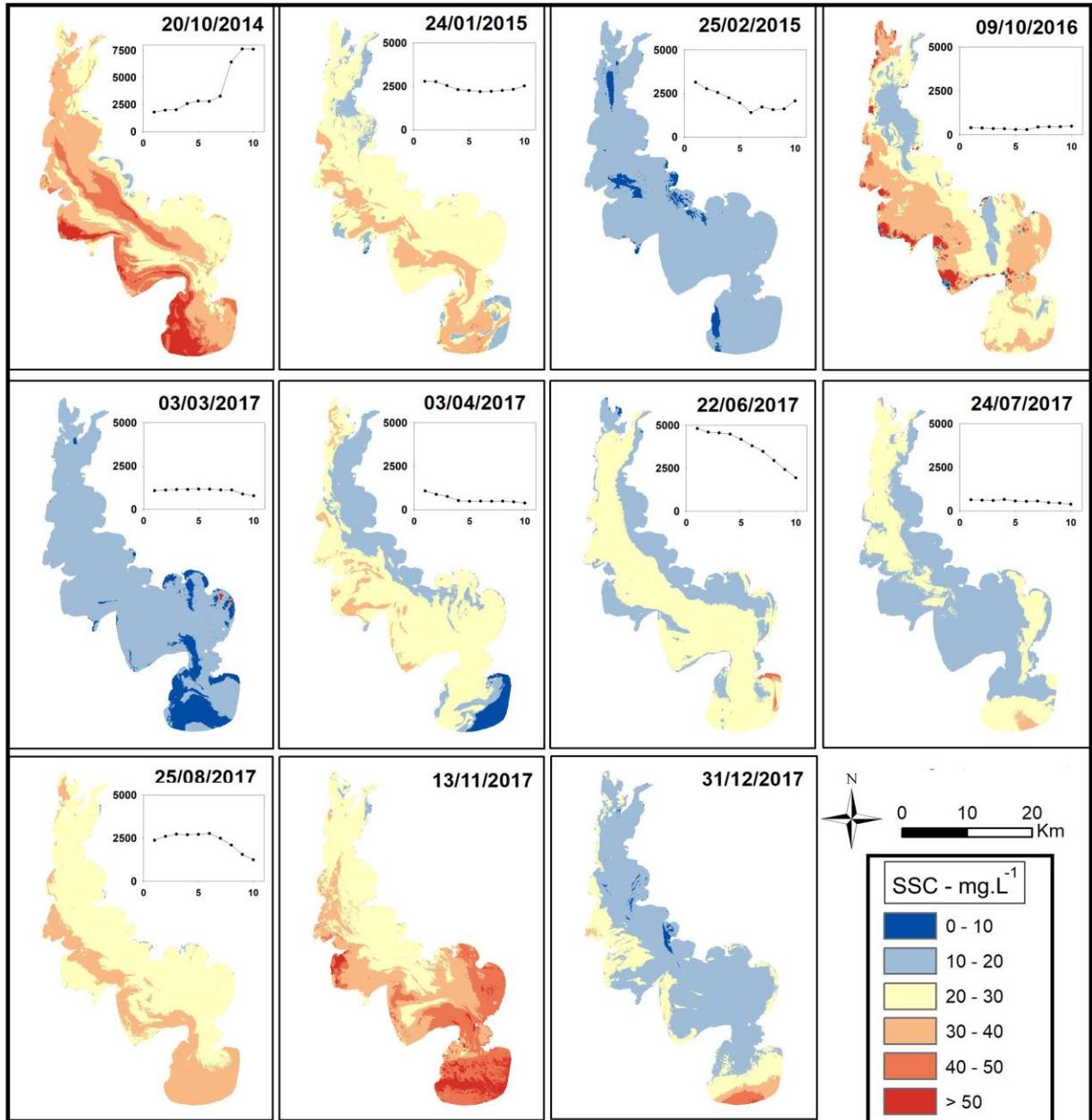


Figure 8. Map of the sedimentary environments of the Guaíba system.

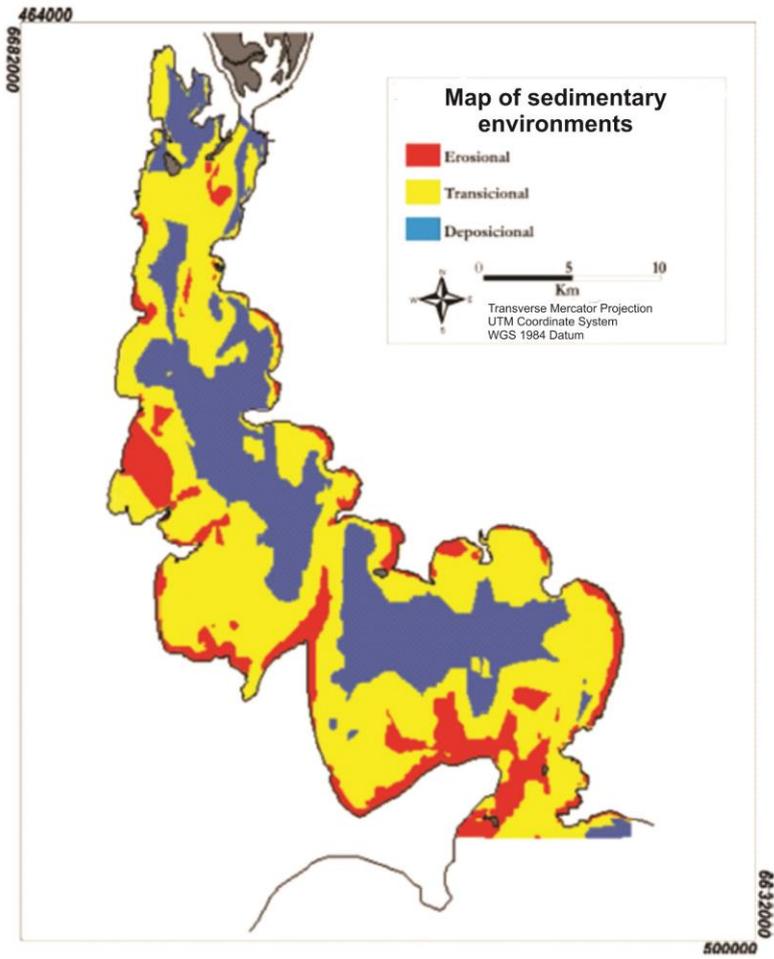


Figure 9. Image from January 13, 2017, in the composition of the visible 4R3G2B.

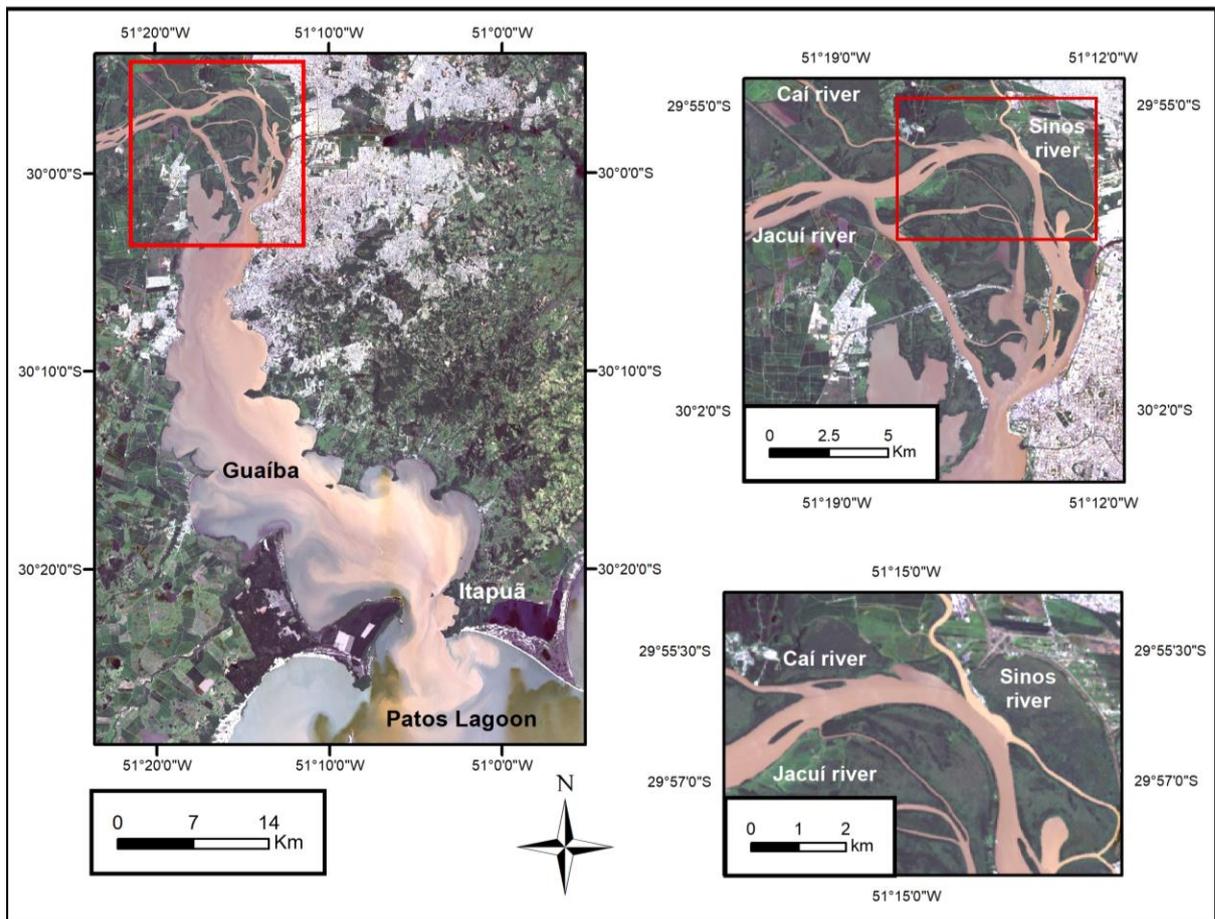


Table list:

Table 1. Campaign dates and number of samples (n) to develop the model.

Data	n - coletadas	n - utilizadas
08/11/2015	6	3
27/01/2016	13	8
16/04/2016	7	2
22/08/2016	11	11
10/11/2016	8	7
26/11/2016	16	16
12/12/2016	30	25
13/01/2017	42	41
02/03/2017	38	31
Total	171	144

Table 2. Spearman's correlations. "***" means statistical significance for $\alpha = 0.01$.

	Mean	Median
CP_Blue (B2)	0.993**	0.993**
CP_Green (B3)	0.996**	0.996**
CP_Red (B4)	0.998**	0.998**
CP_NIR (B5)	0.997**	0.998**
CP_SWIR1 (B6)	0.995**	0.996**
CP_SWIR2 (B7)	0.995**	0.997**

Table 3. Results from the regression analyses performed for the bands in the three datasets. “*” and “**” means significant values of 95% and 99% of confidence, respectively, in the K-S test.

Linear Model	Coefficients		Coefficients		Residuals
	R	R²	A	B	K-S
CP_Blue	.55	.30	.00	.00	.014
Mean_Blue	.55	.30	.00	.00	.010
Median_Blue	.55	.30	.00	.00	.013
CP_Green	.66	.43	.00	.00	.010
Mean_Green	.65	.43	.00	.00	.012
Median_Green	.65	.43	.00	.00	.011
CP_Red	.81	.65	.00	.00	.200**
Mean_Red	.81	.65	.00	.00	.200**
Median_Red	.81	.65	.00	.00	.075*
CP_NIR	.76	.57	.00	.00	.003
Mean_NIR	.76	.58	.00	.00	.001
Median_NIR	.76	.57	.00	.00	.002
CP_SWIR1	.18	.03	.21	.00	.000
Mean_SWIR1	.18	.03	.02	.00	.000
Median_SWIR1	.17	.03	.03	.00	.000
CP_SWIR2	.15	.02	.06	.00	.000
Mean_SWIR2	.16	.02	.06	.00	.000
Median_SWIR2	.15	.02	.07	.00	.000

CAPÍTULO 3 – DESCARGA LÍQUIDA E SÓLIDA EM SUSPENSÃO DO SISTEMA GUAÍBA

[Pesq Geoc] Agradecimento pela Submissão

Caixa de entrada x

**Pesquisas em Geociências - Comissão Editorial**

15:15 (Há 9 minutos)



para eu

Fernando Comerlato Scottá,

Agradecemos a submissão do seu manuscrito "DESCARGA LÍQUIDA E SÓLIDA EM SUSPENSÃO NO RIO GUAÍBA" para Pesquisas em Geociências. Através da interface de administração do sistema, utilizado para a submissão, será possível acompanhar o progresso do documento dentro do processo editorial, bastando logar no sistema localizado em:

URL do Manuscrito:

<http://seer.ufrgs.br/PesquisasemGeociencias/author/submission/87111>

Login: fcscotta

Em caso de dúvidas, envie suas questões para este e-mail. Agradecemos mais uma vez considerar nossa revista como meio de transmitir ao público seu trabalho.



Responder

Encaminhar

Periódicos

ISSN	Título	Área de Avaliação	Classificação
1807-9806	PESQUISAS EM GEOCIÊNCIAS (ONLINE)	GEOCIÊNCIAS	B2

DESCARGA LÍQUIDA E SÓLIDA EM SUSPENSÃO NO RIO GUAÍBA

LIQUID AND SOLID DISCHARGE IN SUSPENSION IN GUAÍBA RIVER

Fernando Comerlato SCOTTÁ¹, Mauro Michelena ANDRADE¹, Jair WESCHENFELDER^{1,2},
Elírio TOLDO JÚNIOR^{1,2} & José Carlos NUNES²

- (¹) Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9.500, CEP 91.540-000, Porto Alegre, Brasil. E-mail: (fcscotta@gmail.com).
(²) Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9.500, CEP 91.540-000, Porto Alegre, Brasil.

Resumo. O objetivo deste trabalho é calcular a descarga líquida (Q_{liq}) e descarga sólida (Q_{ss}) no Guaíba utilizando um sensor perfilador acústico de correntes por Doppler (PACD) comparar a Q_{liq} medidas com a vazão dos rios tributários, oscilações de nível da água, direção e intensidade dos ventos. Foi criada uma equação de calibração do PACD para estimar a concentração de sedimentos em suspensão (CSS) e Q_{ss} comparando dados do método gravimétrico *in situ* e de retroespalhamento acústico do PACD. Uma relação exponencial se adaptou melhor no conjunto de dados, com R² de 0,7. Foi possível realizar um estudo abrangente sobre as variáveis Q_{liq} e Q_{ss} no Guaíba. Os dados de Q_{liq} medidos possuem valores próximos à soma dos dados de vazão dos rios Jacuí, Taquarí, Caí e Sinos. Não foi possível ajustar uma curva-chave entre vazão e a régua localizada no Cais Mauá devido as oscilações do vento que alteram o nível da água na desembocadura deste sistema fluvial, inclusive com situações de inversão do fluxo registradas nos perfis de corrente que foram relacionadas com a ocorrência de ventos nos quadrantes S e SE. Para a variável Q_{ss}, os valores apresentaram grande variabilidade, com mínimos e máximos de 776 a 118.130 t/dia. A possibilidade da calibração do sensor PACD para estimar o CSS no Guaíba serve como base para estimar a quantidade de volume de sedimentos que ingressam no Guaíba.

Palavras-Chave. sedimento em suspensão, descarga líquida (Q_{liq}), descarga sólida (Q_{ss}), hidrodinâmica, perfiladores acústicos.

Abstract. This paper aims at calculate Q_{liq} and Q_{ss} in Guaíba using a PACD sensor (1.5 MHz). It is also the objective of this work to compare the Q_{liq} measures with the flow of the tributary rivers, with oscillations of water level, direction and intensity of the winds in this environment. A PACD calibration equation was created to estimate CSS and Q_{ss} by comparing data from the *in situ* gravimetric method and acoustic backscatter data from the PACD. An exponential relation was the best fit in the data set, with R² of 0.7. It was possible to carry out a comprehensive study on Q_{liq} and Q_{ss} variables in Guaíba. The measured Q_{liq} data have values close to the sum of the flow data of the Jacuí, Taquarí, Caí and Sinos rivers. It was not possible to adjust a key curve between flow and the ruler located in Cais Mauá due to the wind oscillations that alter the water level. The wind action caused the flow inversion of this system. Two inversion situations were recorded in the current profiles at the Guaíba entrance and were related to the occurrence of winds in the S and SE quadrants. For the Q_{ss} variable, the values presented great variability, with minimum and maximum values of 776 to 118,130 t/day. The possibility of PACD sensor calibration to estimate CSS in the Guaíba serves as a basis for estimating the amount of sediment volume that is transported to the Guaíba watershed.

Keywords. suspended sediment, sedimentology, hydrodynamic, acoustic profilers

1 Introdução

O planejamento e gestão dos recursos hídricos dependem de uma eficiente avaliação dos fluxos superficiais e subterrâneos, incluindo confiabilidade na predição de vazões (Salla *et al.*, 2015). Avaliações contínuas, precisas e automáticas da descarga líquida dos rios sob várias condições de fluxo, incluindo condições de seca e inundação, são de vital importância (Nihei & Kinizu, 2008). Apesar disso, diversas são as limitações para uma rede de dados robusta dessa variável, como: falta de recursos para manutenção e atualização de banco de dados, consistência de formatos de dados, documentação limitada, falta de metadados e políticas restrita de acesso (Do *et al.*, 2018).

Questões relativas à gestão e controle de sedimentos em suspensão frequentemente recebem ainda menos atenção nas políticas e em programas de gerenciamento de água (Liu *et al.*, 2017). Uma das razões é a dificuldade de obtenção de dados *in situ* de sedimentos em suspensão, raramente produzindo séries temporais por longos períodos (Oeurng *et al.*, 2010). No Brasil, a rede de monitoramento de estações sedimentométricas mostra esse panorama. Enquanto que a rede fluviométrica com medições de descarga líquida apresentava 1.763 estações no ano de 2007, a rede sedimentométrica tinha apenas 535 estações (ANA, 2017).

O sedimento em suspensão nas águas continentais interiores tem influência nos processos ecológicos dos sistemas aquáticos (Donohue & Molinos, 2009). Sua distribuição pode ser um indicador de qualidade ambiental, problemas de poluição e saúde pública (Robert *et al.*, 2016; Oeurng *et al.*, 2010; Heise & Föstner, 2007; Heininger *et al.*, 2007). Além disso, muitos rios ao redor do mundo estão enfrentando problemas como o declínio da carga de sedimentos, principalmente devido à construção de barragens e outras estruturas de controle, causando retenção de sedimentos em reservatórios e declínio a jusante (Liu *et al.*, 2017).

O sistema Guaíba é formado pelos rios Jacuí, Caí, Sinos, e Gravataí, recebendo o deságue de nove sub-bacias as quais se estendem pelo centro e nordeste do estado do Rio Grande do Sul (Fig. 1), em uma área de aproximadamente 84.763 km², que abrange mais de 250 municípios (Nicolodi *et al.*, 2010). Esse sistema tem área de 496 km² e extensão aproximada de 50 km, entre a Ponta do Gasômetro e a Lagoa dos Patos (Fig. 2). O Guaíba, embora seja denominado como lago pela prefeitura de Porto Alegre (DMAE, 2017) e como um rio pelo IBGE, Exército e Marinha do Brasil (CNH, 2017), é alvo de debates acadêmicos sobre sua classificação hidrodinâmica (Toldo Jr. & Almeida, 2012; Menegat & Carraro, 2009).

Independente da denominação oficial, esse corpo d'água sofre forte pressão antrópica. Os principais impactos ambientais devem-se aos lançamentos de efluentes da cidade de Porto Alegre e da afluência das águas poluídas dos rios Gravataí e Sinos (FEPAM, 2017). Também

serve de abastecimento de água para os municípios de Porto Alegre, Guaíba e Barra do Ribeiro, além de também ser utilizado em atividades de transporte de pessoas, cargas e atividades de lazer. Desde 2011, cerca de 6 milhões de pessoas utilizaram o serviço somente pelo Catamarã (JORNAL DO COMÉRCIO, 2018).

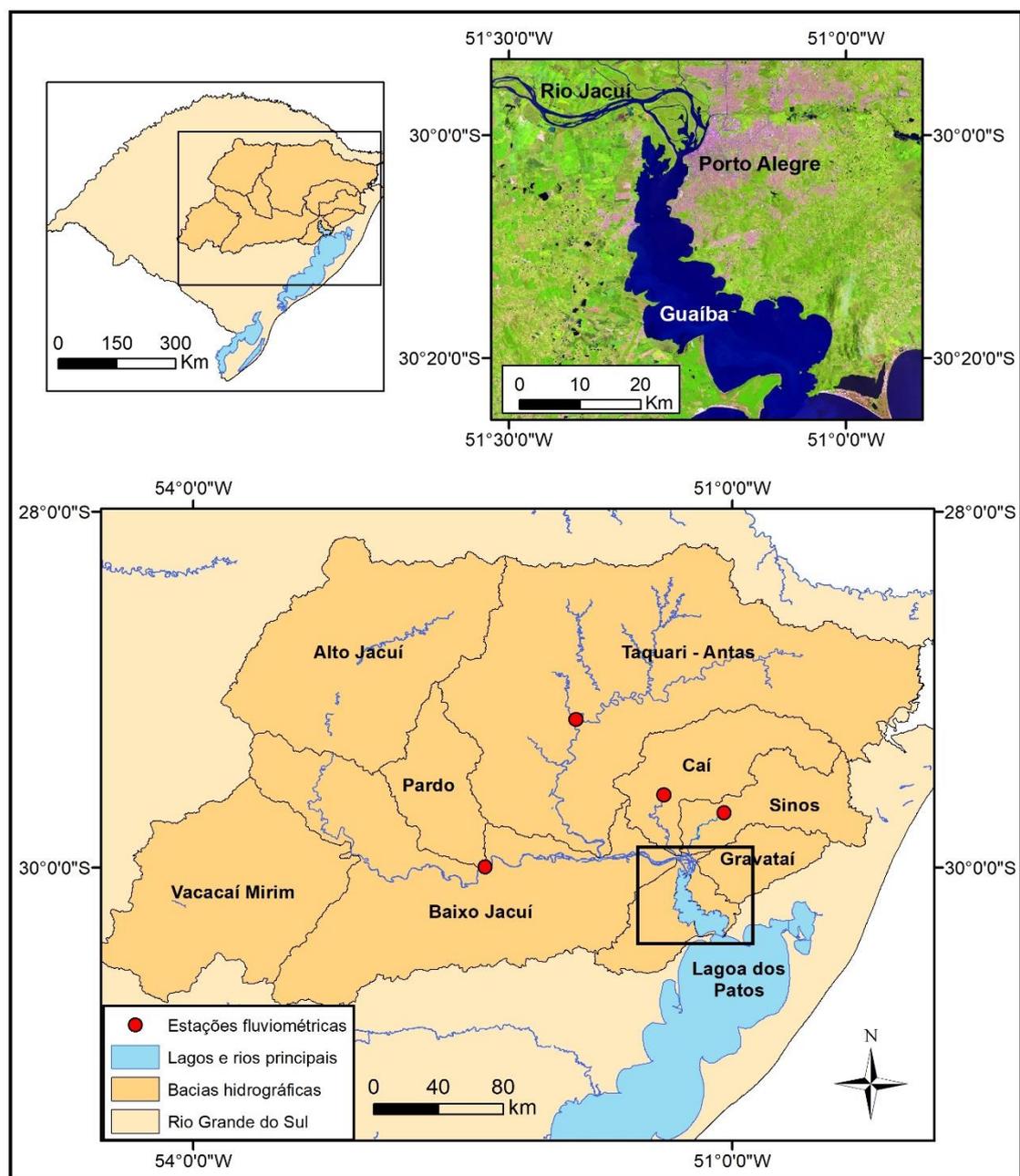


Figura 1. Localização do sistema Guaíba e das nove sub-bacias afluentes.

Figure 1. Location of the Guaíba system and the nine tributary sub-basins.

Apesar da forte pressão antrópica exercida no Guaíba, estudos de descarga líquida (Q_{liq}) e descarga sólida em suspensão (Q_{ss}) são escassos, muitas vezes considerando dados dos rios afluentes (Andrade Netto *et al.*, 2012; Vaz *et al.*, 2006), porém sem medições *in situ*. Andrade Netto *et al.* (2012), realizou a estimação de Q_{ss} entre os períodos de 2003 e 2006 realizando um ajuste de regressão entre dados de vazão dos rios afluentes e dados de turbidez do DMAE (Departamento Municipal de Água e Esgotos de Porto Alegre), sendo, portanto, uma medição indireta. Uma explicação para a escassez desses dados é causada pelo próprio trabalho de aquisição de dados, o qual demanda vários dias de levantamentos utilizando embarcação, dependente das condições meteorológicas e de uma equipe de trabalho treinada.

A estimação de Q_{ss} depende basicamente de três variáveis: área da seção, velocidade do sedimento e concentração dos sedimentos em suspensão (CSS). A velocidade do sedimento é considerada igual à velocidade da água, estando esta variável relacionada com a Q_{liq}. Além disso, quando a CSS estimada por amostragem pontual é utilizada para o cálculo de Q_{ss}, é preciso considerar a largura e profundidade parciais de influência do ponto de coleta, indo até a metade da distância do outro ponto de amostragem (Carvalho, 2008). Portanto, a amostragem *in situ* possui pouca resolução vertical (Zaleski & Schettini, 2006).

Do mesmo modo, o trabalho em laboratório para processamento das amostras requer muito tempo a partir da amostragem inicial e o resultado final do levantamento (Zaleski & Schettini, 2006). Portanto, esses diversos fatores citados produzem grandes limitações para estimar espaço-temporalmente a Q_{ss} e ter uma rede de monitoramento dessa variável.

Uma alternativa para o cálculo da Q_{ss} é o uso de equipamentos tipo PACD (perfilador acústico de correntes por Doppler). Esses sensores são utilizados para medir a velocidade das partículas em suspensão na água através do Efeito Doppler e conseqüentemente quando integrada a área da seção, a Q_{liq}. Estes equipamentos são amplamente utilizados em estudos hidrológicos e oceanográficos (Ávila *et al.*, 2014). Também permitem estimar a CSS, uma vez que a medida de retroespalhamento acústico (RA) do sinal do sensor é proporcional à quantidade de partículas na água (Ávila *et al.*, 2014; Zaleski & Schettini, 2006; Gartner, 2004).

Uma das vantagens deste equipamento é a obtenção de inúmeros perfis verticais consecutivos de velocidades de correntes e RA em toda a coluna de água, resultando em dados com excelente resolução espacial e temporal (Zaleski & Schettini, 2006). Para estimar Q_{ss} com PACD, estes sensores possuem uma vantagem quando comparados a outros métodos, pois medem Q_{liq} diretamente, a qual é uma variável de entrada para o cálculo de Q_{ss}. Dessa forma, a utilização de um PACD diminuí consideravelmente o tempo de trabalho, pois além de fornecer uma variável de entrada (Q_{liq}), diminui o tempo de coleta em campo e as análises em laboratório para estimar CSS.

No entanto, o processo de conversão da intensidade de RA para CSS não é simples. As perdas de transmissão acústica de feixe de propagação e atenuação devem ser contabilizadas corretamente na estimação de CSS (Gartner, 2004). Esse efeito é removido por equações fornecidas pelo manual do equipamento, variando de acordo com as especificações técnicas de cada equipamento (descrição completa do método em: Ávila *et al.*, 2014; Guerrero *et al.*, 2011; Zaleski & Schettini, 2006; Gartner, 2004).

O objetivo deste trabalho é gerar um panorama da hidrodinâmica e transporte de sedimentos do sistema Guaíba. Para isso foram estimadas as Q_{liq} e Q_{ss} utilizando um sensor PACD (1,5 MHz). Foi criada uma equação de calibração do PACD para estimar a CSS e Q_{ss} no Guaíba. Ainda, objetiva comparar a Q_{liq} medida com a soma de Q_{liq} dos rios tributários, com oscilações de nível da água, direção e intensidade dos ventos deste ambiente.

2 Material e Métodos

2.1 Trabalho de campo e coleta dos dados

Foram realizadas 22 campanhas de medições de descarga líquida com o uso de Perfilador Acústico de Correntes por Doppler (PACD, em inglês: ADCP), no período entre junho de 2014 e janeiro de 2017. Todas as medições desse projeto foram realizadas na seção transversal da Ponta do Gasômetro, entrada do Guaíba.

As demais medições (09/2015, 2016 e 01/2017) de PACD foram feitas na Ponta do Gasômetro e eventualmente nas seções Ponta do Dionísio e Ponta Grossa (Fig. 2), a fim de comparar a vazão medida nas 3 seções. Este procedimento não foi realizado em todas as campanhas por indisponibilidade de tempo.

O PACD utilizado foi um SONTEK 1,5 MHz, com sistema de rastreamento do fundo (em inglês, *Bottom Tracking*), com GPS acoplado para definir o posicionamento na seção. O instrumento possui três transdutores orientados 25° em relação ao eixo vertical e deslocados 120° entre si, capaz de realizar medições de até 23 metros de profundidade mais uma distância em branco (Sontek, 2000). Esse instrumento tem resolução vertical máxima de 50 centímetros.

Para as medições de Q_{liq} , todos os critérios adotados para obter os dados atenderam os parâmetros de qualidade sugeridos pelo fabricante (Sontek, 2000), e por agências reguladoras de recursos hídricos como a Agência Nacional de Águas (ANA), Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais (CPRM) e Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS). Por exemplo, os

procedimentos de calibração da bússola, cuidados com a navegação durante as travessias e número de travessias consecutivas foram implementados em campo.

Na seção hidrométrica da Ponta do Gasômetro, utilizada como um ponto de controle, foram realizadas pelo menos quatro travessias consecutivas (Fig. 2). Caso uma das travessias apresentasse uma diferença significativa da vazão em relação às outras, maior que 5%, então seriam realizadas mais travessias para verificação. Nas seções da Ponta do Dionísio e da Ponta Grossa foram realizadas uma ou duas travessias. Esse procedimento foi adotado devida a grande distância entre os locais e à grande largura da seção, o que tornou inviável a realização de 4 travessias nas seções mais ao sul em um mesmo dia.

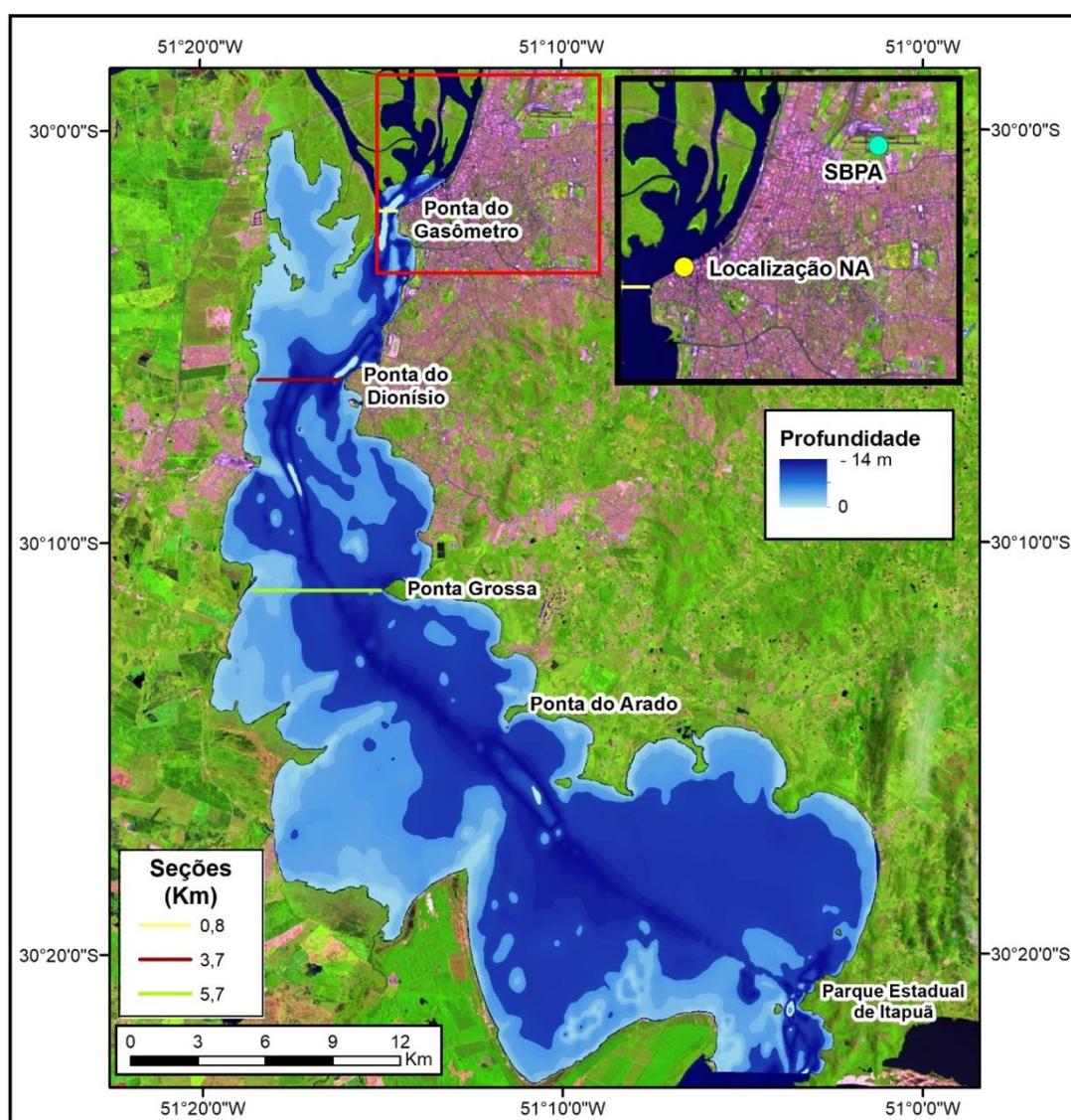


Figura 2. Mapa das seções de monitoramento realizadas com o sensor PADC. A localização da régua para medições do nível da água (NA) é localizada no ponto amarelo. O Aeroporto Internacional de Porto Alegre - Salgado Filho (SBPA) é localizado pelo ponto verde, onde foram analisados dados de direção e intensidade dos ventos.

Figure 2. Map of the monitoring sections performed with the PADC sensor. The location of the ruler for water level measurements (NA) is located at the yellow dot. The Porto Alegre International Airport - Salgado Filho (SBPA) is located by the green dot. In this place, data of intensity and direction of the winds were analyzed.

Para estimar Qss, foram realizadas oito campanhas de coleta de dados nas datas indicadas na tabela 1, distribuídas entre setembro de 2015 e janeiro de 2017, totalizando 94 amostras coletadas. Nestas mesmas datas também foram realizadas as medições de Qliq.

Foi adotado o método de coleta pontual de CSS, utilizando uma garrafa Van Dorn horizontal com capacidade de 2 litros. A quantidade de amostras coletadas na vertical era proporcional à profundidade no ponto de amostragem. Quando a profundidade permitia, foram coletadas amostras em três camadas: logo abaixo da superfície, meio e próxima ao fundo da coluna d'água.

Em cada uma das seções horizontais foram realizados pelo menos 4 pontos de coleta de água, neles o PACD ficava gravando dados enquanto a água era coletada com a garrafa, em profundidades que coincidissem com as profundidades das células do PACD. Após esta etapa, eram feitas no mínimo quatro travessias para medição da descarga líquida com o PACD.

Tabela 1. Datas de coleta de campo e quantidade de amostras utilizadas.

Table 1. Field collection dates and amount of samples used.

Data	Amostras
01/09/2015	21
11/01/2016	10
27/01/2016	9
09/06/2016	5
15/06/2016	10
22/08/2016	9
22/10/2016	14
26/01/2017	16
Total	94

2.2 Tratamento dos dados para estimação da concentração de sólidos em suspensão (CSS)

Em laboratório, as 94 amostras foram filtradas pelo método gravimétrico, utilizando uma bomba de pressão a vácuo e filtros de nitrato de celulose de 45 µm malha e 47 mm de diâmetro. Os filtros foram pesados antes e depois da filtragem, para obtenção da massa de material presente na amostra.

A conversão do sinal acústico em CSS é baseada na relação existente entre a intensidade do retroespalhamento acústico (RA) e a quantidade de partículas em suspensão na coluna d'água (Ávila *et al.*, 2014). Dessa forma, os dados de amplitude acústica de “contagens” (unidade logarítmica interna do equipamento) são transformados para potência sonora em decibéis (dB). Para transformar a amplitude do sinal acústico em RA, a equação do sonar simplificada foi utilizada (Eq. 1):

$$RA=EA+2PA-FA \quad (1)$$

Onde:

RA – representa o retroespalhamento acústico, o qual é o sinal emitido pelos objetos ou partículas existentes no meio.

EA – sinal recebido pelo transdutor.

PA – perdas durante a propagação do sinal na ida e volta ao transdutor.

FA – intensidade do sinal emitido pela fonte emissora.

O retroespalhamento acústico é uma medida indireta, obtida descontando-se as perdas (PA) do sinal acústico previstas do sinal do PACD:

$$PA= -20 \times \log_{10}(D\cos(\phi)) - 2 \times \alpha \times (D\cos(\phi)) \quad (2)$$

O ângulo do transdutor (ϕ) é de 25°, e o coeficiente de absorção (α) é igual 0,68 à (Sontek, 1997). A distância (D) se refere à profundidade de cada célula medida pelo PACD, da superfície ao fundo. Uma vez obtido o RA relativo a cada célula, a calibração consistiu em realizar um modelo de regressão da CSS *in situ* na mesma profundidade e localização com os dados de RA. As etapas de estimação de CSS e Qss são esquematizadas na figura 3.

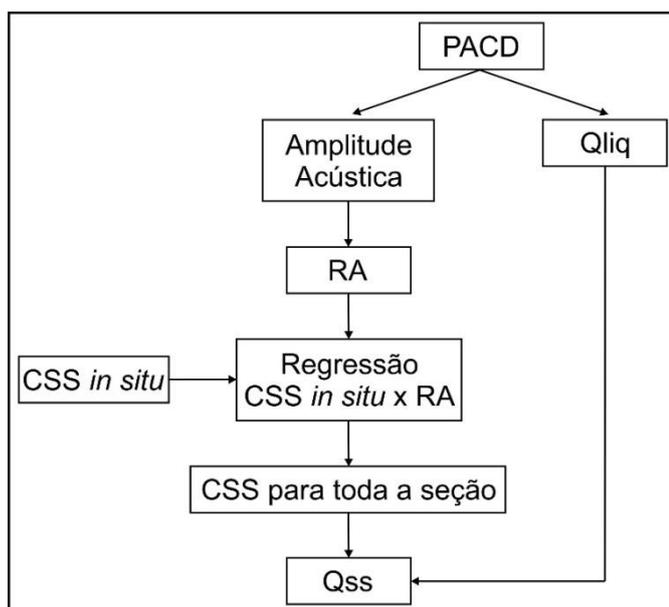


Figura 3. Etapas para estimação de CSS e Qss.

Figure 3. Steps for estimation of CSS and Qss.

Na análise de regressão foi testado o R^2 , significância dos coeficientes e teste Kolmogorv-Smirnov (K-S) para a normalidade dos resíduos. Para os testes dos coeficientes e K-S foi considerada uma significância $\alpha = 0,01$.

2.3 Cálculo da descarga sólida em suspensão (Q_{ss})

Primeiramente, foi calculado o RA para todo um perfil transversal medido pelo PACD. Depois, através da regressão obtida dos dados in situ e do PACD foi estimado valores de CSS para todo este perfil transversal. Após esta etapa foi calculada uma média da CSS que foi usada na fórmula abaixo, sendo assim possível calcular a Qss multiplicando pela descarga líquida (Q_{liq}) medida pelo PACD.

$$Q_{ss} = 0,0864 \times CSS \times Q_{liq} \quad (3)$$

2.4 Análises realizadas

- Comparação do nível da água (NA) com a descarga líquida. O NA foi obtido através da régua do cais da Mauá, disponibilizado pelo site do Sistema de Monitoramento e Alerta de Desastres (<http://www.smad.rs.gov.br/index.php>). A localização da régua é mostrada na figura 2.

- Utilização e comparação das séries temporais (1940 a 2017) de descargas líquidas dos quatro principais tributários do Guaíba (rios Jacuí, Taquarí, Caí e Sinos), as quais foram adquiridas junto ao site Hidroweb da ANA (<http://hidroweb.ana.gov.br/>) e os dados medidos com o PACD na Ponta da Gasômetro.

- Foi realizada uma expansão da série temporal pelo modelo publicado de Andrade Netto *et al.* (2012) para o período de 01/2013 a 09/2017. Foi comparada as variáveis CSS, e Qss estimada neste trabalho com a CSS e Qss estimada por Andrade Netto *et al.* (2012).

- Comparação qualitativa dos dados de Qliq com dados METAR (Meteorological Aerodrome Report) de direção e intensidade dos ventos localizados na estação do Aeroporto Internacional de Porto Alegre - Salgado Filho (Fig. 2).

3 Resultados e Discussão

3.1 Descargas líquidas na seção do Gasômetro

As descargas líquidas (Qliq) medidas pelo PACD durante o período em estudo demonstraram a grande variabilidade deste sistema (Fig. 4). Foram observados valores mínimos e máximos de 407 e 14.270 m³/s, respectivamente. Estes valores estão de acordo com séries históricas desta bacia hidrográfica (Vaz *et al.*, 2006). Os valores apresentados na figura 4 referem-se às medições de descarga líquida realizadas na Ponta do Gasômetro, usada como seção de controle. O citado valor máximo foi medido no maior nível d'água alcançado (2,7 m, régua do Caís Mauá) durante uma das maiores cheias nos últimos 77 anos ocorrida em 22 de outubro de 2016. Este valor corresponde ao terceiro maior valor da série temporal dos tributários no período de 1940 – 2017.

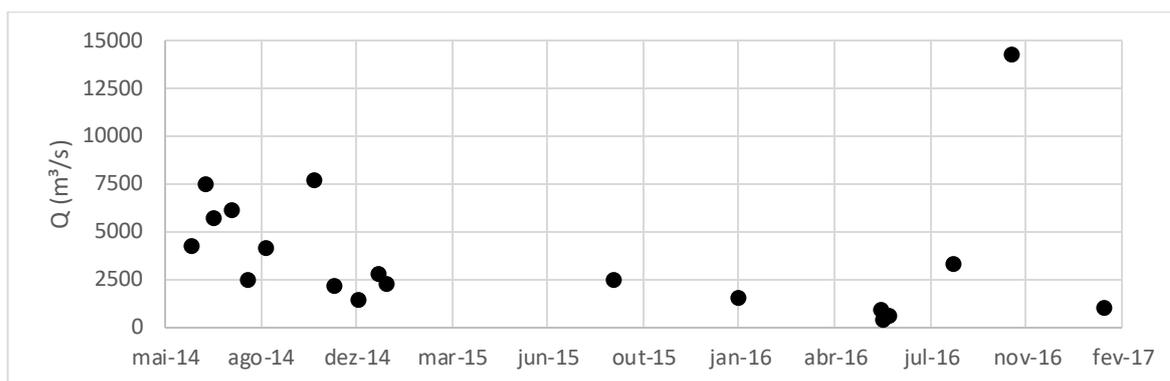


Figura 4. Qliq medidas na Ponta do Gasômetro durante o período em estudo.

Figure 4. Qliq measured at the Ponta do Gasômetro during the study period.

A relação entre o NA e a Qliq foi fraca, com valor de R^2 igual a 0,55 (Fig. 5). Uma possível explicação para isto é a grande área superficial do Guaíba e a influência das oscilações de nível da Lagoa dos Patos, localizada no exutório do Guaíba. A grande extensão e largura deste ambiente produz uma “pista de vento” grande o suficiente, que possibilita a ação do vento local no NA e conseqüentemente no fluxo da água. A Lagoa dos Patos também pode variar o nível significativamente, causando um efeito de represamento das águas do Guaíba em situações de ventos de Sul (Möller *et al.*, 2007). Dessa forma, a impossibilidade de estabelecer uma curva-chave para o Guaíba é justificada em função do baixo valor de R^2 .

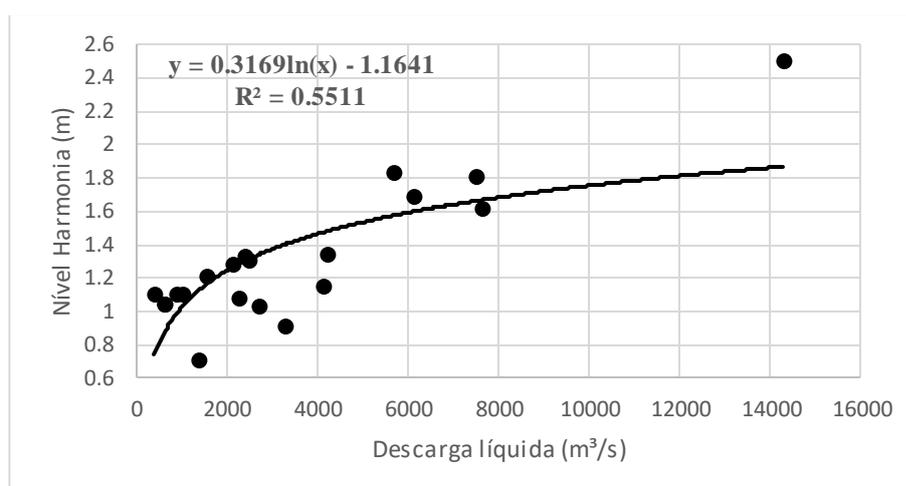


Figura 5. Relação entre NA e Qliq.

Figure 5. Relationship between NA and Qliq.

Foi realizado um comparativo entre as séries temporais de descargas líquidas dos quatro principais tributários do Guaíba (rios Jacuí, Taquari, Caí e Sinos) e os dados medidos com o PACD na Ponta da Gasômetro (Fig. 6). A correlação entre estes dados resultou em $r=0,93$, indicando uma forte associação entre os dados estimados de vazão nos principais afluentes e os dados medidos de vazão no Guaíba.

Os dados medidos por PACD na Ponta da Gasômetro possuem valores superiores em 84% das amostras quando comparados com a soma dos tributários. Esse resultado era esperado pela posição das estações fluviométricas (Fig. 1), que estão localizadas no interior das bacias hidrográficas e conseqüentemente não englobam toda a bacia de drenagem que deságua no Guaíba.

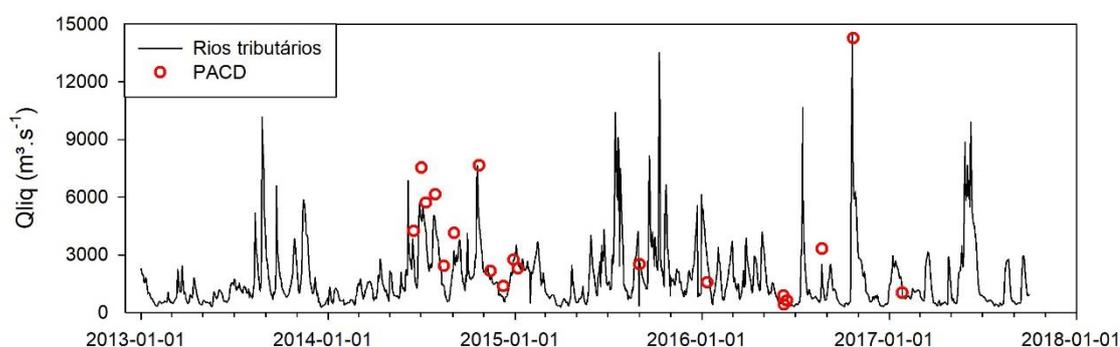


Figura 6. Comparação entre os dados de Q_{liq} dos 4 principais tributários do rio Guaíba (linha em preto) e dados de Q_{liq} medidos na seção Ponta do Gasômetro (pontos em vermelho).

Figure 6. Comparison between the Q_{liq} data of Guaíba river 4 main tributaries (black line) and Q_{liq} data measured in the Ponta do Gasômetro section (red points).

3.2 Estudo do comportamento das Q_{liq} no interior do Guaíba

Foram realizadas medições nas seções transversais na Ponta do Dionísio e a Ponta Grossa, além da seção de controle da Ponta do Gasômetro (Tab. 2). Essas seções estão distantes, respectivamente, 9 e 18 km da Ponta do Gasômetro. Pode-se observar que, apesar da grande distância, da diferença na largura e configuração batimétrica entre as seções, os valores de descarga líquida possuem uma correspondência em magnitude entre si, concordando com a continuidade do fluxo principal no sentido N-S.

Tabela 2. Qliq (m³/s) nas 3 seções transversais no rio Guaíba.Table 2. Qliq (m³ / s) in the 3 cross sections in the Guaíba river.

	Largura Seção	01/09/2015	22/08/2016	22/10/2016	26/01/2017
Ponta Gasômetro	0,8 Km	2.496	3.311	14.270	1.025
Ponta Dionísio	3,7 Km	1.767	3.689	14.190	---
Ponta Grossa	5,9 Km	---	---	14.040	749

Embora os valores de descarga líquida entre as seções sejam semelhantes, o alargamento das seções da Ponta do Dionísio e Ponta Grossa reduz a velocidade do escoamento da água. Comparando especificamente as seções da Ponta do Gasômetro e Ponta Grossa (Fig. 7), é possível observar que os valores de velocidade da corrente se reduzem a aproximadamente a metade nas áreas nas áreas mais largas.

As maiores velocidades são encontradas no canal de navegação e áreas imediatamente adjacentes. O canal, região com maiores profundidades, oferece menor resistência ao escoamento d'água. A seção do Gasômetro é a mais estreita do Guaíba (Tab. 2) e apresenta as maiores velocidades de escoamento. As correntes acima de 40 cm/s, observados em 74% dos perfis de monitoramento, geram tensões de cisalhamento suficiente para construção de dunas subaquosas (Ashley, 1990), as quais foram mapeadas através de perfilagem sísmica nas proximidades da Ponta do Gasômetro (Scottá *et al.*, submetido), indicando correspondência direta entre os dados medidos de corrente e o mapeamento da morfologia de fundo do Guaíba.

Na seção da Pta do Dionísio e Pta Grossa, as maiores velocidades também são registradas nas áreas no canal, porém com menor velocidade e conseqüentemente menor competência do transporte de sedimentos mais grossos. Esse comportamento foi relatado previamente por outros autores (Nicolodi, 2007; Bacchi *et al.*, 2000, Toldo *et al.*, 2000), que observaram que o regime fluvial dos tributários perde a competência como agente transportador ao ingressar no Guaíba. Na data de 15/09/2015 foram registradas descargas (Qliq) de 1.767 m³/s, com velocidades de fundo entre 9 e 24 cm/s, menores que aquelas a montante, porém suficientes para o transporte de arrasto do sedimento arenoso.

Também se observa um comportamento tridimensional do escoamento, ou seja, em toda a coluna d'água, demonstrando um padrão de circulação fluvial no corpo hídrico. Esse resultado difere das discussões de Menegat & Carraro (2009), que propõem fluxo bidimensional, apenas na superfície das águas do Guaíba.

Em 22/10/2016 foi registrada a condição “máxima” de Qliq no Guaíba (Fig. 7). Os valores de velocidade no canal superaram 220 cm/s e 140 cm/s nas seções da Ponta Grossa e

Ponta do Dionísio, respectivamente. Nessas condições hidrodinâmicas a descarga apresenta capacidade para remobilizar e transportar os sedimentos arenosos de fundo, inclusive as frações de tamanho cascalho e seixo, mostrando grande competência de transporte da carga de sedimentos grossos em situações de valores elevados de Q_{liq} .

Nas áreas periféricas das seções Ponta do Dionísio foram registrados valores acima de 40 cm/s, condição crítica para erosão e transporte dos sedimentos arenosos. Esses dados indicam que o transporte de areia nas áreas periféricas das seções mais largas ocorrem apenas em situações de descarga líquida elevada. Uma análise da série temporal dos rios tributários indica que vazões acima de 12.000 m³/s ocorreram apenas dez vezes no período 1940-2017.

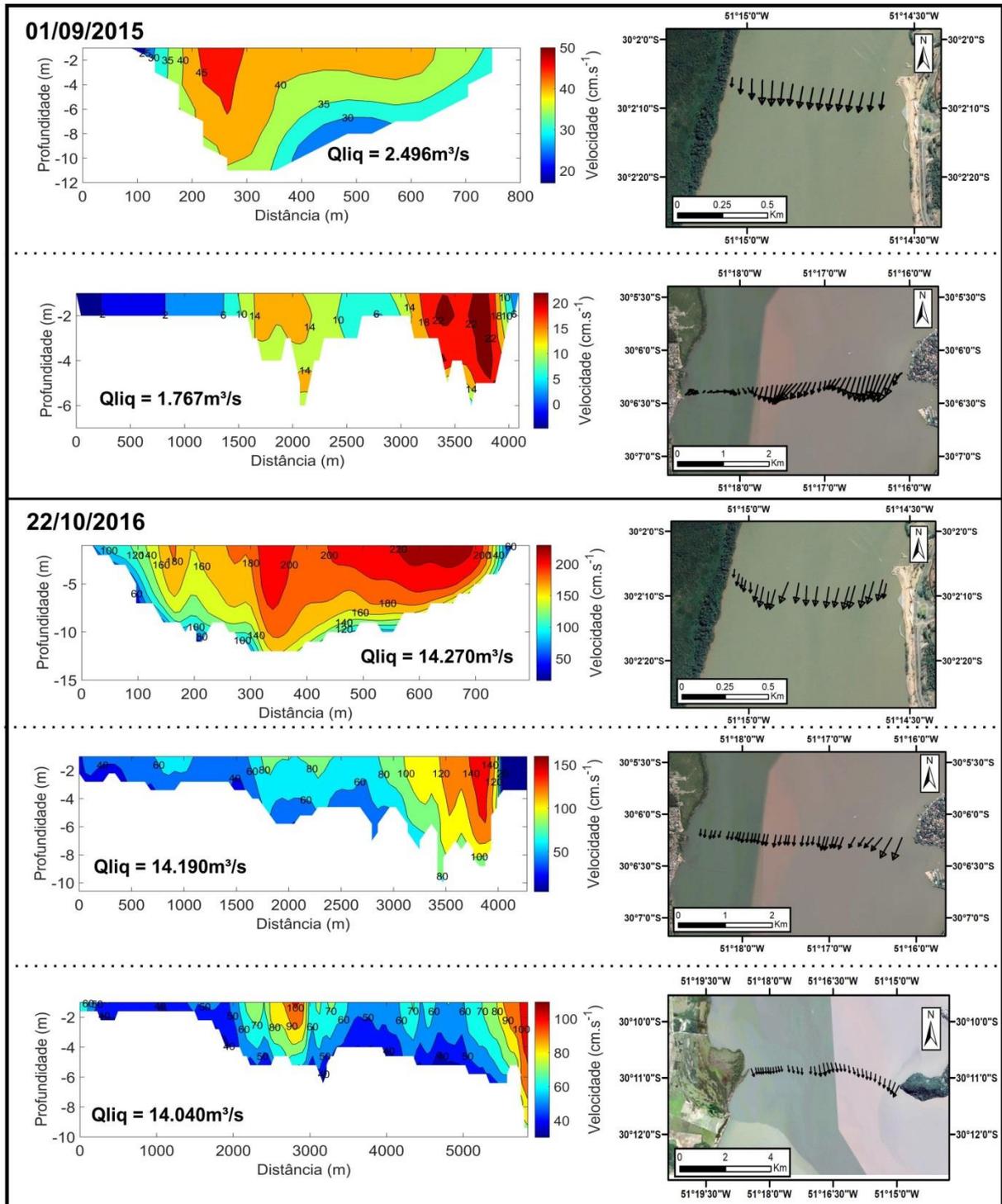


Figura 7. Perfis de medições das velocidades na Ponta do Gasômetro e Ponta do Dionísio, e o mapa de localização das seções com as correntes vetorizadas na direção preferencial do escoamento.

Figure 7. Profiles of velocity measurements at Ponta do Gasômetro and Ponta do Dionísio, and the location map of the sections with the vectored currents in the main flow direction.

3.3 Influência dos ventos na inversão de fluxo no Guaíba

Os ventos registrados pela estação meteorológica analisada (Fig. 2) no período das medições apresentaram predomínio de orientação leste, sendo a direção predominante nessa região (Nicolodi, 2007; Camargo *et al.*, 2002; Livi, 1998). Duas situações de inversão das correntes na Pta do Gasômetro foram registradas em 01/09/2015 e 13/01/2016, sendo relacionadas com ventos nos quadrantes S e SE. A intensidade dos ventos média das últimas 4 horas à realização da medição foi de 5,6 e 6,3 m/s para as respectivas datas.

A data de 01/09/2015 apresentou valores que variaram de -60,3 m³/s e 410,6 m³/s. A inversão do fluxo de 13/01/2016, ocorrida com maior intensidade, foi registrada de forma gradual, com valores positivos nas duas primeiras travessias e que gradualmente foram se reduzindo até o valor de -341 m³/s. A estratificação das correntes também pode ser observada na figura 8. Os valores de corrente negativos (para N) ocorreram inicialmente na superfície, pelo atrito com o vento, e nas laterais da seção, pela baixa velocidade nas margens. As áreas mais profundas, embora tenham reduzido a velocidade do fluxo nas duas últimas medições, mantiveram o sentido de escoamento preferencial Norte – Sul. Na mesma data, a Qliq dos tributários apresentou um valor de 2.455 m³/s.

Situações de inversão de fluxo no Guaíba foram documentadas em trabalhos prévios e relacionadas com a ocorrência de ventos de quadrante Sul (CNH, 2017; Nicolodi, 2007; Casalas & Cybis, 1985; DNAEE, 1983). A ocorrência de ventos de quadrante sul está na faixa de 12%, com a predominância de ventos S e SE (Nicolodi, 2007; Livi, 1998). O vento S pode ser responsável por represar a água e reduzir os valores de Qliq no Guaíba, especialmente nas áreas a sul que possuem maior pista para a ação do vento. Segundo o relatório de correntes do DNAEE (1983), de 8.779 pontos medidos no Guaíba, apenas 15% das medições apresentaram inversão de fluxo, os quais ocorreram principalmente na seção de Itapuã e seções intermediárias. Nenhuma situação de inversão de fluxo foi medida na Ponta do Gasômetro no citado relatório.

A inversão de fluxo, principalmente na área norte do Guaíba, é eventual pela baixa frequência de ventos de quadrante S. Além disso, os ventos devem ter intensidade e duração suficiente para forçar a inversão, como demonstrado na figura 8. A inversão também está associada a situações de baixas Qliq, ou seja, sob condições de correntes com menores velocidades.

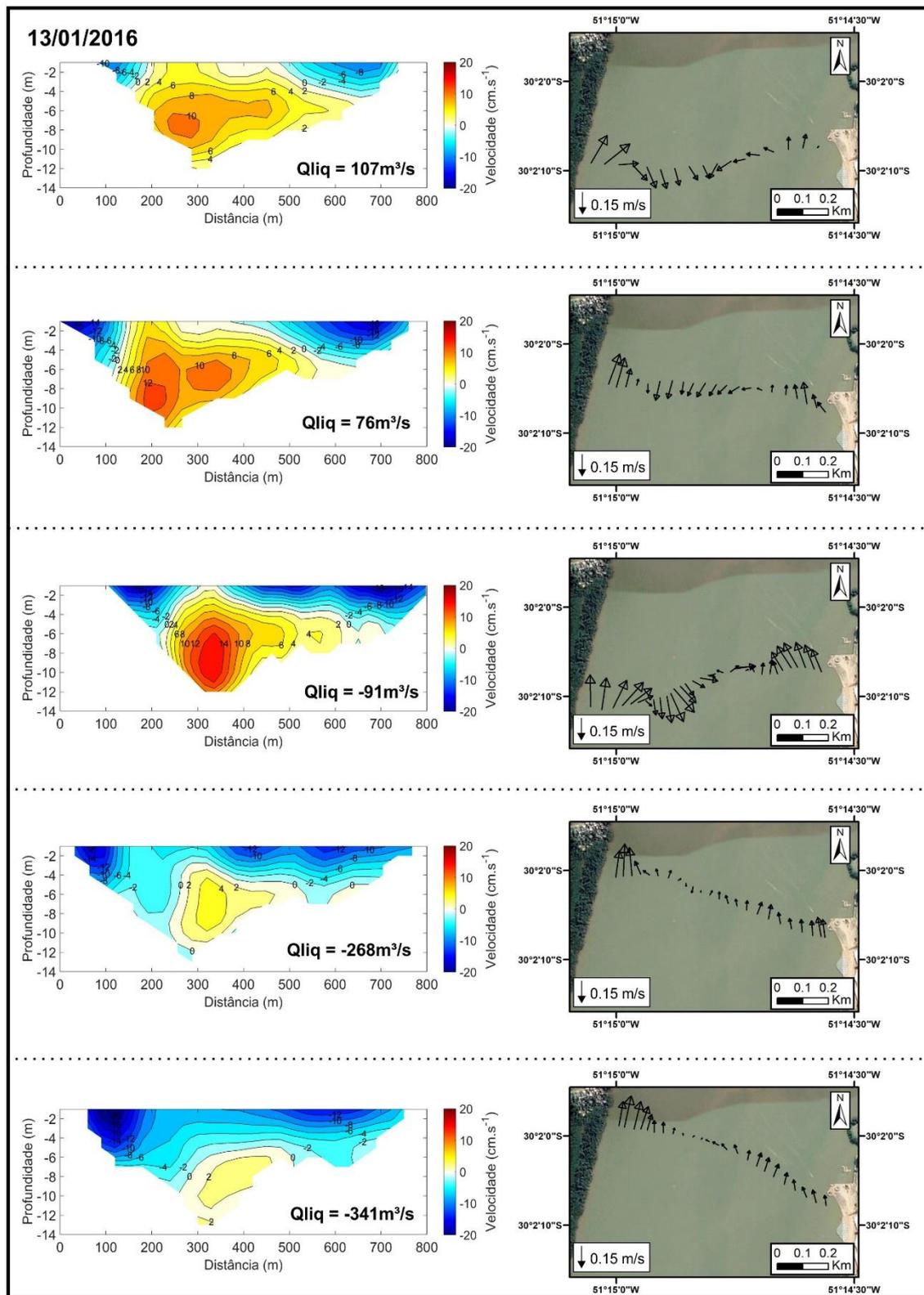


Figura 8. Registros da inversão do fluxo em 13/01/2016. Cores quentes representam o sentido predominante Norte-Sul e as cores frias representam fluxo Sul-Norte (a esquerda). Mapa das seções com as correntes vetorizadas (a direita).

Figure 8. Flow inversion records on 01/13/2016. Warm colors represent the predominant North-South direction and the cold colors represent South-North flow (the left). Map of sections with vectorized currents (right).

3.4 CSS e Q_{ss}

Entre as 94 amostragens de CSS *in situ*, quatro foram excluídos por problema nos dados do PACD. O resultado de ajuste da equação pode ser visualizado na figura 9, mostrando uma relação exponencial com R^2 de 0,7. A regressão apresentou significância estatística para os interceptos e normalidade dos resíduos com $\alpha = 0,01$. Foi encontrada uma predominância de valores entre 20 a 40 mg.l^{-1} , e uma quantidade menor de valores superiores a 100 mg.l^{-1} , sendo valores esperados para esse ambiente de acordo com Andrade Netto *et al.* (2012) .

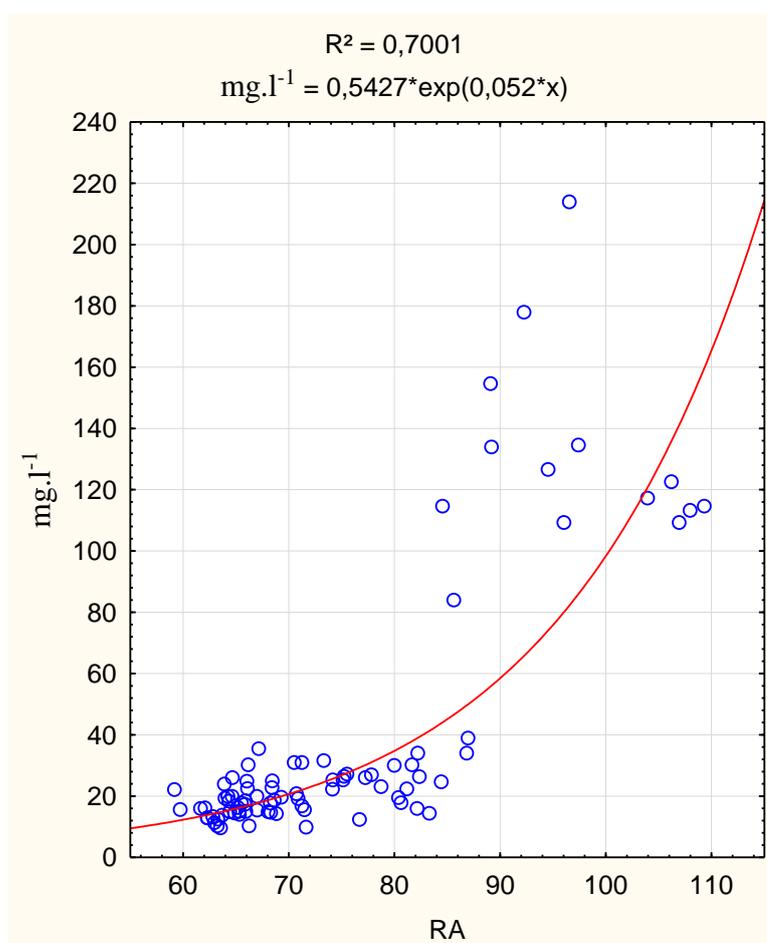


Figura 9. Relação entre a CSS (mg.l^{-1}) e RA.

Figure 9. Relationship between CSS (mg.l^{-1}) and RA.

Embora o manual do equipamento (Sontek, 1997) sugira um valor acima de 1000 mg.l^{-1} como limite para a aquisição dos dados com qualidade, foi possível observar maior geração de resíduos em concentrações maiores que 100 mg.l^{-1} . Resíduos da regressão em elevadas concentrações também foi encontrado em trabalhos que tiveram o mesmo objetivo de calibração de PACD em outros corpos hídricos (Ávila *et al.*, 2014; Zaleski & Schettini, 2006; Gartner, 2004).

Através da equação exponencial obtida foi possível estimar a CSS para toda uma seção realizada com PACD. Os dados de CSS deste trabalho possuem forte associação linear (Fig. 10) com os resultados gerados por Andrade Netto *et al.* (2012). Essa relação mostra que as variações ao longo da série são muito próximas. Os valores de CSS quando comparados entre os métodos tiveram diferença média de $12,75 \text{ mg.l}^{-1}$, com valores mínimo e máximo de $2,52 \text{ mg.l}^{-1}$ (amostra 10) e $25,88 \text{ mg.l}^{-1}$ (amostra 18). Embora os métodos utilizados apresentem resultados semelhantes, a CSS obtida com o PACD apresentou valores menores que os resultados obtidos pelo método de Andrade Netto *et al.* (2012) em todas as amostras, com exceção da amostra 18.

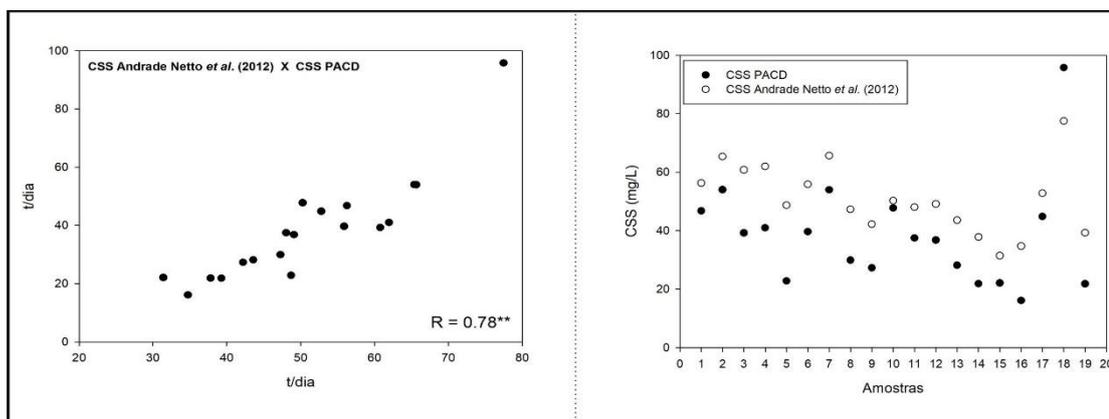


Figura 10. Correlação e diferença da CSS (mg.L^{-1}) das amostras coletadas por PACD comparadas com os dados de Andrade Netto *et al.* (2012).

*Figure 10. CSS correlation and difference ($\text{mg} / \text{L}^{-1}$) of the samples collected by PACD compared with the data of Andrade Netto *et al.* (2012).*

A metodologia proposta por Andrade Netto *et al.* (2012) possui calibração do modelo apenas no ponto de captação da Estação de Tratamento de Esgoto no Bairro Menino Deus, distante 400 m da margem do Guaíba e profundidade superior a 2 m. Por não se localizar no canal de navegação, os valores de CSS e Q_{ss} poderiam estar subestimados nesta metodologia. Porém, a comparação com os dados de PACD, medidos ao longo de toda a seção da Ponta do

Gasômetro, não mostra subestimação da série, visto que os dados são semelhantes e que a estimação de CSS e Qss de Andrade Netto *et al.* (2012) é válida.

Os valores de Qss dos dados de PACD apresentaram valores mínimos e máximos de 0,77 a 118,13 t/dia (Fig. 10). O valor máximo de 118,130 t/dia corresponde à data de 22/10/2016 na condição de máxima. Apesar disso, a acurácia desse valor não pode ser avaliada pelos maiores resíduos gerados pelo modelo em situações de alta CSS. Panorama semelhante, com maiores resíduos em alta CSS, é registrado no modelo de Andrade Netto *et al.* (2012) para o Guaíba. Essa condição de maior indeterminação em maiores CSS é influenciada por diversos fatores além da Qliq, como efeitos sazonais, processos de exaustão, condições do uso do solo e precipitação pluvial (Oeurng *et al.*, 2010; Rovira & Batalla, 2006; Batalla & Sala, 1994).

A Qss apresenta valores próximos entre os métodos devido a forte correlação da Qliq (Fig. 11). As maiores diferenças entre os métodos estão nos valores de CSS, que também apresentam forte associação linear ($R = 0,78$, Fig. 10). O valor médio de Qss da série temporal 01/2013 – 09/2017 pelo modelo de Andrade Netto *et al.* (2002) é de 7,58 t/dia, com valores mínimos e máximos de 0,65 a 98,24 t/dia. Uma característica importante sobre o Guaíba é ter maior contribuição de Qss em condições de descarga moderadas, sendo uma característica que distingue esse sistema de outros sistemas fluviais (Andrade Netto *et al.*, 2002), que possuem a maior porcentagem de transporte de Qss concentradas em condições de enchente.

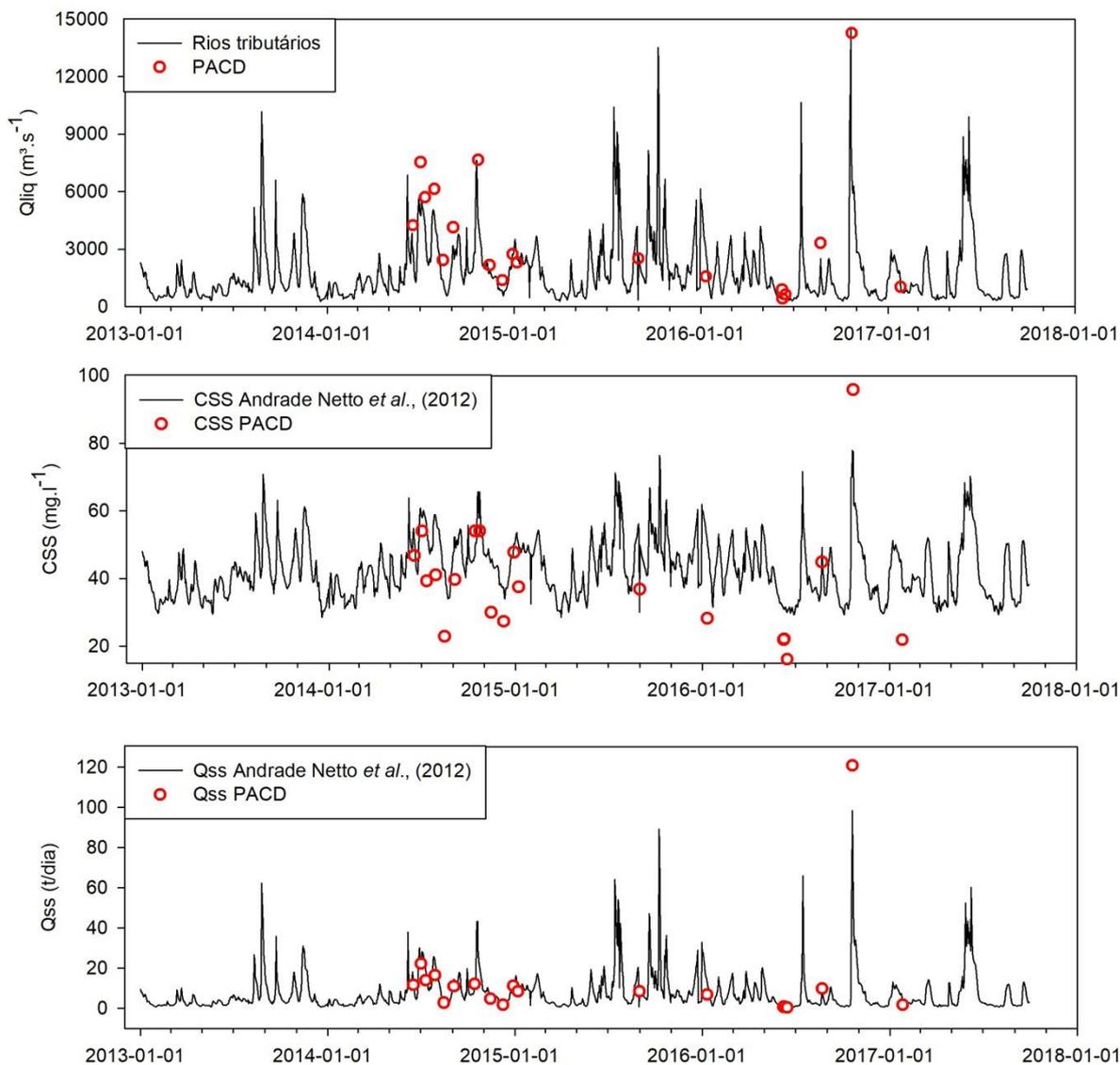


Figura 11. Séries temporais e dados de PACD das variáveis Q_{liq} , CSS e Q_{ss} .

Figure 11. Time series and PACD data of Q_{liq} , CSS and Q_{ss} variables.

4 Conclusões

Foi possível realizar um estudo abrangente sobre as variáveis Q_{liq} e Q_{ss} no Guaíba. Os dados de Q_{liq} medidos possuem valores muito próximos a soma dos dados de vazão estimados para os rios Jacuí, Taquarí, Caí e Sinos, apresentando forte correlação com coeficiente de 0,93. As descargas líquidas recebidas pelo Guaíba apresentam um escoamento preferencial para sul orientado pelo canal de escoamento.

A região de transição entre diferentes corpos hídricos naturalmente não possibilita a aplicação da curva chave. Isto foi observado no Guaíba na tentativa de ajuste da referida curva

entre a vazão e a régua localizada no Cais Mauá. A relação entre o NA e a descarga líquida foi fraca devido as oscilações de nível causadas principalmente pelo vento nesse sistema.

Ademais, foi possível investigar o comportamento, das Qliq, das seções na parte interna do Guaíba (Ponta do Dionísio e Ponta Grossa) em relação à seção de entrada (Ponta do Gasômetro) demonstrando comportamento semelhante do fluxo entre elas.

A área da entrada do Guaíba apresenta velocidades de correntes suficientes para transporte e erosão dos sedimentos arenosos. As seções mais largas (seções da Ponta do Dionísio e Ponta Grossa) apresentam competência para transporte como arrasto de fundo. Nestas duas seções, apenas condições de cheias com altas descargas líquidas são suficientes para provocar erosão e transporte do sedimento arenoso e ocorrem de forma esporádica. As maiores velocidades se encontram na região do canal independente da seção analisada.

A ação do vento provoca eventualmente a inversão de fluxo do sistema Guaíba. Duas situações de inversão foram registradas nos perfis de corrente na entrada do Guaíba e foram relacionadas com a ocorrência de ventos nos quadrantes S e SE.

Este estudo mostra a possibilidade de calibração do sensor PACD para estimar CSS e Qss no Guaíba e de estimar a quantidade de volume de sedimentos transportados para a bacia hidrográfica do Guaíba.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Davi da Motta Marques pelo empréstimo do PACD, ao CNPq e CAPES/CiMar pela concessão de bolsa aos primeiros autores. Os autores agradecem ainda aos alunos de pós-graduação do PPGGEO que auxiliaram nas campanhas realizadas e ao CECO/UFRGS pela disponibilização da infraestrutura para coleta e processamento dos dados.

Referências bibliográficas

- ANA. Agência Nacional de Águas. 2007. *Evolução da rede hidrometeorológica nacional*. Superintendência de Administração da Rede Hidrometeorológica. Brasília, 15p.
- Andrade Neto, J. S., Rigon, L. T., Toldo Junior, E. E. & Schettini, C. A. 2012. Descarga sólida em suspensão do sistema fluvial do Guaíba, RS, e sua variabilidade temporal. *Pesquisas em Geociências*, 39(2): 161-171.
- Ashley, G. M. 1990. Classification of large-scale subaqueous bedforms: a new look at an old problem. *Journal of Sedimentary Petrology*, 60 (1): 160-172.

- Ávila, R. A., Möller Jr, O. O. & Andrade, M. M. 2014. Uso de um ADCP para estimar concentrações de material particulado em suspensão para o estuário da Lagoa dos Patos, Brasil. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 19(2): 299-309.
- Bacchi, F. A., Barboza, E. G. & Toldo Junior, E. E. 2000. Estudo da sedimentação do Guaíba. *Ecos*, 17: 32-35.
- Batalla, R. J. & Sala, M. 1994. Temporal variability of suspended sediment transport in a Mediterranean sandy gravel-bed river. *Variability in Stream Erosion and Sediment Transport*. IAHS Pubi. no. 224. Disponível em: http://hydrologie.org/redbooks/a224/iahs_224_0299.pdf. Acesso em: 18 ago. 2018.
- Camargo, O. A. 2002. *Atlas Eólico: Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, Secretaria de Minas e Comunicações (SEMC). 70p.
- Carvalho, N. O. 2008. *Hidrossedimentologia Prática*. Rio de Janeiro, Editora Engenho Novo, 599 p.
- Casalas, A. & Cybis, F. 1985. Modelo matemático de circulação e de qualidade das águas do estuário do Rio Guaíba. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS, São Paulo. *Anais...São Paulo*, p. 419 - 432.
- CNH. Centro de Hidrografia da Marinha. *De Itapuã a Porto Alegre*. 2013. Disponível em: https://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-cartas-raster/raster_disponiveis.html. Acesso em: 09 jan. 2017.
- DMAE. Departamento Municipal de Água e Esgotos. *Lago Guaíba*. 2017. Disponível em: http://www2.portoalegre.rs.gov.br/dmae/default.php?p_secao=197. Acesso em: 18 maio 2017.
- DNAEE. Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica. 1983. *Mecânica de Correntes do Guaíba: Relatório Síntese*. Ministério das Minas e Energia, Porto Alegre, 61p.
- Do, H.X., Gudmundsson, L., Leonard, M. & Westra, S. 2018. The Global Streamflow Indices and Metadata Archive (GSIM) – Part 1: The production of a daily streamflow archive and metadata. *Earth System and Science Data*, 10: 765–785.
- FEPAM. Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler. 2018. *Região hidrográfica do Guaíba*. Disponível em: <http://www.fepam.rs.gov.br/qualidade/guaiba.asp>. Acesso em: 23 junho 2018.
- Gartner, J. W. 2004. Estimating suspended solids concentrations from backscatter intensity measured by acoustic Doppler current profiler in San Francisco Bay, California. *Marine Geology*, 211: 169-187.

- Guerrero, M., Szupiany, R.N. & Amsler, M. 2011. Comparison of acoustic backscattering techniques for suspended sediments investigation. *Flow Measurement and Instrumentation*, 22: 392-401.
- Jornal do Comércio. Catamarã beneficia trabalhadores e promove o turismo - *Jornal do Comérc.* Disponível em: http://www.jornaldocomercio.com/_conteudo/geral/2018/06/631043-catamara-eneficia-trabalhadores-e-promove-o-turismo.html. Acesso em: 23 junho de 2018.
- Liu, C., Walling, D.E., Spreafico, M., Ramasamy, J., Thulstrup, H.D. & Mishra, A. 2017. *Sediment Problems and Strategies for their Management Experience from several large river basins*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 16 p.
- Livi, P. 1998. Elementos do clima: o contraste dos tempos frios e quentes. In: Menegat, R., Porto, M.L., Carraro, C.C., Fernandes, L.A.D, (Ed.) *Atlas Ambiental de Porto Alegre*, Porto Alegre, Ed. Universidade / UFRGS. p.73 – 78.
- Menegat, R. & Carraro, C.C. 2009. *Manual para saber por que o Guaíba é um lago*. Porto Alegre, Armazém Digital, 108 p.
- Möller, O.O., Castaing, P., Fernandes, E.H.L. & Lazure, P. 2007. Tidal frequency dynamics of a southern Brazil coastal lagoon: choking and short period forced oscillations. *Estuaries and Coasts*, 30(2): 311-320.
- Nicolodi, J.L. 2007. *O padrão de ondas no Lago Guaíba e sua influência nos processos de sedimentação*. Porto Alegre, 179p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Nicolodi, J.L., Toldo Junior, E. E. & Farina, L. 2010. Dinâmica e ressuspensão por ondas no lago Guaíba e suas implicações nos locais de captação de água para abastecimento humano. *Pesquisas em Geociências*, 37(1): 25-39.
- Nihei, Y. & Kimizu, A. 2008. A new monitoring system for river discharge with horizontal acoustic Doppler current profiler measurements and river flow simulation. *Water Resources Research*, 44: 1-15.
- Rovira, A. & Batalla, R.J. 2006. Temporal distribution of suspended sediment transport in a Mediterranean basin: The Lower Tordera (NE SPAIN). *Geomorphology*, 79: 58-71.
- Oeurng, C., Sauvage, S. & Sánchez-Pérez, J.M. 2010. Dynamics of suspended sediment transport and yield in a large agricultural catchment, southwest France. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(11): 1289-1301.
- Sala, M.R., Arquiola, J.P., Elvira, N.L., Alamy Filho, J.E., Pereira, C.E. & Costa, E.S. 2015. Aplicação da ferramenta EVALHID para calibração de parâmetros e simulação de vazões

- no alto curso do rio Araguari, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 20(1): 276-285.
- Scottá, F.C., Andrade, M.M., Silva Junior, V.O., Oliveira, N., Weschenfelder, J., Bortolin, E. & Nunes, J.C. Padrões geoacústicos do fundo e subfundo do rio Guaíba e suas relações como os processos sedimentares e hidrodinâmicos. *Revista Brasileira de Geofísica*. No prelo.
- SMAD. Sistema de Monitoramento e Alertas de Desastres. 2017. Cais Mauá C6. <http://www.smad.rs.gov.br/estacoes/informacaoDaEstacao.php?codigo=87450004>. Acesso em: 18 maio 2017.
- Sontek. 1997. *Using signal strength data to monitor suspended sediment concentration*. San Diego, SonTek Inc., 7p.
- Sontek. 2000. *SONTEK ADP Acoustic Doppler Profiler technical documentation*. San Diego, SonTek Inc., 186p.
- Toldo Jr., E.E.; Dillenburg, S.R.; Corrêa, I.C.S. & Almeida, L.E.S.B. 2000. Holocene Sedimentation in Lagoa dos Patos Lagoon, Rio Grande do Sul, Brazil. *Journal of Coastal Research*, 16(3):816-822.
- Toldo Junior, E. E. & Almeida, L. E. S. 2012. *Rio Guaíba*. Porto Alegre, Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica, 8 p.
- Vaz, A. C., Möller Junior, O. O. & Almeida, T. L. 2006. Análise quantitativa da descarga dos rios afluentes da Lagoa dos Patos. *Atlântica*, 28(1): 13-23.
- Zaleski, A.R. & Schettini, C.A.F. 2006. Procedimentos para calibração de perfiladores acústicos de corrente por Efeito Doppler para a determinação da concentração de material particulado em suspensão na água. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 11(3): 191-200.

***CAPÍTULO 4 – GEOACUSTIC PATTERNS OF THE GUAÍBA RIVER
BOTTOM AND SUBBOTTOM AND THEIR RELATIONSHIP WITH
SEDIMENTARY AND HYDRODYNAMIC PROCESSES***

30/09/2018

Gmail - Brazilian Journal of Geophysics - Manuscript ID GeoPhys-2018-0030



Fernando Scottá <fernandoscotta.sema@gmail.com>

Brazilian Journal of Geophysics - Manuscript ID GeoPhys-2018-0030

1 mensagem

Adriana Xavier <onbehalf@manuscriptcentral.com>

30 de setembro de 2018 01:48

Responder a: editor@sbgf.org.br

Para: fernandoscotta.sema@gmail.com

30-Sep-2018

Dear Mr. Scottá:

Your manuscript entitled "GEOACUSTIC PATTERNS OF THE GUAÍBA RIVER BOTTOM AND SUBBOTTOM AND THEIR RELATIONSHIP WITH SEDIMENTARY AND HYDRODYNAMIC PROCESSES / PADRÕES GEOACÚSTICOS DO FUNDO E SUBFUNDO DO RIO GUAÍBA E SUAS RELAÇÕES COM OS PROCESSOS SEDIMENTARES E HIDRODINÂMICOS" has been successfully submitted online and is presently being given full consideration for publication in the Brazilian Journal of Geophysics.

Your manuscript ID is GeoPhys-2018-0030.

Please mention the above manuscript ID in all future correspondence or when calling the office for questions. If there are any changes in your street address or e-mail address, please log in to ScholarOne Manuscripts at <https://mc04.manuscriptcentral.com/brajgeophys> and edit your user information as appropriate.

You can also view the status of your manuscript at any time by checking your Author Center after logging in to <https://mc04.manuscriptcentral.com/brajgeophys>.

Thank you for submitting your manuscript to the Brazilian Journal of Geophysics.

Sincerely,
Brazilian Journal of Geophysics Editorial Office

Periódicos

ISSN	Título	Área de Avaliação	Classificação
0102-261X	REVISTA BRASILEIRA DE GEOFÍSICA (IMPRESSO)	GEOCIÊNCIAS	B2

1 a 1 de 1 registro(s)

GEOACUSTIC PATTERNS OF THE GUAÍBA RIVER BOTTOM AND SUBBOTTOM AND THEIR RELATIONSHIP WITH SEDIMENTARY AND HYDRODYNAMIC PROCESSES

Abstract - This work aimed at studying the bottom and sub-bottom geoacoustics of the Guaíba River, whose echo patterns are related to hydrodynamic patterns and sedimentary processes. A total of 324 km of seismic transects were surveyed using the Stratabox high-frequency (10 kHz) profiler with concomitant imaging using a side-scan sonar in the northern and central areas of the Guaíba system. The records were interpreted with the aid of complementary data (bathymetry and bottom samples), and maps containing the spatial arrangement of echo-characters were developed. The echo-characters were classified into seven different types according to the presence of sediments controlled by the hydrodynamics of the system or modified by human action. In general, the echoes related to the deposition of fine sediments occurred in deeper areas, the navigation channel or surrounding areas. The echoes in the shallower areas presented strong acoustic reflectivity at sites with lower deposition of fine sediments and predominance of sandy sediments. The occurrence and morphology of asymmetric subaqueous dunes indicated a predominant north-to-south flow and a river behavior.

Keywords: shallow geophysics, sedimentology, hydrodynamics, geoprocessing.

Resumo - Este trabalho tem por objetivo o estudo geoacústico de fundo e subfundo do rio Guaíba, cujos padrões de ecos são relacionados aos padrões hidrodinâmicos e aos processos sedimentares atuantes. Foram levantados 324 km de perfis sísmicos em extensão, com o perfilador de alta frequência (10 kHz) Stratabox e concomitante imageamento com Sonar de Varredura Lateral nas áreas Norte e Central do Guaíba. Os registros foram interpretados com o auxílio de dados complementares (batimetria e amostras de fundo) e foram confeccionados mapas com a disposição espacial dos eco-caráteres. Os eco-caráteres foram classificados em sete diferentes tipos, de acordo com a presença de sedimentos controlados pela hidrodinâmica do sistema ou modificados pela ação humana. De uma forma geral, os ecos relacionados à deposição de sedimentos finos ocorrem nas áreas mais profundas, no canal de navegação ou adjacências. Os ecos nas áreas mais rasas apresentam forte refletividade acústica, em locais com menor deposição de sedimentos finos e predomínio de sedimentos arenosos. A ocorrência e morfologia de dunas subaquosas assimétricas indicam um fluxo preponderante no sentido Norte – Sul e um comportamento fluvial do sistema aquático.

Palavras-chave: geofísica rasa, sedimentologia, hidrodinâmica, geoprocessamento.

INTRODUCTION

Integrated management of the coastal zone and its various associated environments requires precise spatial datasets covering large areas, which are sometimes inaccessible by

direct sampling methods (Kotilainen & Kaskela, 2017). In the submerged environment of coastal areas, seismic data sampling is important and can help in the management of these environments since it allows the recognition of the type of bottom and subbottom, knowing sedimentary processes, and also infer in the environment hydrodynamics (Veronez Jr et al., 2009a; Veronez Jr et al., 2009b; Catanzaro et al., 2004).

The first studies using seismic data were carried out in marine environments (Damuth & Hayes, 1977; Damuth, 1975) and later were applied in shallow areas, facing a greater navigability restriction imposed to large vessels (e.g. Nitsche et al., 2004; Baptista Neto et al., 1996). The advancement of technology has contributed to a larger portability of geophysical equipment, allowing the development of studies in restricted areas that were previously inaccessible onboard large vessels (Souza, 2006). In these environments, geoacoustic sensors have been increasingly used since the late 1990s (Clarke et al., 1996).

In Brazil, several seismic studies have been conducted in areas of bays, lakes, rivers, and estuaries (Barros et al., 2017; Silva et al., 2014; Marino et al., 2013; Quaresma et al., 2011; Veronez Jr et al., 2009a; Veronez Jr et al., 2009b; Paolo & Mahiques, 2008; Hatushika et al., 2007; Catanzaro et al., 2004; Quaresma et al., 2000). These research works have identified and classified echo-characters and sonographic patterns, which can be defined according to their reflection patterns (seismic facies). Thus, the echo-character can be correlated with the size and texture of the bottom sediments (Veronez Jr et al., 2009).

In the state of Rio Grande do Sul (RS), southern Brazil, several studies carrying out seismic surveys have been conducted in Patos Lagoon (Bortolin et al., 2018; Bortolin, 2017; Santos-Fischer et al., 2016; Weschenfelder et al., 2014; Baitelli, 2012; Weschenfelder et al., 2010; Weschenfelder et al., 2006; Toldo Jr et al., 2000). These works mainly aimed at constructing an evolutionary model of Patos Lagoon (PL), a large water body with an area of 10,000 km². Seismic records revealed channels that deeply dissected the region before the formation of the current coastal plain (Weschenfelder et al., 2014; Baitelli, 2012; Weschenfelder et al., 2010). In another study, Weschenfelder et al. (2006) indicated the PL sectors that contain gas accumulation, which were areas with paleo-topographic lows associated with river channels and valleys that were developed in the RS coastal plain during the regressive/transgressive events from the Quaternary.

More recently, studies relating sonographic patterns to the bottom sediment were conducted in the RS coastal areas. Oliveira (2017) analyzed the southern portion of the RS continental shelf near the PL mouth and identified acoustic anomalies as a response to the presence of interstitial gas in the sediment. Bexiga (2016) also carried out a similar study in the PL southern sector, describing three echo patterns and the presence of gas in seismic profiles. Moreover, Silva Jr. (2017) analyzed some of the seismic data used here and preliminarily identified some echo-facies patterns from the northern portion of the Guaíba River.

Important RS water bodies lack geacoustic studies to identify the bottom and sub-bottom depositional architecture as well as sedimentary characteristics and processes. Thus, the objective of this work is to study the bottom and sub-bottom geacoustics of the Guaíba River, whose echo patterns are related to hydrodynamic patterns and sedimentary processes.

STUDY AREA

The Guaíba system is a water body of about 496 km² (Fig. 1) located next to the city of Porto Alegre, capital of RS. It is formed by the confluence of the Jacuí, Sinos, Caí, and Gravataí rivers, receiving the drainage of nine sub-basins that extend through the center and northeast of RS, covering an area of approximately 84,763 km². It supplies water to the cities of Porto Alegre, Guaíba, Barra do Ribeiro, and Viamão. In addition to the water supply, it has several uses such as fishing, leisure, and cargo and people transportation.

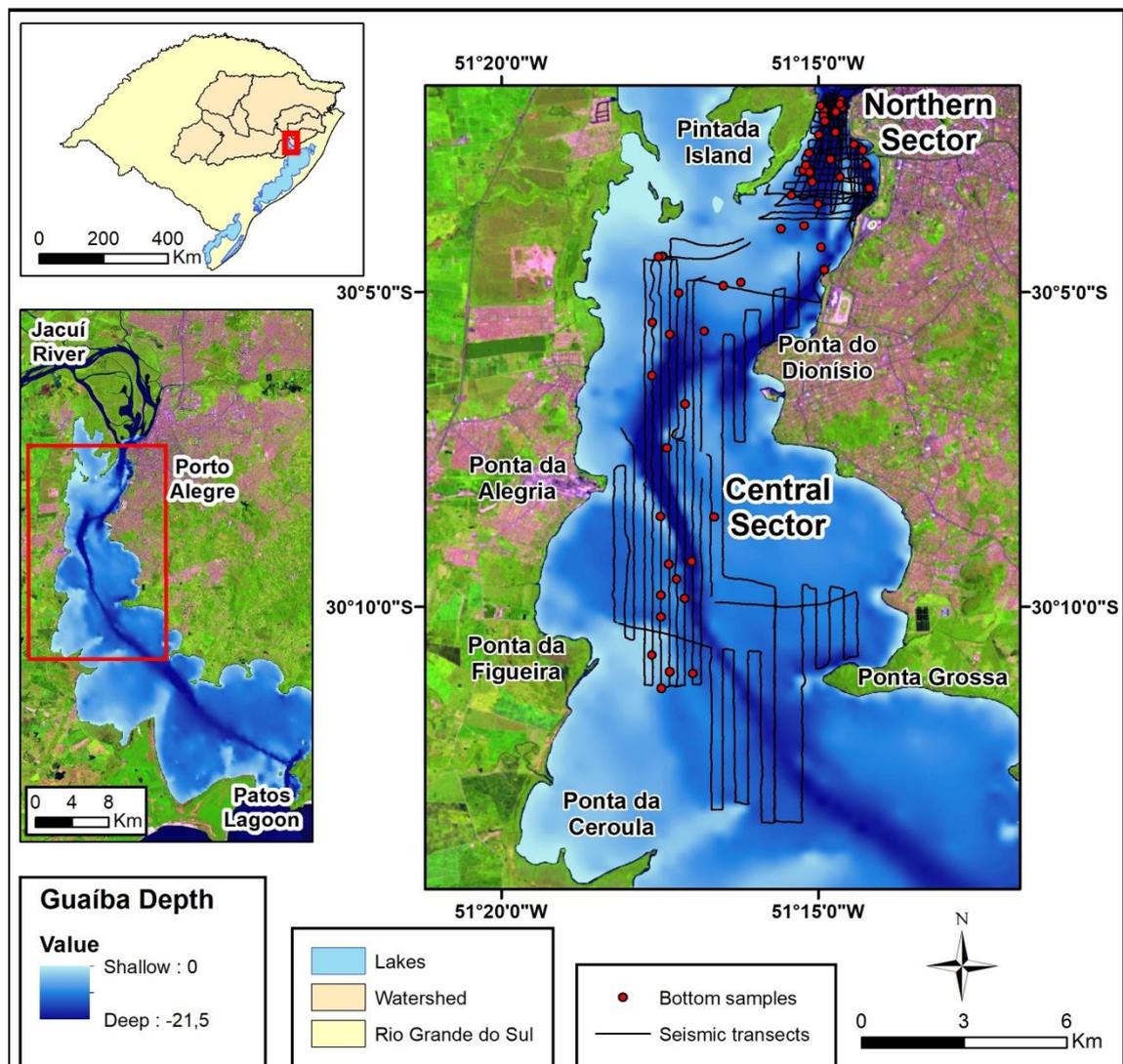


Figure 1. Location of the study area. Seismic lines and collected bottom samples. The Northern Sector corresponds to the upstream end of the Guaíba River; the Central Sector represents the area from the south of Pintada Island until near Ponta da Ceroula. Landsat 8 image, OLI sensor, 6R5G4B composition.

In terms of bathymetry, the Guaíba River presents an average depth of 2 m (NICOLODI, 2007), but with recorded values over 30 m near the city of Itapuã (CNH, 2017). However, its important morphological characteristic is the presence of a navigation channel that mainly varies between 4 and 8 m deep (DNAEE, 1983), reaching 14 m deep at some sites.

The definition of Guaíba Lake or River is the subject of frequent debates in the most diverse sectors of our society. The Guaíba system is officially defined as a river by the Brazilian Navy (CNH, 2017) and as a lake by the city hall of Porto Alegre (DMAE, 2018). Academic divergences are also frequent. Menegat & Carraro (2009) define the Guaíba system as a lake and state that its flow only occurs superficially, a common feature of lakes. Toldo Jr. & Almeida (2009) recognize the Guaíba system as a river due to the presence of a main channel that presents strong water flows, a feature that would not be observed in lakes.

Despite the strong anthropic pressure exerted on this water body, one factor to be highlighted is the lack of available data and published studies, which itself makes it difficult to classify it as a river or lake. Information on its bottom is found on the textural maps available in CECO (1999), which were developed using field sampling and allowed the analysis of this environment general behavior. Seismic studies using an acquisition grid with significant data and information on the bottom and subbottom have not been found.

MATERIAL AND METHODS

Sampling and data collection in the field

A total of 324 km of data transects (Fig. 1) were acquired with a 10-kHz Stratabox seismic profiler and concomitant bottom imaging using a 455-kHz Humminbird 798ci SI Side-Scan Sonar (SSS), both coupled to a Differential Global Positioning System (DGPS). For logistic reasons, this study focused on the northern (NS) and central (CS) sectors of the Guaíba River. Ten campaigns were carried out in the following periods and locations: January 2016 in the NS (3 days); June 2016 in the NS and CS (5 days); February 2017 in the CS (2 days).

Seismic data were sampled by navigating at speeds between 3 and 4 knots, allowing the generation of an adequate aspect ratio for the images (Paolo & Mahiques, 2008). In order to aid the interpretation of seismic profiles, 42 bottom samples were preferentially collected on the acquired seismic transects (Fig. 1). A type of Van Veen bottom sampler was used, which does not allow the loss of fine sediments when it is being hoisted to the vessel (Carvalho et al., 2000).

Data from seismic profilers sampled in previous years were also used to support the interpretation of the geoacoustic grid in some specific regions. The data corresponded to the following dates and equipment operating frequencies:

- Data acquired in 2006 at a 3.5-kHz frequency in the navigation channel area (deeper areas);

- Data acquired in 2012 and 2014 with the same seismic profiler used in the mapping from this study (10-kHz Stratabox).

Data analysis

The main steps of this study were: granulometric analysis of bottom samples; interpretation and classification of seismic profiles; integration of data to produce maps with geoprocessing techniques; and finally, hydrodynamic and sedimentological interpretation.

The bottom samples were dry sieved at 0.5-phi intervals. The silt and clay fraction was separated from the rest with a 4-phi sieve. The bottom samples served as field truth for further interpretation of seismic transects.

The seismic profiler data were interpreted and classified using the SonarWIZ, Reflexw, and Stratabox computer programs. The SSS data were used to support the interpretation of the seismic records acquired by the sub-bottom profiler. Different echo-characters were classified according to the sediment acoustic response, microtopography and morphology of the bottom and subbottom as proposed by Damuth (1980). The bathymetry data from Nicolodi (2007) was also used as a basis for the interpretation of echograms.

Seismic data were arranged into vector (line) data in geoprocessing applications. From there, maps with the classifications of echo-characters were made. Finally, the sedimentation and hydrodynamics of the Guaíba system were interpreted.

Classification of submerged features

The classification of large-scale features according to Ashley (1990) was used, which names and standardizes the bottom undulations as subaqueous dunes and categorizes them into sizes based on their spacing (S) and height (H): very large dunes: $S > 100$ m, and $H > 5$ m; large dunes: $10 \leq S \leq 100$ m, and $0.75 \leq H \leq 5$ m; medium dunes: $5 \leq S < 10$ m, and $0.4 \leq H < 0.75$ m; small dunes: $0.6 \leq S < 5$ m, and $0.075 \leq H < 0.4$ m.

In addition to size and shape, Ashley (1990) also established a hierarchy with three orders of description on the main morphological characteristics of submerged dunes: first order: wavelength, height, and two (2D) or three (3D) dimensions; second order: size and orientation of overlapping features, and sediment characteristics (type and grain size); third order: facies angle and profile symmetry, area of bed coverage, and temporal evolution.

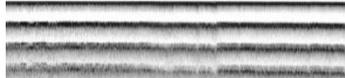
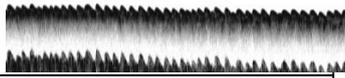
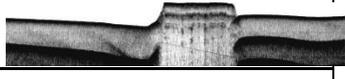
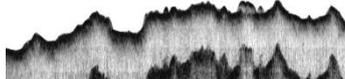
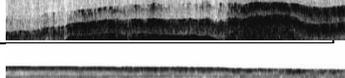
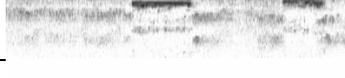
RESULTS AND DISCUSSION

Echo-character types

The echo-characters were classified based on the acoustic backscatter and bottom microtopography (Catanzaro et al., 2004), and were divided into seven different echo types named EC-1 to EC-7 (Tab. 1). The Northern (NS) and Central (CS) sectors of the Guaíba River,

represented by Figures 2 and 3, respectively, were presented separately to facilitate the results visualization.

Table 1. Types of classified echo-characters in the Guaíba River.

Echo	Description	Sediment	Ocurrence	Profile
EC-1	Highly reflective surface, low penetration. Without bed forms.	Sand	Predominant in the CS.	
EC-2	Highly reflective surface, low penetration. With bed forms.	Sand	Upstream end of the Guaíba River and channel areas.	
EC-3	Highly reflective surface, low penetration. Abrupt relief variations.	Sand	Areas at the eastern margin. Only North Sector.	
EC-4	Basement highs or outcrops.	-	Upstream end of the Guaíba River and near rocky basement areas.	
EC-5	High penetration. Presence of several reflectors and one strong sub-bottom reflector.	Mud	Guaíba entrance. Only North Sector.	
EC-6	High penetration. Presence of sub-bottom reflectors.	Mud	Varied only in CS.	
EC-7	High penetration. Presence of regular sub-bottom reflector.	Sand	Sandy areas in Ponta da Figueira.	

The main characteristic of **echo 1** is that it has a low sub-bottom penetration and a predominantly flat terrain without any bottom features. This echo is mainly related to sandy sediments and is highly frequent in the Guaíba system (Figs. 2 and 3).

Echo 2 has bottom features, strong reflectivity, and low sub-bottom penetration. Its occurrence is concentrated at the upstream end of the Guaíba River and more sporadically in areas near the main channel (Figs. 2 and 3). The behavior of these two types of echo-characters – with strong reflection and low penetration – is similar to other studies in different areas of Brazil (Silva et al., 2014; Baptista Neto et al., 2011; Veronez Jr et al., 2009a; Paolo & Mahiques, 2008; Catanzaro et al., 2004).

Echo 3 presents abrupt and sporadic relief variations. It is similar to echo 1 regarding its strong reflection, but they differ with respect to the abrupt relief variation of echo 3. This type of echo is concentrated in the eastern areas from the NS, close to the Dilúvio Stream and the Beira Rio Stadium (Fig. 2).

Echo 4 is formed by discontinuous and chaotic reflectors and occupies widely varied elevations above the bottom, ranging from 6 to 14 m deep. This echo has high reflectivity and

no penetration in most profiles. Sometimes its sound signal penetrates in the first reflector, evidencing a highly reflective and irregular sub-bottom surface. This echo is concentrated in the NS (Fig. 2) and CS at the upstream end of the Guaíba River and in the areas near Ponta do Dionísio and Ponta Grossa (Fig. 3), respectively. Echoes 3 and 4 are related to the presence of irregular bathymetry areas on the Guaíba river bottom.

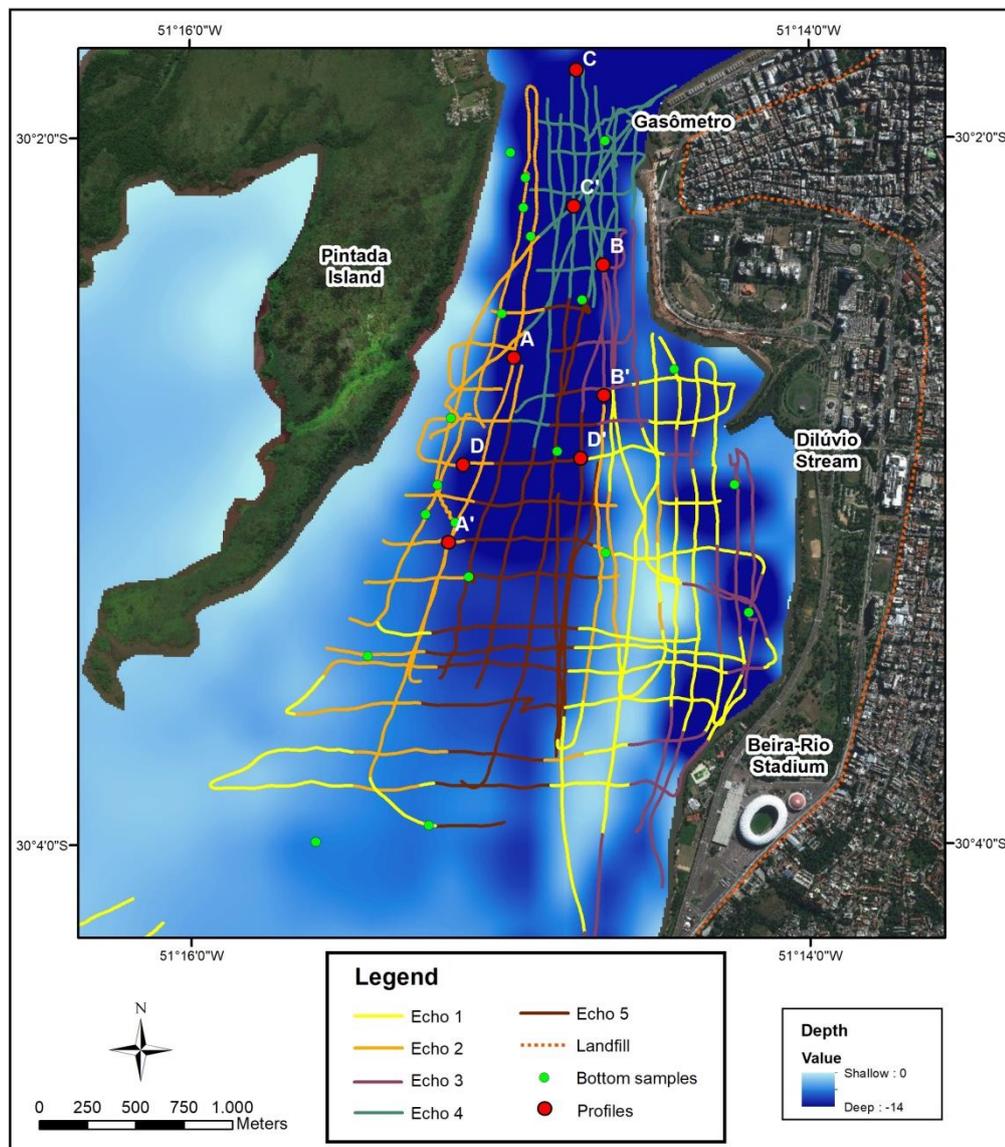


Figure 2. Classification of echo-characters from the NS of the Guaíba River. The landfill areas were manually delimited based on the map by Hasenack et al. (2008).

Echo 5 presents sub-bottom reflectors located in the NS at the upstream end of the Guaíba River (Fig. 2). The bottom morphology is dominantly flat on this echo and sometimes presents irregular bottom shapes in the form of single ripples that may have migrated from nearby subaqueous dune areas (echo 2). This echo has several sub-bottom reflectors and presents a well-defined, flat, and high-amplitude one. While the other sub-bottom reflectors do

not continuously appear in any area, this strong reflector was recorded over the entire extent of the echo-5 occurrence.

Echo 6 indicates a flat-bottom relief in most profiles and one or more sub-bottom reflectors located in several portions from the CS predominantly in the channel or deeper areas (Fig. 3). This echo was classified into three subtypes according to the sub-bottom reflector response (subtypes shown in Figure 11 and detailed later in the discussion). Echoes 5 and 6 have a better penetration of the acoustic signal and resolution of the sub-bottom reflectors. **Echo 7** has a flat and regular reflector on the subbottom. This type is located near Ponta da Figueira, in the western Guaíba River area.

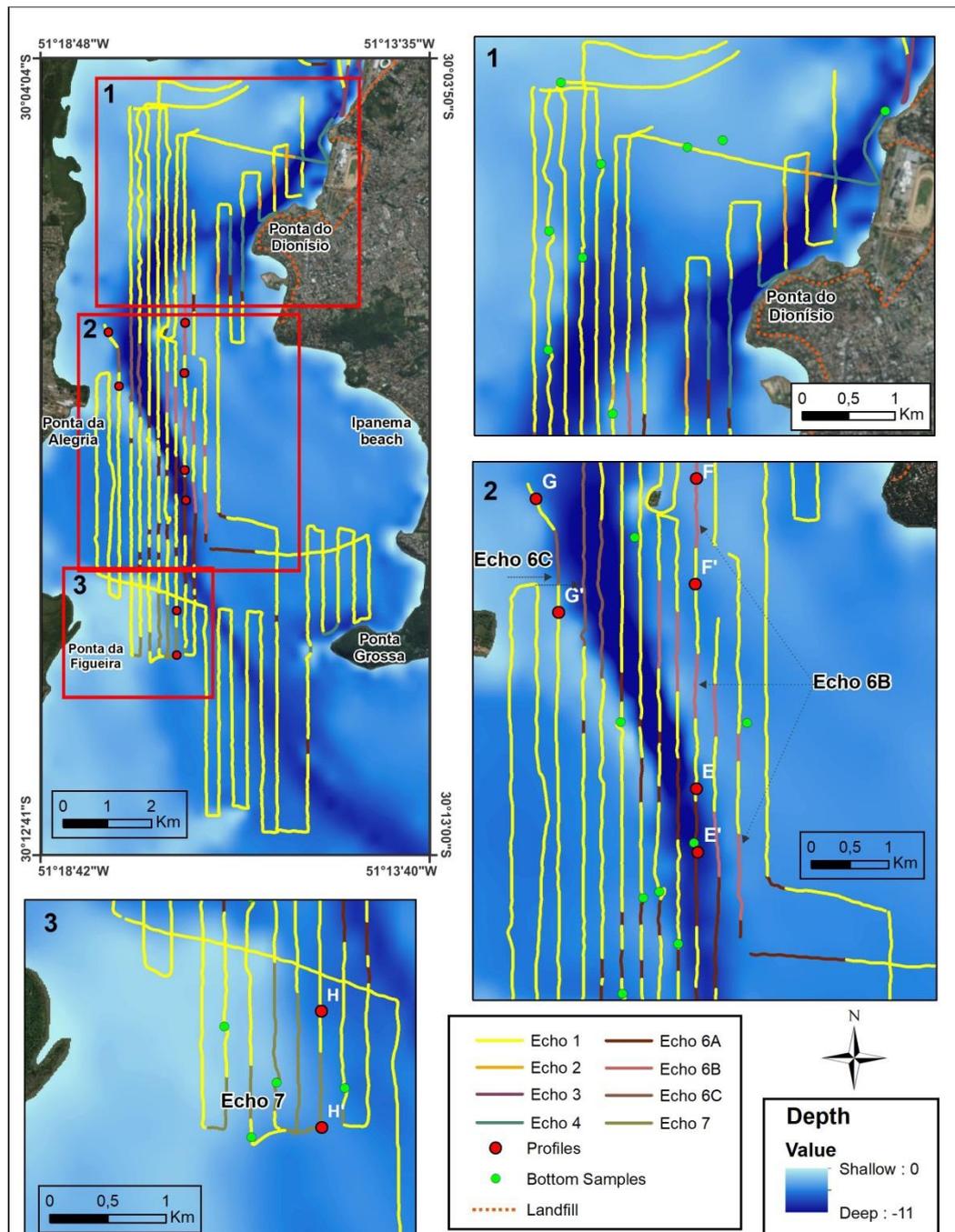


Figure 3. Classification of the echo-characters from the CS of the Guaíba River. The landfill areas were manually delimited based on the map by Hasenack et al. (2008).

Previous studies have highlighted that SSS images do not allow the separation of echo-characters with the same degree of detail as a seismic profiler (Veronez Jr et al., 2009a; Paolo & Mahiques, 2008). Many features were not adequately recorded by the SSS and were indirectly interpreted by the variation of the water column (in the center of the image) in the sonographic records, similar to what was commented by Paolo and Mahiques (2008). One of the factors that made it difficult to acquire and interpret the SSS data was the shallow depths of the Guaíba system, which have an average of 2 m deep. In the shallower regions, SSS images had only a few meters of imaging extension (< 10 m long).

Hydrodynamic and sedimentological interpretations based on seismic analyses

Echo 2 and the mapping of subaqueous dunes

In the NS, the presence of subaqueous dunes (Echo 2) was recorded in the western portion of the studied area, parallel to Pintada Island, as well as in the shallower portions to the east of the navigation channel (Fig. 2). These dunes were asymmetrical, indicating a predominant flow in the north-to-south direction. The area to the east of the navigation channel presented small and medium dunes predominantly with medium sand grains. This variation occurred due to the shallow depths from this site, ranging from 1 to 4 m.

In the areas with subaqueous dunes in the western portion, a large north-to-south variation in the size of features was verified (Fig. 4), with very large dunes in the north end that gradually varied to medium and small dunes in the southern border of the study area. Variations in wavelength were also observed as a function of depth. Smaller dunes were concentrated in shallower regions, closer to the western margin, and larger dunes were found at greater depths farther from the shore. The presence of dunes and their size gradient was also confirmed in the profiles from 2006, 2012, and 2014.

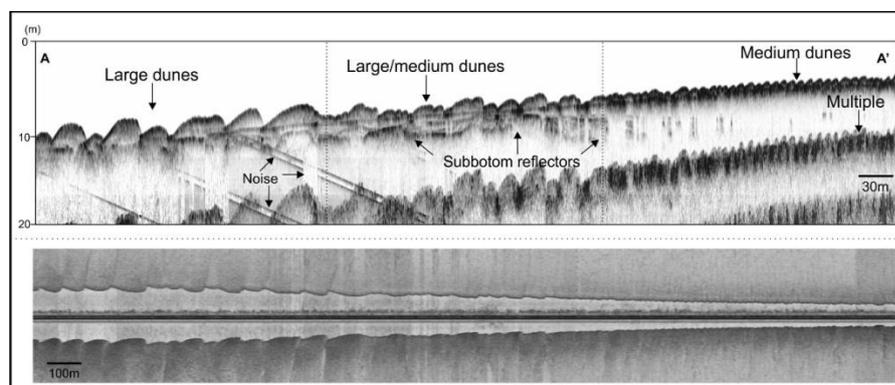


Figure 4. Subaqueous dunes profile in the NS from the Guaíba system. Modified from Silva Jr (2017).

The bottom samples showed more than 90% of sand in the areas with subaqueous dunes, as also observed in different environments in the literature (Fenster et al., 1990). However, the changes in the size of dunes were followed by a variation in the grain size of the sandy sediments that constituted them. The sediments with larger grain size – mainly the coarse sand fraction – and the medium to very fine sand fractions were concentrated in the north at the upstream end of the Guaíba River and in the southern portions, respectively.

In the CS, in the areas near the navigation channel close to Ponta do Dionísio, small and medium dunes were also mapped at 2.5 to 7 m deep (Fig. 3). In other regions to the south until Ponta da Ceroula and Ponta Grossa, no subaqueous dunes were found. The presence of subaqueous dunes in the channel area indicated higher flow velocities and gave evidence of a predominant north-to-south flow due to their asymmetry, which was constant along the seismic profiles.

The decrease in the size of ripples until their total absence showed that the flow competence decreased towards the south. The Guaíba River cross-section is initially about 0.8 km wide at Gasômetro and gets wider towards the south, reaching 4.3 km and 5.9 km wide in the sections at Ponta do Dionísio and Ponta Grossa, respectively (Fig. 3). This widening coincided with the loss of transport competence of thicker sediments observed with the seismic profiles and the bottom samples, which showed a decrease of the sand grain size deposited on the bottom. This behavior was previously reported by other authors (Nicolodi, 2007; Bacchi et al., 2000), who observed that the river flow from the tributaries loses competence as a transport agent when draining into the Guaíba River.

The conditions required for the formation of subaqueous dunes according to Ashley (1990) are: environments deeper than 1 m; grain size greater than very fine sand (> 0.15 mm); and velocity of currents greater than $0.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. The first and second conditions were met and confirmed by the use of the bathymetry and bottom samples, respectively. The higher velocities in the northern area were confirmed in the study by Andrade et al. (2017), who used a Doppler current acoustic profiler to measure currents at Ponta do Gasômetro in the northern sector of the Guaíba River (Fig. 5). In an example profile from September 15, 2015, the highest velocities, which were over $40 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ ($0.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$), occurred in the western area of the section, exactly where the dunes were located.

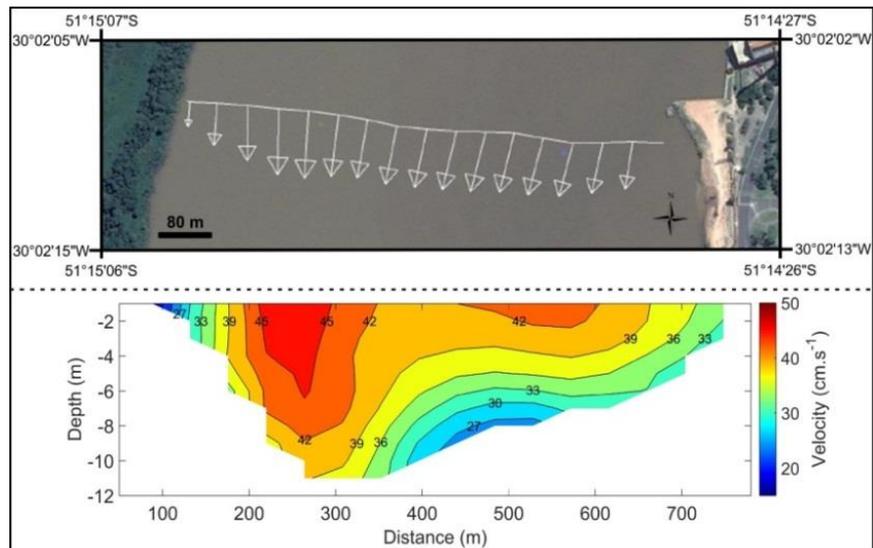


Figure 5. Cross-section at Gasômetro. (Top panel) Velocity vectors from the surface layer. (Bottom panel) Side view of the cross-section. Source: Andrade et al. (2017).

Subaqueous dunes were also mapped at the Guaíba river mouth in Itapuã (Fig. 6) using data measured by a 3.5-kHz seismic profiler in July 2006. These ripples were the size of medium dunes and presented asymmetry, indicating that the flow was predominantly from north to south. These bottom features are common in zones of intense current velocities and were previously described by Baitelli (2012). The longitudinal section of Itapuã is a few kilometers long – ranging from 3.6 to 5 km –, similarly to the section of Dionísio (Fig. 3), which is 4.3 km long. The narrowing of the section causes an increase in the current velocities in the flow channel area, producing the subaqueous ripples.

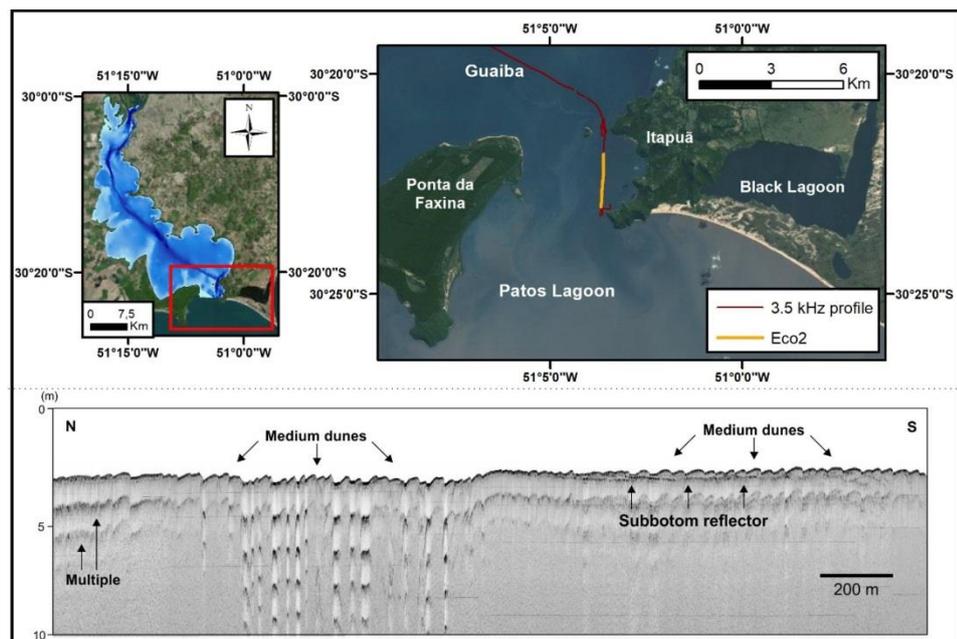


Figure 6. Location and seismic profile (3.5 kHz) of subaqueous dunes mapped at the Guaíba river mouth in Itapuã. The north and south orientations is indicated in the profile.

The present subaqueous ripples indicated that the flow reached the entire water column in these areas and did not only occur superficially as proposed by Menegat and Carraro (2009). This condition is also highlighted in Figure 5, where intense velocities were evident at depths greater than 10 m and near the channel bottom.

The asymmetry of the subaqueous dunes confirmed that the flow in the Guaíba River is preferentially from north to south (CNH, 2017; Nicolodi, 2007; DNAEE, 1983), corroborating that the Guaíba system has a predominant river behavior. According to Ashley (1990), the formation of subaqueous dunes only takes place in three environments: rivers, tide-dominated coastal environments, and shallow marine environments. Since it is not a marine environment and has no tidal effect, the Guaíba system falls into the classification of a river.

Echo 3

Echo 3 occurred throughout the eastern area of the NS at the margins of the city of Porto Alegre (Fig. 2). Irregularities and abrupt relief variations indicated dredging and dredged material disposal (Fig. 7). Baptista Neto et al. (2011) also defined a similar echo using data from a similar equipment (10-kHz Stratabox) in Rodrigo de Freitas Lagoon, city of Rio de Janeiro, Brazil, and they associated it to dredging in the area.

The occurrence of echo 3 was related to the occupation history of the city, which has undergone seven landfill processes in its margin (Bohrer, 2001). The first landfill took place in the 19th century in 1888 aiming at expanding and modernizing its port area (Branco Filho, 2005). This operation continued in the 20th century to implement the other six landfills, finished between 1917 and 1978. According to Branco Filho (2005), the Praia de Belas beach (next to Beira Rio stadium) landfills in the 1970s were made with sediments from the Guaíba River, which were removed by dredging and using large pipes. On the other hand, regarding the other previously made landfills, there is no record on the methodology used.

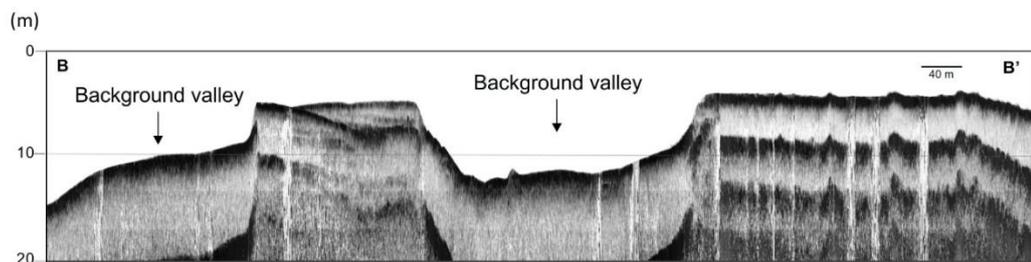


Figure 7. Echogram associated with echo 3. Presence of large troughs on the bed and dredging disposals between the troughs. Modified from Silva Jr (2017).

Changes in the bottom morphology and depths can be observed comparing the 1960s nautical chart from the Brazilian Navy with the actual bathymetric map of this study (Fig. 8). According to the nautical chart this region had depths ranging from 0.1 to 1.4 m prior to the

construction of the landfill, which are shallower than the current configuration of these areas with depth locally greater than 10 m.

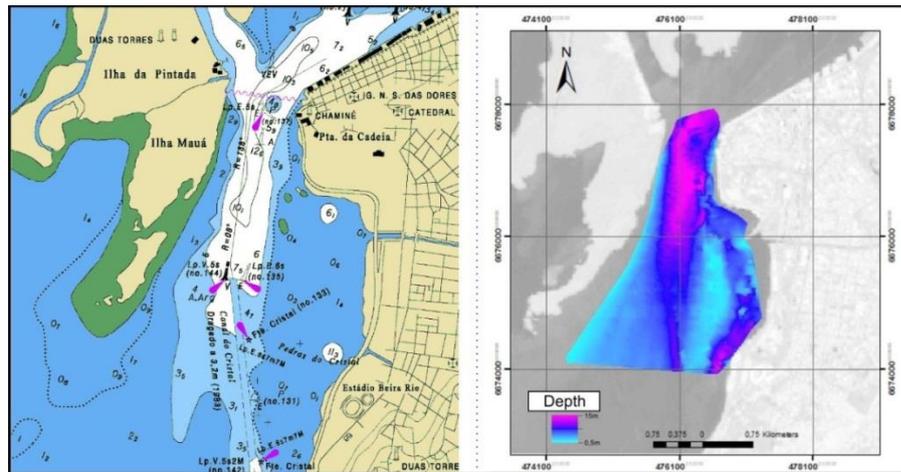


Figure 8. Comparison between the 1960s Brazilian Navy nautical chart (CNH, 2017) and the bathymetric map using the seismic profiler data from this work. Modified from Silva Jr (2017).

Echo 4

Echo 4 was characterized by discontinuous and chaotic reflectors and a highly irregular and reflective bottom (Fig. 9). This echo-character was located close to the margins of Ponta do Gasômetro (Fig. 2), Ponta do Dionísio, and Ponta Grossa (Fig. 3), which are areas that present granitic rocks (Hasenack et al., 2008). This echo characteristics are associated with rock outcrops, which are the extension of nearby basement. This echo-character has also been described with similar characteristics in other works, which have associated it with rock outcrops and rock blocks (Veronez Jr et al., 2009a; Catanzaro et al., 2004), showing a strong reflectivity due to the high intensity of its acoustic return signal (Veronez Jr et al., 2009a).

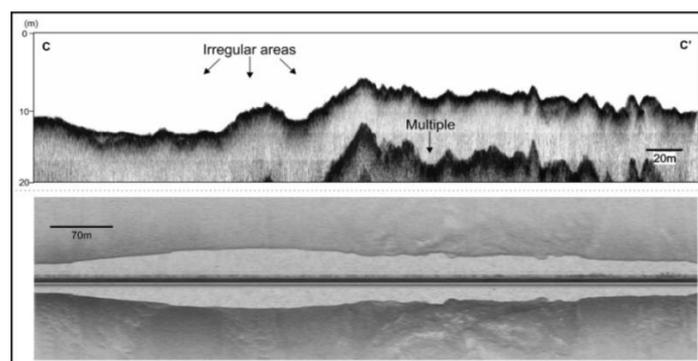


Figure 9. Profile showing the echo 4 areas. Modified from Silva Jr (2017).

On the other hand, the Ponta do Gasômetro area is a landfill area that served as foundation to build a prison, which was destroyed in the 1960s and left debris that are still present at the Guaíba margins. In this specific area, the disposal of these remains is also a possible explanation for the echo-facies pattern observed in this study.

Echos 5 and 6, and deposition of fine sediments

Echo-characters 5 and 6 showed more-pronounced sub-bottom reflectors and were related to the presence of fine sediments on the bottom and shallow subbottom. The bottom samples resulted in the predominance of fine sediments (65-99%) in these areas.

Echo 5 occurred in the NS of the Guaíba River aligned with the Dilúvio Stream mouth, which is where the Guaíba River practically doubles its cross-section width (Fig. 2). Veronez Júnior et al. (2009a) also reported a similar echo using 10-kHz seismic profiling data from Vitória Bay and associated it with the mud or muddy-sand bottom.

These echograms showed thick tabular layers formed by the deposition of fine sediments and presented concordant reflectors on the subbottom (Fig. 10). It is possible to visualize several sub-bottom reflectors, but there was one presenting a high amplitude (Fig. 10, Reflector R3) and a weaker deeper one (low amplitude), not being present throughout the profile.

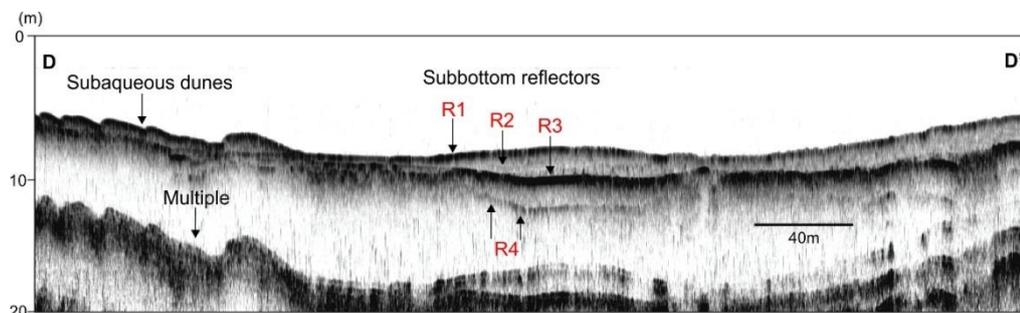


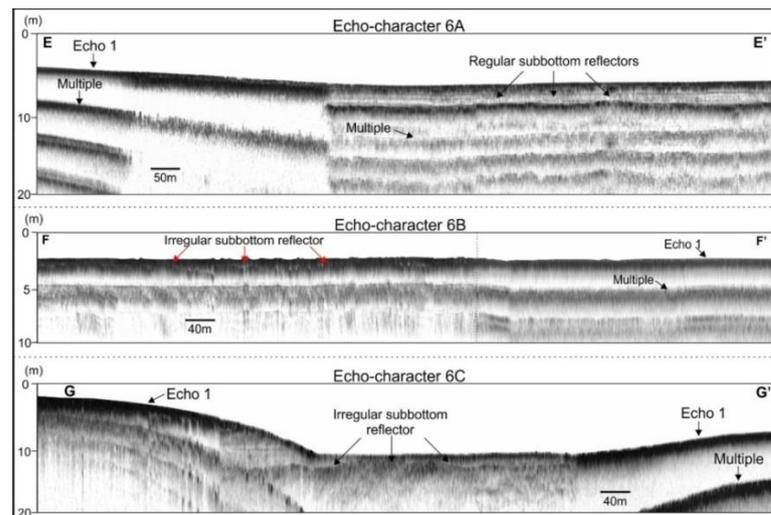
Figure 10. Profile showing echo-character 5 and sub-bottom strata. Modified from Silva Jr (2017).

The high-amplitude sub-bottom reflector (R3) was identified throughout the echo-5 occurrence area, which was a characteristic that defined this echo-character. At the sites adjacent to the channel margins, these echoes showed isolated sandy bars close to the formation of the echo-2 subaqueous dunes. These bars represented an intermediate phase between these sectors of high and low flow speed.

It is also noted that the echo 5 location was associated with the navigation channel and that it was found in its deeper portions, with depths varying from 5 to 14 m (Fig. 2). In probable conditions of low flows, the loss of competence favors the deposition of finer sediments. Nicolodi et al. (2010) defined three different sedimentary environments according to the potential for fine sediment resuspension in the Guaíba River: erosional, transitional, and depositional bottoms. The depositional bottom corresponds to areas with fine sediment deposition, characteristic of regions that are protected from the main resuspension forces and that have low hydrodynamic energy (Nicolodi et al., 2013). These areas showed great spatial similarity with the areas classified as echo 5 and confirmed the dominance of a fine sediment depositional area in the NS of the Guaíba River.

The coastal fluvial courses from the Guaíba watershed maintained their positions relatively fixed during the Quaternary period. The sub-bottom morphology that showed strong amplitude of the echo-5 reflector can be interpreted as the position of the paleo-channel bed of the former Jacuí river course, which dissected the entire length of the Guaíba River basin until it met PL (Weschenfelder et al., 2014; 2010). This paleochannel had the same position of the current navigation channel from the Guaíba River, thus being a morphological inheritance of the relief dissection during periods of lower base level, drowned by the high and transgressive sea from the end of Holocene (Santos-Fischer et al., 2018; 2016; Weschenfelder et al., 2016).

Echo 6 occurred in the CS in the channel and in other predominantly deeper areas, ranging from 2.5 to 11 m deep. The quantity and arrangement of reflectors was varied and did not present a uniform pattern. Thus, this echo was divided into 3 subtypes shown in Figure 11. Echo 6A showed a pattern of various sub-bottom strata, which were concordant in most profiles. Eventually, the presence of a high-amplitude sub-bottom reflector was exclusively recorded in the channel areas, also interpreted as the position of the Jacuí river paleo-channel bed (Fig. 11). This reflector resembled the characteristics of echo 5, which presented a high-amplitude sub-bottom reflector throughout its extension.



Figures 11. Echo-character 6 and its variations (6A, 6B, and 6C) in the CS of the Guaíba River.

Echo 6B was located in an area to the east of the channel in shallower depths, between 2.5 and 4.5 m deep (Fig. 3). This echo subtype presented an irregular sub-bottom reflector at approximately 1 m under the bottom reflector located to the east of the navigation channel. Echo 6C sporadically occurred in the channel area near Ponta da Alegria (Fig. 3) between 4.5 and 7.5 m deep. The characteristic that defined this echo was the bed irregularity in a sub-bottom reflector (Fig. 11) and the eventual presence of others. The echo-6 areas were associated with the muddy sediment present in the bottom.

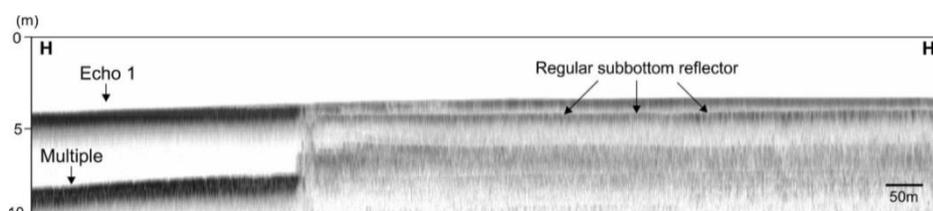
The deposition of fine sediments was recorded by the bottom samples in deeper areas, the navigation channel and surrounding areas. This result, in general, is in agreement with the

work by Bacchi et al. (2000), which reported the presence of fine sediments under the 3-m isobath. Despite that, some deeper regions close to the channel were classified as echo-1 areas. This echo can be observed in the CS in transects that covered the northern and southern areas (Fig. 3), which must have more-consolidated muds due to the echo-1 strong reflectivity.

Echo 7

Echo 7 showed a concordant flat sub-bottom reflector (Fig. 12) and was locally mapped at Ponta da Figueira (Fig. 3), a shallow area (1 to 3 m deep) with sandy bottom. The bottom samples presented over 64% of sand with a predominance of medium sand. The thickness between the bottom and sub-bottom reflectors ranged from 0.4 to 1.1 m.

This type of echo was not found in the shallowest areas of Ponta de Figueira – between 0.6 and 1 m deep –, but it occurred to the south and southwest of these regions. It also occurred parallel to the navigation channel at approximately 750 m from it. The echo-character 7 was associated with the reworking of submerged sandy sediments parallel to Ponta da Figueira. Its inclination was similar to the main orientation of the navigation channel in that area, which is towards the southwest.



Figures 12. Echogram representative of Echo 7. Presence of flat relief and concordant reflectors on the right. An echo-1 area is shown on the left.

Morphological, hydrodynamic, and evolutionary patterns of the Guaíba River

In general, the echoes associated with the deposition of fine sediments occurred in deeper areas, the navigation channel or surrounding areas. The echoes in the shallower areas presented strong acoustic reflectivity at the sites with lower deposition of fine sediments and predominance of sandy sediments. The deposition of fine sediments was confirmed in the deeper areas with bottom samples. This result, in general, is in agreement with the work by Bacchi et al. (2000), which reported the presence of fine sediments under the 3-m isobath.

The Guaíba river flow, predominant in the north-to-south direction, presented interaction with the bottom and modification of bed forms, indicating that the flow was towards the south. The occurrence of subaqueous dunes in the Guaíba upstream end and river mouth corresponded to higher current flows in these areas. This factor indicates different types of environments that are mainly influenced by the longitudinal section. Narrower sections lead to higher current velocities and a greater system competence regarding sediment transport. The central areas from the Guaíba River did not present subaqueous dunes, thus showing a lower

transport competence. Therefore, they had lower hydrodynamic energy when compared to the upstream end and river mouth areas from this system.

The predominant north-to-south direction of the flow with currents reaching the entire water column suggests that the Guaíba system has a slope in the channel, a requirement that defines a river channel. These factors allowed us to conclude that this system has a predominant river behavior: the Guaíba River.

The progressive decrease in the current speeds in the transition from the Northern and Central sectors caused the reduction of sediment transport competence. This decrease suggests that the sand transport only takes place in the form of bottom drag. According to Scottá et al. (submitted), the areas outside the navigation channel have velocities that are not sufficient for the sandy sediment erosion and transport under normal net river discharge conditions. Only flood conditions with high net river discharges are sufficient for the sandy sediment erosion to take place, which occur sporadically.

The high-amplitude sub-bottom reflectors of echoes 5 and 6A pointed to the position of the Jacuí river paleo-channel bed, preserved in the areas of the Guaíba river navigation channel. Echoes 6B, 6C, and 7 – recorded near the navigation channel and parallel to it – indicated possible locations of the Jacuí river flood plain.

CONCLUSION

The sampled data, which included high-resolution (10 kHz) seismic profiles, side-scan sonar imaging, and geological sampling, allowed to advance and update the knowledge of the microtopography and of the geological and hydrodynamic processes in the Guaíba River. The approach focusing on seismic methods gave the support to recognize and map – in a pioneer way – the areas of occurrence of subaqueous dunes and the seismic-depositional architectural elements of the Guaíba River.

It was possible to identify, analyze, and map the sedimentary distribution of the Guaíba river bottom and subbottom from geoacoustic data. Fine sediments were present in deeper areas along the navigation channel or adjacent areas, which are regions of fine sediment deposition when under lower hydrodynamic energy. The occurrence and morphology of asymmetric subaqueous dunes indicated a predominant north-to-south flow and a river behavior.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thanks the CNPQ and CAPES for the PhD scholarship. The authors would like to thank the other postgraduate students from PPGGEO who assisted in the conducted campaigns and the CECO/UFRGS for providing the infrastructure for data sampling and processing.

REFERENCES

- ANDRADE MM, SCOTTÁ FC, TOLDO JR EE, WESCHENFELDER J & NUNES, JC. Hidrodinâmica do Rio Guaíba: resultados preliminares. In: XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2017, Florianópolis. Anais, 2017.
- ASHLEY GM. 1990. Classification of large-scale subaqueous bedforms: a new look at an old problem. *J. sediment. petrol.*, 60 (1): 160-172.
- BACCHI FA, BARBOZA EG & TOLDO JUNIOR EE. 2000. Estudo da sedimentação do Guaíba. *Ecos*, 17: 32-35.
- BATELLI R. 2012. Evolução Paleogeográfica do Sistema de Paleodrenagem do Rio Jacuí na Planície Costeira do Rio Grande do Sul. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012. 149 pp.
- BAPTISTA NETO JA, SILVA MAM & FIGUEIREDO JR AG. 1996. Sísmica de alta frequência e o padrão de distribuição de sedimentos na Enseada de Jurujuba (Baía de Guanabara) - RJ/Brasil. *Rev. Bras. Geof.*, 14(1): 51-57.
- BAPTISTA NETO JA, SILVA CG, DIAS, GTM & FONSECA EM. 2011. Distribuição sedimentar da lagoa Rodrigo de Freitas através de sísmica de alta resolução. *Rev. Bras. Geof.*, 29(1): 187-195.
- BARROS MVS, ROLLNIC M & WATANABE FK. 2017. Caracterização das principais feições superficiais de fundo e em superfície no limite sudoeste da baía de Macapá, canal do Norte, rio Amazonas. *Trop. Oceanography*, 45(1): 1-25.
- BEXIGA GM. 2016. Estudo geoacústico para mapeamento de eco-caráter em registros sísmicos de alta resolução do interior da Lagoa dos Patos, RS, Brasil. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016. 63 pp.
- BLONDEL P. 2009. *The Handbook of Sidescan Sonar*. Springer, Berlin, 344 pp.
- BOHRER MD. 2001. O aterro Praia de Belas e o aterro do Flamengo. Dissertação de Mestrado, Programa de Pesquisa e Pós-Graduação em Arquitetura, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001. 237 pp.
- BORTOLIN EC. 2017. Paleovales quaternários na Lagoa dos Patos, Rio Grande do Sul, Brasil: preenchimento, evolução e influência na dinâmica lagunar. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017. 113 pp.
- BORTOLIN EC, WESCHENFELDER J & COOPER A. 2018. Holocene Evolution of Patos Lagoon, Brazil: The Role of Antecedent Topography. *J. Coast. Res.* Unpublished.

- BRANCO FILHO CC. 2005. A orla do Lago Guaíba no município de Porto Alegre-RS: análise ambiental urbana e proposta de revitalização. 2005. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Geografia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005. 174 pp.
- CARVALHO NO, FILIZOLA JÚNIOR NP, SANTOS PMC & LIMA JEFW. 2000. Guia de práticas sedimentométricas. ANEEL, Brasília, 154 pp.
- CATANZARO LF, NETO JAB, GUIMARÃES, MSD & SILVA CG. 2004. Distinctive sedimentary processes in Guanabara Bay – SE/Brazil based on the analysis of echo-character (7.0 kHz). *Rev. Bras. Geof.*, 22(1): 69-83.
- CECO. Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica. 1999. Projeto Sedimentação do Complexo Guaíba. Convênio CECO/UFRGS - DVP/DEMAE, Porto Alegre, 17 pp.
- CNH. Centro de Hidrografia da Marinha: de Itapuã a Porto Alegre. 2013. Available in: <https://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-cartas-raster/raster_disponiveis.html>. Accessed on: Jan. 09, 2017.
- CLARKE J, MAYER L & WELLS DE. 1996. Shallow-water imaging multibeam sonars: A new tool for investigating seafloor processes in the coastal zone and on the continental shelf. *Mar. geophys. res.*, 18: 607-629.
- DAMUTH JE. 1975. Echo character of the western equatorial Atlantic floor and its relationship to the dispersal and distribution of terrigenous sediments. *Mar. Geol.*, 18: 17-45.
- DAMUTH JE. 1980. Use of high-frequency (3.5-12 kHz) echograms in the study of near-bottom sedimentation processes in the deep-sea: a review. *Mar. Geol.*, 38: 51-75.
- DAMUTH JE & HAYES DE. 1977. Echo character of east brazilian continental margin and its relationship to sedimentary processes. *Marine Geology*, 24: 73-95.
- DMAE. Departamento Municipal de Água e Esgotos. Lago Guaíba. Available in: <http://www2.portoalegre.rs.gov.br/dmae/default.php?p_secao=197>. Accessed on: Fev. 13, 2018.
- DNAEE. Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica. 1983. Mecânica de Correntes do Guaíba: Relatório Síntese. Ministério das Minas e Energia, Porto Alegre 61 pp.
- FENSTER MS, FITZGERALD DM, BOHLEN WF, LEWIS RS & BALDWIN CT. 1990. Stability of Giant Sand Waves in Eastern Long Island Sound, U.S.A. *Mar. Geol.*, 91: 207-225.
- HASENACK, H. 2008. Diagnóstico ambiental de Porto Alegre: Geologia, Solos, Drenagem, Vegetação/Ocupação e Paisagem. Secretaria Municipal do Meio Ambiente, Porto Alegre, 2008. 84 pp.
- HATUSHIKA RS, SILVA CG & MELLO CL. 2007. Sismoestatigrafia de alta resolução no lago Juparanã, Linhares (ES –Brasil) como base para estudos sobre a sedimentação e tectônica quaternária. *Rev. Bras. Geof.*, 25(4): 433–442.

- KOTILAINEN AT & KASKELA AM. 2017. Comparison of airborne LiDAR and shipboard acoustic data in complex shallow water environments: Filling in the white ribbon zone. *Mar. Geol.*, 31:250-259.
- MARINO IK, SANTOS MAC & SILVA CG. 2013. Processing of high-resolution, shallow seismic profiles, Guanabara bay – Rio de Janeiro State, Brazil. *Rev. Bras. Geof.*, 31(4): 579-594.
- MENEGAT R & CARRARO CC. 2009. Manual para saber por que o Guaíba é um lago. Armazém Digital, Porto Alegre, 108 pp.
- MISSIAEN T, WARDELL N & DIX, J. 2005. Subsurface imaging and sediment characterization in shallow water environments. *Mar. geophys. res.*, 26: 83-85.
- NICOLODI JL. 2007. O padrão de ondas no Lago Guaíba e sua influência nos processos de sedimentação. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2007. 179 pp.
- NICOLODI JL, TOLDO JUNIOR EE & FARINA L. 2010. Dinâmica e ressuspensão por ondas no lago Guaíba e suas implicações nos locais de captação de água para abastecimento humano. *Pesqui. geocienc.*, 37(1): 25-39.
- NICOLODI JL, TOLDO JUNIOR EE & FARINA L. 2013. Dynamic and resuspension by waves and sedimentation pattern definition in low energy environments. Guaíba Lake (Brazil). *Braz. J. Oceanogr.*, 61: 55-64.
- NITSCHKE FO, BELL R, CARBOTTE SM, RYAN WBF & FLOOD R. 2004. Process-related classification of acoustic data from the Hudson River Estuary. *Mar. Geol.*, p.131-145.
- OLIVEIRA N. 2017. Caracterização de ocorrências de gás raso na plataforma continental interna do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017. 71 pp.
- PAOLO FS, MAHIQUES MM. 2008. Utilização de métodos acústicos em estudos de dinâmica costeira: exemplo na desembocadura lagunar de Cananéia. *Rev. Bras. Geof.*, 26(2): 211-225.
- QUARESMA V, BASTOS AC, LOUREIRO DV & PAIXÃO S. 2011. Utilização de métodos geofísicos para mapeamento de lama fluída no porto de Tubarão, Vitória (ES-Brasil). *Rev. Bras. Geof.*, 29(3): 487-496.
- QUARESMA V, DIAS GTM & BAPTISTA NETO JA. 2000. Caracterização da ocorrência de padrões de sonar de varredura lateral e sísmica de alta frequência (3,5 e 7,0 kHz) na porção sul da Baía de Guanabara – RJ. *Rev. Bras. Geof.*, 18(2): 201-214.
- SANTOS-FISCHER CB, CORRÊA ICS, WESCHENFELDER J, TORGAN LC & STONE JR. 2016. Paleoenvironmental insights into the Quaternary evolution of the southern Brazilian coast based on fossil and modern diatom assemblages. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 446:108-124.

- SANTOS-FISCHER CB, WESCHENFELDER J, CORRÊA ICS, STONE JR, DEHNHARDT BA & BORTOLIN EC. 2018. A Drowned Lagunar Channel in the Southern Brazilian Coast in Response to the 8.2-ka Event: Diatom and Seismic Stratigraphy. *Estuaries and Coasts*, 41: 1601-1625, 2018.
- SCOTTÁ FC, ANDRADE MM, WESCHENFELDER J, TOLDO JR EE & NUNES JC. Descarga líquida e sólida em suspensão do sistema Guaíba. *Pesqui. geocienc. No prelo.*
- SILVA AE, MENANDRO OS, NASCIMENTO KA, QUARESMA VS & BASTOS AC. 2014. Interpretation of sedimentary processes using echo-character distribution: case study of Piraquê-Açu and Piraquê-Mirim estuarine system, Aracruz – ES (BRAZIL). *Rev. Bras. Geof.*, 32(2): 301-309.
- SILVA JR VO. 2017. Identificação geoacústica de ecofácies de fundo e subfundo da porção norte do Lago Guaíba, RS. Trabalho de Conclusão de Curso em Geologia. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2017. 64 pp.
- SOUZA LAP. 2006. Revisão Crítica da Aplicabilidade dos Métodos Geofísicos na Investigação de áreas submersas rasas. Tese de Doutorado, Curso de Oceanografia Química e Geológica, Universidade de São Paulo, 2006. 311 pp.
- TOLDO JUNIOR EE & ALMEIDA LESB. 2009. Rio Guaíba. PROCEMPA, Porto Alegre, 7 pp.
- TOLDO JUNIOR EE, DILLENBURG SR, CORREA ICS & ALMEIDA LESB. 2000. Holocene sedimentation in Lagoa dos Patos Lagoon, Rio Grande do Sul, Brazil. *J. Coast. Res.*, 16(3): 816-822.
- VERONEZ JR P, BASTOS AC, QUARESMA VS, PIZZIN BF, GAVA RD & SILVA CG. 2009a. Sonar de varredura lateral e sísmica de alta resolução aplicados no estudo de ecofácies na baía de Vitória - ES. *Rev. Bras. Geof.*, 27(3): 411-425.
- VERONEZ JR P, BASTOS AC & QUARESMA VS. 2009b. Morfologia e distribuição sedimentar em um sistema estuarino tropical: Baía de Vitória, ES. *Rev. Bras. Geof.*, 27(4): 609-624.
- WESCHENFELDER J, BAITELLI R, CORRÊA ICS, BORTOLIN EC & SANTOS-FISCHER CB. 2014. Paleochannels related to late Quaternary sea-level changes in Southern Brazil. *J. South Am. earth sci.*, 55: 83-93.
- WESCHENFELDER J, CORRÊA ICS, ALIOTTA S & BAITELLI R. 2010. Paleochannels related to late Quaternary sea-level changes in Southern Brazil. *Braz. J. Oceanogr.*, 58: 35-44.
- WESCHENFELDER J, CORRÊA ICS, ALIOTTA S, PEREIRA CM & VASCONCELLOS VEB. 2006. Shallow gas accumulation in sediments of the Patos Lagoon, southern Brazil. *An. Acad. Bras. Ciênc.*, 78(3): 607-614.
- WESCHENFELDER J, KLEIN AHF, GREEN NA, ALIOTTA S, DE MAHIQUES MM, NETO AA, TERRA LC, CORRÊA ICS, CALLIARI LJ, MONTOYA I, GINSBERG SS & GRIEP GH. 2016. The control of palaeo-topography in the preservation of shallow gas accumulation: Examples from Brazil, Argentina and South Africa. *Estuar. Coast. Mar. Sci.*, 172:93-107.

CAPÍTULO 5 – SÍNTESE INTEGRADORA

5.1 - OBJETIVOS ALCANÇADOS

5.1.1 - Criação de um modelo empírico para estimar a CSS com o sensor OLI, satélite Landsat 8 – o Modelo B4-CSS-exp

O modelo B4-CSS-exp foi desenvolvido baseado em uma relação empírica da banda 4 (faixa espectral do vermelho, 0,636–0,673 μm) do sensor OLI a bordo do satélite Landsat 8. O modelo permitiu quantificar a variável CSS em diferentes datas e parametrizou as cenas, viabilizando a comparação da CSS entre os mapas e também com a descarga líquida dos rios tributários.

A aquisição de dados *in situ* no mesmo dia foi considerada fundamental para atingir o objetivo. A aquisição de dados com uma defasagem temporal maior adicionaria mais resíduos no modelo de regressão.

Uma dificuldade desta pesquisa foi adquirir dados com toda amplitude de CSS em diversas datas. As dificuldades de logística e navegação muitas vezes não permitiram uma ampla navegação pelo Guaíba, provocando a coleta de amostras próximas e com concentrações similares. Além disso, a própria condição do Guaíba em algumas cenas apontou para a homogeneidade de concentrações. A coleta em cenários de altas ($>50 \text{ mg.l}^{-1}$) e baixas ($<10 \text{ mg.l}^{-1}$) concentrações foi uma dificuldade registrada durante as campanhas realizadas.

Uma limitação do método foi a consideração de todos os constituintes opticamente ativos presentes na água como CSS. Não foram separados em laboratório as variáveis clorofila e matéria orgânica, que também influenciam na resposta espectral da água.

5.1.2 - Estudo de correntes, Qliq, CSS, Qss com um sensor PACD

Foi possível realizar um estudo abrangente sobre as variáveis Qliq, CSS e Qss no Guaíba. Embora o PACD tenha ampla utilização em levantamentos hidrográficos, o estudo é precursor no Guaíba, apresentando uma nova série de dados *in situ*. Os dados de Qliq medidos possuem valores muito próximos a soma dos dados de vazão dos rios Jacuí, Taquarí, Caí e Sinos, apresentando forte correlação com coeficiente igual a 0,93.

O estudo também mostrou a possibilidade de calibração do sensor PACD para estimar CSS e Qss no Guaíba. Esse estudo serviu de base para validar o

trabalho de Andrade Netto *et al.* (2012) para estimar a quantidade de volume de sedimentos que são transportados para a bacia hidrográfica do Guaíba.

As limitações de mono frequência e tamanho de partícula não foram avaliadas na estimação de CSS e Qss. Outra limitação foi a coleta de CSS similares para a calibração do sensor PACD para estimar CSS e Qss, como também previamente relatado para calibração do modelo B4-CSS-exp.

5.1.3 – Mapeamento Sísmico

O conjunto de dados coletados, englobando perfis sísmicos de alta resolução (10 kHz), imageamento por sonar de varredura lateral e amostragem geológica, permitiu avançar e atualizar o conhecimento da microtopografia e dos processos geológicos e hidrodinâmicos atuantes no Guaíba. A abordagem com enfoque nos métodos sísmicos permitiu reconhecer e mapear, de forma pioneira, as áreas de ocorrência de dunas subaquosas e os elementos arquiteturais sismo-deposicionais de fundo e subfundo do Guaíba.

A viabilidade da navegação pelas condições meteorológicas dificultou o tempo de aquisição da malha amostral. A constante presença de ondas inviabilizou a coleta dos dados sísmicos por vários dias durante essa pesquisa. Essa condição dificultou a expansão da coleta de dados no setor Sul do Guaíba.

5.2 - O SISTEMA GUAÍBA: RIO GUAÍBA

Uma contribuição significativa sobre a hidrodinâmica e sedimentologia do Guaíba foi desenvolvida com esta pesquisa. Os três conjuntos de dados gerados (mapas de CSS, perfis de correntes de PACD e dados sísmicos) se mostraram complementares e proporcionaram uma visão integrada desse sistema.

Os perfis de corrente medidos na entrada do Guaíba (Ponta do Gasômetro) possuem escoamento preferencial para sul orientado pelo canal de escoamento. Além disso, foi mostrado que as seções do interior do Guaíba (Ponta do Dionísio e Ponta Grossa) possuem comportamento semelhante. A forte correlação ($R=0.93$) entre a Qliq coletada e a soma de Qliq dos rios tributários (Jacuí, Taquari, Caí e Sinos) evidencia que o Guaíba apresenta continuidade das correntes. Portanto, esse sistema deve ser compreendido como um prolongamento de toda área de drenagem das bacias hidrográficas a montante.

As formas de fundo como ripples e dunas subaquosas assimétricas, presentes nos registros sísmicos confirmam o predomínio de corrente orientada para sul e indicam um comportamento fluvial do sistema aquático. As dunas foram mapeadas na entrada, exutório e em algumas áreas do canal de navegação, nas seções longitudinais com menor extensão. Essa presença sugere diferentes tipos de ambientes que são influenciados basicamente pela seção longitudinal.

Seções mais estreitas provocam as maiores velocidades das correntes e uma maior competência do sistema para o transporte de sedimentos. As áreas no interior do Guaíba possuem menor competência de transporte e são, sob o ponto de vista das correntes, ambientes com menor energia hidrodinâmica comparadas com as áreas de entrada e saída desse sistema. Esse comportamento também foi observado nos perfis de corrente de PACD.

A ação de ventos e geração de ondas também é uma forçante presente nesse sistema. O vento altera a hidrodinâmica desse sistema, gerando ondas com alturas de até 0,55 m presentes em áreas do canal e com menor altura nas margens mais rasas (NICOLODI, 2007). As ondas são responsáveis por ressuspender os sedimentos nas áreas mais rasas, até 1,9 m. Os mapas de CSS confirmam a modelagem proposta por Nicolodi (2007). As áreas mais rasas, principalmente na margem oeste e sudoeste do Guaíba, apresentaram maiores concentrações em algumas datas com os mapas de CSS. Essas áreas, sob o ponto de vista da influência das ondas, possuem alta energia hidrodinâmica e são classificados como ambientes erosionais por Nicolodi (2007).

A ação do vento também pode provocar a inversão de fluxo desse sistema. Duas situações de inversão foram registradas nos perfis de corrente na entrada do Guaíba e foram relacionadas com a ocorrência de ventos nos quadrantes S e SE. A ocorrência de inversão de fluxo é eventual, visto que os ventos nesses quadrantes são registrados numa frequência de 10% (NICOLODI, 2007). Além disso, a inversão deve ocorrer apenas em condições de baixas descargas líquidas, quando a forçante vento se torna superior ao movimento preferencial da corrente.

O Guaíba está sujeito às forçantes vento/onda e descarga líquida de forma coexistente. Dessa forma, o comportamento do sedimento é influenciado por esses dois fatores de forma simultânea ou apenas por uma forçante, a depender taxa de descarga líquida dos rios tributários, da intensidade do vento e geração de ondas. Além disso, a profundidade e o tamanho também influenciam o comportamento do sedimento.

Embora tenha forçantes distintas, a predominância do fluxo de Norte para Sul, com correntes atuando em toda a coluna d'água sugere que o Guaíba possui declividade no canal, condição para definir um canal fluvial. Esses fatores são condições que permitem concluir que esse sistema possui predomínio de comportamento de rio.

O principal ganho deste estudo está na aquisição de resultados que descrevem o comportamento da corrente do Guaíba, até então não detalhado. A influenciada das ondas nesse sistema, previamente modelada e detalhada por Nicolodi (2007), também foi corroborada com os padrões de ressuspensão apresentados nos mapas de CSS e com os padrões das ecofácies mapeados com os dados sísmicos.

A partir dos dados de correntes e do mapeamento sísmico, também foi possível realizar inferências sobre o transporte de sedimentos de fundo do Guaíba. A área da entrada do Guaíba, na seção do Gasômetro, apresenta velocidades de correntes suficientes para transporte e erosão dos sedimentos arenosos em condições normais, com valores de correntes médios acima de 0,4 m/s pela presença das dunas subaquosas.

Nas seções mais largas (seções da Pta do Dionísio e Pta Grossa), as correntes apresentam competência para transporte do sedimento arenoso como arrasto de fundo, com valores abaixo de 0,2 m/s em condições normais de descargas líquidas (Qliq média 1987-2017 - 1534 m³/s). Nestas duas seções, apenas condições de altas descargas líquidas são suficientes para provocar erosão e transporte do sedimento arenoso e ocorrem de forma esporádica.

Uma medição inédita de máxima Qliq (14.270 m³/s) com PACD foi realizada durante uma das maiores cheias nos últimos 77 anos, a qual ocorreu em 22 de outubro de 2016. O valor corresponde a terceira maior Qliq da série temporal dos rios tributários no período de 1940 – 2017. As condições de cheia pela soma dos tributários apresentam valores máximos entre 14.000-15.000 m³/s e pode ser interpretado como o máximo para esse sistema. No período 1940-2017, descargas líquidas acima de 12.000 m³/s foram registradas apenas dez vezes.

No perfil gerado na condição máxima (Capítulo 3, Figura 07), os valores de velocidade de corrente no canal superaram 2,5 m/s e 1,40 m/s nas seções da Ponta Grossa e Ponta do Dionísio, respectivamente. Esses valores são responsáveis por erodir e transportar sedimentos grossos, como cascalhos e seixos (HJULSTROM, 1935), mostrando grande competência no canal em situações de altos valores de

Qliq. Nas áreas periféricas das seções Ponta do Dionísio foram registrados valores acima de 0,40 m/s, condição que permite a erosão e transporte de sedimentos arenosos grossos.

A distribuição sedimentar do fundo e subfundo do Guaíba foi identificada em registros geoacústicos. De uma forma geral, os ecos relacionados à deposição de sedimentos finos ocorrem nas áreas mais profundas, no canal de navegação ou adjacências. Os ecos nas áreas mais rasas apresentam forte refletividade acústica, em locais com menor deposição de sedimentos finos e predomínio de sedimentos arenosos. Esses dados estão de acordo com outros estudos realizados no Guaíba (NICOLODI, 2007; BACCHI *et al.*, 2000). Esse sedimento é depositado em condições de baixas descargas líquidas e em condições de calmarias da geração de ondas pelo vento. Uma vez depositado na região do canal, com maiores profundidades, o sedimento fica abrigado das forças de ressuspensão das ondas.

Os refletores de subfundo de alta amplitude presentes dos ecos 5 e 6A (Capítulo 4, Figuras 4, 5, 12 e 13) sugerem a posição do leito do paleocanal do rio Jacuí, preservadas nas áreas do canal de navegação do Guaíba. Os ecos 6B, 6C e 7 (Capítulo 4, Figuras 4, 5, 13 e 14), registrados nas adjacências do canal de navegação, sugerem possíveis locais da planície de inundação do rio Jacuí, orientados de forma paralela ao canal de navegação.

5.3 - RECOMENDAÇÕES E POSSIBILIDADES DE TRABALHOS FUTUROS

5.3.1 - Avaliação e expansão do modelo B4-CSS-exp

Trabalhos futuros poderão estender o processamento do modelo B4-CSS-exp na série de dados Lansdat 8/OLI. Recomenda-se a realização de novos levantamentos para avaliação do modelo em outras datas. A comparação de uma cena processada pelo modelo com novas amostras *in situ* é recomendada para avaliar a qualidade da estimativa do modelo B4-CSS-exp.

Também se recomenda a utilização de mais amostras para entrada no modelo. A coleta de mais amostras, principalmente em cenários de altas (>50 mg.l⁻¹) e baixas (<10 mg.l⁻¹) concentrações, pode refinar o modelo e produzir melhor confiabilidade de estimativa da variável CSS.

A possibilidade de utilizar o modelo B4-CSS-exp nas séries de dados Landsat5/TM e Landsat7/ETM+ pode expandir a série de mapas de CSS no Guaíba. No entanto, essa expansão deve ser avaliada. As bandas espectrais da faixa do vermelho são próximas, mas não possuem o mesmo intervalo espectral (TM e ETM+ 0,63–0,69 μm / OLI 0,636–0,673 μm). Essa diferença pode alterar a qualidade do modelo e prejudicar a estimativa da CSS. A utilização de dados históricos *in situ* pode ser uma alternativa de avaliação da CSS nesses sensores.

5.3.2 - Mapeamento de dados sísmicos e a reconstrução paleogeográfica do Guaíba no Guaíba

A aquisição dos dados sísmicos no setor Sul do Guaíba é uma possibilidade de trabalhos futuros. Recomenda-se que a malha amostral seja planejada em áreas mais profundas que 1,2 metros, pois a identificação visual foi prejudicada nos perfis em áreas rasas.

Outra possibilidade de estudos é a reconstrução paleogeográfica do Guaíba. A coleta de testemunhos, com determinação do tipo do sedimento, datação e taxa de deposição é recomendada nas áreas onde foram mapeadas as ecofácies com identificação do subfundo (ecofácies 5, 6 e 7). Esse novo conjunto de dados poderá investigar com maior detalhamento a posição do leito do paleocanal do rio Jacuí.

5.3.3 - Fundeio de PACD e criações de séries temporais para estudos de corrente e descarga líquida

Fundeios de PACD são recomendados para a criação de uma série temporal das correntes e descarga líquida. Se indica a instalação de 3 pontos de fundeio, na entrada, meio, e saída do Guaíba. A descarga líquida e a influência do vento nas correntes poderiam ser mais detalhadas e melhor compreendidas com a geração de séries temporais desse sensor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, J. G. N.; CALLIARI, L. J. 2005. Paleocanais na plataforma continental interna do Rio Grande do Sul: evidências de uma drenagem fluvial pretérita. **Revista Brasileira de Geofísica (Impresso)**, 23(2): 123-132.

ANDRADE NETO, J. S.; RIGON, L. T.; TOLDO JUNIOR, E. E.; SCHETTINI, C. A. 2012. Descarga sólida em suspensão do sistema fluvial do Guaíba, RS, e sua variabilidade temporal. **Pesquisas em Geociências**, 39(2):161-171.

ÁVILA, R. A.; MÖLLER JR. O. O.; ANDRADE, M. M. 2014. Uso de um ADCP para estimar concentrações de material particulado em suspensão para o estuário da Lagoa dos Patos, Brasil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 19(2): 299-309.

BACHI, F. A.; BARBOZA, E. G.; TOLDO JUNIOR., E. E. 2000. Estudo da sedimentação do Guaíba. **Ecoss**, 17: 32-35.

BAITELLI, R. 2012. **Evolução Paleogeográfica do Sistema de Paleodrenagem do Rio Jacuí na Planície Costeira do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 149 p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BARROS, M. V, S.; ROLLNIC, M.; WATANABE, F. K. 2017. Caracterização das principais feições superficiais de fundo e em superfície no limite sudoeste da baía de Macapá, canal do Norte, rio Amazonas. **Tropical Oceanography**, 45(1): 1-25.

BLONDEL, P. 2009. **The Handbook of Sidescan Sonar**. Berlin, Springer, 344p.

BORTOLIN, E. C.; WESCHENFELDER, J.; COOPER, A. 2018. Holocene Evolution of Patos Lagoon, Brazil: The Role of Antecedent Topography. **Journal of Coastal Research**.

BORTOLIN, E. C. 2017. **Paleovales quaternários na Lagoa dos Patos, Rio Grande do Sul, Brasil: preenchimento, evolução e influência na dinâmica**

lagunar. Porto Alegre, 113 p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

BUCHMANN, F. S. C.; SEELIGER, M.; ZANELLA, L. R.; MADUREIRA, L. S. P.; TOMAZELLI, L. J.; CALLIARI, L. J. 2001. Análise batimétrica e sedimentológica no estudo do parcel do Carpinteiro, uma paleolinha de praia Pleistocênica na antepraia atual do Rio Grande do Sul, Brasil. **Pesquisas em Geociências**, 28(2): 109-115.

CATANZARO, L. F.; NETO, J. A. B.; GUIMARÃES, M. S. D; SILVA, C. G. 2004. Distinctive sedimentar processes in Guanabara Bay – SE/Brazil based on the analysis of echo-character (7.0 kHz). **Revista Brasileira de Geofísica**, 22(1): 69-83.

CLARKE, J.; MAYER, L. A.; WELLS, D. E. 1996. Shallow-water imaging multibeam sonars: A new tool for investigating seafloor processes in the coastal zone and on the continental shelf. **Marine Geophysical Researches**, 18: 607-629.

CHM. **Centro de Hidrografia da Marinha:** de Itapuã a Porto Alegre. 2013. Disponível em: <https://www.mar.mil.br/dhn/chm/box-cartas-raster/raster_disponiveis.html>. Acesso em: 09 jan. 2017.

CORREIO DO POVO. **Extração de areia do Guaíba é alternativa para falta do minério.** Porto Alegre, 27 nov. 2010. Disponível em: <<http://www.correiodopovo.com.br/Noticias/?Noticia=227942>>. Acesso em: 18 fev. 2015.

CORREIO DO POVO. **Após uma década, Fepam autorizará extração de areia do Guaíba.** Porto Alegre, 17 mar. 2015. Disponível em: <<http://www.correiodopovo.com.br/Noticias/551595/Apos-uma-decada,-Fepam-autorizara-extracao-de-areia-do-Guaiba>>. Acesso em: 21 abril. 2015.

DMAE. Departamento Municipal de Água e Esgotos de Porto Alegre. **Lago Guaíba.** Disponível em: <http://www2.portoalegre.rs.gov.br/dmae/default.php?p_secao=197>. Acesso em: 06 fev. 2018.

DMAE. Departamento Municipal de Água e Esgotos de Porto Alegre. **Locais de captação.** Disponível em: http://www2.portoalegre.rs.gov.br/dmae/default.php?reg=1&p_secao=171. Acesso em: 17 nov. 2017.

DNAEE. Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica. 1983. **Mecânica de Correntes do Guaíba:** Relatório Síntese. Porto Alegre, Ministério das Minas e Energia, 61p.

DONDA, F. GORDINI, E.; REBESCO, M.; PASCUCCI, V.; FONTOLAN, G.; LAZZARI, P.; MOSETTI, R. 2008. Shallow water sea-floor morphologies around Asinara Island (NW Sardinia, Italy). **Continental Shelf Research**, 28: 2550-2564.

DONOHUE, I.; MOLINOS, J. G. 2009. Impacts of increased sediment loads on the ecology of lakes. **Biological Reviews**, 84: 517-531.

HEININGER, P. HÖSS, S.; CLAUS, E.; PELZER, J.; TRAUNSPURGER, W. 2007. Nematode communities in contaminated river sediments. **Environmental Pollution**, 146: 64-76.

HJULSTROM, F. 1935. Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris. **Bulletin of the Geological Institute**, 25: 221–527.

GARTNER, J. W. 2004. Estimating suspended solids concentrations from backscatter intensity measured by acoustic Doppler current profiler in San Francisco Bay, California. **Marine Geology**, 211: 169-187.

GUAÍBA DADOS. GUAÍBA DADOS -
Desenvolvido no programa de pós-graduação em comunicação e informação da UFRGS. 2017. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/jordi/guaibadados/>. Acesso em: 17 nov. 2017.

HAN, L. 1997. Spectral reflectance with varying suspended sediment concentrations in clear and algae-laden waters. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, 63(6): 701-705.

HATUSHIKA, R. S.; SILVA, C. G.; MELLO, C. L. 2007. Sismoestatigrafia de alta resolução no lago Juparanã, Linhares (ES –Brasil) como base para estudos sobre a sedimentação e tectônica quaternária. **Revista Brasileira de Geofísica**, 25(4): 433–442.

HEININGER, P. HÖSS, S.; CLAUS, E.; PELZER, J.; TRAUNSPURGER, W. 2007. Nematode communities in contaminated river sediments. **Environmental Pollution**, 146: 64-76.

HEISE, S.; FORSTNER, U. 2007. Risk assessment of contaminated sediments in river basins—theoretical considerations and pragmatic approach. **Journal of Environmental Monitoring**, 9: 943-952.

JACKSON, D. R.; RICHARDSON, M. D. 2007. **High-Frequency Seafloor Acoustics**. New York, Springer, 617 p.

KAESER, A. J.; LITTS, T.; TRACY, T. W. 2012. Using low-cost side-scan sonar for benthic mapping throughout the lower Flint River, Georgia, USA. **River Research and Applications**, 29: 634-644.

KAESER, A. J.; LITTS, T. 2010. A novel technique for mapping habitat in navigable streams using low-cost Side Scan Sonar. **Fisheries**, 35(4): 163-174.

KOPAČKOVÁ, V.; HLADÍKOVÁ, L. 2014. Applying spectral unmixing to determine surface water parameters in a mining environment. **Remote Sensing**, 6:11204-11224.

KOTILAINEN, A. T.; KASKELA, A. M. 2017. Comparison of airborne LiDAR and shipboard acoustic data in complex shallow water environments: Filling in the white ribbon zone. **Marine Geology**, 31:250-259.

MARINO, I. K.; SANTOS, M. A. C; SILVA, C. G. 2013. Processing of high-resolution, shallow seismic profiles, Guanabara bay – Rio de Janeiro State, Brazil. **Revista Brasileira de Geofísica**, 31(4): 579-594.

MENEGAT, R.; CARRARO, C. C. 2009. **Manual para saber por que o Guaíba é um lago**. Porto Alegre, Armazém Digital, 108 p.

MISSIAEN, Tine. **Shallow Marine Acoustic Imaging In Environmental Investigations**. 2008. 174 f. Tese (Doutorado) - Curso de Faculdade de Ciências, Universidade de Ghent, Ghent, 2008.

MISSIAEN, T.; WARDELL, N.; DIX, J. 2005. Subsurface imaging and sediment characterization in shallow water environments. **Marine Geophysical Researches**, 26: 83-85

MELO, F. **Manual de Direito Ambiental**. São Paulo: Método, 2014.

MERTES, L. A. K.; SMITH, M. O.; ADAMS, J. B. 1993. Estimating suspended sediment concentrations in surface waters of the Amazon River wetlands from Landsat images. **Remote Sensing of Environment**, 43: 281-301.

MONTANHER, O. C.; BARBOSA, C. C. F.; NOVO, E. M. L. M. 2013. Integração de dados TM/Landsat e medidas in situ para estimativa de sedimentos em suspensão em rios amazônicos: um estudo de viabilidade. **Geografia (Rio Claro)**, 38(1): 175-188.

MONTANHER, O. C.; NOVO, E. M. L. M.; BARBOSA, C. C. F.; RENNÓ, C. D.; SILVA, T. F. S. 2014. Empirical models for estimating the suspended sediment concentration in Amazonian white water rivers using Landsat 5/TM. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, 29: 67-77.

NIHEI, Y.; KIMIZU, A. 2008. A new monitoring system for river discharge with horizontal acoustic Doppler current profiler measurements and river flow simulation. **Water Resources Research**, 44: 1-15.

NICOLODI, J.; TOLDO JUNIOR, E.; FARINA, L. 2013. Dynamic and resuspension by waves and sedimentation pattern definition in low energy environments. Guaíba Lake (Brazil). **Brazilian Journal of Oceanography**, 61: 55-64.

NICOLODI, J.; TOLDO JUNIOR, E.; FARINA, L. 2011. Wave dynamics and resuspension in Lake Guaíba (Brazil) with implications on points of water abstraction for human supply. **Journal of Coastal Research**, 64: 1550-1554.

NICOLODI, J. L.; TOLDO JUNIOR, E. E.; FARINA, L. 2010. Dinâmica e ressuspensão por ondas no lago Guaíba e suas implicações nos locais de captação de água para abastecimento humano. **Pesquisas em Geociências**, 37(1): 25-39.

NICOLODI, J. L. 2007. **O padrão de ondas no Lago Guaíba e sua influência nos processos de sedimentação**. Porto Alegre, 179p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

OLIVEIRA, N. 2017. **Caracterização de ocorrências de gás raso na plataforma continental interna do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 71 p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

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

PAPATHEODOROU, G.; AVRAMIDIS, P.; FAKIRIS, E.; CHRISTODOULOU, D.; KONTOPOULOS N. 2012. Bed diversity in the shallow water environment of Pappas lagoon in Greece. **International Journal of Sediment Research**, 27: 1-17.

PERRY, R. 1982. Scientific and Hydrographic use of the Bathymetric SWATH Survey System. In: OCEANS 82, 1., 1982, Washington. **Proceedings...Washington: IEEE**, p. 396 - 401.

PIERCE, A. R.; KING, S. 2008. Spatial dynamics of overbank sedimentation in floodplain systems. **Geomorphology**, v. 100, p.256-268, 2008.

PINTO, C. MENEZES, P. H. B. J.; MARTINEZ, J.; ROIG, H. L.; VILLAR, R. A. E. 2014. Uso de imagens MODIS no monitoramento do fluxo de sedimentos no reservatório de Três Marias. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 18(5): 507-516.

POPA. **Delegado da Marinha proíbe navegação em área do Rio Guaíba**. Disponível em: <http://popa.com.br/_2012/CRONICAS/DMAE-PISA/DELEGACIA/area-interditada-pela-delegacia/index.htm>. Acesso em: 19 fev. 2015.

QUARESMA, V.; BASTOS, A. C.; LOUREIRO, D. V. PAIXÃO, S. 2011. Utilização de métodos geofísicos para mapeamento de lama fluída no porto de Tubarão, Vitória (ES-Brasil). **Revista Brasileira de Geofísica**, 29(3): 487-496.

QUARESMA, V.; DIAS, G. T. M.; BAPTISTA NETO, J. A. 2000. Caracterização da ocorrência de padrões de sonar de varredura lateral e sísmica de alta frequência (3,5 e 7,0 kHz) na porção sul da Baía de Guanabara – RJ. **Revista Brasileira de Geofísica**, 18(2): 201-214.

RECKZIEGEL, E. W. 2018. **Áreas com risco de inundação do lago Guaíba e delta do Jacuí**. Porto Alegre, 113 p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

RITCHIE, J. C.; ZIMBA, P. V.; EVERITT, J. H. 2003. Remote sensing techniques to assess water quality. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, 69(6): 695-704.

ROBERT, E.; GRIPPA, M.; KERGOAT, L.; PINET, S.; GAL, L.; COCHONNEAU, G.; MARTINEZ, J. M. 2016. Monitoring water turbidity and surface suspended sediment concentration of the Bagre Reservoir (Burkina Faso) using MODIS and field

reflectance data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, 52: 243–251.

SALA, M. R.; ARQUIOLA, J. P.; ELVIRA, N. L.; ALAMY FILHO, J. E.; PEREIRA, C. E.; COSTA, E. S. 2015. Aplicação da ferramenta EVALHID para calibração de parâmetros e simulação de vazões no alto curso do rio Araguari, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 20(1): 276-285.

SANTOS-FISCHER, C. B.; CORRÊA, I. C. S.; WESCHENFELDER, J.; TORGAN, L. C.; STONE, J. R. 2016. Paleoenvironmental insights into the Quaternary evolution of the southern Brazilian coast based on fossil and modern diatom assemblages. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, 446:108-124.

SILVA, A. E.; MENANDRO, P. S.; NASCIMENTO, K. A.; QUARESMA, V. S.; BASTOS A. C. 2014. Interpretation of sedimentary processes using echo-character distribution: case study of Piraquê-Açu and Piraquê-Mirim estuarine system, Aracruz – ES (BRAZIL). **Revista Brasileira de Geofísica**, 32(2): 301-309.

SILVA, J. L. B. 2009. **Identificação do sistema de paleodrenagem na margem continental sul brasileira adjacente à Lagoa Mirim no terciário por sísmica de reflexão**. Porto Alegre, 239 p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

SMARJA. **Liberar mineração no Guaíba é solução para evitar crise de abastecimento de areia**. Disponível em: <<http://www.smarja.com.br/execs/materia.cgi?codigo=27>>. Acesso em: 18 fev. 2015.

SOUZA, L. A. P. 2006. **Revisão Crítica da Aplicabilidade dos Métodos Geofísicos na Investigação de áreas submersas rasas**. São Paulo, 311 p. Tese de Doutorado, Curso de Oceanografia Química e Geológica, Universidade de São Paulo.

SRIWONGSITANON, N.; SURAKIT, K.; THIANPOPIRUG, S. 2011. Influence of atmospheric correction and number of sampling points on the accuracy of water

clarity assessment using remote sensing application. **Journal of Hydrology**, 401: 203-220.

SUL21. **O Lago Guaíba legalmente é um Rio**. Porto Alegre, 01 agos. 2016. Disponível em: <https://www.sul21.com.br/jornal/o-lago-guaiba-legalmente-e-um-rio/> Acesso em: 13 nov. 2017.

SUL21. **Sobrecarga do rio Jacuí reacende debate sobre extração de areia no Guaíba**. Porto Alegre, 17 jan. 2013. Disponível em: <http://www.sul21.com.br/jornal/sobrecarga-do-rio-jacui-reacende-debate-sobre-extracao-de-areia-no-guaiba/>. Acesso em: 18 fev. 2015.

TYLER, A. N.; SVAB, E.; PRESTON, T.; PRÉSING, M.; KOVÁCS, W. A. 2006. Remote sensing of the water quality of shallow lakes: a mixture modelling approach to quantifying phytoplankton in water characterized by high-suspended sediment. **International Journal of Remote Sensing**, 27(8): 1521-1537.

TOLDO JUNIOR, E. E.; ALMEIDA, L. E. S. 2012. **Rio Guaíba**. Porto Alegre: Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica, 8 p.

TOLDO JUNIOR, E. E.; DILLENBURG, S. R.; CORREA, I. C. S.; ALMEIDA, L. E. S. B. 2000. Holocene sedimentation in Lagoa dos Patos Lagoon, Rio Grande do Sul, Brazil. **Journal of Coastal Research**, 16(3): 816-822.

TOLDO JUNIOR, E. E. 1994. **Sedimentação, Predição do Padrão de Ondas e Dinâmica Sedimentar da Antepraia e Zona de Surfe do Sistema Lagunar da Lagoa dos Patos, RS**. Porto Alegre, 178 p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

VAN OVERMEEREN, R.; CRAEYMEERSCH, J.; VAN DALFSEN, J.; FEY, F.; VAN HETEREN, S.; MEESTERS, E. 2009. Acoustic habitat and shellfish mapping and monitoring in shallow coastal water – Sidescan sonar experiences in The Netherlands. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, 85: 437-448.

VERONEZ JR., P.; BASTOS, A. C.; QUARESMA, V. S.; PIZZIN, B. F.; GAVA, R. D.; SILVA, C. G. 2009a. Sonar de varredura lateral e sísmica de alta resolução aplicados no estudo de ecofácies na baía de Vitória - ES. **Revista Brasileira de Geofísica (Impresso)**, 27(3): 411-425.

VERONEZ JR., P.; BASTOS, A. C.; QUARESMA, V. S. 2009b. Morfologia e distribuição sedimentar em um sistema estuarino tropical: Baía de Vitória, ES. **Revista Brasileira de Geofísica (Impresso)**, 27(4): 609-624.

WESCHENFELDER, J.; BAITELLI, R.; CORRÊA, I. C. S.; BORTOLIN, E. C.; SANTOS-FISCHER, C. B. 2014. Paleochannels related to late Quaternary sea-level changes in Southern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, 55: 83-93.

WESCHENFELDER, J.; CORRÊA, I. C. S.; ALIOTTA, S.; BAITELLI, R. 2010. Paleochannels related to late Quaternary sea-level changes in Southern Brazil. **Brazilian Journal of Oceanography (Impresso)**, 58: 35-44.

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

ZALESKI, A. R.; SCHETTINI, C. A. F. 2006. Procedimentos para calibração de perfiladores acústicos de corrente por Efeito Doppler para a determinação da concentração de material particulado em suspensão na água. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 11(3): 191-200.

ZERO HORA. **Obras causam acidentes e encalhes no Guaíba**. Porto Alegre, 09 mar. 2012. Disponível em: <<http://zh.clicrbs.com.br/rs/noticias/noticia/2012/03/obras-causam-acidentes-e-encalhes-no-guaiba-3689452.html>>. Acesso em: 18 fev. 2015.

ANEXO I
Título da Dissertação/Tese: “A HIDRODINÂMICA E SEDIMENTOLOGIA DO RIO GUAÍBA ANALISADOS POR SENSORES GEOACÚSTICOS E ORBITAIS”
Área de Concentração: Geologia Marinha
Autor: Fernando Comerlato Scottá
Orientador: Jair Weschenfelder
Examinador: Prof. Dr. Iran Carlos Stalliviere Corrêa
Data: 01 de novembro de 2018
Conceito: A (EXCELENTE)
PARECER:
A tese apresenta-se bem elaborada, com uma introdução que descreve a área estudada e suas características bem como os trabalhos anteriores desenvolvidos.
A Tese se apresenta na forma de artigos, sendo composta por três trabalhos, uma parte introdutória com objetivos e metodologia e uma parte final com uma síntese integradora.
Algumas correções e sugestões:
Página 20 – Figura 1 – Na figura menor aparece a denominação “Lago Guaíba”, sugere-se que seja alterado para “Rio Guaíba”, já que esse termo é defendido na tese.
Página 24 – Capítulo 1.4 – A metodologia deveria ser mais detalhada, mencionando os métodos aplicados e seus equipamentos.
Página 53 – Figura 5 – A abreviação “CSS” encontra-se errada, já que o artigo encontra-se escrito em inglês, deve ser “SSC”. Os gráficos que aparecem nos dois mapas não apresentam unidades.
Página 55 – Figura 7 – Todos os gráficos que encontram-se em cada mapa estão sem unidade de referência.
Página 56 – Figura 8 – Falta mencionar o Meridiano Central (51°) já que o mapa apresenta coordenadas UTM.
Página 57 – Figura 9 – Os dois mapas menores, apresentam coordenadas sem pontos de referência sobre os mapas.



Página 77 – Figura 7 – Os gráficos apresentados são referidos as localidades de Ponta do Gasômetro e Ponta Dionísio, em duas ocasiões. É representado ainda (último gráfico) um outro gráfico que não é informada a localidade do mesmo.

Página 79 – Figura 8 – Não é informada a localidade destes perfis.

Página 92 – Figura 1 – A escala de profundidade do Guaíba não tem unidade.

Página 97 – Figura 3 – A escala de profundidade do Guaíba não tem unidade

Os três trabalhos apresentado encontram-se bem elaborados com objetivos claros e resultados conclusivos.

A síntese integradora proporciona um apanhado dos resultados dos três artigos podendo-se ter uma conclusão geral da tese.

Os resultados obtidos pelo candidato, no desenvolver da tese, atingiu plenamente os objetivos proposto e obtendo resultados satisfatórios.

O candidato encontra-se APTO a obtenção do título pretendido.

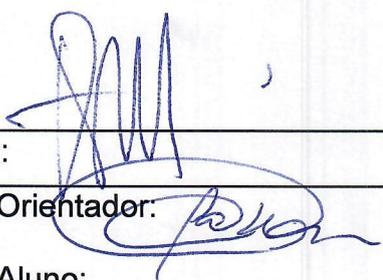
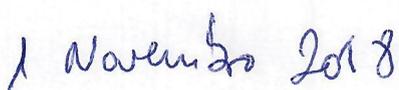
Assinatura:

Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno:

Data: 01/11/2018

ANEXO I	
Título da Dissertação/Tese:	
“A HIDRODINÂMICA E SEDIMENTOLOGIA DO RIO GUAÍBA ANALISADOS POR SENSORES GEOACÚSTICOS E ORBITAIS”	
Área de Concentração: Geologia Marinha	
Autor: Fernando Comerlato Scottá	
Orientador: Jair Weschenfelder	
Examinadora: Prof. Dra. Tatiana Silva da Silva	
Data: 01/11/2018	
Conceito: A	
PARECER:	
<p>A tese tem como foco temas de extrema relevância, não somente do ponto de vista do entendimento do sistema, mas dos possíveis desdobramentos em termos de planejamento e gestão, além de contribuir para as discussões sobre a classificação do Guaíba. O texto é muito claro, bem estruturado e escrito. A apresentação foi muito bem elaborada e esclarecedora. Os três artigos que compõem a tese foram adequadamente integrados na síntese final. Como pontos a serem melhorados, em caso de revisão dos artigos submetidos, sugere-se:</p> <p>(a) aperfeiçoar a discussão dos resultados, preferencialmente trazendo trabalhos semelhantes em outros locais para fins de comparação; (b) explorar melhor a relação estatística entre os dados de sedimentos em suspensão e os dados sensoramento remoto, incluindo, por exemplo, procedimentos de regressão múltipla, a transformação ortogonal de imagens e a aplicação de índices Automáticos; e (c) avaliar a resposta do sensor para áreas de baixa profundidade em casos onde a concentração de sedimentos em suspensão foi baixa.</p> <p>Como sugestão para artigos futuros, recomenda-se abordar como os resultados da tese podem vir a contribuir para o planejamento e gestão, não somente na definição de uma estratégia de monitoramento, mas como insumo para planos de ação.</p>	
Assinatura:	
Data: 01/11/2018	
Ciente do Orientador:	
Ciente do Aluno:	

ANEXO I	
Título da Dissertação/Tese:	
“A HIDRODINÂMICA E SEDIMENTOLOGIA DO RIO GUAÍBA ANALISADOS POR SENSORES GEOACÚSTICOS E ORBITAIS”	
Área de Concentração: Geologia Marinha	
Autor: Fernando Comerlato Scottá	
Orientador: Jair Weschenfelder	
Examinador: Prof. Dr. Felipe García Rodríguez	
Data: 01Nov2018	
Conceito: A (Excelente)	
PARECER:	
<p>A Tese de Fernando Scottá é um trabalho que integra processos sedimentológicos, sísmicos e hidrodinâmicos. O trabalho está claramente escrito e organizado em 3 artigos científicos submetidos a revistas especializadas. As hipóteses e objetivos colocados e demonstrados de forma satisfatória, com dados de campo, dados de imagens de satélite e levantamento sísmico. O trabalho tem uma excelente apresentação gráfica e um correto tratamento estatístico dos dados. A Tese tem um excelente nível para o grau acadêmico ao qual foi submetida. Desta forma, se outorga o conceito de A (Excelente).</p> <p>-----</p> <p> ,</p> <p></p>	
Assinatura:	Data:
Ciente do Orientador:	
Ciente do Aluno:	