

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Desenvolvimento Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos



Tese

**Estimativa da Descarga Líquida e da Concentração de Sedimentos em
Suspensão por meio de Perfiladores Acústicos de Corrente por Doppler no
Canal São Gonçalo - RS**

George Marino Soares Gonçalves

Pelotas, 2023

George Marino Soares Gonçalves

**Estimativa da Descarga Líquida e da Concentração de Sedimentos em
Suspensão por meio de Perfiladores Acústicos de Corrente por Doppler no
Canal São Gonçalo - RS**

Tese apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, do Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Recursos Hídricos.

Orientador: Gilberto Loguercio Collares

Pelotas, 2023

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

G635e Gonçalves, George Marino Soares

Estimativa da descarga líquida e da concentração de sedimentos em suspensão por meio de perfiladores acústicos de corrente por doppler no Canal São Gonçalo - RS / George Marino Soares Gonçalves ; Gilberto Loguercio Collares, orientador. — Pelotas, 2023.

108 f. : il.

Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2023.

1. Curva-chave. 2. Fluxos bidirecionais. 3. Velocidades indexadas. I. Collares, Gilberto Loguercio, orient. II. Título.

CDD : 627

George Marino Soares Gonçalves

**Estimativa da Descarga Líquida e da Concentração de Sedimentos em
Suspensão por meio de Perfiladores Acústicos de Corrente por Doppler no
Canal São Gonçalo - RS**

Tese aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Doutor em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 27 de fevereiro de 2023.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Gilberto Loguercio Collares (Orientador)

Doutor em Ciência do Solo pela Universidade Federal de Santa Maria

Prof. Dr. Leonardo Contreira Pereira – Engenharia Hídrica, CDTec

Doutor em Ciências Ambientais pela Universidade Pierre et Marie Curie (Paris VI)

Prof. Dr. Mauro Michelena Andrade – Oceanografia, UNIVALI

Doutor em Geociências pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Osmar Olinto Möller Junior – IO, FURG

Doutor em Oceanologia pela Université Bordeaux, Sciences et Technologies

Dedico este trabalho a minha noiva e futura esposa, aos meus pais, minhas irmãs e sobrinha, que ainda que geograficamente distantes, acreditaram, vibraram e rezaram por cada uma das linhas escritas neste trabalho.

Agradecimentos

À Deus, pela saúde, guia e paz durante a construção desta obra.

À minha noiva, Cristiane Zandonotto, pela resiliente paciência e compreensão da minha dedicação e ausência para com a conclusão desta obra.

Aos meus pais, pelas incansáveis orações de zelo pelo meu sucesso nesta e em outras tantas caminhadas que eu venha a percorrer. Obrigado.

Às minhas irmãs, pelo carinho e amor dedicados, pelos exemplos de pessoas que são para mim.

À minha sobrinha Helena, que segue a servir de motivação nas minhas caminhadas, e que um dia eu possa ser um exemplo para ela.

Ao meu muito estimado orientador Dr, Gilberto Loguercio Collares, pelo incansável suporte na minha caminhada profissional e acadêmica. És um exemplo que quero seguir.

À Agência de Desenvolvimento da Bacia da Lagoa Mirim – ALM, por incentivar, financiar e proporcionar, em conjunto, a idealização desta obra, reforçando sempre o seu compromisso para com o desenvolvimento regional.

Aos colegas Dr. Guilherme Kruger Bartels, Prof. Alexandre Felipe Busch, Prof^a. Angélica Cirolin e Téc. Reginaldo Galski Bonczynski, obrigado pelo companheirismo nessa jornada. Salve a equipe “Só Bucha!”.

Aos colegas do laboratório NEPE – HidroSedi, pela amizade, saídas de campo, e motivação durante esses quase 3 anos de doutoramento. Muito Obrigado.

À Universidade Federal de Pelotas – UFPel, por viabilizarem a execução deste trabalho, fornecendo suporte, infraestrutura e logísticas necessárias. Viva a UFPel.

Naturalmente o canal São Gonçalo, devido ao seu complexo regime de escoamento, oferece assunto para árduo e interessantíssimo trabalho de Hidrologia. O intuito de atender as necessidades citadas não nos limitará a prosseguir na análise mais profunda das atuais e futuras observações. Oportunamente apresentaremos informes complementares, atendendo o entusiasmo que êsse estudo sempre nos proporcionou.

*Informações Hidrológicas sôbre o Canal S. Gonçalo
(Preliminares)*

1968

*CLM SUB-SÉDE RIO GRANDE – SETOR DE HIDROLOGIA
UNPD / FAO / CLM
Projeto Regional da Lagoa Mirim
URUGUAI BRASIL
Seção de Hidrologia*

Resumo

GONÇALVES, GEORGE Marino Soares. **Estimativa da Descarga Líquida e da Concentração de Sedimentos em Suspensão por meio de Perfiladores Acústicos de Corrente por Doppler no Canal São Gonçalo - RS**. 2023. 108f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2023.

O Canal São Gonçalo (76 km de comprimento) é o responsável por interligar as águas da Lagoa Mirim a Lagoa dos Patos e, juntos formam o maior complexo lagunar da América Latina e o maior ambiente costeiro raso do mundo. Entretanto, este canal é desassistido de sistemas de monitoramento contínuo acerca de suas descargas líquidas e sólidas, muito disso devido ao fato que este canal apresenta características de fluxo complexo (fluxos inversos, estacionários e bidirecionais). Desta maneira, este trabalho objetivou desenvolver modelos capazes de oferecer dados contínuos, a partir de estimativas, de vazão d'água e Concentração de Sedimentos em Suspensão (CSS), a partir de Equipamentos Acústicos por Efeito Doppler (ADCPs). Duas seções (GS1 e GS2) foram monitoradas no canal, uma localizada próximo a confluência canal-Patos e outra próximo a confluência Mirim-canal, distantes 60 km entre si. Para a estimativa das vazões, foram desenvolvidos modelos de regressão linear e linear múltipla, baseado no Método das Velocidades Indexadas – constitui-se da relação entre cota e área da seção, e velocidade média e velocidade indexada (velocidade em um ou mais pontos específicos na seção), considerando as abordagens Velocidade Integrada no Feixe (IVC) e Velocidade Multicélula (MCV). Os modelos IVC e IVC+MCV apresentaram resultados como coeficiente de determinação r^2 de 0,986, e 0,998, na GS1 respectivamente, e r^2 de 0,986, e 0,995 para a GS2. Os resultados foram capazes de expressar a precisão dos modelos para as diferentes abordagens. A partir dos modelos foram construídas séries históricas de vazões para as seções, essas capazes de identificar momentos de inversão e estagnação dos fluxos, as quais sobrepueram as vazões in situ utilizadas para calibração dos modelos. Ainda, para nas seções foram desenvolvidos modelos capazes de estimar a CSS a partir da intensidade do pulso de retorno (backscatter – resultante da interação do pulso com as partículas suspensas presentes na água) corrigido. As correções consideraram as atenuações causadas pela onda acústica, pelas propriedades da água, pelas propriedades e presença dos sedimentos. Os resultados apontaram para modelos com desempenho Bom e Muito Bom na GS1 e GS2, respectivamente; modelos considerando o backscatter médio corrigido, o coeficiente de absorção do sedimento e, a temperatura da água, foram os que apresentaram melhor desempenho em ambas as seções monitoradas. Os modelos permitiram a construção de séries históricas de CSS para os locais, as quais sobrepueram as amostragens in situ utilizadas para calibração dos modelos. A utilização conjunta desses modelos oferece para o Canal São Gonçalo dados de descarga líquida e sólida com elevada precisão e curto espaço de tempo (intervalos de 15 minutos).

Palavras-chave: Curva-chave. Fluxos bidirecionais. Velocidades Indexadas.

Abstract

GONÇALVES, George Marino Soares. **Estimating discharges and Suspended-Sediment Concentrations by using Acoustic Doppler Current Profilers at the São Gonçalo Channel – RS State.** Advisor: Prof. Ph.D. Gilberto Loguercio Collares. 2022. 108f. Thesis (Doctor Degree in Water Resources) – Water Resources Postgraduate Program, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2023.

The São Gonçalo Channel (76 km long) is responsible for linking Mirim Lake to Patos Lake which compound the largest coastal lagoon system in Latin America and the largest shallow coastal environment in the world. However, this channel is unassisted by continuous monitoring systems about its water and suspended-sediment discharges, much of this because this channel has complex flow characteristics (inverse, stationary and bidirectional flows). In this way, this work aimed to develop models capable to estimate continuous data of discharge and Suspended-sediment Concentration (SSC), by Acoustic Doppler Current Profilers (ADCPs). Two sections (GS1 and GS2) were monitored in the channel, one located near the mouth and the other near the outlet, 60 km apart. To estimate the water discharges, linear and multilinear regression models were developed, based on the Indexed Velocity Method - it consists of the relationship between height and area of the cross-section, and average velocity and indexed velocity (velocity at one or more specific points in the cross-section), considering the Integrated Velocity Cell (IVC) and Multi-cell profile (MCV) approaches. The IVC and IVC+MCV models presented results such as coefficient of determination r^2 of 0.986, and 0.998, at GS1 respectively, and r^2 of 0.986, and 0.995 at GS2. The results expressed the accuracy of the models for the different approaches. From the models, time series of discharge were developed for the sections, these capable of identifying moments of inversion and stagnation of the water flow, which matches the in situ discharge data used for calibration process. Also, models for estimating the SSC were developed from the intensity of the corrected return pulse (backscatter – resulting from the interaction of the pulse with suspended particles present in the water). The corrections considered the attenuations caused by the acoustic wave, by the properties of the water, by the properties and presence of the sediments. The results pointed to models with Good and Very Good performance in GS1 and GS2, respectively; models considering the mean corrected backscatter, the sediment absorption coefficient and the water temperature were the ones that presented the best performance in both monitored sections. The models allowed the construction of SSC time series for the sites, which matches the in situ samples used during calibration process. The joint use of these models provides to the São Gonçalo Channel accurate water discharge and suspended-sediment discharge data in a short timescale (15-minute intervals).

Keywords: Bi-directional fluxes. Index Velocities. Rating curve.

Lista de abreviaturas e siglas

ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler
ADVM	Acoustic Doppler Velocity Meter
ALM	Agência para o Desenvolvimento da Bacia da Lagoa Mirim
ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
Backscatter	Intensidade do eco de retorno
Beam	Transdutor
BHMSG	Bacia Hidrográfica Mirim-São Gonçalo
Bio-fouling	Incrustação biológica
Blanking distance	Distância não amostrada pelo equipamento acústico
CSG	Canal São Gonçalo
CSS	Concentração de Sedimentos em Suspensão
D-ADCP	ADPC dinâmico
H-ADCP	ADCP estático
IID	Igual incremento de descarga
IIL	Igual incremento de largura
IVC	Velocidade Integrada no feixe
MCV	Velocidade Multicélula
Near-field	Campo próximo
SAID	Surrogate Analysis and Index Developer
SNR	Signal noise ratio
USGS	United States Geological Service

SUMÁRIO

Capítulo 1 – Introdução

- 1.1 Bacia Hidrográfica Mirim-São Gonçalo
- 1.2 Complexo Lagunar Mirim-Patos
- 1.3 Lagoa Mirim
- 1.4 Canais Abertos
- 1.5 Canal São Gonçalo
 - 1.5.1 Barragem do Canal São Gonçalo

Capítulo 2 – Objetivos e Hipótese

- 2.1 Objetivo Geral
- 2.2 Objetivos Específicos
- 2.3 Hipótese
- 2.4 Estado da arte
 - 2.4.1 Estudos no Complexo Lagunar Mirim-Patos
 - 2.4.2 ADCPs e o Método de Velocidades Indexadas
 - 2.4.3 ADCPs e a Estimativa da CSS e Descarga Sólida em Suspensão

Capítulo 3 – Materiais e Métodos

- 3.1 Seções de Monitoramento
- 3.2 Equipamentos Acústicos e a Medição de Vazão
 - 3.3.1 Perfiladores Acústicos do tipo dinâmico
 - 3.3.2 Perfiladores Acústicos do tipo estático
- 3.4 Variáveis hidráulicas monitoradas
- 3.5 Amostragem de Sedimentos
 - 3.5.1 Construção dos modelos de estimativa da CSS

Capítulo 4 – Resultados e Discussões

Artigo 1 - Continuous discharge monitoring of the Mirim-São Gonçalo system by the index velocity rating curve method

Artigo 2 - Surrogate technologies for assessment the Sediment Discharge at São Gonçalo Channel

Capítulo 5 – Considerações Finais

Referências Bibliográficas

Apresentação

Esta obra foi construída com o intuito de permitir a compreensão das características e complexidades de um ambiente que contém um canal natural de fluxo complexo, empregando e aplicando técnicas e equipamentos hidrométricos para determinação das descargas líquidas e descargas sólidas, alcançando avanços científicos através deste estudo.

Com isso, esta obra está organizada em cinco capítulos, a seguir enunciados:

- **Capítulo 1** abordagem geral do tema que esclarece o escopo do trabalho, associada a uma detalhada contextualização que explicita a magnitude e complexidade do local de estudo;
- **Capítulo 2** descreve os objetivos e hipótese do trabalho, junto ao *estado da arte* para o cenário que o território apresenta, observando trabalhos com metodologias que buscam responder objetivos semelhantes;
- **Capítulo 3** descreve detalhamento das metodologias aplicada nos estudos desenvolvidos e apresentados;
- **Capítulo 4** explicita os experimentos em si, apresentando na integra dois estudos: o primeiro tratando da aplicação do Método das Velocidades Indexadas na determinação das vazões no Canal São Gonçalo - CSG; o segundo apresentando modelos de estimativa da Concentração de Sedimentos em Suspensão - CSS no CSG, baseados na correção da intensidade do pulso de retorno; ambos utilizando um ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler);
- **Capítulo 5** apresenta as considerações finais, baseadas nos resultados obtidos nos dois estudos desenvolvidos;

Capítulo 1

Introdução

A grande maioria das populações, ao redor do globo, vivem próximas de áreas costeiras (estuários, lagoas e baías), e isso se dá ao fato do grande potencial econômico desses locais, facilitando atividades como lazer, pesca, indústria e navegação (OLIVEIRA *et al.*, 2019). Entretanto, esses ecossistemas são muito sensíveis e, seus processos hidrológicos são tipicamente influenciados pela variabilidade climática da região sendo que, conhecer as características da variabilidade natural desses processos é crucial para a sustentabilidade dos recursos hídricos em áreas costeiras (COSTI *et al.*, 2018).

Essas zonas costeiras podem ser definidas como área de transição entre oceano e continente, e fortemente influenciadas pela ação dos ventos (COLVIN *et al.*, 2018; COSTI *et al.*, 2018). Essa separação dos lagos, estuários e canais costeiros para com o oceano, se dão tipicamente através de uma faixa de areia e/ou continente, com possibilidade de pelo menos uma conexão entre esses, seja essa permanente ou temporária (MEL *et al.*, 2019).

Para entendimento de processos hidrológicos em sistemas hídricos, usualmente busca-se pela determinação da descarga líquida, que expressa a vazão de cursos d'água, ou seja, o aporte ou saída em um ambiente fechado, que aqui entende-se como zonas costeiras. Entretanto, o processo de medição da vazão pode ser oneroso e espaçado ao longo do tempo, por isso que, usualmente, para monitoramento contínuo da descarga líquida em cursos d'água utiliza-se uma relação entre a cota e a vazão, também conhecida como curva-chave.

Curvas-chave, embora tradicionalmente utilizadas para determinação da vazão (CHENG *et al.*, 2019; MUSTE e HOITINK, 2017), exigem um número mínimo de observações da seção de interesse, e não são eficazes em ambientes complexos, como aqueles com presença de fluxos inversos e/ou bidirecionais (LE COZ *et al.*, 2008). Isso ocorre devido ao fato que em ambientes de fluxos complexos, curvas-chave são incapazes de perceber as diferentes fases de um hidrograma, como a subida (picos de descarga) e descida (momentos de vazante) (MUSTE *et al.*, 2020). Por esses motivos, em locais com essas características pode se aplicar o Método de

Velocidades Indexadas (IVRC) para determinação da vazão (CHENG *et al.*, 2019), que relaciona a velocidade de um local específico da seção com a velocidade média da mesma, em conjunto a relação entre cota-área da seção (CHEN *et al.*, 2012), atendendo a equação da continuidade onde o produto da velocidade média e área da seção, resultam na vazão.

Neste sentido, tem-se utilizado Equipamentos Acústicos por Efeito Doppler, também conhecidos como ADV¹ (Acoustic Doppler Velocity Meter) e ADCP² (Acoustic Doppler Current Profiler), este último mais amplamente difundido, capazes de operar através da emissão de pulsos sonoros na coluna d'água na qual, através da avaliação da variação da frequência do sinal emitido, é possível calcular a velocidade de escoamento do fluido e, conseqüentemente a vazão do curso d'água. Equipamentos do tipo ADCP foram originalmente desenvolvidos para aplicação em ambientes marinhos, para determinação da direção e intensidade das correntes de água e, posteriormente adaptados à ambientes de água doce para a determinação da vazão em rios e canais, naturais e artificiais.

Além da determinação da descarga líquida de um curso d'água, para melhor compreensão dos processos hidrodinâmicos inerentes ao local, muito se tem interesse na determinação da descarga sólida, ou seja, compreender e quantificar o transporte de sedimentos em determinado sistema hídrico. É tido que o transporte de sedimentos em cursos d'água é um processo natural e inerente aos processos hidrológicos presentes em bacias hidrográficas. Porém, a ineficaz gestão dessa variável pode acarretar prejuízos, afetando negativamente recursos naturais, fauna, flora e em obras hidráulicas. De acordo com o Serviço Geológico Americano (WOOD, 2014), os Estados Unidos da América possuem um prejuízo anual da ordem de 20 bilhões de dólares por consequência de elevadas taxas de transporte de sedimentos em cursos d'água.

Uma eficaz estratégia para auxiliar na gestão e tomada de decisão sobre a geração, transporte, e deposição de sedimentos em cursos d'água é através do monitoramento permanente das variáveis hidráulicas: **descarga líquida e descarga sólida**. Para isso, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) possui

¹ ADV¹ serve como nomenclatura genérica para equipamentos acústicos instalados de forma fixa. É uma terminologia comumente utilizada pela USGS.

² Nomenclatura criada pela empresa RDI, se popularizou no meio técnico, sendo a sigla ADCP utilizada para denominar de forma geral os medidores acústicos por efeito Doppler.

em sua base de dados (Rede Hidrometeorológica Nacional), 1.485 estações fluviométricas (medição de vazão) e, 463 estações sedimentométricas (medição do transporte de sedimentos em suspensão) distribuídas pelo Brasil (ANA, 2022). Essas estações contam com medidas sazonais, tanto de vazão como de sedimentos, nas quais as de sedimentos são realizadas através de métodos tradicionais de amostragem, já consagrados na literatura, conforme os descritos em Carvalho (1994) e, Edwards e Glysson (1988).

Nota-se que o número de estações não é elevado, tendo em vista as dimensões continentais do Brasil e, o principal motivo desse número não ser maior, a exemplo das estações de monitoramento de sedimentos, é por conta da limitação e dificuldade de obtenção de dados reais a partir de métodos diretos/tradicionais (aqueles através da amostragem de água *in situ* e posterior tratamento em laboratório para determinação da concentração de sedimento presente). Essa limitação é mais expressiva em grandes rios e sob as condições de eventos extremos, considerando que a amostragem de sedimentos, tradicionalmente, despende de muito tempo, logística e recursos, e por vezes pode ser uma tarefa que traga riscos a vida humana.

Nesse sentido, em estudos recentes na área de sedimentos, tem sido desenvolvido alternativas a aplicação dos métodos diretos, tradicionais, para estimativa da concentração de sedimentos em suspensão (CSS), com destaque para a utilização de ADCPs (RUBEN *et al.*, 2020; LI *et al.*, 2019; SZUPIANY *et al.*, 2019; WOSIACKI *et al.*, 2021).

Quando utilizados em cursos d'água, os ADCPs são capazes de coletar uma série de informações, em curtos intervalos de tempo, com elevada resolução, tais como: vetores de velocidade (direção e magnitude); intensidade do sinal emitido; nível de ruído promovido pelo meio; intensidade do sinal de retorno, entre outros. E, quando se tratando da estimativa de sedimentos, os ADCPs permitem, a partir da intensidade de retorno do sinal acústico, devidamente calibrado para o curso d'água de interesse, estimar a presença de sedimentos na coluna de água, em tempo real e de forma contínua. Com isso, a utilização de ADCPs pode auxiliar na diminuição da frequência de realização de coleta de amostras de solução (água e sedimentos), embora procedimentos de calibração e verificação dos resultados devam ser continuados, atividades que dispendem tempo e recursos nos processos de análises sedimentométricas.

Neste contexto, temos o Canal São Gonçalo, possuindo 76,6 km de extensão, localizado no extremo sul do Brasil, parte da Bacia Hidrográfica Mirim-São Gonçalo, responsável por conectar os ambientes lagunares costeiros Lagoa Mirim e Lagoa dos Patos, compondo o maior complexo lagunar da América Latina. O canal não está contemplado pela Rede Hidrometeorológica Nacional acerca do monitoramento de vazões e tampouco de sedimentos. Em 2015 iniciou-se um extenso trabalho, promovido pelo grupo de pesquisas NEPE-HidroSedi³ (Núcleo de Ensino, Pesquisa e Extensão em Hidrometria e Sedimentologia para o Manejo de Bacias Hidrográficas – Universidade Federal de Pelotas) para a determinação, de forma contínua e precisa, da vazão no local e, em 2019 sobre a caracterização dos sedimentos presentes no canal.

Os estudos e avanços, aplicando ADCPs no monitoramento das vazões e dos sedimentos, promovidos pelo grupo NEPE-HidroSedi no Canal São Gonçalo apresentaram-se promissores, sugerindo a possibilidade de monitoramento contínuo dessas variáveis.

Detalhes dos estudos com ADCP no Canal São Gonçalo e região, encontram-se descritos a seguir.

1.1 Bacia Hidrográfica Mirim-São Gonçalo

Conceitualmente, bacias hidrográficas podem ser definidas como áreas naturais de captação de água da chuva (precipitação), água essa que converge na forma de escoamento para um ponto de saída em comum, o exutório da bacia (TUCCI, 2009). Entretanto, como a água não enxerga fronteiras, essa possui a capacidade de atuar como elemento integrador no território em que escoar. Nesse sentido, bacias hidrográficas transfronteiriças – aquelas que possuem divisão geopolítica dentro de seu território, como divisão de municípios, estados e países – possuem a água como elemento integrador de seus povos, ambientes, economia e interesses. Com isso, no extremo sul do Brasil, possuímos a Bacia Hidrográfica Mirim-São Gonçalo (BHMSG), tida como uma das principais bacias hidrográficas transfronteiriças da América do Sul, de grande importância ecológica e econômica nessa região (OLIVEIRA *et al.*, 2015).

³ Detalhes sobre as projetos e áreas de atuação do grupo de pesquisas NEPE-HidroSedi encontram-se disponíveis em: www.hidrosemi.com.

A BHMSG (Figura 1) possui uma área total de 62.250 km² que é compartilhada entre o Brasil e o Uruguai, sendo que cerca de 47% da área total está em território brasileiro, com abrangência de 21 municípios e uma população estimada de 770.827 habitantes (Fernandes *et al.*, 2021). Em território uruguaio a BHMSG engloba 5 departamentos e abriga 5% da população do país (154.699 habitantes) (MVOTMA, 2017).

Ainda, como principais afluentes no lado brasileiro, destacam-se o Arroio Pelotas, os rios Piratini e Jaguarão e o Canal São Gonçalo. Já no lado uruguaio, recebem destaque os rios Cebollati, Tacuari, Sarandi e San Miguel.

A região da BHMSG está sob clima do tipo subtropical úmido (Cfa na classificação de Köppen), com verões quentes e chuvas bem distribuídas ao longo de todo o ano (PEEL *et al.*, 2007). Possui como característica que a precipitação e evapotranspiração de referência (ET_o) são homogêneas do norte para o Sul da BHMSG, evidenciadas pelas distribuições mensais de precipitações e ET_o, historicamente monitoradas na estação agroclimatológica da Embrapa Clima Temperado, localizada a aproximadamente 1,8 km da Barragem do São Gonçalo e, na estação agroclimatológica do Instituto Nacional de Investigación Agropecuária (INIA), localizada em Treinta y Tres no Uruguai, a aproximadamente 250 km ao sul da estação da Embrapa. A precipitação média anual registrada na estação da Embrapa é de 1401 ± 298 mm e evapotranspiração média anual de referência de 1081 ± 36 mm (1973–2020).

A BHMSG está também localizada sobre as províncias geomorfológicas da Planície Costeira – caracterizada por ser uma formação geomorfológica jovem, relevo plano e de altitudes abaixo de 40 m em relação ao Nível Médio do Mar (NMM), favorecendo o cultivo de arroz – e do Escudo Uruguaio-Sul-Rio-Grandense – com características de relevos ondulados e suave ondulados, apresentando altitudes que podem variar entre 0 m e 500 m NMM (ALM, 2023). Ainda, as várias zonas baixas e úmidas associadas às lagoas e florestas, constituem-se também como habitat de aves migratórias, assim como, atuam também na regulação natural da vazão de rios, amortecimento de cheias e provendo a recarga de aquíferos (ALM, 2023).

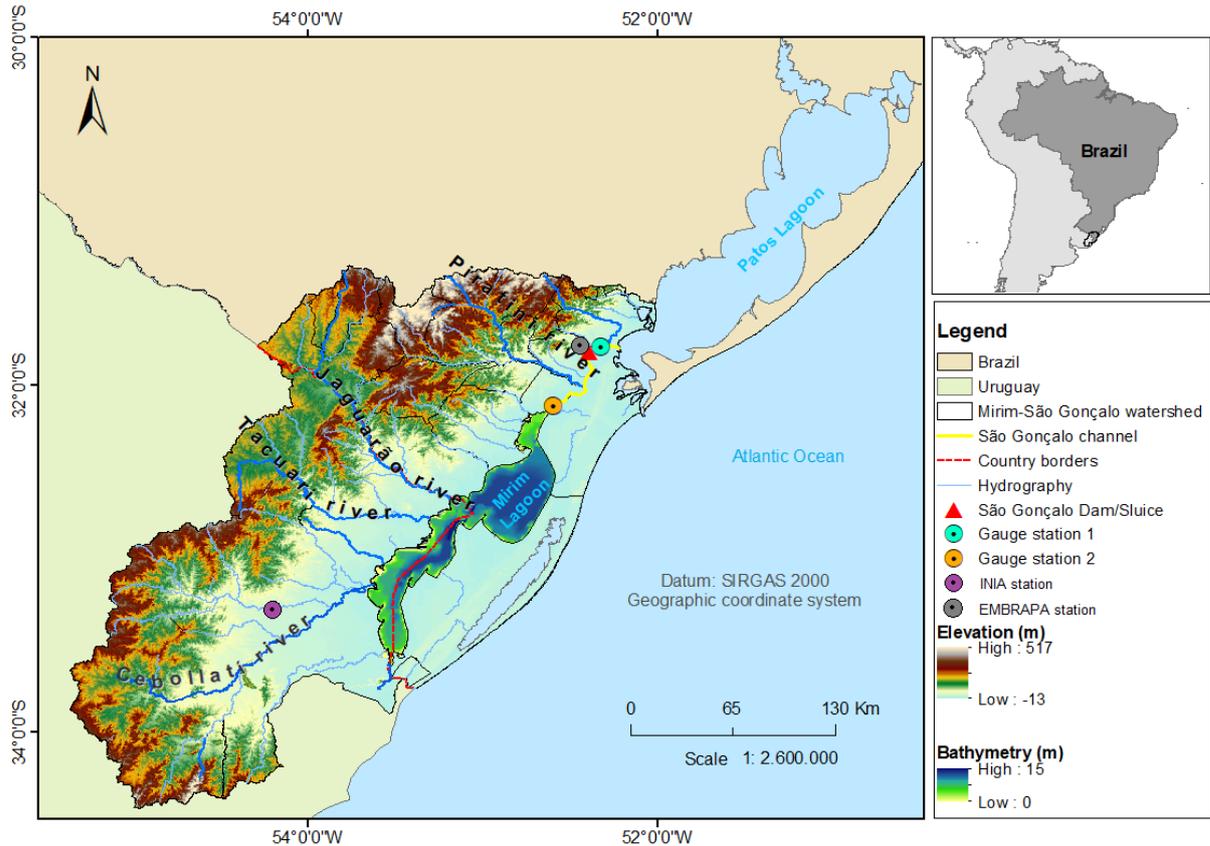


Figura 1 – Representação da Bacia Hidrográfica Mirim-São Gonçalo e seus principais afluentes.

Fonte: Próprio Autor.

1.2 Complexo Lagunar Mirim-Patos

Inserida na área da BHMSG, a Lagoa Mirim pode ser considerada o maior corpo d'água dentro dessa, e o sentido predominante de suas águas está no fluxo de sentido sul-norte em direção ao exutório (Canal São Gonçalo), até encontrar com as águas da Laguna dos Patos. Juntos, esses três ambientes costeiros são responsáveis por formar o Complexo Lagunar Mirim-Patos, considerado o maior sistema limnológico raso costeiro do mundo (Kjerfve, 1986), e maior sistema lagunar da América Latina (OLIVEIRA *et al.*, 2015; PERILLO, PICCOLO e PINO-QUIVIRA, 1999), apresentando área de espelho d'água de ~13 mil km² (FRIEDRICHF, NIENCHESKIJ, E SANTOS 2006; TOLDO 1994), com mais de 500 km de linha de costa (OLIVEIRA *et al.*, 2019). Ainda, (PERILLO, PICCOLO e PINO-QUIVIRA, 1999) trazem que a área de drenagem

contribuinte para o complexo lagunar é de 201.626 km², sendo que 75% contribuem diretamente para a Laguna dos Patos.

O local é intitulado como “complexo”, justamente ao considerar sua hidrodinâmica que possui complexos aspectos e comportamentos. O fluxo de suas águas ocorre de forma predominante no sentido de Mirim para Patos. Entretanto, essa dinâmica pode se inverter (fluxos inversos), ocorrer nos dois sentidos (fluxos bidirecionais), e até mesmo não fluir (represamento de águas). E esses efeitos são causados pelo regime de chuvas mas, principalmente, pela ação dos ventos nos níveis d’água na região (COSTI *et al.*, 2018; OLIVEIRA *et al.*, 2019). O vento vindo do sul empurra as águas no sentido Mirim-Patos (MUNAR *et al.*, 2018), enquanto o vento vindo de nordeste empurra as águas no sentido Patos-Mirim, causando oscilação dos níveis d’água em virtude de distúrbios nos padrões de variabilidade sazonal (COSTI *et al.*, 2018).

Existe a predominância, ao longo do ano, com médias de 4 m/s, de ventos de nordeste (Figura 2), aqueles que atuam “empurrando” as águas no sentido Patos-Mirim, podendo causar efeitos de represamento e, até mesmo intrusão salina (entrada de águas oceânicas através da conexão da Laguna dos Patos com o Oceano Atlântico, que acabam por fluir em direção ao sul). Entretanto, nos períodos de outono e inverno a predominância da direção dos ventos passa a ser do quadrante sul, ou seja, ventos que “empurram” as águas no sentido Mirim-Patos, podendo chegar a velocidades de 2,8 m/s, no outono.

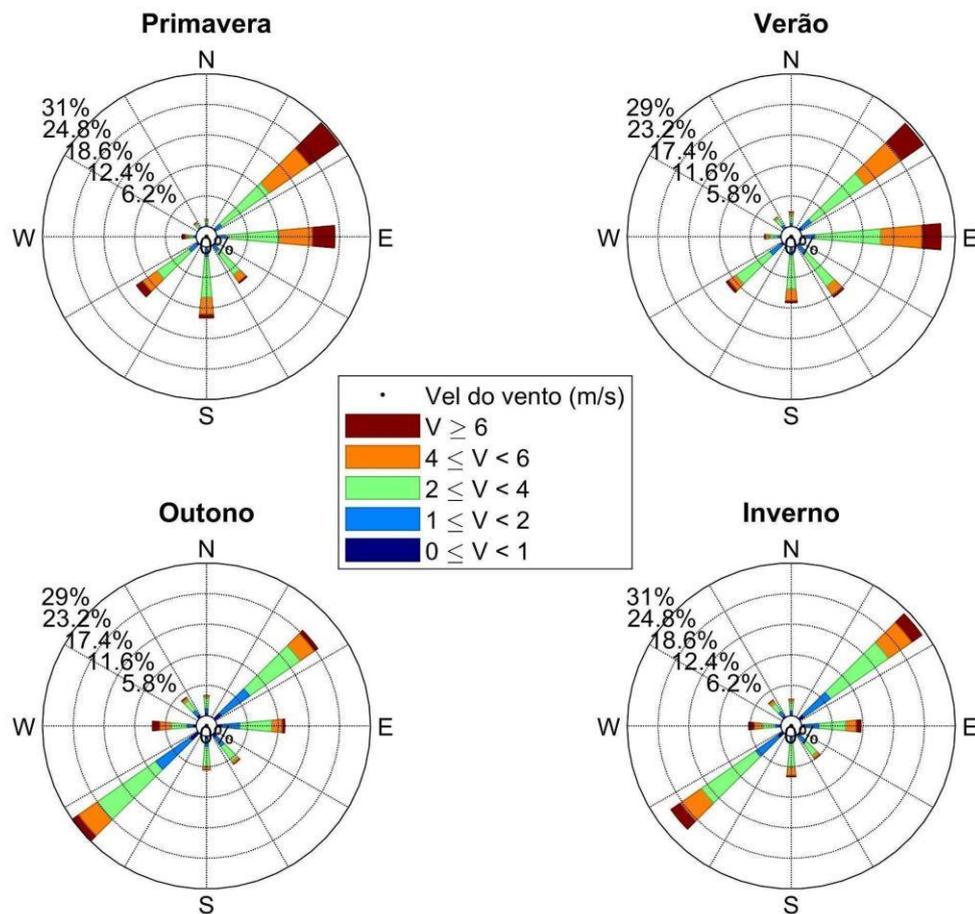


Figura 2 – Série de velocidades e direções do vento, a partir de dados da estação agrometeorológica da Embrapa, para o período entre 1971-2020.

Fonte: ALM, 2022.

1.3 Lagoa Mirim

A Lagoa Mirim, segundo (PERILLO, PICCOLO e PINO-QUIVIRA, 1999), é classificada como um lago costeiro (“coastal lake”), diferentemente da Laguna dos Patos (classificada como lagoa costeira estrangulada – “coastal lagoon choked”). A Lagoa Mirim possui área total de 3,749 km² (FRIEDRICHF *et al.*, 2006; TOLDO, 1994) (PERILLO, PICCOLO e PINO-QUIVIRA, 1999), com capacidade total de armazenagem de $\sim 17 \times 10^9$ m³ de água (VIEIRA, 1988), apresentando profundidades de até seis metros em grande parte da lagoa, com uma pequena região apresentando profundidades de doze metros (margem oposta da foz do rio Jaguarão, que desagua no Canal São Gonçalo), e atua como um enorme reservatório de amortecimento dos seus contribuintes, estando seu exutório localizado na região conhecida como

Sangradouro, localizado na confluência Mirim-CSG. Ainda, o principal uso das águas da Lagoa Mirim consiste na irrigação da cultura do arroz, através da extração direta de água em território brasileiro e uruguaio, sendo a região agrícola de entorno a lagoa, responsável por 50% da produção de arroz em ambos os países.

No leito da Lagoa Mirim, não há homogeneidade das características dos sedimentos presentes, sendo que nas regiões de margem há predomínio de sedimentos arenosos, enquanto nas regiões mais centrais, alinhadas ao eixo do perfil longitudinal, ocorre o predomínio de sedimentos finos, chegando a 60-80% de silte e argila (VIEIRA *et al.*, 2020).

Até a década de 70, em períodos de baixo aporte fluvial de seus tributários, associado ou não a períodos de vento nordeste, ocorria a entrada de água salobra na Lagoa Mirim, através do Canal São Gonçalo (OLIVEIRA *et al.*, 2015), impedindo a utilização de suas águas para usos tais como abastecimento público e irrigação. Registros anteriores a década de 50 apontam para um evento de situação extrema, ocorrido em 1946, onde a água salgada atingiu a região do extremo sul da Lagoa Mirim, nas imediações de Santa Vitória do Palmar, tendo sido registrado valores de salinidade de 1.190 p.p.m (partes por milhão) de cloreto de sódio (considera-se para irrigação o limite máximo de 500 p.p.m de cloreto de sódio) (CLM, 1970).

De forma geral, a Lagoa Mirim possuía tendência de salinização após o fim do período normal de estiagem na região, coincidindo com o mês de abril (probabilidade de salinização de 76%), embora o distrito de Santa Isabel do Sul, na região sul do Canal São Gonçalo e próximo ao Sangradouro, possuía probabilidade de salinização de 83%, até a década de 70 (CLM, 1970), isso porque esses sucessivos eventos de salinização da região, justificaram a construção da Barragem do Canal São Gonçalo, entre 1972 e 1977, com objetivo de impedir a intrusão salina na porção sul do sistema.

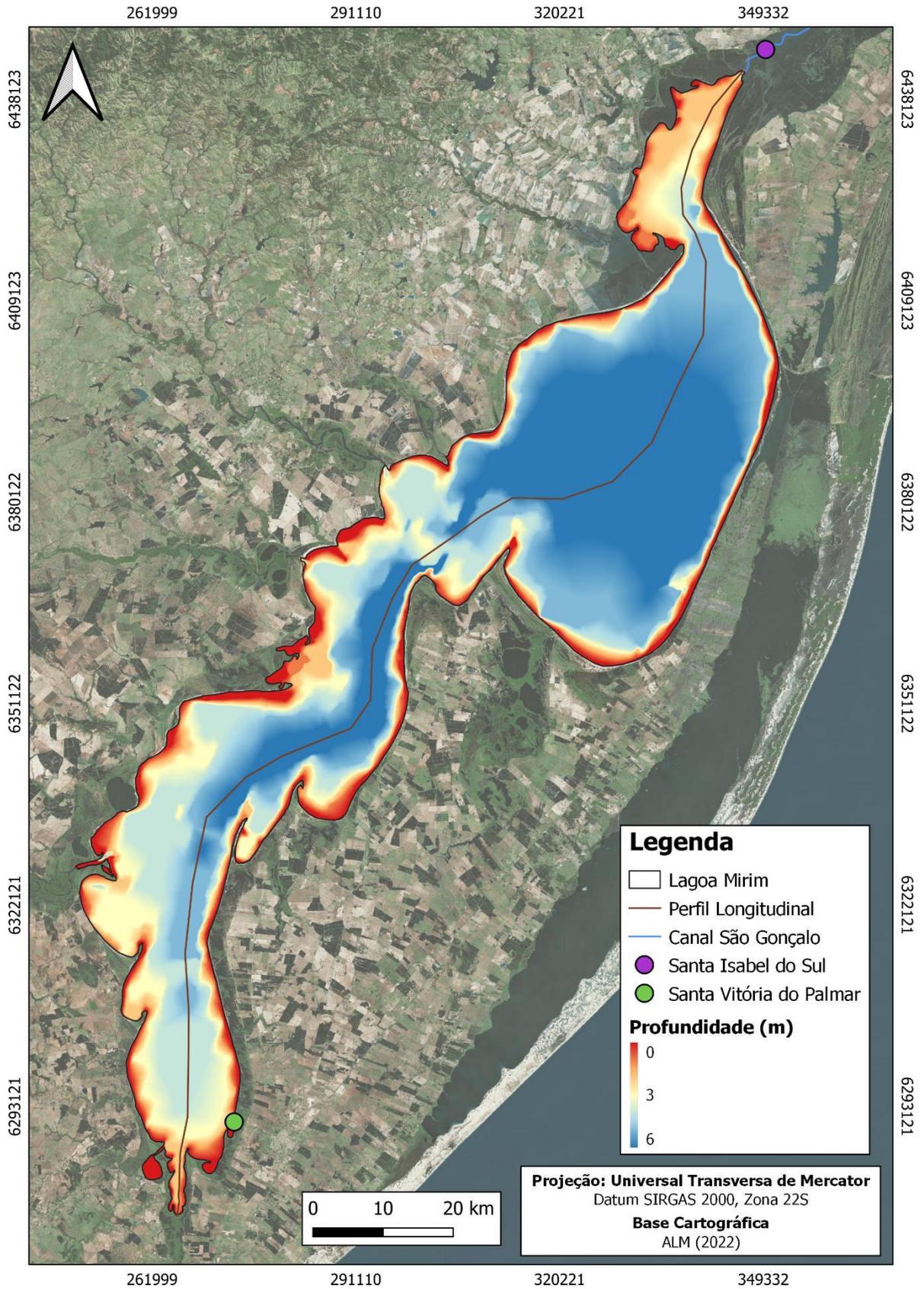


Figura 3 – Batimetria da Lagoa Mirim.

Fonte: Próprio Autor.

1.4 Canais Abertos

De acordo com Chow (1959), *canais abertos* podem ser caracterizados como condutos nas quais a água flui em contato com a atmosfera, de forma livre, podendo ainda serem classificados como: *naturais* – cursos d'água que existem de forma natural na terra (arroyos, rios e ligações de estuários); *artificiais* – construídos ou desenvolvidos por ação do homem (canais de navegação, irrigação, drenagem etc.).

Independente da classificação, seja canal natural ou artificial, este está sujeito a parâmetros de estudo hidráulico, que de acordo com Chanson (2004), podem ser a geometria do canal (largura, declividade e rugosidade), as propriedades do fluido (densidade e viscosidade), e os parâmetros do fluxo (velocidade, profundidade), esses últimos de grande interesse para este trabalho. Entretanto, obter com precisão parâmetros de fluxo como velocidade, direção da corrente e, descarga líquida da seção, em canais que apresentam características complexas, como influência de remanso e represamento de água, influência de maré e oscilação dos níveis, é uma tarefa que requer atenção extra de hidrólogos.

Canais naturais de fluxo complexo, apresentando inversão de seus fluxos e até mesmo represamento de suas águas, influenciados por efeitos de remanso tem sido estudado e descrito na literatura, a nível de mundo (CASTELLTORT *et al.*, 2020; GANTI *et al.*, 2016; HIDAYAT *et al.*, 2011), e Brasil (ALVES *et al.*, 2021).

Ainda, canais naturais com características de inversão e represamento de seus fluxos, influenciados pelas variações dos níveis, têm sido extensivamente estudados e descritos na literatura, a nível de mundo (CATHERINE e SIMPSON, 2005; CHEN *et al.*, 2012; HOITINK *et al.*, 2009; Simpson, 2001), e Brasil (COSTI *et al.*, 2018; MUNAR *et al.*, 2018; OLIVEIRA *et al.*, 2019).

1.5 Canal São Gonçalo

No Complexo Lagunar Mirim-Patos, o Canal São Gonçalo (CSG) exerce papel fundamental. O CSG é um canal natural e sinuoso, com 76,6 km de extensão e declividade média de 0,004% (BONCZYNSKI, 2018), apresenta profundidade média de 6 m e máxima de 15m e largura média de 250 m, responsável por conectar a Lagoa Mirim a Laguna dos Patos. Seu papel dentro do Complexo Lagunar Mirim-Patos é de

atuar como “artéria vital” deste sistema, onde todas as trocas de descarga fluvial entre essas duas lagoas, acontecem através do CSG, inclusive os eventos de intrusão salina, na qual as águas salgadas do Oceano Atlântico que entram na Laguna dos Patos, adentram o CSG e fluem na direção sul, podendo estar mais ou menos favorecidas pela intensidade e direção dos ventos, assim como pelos níveis d’água nas duas lagoas.

Além disso, o CSG exerce grande importância econômica e social para a região em que se insere, sendo também utilizado para fins de recreação, lazer, abastecimento urbano, pesca de subsistência, além de atuar como importante via de navegação (MEDRONHA *et al.*, 2013; SOUZA, 2015). Neste sentido, foram retomados esforços regionais para idealização da Hidrovia Uruguai-Brasil, que será uma via lacustre, capaz de ligar o Uruguai ao Brasil, através da Lagoa Mirim, estendendo-se pelo Canal São Gonçalo e Laguna dos Patos, chegando até o Porto de Rio Grande. Esta obra prevê cerca de 650 km de extensão e estará apta ao transporte de cargas, como: madeira, fertilizantes, minerais e grande potencial para o transporte de grãos, tais como arroz e soja.

Sobre o regime fluvial, o CSG apresenta vazões médias anuais de $700 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, com velocidade média de $0.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, com registros de vazões máximas da ordem de $3.000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ em períodos de cheia (CLM, 1970). A direção predominante de seu fluxo d’água é na direção Mirim-Patos em 70% do período do ano (MEDRONHA *et al.*, 2013; HARTMANN e HARKOT, 1990). Ainda, a descarga líquida no CSG depende das condições de fluxo que ocorrem no Rio Piratini (principal tributário do CSG), condições de nível na desembocadura (confluência CSG-Patos) e, ação da Barragem do Canal São Gonçalo (que pode estar total ou parcialmente fechada ou aberta) (KARSBURG, 2016).

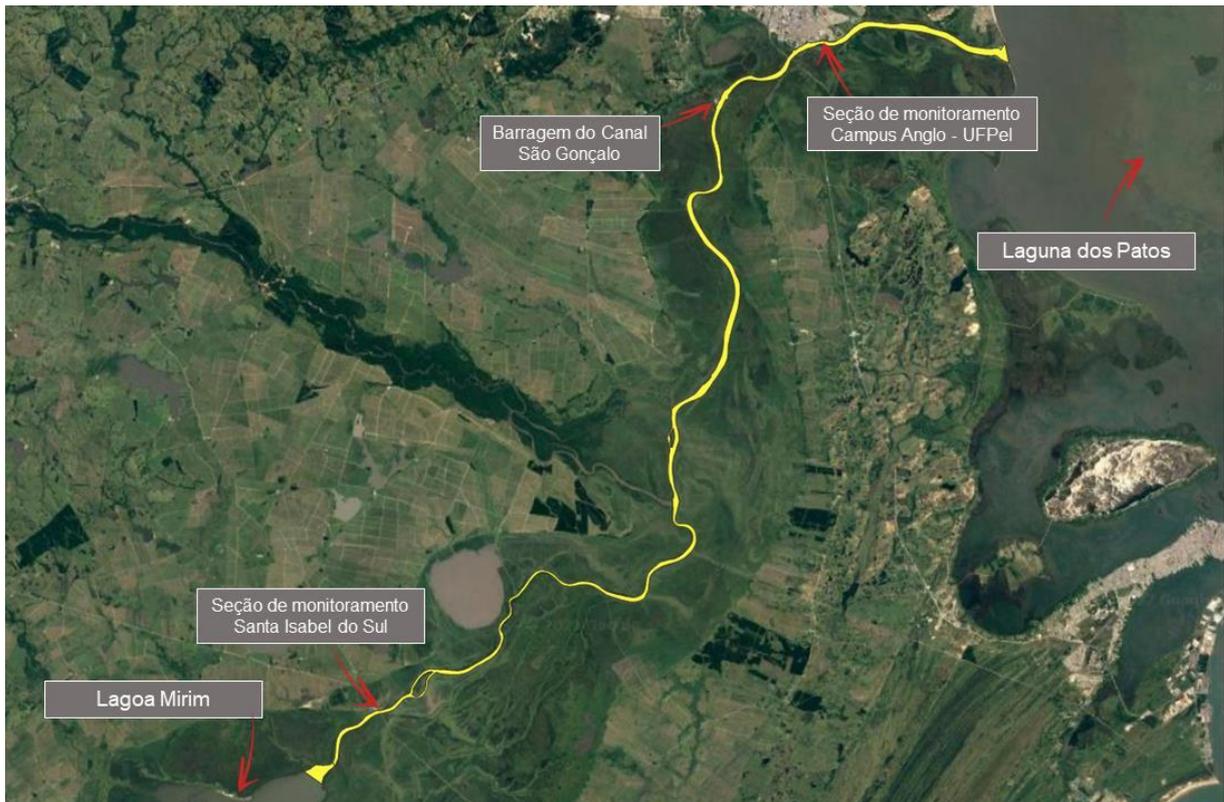


Figura 4 – Traçado do Canal São Gonçalo, conectando a Lagoa Mirim a Laguna dos Patos.

Fonte: Próprio Autor.

1.6 Barragem do Canal São Gonçalo

Em virtude dos sucessivos eventos de intrusão salina que ocorriam na porção sul do canal e na Lagoa Mirim, entre 1972 e 1977 foi construída a Barragem do Canal São Gonçalo (Figura 5), com o objetivo de impedir a continuidade de tais eventos em épocas de estiagem, ou em épocas com vento de Nordeste. Sob gerência da Agência para o Desenvolvimento da Bacia da Lagoa Mirim (ALM⁴), a obra está localizada 15 km a montante da confluência CSG-Patos, no município do Capão do Leão, distante 260 km do Porto de Porto Alegre.

O corpo da barragem foi parcialmente moldado no local, e é composta por um diafragma de concreto armado, possui 245 metros de extensão de margem a margem (eixo principal), com 12 metros de profundidade. No eixo principal, estão distribuídas 18 comportas basculantes, de acionamento eletromecânico, que podem ser

⁴ Para conhecer mais sobre as ações no território promovidas pela ALM, acesse: <https://agencialagoamirim.com.br>

fechadas/abertas individualmente. Ainda, na margem direita, há um dique, construído e utilizado para desvio do CSG durante a construção da barragem, e possui comprimento de 100 m, atuando como vertedor de emergência natural, nivelado na cota 1,00 metro NMM, evitando fluxos transversais à barragem.

Anexo ao eixo principal da barragem, na margem esquerda do CSG, está disposta uma eclusa para navegação. É formada por uma câmara com dimensões de 17 m de largura, 120 m de comprimento e altura de muro de 8 m, acessada através de duas estruturas terminais com comportas basculantes de 17 x 8 m, destinadas ao controle de travessia das embarcações, auxiliadas por muros-guias, que protegem as embarcações contra correntezas e turbilhonamentos, deixando espaço para o acostamento de comboios, sem interferir no tráfego da eclusa (ALM, 2021).

Os eventos de intrusão salina ainda ocorrem na região. Entretanto, após a construção da barragem, a água salobra não é mais capaz de atingir a porção sul do CSG, tampouco a Lagoa Mirim, garantindo assim os usos múltiplos da água nessa região, com destaque para o abastecimento urbano dos municípios de Rio Grande, Capão do Leão e Pelotas, assim como, irrigação de cerca de 30 mil hectares de terras agrícolas na região.



Figura 5 – Barragem do Canal São Gonçalo e sua eclusa de navegação, com destaque para o registro do represamento de água salgada (16/03/2022).

Fonte: Próprio Autor.

Com isso, considerando as particularidades e complexidades do ambiente, junto de sua importância social, ambiental e econômica para a região, justifica-se este trabalho, no sentido de desenvolver e avaliar o uso de ferramentas capazes de monitorar variáveis hidrológicas no Canal São Gonçalo. Além disso, os avanços a serem alcançados se fazem essenciais para a evolução e facilitação da tarefa de monitoramento de rios, lagos e canais, exercido por profissionais da área de recursos hídricos.

Capítulo 2

Objetivos e Hipótese

2.1 Objetivo geral

Avaliar modelos capazes de quantificar variáveis hidráulicas e hidrodinâmicas, como as descargas líquidas e descargas sólidas em suspensão, observadas no Canal São Gonçalo, a partir de equipamentos ADCPs – Acoustic Doppler Current Profiler.

2.2 Específicos

- i – Estudar a variabilidade da Descarga Líquida no Canal São Gonçalo através do método das Velocidades Indexadas;
- ii – Analisar a Concentração de Sedimentos em Suspensão no Canal São Gonçalo, a partir de amostras físicas utilizando métodos tradicionais de coleta;
- iii – Reconstruir séries históricas da Concentração de Sedimentos em Suspensão nas seções estudadas.

2.3 Hipótese

ADCPs são equipamentos adequados para determinação da descarga líquida, de forma contínua e capazes de estimar a concentração de sedimentos em suspensão (CSS), considerando as características hidráulicas e sedimentométricas presentes em um rio ou canal.

2.4 Estado da arte

Segue uma revisão dos principais trabalhos desenvolvidos na região de estudo, com temática e objetivos semelhantes a esta obra. Ainda, serão trazidos a luz os principais autores e referências que ofereceram contribuições para o avanço dos estudos e pesquisas na área de hidrometria, bases para o estudo aqui descrito, como: determinação da vazão de forma contínua em ambientes de fluxos complexos, a partir de ADCPs e aplicação do IVRC; estimativa da CSS e descarga sólida em suspensão a partir de ADCPs e correção da intensidade do backscatter.

2.4.1 Estudos no Complexo Lagunar Mirim-Patos

Devido a sua complexidade, magnitude, importância econômica, social e ambiental para a região sul do Brasil e leste uruguaio, o território do Complexo Lagunar Mirim-Patos, BHMSG e o próprio Canal São Gonçalo, carecem de estudos detalhados que reúnam informações e dados acerca de variáveis como: descarga líquida, sedimentos, nível, tempo de residência das águas e, padrões hidrodinâmicos. Entretanto, alguns estudos desenvolvidos merecem destaque ao tentar preencher essas lacunas de informações na região.

Hirata *et al.* (2010), conduziram um importante estudo na Lagoa Mirim, analisando para o período de 1912 até 2002 as estações de nível localizadas em Santa Isabel do Sul e Santa Vitória do Palmar, extremos norte e sul da lagoa, respectivamente. Perceberam existir dois períodos distintos, fortemente influenciados pela ação do Índice de Oscilações Sul na região, onde 1912-1958 apresentaram-se como mais seco que o período subsequente. Ainda, o estudo registrou a estiagem de 1943-45, a qual precede os registros de intrusão salina da lagoa (1946) percebidos em Santa Vitória do Palmar, descritos em CLM (1970).

Oliveira *et al.* (2015), fizeram importantes contribuições para os estudos da região, ao analisarem a descarga líquida da Lagoa Mirim em direção a Laguna dos Patos, através do CSG. Para isso, analisaram as descargas líquidas de tributários da Lagoa Mirim e a ação dos ventos sobre essa massa líquida, todos fatores de grande influência para impor variação da vazão entre as duas lagoas. Ainda, os autores desenvolveram uma curva-chave para o Canal São Gonçalo, referente a Santa Isabel

do Sul (próximo a desembocadura da Lagoa Mirim) – ainda que, dadas as condições de fluxo complexo do CSG, curvas-chave possam não ser a melhor escolha para determinação da vazão nesse local, os autores obtiveram uma boa correlação cota-vazão.

Costi *et al.* (2018), utilizaram imagens de satélite e dados de nível dos principais tributários da Lagoa Mirim e do CSG, para modelar a variação de nível nesse ambiente e determinar as zonas de inundação que circundam a lagoa e canal. Este trabalho apresentou importantes resultados ao avaliar pelo período de 5 anos qual seria a zona alagada e qual seu período de permanência na região. Além disso, o trabalho faz importantes apontamentos e simulações sobre como se dão os processos de represamento e oscilação dos níveis dentro da lagoa, influenciados pelos ventos.

Oliveira *et al.* (2019), modelaram, em 3D, variáveis hidrológicas no Complexo Lagunar Mirim-Patos, considerando as influências causados pelos ventos na região. Os autores produziram importantes resultados, nas quais destacam-se as descargas líquidas entre as duas lagoas e a diferença de níveis observados na Lagoa Mirim (autores olharam para as seções de Santa Vitória do Palmar e Santa Isabel do Sul, extremos da Lagoa Mirim e historicamente monitorados, representando o nível médio das águas na lagoa), submetidos a ocorrência de ventos. Ainda, modelaram o comportamento dos vetores velocidade das correntes dentro da Lagoa Mirim, sob influência de ventos sul/nordeste.

Silva *et al.* (2019), realizaram uma modelagem 2D do tempo de residência das águas da Lagoa Mirim, influenciada pelas descargas líquidas dos principais tributários, considerando a influência do vento e batimetria do local, calibrando e validando os dados a partir dos níveis observados em Santa Isabel do Sul e Santa Vitória do Palmar. O estudo aponta o grau de estagnação das águas dentro da lagoa em simulações de 1 ano, distribuídas em zonas com maior/menor efeito de represamento das águas (backwater effect) e locais de recirculação de água.

Jung *et al.* (2020), construíram curvas-chave para sedimentos, dos principais tributários do Complexo Lagunar Mirim-Patos, objetivando determinar a descarga sólida de longo termo para esses. Os autores foram capazes de, por exemplo, apresentar uma curva-chave de sedimentos para o CSG, com desempenho classificado como *Satisfatório* segundo métricas estatísticas deste estudo. São importantes os avanços aqui apresentados, já que a estimativa da CSS a partir da

descarga líquida é um processo simples e mais barato, ainda que com menor resolução espaço-temporal.

Vieira *et al.* (2020), distribuiu espacialmente 142 amostras do leito e as classificou a partir das porcentagens de finos, argilas e areias presentes (triângulo textural). O estudo ainda, modelou a dissipação e redistribuição dos sedimentos em função das profundidades e condições de vento na Lagoa Mirim, fatores de influência na hidrodinâmica das águas.

Bitencourt *et al.* (2020), realizaram a modelagem através do TELEMAC-3D, para a região da Lagoa dos Patos, considerando o tributário Canal São Gonçalo. Neste estudo os autores estimaram as descargas líquida, sólida em suspensão do canal em direção a lagoa, considerando as influências do vento, precipitação, descarga líquida e índices climáticos (ENOS). As estimativas referem-se ao período de 5 anos entre 2002-2006, de forma sazonal, anual e interanual. Os resultados apontaram para valores de CSS entre 30-50 mg.L⁻¹ na confluência CSG-Patos, sendo que os valores tendem a decrescer de julho a dezembro (~23 mg.L⁻¹ no verão; ~50 mg.L⁻¹ no outono; ~34 mg.L⁻¹ no inverno; ~37 mg.L⁻¹ na primavera). Embora as simulações para a confluência CSG-Patos do canal não tenham considerado dados *in situ* de CSS durante a calibração, as estimativas apresentam-se como um importante norte para os valores de descarga sólida suspensa do Canal São Gonçalo para o estuário da Lagoa dos Patos.

Ávila *et al.* (2021), em seu estudo desenvolveram modelos lineares que relacionam a calibração de um ADCP e um turbidímetro, para estimativa da CSS no estuário da Lagoa dos Patos, com intuito de descrever a hidrodinâmica de trocas e contribuições de carga sólida em suspensão nessa região. Os autores apontam para observações, como o fato da intensificação das descargas de entrada e saída no estuário, possuírem relação direta com o aumento da média da CSS, assim como, o fato de existir assimetria na relação entre a CSS e a distribuição dos perfis de velocidades percebidos. Ainda, os autores apontam para o período analisado (2018-2020), 4,31 x 10⁵ toneladas como média mensal de descarga sólida exportada do estuário.

Fagundes *et al.* (2021), realizaram uma modelagem da CSS e descarga sólida em suspensão para os principais rios, canais e planícies de inundação da América Latina. Ainda que seja um estudo de grande escala, foi capaz de contemplar os

principais tributários da Lagoa Mirim e o Canal São Gonçalo em sua porção a montante e a jusante da Barragem do Canal São Gonçalo. Os resultados apontados neste estudo indicam uma descarga média anual de 23.511 ton.ano⁻¹ no CSG, próximo de Santa Isabel do Sul.

Távora *et al.* (2021), compilaram dados de material particulado em suspensão, de amostras coletadas *in situ*, a partir de diferentes estudos e projetos realizados na região (de 1978 até 2019). Apresenta-se como um importante estudo ao oferecer para a região longas séries de dados, subsídios, análises e comparações em estudos atuais e futuros.

Bortolin *et al.* (2022), usaram imagens de satélite para construir séries temporais de longo período (1984-2020), que apresentaram a concentração de material particulado em suspensão (SPM), dos principais tributários na Lagoa do Patos. O estudo aponta para maiores concentrações no período entre inverno e primavera, sendo intensificados em períodos de El Niño, alcançando médias de 100 g.m³. Para o Canal São Gonçalo, o estudo considerou 165 imagens durante o período de estudo, porém, sem amostragem *in situ* para correlação direta com as imagens. O Canal São Gonçalo apresentou as menores taxas de exportação de sedimentos para dentro do estuário, comparado aos demais tributários analisados neste estudo (Rio Camaquã e Rio Guaíba), porém, apresentou elevada ocorrência de pluma de sedimentos em direção ao estuário, processo que apresenta maiores taxas de sedimentos durante períodos de El Niño. O valor máximo identificado no estudo, para exportação de SPM em direção ao estuário, foi em 1992, atingindo 129,5 g.m³.

2.4.2 ADCPs e o Método de Velocidades Indexadas

Equipamentos do tipo ADCP têm sido aplicados para determinação da descarga líquida, em rios e canais, com características de fluxo complexo, caso da região do Complexo Lagunar Mirim-Patos, BHMSG e Canal São Gonçalo, bem como ao redor do globo. Para tanto, alguns desses estudos merecem destaque.

Levesque e Oberg (2012), apresentam em sua obra um manual para a aplicação do Método de Velocidades Indexadas, em rios e canais. Os autores detalham sobre a escolha do equipamento, da seção de controle, local e forma de instalação do H-ADV. Ainda descrevem como desenvolver a relação cota-área,

velocidade média-velocidade indexada, junto de consistente análise estatística dos resultados. Este trabalho é baseado em estudos desenvolvidos em aproximadamente 470 seções de monitoramento usando o IVRC, nos Estados Unidos da América.

Ainda que não tratem especificamente da aplicação do IVRC, outras duas referências importantes para o método IVRC, principalmente quando utilizando ADCPs para a calibração dos modelos, estudos descritos por Mueller (2013; 2016). Nesse caso, o autor descreve procedimentos para realização de medidas de vazão, a partir de ADCPs dinâmicos, realizando a travessia com barco nas seções de interesse e, posteriormente o emprego de metodologias de pós-processamento dos dados coletados para garantir as precisas medidas de vazão, velocidade média e caracterização da área dos locais estudados. Os dados dessa etapa, influenciam diretamente o desenvolvimento do IVRC, já que esse é dependente da qualidade dos dados de calibração.

Lima (2016), foi a precursora na aplicação do Método de Velocidades Indexadas no CSG – região do Porto de Pelotas, ao utilizar um H-ADVM de 0,5 MHz de frequência, e um ADCP dinâmico de 1 e 3 MHz de frequência, ambos da marca Sontek®. A autora construiu uma curva-chave para o conjunto de dados da calibração e comparou com as estimativas apresentadas pelo IVRC, considerando a velocidade integrada na seção, uma faixa horizontal com ~120 m a partir da face do equipamento, mais detalhes serão discutidos na sessão Variáveis Hidráulicas Monitoradas – percebendo significativos avanços nos resultados, além de constatar a forte influência do vento nas vazões, corroborando com a impossibilidade de utilização da curva-chave para esse local.

Noschang (2018), se valeu da metodologia desenvolvida por LIMA (2016) e aplicou em Santa Isabel do Sul (próximo da desembocadura da Lagoa Mirim), utilizando também um H-ADVM de 0,5 MHz de frequência, e um ADCP dinâmico de 1 e 3 MHz de frequência, ambos da marca Sontek®. Nesse estudo o autor foi capaz de identificar diversos período de fluxos inversos analisando possíveis relações com a direção e velocidade dos ventos para esses específicos momentos na seção estudada. Esse trabalho foi importante para atestar a presença de fluxos inversos no canal e, identificar a relação direta de sua ocorrência com as condições de vento local.

2.4.3 ADCPs e a Estimativa da CSS e Descarga Sólida em Suspensão

Além de realizar a medida de vazão em cursos d'água, profissionais e pesquisadores da área têm dedicado esforços na aplicação de ADCPs para o monitoramento e estimativa da qualidade e quantidade dos sedimentos presentes na água. Alguns estudos na região do Complexo Lagunar Mirim-Patos, BHMSG e Canal São Gonçalo, merecem destaque, bem como estudos em outras regiões.

Deines (1999), fez grande contribuição aos estudos de estimativas de CSS a partir de ADCPs ao propor o equacionamento da proporcionalidade entre os incrementos de intensidade do pulso acústico e CSS, com base na equação do sonar proposta por Urick (1975). O autor sugere que se defina uma correlação entre esses parâmetros, para que sirva de referência para as outras intensidades de eco acústicas, permitindo então que se converta intensidade do eco em CSS. O autor também sugere a correção da intensidade do eco para perdas inerentes ao feixe acústico para o meio líquido (corpo d'água) e para a massa sólida (sedimento).

Gartner (2002), compara estimativas de CSS a partir de métodos acústicos e métodos óticos. Salieta as vantagens na utilização de ADCP's (menos intrusivos e menos suscetíveis a formação de crostas por ação biológica - bio-fouling; possibilidade da construção de séries temporais a partir de dados já obtidos para leituras de vazão), mas também enfatiza limitações na aplicação de ADCPs, principalmente ligados à incapacidade de esses diferenciarem mudanças na distribuição da concentração granulométrica dos sedimentos. A grande conquista deste estudo está na proposição de utilização da relação direta entre a CSS observada e o logaritmo da intensidade do eco de retorno, nas estimativas. A partir dessa proposição, diversos trabalhos empregaram essa estratégia e outros ainda perseguem essa teoria (CHANSON *et al.*, 2008; DOMANSKI *et al.*, 2015; RUBEN *et al.*, 2020; GARTNER, 2004; GRAY e GARTNER, 2009; GUERRERO *et al.*, 2011, 2016; LATOSINSKI *et al.*, 2014; LI *et al.*, 2019; MOORE *et al.*, 2013; SZUPIANY *et al.*, 2019; TOPPING *et al.*, 2006; WOOD, 2014; WOOD e TEASDALE, 2013).

Ávila, Möller e Andrade (2014) avaliaram em seu estudo a relação existente entre o material particulado em suspensão (MPS), presente no estuário da Laguna dos Patos-RS, e o backscatter corrigido de um ADCP da marca Sontek de 1,5MHz de frequência. Os autores realizaram sete campanhas amostrais, totalizando 205 coletas,

cujos dados extraídos foram comparados com os valores de retroespalhamento do sinal acústico para o equacionamento da relação. Os autores também utilizaram dados obtidos em 19 transectos localizados na desembocadura do estuário da Laguna dos Patos para estimativa da quantidade de MPS exportado pelo estuário. Até então, não havia registros científicos da exploração dessas relações no ambiente estuarino da Laguna dos Patos.

Domanski *et al.* (2015), apresentaram a ferramenta *Surrogate Analysis And Index Developer* (SAID), aplicada para automatização da correção do backscatter, posterior modelagem e avaliação das relações entre backscatter corrigido e CSS, considerando a metodologia proposta por Gartner (2004). A grande contribuição do trabalho foi oferecer aos pesquisadores e profissionais da área de sedimentometria uma ferramenta que auxilie na construção de estimativas de CSS a partir de equipamentos acústicos.

Landers *et al.* (2016), descrevem a metodologia para estimativa da CSS a partir de ADCPs, de forma contínua, utilizando dados de backscatter corrigido. Os autores exploraram a interferência e ajuste da correlação das variáveis levando em consideração outros parâmetros, como o tamanho e forma da partícula sólida.

Gonçalves (2020), utilizou um H-ADVM de 0,5 MHz de frequência no monitoramento de duas seções no Canal São Gonçalo. Usou dado de backscatter corrigido seguindo o proposto por (Gartner, 2004), e relacionou com amostras de CSS (r^2 de 0,44 foi o melhor resultado obtido desta relação). Este trabalho iniciou um novo período de testes sedimentométricos por parte do grupo de pesquisa envolvido, sugerindo a aptidão de ADCPs para estimativa da CSS na região.

Silva (2021), desenvolveu modelos de estimativa da CSS a partir de ADCPs dinâmicos de 1 e 3 MHz de frequência da marca Sontek®, empregando a correção da Relação Sinal e Ruído (SNR), relacionando com amostragens de sedimentos em seções do Canal São Gonçalo localizadas em Pelotas e Santa Isabel do Sul. Obteve como melhor resultado um r^2 de 0,56 para a relação. Os avanços desse trabalho consistem de, além de estimar a CSS média na seção, também ser capaz de discretizar essa estimativa no perfil, já que o equipamento utilizado executa a varredura total da seção analisada.

Capítulo 3

Materiais e Métodos

3.1 Seções de Monitoramento

Os experimentos foram desenvolvidos em duas seções do Canal São Gonçalo – Rio Grande do Sul, Brasil. A Seção de Monitoramento 1 (GS1) está localizada no Campus Anglo da Universidade Federal de Pelotas (Figura 6), na porção norte do canal, distante ~10 km da desembocadura do CSG e, ~8 km a jusante da Barragem do Canal São Gonçalo (os termos jusante e montante, referem-se ao sentido predominante do canal, sentido Mirim em direção a Patos). Essa seção foi estrategicamente instalada pelo Grupo de Pesquisas NEPE-HidroSedi em 2015, visando monitorar as condições e variações hidráulicas do canal na porção jusante da barragem, zona com maior probabilidade de ocorrência de eventos de mudança de fluxo e de intrusão salina. A GS1 é uma seção hidráulicamente estável, sem variações das características de margem e leito e apresenta características morfométricas tais como profundidade média de 6,1m e largura de 230m. Ainda, a proximidade da seção com o Campus Anglo – UFPel, concede segurança ao local e equipamentos ali instalados.

A Seção de Monitoramento 2 (GS2) está localizada nas margens do distrito de Santa Isabel do Sul (Figura 7), na porção sul do canal, ~4 km a jusante da desembocadura da Lagoa Mirim no Canal São Gonçalo e, ~60 km a montante da GS1, sendo essas duas seções capazes de cobrir os dois extremos do canal (confluência Mirim-CSG e, confluência CSG-Patos); é também uma seção com características hidráulicas estáveis, sem variações das características de margem e leito, apresentando profundidade média de 7,6m e largura de 170m. Os primeiros registros⁵ do monitoramento da GS2 são de 1963, realizados pela Comissão da Lagoa Mirim (CLM) onde, na época, foram realizadas medidas de velocidade e vazão quase que diárias pelo período de 5 anos, e acompanhamento contínuo do nível d'água no local. Ne época, o monitoramento dessas variáveis hidráulicas objetivava coletar subsídios

⁵ Parte dos dados estão dispostos em formato físico no Acervo Técnico da ALM e, outra parte disposta de forma online em: hidrosedi.com/siirh.

técnicos para a construção da Barragem do Canal São Gonçalo, à qual foi cogitada de ser construída no local da GS2, mas que depois, os projetistas da época apontaram para maior viabilidade econômica se construída próxima de Capão do Leão, à jusante da desembocadura do Rio Piratini no Canal São Gonçalo, local atual da obra.



Figura 6 – Vista superior, vista lateral e batimetria do leito da Seção de Monitoramento 1 (GS1), Campus Anglo – UFPel.

Fonte: Próprio autor.



Figura 7 – Vista superior, vista lateral e batimetria do leito da Seção de Monitoramento 2 (GS2), Santa Isabel do Sul.

Fonte: Próprio autor.

3.2 Equipamentos Acústicos e a Medição de Vazão

A medição da vazão nos locais de interesse, configura-se como a obtenção de uma variável básica para as próximas etapas, necessárias à construção de modelos que empregam o Método de Velocidades Indexadas. As medidas de vazão antecedem amostragens de sedimentos em suspensão, assim como valores de vazão permitem a estimativa da descarga sólida em suspensão para os locais de interesse.

Neste estudo, todas as medidas de vazão foram obtidas a partir de Perfiladores Acústicos por Efeito Doppler - ADCP (dinâmicos/estáticos).

3.2.1 Perfiladores Acústicos do tipo dinâmico

Os perfiladores acústicos (ADCPs), tem sido utilizado em larga escala, para medição da vazão em cursos d'água. Suas características e propriedades permitiram

avanços e praticidade aos profissionais e para a atividade do hidrometrista ⁶, motivados pela facilidade de uso, nível de detalhamento dos resultados e, principalmente, segurança na operação. Durante a utilização de ADCPs, para a medição da vazão de um rio e/ou canal, não se faz necessário a passagem de cabos de margem-a-margem na seção; os ADCPs não precisam ser constantemente içados na seção; a medição pode ser realizada muito mais rapidamente, pois não se perde tempo estacionado em determinado local da seção para realizar a medição de uma vertical específica; os ADCPs não necessitam ser calibrados constantemente e, por fim, não possuem partes mecânicas, móveis, que possam sofrer decomposição e/ou mau funcionamento (GAMARO, 2012).

O princípio de funcionamento de ADCPs se baseia no efeito Doppler, que considera a percepção da alteração de frequência de uma determinada onda acústica, entre uma fonte emissora e outra receptora, num ponto de observação qualquer. Desta forma, a frequência emitida pela fonte (nesse caso o ADCP) até um ponto observador (nesse caso, partículas em suspensão presentes na água), é diretamente proporcional à velocidade com que a distância entre esses é alterada, aumentando ou diminuindo. Com isso, o ADCP é capaz de calcular a velocidade do movimento das partículas que, de acordo com Santos *et al.* (2001), é a mesma velocidade da água. Portanto, ADCPs determinam a velocidade da água através da velocidade de deslocamento das partículas suspensas na água e em movimento.

Em resumo, instrumentos ADCPs se baseiam na interação entre pulso acústico e partículas presentes na água, sendo possível perceber que esses equipamentos possuem aptidão para análises sedimentométricas⁷.

Desta forma, ADCP's do tipo dinâmico referem-se a equipamentos utilizados em embarcações, capazes de se deslocarem nas seções e cursos d'água de interesse, para a realização de medidas de vazão, direção e velocidade da água. Alguns desses equipamentos possuem diferentes frequências, sendo uma reservada para velocidades em águas rasas, uma reservada para velocidades em águas mais profundas, e uma terceira reservada para a batimetria do leito. Desta maneira, são

⁶ Profissional técnico qualificado para realizar a medida de variáveis hidráulicas e hidrológicas, por exemplo, de precipitação, evapotranspiração, velocidade e direção da água, profundidade de lagos e rios etc.

⁷ Campo da ciência que estuda os sedimentos em todas as suas formas, e interações com o meio. Oferece técnicas para a determinação quali-quantitativa dos diferentes tipos de sedimentos presentes em bacias e cursos d'água.

capazes de determinar a velocidade da água em pequenas células, e realizam uma “varredura” da seção discretizando-a em verticais (Figura 4).

Nesse estudo foi empregado o perfilador acústico Sontek RiverSurveyor® M9 para a realização de medidas de vazão. Esse equipamento possui nove transdutores; quatro com 3MHz de frequência; quatro com 1MHz de frequência; um com 0,5MHz de frequência (Figura 4). Os oito primeiros são responsáveis por perfilar a seção, medindo as velocidades de corrente d’água nas diferentes direções. O transdutor de 0,5MHz é responsável pela medida da profundidade no eixo vertical (batimetria da seção). O equipamento possui um sensor de temperatura para a correção da velocidade do som transmitido na água. Outros detalhes sobre o ADCP dinâmico RiverSurveyor® M9 podem ser obtidos através do endereço eletrônico: <https://www.yssi.com/riversurveyor-s5-m9>.

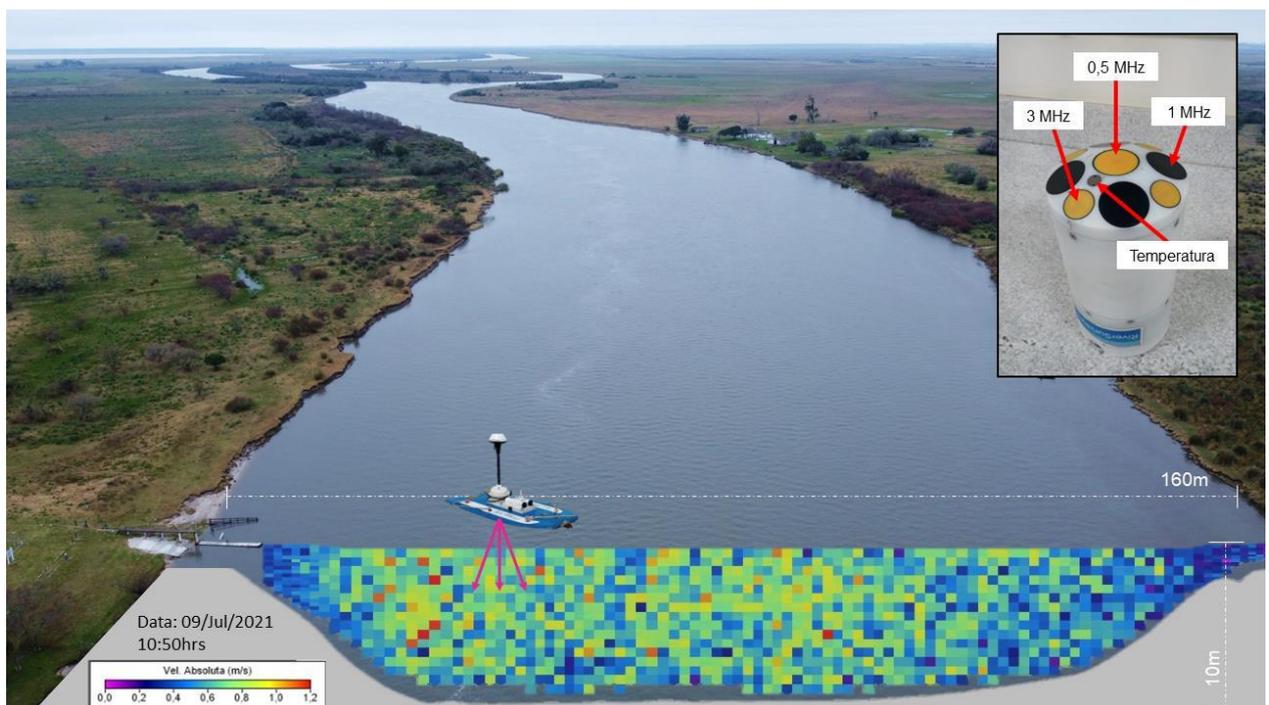


Figura 8 – Representação de uma medida de vazão com um perfilador acústico dinâmico (Sontek RiverSurveyor M9, apresentado no destaque), na seção de Santa Isabel do Sul, Arroio Grande, RS – Canal São Gonçalo (09/07/2021).

Fonte: Próprio Autor.

3.2.2 Perfiladores Acústicos do tipo estático

Perfiladores acústicos fixos, também conhecidos como ADCPs do tipo estático, possuem o mesmo princípio de funcionamento que orienta os ADCPs de forma geral, ou seja, utilizam-se dos princípios da acústica considerando o efeito Doppler, a interação do pulso acústico emitido e o retorno desse pulso após interação com as partículas presentes no meio. A diferença se dá especialmente com relação à instalação e caracterização da medição; esses equipamentos são usualmente instalados em margens, boias, no leito de canais, rios ou baías. São capazes de medir o perfil longitudinal da seção na qual estão instalados, medindo a velocidade em um plano (horizontal ou vertical), apenas em um ponto, ou perfilando a seção inteira, conforme o equipamento.

É comum nesses equipamentos, o uso de uma única frequência; são equipados com sensores de nível e de pressão (permite o monitoramento da cota/nível d'água); são capazes de discretizar a seção ou perfil em células de tamanho fixo. ADCPs do tipo estático possuem importante aplicação na melhoria e adequação de curvas-chave, pois coletam de forma contínua informações de nível, direção e velocidade da água; são também amplamente aplicados no desenvolvimento de curvas de velocidade indexada, relacionando a velocidade de um ponto específico da seção com sua velocidade média, muito usado em canais com fluxos complexos e/ou aqueles com mudança de regime, onde curvas-chave do tipo tradicional não podem ser utilizadas.

Esses equipamentos são usualmente encontrados em frequências relativamente mais baixas (sendo os mais comuns 300, 500, 600, 1.000, 1.200, 1.500 e 3.000 kHz) quando comparadas aos ADCPs do tipo dinâmicos.

O equipamento utilizado nesse estudo é o perfilador acústico estático Sontek Side-Looker-500[®] (Figura 9). Dotado de dois transdutores horizontais de 500 kHz cada, angulados 25° entre si; um transdutor vertical; um sensor de pressão; um sensor de temperatura. Este equipamento possui alcance máximo de 120 m, e capacidade para discretizar a seção em até 10 células. Mais informações sobre o equipamento podem ser obtidas através do link: <https://www.yssi.com/sontek-sl-series>.

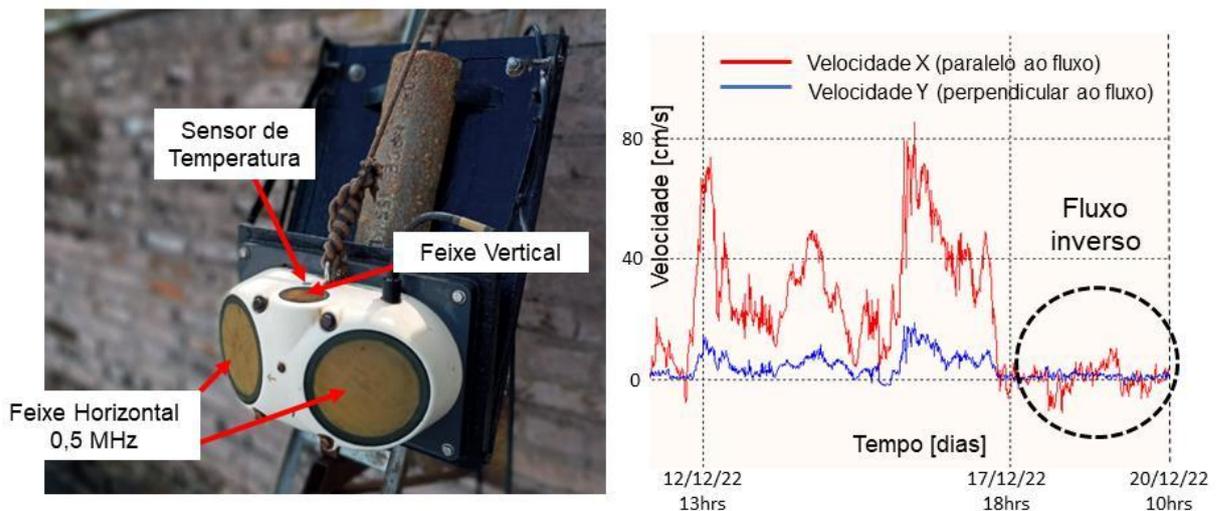


Figura 9 – ADCP do tipo estático, Sontek Side-Looker-500® em detalhes (imagem da esquerda); representação da magnitude e direção das velocidades X e Y monitoradas no Canal São Gonçalo, no período de 12 a 20 de dezembro de 2022 (imagem da direita).

Fonte: Próprio Autor.

3.3 Variáveis hidráulicas monitoradas

O desenvolvimento de modelos IVRC para estimativa da descarga líquida em cursos d'água, prevê a construção das relações a seguir descritas: relação entre a **velocidade média** da água e a **velocidade em um ou mais** pontos específicos na seção de controle (velocidade indexada); relação entre o **nível** da água e **área molhada** da seção.

Os valores de velocidade média da água, foram obtidos a partir de campanhas à campo (27 na GS1 e 22 na GS2), utilizando-se o ADCP dinâmico Sontek RiverSurveyor® M9, anteriormente descrito (Figura 8); nessas campanhas determinou-se a vazão líquida e área molhada da seção; a velocidade média é obtida a partir do quociente entre vazão e área.

Realizou-se uma topobatimetria nas seções estudadas para a correta delimitação da seção transversal; a área obtida foi utilizada na construção da relação entre nível da água e área molhada da seção.

As duas seções monitoradas, possuem instalados um ADCP estático Sontek Side-Looker® 500 (Figura 9), responsável por monitorar a velocidade nos sentidos X (perpendicular ao fluxo) e Y (transversal à seção) do canal, em uma faixa horizontal

de margem-a-margem, com 120 m de distância, a uma profundidade fixa (-0,37 m na GS1 e, -0,34 m na GS2, considerando o nível médio do mar) garantindo que nem o equipamento, nem o feixe emitido, toquem a superfície da linha d'água e/ou o leito do canal; com o equipamento também foi realizado monitoramento do nível da água através de seu sensor de pressão; todos os dados medidos estão em intervalos de 15-min.

Os dados de velocidade da água nas seções, a partir dos ADCPs estáticos, apresentam duas formas básicas de arranjo: Integrado no Feixe (IVC) – na qual a velocidade X/Y considera toda a porção que o feixe alcança, 120 m no caso deste estudo; Multicélula (MCV) – discretiza o feixe em intervalos (cells) de igual tamanho, e apresenta a velocidade X/Y referente a esses locais específicos, no caso, 10 cells com 10 m cada (Figura 10).

Para a metodologia aqui aplicada, a relação entre **velocidade média** (V-ADCP), variável dependente, e **velocidade indexada** (V-INDEX), variável independente, foi estabelecida testando diferentes arranjos, na busca do melhor desempenho; as variáveis independentes testadas foram as seguintes: nível da água; velocidade indexada no eixo X considerando o método IVC; velocidade indexada no eixo X considerando o método MCV; velocidade indexada no eixo X considerando o método IVC+MCV. O desempenho dos modelos foi determinado pelo valor do coeficiente de determinação (r^2) – quanto mais próximo de 1, melhor foi o desempenho; e observação do erro médio absoluto (MAE), que quanto mais próximo da nulidade se confere um melhor desempenho.

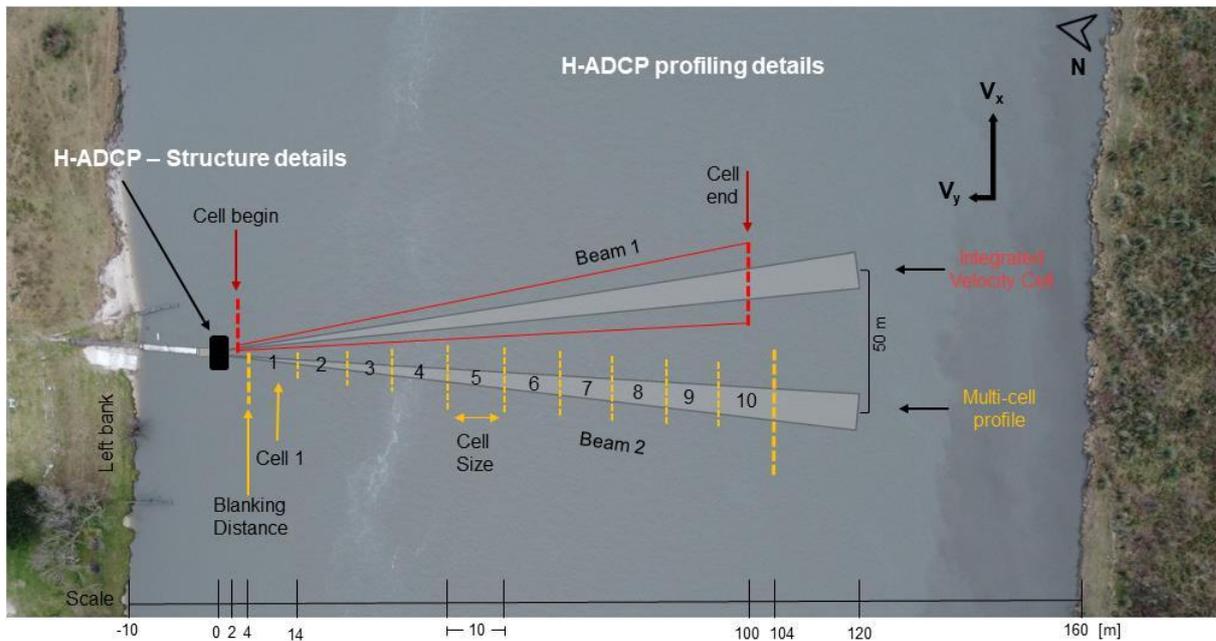


Figura 10 – Esquema de fixação do ADCP estático na Seção de Santa Isabel do Sul e, a representação dos métodos IVC (vermelho) e MCV (amarelo).

Fonte: Próprio Autor.

3.4 Amostragem de Sedimentos

Para esse estudo foram realizadas amostragens de sedimentos em suspensão para a determinação da **Concentração de Sedimentos em Suspensão (CSS)**. As amostragens seguiram o método de Igual Incremento de Descarga - IID, com 6 verticais amostradas, com duplicatas. O equipamento amostrador empregado estava dependente, principalmente da velocidade do fluxo; em velocidades baixas utilizou-se o DH-59; em velocidades mais elevadas utilizou-se o D-49 (Figura 11).

Devido às limitações impostas pelas características dos amostradores, as amostragens foram realizadas até a profundidade máxima de 4,6 m, quando utilizando o método de integração da vertical.

Em cada amostragem de sedimentos, foi realizada medida de vazão com o auxílio de ADCP dinâmico; essa medida de vazão foi utilizada para cálculo do tempo de amostragem e das distâncias para cada uma das verticais a partir do software HidroSedimentos®. Mais detalhes sobre o software HidroSedimentos® podem ser

obtidas em Back *et al.* (2011), ou através do endereço eletrônico: http://biblioteca.ana.gov.br/index.asp?codigo_sophia=61692 .

As amostras coletadas, durante as campanhas, foram individualmente armazenadas e conduzidos para o laboratório do NEPE-HidroSedi, no Campus Anglo – UFPel, para os procedimentos laboratoriais necessários para a determinação da CSS (Figura 12). Para esse fim, foi aplicada a técnica de filtragem da mistura água-sedimento, conforme DNAEE (1970), a qual segue os passos a seguir descritos: as amostras coletadas em campo (mistura água-sedimento) são levadas ao laboratório para serem tratadas e analisadas para a determinação da CSS; os frascos contendo as amostras ficaram em repouso por período mínimo de 24 horas, para posterior pesagem e determinação da massa bruta (água+sedimento). Após o processo de filtragem, os frascos foram pesados novamente para se obter os valores de massa tara (peso do recipiente sem presença da amostra). Esse processo também foi realizado com as membranas filtrantes, às quais foram secas em estufa a 105°C por período superior a 1 hora, colocadas em repouso no dessecador, por período mínimo de 12 horas, e então pesadas para determinação dos valores de massa tara (sem presença de sedimento). Após o processo de filtragem, as membranas com sedimento foram levadas à estufa, para então serem pesadas novamente, obtendo os valores de massa bruta (membrana com a presença de sedimento).

Na sequência, foram realizados cálculos para a determinação da CSS média na seção e discretizada por vertical, conforme:

$$CSS = \frac{m_{SB} - m_{ST}}{\sum_{i=1}^n (m_{ABi} - m_{ATi})} \times 10^6 \times F_c + C_p \quad (1)$$

Em que:

Css = Concentração de sedimentos em suspensão – mg.L⁻¹

mSB= Massa bruta do sedimento filtrado (membrana) – gramas

mST= Massa tara da membrana – gramas

mABi = Massa bruta da i-ésima sub-amostra – gramas

mATi= Massa tara da i-ésima sub-amostra – gramas

10⁶ = Fator de conversão de g.g⁻¹ para mg.kg⁻¹ – (mg.kg⁻¹) / (g.g⁻¹)

Fc = Fator de conversão de CSS de mg.kg⁻¹ para mg.L⁻¹ – (mg.L⁻¹) / (mg.kg⁻¹)

Cp = Correção nula de precisão intermediária do procedimento analítico

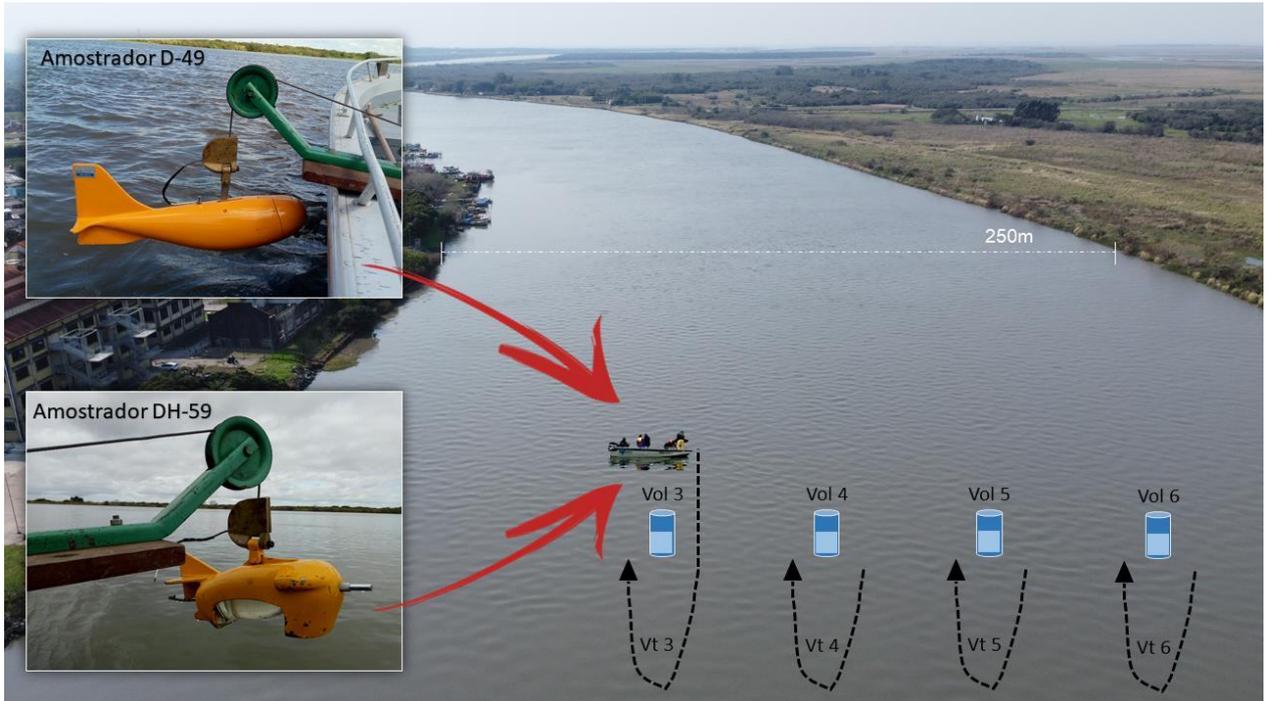


Figura 11 – Amostragem de sedimentos em suspensão realizada no Canal São Gonçalo, pelo método IID, e em destaque os equipamentos utilizados (D-49 e/ou DH-59).

Fonte: Próprio Autor.

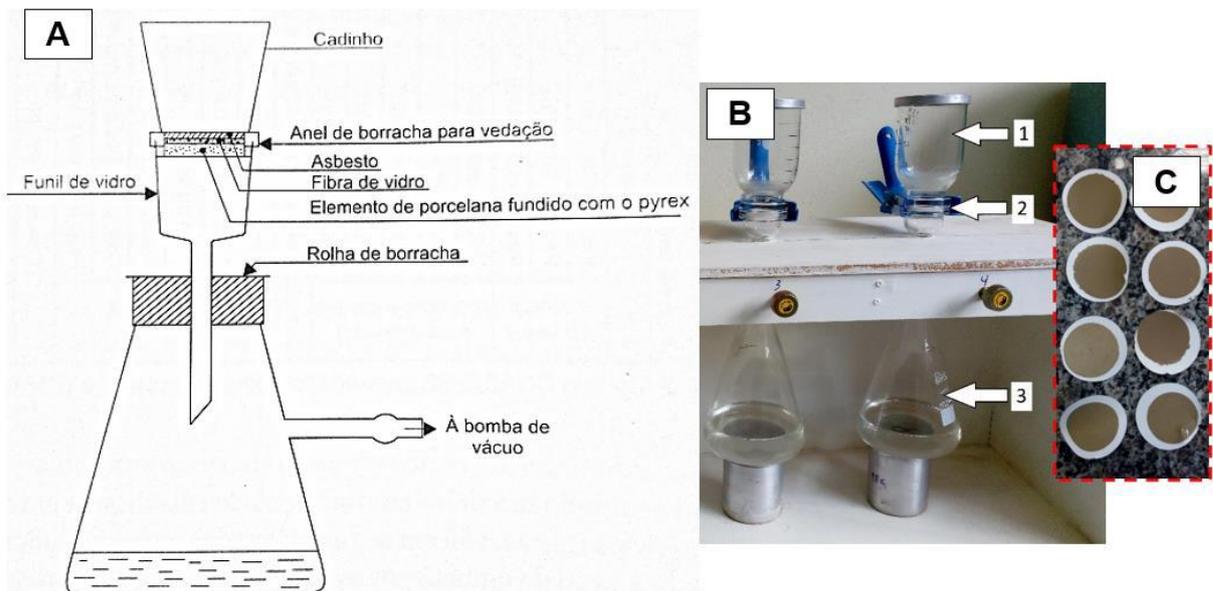


Figura 12 – A) Cadinho de Gooch; B) Sistema para método de filtragem das amostras, com (1) cadinho de Gooch (2), membrana filtrante e (3) Erlenmeyer; C) Membranas filtrantes após processo de filtragem.

Fonte: Próprio Autor.

3.4.1 Construção dos modelos de estimativa da CSS

Para a determinação da Concentração de Sedimentos em Suspensão (CSS) através dos ADCPs, foi realizada a correção dos dados acústicos obtidos nas seções. Essa correção se baseia nos seguintes itens:

- Correção para atenuações da onda acústica emitida, que perde energia ao se deslocar, causado principalmente pela dissipação de calor gerado em seu deslocamento;
- Correção para atenuações do pulso no meio aquoso, influenciadas pela densidade, temperatura e outras características do meio, que absorvem energia do pulso acústico ao transitar por este;
- Correção para atenuações causadas pela presença e características dos sedimentos, que absorvem e/ou refletem a energia do pulso acústico quando esse se choca com essas partículas (Figura 13).

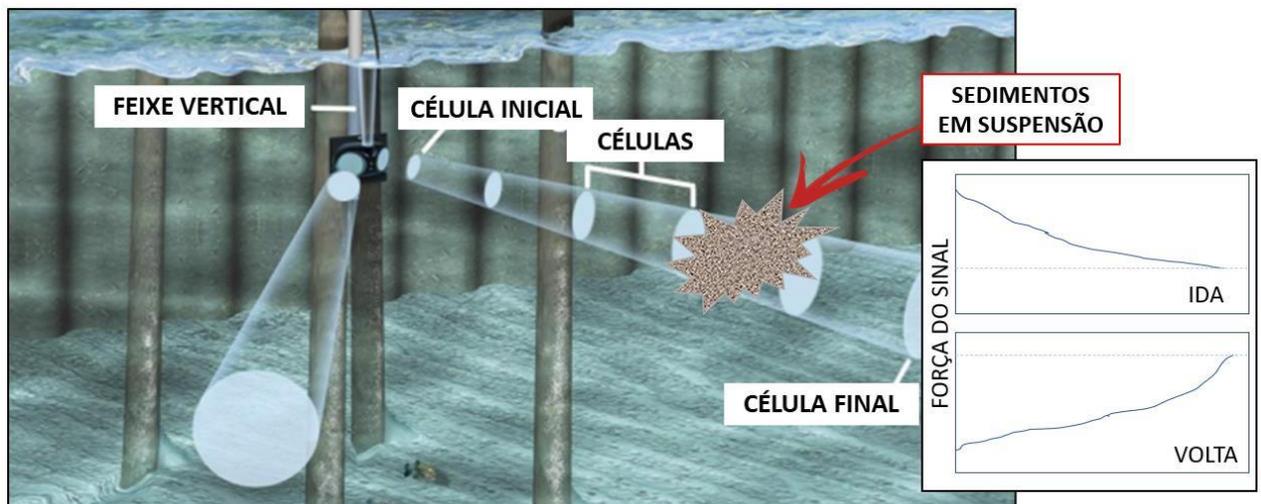


Figura 13 – Enfraquecimento do sinal que retorna (backscatter) para a fonte emissora (ADCP), causado pela presença de sedimentos no meio.

Fonte: Modificado de Sontek, 2014.

Para a correção do pulso acústico, foi empregado o software Surrogate Analysis and Index Developer (SAID), proposto por (DOMANSKI *et al.*, 2015) (Figura 14). A ferramenta SAID, se baseia em premissas apresentadas por (GARTNER, 2004), onde a energia do eco de retorno (backscatter) é a energia do pulso acústico que retorna para a fonte emissora, após esse pulso interagir com o sedimentos em

suspensão, presentes na água. Através da ferramenta SAID, a Concentração de Sedimentos em Suspensão (CSS) pode ser estimada pela Equação 1:

$$SSC = 10^{(A+B \times RL)} \quad (1)$$

Em que:

SSC = concentração de sedimentos em suspensão (mg.L^{-1});

A = coeficiente linear da regressão;

B = coeficiente angular da regressão;

RL = nível de reverberação (eco).

Os coeficientes A e B foram determinados a partir da regressão entre valores de CSS obtidos in situ (dados de calibração) e a variável explanatória, que pode ser, por exemplo, os valores de backscatter corrigidos, entre outras. Já o termo RL é derivado da equação do sonar, proposta por (URICK, 1975), conforme Equação 2:

$$RL = SL - 2TL + TS \quad (2)$$

Em que:

RL = nível de reverberação (dB);

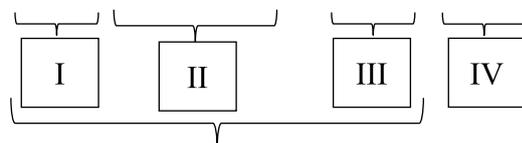
SL = nível da fonte (dB);

2TL = perda de transmissão nos dois sentidos (dB);

TS = força do eco no local analisado (célula) (dB).

Uma melhor abordagem sobre as perdas existentes no processo de emissão/recepção dos pulsos acústicos na coluna da água, implica em reescrever a Equação 2, conforme apresentado na Equação 3, e amplamente discutido por Landers *et al.* (2016):

$$SCB = MB + 20\text{Log}_{10}(\psi r) + 2r\alpha_w + 2r\alpha_s \quad (3)$$



Em que:

I – backscatter medido pelo equipamento (dB)

II – correção para a dispersão do pulso (m)

III – correção para atenuação causada pelas propriedades da água (dB/m)

IV – correção para atenuação causada pelas propriedades dos sedimentos (dB/m)

r = distância inclinada do transdutor à célula a ser medida (m);

ψ = correção para o campo próximo;

MB = backscatter medido pelo equipamento (dB);

WCB = backscatter corrigido para atenuações causadas pela água e pela dispersão do pulso;

SCB = backscatter normalizado/corrigido (dB);

α_w = coeficiente de absorção da água (dB/m);

α_s = coeficiente de absorção do sedimento (dB/m).

As correções e equacionamentos propostos acima, são amplamente abordados em estudos realizados por Downing *et al.* (1995) para correções do campo próximo; (SCHULKIN e MARSH, 1962) para correções do α_w quando considerando águas doces; (LANDERS *et al.*, 2016; TOPPING *et al.*, 2006; WOOD e TEASDALE, 2013) para correções considerando o α_s .

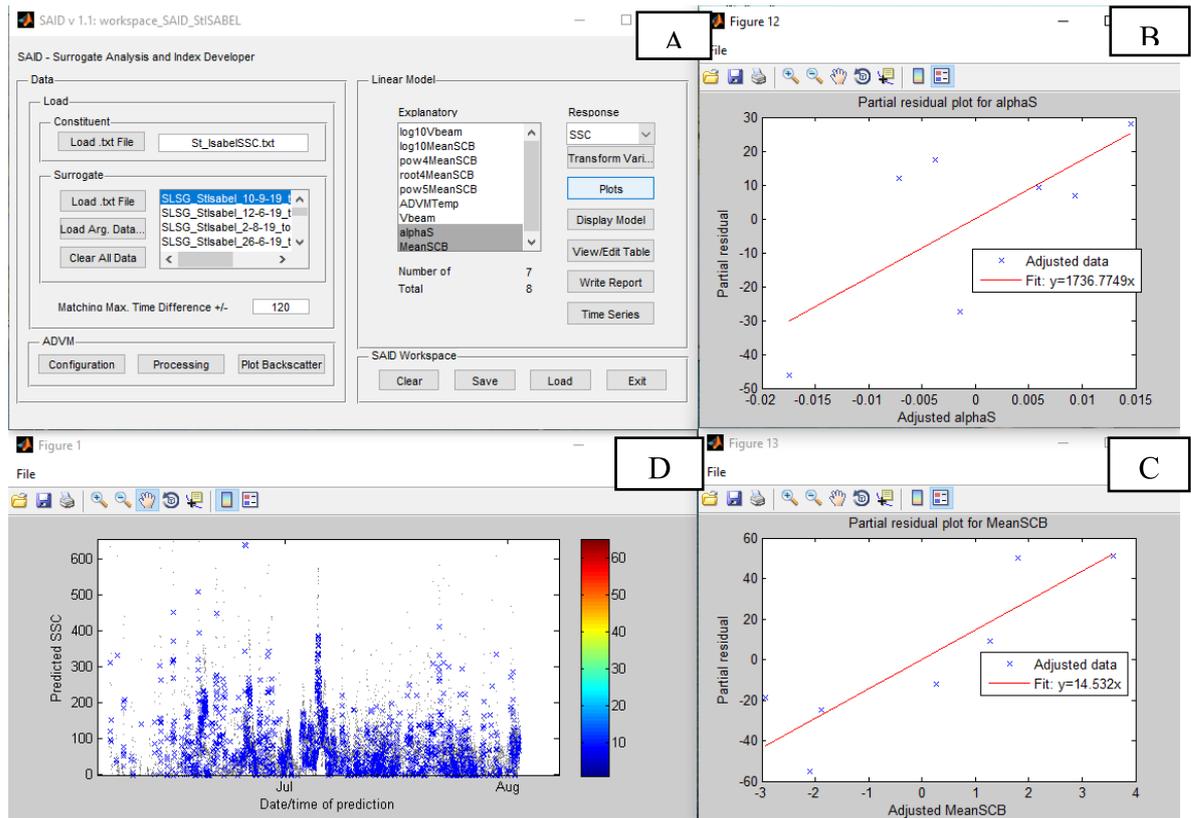


Figura 14 – Visão geral do software SAID, apresentando (A) a entrada e escolha das variáveis explanatórias, (B e C) desempenho dos modelos e (D) série temporal de CSS estimada.

Fonte: Próprio Autor.

Capítulo 4

Resultados e Discussões – Artigo 1

Journal of Hydroinformatics, 2023.

<https://doi.org/10.2166/hydro.2023.045>

Continuous discharge monitoring of the Mirim-São Gonçalo system by the index velocity rating curve method

GONÇALVES¹, George Marino Soares; BARTELS², Guilherme Kruger; SHIGIHARA³, Luciana Lima; BOEIRA⁴, Lukas dos Santos; COLLARES⁵, Gilberto Loguercio;

ABSTRACT:

The São Gonçalo Channel, located in the south of Brazil, is responsible for connecting the Mirim Lagoon to the Patos Lagoon, constituting the largest coastal lagoon system in Latin America. The assessment of its hydraulic variables is necessary given the importance of this channel for the region. Thus, this study aimed to evaluate the performance of the Index Velocity Rating Curve method (IVRC), from velocity measurements provided by horizontal static-type Acoustic Doppler Profilers (H-ADCPs). For the two sections analyzed in this study (GS1 and GS2), IVRC models were developed considering: the Integrated Velocity Cell method (IVC); the Multi-Cell Velocity method (MCV); joint use of IVC and MCV; stage-mean velocity rating curve. The results point to a r^2 of 0.986 (IVC), 0.998 (IVC+MCV), 0.534 (stage-mean velocity) at GS1, and r^2 of 0.986 (IVC), 0.995 (IVC+MCV) and 0.815 (stage-mean velocity) at GS2. In both GS1 and GS2, results showed significant gains - for different flow conditions - on continuous estimations of flow velocities and discharges when considering MCV+IVC method. The IVRC model that presented the best fit allowed the development of time-series of discharge in the studied sites with a high reliability.

Keywords: Index Velocity Rating curve, Bi-directional flows, Hydrodynamic, Acoustic Profiler

NOTATION:

SQRC – Stage-Discharge Rating curve method

IVRC - Index Velocity Rating Curve method

ADCPs - Acoustic Doppler Current profilers

H-ADCP - Horizontal Acoustic Doppler Current Profiler

SGC – São Gonçalo Channel

GS1 – Gauge Station 1

GS2 - Gauge Station 2

IVC - Integrated Velocity Cell method

MCV - Multi-Cell Velocity method

D-ADCP – Dynamic Acoustic Doppler Current Profiler

MAE - Mean Absolute Error

V_{D-ADCP} - Cross-section water velocity from the D-ADCP

V_{mean} – Cross-section water velocity from the IVRC model

V_{INDEX} - X-axis Index velocity

INTRODUCTION

Taking approximately 13% of the world's coastal zones, coastal lagoons are characterized by a shallow water body, generally oriented parallel to the coast and separated from the ocean by a land barrier often affected by natural and anthropogenic aspects (Kjerfve, 1994). The hydrodynamics in coastal lagoons is complex (Fiandrino *et al.*, 2017), influenced by different forcings such as winds, tides, precipitation, and river discharge. Understanding the physical, chemical, geological, and ecological dynamics of these environments is an important task for the better adoption of coastal management strategies and planning in coastal lagoon areas (Kjerfve, 1994).

The Patos-Mirim lagoon system is the largest coastal lagoon system in South America, having a 500 km long coastline (Oliveira *et al.*, 2019). This system is considered complex due to the strong influence of wind action on the water level dynamics (Costi *et al.*, 2018; Oliveira *et al.*, 2019) causing multidirectional and stationary flow, as backwater effects. The northeast wind pushes the water into the southern portion of the Mirim Lagoon and disturbs the patterns of seasonal variability, resulting in water level oscillations (Costi *et al.*, 2018), while the southerly winds push the water towards the north, raising the water level in that direction (Munar *et al.*, 2018). When this region is under southwest wind influences, the Mirim Lagoon flows towards the Patos Lagoon through the São Gonçalo Channel. Under northeast wind influence, the São Gonçalo Channel mouth's water level rises (Oliveira *et al.*, 2019), thus, causing inversive discharges.

All these reported dynamics, direct influence the quality and availability of water, as well as the pollutants residence time and navigability conditions in the Patos-Mirim lagoon system (Costi *et al.*, 2018). Therefore, the continuous monitoring of water levels and flow discharges on this environment, is relevant both from social and economic perspective, as well as, for the understanding of the hydrodynamic patterns of such complex system. Among the used methods for continuous monitoring of the flows and consequent discharge estimations, the Stage-Discharge rating curve (SQRC) is the most common and traditional approach (Cheng *et al.*, 2019; Muste and Houtink, 2017), and it is performed through a graphical and hydraulic analysis (Dias *et al.*, 2019; WMO, 1980). However, SQRCs are influenced by a minimum number of observations, and the stage-discharge relationship may vary over time, or even become impossible to determine especially in cases of backwater and inversive flow occurrence (le Coz *et al.*, 2008). Furthermore, in the SQRC approach there is no distinction between the different hydrograph phases (rising and falling), since under unstable flow conditions, the hysteresis effects may occur between these two (stage and discharge) variables used to construct this relationship (Muste *et al.*, 2020). In order to overcome the limitations imposed by the SQRC, the Index Velocity Rating Curve method (IVRC) that relates the velocity at a specific point, the cross-section's mean velocity and wetted area to the stage, where the discharge value is the result from multiplying these relations (Chen *et al.*, 2012). Thus, in complex flow situations, such as unstable and non-uniform flows, it is expected that the addition of permanent indexed velocity

measurements will improve discharge estimates, due to the inclusion of flow dynamics information (Cheng *et al.*, 2019).

While guidelines for developing SQRC are well known and extensively documented (e.g., (Rantz, 1982a; WMO, 1980), the application of the IVRC has gained greater attention in recent decades, especially with the joint use of Acoustic Doppler Current profilers (ADCPs) (Farahmand and Hamilton, 2016; Levesque and Oberg, 2012). Continuous flow velocity measurements became possible since the implementation of Horizontal Acoustic Doppler Current Profilers (H-ADCPs), in a riverbank fixed position (Vougioukas *et al.*, 2011). The H-ADCPs monitors the horizontal velocity profile in uniformly discrete intervals (cells) along the x-axis of the main beam (Vougioukas *et al.*, 2011), at a specific flow depth (Kästner *et al.*, 2018). Thus, the IVRC approach requires two models to estimate the discharge, one is the *stage-area* and the other is the *index velocity-mean velocity*. One of the main challenges in IVRC modelling is the model exploration and analysis in order to find the optimal regression model predictor(s) and model type (Farahmand & Hamilton, 2016).

In recent years, many studies have been carried out in the Patos-Mirim lagoon system aiming to analyze, among other aspects, its environment hydrodynamics (Costi *et al.*, 2018; Munar *et al.*, 2018; Oliveira *et al.*, 2019; Possa *et al.*, 2022), the Mirim Lagoon residence time (Silva *et al.*, 2019), spatial and seasonal water surface temperature variations (Munar *et al.*, 2019) and the Mirim Lagoon bed sediment composition (Vieira *et al.*, 2020). All these mentioned studies had used punctual in situ observed data (water velocity, current direction, discharge, stage) from the main Patos-Mirim lagoon system tributaries and São Gonçalo Channel, and also daily water level timeseries from this region in their simulations and analyses. These studies evidence the lack of continuous monitoring programs involving equipment deployments and accurate techniques. Thus, continuous, accurate, and robust information regarding flow velocities, water discharges, and water level variation on a semi-daily scale are timely over this region.

Given the importance of this environment, both in terms of social and economic development of this territory which compound an international transboundary basin shared between Brazil and Uruguay. There is still no research investigating the best approach for IVRC use at the Patos-Mirim lagoon system and São Gonçalo Channel

despite the great potential. Hence, this study assessed the performance of the IVRC method from applying velocity measurements provided by H-ADCPs, as a promising approach for continuous monitoring of flow velocities and discharges in a natural channel with typical complex flow characteristics. By analyzing discharge measurements under different flow conditions in two gauge stations along the São Gonçalo Channel, on which H-ADCPs continuously monitor both gauges, we intend to answer the following questions:

- Is the rating curve traditional approach suitable for representing these flow conditions?
- Which IVRC development methods are most promising for representing the mean flow velocity at both gauge stations?

MATERIAL AND METHODS

Characterization of the study area

The Patos-Mirim lagoon system is in the extreme south of Brazil and east of Uruguay, encompassing the Patos and Mirim lagoons (Figure 1). These two lagoons have a total area of 13,749 km² (Vieira *et al.*, 2020) where the Patos Lagoon comprises 10,000 km² (Munar *et al.*, 2019) and Mirim Lagoon 3,749 km² (Friedrich *et al.*, 2006; Toldo, 1994) and their only connection is made by the São Gonçalo Channel (SGC). The SGC is a 76.6 km long natural channel with mean depth of 6 m, maximum depth of 15 m, mean width of 250 m and a flood plain area that extends beyond the channel banks varying in range especially in the right banks (Figure 2), being the SGC responsible for draining the entire runoff from Mirim towards Patos. A dam and a navigation sluice were built in 1977 at the SGC to contain the backwater from Patos towards Mirim, thus avoiding saltwater intrusion in the southern portion of SGC and northern Mirim Lagoon. The mentioned dam operates opening/closing eighteen vertical moving gates, and its close/open periods depend on primarily the water levels and wind directions on this region. It guarantees freshwater for all the different uses in the southern portion of the watershed.

The Mirim-São Gonçalo Transboundary Basin (Figure 1) has an amount area of 62,250 km², of which 29,250 km² is attached to the Brazilian territory, including 21

municipalities and an estimated population of 770,308 inhabitants, where 88.8% of the population lives in the urban area and 11.2% in the country area (SEMA, 2021). In the Uruguayan side the basin has an area of 33,000 km², with a population of 154,699 which corresponds to 5% of the total population of the country, 92% living in urban areas and 8% in country areas (MVOTMA, 2017). The main tributaries in Brazilian territory are the Pelotas stream, the rivers Piratini and Jaguarão, and the SGC (Figure 1). On the Uruguayan side, the main rivers are, Cebollati, Tacuari, Sarandi and San Miguel. The climate of the Mirim-São Gonçalo basin region is characterized as humid subtropical (Cfa in the Köppen classification), with hot summers and well-distributed rainfall throughout the year (Peel *et al.*, 2007). The annual precipitation in this region is 1400 ± 296 mm, the annual reference evapotranspiration is 1080 ± 36 mm, and the annual mean temperature is 18.5 ± 0.5 °C (1971–2020).

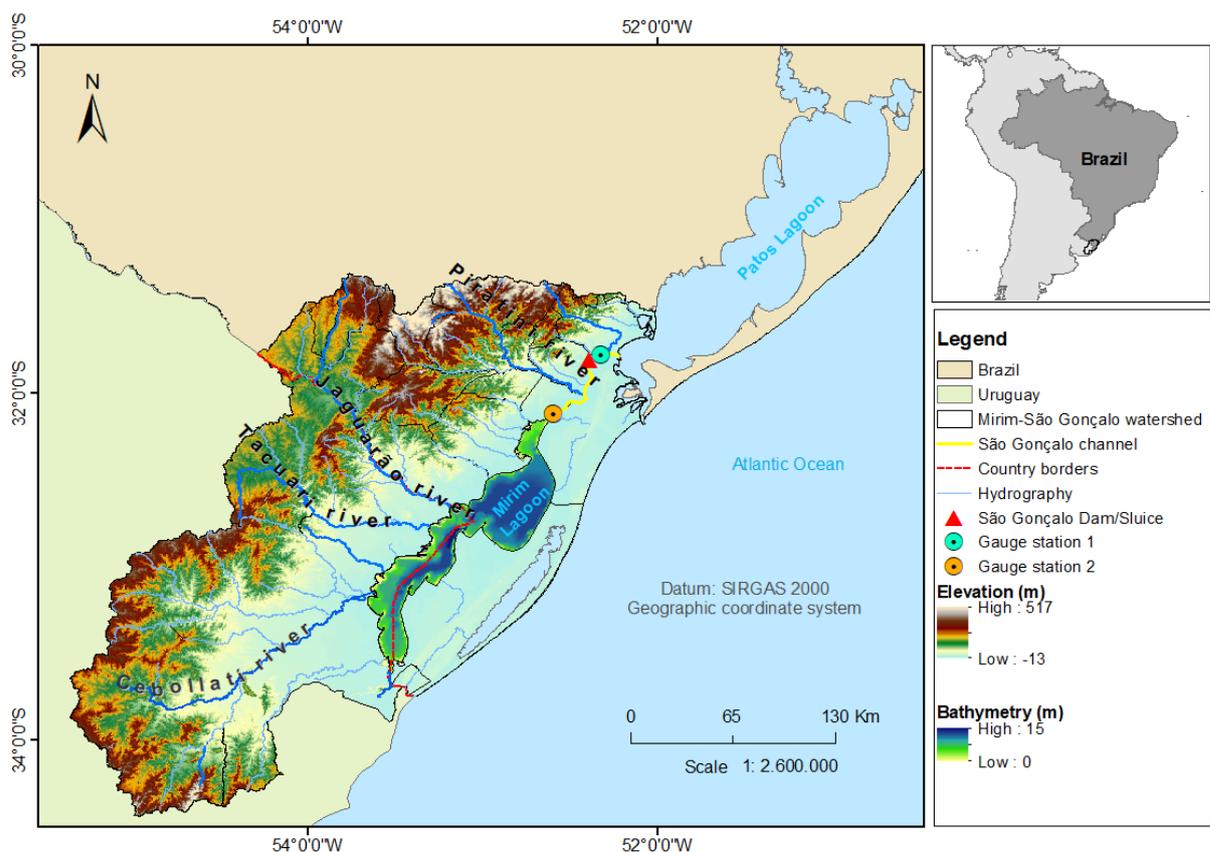


Figure 1 – The Mirim-São Gonçalo Transboundary Basin location and its main tributaries, studied cross-sections and the Patos-Mirim lagoon system.

The efforts to carry out the surveys were focused on two cross-sections (also called gauge stations) located at the two extremes of the SGC, 60 km apart from each other (Figure 2). The Gauge Station 1 (GS1) is in the Federal University of Pelotas, and it is about 10 km far from the SGC mouth, and this gauge has a mean width of 230 m and a mean depth of 6.1 m. The Gauge Station 2 (GS2) is in the Santa Isabel do Sul District, and it is about 4 km far from the Mirim Lagoon mouth, and this gauge has a mean width of 170 m and a mean depth of 7.6 m (an overview of GS1, São Gonçalo Dam/Sluice and GS2 are shown in Figure 3). In both monitored stations a channel bed bathymetric survey was conducted applying a single-beam echo sounder model SDE-28S designed by SOUTH™/South Co., which has 200 kHz of frequency, and for the bank areas, a total station was applied, thus constituting the cross-sections topobathymetry. The locations for the gauge's installations were chosen due to the accessibility and possibility of representing the SGC in its totality, as well for the equipment safety and the best hydraulic conditions as pointed out by Benson and Dalrymple (1967), Levesque and Oberg (2012) and Rantz (1982). Flow velocity measurements were not carried in floodplains, due to the low flow depth and the presence of massive vegetation in flooded areas. These areas were not considered in the estimates of the cross-sections wetted areas.

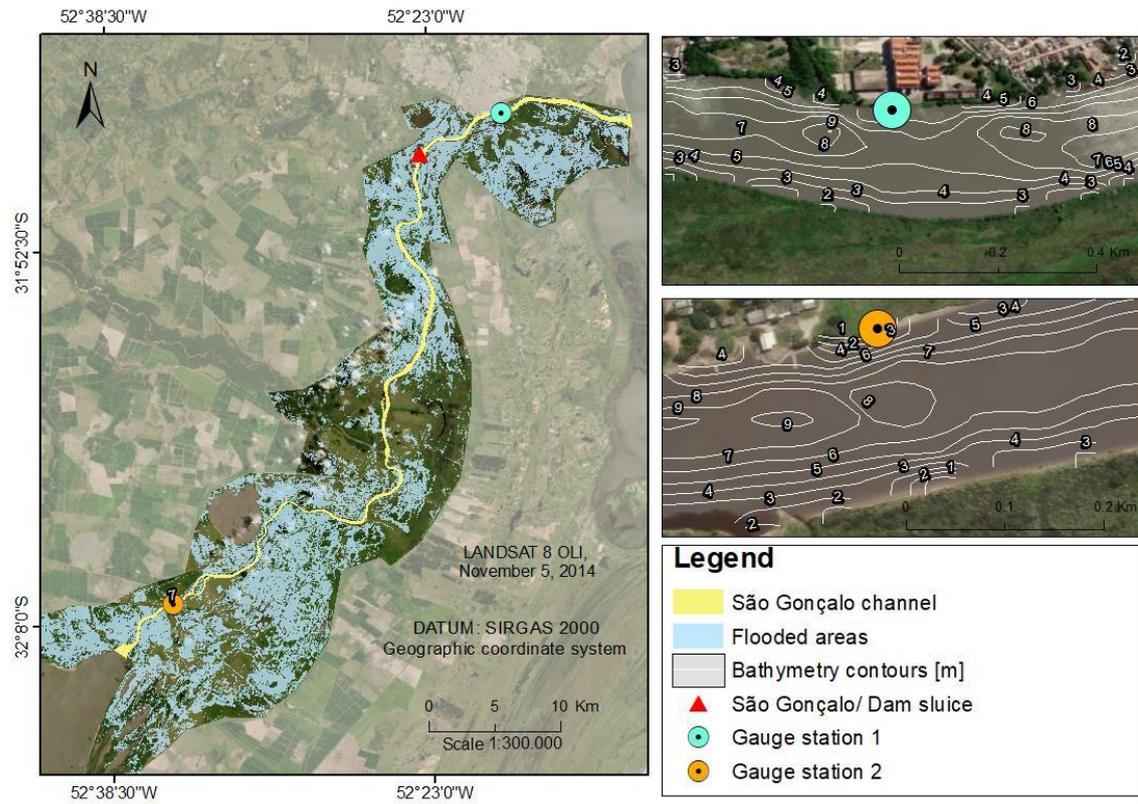


Figure 2 – Flooded areas on a wet period in São Gonçalo Channel, and locations of GS1, GS2, and São Gonçalo Dam/slucice. The white lines represent the bathymetry contours in meters next to GS1/GS2 areas.

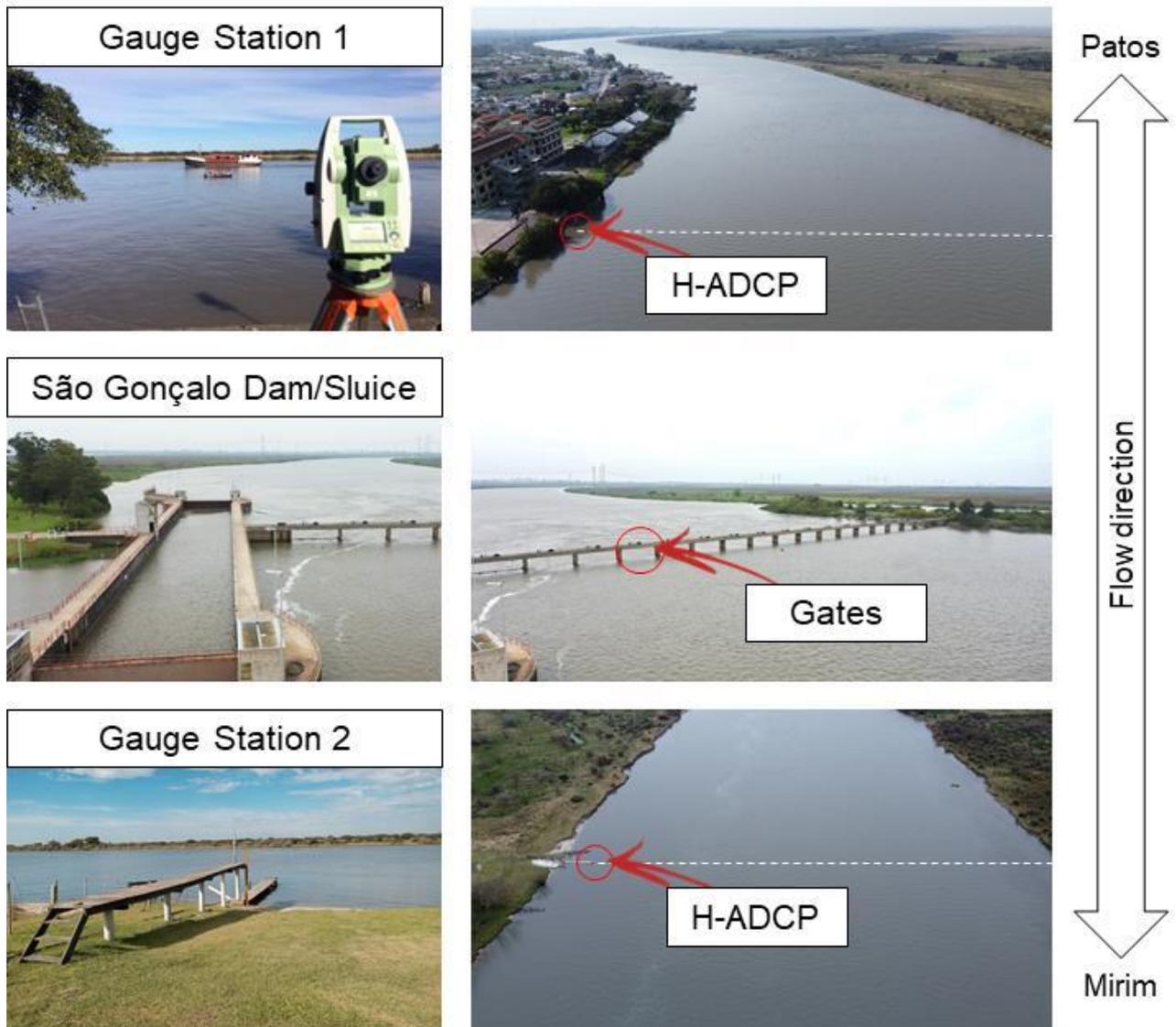


Figure 3 – Overview of the GS1, São Gonçalo Dam/Sluice and GS2. Highlighted are the H-ADCP locations, the 18 gates of the Dam/Sluice, and the predominant flow direction at the three sites.

Description of study site and ADCP installation

Water level and velocity were monitored on both gauge stations with H-ADCPs designed by SonTek™/YSI, model Argonaut Side-Looker (SL) of 500 kHz. The gauge stations were commissioned in October 2015 at GS1 and March 2018 at GS2. The H-ADCPs have 2 transducers and are mounted at one of channel bank, aiming ‘side-looking’ towards the channel, providing a velocity measurement with accuracy of $0.005 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. The horizontal beams width is 1.4° and its maximum profile long range is 120 m. The H-ADCPs comprise a built-in temperature sensor, a vertical beam and a pressure sensor also used to monitor the water level. The equipment is direct current-powered

through a solar panel and battery (~20 m of cable between instrument and energy system at GS1 and, ~70 m at GS2), connected to a voltage controller to avoid voltage fluctuations. The H-ADCP is attached on a mobile iron structure, which allows the H-ADCP to be moved vertically, and this mobile structure moves over an iron support fixed at the left riverbank side wall and at the channel bed. The instrument operates recording in both Integrated Velocity Cell (~ 100 m) and Multi-cell profile (10 m each) modes, at the same time (Figure 4). The data were recorded at 900 s intervals from averaging during 300 s. All the recorded data are processed and downloaded by the user using the software ViewArgonaut™. The setup configuration applied during GS1 and GS2 H-ADCPs installation are shown next on Table 1.

Table 1 – Aspects setted up on GS1 and GS2 H-ADCPs.

	GS1	GS2
Pitch [degrees]	-1.5	-0.8
Level [m]	-0.37	-0.34
Cell begin [m]	2	2
Cell end [m]	120	100
Cell size [m]	10	10
Blanking distance [m]	10	4

It is worth note the blanking distance refers the use of the Multi Cell Velocity (MCV) approach; cell begin refers the use of the Integrated Velocity Cell (IVC) (SonTek, 2009), being these two completely different approaches, which considers different horizontal profile measured portions (Figure 4). The cross-sections topobathymetry are presented in Figures 5A and 5B, respectively, with the min/max stage observed during the studied period.

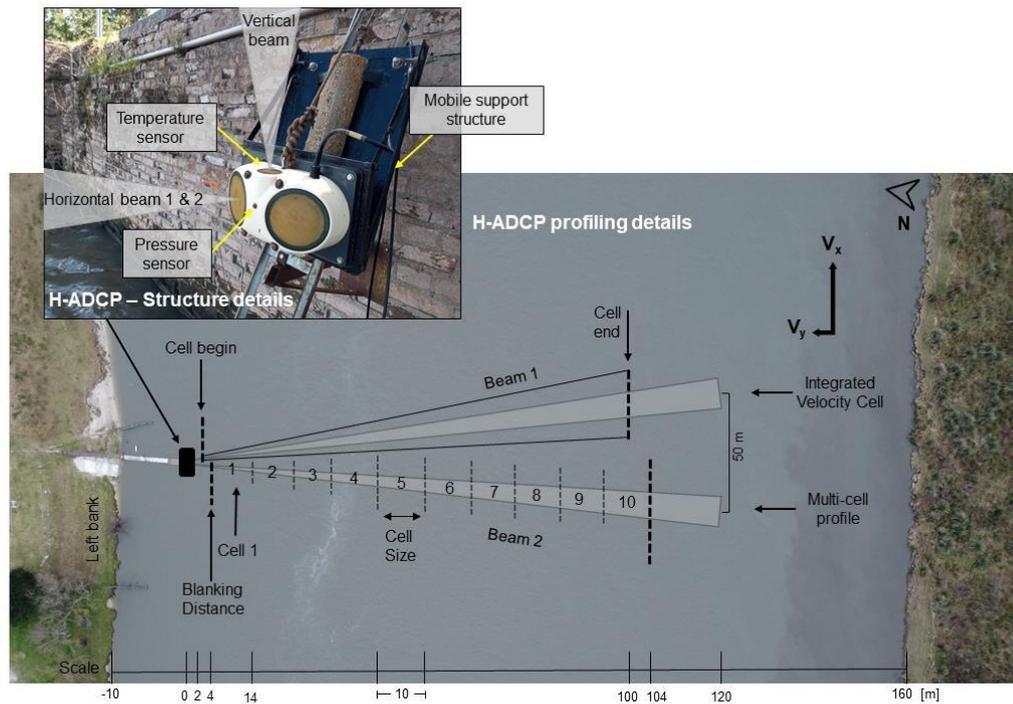


Figure 4 – H-ADCP profiling details (distances refers to GS2) showing the Integrated Velocity Cell (IVC) and Multi-cell Velocity (MCP) profile methods. In detail, H-ADCP structure and support installation.

The MCP itself can look at each of the 10 cells along the cross-section from the two H-ADCP horizontal beams, allowing a more precise and discretized assessment of the x-axis velocity distribution over the horizontal profile. Considering the MCP, each cell from 1 to 10 is a mean value from beam 1 and 2, for example, x-axis velocity into Cell 04 is going to be the mean x-axis velocity from Cell 04 beam 1 and Cell 04 beam 2. The x-axis velocity of Cell 04 on GS2 (see Figure 4) is a 10 m long portion starting 34 m far from the H-ADCP (considering blanking distance equals to 4 m + 10 m for each of the cells 1 to 3), instead of the IVC which considers a 98 m portion along the cross-section (considering cell start and cell end as 2 m and 100 m, respectively).

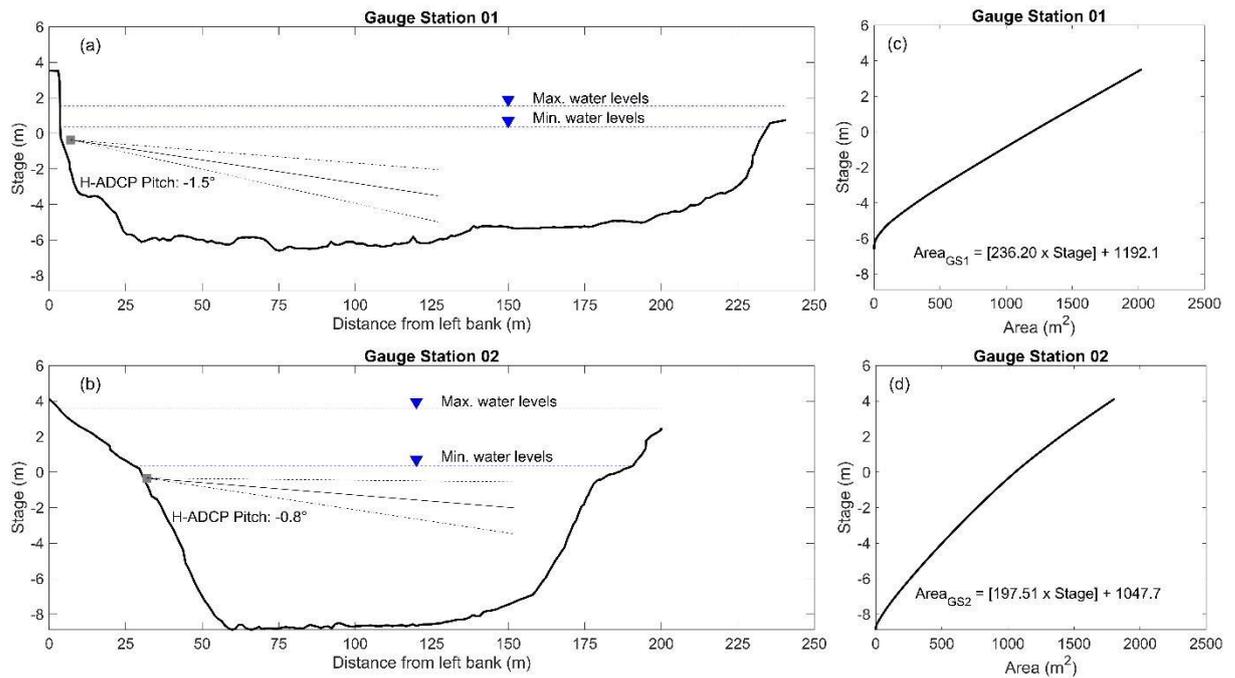


Figure 5 – The cross-sections topo bathymetric from a) GS1, b) GS2, with the H-ADCPs horizontal angles (pitch) of installation, and the stage-area rating curves for GS1, and GS2.

The cross-sectional discharge at the gauge stations were also measured by a Dynamic Acoustic Doppler Current Profiler (D-ADCP). At GS1 there were 27 surveys between October 2015 and June 2019, and at GS2 there were 22 surveys between March 2019 and November 2019 (Tables 2, S1 and S2). These D-ADCP data are only used on the IVRC development step which needs cross-section mean velocity (V_{D-ADCP}) punctual data. The discharge measurements were carried out with a D-ADCP designed by Sontek™/YSI RiverSurveyor™ M9 model, built-in with nine transducers, 4x 3 MHz and 4x 1 MHz both responsible for measuring the velocity and flow direction with $0.002 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ of accuracy, and 1x 0.5 MHz transducer for bathymetry purpose. In addition, the D-ADCP has a temperature sensor applied for acoustic pulse velocity instantaneous correction, as well as an internal compass. To ensure data consistency the measurements were post-processed by QRev™ software (Mueller, 2016), which allow us to analyze deeply the collected velocity profiles. The D-ADCP collected data used bottom tracking as reference for position. Following recommended by (Mueller *et al.*, 2013), each measurement was made by at least two pairs of reciprocal transects. Moreover, stationary moving-bed tests were performed on GS1 and GS2, under different flow conditions. On both sites no moving-bed characteristics were detected

considering the discharge measurements performed, following criteria pointed out by (Mueller *et al.*, 2013).

Index Velocity Rating Curve method (IVRC)

According to (Rantz, 1982b) the IVRC approach separates the cross-section area and the mean velocity; the cross-section area is obtained from observing the stage through a linear regression between these two; the flow velocity (V_{mean}) is obtained from the relationship between the cross-section mean velocity ($V_{\text{D-ADCP}}$) and the indexed velocity (it can be a random point at the cross-section, usually the x-axis velocity, perpendicular to the flow). While considering H-ADCPs the indexed velocity (V_{INDEX}) applied to the IVRC development may be the beam integrated velocity from cell begin to cell end (IVC), as well as, it may be the discretized average velocity registered by a single cell or multiple cells (MCV), as illustrated in Figure 4. In turn, the $V_{\text{D-ADCP}}$ and V_{INDEX} relationship is inherent for each studied cross-section, and it can consider the use of the IVC, the MCV, or MCV+IVC on the development of the IVRC.

The IVRC quality is dependent on the number of $V_{\text{D-ADCP}}$ measurements performed and the hydraulic conditions variability observed, that is, the greater the number of measurements and the greater the variability observed (measurements in dry and flood season period, high stage, low flow velocity, high flow velocity, inverse flows, backwater, and bi-directional flows occurrence, etc.), the greater the capacity of the IVRC models to represent real flow conditions on the channel.

The assessment of the IVRC models were based on the mean absolute error (MAE) and the coefficient of determination (r^2). Also, MAE and r^2 were considered for the MCV cells selection at each gauge station too. Further statistical performances from the best IVRC models developed are detailed in Supplementary Information – Table S3.

Hydraulic Variables

From the use of H-ADCP and D-ADCP the necessary hydraulic variables for IVRC modelling, on both GS1 and GS2, were obtained. The $V_{\text{D-ADCP}}$ from the D-ADCP measurements are only used for IVRC models development. The V_{INDEX} from the H-ADCP, even the MCV and IVC on the x-axis, is used for IVRC models developments

and then for further V_{mean} estimations. The topobathymetric survey is only used for the Stage x Area relationship and it was developed into the software AreaComp 1 - Version 1.13 (Lant and Mueller, 2012) widely used from United States Geological Survey (USGS) at their monitored stations, following good practices mentioned on (Levesque and Oberg, 2012). The stage is monitored by the H-ADCP (obtained from the pressure sensor/vertical beam) and further applied to estimate the cross-section wetted area (Figure 5).

To sum up the study collected data are as followed: i) discharge measurements from the D-ADCP and ii) post-processed on QRev® to obtain the $V_{D\text{-ADCP}}$, then applied on IVRC developing models; as well from the H-ADCP iii) continuous V_{INDEX} were collected and iv) post-processed on ViewArgonaut® to obtain IVC and MCV data, then applied on IVRC developing models; while v) the H-ADCP monitors the stage, and vi) a topobathymetric survey it was conducted, both vii) applied to Stage x Area rating curve developed on AreaComp software; the results are viii) continuous V_{mean} estimated data and ix) continuous Area estimated data, then x) multiplying these two results in an estimated Discharge Time-Series for GS1 and GS2. The steps followed herein are presented in Figure 6 as a flowchart.

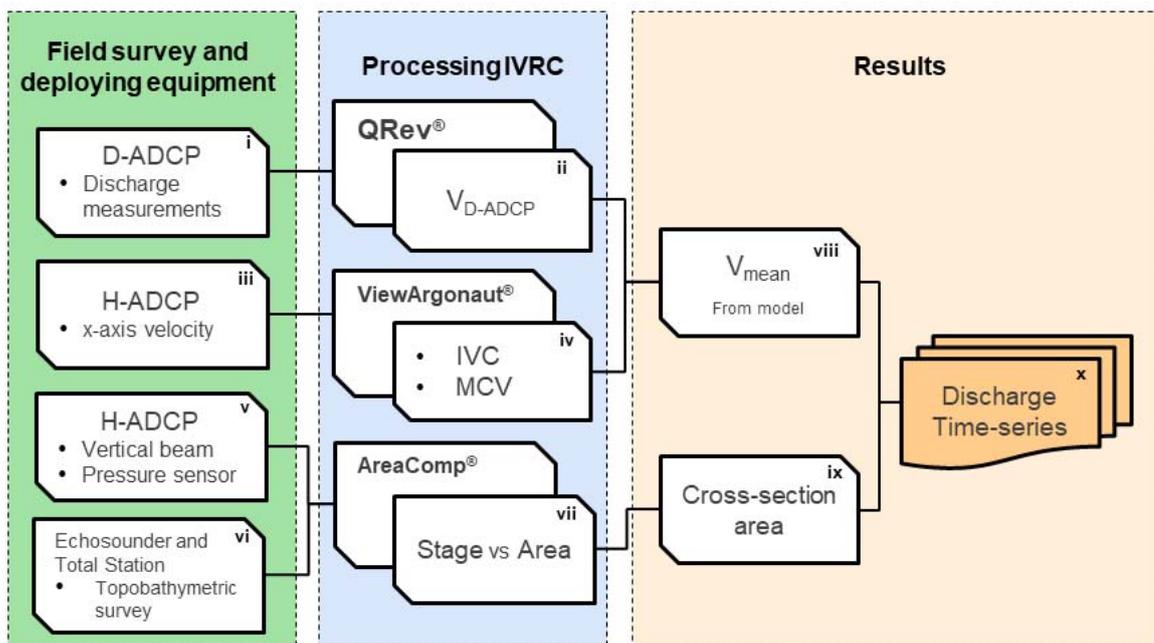


Figure 6 – Main followed steps for data acquisition, data processing and results generating.

RESULTS

From the 27 D-ADCP surveys performed at GS1 and 22 performed at GS2 the max/min observed for discharge and V_{D-ADCP} are shown in Table 2.

Table 2 – Min/max discharges [$m^3.s^{-1}$] and V_{D-ADCP} [$m.s^{-1}$] observed for GS1 and GS2.

	GS1		GS2	
	Discharge	V_{D-ADCP}	Discharge	V_{D-ADCP}
Minimum	157.21	0.12	-269.83	-0.25
Maximum	1861.79	1.26	1384.43	0.85

These results shown the D-ADCP discharge measurements were capable to cover a decent amplitude of data over the year. At GS2 were identified some moments with negative flow and/or with stationary flow ($4 m^3.s^{-1}$ and $0.0042 m.s^{-1}$). Over the year, for both gauge stations, the flood period was identified as between September and January, and the drought period as between March and June.

The detailed information from each discharge measurement is in Supplementary Information.

São Gonçalo Channel IVRC assessment

The relationship between V_{D-ADCP} and V_{INDEX} in both gauge stations was evaluated from three different IVRC approaches: (i) linear regression models considering the IVC method; (ii) linear regression models considering the MCV method; (iii) multiple linear regression models considering both IVC and MCV. As mentioned before, considering the MCV approach, the chosen cells were taken based on the smallest MAE and the r^2 closest to 1 (see all the tested models and cell combinations/performances in Supplementary Information - Tables S3). Next are shown for GS1 and GS2 the best fit for each of the three applied approaches (Figures 7, and 8). To identify and demonstrate the complex flow conditions occurring in the SGC, we also developed a linear regression between stage and V_{D-ADCP} (similar to a SQRC).

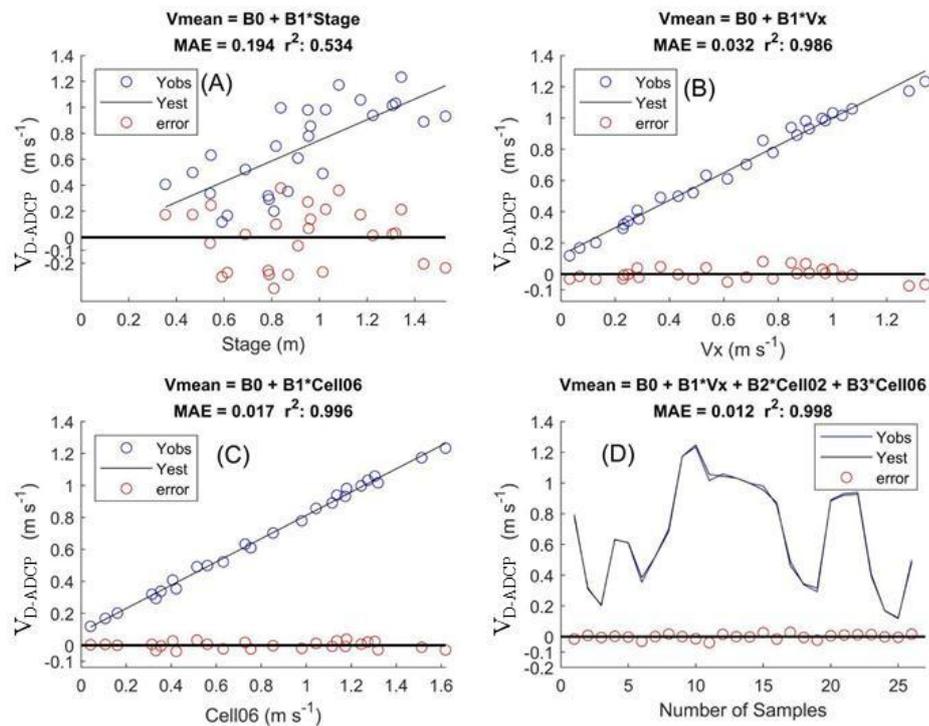


Figure 7 - Regression models to estimate the mean velocity for GS1 using (A) stage (similar to a SQRC), (B) V_{INDEX} (considering IVC), (C) V_{INDEX} in Cell 6 (considering MCV) and (D) V_{INDEX} on IVC and also the cells 2 and 6.

From the GS1 models (Figure 7) it seems the linear regression using Stage (Figure 7a) as a predictor variable has showed the worst performance when compared to the others, resulting in a MAE of $0.194 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ and, r^2 of 0.534. However, the IVC and MCV models (Figures 7b and 7c) both presented similar results with small error (MAE of $0,032 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ and $0,017 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, respectively) and r^2 of 0.986 and 0.996, respectively. However, the best fit model was obtained when considering MVC+IVC (Cell 02 and Cell 06 – Figure 7d) in a multiple linear regression model, with r^2 of 0.998 and MAE of $0.012 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Comparing the MCV+IVC model, it represents a MAE of 90% less than the SQRC approach, MAE 60% less than the IVC model, and MAE 30% less than the MCV model itself.

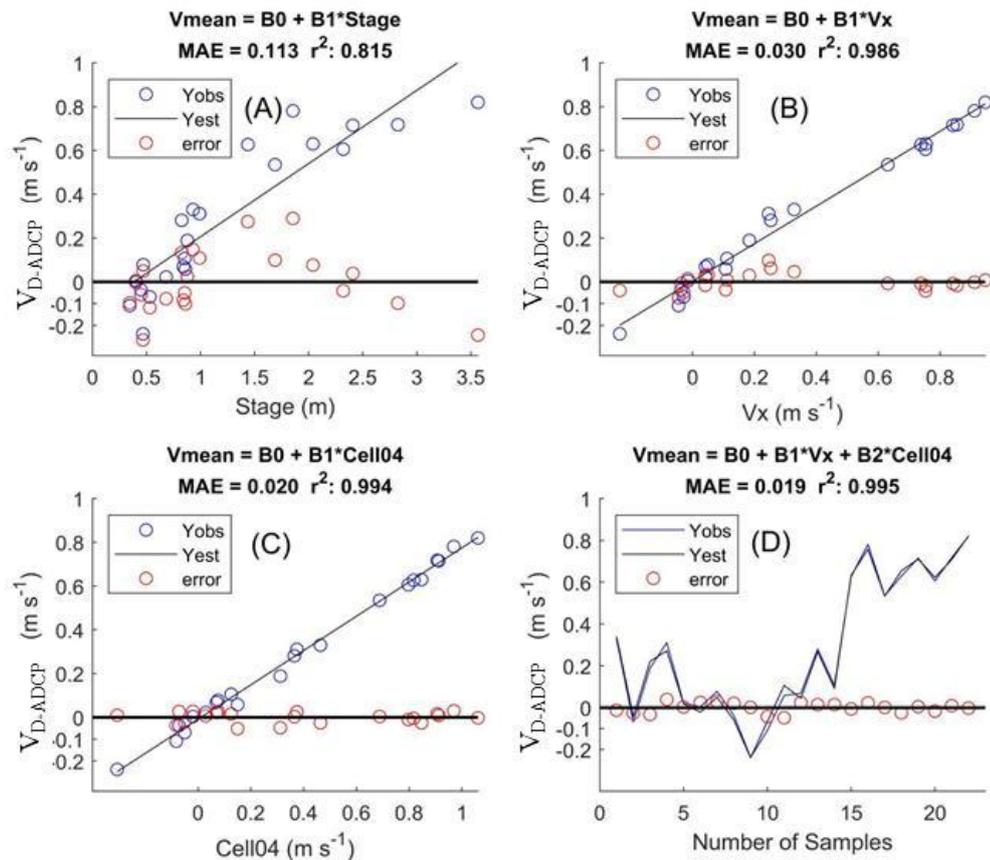


Figure 8 - Regression models to estimate the mean velocity for GS2 using (A) stage (similar to a SQRC), (B) V_{INDEX} (considering IVC), (C) V_{INDEX} in Cell 4 (considering MCV) and (D) V_{INDEX} on IVC and also the Cells 4.

At the GS2 the IVRC model considering Stage (Figure 8a) as predictor variable performed worst, showing asymmetric error distribution and hysteresis effects, as well MAE of $0.113 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ and r^2 of 0.815. However, the GS2 IVRC models results considering the IVC (Figure 8b), MCV (Figure 8c) and MCV+IVC (Cell 4 - Figure 8d) presented better results compared to the Stage approach (Figure 8a). For GS2 the best fit was the IVRC model performed from multiple linear regression with two predictor variables (MCV+IVC considering the Cell 4), which presented a MAE 80% less than the SQRC approach, MAE 37% less than the IVC model, and MAE 5% less than the MCV model itself.

More details from each of the developed models for GS1 and GS2 are presented in Supplementary Information.

Discharge Time-Series

The Stage, V_{INDEX} considering IVC, V_{INDEX} considering MCV, and discharge time series for GS1 and GS2 are shown in Figure 9 and Figure 10, respectively. The lack of information on both gauges are due the problems that both H-ADCPs presented during the monitored period, as power cord and data loggers problems. Given the complex flow conditions at SGC, it is reasonable not to use any method for gap-filling the missing data.

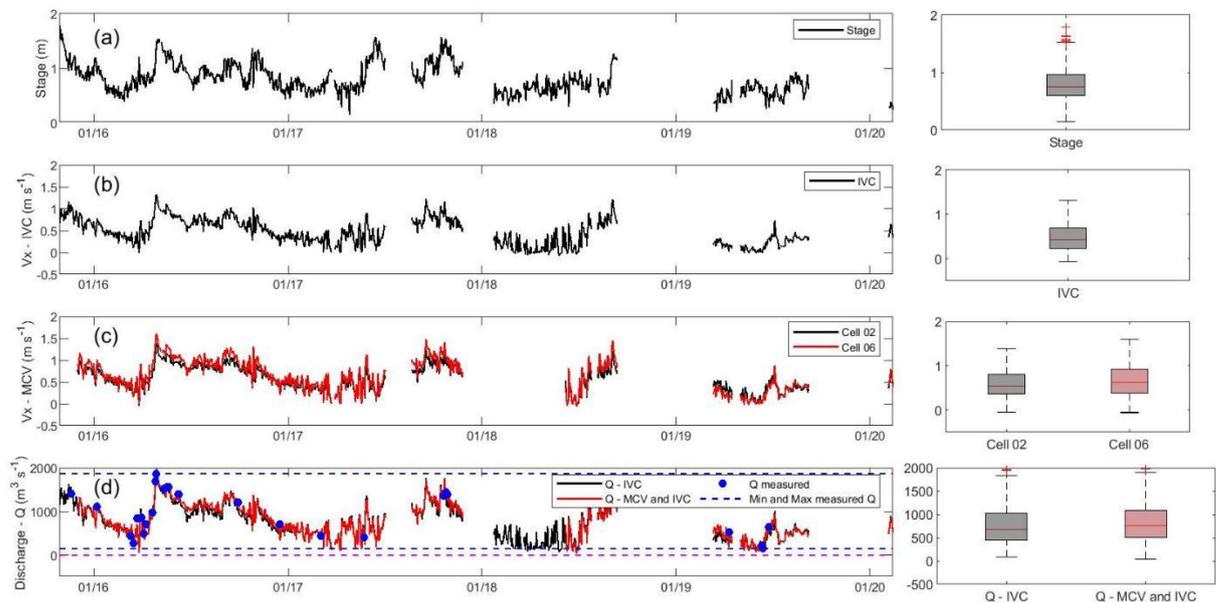


Figure 9 - Time-series and box plots representing data variation developed for GS1 showing a) stage, b) V_{INDEX} (considering IVC), c) V_{INDEX} in Cell 02 and Cell 06 (considering MCV), d) discharges applying IVC and MCV+IVC.

The H-ADCP estimated discharge time-series for GS1 (Figure 9d) had fitted in the min/max D-ADCP discharge measurements for almost the entire period, suggesting the SGC variations were covered in almost its totally.

The results suggest that, for GS1, the IVRC model had performed significantly. The minimum and maximum discharge estimations from the MCV+IVC model (Figure 9d – red line) were $43.211 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ and $1980.017 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, respectively, as well, the minimum and maximum discharge estimations from the IVC model (Figure 9d – black

line) were $78.881 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ and $1967.831 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, respectively. In both situations no periods of inversive flow were registered.

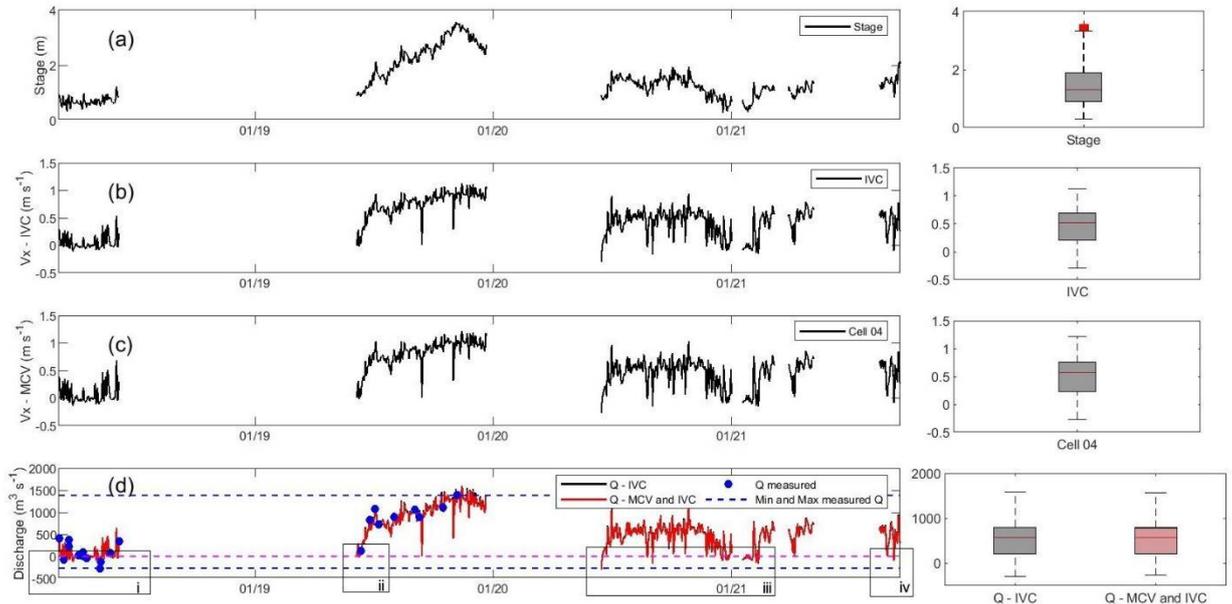


Figure 10 - Time-series and box plots representing data variation developed for GS2 showing a) stage, b) V_{INDEX} (considering IVC), c) V_{INDEX} in Cell 04 (considering MCV), d) discharges applying IVC and MCV+IVC. Highlighted four inversive flow moments captured.

At GS2 the H-ADCP discharge estimations (Figure 10d) had fitted in the min/max D-ADCP discharge measurements for almost the entire period, even though the D-ADCP data are concentrated in the first half of the analyzed period. The results of time-series suggest the SGC variations were covered in its totally.

The results herein found for GS2 clearly suggest the IVRC model had performed significant, with minimum and maximum discharge estimations from the MCV+IVC model (Figure 10d – red line) as $-270.675 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ and $1570.650 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, respectively, as well, the minimum and maximum discharge estimations from the IVC model (Figure 10d – black line) as $-296.727 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ and $1590.758 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, respectively.

At GS2 the results had pointed out four main moments with negative discharge estimation values, being the minimum framed as: i) $-122.9 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, ii) $-22 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, iii) $-270.7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (the maximum inversive flux registered in this study), iv) $-147.2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (Figure 10d). At none of the four inversive flow moments the Stage variable registered negative values.

Observed x Estimated regression for discharge values

The relationship between observed (D-ADCP discharge) and estimated (H-ADCP discharge from the best fit IVRC model) values and its residuals, are next presented for GS1 and GS2 (Figure 11). For the GS1 the IVRC model applied is the one which considers the MCV+IVC (cells 2 and 6), as presented in Figure 7d. For the GS2 the IVRC model applied is the one which considers MCV+IVC (Cell 4), as presented in Figure 8d.

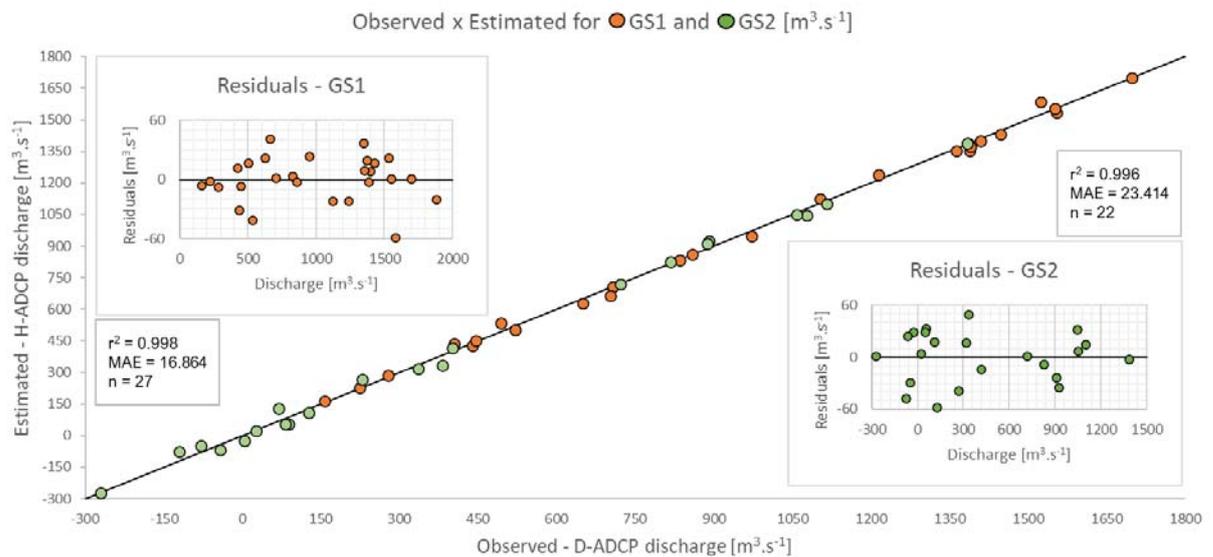


Figure 11 – Regression between observed (D-ADCP surveys) and estimated (for H-ADCP from the best fit model) discharge values and its residuals for GS1 and GS2.

The results of residuals from the relationship between observed and estimated discharges at GS1 (Figure 11) had shown homogeneous residual distribution for low and high flow discharges, with MAE of $16.864 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (1.71% of the mean, 0.90% of the maximum, and 10.33% of the minimum estimated discharges for observed moments), with $43.211 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ as the minimum estimated in this study by the MCV+IVC model at GS1.

At GS2 the residual (Figure 11) from the relationship between observed and estimated discharges shown a homogeneous distribution with MAE of $23.414 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (5.60% of the mean, 1.69% of the maximum, and 8.64% of the minimum estimated discharges for observed moments), with $-270.675 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ as the minimum estimated in this study by the MCV+IVC model at GS2.

DISCUSSION

The D-ADCP surveys performed to obtain in situ discharge measurements were conducted in both monitored gauge stations during the period of November 2015-2019, compounding a total of 49 campaigns (Tables 1, SP1 and SP2) and covering most of the hydraulic situations that occurs at São Gonçalo channel, as flood/drought moments, and bi-directional/stationary flows. The amplitude of discharge measurements helps for better performance of the IVRC models, for example, on the development of the GS2 IVRC models which considered negative D-ADCP discharge measurements ($-41.761 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, $-269.83 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, and $-120.938 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$), registering the occurrence of inversive flows, typical from complex flow channels.

From the IVRC developed models (shown in Figures 7 and 8) the MCV+IVC approach had shown better performance compared to the IVC approach, noticed in GS1 and GS2. The SQRC had shown the worst performance compared to MCV+IVC and IVC models at GS1 and GS2. Thus, the results clearly suggest the use of SQRC models are not ideal for the SGC characteristics and its complex flow conditions, despite prior studies (Oliveira *et al.*, 2015; Jung *et al.*, 2020), due to the inability of the SQRC approach in good estimating discharges in moments with bi-directional/inversive flow, which occurs in SGC.

Still from the IVRC models, in addition to the small error presented from the IVC and/or MCV+IVC approaches (Figures 7 and 8) its distribution is quite symmetrical for low and high flow velocities, and it is corroborated by the relationship between Observed and Estimated discharge values and its residues (Figure 11) which shown a homogeneous residual distribution with MAE of $16.864 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ for GS1 and $23.414 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ for GS2. This fact evidences the efficiency of applying the three approaches for the IVRC model development to estimate the V_{mean} and then estimate discharges in both gauge stations.

From the time-series results the discharge estimations applying IVRC models on both gauge stations presented reasonable performance. The time-series were capable of estimating discharges under the whole amplitude of SGC hydraulic conditions and in situ observed discharge data. The similarity of model performances when considering the IVC and MCV+IVC approaches allows the user to choose between

these while guarantee high degree of certainty (Figures 9d and 10d), even when out of observed data moments.

What was found here make it clear the GS2 discharge estimation time-series from the analyzed period can represent more comprehensive flow conditions compared to the other studies carried out in the SGC, being registered negative flows at GS2, that is, flow direction from Patos towards Mirim, as highlighted in Figure 10d. According to a study done by (Oliveira *et al.*, 2015), these authors performed discharge measurements at GS2 and found positive discharges from $98.54 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ up to $1503 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ during the period between January 2009 and December 2011. In another study, (Oliveira *et al.*, 2019) had found a flow discharge range from $300 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ up to $2250 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ analyzing 2002 year, nonetheless its results are obtained from modeling in the SGC. Despite the herein found maximum values are under the described in prior studies, we have found no conclusive evidence that these discharge magnitudes really occur at SGC, neither from the D-ADCP measurements nor the H-ADCP registered data.

CONCLUSIONS

From the developed models, a time-series for predicted discharges for the two gauge stations in São Gonçalo Channel was generated with a high degree of certainty. They are based on the IVRC principles and applied to estimate mean flow velocity, using the hydraulic variables monitored from an H-ADCP. The IVRC models considered the V_{INDEX} as Integrated Velocity Cell in the horizontal beam (IVC approach), and the V_{INDEX} as discretized Multi Cell Velocity (MCV approach), both on x-axis direction, through linear and multiple linear regression models. The rating curve traditional approach, which is based only on stage to predict the discharge, is not representative for the São Gonçalo channel, and is therefore not applicable under these conditions.

All three IVRC development methods presented good performances in estimating mean flow velocity at both gauge stations. We highlight the better performance from the combined use of IVC and MCV for developing IVRC multiple linear regression models. In these IVRC models, we have found smaller errors, in addition to a

symmetrical distribution of errors, both for low and high flow velocities. Based on these assumptions, for the reproducibility of this work, we suggest for other authors to pay attention if there is no interference at any point of the beams like contact with the river/channel bed and/or water surface, which may invalidate the use of some cells, as well as, to try all the valid cells combinations to find the better IVRC performance.

For the analyzed period, it was possible to register moments with inversive flows, even during D-ADCP discharge measurements and during H-ADCP discharge monitoring (after applying the best fit IVRC model for discharge estimations), evidencing the better performance of the IVRC approach over the SQRC approach and the São Gonçalo Channel complex characteristics.

Due to the results, we strongly suggest keeping the hydraulic variables monitored at São Gonçalo Channel. Primarily, for better understanding its complex water behavior, and better develop IVRC understanding from natural and complex channels, only possible from long-term monitoring of flow characteristics.

ACKNOWLEDGEMENTS

We thank NEPE-HidroSedi at the Federal University of Pelotas (UFPEl) for field surveys using the D-ADCP and providing the time series obtained with the H-ADCP. We thank the Mirim-São Gonçalo Basin Development Agency for proposing the study theme that is so important for better understanding the complex hydrodynamics of the SGC. L.S.L. received support from by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Finance Code 001.

REFERENCES

- Benson, M.A., Dalrymple, T., 1967. GENERAL FIELD AND OFFICE PROCEDURES FOR INDIRECT DISCHARGE MEASUREMENTS.
- Chen, Y.C., Yang, T.M., Hsu, N.S., Kuo, T.M., 2012. Real-time discharge measurement in tidal streams by an index velocity. *Environmental Monitoring and Assessment* 184, 6423–6436. <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2430-y>
- Cheng, Z., Lee, K., Kim, D., Muste, M., Vidmar, P., Hulme, J., 2019. Experimental evidence on the performance of rating curves for continuous discharge estimation in complex flow situations. *Journal of Hydrology* 568, 959–971. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.021>
- Costi, J., Marques, W.C., Kirinus, E. de P., Duarte, R. de F., Arigony-Neto, J., 2018. Water level variability of the Mirim - São Gonçalo system, a large, subtropical, semi-enclosed coastal complex. *Advances in Water Resources* 117, 75–86. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2018.05.008>
- Dias, L.C., Fernandes, L.L., Lopes, D.F., 2019. Development and Extrapolation of Rating Curves in Amazon. *Revista Brasileira de Geografia Física* 12, 2285–2301.
- Farahmand, T., Hamilton, S., 2016. Computing continuous record of discharge with quantified uncertainty using index velocity observations: A probabilistic machine learning approach, *Geophysical Research Abstracts*.
- Fiandrino, A., Ouisse, V., Dumas, F., Lagarde, F., Pete, R., Malet, N., le Noc, S., de Wit, R., 2017. Spatial patterns in coastal lagoons related to the hydrodynamics of seawater intrusion. *Marine Pollution Bulletin* 119, 132–144. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.03.006>
- Friedrichf, A.C., NiencheskiJ, L.F., Santos, I.R., 2006. Dissolved and Particulate Metals in Mirim Lagoon, Brasil-Uruguayan Border. *Journal of Coastal Research* SI 39, 1036–1039.
- Kästner, K., Hoitink, A.J.F., Torfs, P.J.J.F., Vermeulen, B., Ningsih, N.S., Pramulya, M., 2018. Prerequisites for Accurate Monitoring of River Discharge Based on Fixed-Location Velocity Measurements. *Water Resources Research* 54, 1058–1076. <https://doi.org/10.1002/2017WR020990>
- Kjerfve, B., 1994. Coastal Lagoons, in: Elsevier Oceanography Series. pp. 1–8.
- Lant, J., Mueller, D.S., 2012. Stage Area Rating Application-AreaComp2.
- le Coz, J., Pierrefeu, G., Paquier, A., 2008. Evaluation of river discharges monitored by a fixed side-looking Doppler profiler. *Water Resources Research* 46. <https://doi.org/10.1029/2008WR006967>
- Levesque, V.A., Oberg, K.A., 2012. Computing discharge using the index velocity method. U.S. Dept. of the Interior, U.S. Geological Survey, Reston, Virginia.
- Morlock, S.E., Nguyen, H.T., Ross, J.H., 2002. Feasibility of Acoustic Doppler Velocity Meters for the Production of Discharge Records from U.S. Geological Survey Streamflow-Gaging Stations. Indianapolis, Indiana.

- Mueller, D.S., 2016. QRev-Software for Computation and Quality Assurance of Acoustic Doppler Current Profiler Moving-Boat Streamflow Measurements-User's Manual for Version 2.8. Reston, Virginia. <https://doi.org/10.3133/ofr20161052>
- Mueller, D.S., Wagner, C.R., Rehmel, M.S., Oberg, K.A., Rainville, F., 2013. Measuring Discharge with Acoustic Doppler Current Profilers from a Moving Boat. Reston, Virginia. <https://doi.org/10.3133/tm3A22>
- Munar, A.M., Cavalcanti, J.R., Bravo, J.M., da Motta-Marques, D., Fragoso, C.R., 2019. Assessing the large-scale variation of heat budget in poorly gauged watershed-shallow lake system using a novel integrated modeling approach. *Journal of Hydrology* 575, 244–256. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.025>
- Munar, A.M., Cavalcanti, J.R., Bravo, J.M., Fan, F.M., Motta-Marques, D. da, Fragoso, C.R., 2018. Coupling large-scale hydrological and hydrodynamic modeling: Toward a better comprehension of watershed-shallow lake processes. *Journal of Hydrology* 564, 424–441. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.07.045>
- Muste, M., Hoitink, T., 2017. Measuring Flood Discharge, in: *Oxford Research Encyclopedia of Natural Hazard Science*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780199389407.013.121>
- Muste, M., Lee, K., Kim, D., Bacotiu, C., Oliveros, M.R., Cheng, Z., Quintero, F., 2020. Revisiting hysteresis of flow variables in monitoring unsteady streamflows. *Journal of Hydraulic Research* 58, 867–887. <https://doi.org/10.1080/00221686.2020.1786742>
- MVOTMA, 2017. Plan Nacional de Aguas.
- Oliveira, H.A. de, Fernandes, E.H.L., Möller, O.O.J., Collares, G.L., 2015. Hidrology and Hydrodynamics of Mirim Lagoon. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 20, 34–45.
- Oliveira, H., Fernandes, E., Möller, O., García-Rodríguez, F., 2019. Relationships between wind effect, hydrodynamics and water level in the world's largest coastal lagoonal system. *Water (Switzerland)* 11. <https://doi.org/10.3390/w11112209>
- Peel, M.C., Finlayson, B.L., McMahon, T.A., 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences* 11, 1633–1644.
- Possa, T.M., Collares, G.L., Boeira, L. dos S., Jardim, P.F., Fan, F.M., Terra, V.S.S., 2022. Fully coupled hydrological–hydrodynamic modeling of a basin–river–lake transboundary system in Southern South America. *Journal of Hydroinformatics*. <https://doi.org/10.2166/hydro.2021.096>
- Rantz, S.E., 1982a. *Measurement and Computation of Streamflow: Volume 1. Measurement of Stage and Discharge*. Washington D.C.
- Rantz, S.E., 1982b. *Measurement and Computation of Streamflow: Volume 2. Computation of Discharge* GEOLOGICAL SURVEY. Washington D.C.
- SEMA, 2021. Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura [Infrastructure and Environment Bureau] [WWW Document]. URL <https://www.sema.rs.gov.br/1040-bh-mirim> (accessed 1.17.22).

Silva, D.V. da, Oleinik, P.H., Costi, J., Kirinus, E. de P., Marques, W.C., 2019. Residence time patterns of Mirim Lagoon (Brazil) derived from two-dimensional hydrodynamic simulations. *Environmental Earth Sciences* 78. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8162-y>

SonTek, 2009. Argonaut-SL System Manual Firmware Version 12.0. San Diego, California.

Toldo, Jr.E., 1994. Sedimentação, Predição do Padrão de Ondas, e Dinâmica Sedimentar da Antepraia e Zona de Surfe do Sistema Lagunar. Porto Alegre.

Vieira, H.M., Weschenfelder, J., Fernandes, E.H., Oliveira, H.A., Möller, O.O., García-Rodríguez, F., 2020. Links between surface sediment composition, morphometry and hydrodynamics in a large shallow coastal lagoon. *Sedimentary Geology* 398. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2020.105591>

Vougioukas, S., Papamichail, D., Georgiou, P., Papadimos, D., 2011. River discharge monitoring using a vertically moving side-looking acoustic Doppler profiler. *Computers and Electronics in Agriculture* 79, 137–141. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.09.004>

WMO, 1980. Manual on Stream Gauging. Geneva.

Supplementary Information – Table S1

Measurements Information - Gauge Station 1

Date	Measurements				Reference		Settings						Discharge				Avg. Water Dir (Deg)	
	Starting time	Ending time	n°. Trans.	Durat. (sec)	Nav.	Depth	Depth trans. (m)	Magnetic decl. (deg)	Top Meth.	Bottom Meth.	Exp.	Left B. Dist (m)	Right B. dist (m)	Discharge (m ³ .s ⁻¹)	Width (m)	Area (m ²)		Vd. ADCP (m.s ⁻¹)
2015_11_19	14:54	15:07	3	586	BT	VB	0.08	-14.95	Power	Power	0.1156	1	3	1409.993	231	1453.5	0.97	93.67
2016_01_06	09:34	09:50	4	945	BT	VB	0.07	-14.97	Power	Power	0.194	0.5	10	1103.812	243.6	1434.5	0.77	96.51
2016_03_10	14:13	14:30	4	916	BT	VB	0.08	-15	Constant	No Slip	0.1667	0.5	5	439.251	230.7	1380	0.32	94.24
2016_03_15	09:34	09:50	4	961	BT	VB	0.07	-15	Power	Power	0.2385	0.5	5	278.682	230.4	1350.9	0.21	94.71
2016_03_22	10:16	10:40	4	817	BT	VB	0.06	-15	Power	Power	0.1036	0.5	3	835.519	230.1	1312.1	0.64	92.55
2016_03_30	09:17	09:28	2	416	BT	VB	0.07	-15	Power	Power	0.1667	0.5	5	858.365	229.9	1385.8	0.62	94.59
2016_04_04	10:52	11:10	4	1013	BT	VB	0.07	-15	Power	Power	0.1667	0.5	5	493.641	231.5	1377.6	0.36	94.78
2016_04_07	17:48	18:04	4	913	BT	VB	0.08	-15	Power	Power	0.1667	0.5	5	706.811	231.2	1356.5	0.52	93.35
2016_04_20	16:11	16:28	4	940	BT	VB	0.07	-15	Power	Power	0.0974	0.5	5	972.726	229.8	1386.8	0.7	94.31
2016_04_26	09:56	10:16	4	761	BT	VB	0.05	-15	Power	Power	0.1667	0.5	5	1697.947	229.7	1430.8	1.19	93.45
2016_04_27	09:50	10:04	4	843	BT	VB	0.07	-15	Power	Power	0.1442	0.5	10	1861.79	232.1	1474.4	1.26	93.06
2016_05_12	10:08	10:24	4	876	BT	VB	0.08	-15.02	Power	Power	0.1667	0.5	5	1524.839	230.6	1472.4	1.04	95.15
2016_05_17	09:26	09:35	4	716	BT	VB	0.07	-15.02	Power	Power	0.1667	0.4	5	1554.069	235.1	1465.7	1.06	94.94
2016_05_20	10:05	11:18	8	1656	BT	VB	0.07	-15.02	Power	Power	0.1324	0.5	10	1551.854	234.7	1487.1	1.04	95.03
2016_06_07	10:24	10:38	4	776	BT	VB	0.07	-15.03	Power	Power	0.1667	0.4	5	1385.848	231.9	1387.6	1	94.03
2016_06_08	09:21	09:31	3	539	BT	VB	0.07	-15.03	Power	Power	0.1328	0.5	5	1389.316	231.8	1404.3	0.99	94.3
2016_09_28	16:56	17:11	4	834	BT	VB	0.07	-15.07	Power	Power	0.1462	0.5	5	1214.925	230.9	1415.2	0.86	95.03
2016_12_15	10:10	10:25	4	848	BT	Comp. 4B	0.07	-15.1	Power	Power	0.1667	1.5	5	702.896	231.9	1390.8	0.51	94.77
2017_03_03	13:50	14:18	4	1083	BT	Comp. 4B	0.09	-15.13	Constant	No Slip	0.333	0.5	4	445.986	227.5	1296.9	0.34	93.81
2017_05_23	15:13	15:28	3	792	BT	VB	0.08	-15.13	Constant	No Slip	0.1667	0.5	5	403.908	229.7	1334.8	0.3	93.59
2017_10_20	09:34	15:05	4	852	BT	VB	0.07	-15.22	Constant	No Slip	0.1667	0.2	5	1363.143	230.2	1511.1	0.90	95.16
2017_10_24	16:31	16:45	4	784	BT	VB	0.07	-15.22	Constant	No Slip	0.1667	2	5	1447.188	231.8	1532.1	0.94	94.09
2017_10_27	13:27	13:44	4	916	BT	VB	0.07	-15.22	Power	Power	0.1667	2	5	1390.656	233.3	1514.7	0.92	94.14
2019_04_11	10:35	10:54	4	1002	BT	VB	0.06	-15.4	Constant	No Slip	0.2004	5	3	520.401	233.8	1519.8	0.34	84.77
2019_06_11	15:06	15:24	4	866	BT	Comp. 4B	0.1	-15.4	Power	Power	0.0907	8	5	224.722	236.7	1520.7	0.15	88.43
2019_06_13	09:12	10:00	6	1726	BT	VB	0.1	-15.4	Constant	No Slip	0.1667	2	6	157.21	230.8	1355.2	0.12	91.34
2019_06_24	09:44	10:00	4	941	BT	VB	0.1	-15.45	Constant	No Slip	0.1667	6	4	649.861	236.8	1554.3	0.42	85.4

Supplementary Information – Table S2

Measurements Information from D-ADCP - Gauge Station 2

Date	Measurements				Reference				Settings						Discharge			
	Starting time	Ending time	n°. Trans.	Durat. (sec)	Nav.	Depth	Depth trans. (m)	Magnetic decl. (deg)	Top Meth.	Bottom Meth.	Exp.	Left B. Dist (m)	Right B. dist (m)	Discharge (m ³ .s ⁻¹)	Width (m)	Area (m ²)	V _{D-ADCP} (m.s ⁻¹)	Avg. Water Dir (Deg)
2018_03_06	16:30	16:44	4	772	BT	BT	0.07	-14.9	Constant	No Slip	0.1667	1	1	400.986	167.9	1157.1	0.35	75.65
2018_03_13	18:11	18:21	4	617	BT	BT	0.1	-14.9	Power	Power	0.1667	1.5	2	-78.941	162	1107.4	-0.07	254.9
2018_03_21	11:14	11:28	4	798	BT	BT	0.07	-14.9	Constant	No Slip	0.1667	1.5	1.5	228.097	167.8	1155.8	0.2	75.28
2018_03_21	14:50	15:03	4	671	BT	VB	0.07	-14.9	Constant	No Slip	0.0932	1.5	1.5	381.69	171.2	1162.1	0.33	76.4
2018_04_04	15:42	15:55	4	759	BT	VB	0.23	-14.9	Constant	No Slip	0.1667	5	5	25.909	160.1	1128.6	0.02	69.17
2018_04_11	11:30	11:40	4	769	BT	BT	0.06	-14.9	Constant	No Slip	0.1667	4	3	4.407	152	1055.7	0.0042	248.38
2018_04_11	17:06	17:17	4	663	BT	VB	0.06	-14.9	Power	Power	0.3856	5	4	88.511	158.2	1092.9	0.08	78.22
2018_04_17	11:00	11:20	6	1081	BT	BT	0.07	-14.9	Power	Power	0.1667	5	4	-41.761	154.9	1052.3	-0.04	252.4
2018_05_08	11:54	12:26	6	1364	BT	BT	0.07	-14.9	Power	Power	0.1322	5	3	-269.83	154.9	1069.8	-0.25	256.22
2018_05_08	16:16	16:30	4	802	BT	BT	0.07	-14.9	Power	Power	0.0969	5	10	-120.938	160.6	1073.2	-0.11	251.26
2018_05_23	11:49	12:04	4	671	BT	BT	0.06	-14.9	Constant	No Slip	0.1667	10	10	69.675	165.9	1117.5	0.06	73.75
2018_05_23	16:38	16:48	4	575	BT	BT	0.06	-14.9	Power	Power	0.1667	10	5	82.343	166	1113.4	0.07	78.17
2018_06_06	12:34	12:46	4	739	BT	VB	0.07	-14.9	Power	Power	0.1192	7	5	335.94	163	1128.5	0.30	76.17
2019_06_12	14:42	14:55	4	722	BT	VB	0.1	-15.23	Constant	No Slip	0.1667	8	3	126.834	167.3	1164.9	0.109	73.45
2019_06_26	11:17	11:35	6	1006	BT	VB	0.1	-15.23	Power	Power	0.0867	10	1	818.076	172.3	1242.5	0.658	74.31
2019_07_03	10:48	11:07	6	1082	BT	BT	0.12	-15.23	Power	Power	0.1217	15	1	1077.586	174	1336	0.807	74.89
2019_07_09	10:56	11:07	4	665	BT	BT	0.1	-15.23	Power	Power	0.1071	10	2	722.287	173.9	1271.5	0.568	74.68
2019_08_02	10:19	10:32	4	771	BT	VB	0.1	-15.25	Power	Power	0.1667	5	2	890.173	175.6	1359.1	0.655	77.06
2019_09_03	11:30	12:15	6	1311	BT	BT	0.1	-15.25	Power	Power	0.1343	5	2	1058.306	176.6	1399.4	0.756	76.5
2019_09_10	11:34	11:48	4	780	BT	BT	0.1	-15.25	Power	Power	0.1667	6	4	887.357	178.4	1389	0.639	74.55
2019_10_16	10:55	11:05	3	613	BT	BT	0.3	-15.3	Power	Power	0.1263	12	10	1116.254	191	1496.3	0.746	75.26
2019_11_06	11:43	11:53	4	770	BT	BT	0.3	-15.3	Power	Power	0.0955	3	5	1384.43	193	1630.6	0.85	74.83

Supplementary Information – Table S3

Assessment of model for estimating mean velocity at Gauge Station 01.

	E_{a50}	E_{aMe}	E_{aMx}	E_{a95}	R^2	B_0	B_1	B_2	B_3
B0 + B1*Stage'	0.2140	0.1938	0.3937	0.3815	0.5340	-0.0474	0.7942		
B0 + B1*Vx'	0.0293	0.0316	0.0808	0.0757	0.9855	0.1214	0.8788		
B0 + B1*Vy'	0.0719	0.0881	0.5324	0.2638	0.8311	0.1437	5.6355		
B0 + B1*Cell01'	0.0186	0.0232	0.0874	0.0529	0.9920	0.0271	1.2255		
B0 + B1*Cell02'	0.0233	0.0209	0.0449	0.0447	0.9940	0.0656	0.8883		
B0 + B1*Cell03'	0.0168	0.0200	0.0542	0.0529	0.9942	0.0830	0.7196		
B0 + B1*Cell04'	0.0158	0.0175	0.0551	0.0434	0.9955	0.0773	0.6892		
B0 + B1*Cell05'	0.0190	0.0220	0.0615	0.0515	0.9934	0.0936	0.7056		
B0 + B1*Cell06'	0.0186	0.0175	0.0384	0.0379	0.9959	0.0843	0.7280		
B0 + B1*Cell07'	0.0492	0.0603	0.2150	0.1547	0.9424	0.1842	0.7970		
B0 + B1*Cell08'	0.0493	0.0606	0.1469	0.1418	0.9483	0.2085	0.8269		
B0 + B1*Cell09'	0.0339	0.0463	0.1850	0.1669	0.9620	0.1652	0.8147		
B0 + B1*Cell10'	0.0980	0.1142	0.3665	0.2768	0.8235	0.2888	0.9155		
B0 + B1*Vx + B2*Stage'	0.0291	0.0317	0.0807	0.0762	0.9855	0.1227	0.8804	-0.0025	
B0 + B1*Vx + B2*Cell02'	0.0213	0.0212	0.0414	0.0403	0.9942	0.0717	0.1083	0.7799	
B0 + B1*Vx + B2*Cell02 + B3*Cell06'	0.0117	0.0121	0.0395	0.0317	0.9977	0.0644	-0.2949	0.3795	0.6607
B0 + B1*Cell02 + B2*Cell06'	0.0125	0.0153	0.0354	0.0351	0.9969	0.0764	0.3281	0.4604	
B0 + B1*Vx + B2*Cell06'	0.0138	0.0164	0.0438	0.0369	0.9964	0.0760	-0.2289	0.9160	

Supplementary Information – Table S4

Assessment of model for estimating mean velocity at Gauge Station 02.

	E_{a50}	E_{aMe}	E_{aMx}	E_{a95}	R^2	B_0	B_1	B_2	B_3
B0 + B1*Stage'	0.0972	0.1126	0.2895	0.2806	0.8152	-0.1280	0.3342		
B0 + B1*Vx'	0.0239	0.0296	0.0974	0.0830	0.9861	0.0029	0.8562		
B0 + B1*Vy'	0.0733	0.0982	0.3915	0.2840	0.8312	0.0261	12.4311		
B0 + B1*Cell01'	0.0305	0.0467	0.1241	0.1197	0.9652	-0.0039	1.1380		
B0 + B1*Cell02'	0.0327	0.0340	0.0894	0.0876	0.9820	-0.0023	0.8965		
B0 + B1*Cell03'	0.0234	0.0225	0.0592	0.0478	0.9931	-0.0082	0.7920		
B0 + B1*Cell04'	0.0218	0.0204	0.0515	0.0490	0.9943	-0.0079	0.7829		
B0 + B1*Cell05'	0.0177	0.0210	0.0557	0.0499	0.9932	-0.0014	0.8023		
B0 + B1*Cell06'	0.0250	0.0414	0.1116	0.1102	0.9702	0.0084	0.8140		
B0 + B1*Cell07'	0.0313	0.0501	0.1484	0.1446	0.9551	0.0148	0.8099		
B0 + B1*Cell08'	0.0282	0.0430	0.1628	0.1402	0.9654	0.0213	0.8119		
B0 + B1*Cell09'	0.0254	0.0550	0.1697	0.1575	0.9412	0.0306	0.8123		
B0 + B1*Cell10'	0.0331	0.0526	0.1819	0.1610	0.9509	0.0289	0.8338		
B0 + B1*Vx + B2*Stage'	0.0276	0.0302	0.0960	0.0836	0.9866	0.0137	0.8994	-0.0202	
B0 + B1*Vx + B2*Cell04'	0.0190	0.0192	0.0483	0.0449	0.9947	-0.0065	0.1607	0.6375	
B0 + B1*Vx + B2*Cell04 + B3*Cell05'	0.0194	0.0187	0.0490	0.0451	0.9948	-0.0076	0.2244	0.7910	-0.2167
B0 + B1*Vx + B2*Cell05'	0.0182	0.0208	0.0576	0.0514	0.9932	-0.0013	0.0386	0.7664	

Resultados e Discussões – Artigo 2

Submitted (cover letter attached): International Journal of Sediment Research, 2023.

Title: Surrogate technologies for assessment the Suspended-Sediment Concentrations at São Gonçalo Channel

Authors

GONÇALVES¹, George Marino Soares;

BARTELS², Guilherme Kruger;

COLLARES³, Gilberto Loguercio;

NOTATION

α_s - sediment absorption coefficient (in dB.m⁻¹)

BHMSG - Mirim-São Gonçalo Transboundary Basin

EDI – Equal Discharge Increment

GS1/GS2 – Gage Station 1 or 2

H-ADVM - Horizontal Acoustic Doppler velocity meter

SAID - Surrogate Analysis and Index Developer

SGC – São Gonçalo Channel

SSC – Suspended-sediment Concentration

SCB - Sediment-corrected backscatter

\overline{SCB} – Mean Sediment-corrected backscatter

ABSTRACT

This paper documents the ability and limitations of applying a single-frequency 0.5 MHz Horizontal Acoustic Doppler velocity meter (H-ADV), as surrogate methods based on backscatter measurements, to estimate Suspended-sediment concentrations (SSC) and suspended-sediment load on continuous 15-min intervals in São Gonçalo Channel, a natural channel with bi-directional discharges. Two different study sites (GS1/GS2) are analyzed, and its acoustic data are corrected following as in (Gartner, 2004), for sound and sediment attenuation losses. This study considered 21 suspended-sediment samples (13 at GS1 and 8 at GS2) collected by the Equal Discharge Increment method (EDI) using a D-74 or DH-59 sampler, from January to December of 2019. The better model performances were Good at GS1 and Very Good at GS2, based on the RMSE-observations standard deviation ratio (RSR), Nash-Sutcliffe efficiency (NSE), and Percent bias (PBIAS). At GS1 Time-series of SSC estimated were constructed showing min/max of 0.39 and 450 mg.L⁻¹, with average of 46.37 mg.L⁻¹, for multiple linear regression model. At GS2 occurred the same, with Time-series of SSC Estimated showing min/max as 1.67 and 35,393.56 mg.L⁻¹, with average of 43.66 mg.L⁻¹. The use of for multiple linear regression model showed significant gains, despite the evidence of overestimating during low mean corrected-backscatter, and during low water temperatures, at GS1 and GS2, consequently. The SSC Estimation models that presented the best fit allowed the development of time-series in the studied sites, with high time scale. The use of backscatter for this purpose seems a promising approach for continuous SSC monitoring at São Gonçalo Channel.

Keywords: Acoustic Profiler, Sediment-Rating Curves, SSC Estimation.

INTRODUCTION

Sediments are present in water and it can be defined as solid particles or debris which are either transported (i.e. by the water flows) or found in deposits sedimented (Chien & Wan, 1999). Although, the high presence of fluvial sediment can produce damages as reducing biological productivity of aquatic systems and impair freshwater quality, as well decrease reservoir storage and hydraulic structures capacity throughout sedimentation processes (Wood & Teasdale, 2013).

For this, the understanding and quantify of physical processes involving sediment transport in large streams represents great scientific and technological interesting for different applications (Latosinski *et al.*, 2014). However, the standard methods used for sampling suspended-sediment and loads (physical samples) in large rivers are usually time consuming, unsafe, rather expensive, and are limited on either space and time resolution (Latosinski *et al.*, 2014).

To overcome these limitations, worldwide studies have been testing techniques and instruments to estimate SSC, with highlight for: optical laser scattering - commercially available instruments for measuring sediment size distribution with high-resolution, but limited to high particle concentrations and size range, as bio-fouling affected; pressure differential – with complicated use on field due to moment of low SSC and turbulence, as water temperature variations, this instrument uses simultaneously two pressure sensors (above each other) which convert this pressure difference in water density, from which SSC is inferred; bulk optics (turbidity) – instruments limited to the particle size changes and bio-fouling, works while employs a light source to the measured as the visible fraction by a light detector, which may be related to the SSC (Gartner *et al.*, 2003; Gray, 2003; Gray and Glysson, 2005). These instruments are limited to punctual estimations.

Since the implementation of Horizontal Acoustic Doppler Velocity Meters (H-ADVM) over fixed river/channel banks positions, the continuous flow velocity measurements became possible (Vougioukas *et al.*, 2011), as the H-ADVM monitors uniformly the horizontal profile at a specific flow depth (Kästner *et al.*, 2018).

Acoustic Doppler devices works based on the monitoring of acoustic parameters such as the **acoustic backscatter**, which is the strength of sound energy returned after it interacts with the scatterers in the water. As stated by (Guerrero *et al.*, 2016), the use of the acoustic backscatter from H-ADVM allow indirect quantification

of the suspended-sediment concentration (SSC) with high temporal and special resolution. Furthermore, the use of this surrogate method is effective, require low maintenance and is no influenced by biological fouling, as allow the continuous assessment by in-situ and real-time basis over SSC time-series, as it has the ability of measure a profile instead a point (Wood & Teasdale, 2013; Gartner and Grey, 2005). Hence, the suspended-sediment estimations may be process by a correlation between SSC and acoustic backscatter while considering the sound and sediment attenuation losses, since it covers the inherent assumption the sediment homogeneity in the ensonified volume (Guerrero *et al.*, 2016).

Thus, this paper aimed to assess the viability to use a surrogate method based on H-ADVM deployment to estimate the Suspended-Sediment Concentration and Load Transport at São Gonçalo Channel, a natural channel driven by bi-directional flow and responsible for linking the Latin America biggest lagoon system.

MATERIAL AND METHODS

Study area

The study area is located into the Mirim-São Gonçalo Transboundary Basin (BHMSG), which encompass an area of 62,250 km², shared between Brazil (21 municipalities over 29,250 km² of area) and Uruguay (5 provinces over 33,000 km² of area). According to the Cfa in Köppen classification the climate of the BHMSG is characterized as humid subtropical, with hot summers and well-distributed throughout the year (Peel *et al.*, 2007). Also, the annual precipitation over the BHMSG region is 1400 ± 296 mm, and the annual reference evapotranspiration is 1080 ± 36 mm, as well the annual average temperature is 18.5 ± 0.5 °C (1971–2020).

The BHMSG Brazilian side main tributaries are the Pelotas stream, the rivers Piratini and Jaguarão, and the São Gonçalo Channel (SGC), the channel in focus of this study. For the Uruguayan side, the main rivers are, Cebollati, Tacuari, Sarandi and San Miguel (Figure 1).

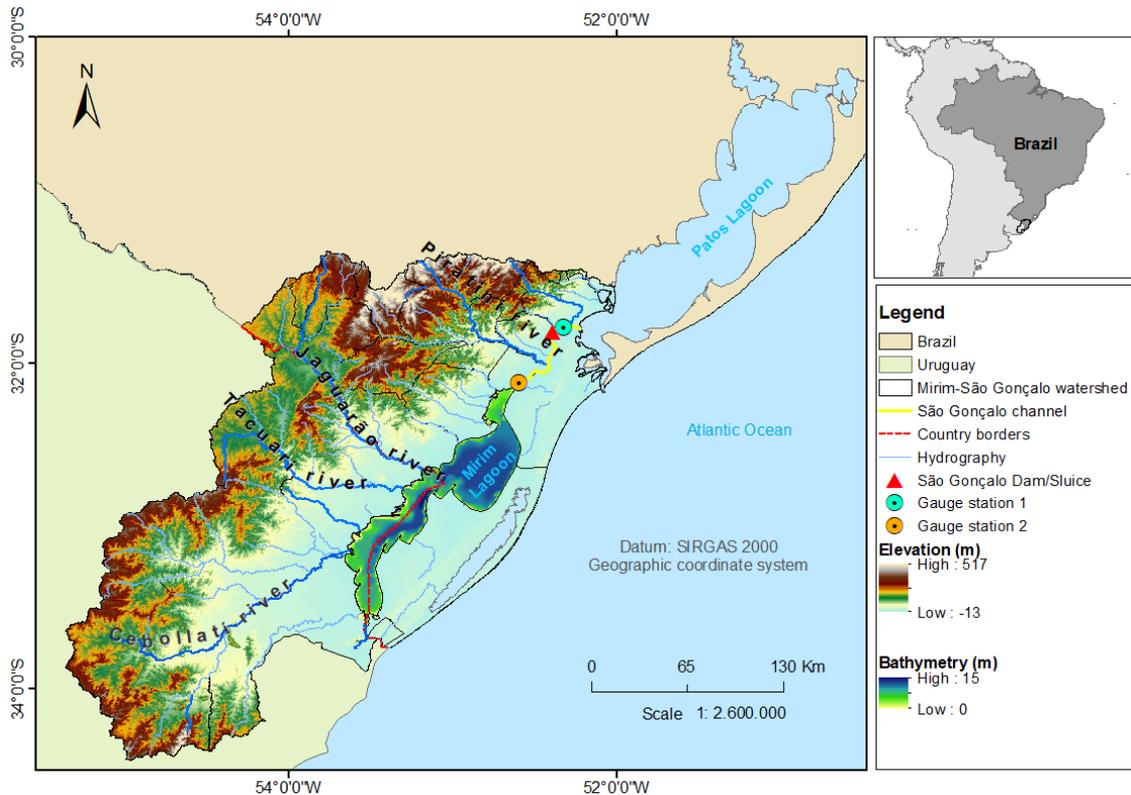


Figure 1 – The Mirim-São Gonçalo Transboundary Basin and, Patos-Mirim lagoon system (Adapted from GONÇALVES *et al.*, 2023).

The SGC works as a natural and the only linking between Mirim Lagoon and Patos Lagoon (Figure 2), and it is responsible for draining the entire runoff that comes from the BHMSG and from the Mirim Lagoon through the Patos Lagoon, which reaches the ocean. The SGC characteristics are ~76 km long, ~250 m width, ~6 m depth (Figure 2), ~700 m³.s⁻¹ annual discharge, and according to (Jung *et al.*, 2020) its annual suspended-sediment discharge is ~1.88 x 10⁶ ton.yr⁻¹.

There are two gage station in the SGC, monitored by the NEPE-HidroSedi Laboratory situated in the Federal University of Pelotas, Brazil; these gage stations are equipped with a H-ADVM (0.5-MHz Sontek®/YSI, Argonaut-SL) on the left bank of the channel. The equipment is direct current-powered through a solar panel and battery, connected to a voltage controller to avoid voltage fluctuations. The H-ADVM average measurements collected over 5 min out of every 15 min over the profile.

The *Pelotas – UFPEl* field site, known as Gage Station 1 (GS1) is located 10 km upstream from the channel mouth. Its characteristics are ~230 m width, ~6 m depth. The GS1 registered during 2015-2022 from the H-ADVM minimum discharge of 43.211 m³.s⁻¹ and maximum discharge of 1,980.017 m³.s⁻¹ (GONÇALVES *et al.*, 2023).

The channel flow passing through the GS1 channel gage is regulated by a sluice/dam located 4km upstream. This dam operates opening/closing eighteen vertical moving gates according to the water levels and wind directions on this region, and its operating is vital to guarantee fresh water at the southern portion, preventing the salt intrusion.

The *Santa Isabel do Sul* field site, also called as Gage Station 2 (GS2), is located 4 km downstream the Mirim Lagoon mouth, and it is ~60 km upstream apart from the GS1 and ~55 km upstream apart from the São Gonçalo Channel Dam/Sluice, being these two gages capable to cover two different environments and the opposite canal sides as the SGC spring/mouth. The GS2 its characteristics are ~170 m width, ~7.6 m depth, and as well at the GS1, the GS2 also can observe flood periods with floodplain over the right and left banks increasing significantly the cross-section width (GONÇALVES *et al.*, 2023). The H-ADVM has been monitoring this cross-section since 2018 where registered minimum discharge as $-270.675 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (discharge on Patos-Mirim direction) and maximum discharge as $1570.650 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

The study sites herein in focus play important roles on the water/sediment balance and water storage of the region, as the SGC works as a communicating vessel between these two big lagoons.

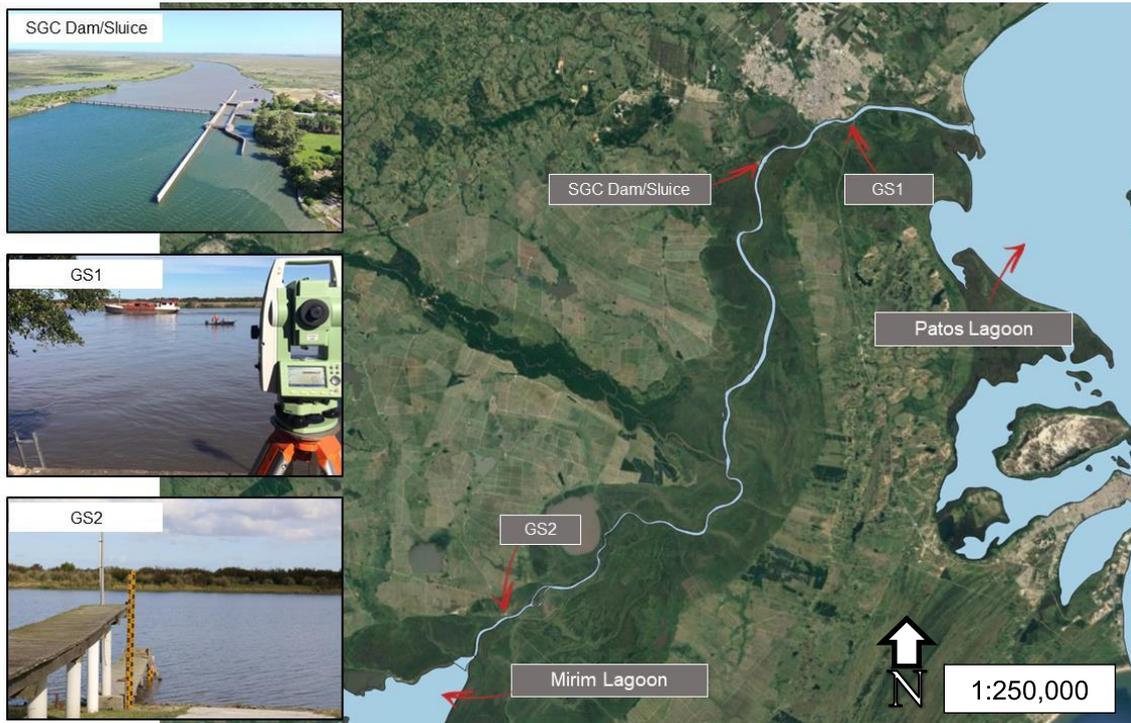


Figure 2 – São Gonçalo Channel area with the disposal of the SGC Dam/Sluice and gage stations 1 e 2.

Sample collecting and analysis

The main steps over this study are divided into sampling and analysis of suspended-sediment, and assessment of backscatter and acoustic parameters, which encompass the acoustic pulse corrections, rating curve developments and SSC estimations. For the sediment phase, the NEPE-HidroSedi laboratory conducted a suspended-sediment sampling program in the São Gonçalo Channel from 2019 to 2020, surveying 21 samples (13 at GS1 and 8 at GS2) to better understand the sediment yield of the region and all the related hydraulic variables. Each field campaign were conducted by the Equal Discharge Increment method (EDI) from either a depth-integrating D-74 or DH-59 sampler, which resulted in 6 verticals discharge-weighted samples and its replicate (252 samples in total), which contains a representative concentration of suspended-sediment material in transport throughout the study cross-sections at the time each sample were collected (Figure 3), according to the best practices as described in (Edwards & Glysson, 1999; Nolan *et al.*, 2005). Afterwards, the samples were processed to analyze the suspended-sediment concentration by the Filtration method, which measures the sample weights compared to the original

collected volumes, following best practices as described in (Carvalho, 2008; Guy, 1969).

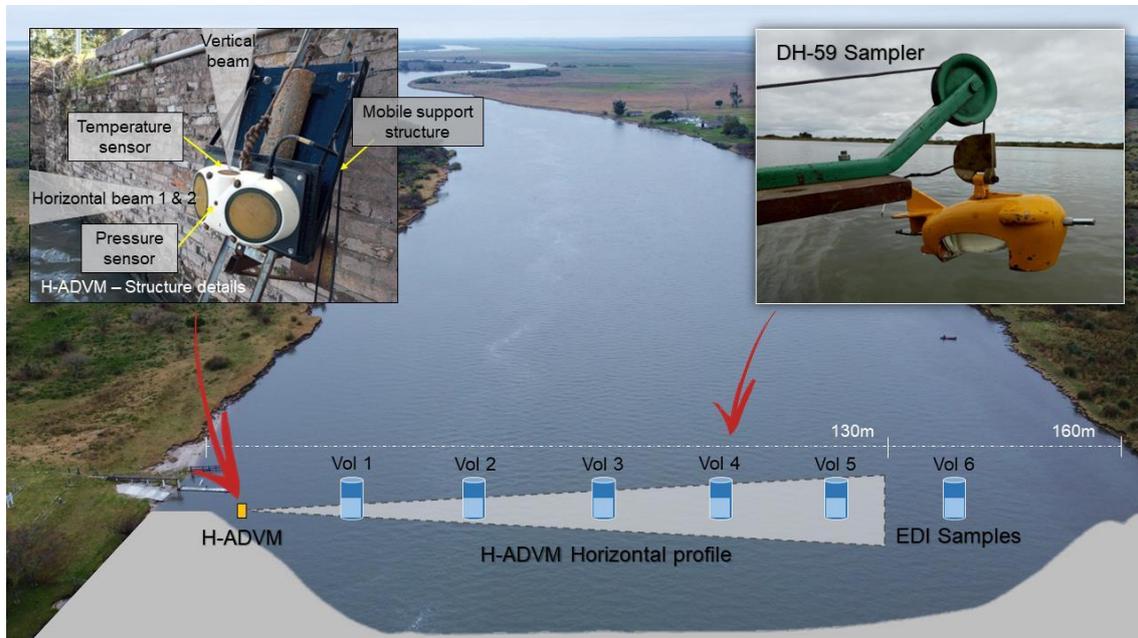


Figure 3 – GS2 aerial view with H-ADVM location, Structure Details and Horizontal profile; The representation of the six EDI vertical samples over the GS2 and the sampler it was used for this (DH-59).

Acoustic data correcting - backscatter

From the H-ADVM installed on GS1 and GS2 study sites all the necessary acoustic data were monitored, as: water temperature; frequency; signal amplitude. The H-ADVM emits acoustic pulses into the water column, which bounces and interacts with the suspended-sediment load and this pulse may be scattered, absorbed or reflected back to the source (Figure 4). The strength of the returned pulse is called backscatter (Ysi, 2009) and it is stored in counts, and it can be converted to decibels (dB) by multiplying the intensity scale factor (0.43 in this case) of the H-ADVM.

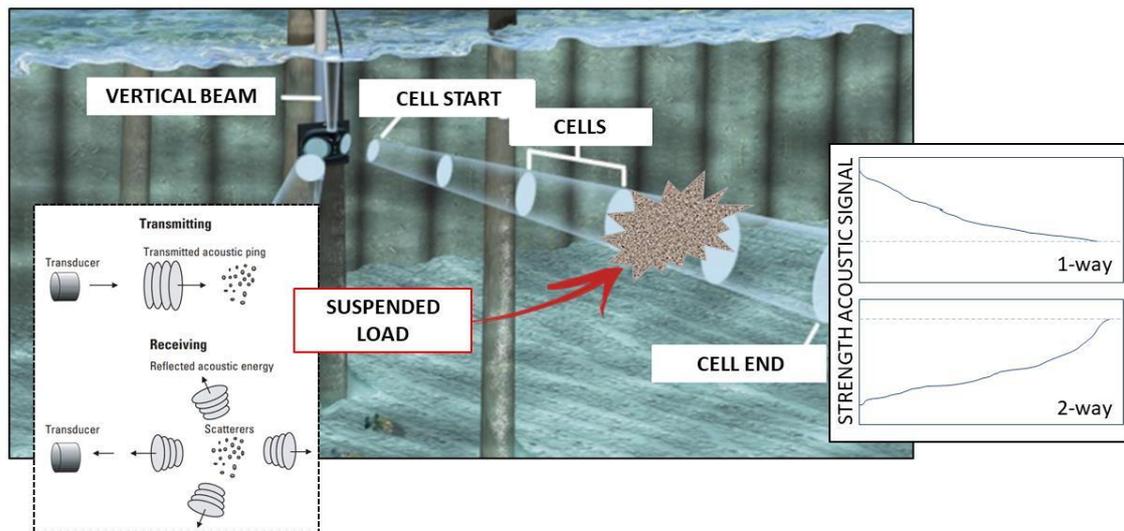


Figure 4 – Illustrates the suspended-load interacting with the emitted wave and its losing strength along the 2-way path. Source: Adapted from SIMPSON (2001) and SONTEK (2014).

For the SSC Estimation process, the acoustic data may be corrected for **acoustic transmission** and **sediment attenuation losses**. At this step, the Surrogate Analysis and Index Developer (SAID) tool (Domanski *et al.*, 2015), was applied for backscatter correction following as expressed by (Gartner, 2004) in Eq. (1):

$$SSC = 10^{(A+B \times RL)} \quad (1)$$

where SSC is the estimated suspended-sediment concentration by the H-ADVM (in mg.L^{-1}), A and B are the regression coefficients (A – intercept; B - response variables; the model may have more response variables) determined by regressing in-situ SSC with corrected-backscatter data, and RL follows the sonar equation concept first written by Urick (1975) as Eq. (2):

$$RL = SL - 2TL + TS \quad (2)$$

where RL is the reverberation level, SL is the source level, $2TL$ is the transmission losses on the 2-way, and the TS is the eco intensity strength at the cell center, all these in decibel (dB). Hence, it can be better rewritten as Eq. (3), in-depth discussed in (Landers *et al.*, 2016):

$$SCB = MB + 20\log_{10}(\psi r) + 2r\alpha_w + 2r\alpha_s \quad (3)$$

where SCB is the **sediment-corrected backscatter** (in dB), the MB is the raw measured backscatter (dB), $20\log_{10}$ refers to the acoustic pulse geometric spreading, ψ is the near field correction factor due to acoustic spherical spreading near to the transducer head (Downing *et al.*, 1995), r is the slant range or distance from the transducer head to the cell center (in m). For the α_w determination, considering fresh water, it was applied the Eq. (4), Eq. (5), and Eq. (6), as described in (Schulkin & Marsh, 1962):

$$\alpha_w = 8.687 \frac{B_w f^2}{f_T} \quad (4)$$

$$f_T = 21.9 \times 10^{[6-1520/(T+273)]} \quad (5)$$

$$B_w = 3.38 \times 10^{-6} \quad (6)$$

where α_w is the water absorption coefficient (in dB/m) mostly due to the water molecular transfer of acoustic energy to heat also driven by the H-ADVM frequency (as f in Hz), the f_T is the relaxation frequency (in Hz) and dependent on the water temperature (as T in °C), and B_w is the constant for viscosity mechanism in pure water. For the α_s determination, which is the **sediment absorption coefficient** (in dB.m⁻¹) due to the sediment properties for a given emitted acoustic frequency, it was applied the Eq. (7), as described in (Landers *et al.*, 2016; Straub *et al.*, 2018; Topping D.J., David J, Wright S.A., Melis T.S., 2006; Wood & Teasdale, 2013):

$$\alpha_s = \frac{1}{2} \times \frac{d}{dr} (WCB) \quad (7)$$

where WCB represents the first part of the Eq. (3), $MB + 20\log_{10}(\psi r) + 2r\alpha_w$, and its determinations is made by -0.5 times the WCB slope line for the horizontal profile.

Assessment and developing SSC models

The Equation 3 was applied at the acoustic data monitored in both gage stations, then the **mean sediment corrected backscatter** (from now called as \overline{SCB}) was obtained for each 15-min increment. After correcting the backscatter data, regressing it with the in-situ SSC data, the regression coefficients A and B for the Eq. (1) are determined. The SSC estimation models were developed and evaluated from four different approaches: linear regression models considering (i) sampled SSC x \overline{SCB} ; (ii) sampled SSC x α_s ; (iii) sampled SSC x Water Temperature; and multiple linear regression model considering (iv) sampled SSC x ($\overline{SCB} + \alpha_s +$ Water Temperature).

The chosen models were taken based on the coefficient of determination (r^2), which describes the degree of collinearity between measured and estimated data, and it ranges from -1 to 1, as closest to 1 the best; the RMSE-observations standard deviation ratio (RSR), which is calculated as the ratio for the root mean square error (RMSE) and standard deviation of measured data, where the lower the best; the Nash-Sutcliffe efficiency (NSE), which indicates how well the relationship between measured x estimated data fits the 1:1 line, where the closest to 1 the better; Percent bias (PBIAS), which measures the average of the estimated data to be larger/smaller than the measured, where the closest to zero the best. All the performance assessment equations are fully described in (Moriasi *et al.*, 2007), while the herein used model performance parameters are showed in Table 1, based on sediment rating curves.

Table 1 – General performance considering sediment ratings, following (Moriasi *et al.*, 2007).

	RSR	NSE	PBIAS
Very good	$0.00 \leq RSR \leq 0.50$	$0.75 < NSE \leq 1.00$	$PBIAS < \pm 15$
Good	$0.50 < RSR \leq 0.60$	$0.65 < NSE \leq 0.75$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 30$
Satisfactory	$0.60 < RSR \leq 0.70$	$0.50 < NSE \leq 0.65$	$\pm 30 \leq PBIAS < \pm 55$
Unsatisfactory	$RSR > 0.70$	$NSE \leq 0.50$	$PBIAS \geq \pm 55$

RESULTS AND DISCUSSION

Suspended-sediment Concentration samples

From the 13 sampling surveys performed at GS1, and 8 performed at GS2, the results in general pointed out for low SSC yield at both gage stations, when considering the SSC for the whole cross-section (Figure 5). At the GS1 the min/max observed were 11.23 mg.L⁻¹ and 57.05 mg.L⁻¹, respectively. Although, at the GS2 the min/max observed were 11.29 mg.L⁻¹ and 129.45 mg.L⁻¹, respectively. When facing low SSC it brings to a problem, which is the fact that the environment noise – the one produced by the instrument electronics (due to thermal noise), and by the environment (due to cavitation) - may be higher than the pulse strength itself, adding uncertainties to the SSC estimating process, as described in (Landers *et al.*, 2016). Moreover, prior studies indicated the SSC equals or under 10 mg.L⁻¹ may be a limitation for H-ADVM frequencies of 500 kHz or under, while applied for SSC estimation (Gray & Gartner, 2009), existing a inversive relationship between frequency and SSC load - the addition of higher frequencies may overcome the limitations of low frequencies while low SSC yield periods.

Although the discharge measurements at the sampling campaigns (also shown in Figure 5) were capable to cover a decent amplitude of data over the year (min/max of 224.72 and 2041.72 m³.s⁻¹ for GS1, and min/max of 722.29 and 1384.43 m³.s⁻¹ for GS2). The relationships between SSC and discharge (typically known as sediment rating-curves) had shown bad correlations, with coefficient of determination under 0.2 at both study sites (Figure 5B). Despite this fact, a study conducted by (Jung *et al.*, 2020) at the SGC over the GS2 area, developed a sediment rating-curve classified as Good (see Table 1) considering “all data”, while for monthly period the curve presented unsuitable results, due to the fact the calibration data were nor spare through the year over the months. According to (Horowitz, 2003), longer timescales in sediment rating-curves decrease errors due to the high frequency needed for short-term-frames.

Although, in this study the missing data at both gage stations are due to the unsafe climate conditions over the SGC during the sampling survey day, being not possible at that time to collect over the whole cross-section. The detailed information from each sampling survey is in Tables S1 and S2 in Supplementary Information.

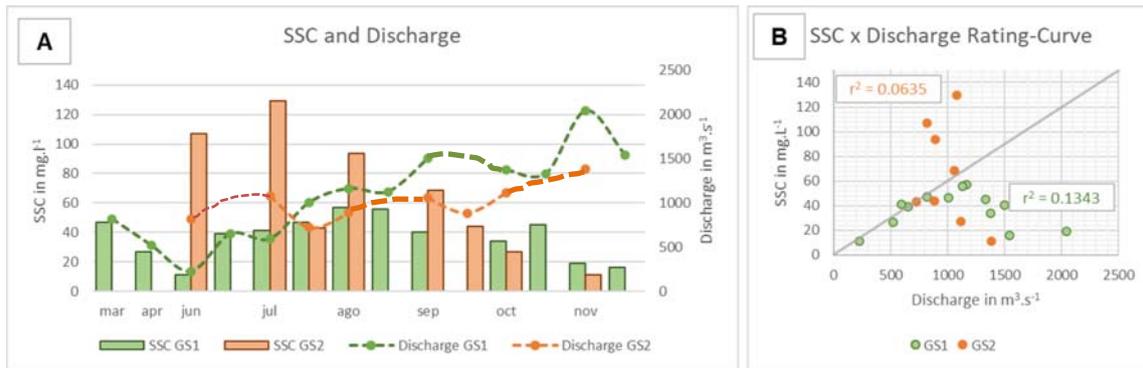


Figure 5 – A) Sampled SSC data and the discharge, B) 1:1 plot from SSC x Discharge for GS1 and GS2, from the 21 conducted surveys.

SSC model estimation

Next are shown for GS1 and GS2 (Table 2), four models to estimate the SSC at each site, which are applied based on the Eq. 8.

$$SSC = 10^{(A+B \times \overline{SCB} + C \times \alpha_s + D \times Temp)} \times Bias \quad (8)$$

where SSC estimated (in mg.L⁻¹), A is the intercept; B is the response variables for \overline{SCB} ; C is the response variables for α_s ; D is the response variables for Water Temperature; and Bias is a factor to correct logarithmic retransformation bias.

Table 2 – SSC Estimation models for GS1.

	Model n.	A	B	C	D	Bias	r ²	RSR	NSE	PBIAS
GS1	1	6.72	-0.07			1.07	0.38	0.89	0.21	-1.36
	2	1.59		-1.77		1.10	0.05	0.99	0.02	-0.37
	3	2.12			-0.03	1.06	0.53	0.65	0.58	-1.37
	4	-1.87	0.06	-4.44	-0.06	1.03	0.74	0.50	0.75	-0.61
GS2	1	-2.46	0.04			1.19	0.21	0.72	0.48	1.04
	2	1.30		9.12		1.22	0.13	0.90	0.20	0.32
	3	2.70			-0.07	1.13	0.49	1.09	-0.18	-2.49
	4	-1.85	0.05	6.77	-0.08	1.02	0.92	0.48	0.77	-3.40

Best results are presented in bold.

For the GS1 it seems the model 2 using α_s as a response variable has showed the worst performance when compared to the others. Also, the bad performance of the

models 1 and 2 classified these as Unsatisfactory, while these use \overline{SCB} and α_s as response variables, respectively. Traditionally, the \overline{SCB} itself is the only response variable used for SSC estimations due to the fact it considers all the losses (water and sediment absorption). Hence, the \overline{SCB} correlates strongly with sand concentrations, while α_s strongly correlates with fine concentrations (silt and clay), the addition of α_s to the model makes it less sensitive to changes in particle size (Landers *et al.*, 2016; Moore *et al.*, 2013).

Even though the model 3 shows better performance than model 1 and 2, it is classified as Satisfactory, due to the better results in RSR (0.65) and NSE (0.58), while the r^2 increases to 0.53. The addition of the Water Temperature as a response variable showed improvements on both sites, probably due to the fact the SGC faces seasonal salt intrusion periods, which plays an important role on particles sedimentation driven by the density differences.

On the other hand, the model 4 presented the better results and it is classified as Good, evidencing the viability of estimating the SSC by a multiple linear regression model which uses the three physically related variables (\overline{SCB} , α_s and Water Temperature). All the four models showed low and negative PBIAS, which is the deviation percentage of data being evaluated, where negative values indicate that model overestimated biased (Gupta *et al.*, 1999).

At the GS2 occurs the same. The SSC estimating model 2 considering α_s as predictor variable performed worst, showing RSR 0.90 and NSE of 0.20, which classify this one as Unsatisfactory. The RSR results represent as much the model is capable to perfect estimate the phenomena, as same its residual variation does not exist when RSR equal to zero (optimal value). Instead, the NSE determines the relative magnitude of the residual variance compared to the variance from the measured dataset (Nash and Sutcliffe, 1970); negative values of NSE indicates the mean observed value is a better predictor than the estimator itself, while it is an unacceptable performance (it occurs for model 3 at GS2).

For the GS2 the model 4 performed better compared to the others, reflected on the r^2 of 0.92 for the composed multiple linear regression model considering \overline{SCB} , α_s and Water Temperature as responsible variables. Also, the model 4 showed RSR of 0.48 and NSE of 0.77, which classify this model as Very Good. In general, for the GS2 site the models showed low PBIAS results (low-magnitude values indicate accurate

model simulation), while models 1 and 2 are positive values – indicates the model is underestimate biased; models 3 and 4 are negative values. In general, the results of GS2 are slightly better than GS1 driven by the bigger SSC dataset amplitude (which benefits the calibration process) and higher concentrations (SSC mean of $\sim 65 \text{ mg.L}^{-1}$).

Time-series for suspended-sediment

Next are shown the Time-series of estimated SSC at GS1 and GS2, from applying the \overline{SCB} based model and, the composed based model (\overline{SCB} , α_s and Water Temperature).

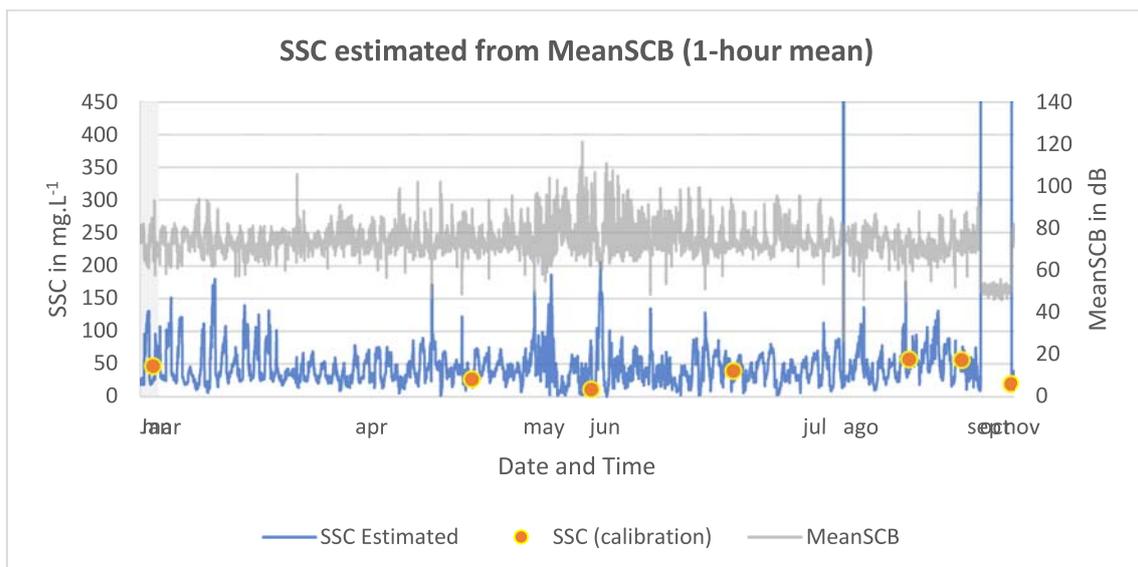


Figure 10 – The estimated SSC time-series for GS1, based on \overline{SCB} model.

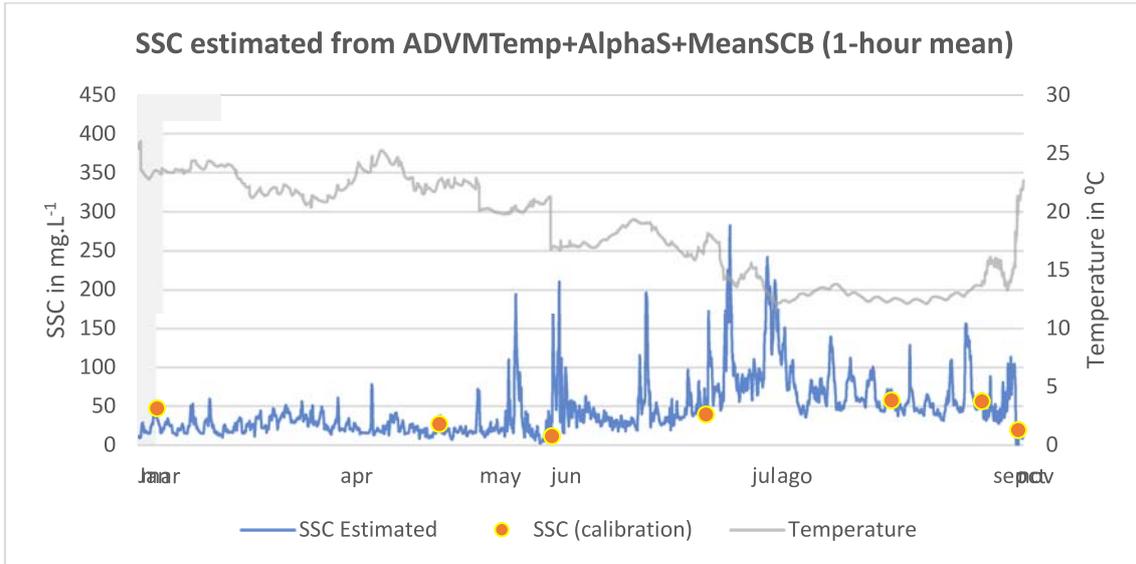


Figure 11 – The estimated SSC time-series for GS1, based on (\overline{SCB} , α_s and Water Temperature) model.

From the SSC estimation models, these shown as capable to estimate the SSC with high degrees of certainty based on the r^2 , RSR, NSE and PBIAS. In both cases, either estimating from \overline{SCB} or composed model, the observed SSC data had fitted in the time-series for the entire study period, suggesting the SGC sediment variations were covered in almost its totally. However, the time-series developed from the \overline{SCB} as response variable performed worst, estimating min/max of 0.02 and 76,250.72 mg.L^{-1} , which seems clearly as an outlier (Figure 10). Moreover, the GS1 time-series from \overline{SCB} had shown significant noising behavior over the period, either the SSC or \overline{SCB} , with min/max of 26.5 and 121 dB, with mean of 73.2 dB, being noticed sometimes the \overline{SCB} dropping during the night, despite the use of a voltage controller to avoid voltage fluctuations.

SSC models based only on \overline{SCB} may face the fact that backscatter measurements are register in dB, which indicates the pressure intensity compared to a reference level, and it is in logarithm scale, while a slight difference of ± 3 dB on the backscatter measurement may insert an error of 100% on the SSC estimation results (Gamaro, 2014).

The application of the composed model at the GS1 resulted in better results expressed on the time-series (Figure 11), which now shows min/max of 0.39 and 450

mg.L⁻¹, with mean of 46.37 mg.L⁻¹. Perhaps the maximum SSC estimated out extends the maximum observed, it may be explained by the study conducted by (Landers *et al.*, 2016), which says for frequencies of 0.5 MHz in fresh water, the α_s factor relates directly to the water temperature, where 50% of the backscatter variations are driven by the α_s factor at water temperature in 15°C, and it increases as the water temperature drops (~65% at 10°C; ~80% at 5°C). This fact suggests that while applying the composed model, the response variables α_s and \overline{SCB} (which considers α_s into its process) are influenced by the water temperature around 60% of its behavior, instead of being either influenced by the particle characteristics or quantity.

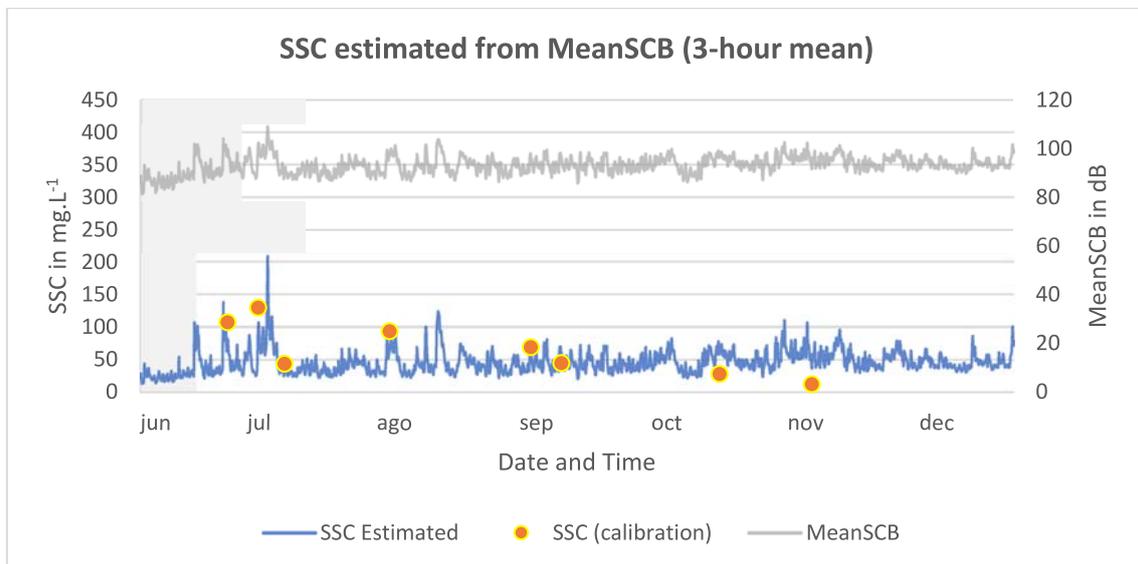


Figure 12 – The estimated SSC time-series for GS2, based on MeanSCB model.

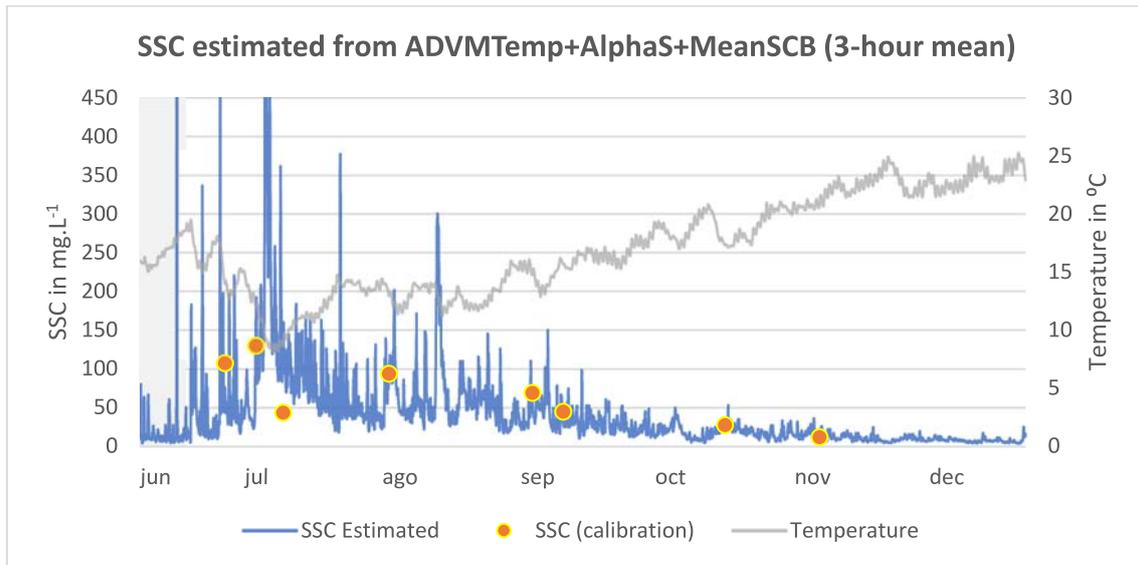


Figure 13 – The estimated SSC time-series for GS2, based on ADVMTemp+AlphaS+MeanSCB model.

At GS2 occurs similar, with the \overline{SCB} based model performing worst compared to the composed model (herein also considering \overline{SCB} , α_s and Water Temperature). By applying the \overline{SCB} model it resulted that the observed SSC data had fitted in the time-series for the entire study period (Figure 12), with min/max SSC estimations of 11.47 and 284.33 mg.L⁻¹, with mean of 46.01 mg.L⁻¹. The \overline{SCB} during the period oscillated between min/max of 79.86 and 112.2 dB, with average of 93.13 dB, higher than the GS1 and not showing night-voltage fluctuations. When applying the composed model at GS2 it shows SSC estimation results as min/max of 1.67 and 35,393.56 mg.L⁻¹, with average of 43.66 mg.L⁻¹, and the Water Temperature oscillating between min/max of 8.03 and 25.26 °C, and average of 17.15 °C (Figure 13). It brings the same limitations previously mentioned, while water temperatures ~9.5 °C results in SSC estimations close to two-times the SSC observed during the period.

The results herein found underestimated the average SSC when compared to a similar study done by (Jung *et al.*, 2020), which found results for Estimated SSC around ~40 and ~200 mg.L⁻¹, with average of 118 mg.L⁻¹ for the SGC by Sediment Rating-Curve, with power function regression from observed SSC and Discharge, which showed RSR of 0.6, NSE of 0.65, and PBIAS of 4.38, classifying this model as Good. Another important study to compare the results herein found is done by

(Fagundes *et al.*, 2021), which estimated by satellite imagery an average of SSC for the SGC ranging between 0-30 mg.L⁻¹, closer to the results herein found.

STUDY LIMITATIONS AND RESEARCH RECOMMENDATIONS

Due to the results so far, we strongly suggest keeping and extending the SSC monitoring program over the São Gonçalo Channel, as adding the granulometric analysis. Primarily, for better understanding the sediment behavior at this site, and better develop the relationship between backscatter and sediment interaction in natural and complex channels, only possible from long-term monitoring of acoustic characteristics. Also, we strongly suggest for further studies around this theme over the BHMSG region, the authors cover the following steps: carefully analyze all the current-powered system to really avoid voltage fluctuations, mainly overnight (sunless period); install different frequencies (from low to high) to analyze its behavior on the correcting backscatter process (low frequencies response better to fine particles, while high frequencies to sand particles); add another surrogate instrument (i.e turbidimeter) to correlates its data to SSC, and maybe from this add another physically response variable to the composed models; sample as much is possibles, it helps on the calibration and validating process when some samples may be discarded, making the process harder.

CONCLUSIONS

From the developed models using H-ADVM to estimate the suspended-sediment concentration at the study sites (GS1 and GS2), the results generated a high degree of certainty. They were based on acoustic data corrected for acoustic transmission and sediment attenuation losses, following the equation proposed by (Gartner, 2004).

The composed model (\overline{SCB} , α_s and Water Temperature) presented Good or Very Good performances in estimating the SSC, and consequent the suspended-sediment transport at both gage stations. This better performance from using the composed method due to the ability of better perform on environments driven by fine

suspended-sediments; despite the fact the high influence of the Water Temperature on the SSC estimations due to its weight on the sediment correction step.

For the analyzed period, it was possible to register moments with high and low SSC concentrations, as well high and low suspended-sediment transport rates, evidencing the better performance of the surrogate methods approach over the sampling-traditional approach and rating-curves, overcoming the temporal scale.

ACKNOWLEDGES

The authors thank NEPE-HidroSedi laboratory at the Federal University of Pelotas (UFPel) for providing all the H-ADVM and SSC data from its Sediment Monitoring Program. The authors thank the Mirim-São Gonçalo Basin Development Agency - ALM for proposing the study theme that is so important for better understanding the complex hydrodynamics of the São Gonçalo Channel, as well for the economic and environmental development of Mirim-São Gonçalo Basin.

Supplementary Information – Table S1

Suspended-sediment Concentration data from Gage Station 1.

d/m/2019	GS1 – Suspended-sediment Concentration [mg.l ⁻¹]						SSC cross-section	Q [m ³ .s ⁻¹]
	1	2	3	4	5	6		
13/mar	43.19	42.76	38.84	50.79	53.33	53.16	46.93	821.59
11/apr	24.66	24.32	24.76	27.22	27.96	32.85	26.66	520.40
11/jun	7.51	12.57	10.25	8.76	14.34	11.31	11.23	224.72
24/jun	34.91	37.23	38.03	39.17	47.19	44.33	39.25	649.86
24/jul	40.73	41.51	-	-	-	-	41.20	592.98
31/jul	43.40	43.83	50.50	49.38	48.14	46.05	46.83	1004.83
21/ago	54.73	53.39	59.37	60.55	57.87	56.15	57.05	1163.46
27/ago	54.99	51.77	59.09	54.99	58.51	57.39	55.97	1127.60
17/sep	35.40	37.35	41.73	42.43	42.42	43.57	40.29	1501.72
08/oct	28.34	30.96	35.82	34.66	38.03	36.92	33.92	1376.60
14/oct	37.41	40.01	42.35	45.50	52.79	51.96	45.06	1332.80
05/nov	17.34	18.08	18.15	16.27	21.00	25.05	19.17	2041.72
20/nov	15.99	15.41	14.86	16.78	16.61	17.34	16.12	1545.63

Supplementary Information – Table S2

Suspended-sediment Concentration data from Gage Station 2.

d/m/2019	GS2 – Suspended-sediment Concentration [mg.l ⁻¹]						SSC cross-section	Q [m ³ .s ⁻¹]	
	1	2	3	4	5	6			CV %
26/jun	-	95.49	93.41	104.95	122.07	-	12.56	106.87	818.08
03/jul	85.51	101.60	119.26	137.63	154.44	171.99	25.37	129.45	1077.59
09/jul	32.33	38.41	42.99	48.31	47.18	47.01	14.67	43.20	722.29
02/ago	89.40	94.13	93.72	95.01	94.31	93.50	2.15	93.44	890.17
03/sep	71.44	71.44	71.59	67.09	67.12	64.01	4.62	68.69	1058.31
10/sep	50.69	49.05	42.75	44.40	41.19	38.69	10.39	44.14	887.36
16/oct	22.82	19.98	30.31	53.50	21.34	19.70	46.94	27.09	1116.25
06/nov	9.48	13.35	11.06	11.51	11.57	10.30	11.73	11.29	1384.43

Appendix – Manuscript Draft submission proof

International Journal of Sediment Research
Surrogate technologies for assessment the suspended-sediment concentrations at São
Gonçalo Channel
 --Manuscript Draft--

Manuscript Number:	
Article Type:	Research Paper
Keywords:	Acoustic Profiler, Sediment-Rating Curves, SSC Estimation
Corresponding Author:	George Marino Soares Gonçalves, M.D Federal University of Pelotas Pelotas, Rio Grande do Sul BRAZIL
First Author:	George Marino Soares Gonçalves, M.D
Order of Authors:	George Marino Soares Gonçalves, M.D Guilherme Kruger Bartels, PhD Gilberto Loguercio Collares, PhD
Abstract:	<p>This paper documents the ability and limitations of applying a single-frequency 0.5 MHz Horizontal Acoustic Doppler velocity meter (H-ADVM), as surrogate methods based on backscatter measurements, to estimate Suspended-sediment concentrations (SSC) and suspended-sediment load on continuous 15-min intervals in São Gonçalo Channel, a natural channel with bi-directional discharges. Two different study sites (GS1/GS2) are analyzed, and its acoustic data are corrected following as in (Gartner, 2004), for sound and sediment attenuation losses. This study considered 21 suspended-sediment samples (13 at GS1 and 8 at GS2) collected by the Equal Discharge Increment method (EDI) using a D-74 or DH-59 sampler, from January to December of 2019. The better model performances were Good at GS1 and Very Good at GS2, based on the RMSE-observations standard deviation ratio (RSR), Nash-Sutcliffe efficiency (NSE), and Percent bias (PBIAS). At GS1 Time-series of SSC estimated were constructed showing min/max of 0.39 and 450 mg.L⁻¹, with average of 46.37 mg.L⁻¹, for multiple linear regression model. At GS2 occurred the same, with Time-series of SSC Estimated showing min/max as 1.67 and 35,393.56 mg.L⁻¹, with average of 43.66 mg.L⁻¹. The use of for multiple linear regression model showed significant gains, despite the evidence of overestimating during low mean corrected-backscatter, and during low water temperatures, at GS1 and GS2, consequently. The SSC Estimation models that presented the best fit allowed the development of time-series in the studied sites, with high time scale. The use of backscatter for this purpose seems a promising approach for continuous SSC monitoring at São Gonçalo Channel.</p>

Appendix – Cover Letter addressed to IJSR Chief Editor.

Dear Hongwei Fang – Chief Editor of IJSR,

I am writing to submit a manuscript entitled "*Surrogate technologies for assessment the suspended-sediment concentrations at São Gonçalo Channel*" for consideration to be published in the International Journal of Sediment Research. This manuscript represents original research in the field of sediment dynamics in river systems, and I believe that it is well suited for publication in your esteemed journal.

In this manuscript, we present a comprehensive study on the estimations of the suspended-sediment concentrations by using Acoustic Doppler Current Profilers instruments, in a natural channel driven by complex fluxes. We used a combination of field measurements and modeling techniques to assess the sediment yield in the study area. The results of this study provide valuable insights into the processes that control sediment transport in natural channel systems and highlight the process of correcting backscatter data for sediment estimations.

We believe that our findings will be of interest to a broad readership and will contribute to the growing body of knowledge in the field of sediment research. We appreciate your time and consideration in reviewing this manuscript for possible publication in your journal.

Thank you for your consideration.

Sincerely,

George Marino Soares Gonçalves

REFERENCES

- Carvalho, N. (2008). *Hidrossedimentologia Prática*. Editora Interciência.
- Chanson, H., Takeuchi, M., & Trevethan, M. (2008). Using turbidity and acoustic backscatter intensity as surrogate measures of suspended sediment concentration in a small subtropical estuary. *Journal of Environmental Management*, 88(4), 1406–1416. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.07.009>
- Chien, Ning, and Zhaohui Wan. "Mechanics of sediment transport." American Society of Civil Engineers, 1999.
- Costi, J., Marques, W. C., Kirinus, E. de P., Duarte, R. de F., & Arigony-Neto, J. (2018). Water level variability of the Mirim - São Gonçalo system, a large, subtropical, semi-enclosed coastal complex. *Advances in Water Resources*, 117(3), 75–86. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2018.05.008>
- Domanski, M. M., Straub, T. D., & Landers, M. N. (2015). Surrogate Analysis and Index Developer (SAID) Tool. U.S. Geological Survey Open-File Report 2015-1177, 38.
- Downing, A., Thorne, P. D., & Vincent, C. E. (1995). Backscattering from a suspension in the near field of a piston transducer. *Journal of the Acoustical Society of America*, 97(3), 1614–1620. <https://doi.org/10.1121/1.412100>
- Edwards, T. K., & Glysson, G. D. (1999). *Field Methods for Measurement of Fluvial Sediment: U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations 3–C2. Techniques of Water-Resources Investigations of the U.S. Geological Survey*, 97.
- Fagundes, H. O., Fan, F. M., Paiva, R. C. D., Siqueira, V. A., Buarque, D. C., Kornowski, L. W., Laipelt, L., & Collischonn, W. (2021). Sediment Flows in South America Supported by Daily Hydrologic-Hydrodynamic Modeling. *Water Resources Research*, 57(2), 1–26. <https://doi.org/10.1029/2020WR027884>
- 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(3–4), 169–187. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2004.07.001>
- Gartner, J. W., D. S. Mueller, G. R. Wall, and J. R. Gray (2003), Breakout session 4: Other fluvial-sediment surrogates, paper presented at Federal Interagency Workshop on Turbidity and Other Sediment Surrogates, Fed. Interagency Subcomm. on Sediment., Reno, Nevada. (Available at <http://pubs.usgs.gov/circ/2003/circ1250/>).
- GAMARO, P. E.; Estimando carga de sedimentos com medidores acústicos Doppler. *Sedimentologia Fluvial: Estudos e Técnicas – Capítulo 3*. Porto Alegre: ABRH. Volume 1, p. 218.2014.
- Gonçalves, G. M. S., Kruger, G., Lima, L. S., Boeira, S., & Loguercio, G. (2023). Continuous discharge monitoring of the Mirim-São Gonçalo system by the index velocity rating curve method. 25(1), 20–35. <https://doi.org/10.2166/hydro.2023.045>

Gray, J. R., and G. D. Glysson (2005), Attributes of a sediment monitoring instrument and analysis research program, paper presented at Federal Interagency Sediment Monitoring Instrument and Analysis Research Workshop, U. S. Geol. Surv., Flagstaff, Ariz. (Available at http://water.usgs.gov/osw/techniques/sediment/sedsurrogate2003workshop/gray_glysson.pdf)

Gray, J. R. (2003), The need for sediment surrogate technologies to monitor fluvial-sediment transport, in Proceedings of the Federal Interagency Sedimentation Workshop on Turbidity and Other Sediment Surrogates, edited by J. R. Gray and G. D. Glysson, U. S. Geol. Surv. Circ., vol. 1250, 4 pp. (Available at <http://water.usgs.gov/osw/techniques/TSS/gray.pdf>)

Gray, J. R., & Gartner, J. W. (2009). Technological advances in suspended-sediment surrogate monitoring. *Water Resources Research*, 46(4).
<https://doi.org/10.1029/2008WR007063>

Guerrero, M., R  ther, N., Szupiany, R., Haun, S., Baranya, S., & Latosinski, F. (2016). The acoustic properties of suspended sediment in large rivers: Consequences on ADCP methods applicability. *Water (Switzerland)*, 8(1), 1–22. <https://doi.org/10.3390/w8010013>

Guerrero, M., Szupiany, R. N., & Amsler, M. (2011). Comparison of acoustic backscattering techniques for suspended sediments investigation. *Flow Measurement and Instrumentation*, 22(5), 392–401. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2011.06.003>

Guy, H. P. (1969). Laboratory theory and methods for sediment analysis. *Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey, Laboratory (Book 5)*, 64. http://pubs.usgs.gov/twri/twri5c1/pdf/TWRI_5-C1.pdf

Gupta, H. V., Sorooshian, S., & Yapo, P. O. (1999). Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *Journal of hydrologic engineering*, 4(2), 135-143.

Horowitz, A. J. (2003). An evaluation of sediment rating curves for estimating suspended sediment concentrations for subsequent flux calculations. *Hydrological Processes*, 17(17), 3387–3409. <https://doi.org/10.1002/hyp.1299>

Jung, B. M., Fernandes, E. H., M  ller, O. O., & García-Rodríguez, F. (2020). Estimating suspended sediment concentrations from river discharge data for reconstructing gaps of information of long-term variability studies. *Water (Switzerland)*, 12(9).
<https://doi.org/10.3390/W12092382>

Kästner, K., Hoitink, A. J. F., Torfs, P. J. J. F., Vermeulen, B., Ningsih, N. S., & Pramulya, M. (2018). Prerequisites for Accurate Monitoring of River Discharge Based on Fixed-Location Velocity Measurements. *Water Resources Research*, 54(2), 1058–1076.
<https://doi.org/10.1002/2017WR020990>

Landers, M. N., Straub, T. D., Wood, M. S., & Domanski, M. M. (2016). Sediment Acoustic Index Method for Computing Continuous Suspended-Sediment Concentrations. In U.S. Geological Survey Techniques and Methods, Book 3, Chap. C5.
<https://doi.org/10.3133/tm3c5>

Latosinski, F. G., Szupiany, R. N., García, C. M., Guerrero, M., & Amsler, M. L. (2014). Estimation of Concentration and Load of Suspended Bed Sediment in a Large River by

Means of Acoustic Doppler Technology. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(7), 04014023. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000859](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000859)

Moore, S. A., Le Coz, J., Hurther, D., & Paquier, A. (2013). Using multi-frequency acoustic attenuation to monitor grain size and concentration of suspended sediment in rivers. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 133(4), 1959–1970. <https://doi.org/10.1121/1.4792645>

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. Van, Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). *M e g s q a w s*. 50(3), 885–900.

Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)

Nolan, K. M., J. R. Gray, and G. D. Glysson (2005), Introduction to suspended-sediment sampling [CD-ROM], U.S. Geol. Surv. Sci. Invest. Rep., 2005 – 5077. (Available at <http://pubs.er.usgs.gov/pubs/sir/sir20055077>)

Oliveira, H., Fernandes, E., Möller, O., & García-Rodríguez, F. (2019). Relationships between wind effect, hydrodynamics and water level in the world's largest coastal lagoonal system. *Water (Switzerland)*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/w11112209>

Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(10), 1633–1644. www.hydrol-earth-syst-sci.net/11/1633/2007/

Schulkin, M., & Marsh, H. W. (1962). Sound Absorption in Sea Water. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 34(6), 864–865. <https://doi.org/10.1121/1.1918213>

Simpson, M. R. (2001). Discharge Measurements using a broad-band acoustic Doppler current profiler. United States Geological Survey OPEN-FILE REPORT 01-1, 134.

SONTEK. SonTek-SL Serier SIDE-LOOKING DOPPLER CURRENT METERS. San Diego, EUA. 2014.

STRAUB, T.; DOMANSKI, M.; WOOD, M.; LANDERS, M.; “Sound” Sediment Science - A Training Course to Augment USGS Course H-17-037, Acoustic Index Method for Estimating Fluvial Suspended Sediment and USGS Techniques and Methods. Report 3C-5. Treinamento. 2018.

Szupiany, R. N., Lopez Weibel, C., Guerrero, M., Latosinski, F., Wood, M., Dominguez Ruben, L., & Oberg, K. (2019). Estimating sand concentrations using ADCP-based acoustic inversion in a large fluvial system characterized by bi-modal suspended-sediment distributions. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44(6), 1295–1308. <https://doi.org/10.1002/esp.4572>

Topping D.J., David J, Wright S.A., Melis T.S., R. D. M. (2006). High-Resolution Monitoring of Suspended-Sediment Concentration and Grain Size in the Colorado River Using Laser- Diffraction Instruments and a Three-Frequency Acoustic System. Proceedings of the Eighth Federal Interagency Sedimentation Conference (8thFISC), 539–546.

[http://pubs.usgs.gov/misc/FISC_1947-2006/pdf/1st-7thFISCs-CD/8thFISC/Session 6C-3_Topping.pdf](http://pubs.usgs.gov/misc/FISC_1947-2006/pdf/1st-7thFISCs-CD/8thFISC/Session%206C-3_Topping.pdf)

URICK, R. J.; Principles of Underwater Sound, 3rd edition. Peninsula Pub. Published in 1996. p. 444. 1975.

Vougioukas, S., Papamichail, D., Georgiou, P., & Papadimos, D. (2011). River discharge monitoring using a vertically moving side-looking acoustic Doppler profiler. *Computers and Electronics in Agriculture*, 79(2), 137–141. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.09.004>

Wood, M. S., & Teasdale, G. N. (2013). Use of Surrogate Technologies to Estimate Suspended Sediment in the Clearwater River, Idaho, and Snake River, Washington, 2008-10. <https://pubs.usgs.gov/sir/2013/5052/pdf/sir20135052.pdf>

Ysi, S. (2009). Appendix B . Argonaut-SW Principles of Operation. 175–194.

Capítulo 5

Considerações Finais

Este trabalho possibilitou ofertar para o Canal São Gonçalo dados contínuos acerca das descargas líquidas e de sedimentos em suspensão, através do desenvolvimento e aplicação de técnicas que usam equipamentos acústicos por efeito doppler (ADCPs), considerando o monitoramento de duas seções, nas extremidades do canal (confluência Mirim-CSG e, confluência CSG-Patos).

Através do desenvolvimento de modelos baseados no Método das Velocidades Indexadas (Artigo 1 da sessão resultados), percebeu-se os ganhos no uso dessa estratégia para o monitoramento contínuo de vazões no Canal São Gonçalo. Os modelos foram capazes de registrar momentos de vazante, inversão e estagnação do fluxo no canal.

Ainda, pode-se avaliar a melhora no desempenho dos modelos quando utilizando dados do Multi-Cell Velocity method (MVC), frente aos modelos que consideram o Integrated Velocity Cell method (IVC) e, Curva-chave (aqui considerada a relação entre Cota e Velocidade Média). Considerado de grande valia para a região, é importante destacar que o monitoramento permitiu atualizar, com precisão, os valores de descarga líquida do canal, considerando os resultados descritos no Artigo 1. Importante destacar que, o valor de descarga líquida mínima registrada, constitui-se como inversão do fluxo, ou seja, $270,68 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ fluindo no sentido de Patos para Mirim.

Tabela 1 – Valores de Nível, Velocidade média e Vazão da água, no Canal São Gonçalo.

	Nível (m)			Velocidade Média (m/s)			Vazão (m ³ /s)		
	Mín	Méd	Máx	Mín	Méd	Máx	Mín	Méd	Máx
Pelotas Campus Anglo (GS1*)	-0,07	0,75	1,78	0,03	0,52	1,29	43,21	723,01	1.980,02
Santa Isabel do Sul (GS2**)	0,29	1,49	3,56	-0,22	0,39	0,95	-270,68	551,46	1.570,65

*Considerando o período de 2015-2022.

**Considerando o período de 2018-2022.

Quando analisamos o Artigo 1, existem diferenças nos resultados produzidos pelos modelos IVC e MCV. As diferenças encontradas são atribuídas ao fato que no MCV, estatisticamente encontra-se o local na seção que possui velocidade da água capaz de melhor representar a velocidade média da seção por completo, ao passo que, no IVC considera-se uma “grande” faixa/perfil da seção, fato que generaliza o comportamento hidráulico da seção, o que pode não ocorrer em locais de fluxo complexo.

De forma semelhante, essa análise serve para o uso da Cota para responder a velocidade e/ou vazão da seção, onde esse parâmetro igualmente generaliza os comportamentos hidráulicos para a seção, tornando essa abordagem incapaz de perceber mudanças de direção do fluxo e represamento das águas do canal.

Por sua vez, este trabalho também contemplou o desenvolvimento de modelos baseados na correção da intensidade do pulso de retorno (backscatter), para a estimativa da Concentração de Sedimentos em Suspensão (Artigo 2, sessão resultados) a partir de ADCPs, no Canal São Gonçalo.

Os modelos desenvolvidos permitiram a construção de séries temporais de CSS de curta escala de tempo. Ainda, o estudo avaliou a estimativa da CSS a partir de diferentes variáveis explanatórias, como: Backscatter Médio corrigido (SCB); Coeficiente de Absorção dos Sedimentos (Alpha S); Temperatura da Água.

O desempenho dos modelos apontou para resultados *Insatisfatórios* com o uso do SCB e Alpha S, ao passo que, os desempenhos de modelos compostos, considerando as três variáveis apresentou desempenho entre *Bom* e *Muito Bom*. Ainda, este monitoramento permitiu ofertar valores de CSS e Descarga Sólida em Suspensão (Qss) atualizados para o canal, considerando os modelos desenvolvidos no Artigo 2.

Tabela 2 – Valores de CSS e Qss no Canal São Gonçalo.

	CSS (mg.L ⁻¹)			Qss*** (ton/dia)		
	Mín	Méd	Máx	Mín	Méd	Máx
Pelotas Campus Anglo (GS1 [†])	0,39	46,37	450,99	21,12	2.821,15	5.289,05
Santa Isabel do Sul (GS2 ^{**})	11,47	46,01	284,33	179,91	2.192,07	1.9012,12

*Considerando o modelo n.4.

**Considerando o modelo n.1.

***Considerando metodologias de Gray e Simões (2008), e Portefild (1972).

Considerando o período de 2019-2020.

Ao analisarmos os resultados descritos no Artigo 2, diferenças são percebidas entre a CSS estimada e observada *in situ*. Essas diferenças podem estar relacionadas, principalmente, ao fato que no canal são observados recorrentes períodos de intrusão salina. Esse fenômeno soma-se ao fato que os modelos foram desenvolvidos considerando apenas uma frequência de ADCP (baixa frequência – 0,5 MHz), algo que limita o modelo com relação à variabilidade do tamanho de partícula. Ainda, ao longo das campanhas de medição, foram percebidas baixas concentrações de CSS, fator limitante para a frequência de ADCP empregada no estudo.

Através deste trabalho conclui-se então que as metodologias aqui aplicadas permitiram construir modelos para estimativa da Vazão e Concentração de Sedimentos em Suspensão e, respectiva Descarga Sólida em Suspensão para o Canal São Gonçalo, com elevado grau de certeza e curto espaço temporal, preenchendo uma lacuna hidrológica na região.

Considerando este estudo, indica-se para o Canal São Gonçalo os valores a seguir: **Descarga Líquida Média de 723,01 m³.s⁻¹ e 551,46 m³.s⁻¹**, para a porção de jusante e montante da Barragem do Canal São Gonçalo, respectivamente; **Concentração de Sedimentos em Suspensão Média de 46,37 mg.L⁻¹ e 46,01 mg.L⁻¹**, para a porção de jusante e montante da Barragem do Canal São Gonçalo, respectivamente; **Descarga Líquida em Suspensão de 2.821,15 ton.dia⁻¹ e 2.192,07 ton.dia⁻¹**, para a porção de jusante e montante da Barragem do Canal São Gonçalo, respectivamente.

Acredita-se que esses dados auxiliarão técnicos, pesquisadores, poder público e privado e, sociedade civil, para a gestão que aponte para o desenvolvimento regional sustentável, alicerçado em dados precisos acerca dos recursos hídricos no Canal São Gonçalo. Para isso, indica-se a continuidade dos programas de monitoramento iniciados para a construção desta obra.

Desta maneira, aceita-se como verdadeira a hipótese deste trabalho.

Referências Bibliográficas

- ALM – Agência para o Desenvolvimento da Bacia da Lagoa Mirim. 2023. **Bacia Hidrográfica Mirim – São Gonçalo (BHMSG)**. Disponível em: <https://agencialagoamirim.com.br/bacia-hidrografica/>. Acesso em: 31 jan. 2023.
- ALM – Agência para o Desenvolvimento da Bacia da Lagoa Mirim. **Lagoa Mirim e Canal São Gonçalo; Hidrovia Uruguai-Brasil, considerações técnicas: o território e suas estruturas**. 2022.
- ALM – Agência para o Desenvolvimento da Bacia da Lagoa Mirim. **MANUAL DE OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DA BARRAGEM DO CANAL SÃO GONÇALO E SUA ECLUSA**. 2021.
- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2021: relatório pleno** / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Brasília : ANA, 2022.
- ÁVILA, R. A.; MÖLLER Jr, O. O; ANDRADE, M. M.; Uso do ADCP para Estimar Concentrações de Material Particulado em Suspensão para o Estuário da Lagoa dos Patos, Brasil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. Volume 19 n. 2, p. 10. 2014.
- ÁVILA, R. A.; OROZCO, P. M. S.; ANDRADE, M. M.; MÖLLER, O. O. Temporal variability of suspended-solids concentration in the estuarine channel of patos lagoon, southern Brazil. **Water (Switzerland)**. 13(5), 1–13. <https://doi.org/10.3390/w13050646>. 2021.
- BACK, A. J.; **HidroSedimentos**, Versão 3.1. 2011.
- BITENCOURT, L. P.; FERNANDES, E. H.; da SILVA, P. D.; MÖLLER, O. Spatio-temporal variability of suspended sediment concentrations in a shallow and turbid lagoon. **Journal of Marine Systems**. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2020.103454>. 2020.
- BONCZYNSKI, Reginaldo Galski. **MODELAGEM GEOMÉTRICA DO CANAL SÃO GONÇALO ATRAVÉS DO LEVANTAMENTO DE SEÇÕES TOPOBATOMÉTRICA**. Trabalho de Conclusão de Curso (Geoprocessamento), UFPel, 2018.
- BORTOLIN, E. C.; TÁVORA, J.; FERNANDES, E. H. L. Long-Term Variability on Suspended Particulate Matter Loads From the Tributaries of the World’s Largest Choked Lagoon. **Frontiers in Marine Science**. 1–17. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.836739>. 2022.
- CARVALHO, N. **Hidrossedimentologia Prática**. Editora Interciência. 2008.
- CARVALHO, N. O.; **Hidrossedimentologia prática**. CPRM – Companhia de Pesquisas em Recursos Minerais. ELETROBRAS. Rio de Janeiro, RJ. p. 372. 1994.
- CHANSON, H.; TAKEUCHI, M.; TREVETHAN, M. Using turbidity and acoustic backscatter intensity as surrogate measures of suspended sediment concentration in a small subtropical estuary. **Journal of Environmental Management**. 88(4), 1406–1416. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.07.009>. 2008.

- CHEN, Y.C., YANG, T.M., HSU, N.S., KUO, T.M. Real-time discharge measurement in tidal streams by an index velocity. **Environmental monitoring and assessment**, v. 184, p. 6423-6436, 2012.
- CHENG, Z., LEE, K., KIM, D., MUSTE, M., VIDMAR, P., HULME, J., Experimental evidence on the performance of rating curves for continuous discharge estimation in complex flow situations. **Journal of Hydrology**, v. 568, p. 959-971, 2019.
- CHANSON, Hubert. **Hydraulics of open channel flow**. Elsevier, 2004.
- CHOW, V. T. **Open channel hydraulics**. New York: McGraw-Hill, 1959.
- CLM – Comissão da Lagoa Mirim. Barragem do São Gonçalo: estudo preliminar de viabilidade. Vol. 1; p. 46. 1970.
- COLVIN, Jeffrey *et al.* Wind driven setup in east central Florida's Indian River Lagoon: Forcings and parameterizations. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 213, p. 40-48, 2018.
- COSTI, Juliana *et al.* Water level variability of the Mirim-São Gonçalo system, a large, subtropical, semi-enclosed coastal complex. **Advances in Water Resources**, v. 117, p. 75-86, 2018.
- DEINES, K. L. **Backscatter estimation using broadband acoustic Doppler current profilers**. RD Instruments, San Diego. USA. 1999.
- DNAEE. **Normas e recomendações hidrológicas**. Anexo III – Sedimentometria. 1970.
- DOMANSKI, M. M.; STARUB, T. D.; WOOD, M. S.; LANDERS, M. N.; WALL, G. R.; BRADY, S. J.; **Surrogate analysis and index developer (SAID) tool and real-time data dissemination utilities**. Conference Paper. Reno, Nevada – EUA, p. 12. 2015.
- RUBEN, D. L. G.; SZUPIANY, R. N.; LATOSINSKI, F. G.; WEIBEL, L. C., WOOD, M.; BOLDT, J. Acoustic Sediment Estimation Toolbox (ASET): A software package for calibrating and processing TRDI ADCP data to compute suspended-sediment transport in sandy rivers. **Computers and Geosciences**. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2020.104499>. 2020.
- DOWNING, A.; THORNE, P. D.; VINCENT, C. E. Backscattering from a suspension in the near field of a piston transducer. **The Journal of the Acoustical Society of America**, v. 97, n. 3, p. 1614-1620, 1995.
- EDWARDS, T. K.; GLYSSON, G. D. **Field methods for measurement of fluvial sediment**. Open-file report - USGS. Reston, Virginia. USA., p. 86-531, 1988.
- FAGUNDES, H. O.; FAN, F. M.; PAIVA, R. C. D.; SIQUEIRA, V. A.; BUARQUE, D. C.; KORNOWSKI, L. W.; LAIPELT, L.; COLLISCHONN, W. Sediment Flows in South America Supported by Daily Hydrologic-Hydrodynamic Modeling. **Water Resources Research**, 57(2), 1–26. 2021.

FERNANDES, Fernanda De Moura; COLLARES, Gilberto Loguercio; CORTELETTI, Rafael. A água como elemento de integração transfronteiriça: o caso da Bacia Hidrográfica Mirim-São Gonçalo. **Estudos Avançados**, v. 35, p. 59-77, 2021.

FERNANDES, H. O; MÖLLER Jr, O. O; RODRÍGUEZ, F. G. Relationships between wind effect, hydrodynamics and water level in the world's largest coastal lagoonal system. *Water*, v. 11, n. 11, p. 2209, 2019.

FERNANDES, H. O; MÖLLER, O. O; GARCÍA, F. R.; (2019). Relationships between wind effect, hydrodynamics and water level in the world's largest coastal lagoonal system. *Water (Switzerland)*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/w11112209>

FRIEDRICHF, A. C.; NIENCHESKIJ, L. F.; SANTOS, I. R. (2006). Dissolved and Particulate Metals in Mirim Lagoon, Brasil-Uruguayan Border. *Journal of Coastal Research SI*, 39(39), 1036–1039. <https://about.jstor.org/terms>. 2006.

GAMARO, P. E. **Medidores Acústicos Doppler de Vazão. Itaipu Binacional**. Foz do Iguaçu, p. 164. 2012.

GARTNER, J. W. Estimation of suspended solids concentrations based on Acoustic Backscatter Intensity: theoretical background. In: **Turbidity and Other Sediment Surrogates Workshop**. Reno, NY, USA. p. 3. 2002.

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

GRAY, J. R.; GARTNER, J. W. Technological advances in suspended-sediment surrogate monitoring. **Water Resources Research**. 46(4). <https://doi.org/10.1029/2008WR007063>. 2009.

GRAY, J. R.; SIMÕES, F. J. M. Estimating Sediment Discharge. American Society of Civil Engineers. **USGS Publications Warehouse**. 2008.

GONÇALVES, George Marino Soares. **ESTIMATIVA DA CONCENTRAÇÃO DE SEDIMENTO EM SUSPENSÃO NO CANAL SÃO GONÇALO A PARTIR DE EQUIPAMENTOS ACÚSTICOS**. 2020, 105p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos), Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2020.

GUERRERO, M.; RÜTHER, N.; SZUPIANY, R.; HAUN, S.; BARANYA, S.; LATOSINSKI, F. The acoustic properties of suspended sediment in large rivers: Consequences on ADCP methods applicability. *Water (Switzerland)*, 8(1), 1–22. <https://doi.org/10.3390/w8010013>. 2006.

HARTMANN, C.; HARKOT, P. F. C. HARTMANN, Carlos; HARKOT, Paulo Fernando Carreta. Influência do canal São Gonçalo ao aporte de sedimentos para o estuário da Laguna dos Patos-RS. **Brazilian Journal of Geology**, v. 20, n. 1, p. 329-332, 1990.

HIRATA, F. E.; MÖLLER Júnior, O. O.; MATA, M. M. Regime shifts, trends and interannual variations of water level in Mirim Lagoon, southern Brazil. **Pan-American Journal of Aquatic Sciences**, 5(2), 254–266. 2010.

JUNG, B. M.; FERNANDES, E. H.; MÖLLER Jr, O. O.; GARCÍA-Rodríguez, F. Estimating suspended sediment concentrations from river discharge data for reconstructing gaps of information of long-term variability studies. *Water*, v. 12, n. 9, p. 2382, 2020.

LANDERS, M. N.; STRAUB, T. D.; WOOD, M. S.; DOMANSKI, M. M.; Sediment acoustic index method for computing continuous suspended sediment concentration. **U.S Geological Survey Techniques and Methods, book 3, chap. C5**. p. 63. 2016.

LATOSINSKI, F. G.; SZUPIANY, R. N.; GARCÍA, C. M.; GUERRERO, M.; AMSLER, M. L.; Estimation of Concentration and Load Suspended Bed Sediment in a Large River by Means of Acoustic Doppler Technology. **Journal of Hydraulic Engineering**. American Society of Civil Engineers. p. 15. 2014.

LE COZ, J.; PIERREFEU, G.; PAQUIER, A. Evaluation of river discharges monitored by a fixed side-looking Doppler profiler. **Water Resources Research**, v. 44, n. 4, 2008.

LEVESQUE, V. A.; OBERG, K. A. Computing discharge using the index velocity method: **U.S. Geological Survey Techniques and Methods (3-A23)**. p. 148. 2012.

LI, W.; YANG, S.; YANG, W.; XIAO, Y.; FU, X.; ZHANG, S. Estimating instantaneous concentration of suspended sediment using acoustic backscatter from an ADV. **International Journal of Sediment Research**, 34(5), 422–431. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2018.10.012>. 2019.

LIMA, L. S. **ESTIMATIVA DE VAZÕES PARA O CANAL SÃO GONÇALO, DO SISTEMA LAGUNAR PATOS-MIRIM -RS, ATRAVÉS DO MÉTODO DAS VELOCIDADES INDEXADAS**. 2016, 63p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Hídrica), Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2016.

KARSBURG, Roberta Machado. **PRECIPITAÇÃO E VELOCIDADE DO VENTO NA OSCILAÇÃO DOS NÍVEIS D'ÁGUA DO CANAL SÃO GONÇALO-RS**. 2016, 79p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos), Universidade Federal de Pelotas, Pelotas-RS, 2016.

KJERFVE, B. Comparative Oceanography of Coastal Lagoons. In *Estuarine Variability*; Wolf, D.A., Ed.; Academic Press: New York, NY, USA, 1986; pp. 63–81.

MEDRONHA, G. D. A. BIGLIARDI, I. M.; SOUZA, M. F.; BONCZYNSKI, R.; DÉCIO JR., R.; SUZUKI, L. A.S.; PRÁ, M. D.; COLLARES, G. L.; Avaliação Da Qualidade Da Água Do Canal São Gonçalo-Rs Através Do Índice De Qualidade De Água. In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Anais... Bento Gonçalves, Rio Grande do Sul, p. 1–8.2013.

MEL, R.; CARNIELLO, L.; D'ALPAOS, L. Addressing the effect of the Mo. SE barriers closure on wind setup within the Venice lagoon. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 225, p. 106249, 2019.

MOORE, S. A.; LE COZ, J.; HURTHER, D.; PAQUIER, A. Using multi-frequency acoustic attenuation to monitor grain size and concentration of suspended sediment in rivers. **The**

Journal of the Acoustical Society of America, 133(4), 1959–1970.
<https://doi.org/10.1121/1.4792645>. 2013.

MUELLER, D. S.; WAGNER, C. R.; REHMEL, M. S.; OBERG, K. A.; RAINVILLE, F.;
 Measuring discharge with acoustic Doppler current profilers from a moving boat (ed. 2). **U.S. Geological Survey Techniques and Methods**. p. 95. 2013.

MUNAR, A. M.; CAVALCANTI, J. R.; BRAVO, J. M.; FAN, F. M.; da MOTTA-MARQUES, D.; FRAGOSO Jr, C. R. Coupling large-scale hydrological and hydrodynamic modeling: Toward a better comprehension of watershed-shallow lake processes. *Journal of hydrology*, v. 564, p. 424-441, 2018.

MUSTE, M.; LEE, K.; KIM, D.; BACOTIU, C.; OLIVEROS, M. R.; CHENG, Z.;
 QUINTERO, F. Revisiting hysteresis of flow variables in monitoring unsteady streamflows. **Journal of hydraulic research**, v. 58, n. 6, p. 867-887, 2020.

MUSTE, Marian; HOITINK, Ton. Measuring flood discharge. In: **Oxford research encyclopedia of natural hazard science**. 2017.

MVOTMA, 2017. Plan Nacional de Aguas.

NOSCHANG, A. A. **ESTIMATIVA DE DESCARGA LÍQUIDA DO CANAL SÃO GONÇALO NA REGIÃO DE DESEMBOCADURA DA LAGOA MIRIM, EXTREMO SUL DO BRASIL, UTILIZANDO O MÉTODO DAS VELOCIDADES INDEXADAS**. 2018, 53p. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Hídrica), Universidade Federal de Pelotas, Pelotas-RS, 2018.

OLIVEIRA, H. A. D.; FERNANDES, E. H. L.; MÖLLER Junior, O. O.; COLLARES, G. L. Processos hidrológicos e hidrodinâmicos da Lagoa Mirim. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 20, p. 34–45. 2015.

PORTERFIELD, G. “**Book 3, Chapter C3: Computation of fluvial-sediment discharge.**” *Techniques of Water-Resources Investigations Report*, U.S. Geological Survey, Reston, Va.. 1972.

PEEL, Murray C.; FINLAYSON, Brian L.; MCMAHON, Thomas A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and earth system sciences**, v. 11, n. 5, p. 1633-1644, 2007.

PERILLO, Gerardo ME; PICCOLO, M. Cintia; PINO-QUIVIRA, Mario. What do we know about the geomorphology and physical oceanography of South American estuaries?. **Estuaries of South America: Their Geomorphology and Dynamics**, p. 1-13, 1999.

SANTOS, I.; FILL, H. D.; SUGAI, M. R. V. B.; BUBA, H.; KISHI, R. T.; MARONE, E.; LAUTERT, L. F. **Hidrometria Aplicada**. Curitiba: Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, LACTEC, 2001. 372 p. 2001.

SCHULKIN, M.; MARSH, H. W.). Sound Absorption in Sea Water. **The Journal of the Acoustical Society of America**, 34(6), 864–865. 1962.

SILVA, G. R. da. **Estimativa da concentração de sedimentos em suspensão empregando Perfiladores Acústicos Dinâmicos (ADCP) no Canal São Gonçalo - RS**. 2021, 93p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Hídrica), Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2021.

SILVA, D. V. da; OLEINIK, P. H.; COSTI, J.; KIRINUS, E. P. de; MARQUES, W. C. Residence time patterns of Mirim Lagoon (Brazil) derived from two-dimensional hydrodynamic simulations. **Environmental Earth Sciences**, v. 78, p. 1-11, 2019.

SONTEK. **SonTek-SL Serier SIDE-LOOKING DOPPLER CURRENT METERS**. San Diego, EUA. 2014.

SOUZA, M. F.; Qualidade da água do Canal São Gonçalo-RS/Brasil: uma avaliação hidroquímica considerando seus usos múltiplos. 2015.105 f.Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Pelotas, 2015.

SZUPIANY, R. N.; WEIBEL, C. L.; GUERRERO, M.; LATOSINSKI, F.; WOOD, M.; RUBEN, L. D.; OBERG, K. Estimating sand concentrations using ADCP-based acoustic inversion in a large fluvial system characterized by bi-modal suspended-sediment distributions. **Earth Surface Processes and Landforms**, 44(6), 1295–1308. <https://doi.org/10.1002/esp.4572>. 2019.

TÁVORA, J.; FERNANDES, E. H. Leão; MÖLLER Jr, O. O. Patos Lagoon, Brazil, suspended particulate matter (SPM) data compendium. 2022.

TOLDO, E.E. Sedimentação, Predição do Padrão de Ondas e Dinâmica Sedimentar da Antepraia e Zona de Surfe do Sistema Lagunar da Lagoa dos Patos. Ph.D. Thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil, 1994.

TOPPING, D.J.; DAVID, J; WRIGHT, S.A.; MELIS, T.S. R. D. M. (2006). High-Resolution Monitoring of Suspended-Sediment Concentration and Grain Size in the Colorado River Using Laser- Diffraction Instruments and a Three-Frequency Acoustic System. **Proceedings of the Eighth Federal Interagency Sedimentation Conference (8thFISC)**. 2006.

TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. 4ª. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2009. 943 p.

URICK, R. J.; Principles of Underwater Sound, 3rd edition. **Peninsula Pub**. Published in 1996. p. 444. 1975.

VIEIRA, E. F. Planície costeira do Rio Grande do Sul: geografia física, vegetação e dinâmica sociodemográfica. Porto Alegre: Sagra, 1988. 256 p. ISBN 8524101970.

VIEIRA, H. M.; WESCHENFELDER, J.; FERNANDES, E. H.; OLIVEIRA, H. A.; MÖLLER, O. O.; GARCIA, R. F. Links between surface sediment composition, morphometry and hydrodynamics in a large shallow coastal lagoon. **Sedimentary Geology**, v. 398, p. 105591, 2020.

WOOD, M. S. Estimating suspended sediment in rivers using acoustic Doppler meters. **US Geological Survey**, 2014.

WOOD, M. S.; TEASDALE, G. N.; Use of Surrogate Technologies to Estimate Suspended Sediment in the Clearwater River, Idaho, and Snake River, Washington, 2008-10. **U.S Geological Survey Scientific Investigations Report 2013-5052**. p. 30. 2013.

WOSIACKI, L. F. K.; SUEKAME, H. K.; WOOD, M. S.; GONÇALVES, F. V.; BLENINGER, T. Mapping of suspended sediment transport using acoustic methods in a Pantanal tributary. **Environmental Monitoring and Assessment**, 193(8). <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09266-w>. 2021. 2021.