

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

**VARIABILIDADE MORFODINÂMICA DE DELTAS LAGUNARES HOLOCÊNICOS  
DO LITORAL NORTE DO RIO GRANDE DO SUL**

**MARIAH XAVIER ROCHA**

**ORIENTADORA – Profa. Dra. Maria Luiza Correa da Camara Rosa**

**Porto Alegre, 2020**

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

**VARIABILIDADE MORFODINÂMICA DE DELTAS LAGUNARES HOLOCÊNICOS  
DO LITORAL NORTE DO RIO GRANDE DO SUL**

MARIAH XAVIER ROCHA

ORIENTADORA – Profa. Dra. Maria Luiza Correa da Camara Rosa

**BANCA EXAMINADORA**

Dra. Samanta da Costa Cristiano

Prof. Dr. Elírio Ernestino Toldo Júnior

Prof. Dr. Luiz José Tomazelli

Dissertação de Mestrado apresentada como  
requisito parcial para obtenção do Título de  
Mestre em Geociências.

**Porto Alegre, 2020**

## FICHA CATALOGRÁFICA

### CIP - Catalogação na Publicação

Rocha, Mariah Xavier  
VARIABILIDADE MORFODINÂMICA DE DELTAS LAGUNARES  
HOLOCÊNICOS DO LITORAL NORTE DO RIO GRANDE DO SUL /  
Mariah Xavier Rocha. -- 2020.  
105 f.  
Orientadora: Maria Luiza Correa da Câmara Rosa.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do  
Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa  
de Pós-Graduação em Geociências, Porto Alegre, BR-RS,  
2020.

1. Deltas lagunares. 2. Morfologia deltaica. 3.  
Sistema morfodinâmico. 4. Planície Costeira do Rio  
Grande do Sul (PCRS). I. Rosa, Maria Luiza Correa da  
Câmara, orient. II. Título.

*À todas aquelas que vieram antes trilhando o caminho.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao tempo e a comunhão de fatores que me trouxeram até aqui.

Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudos concedida, sem a qual não teria sido possível a realização dessa pesquisa.

Agradeço a todas as pessoas com quem pude conviver e dividir experiências ao longo dessa trajetória:

À minha orientadora Maria Luiza, pela abertura, troca, investimento, paciência e confiança.

Aos professores Sérgio Rabello Dillenburg, Eduardo Guimarães Barboza e especialmente ao professor Felipe Caron pelo auxílio na aquisição de dados de campo que em breve serão explorados.

Ao técnico José Carlos Rodrigues Nunes pela positividade e pelo fundamental auxílio na aquisição e processamento dos dados batimétricos.

Ao técnico Gilberto Silveira dos Santos por todas instruções sobre os procedimentos de análise de dados sedimentológicos.

Aos colegas que se tornaram novos amigos:

Simone Trindade, parceira de mar e lagoas, obrigada pela construção e disponibilização dos modelos batimétricos, ajuda durante os trabalhos de campo e as boas conversas.

Volney Bitencourt, Nicolás Bose, Bruno Fontoura e Caleb Ribeiro pela força e disposição de encarar o trabalho de campo sem tempo ruim.

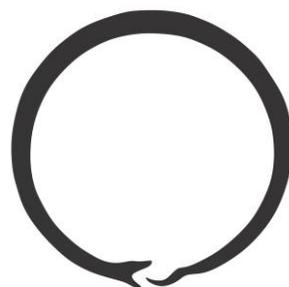
Maiara Rech, pela parceria e pela ajuda com a estrutura do artigo. Agradeço a você e a Débora Sayuri Zanchi Watanabe pelos bons momentos e deliciosas risadas compartilhadas.

Ao meu companheiro, melhor amigo e grande fonte de amor e carinho Giuseppe Betino De Toni. Obrigada por estar ao meu lado e tornar os dias mais vibrantes. Por me ouvir, por opinar, por ajudar e cuidar!

Agradeço a minha mãe, Ana Maria Xavier Rocha, pela vida, pelo amor, pela compreensão, pela inspiração e a capacidade de sonhar.

À minha madrinha, Maria Angélica Xavier Zuannazzi, por querer bem e se preocupar em oferecer melhores condições.

Agradeço!



**Tudo que vive nessa Terra  
pra essa Terra é alimento.**

*(Grande Poder – Mestre Verdelinho)*

## RESUMO

Deltas lagunares estão distribuídos ao longo da Planície Costeira do Rio Grande do Sul (PCRS), localizados preferencialmente no Sistema Laguna-Barreira IV, em porções onde a linha de costa apresenta comportamento transgressivo. A maior parte dos deltas está condicionada pelo influxo sedimentar provido pelos campos de dunas que ali se desenvolvem, fazendo parte do processo de retrogradação do Sistema IV. No litoral norte da PCRS, diferentes morfologias deltaicas são observadas nas margens leste das Lagoas do Gentil e Manuel Nunes e esta dissertação tem como objetivo responder como os fatores controladores interagem na produção da diversidade morfológica. Para identificar as relações morfodinâmicas, realizou-se a análise morfométrica temporal dos elementos que compõem os sistemas deltaicos utilizando sensoriamento remoto conjugado com sistemas de informação geográfica. Os parâmetros morfométricos obtidos para os anos de 2003 a 2018 foram correlacionadas com perfis topográficos e modelos batimétricos. As morfologias deltaicas observadas variam entre lobadas, arqueadas e digitadas, e os fatores controladores compreendem principalmente disponibilidade de sedimentos, espaço de acomodação, presença de vegetação, processos eólicos e atividades antrópicas. O aporte sedimentar está vinculado aos processos costeiros sobretudo aos fluxos eólicos que influenciam desde a ação das ondas até a migração do campo de dunas no sentido NE. O espaço de acomodação relaciona-se com os níveis de base dado pela batimetria das lagoas e as flutuações do nível d'água, que é controlado pelas precipitações e variações climáticas sazonais. A presença de vegetação no campo de dunas dificulta a entrada de sedimentos e aumenta a umidade no solo, propiciando a formação de canais aluviais coesos, sinuosos e estreitos. Na ausência de vegetação os canais são largos e difusos e os processos eólicos dominam. A presença de salinidade e a baixa profundidade da Lagoa do Gentil contribui para ampla proliferação das macrófitas aquáticas, as quais auxiliam na estabilização dos lobos deltaicos. Enquanto na Lagoa Manuel Nunes a ausência de salinidade e maiores profundidade na margem leste, refletem na ausência de macrófitas aquáticas junto aos deltas. A expansão da ocupação urbana sobre a Barreira IV faz com que o transporte de sedimentos da praia para o campo de dunas seja interrompido, diminuindo a disponibilidade de sedimentos, ao mesmo tempo em que propicia o aumento de umidade pela impermeabilização do solo e pela introdução de vegetação, como a espécie invasora *Pinus sp.* A implantação do parque eólico sobre o campo de dunas altera a forma e a extensão das sub-bacias de drenagem que alimentam os deltas lagunares, no entanto, apresentam pouco ou nenhum reflexo nas planícies deltaicas no período observado. As interações entre as causas e os efeitos que condicionam as morfologias deltaicas foram integradas em uma rede e a partir dessas relações foi sugerido um modelo evolutivo para dos deltas lagunares. Dentro da curta escala de tempo em que foram observados, as tendências evolutivas indicam que os sistemas deltaicos podem evoluir de morfologias arqueadas para lobadas, e de lobadas para digitadas.

**Palavras-chave:** Deltas lagunares; Morfologia deltaica; Sistema morfodinâmico; Planície Costeira do Rio Grande do Sul (PCRS).

## ABSTRACT

Lagoon deltas are distributed along the Rio Grande do Sul Coastal Plain (RSCP), preferentially located along Laguna-Barrier IV system, in portions where the coastline presents a transgressive behavior. Most deltas are conditioned by the sedimentary influx provided by dune field migration, as part of the Barrier IV retrograde process. In the northern coast of RSCP, different deltaic morphologies are observed in the eastern margins of Gentil and Manuel Nunes lagoon. This work aims to answer how the controlling factors interact to produce morphological diversity. To identify the morphodynamic relationships, a temporal morphometric analysis of deltaic systems elements was performed using remote sensing integrated with Geographic Information Systems. The morphometric parameters obtained from 2003 to 2018 were correlated with actual topographic profiles and bathymetric models. Deltaic morphologies vary between lobates, arcuated and birdsfoot, and the main controlling factors comprise sediment availability, accommodation space, vegetation presence, wind processes and anthropic activities. Sediment input is linked to coastal processes, mainly the wind flows that influence wave action and the dune field migration towards NE. The accommodation space relates to the base levels given by lagoons bathymetry and fluctuations in the water level, which is controlled by rainfall and seasonal climatic variations. Vegetation presence in dune field makes it difficult for sediment to enter and increases soil moisture, leading to the formation of cohesive, winding and narrow alluvial channels. In the absence of vegetation the channels are wide and diffuse, with dominating wind processes. Salinity presence and Gentil Lagoon shallow depth contributes to aquatic macrophytes wide proliferation, which help delta lobes stabilization. On the other hand, salinity absence of Manuel Nunes Lagoon and greater depths of its eastern margin lead to the absence of aquatic macrophytes near deltas. Urban expansion over the Barrier IV System causes interruption of sediment transport from the beach to the dune field, reducing sediment availability. At the same time it increases soil moisture due to surface sealing and the vegetation introduction, such as the invasive species *Pinus sp.* The wind farm over the dune field changes the shape and extent of the drainage sub-basins that feed the lagoon deltas. However, it presents either small or no influence on the deltaic plains along the observed period. Interactions between causes and effects that conditioned deltaic morphologies were integrated in a network and from these relationships an evolutionary model for the lagoon deltas is suggested. Within the short timeframe in which they were observed, evolutionary trends indicate that delta systems can evolve from arcuate to lobed, and lobed to birdsfoot morphologies.

**Keywords:** Lagoon deltas; Delta morphology; Morphodynamic system; Rio Grande do Sul Coastal Plain (RSCP).

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Classificação tripartida em membros finais dominados por rios, ondas e marés onde os membros finais dominados pela maré são anotados como sendo estuarinos. (Galloway, 1975)..... 14
- Figura 2.** Seção transversal apresentando a sucessão vertical de fácies, indicando a divisão dos três sub-ambientes deltaicos e seus estratos correspondentes (*topset*, *foreset* e *bottomset*) (Elliott, 1986, *apud* Bhattacharya, 2006)..... 16
- Figura 3.** Representação das escalas espaciais e temporais apropriadas para o estudo da morfodinâmica costeira (Guimarães, 2014, modificado de Cowell e Thom, 1994) ..... 18
- Figura 4.** (A) A localização da área de estudo parte da escala da Bacia de Pelotas e abrange toda Planície Costeira do Rio Grande do Sul (PCRS), onde a linha de costa é sinuosa. (B) A presença de deltas lagunares marginais se concentra nas projeções costeiras e está condicionada a presença dos campos de dunas. (C) No Litoral Norte da PCRS, situado na extremidade de uma projeção costeira, deltas marginais são depositados entre o Campo de Dunas de Cidreira e as Lagoas do Gentil e Manuel Nunes. A legenda do mapeamento de maior escala indica os sub-ambientes geomorfológicos naturais e as intervenções antrópicas de uso do solo como elementos fisiográficos importantes que constituem o sistema deposicional. ....20
- Figura 5.** Dados de precipitação diária acumulada, apresentando anomalias positivas e negativas com relação à climatologia acumulada calculada para o litoral norte da PCRS entre os anos de 1997 a 2014. Os retângulos amarelos abrangem períodos de tempo próximo as datas das imagens observadas nos anos de 2003, 2009, 2012, 2016 e 2018, enquanto as linhas cinzas indicam a precipitação diária acumulada para estes períodos com seus respectivos valores. (CPETC/INPE: <<http://clima1.cptec.inpe.br/estacaochuvosa/pt>>) .....22
- Figura 6.** Bacia hidrográfica do Rio Tramandaí com proposta de enquadramento realizado por Castro e Rocha, (2016) para as lagoas costeiras, onde classifica como salobras as águas da Lagoa do Gentil, e doces as águas da Lagoa Manuel Nunes. ....29
- Figura 7.** (A) Modelo batimétrico da Lagoa do Gentil; (B) Modelo batimétrico da Lagoa Manuel Nunes (*modificado* de TRINDADE, 2019). ....30
- Figura 8.** Deltas lagunares de diferentes morfologias condicionados pelo Campo de Dunas. (A) Margem leste da Lagoa do Gentil com indicação dos deltas estudados, denominados como G1, G2, G3 e G4. (B) Margem leste da Lagoa Manuel Nunes, indicando os deltas denominados como MN1 e MN2. ....31
- Figura 9.** Imagens utilizadas como base do mapeamento da área de estudo no litoral norte da PCRS. A) Fotografia aérea de 1974; Imagens de satélite do Google Earth® utilizados como base dos mapeamentos para análise temporal para as datas de: B) 23/05/2003; C) 26/10/2009; D) 17/03/2012; E) 13/05/2016; F) 03/09/2018; e G) Modelo Digital de Elevação (MDE) ALOS World 3D (AW3D).....33

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
1.1 OBJETIVOS .....	11
<b>1.1.1 Objetivo Geral</b> .....	<b>11</b>
<b>1.1.2 Objetivo Específico</b> .....	<b>11</b>
1.2 MOTIVAÇÃO .....	11
<b>2. ESTADO DA ARTE</b> .....	<b>12</b>
2.1 SISTEMAS DELTAICOS.....	12
<b>2.1.1 Classificação</b> .....	<b>13</b>
<b>2.1.2 Morfologia</b> .....	<b>15</b>
2.2 SISTEMAS MORFODINÂMICOS .....	16
<b>3. CONTEXTO GEOLÓGICO</b> .....	<b>19</b>
3.1 CLIMA E PROCESSOS COSTEIROS .....	21
3.2 SISTEMA BARREIRA IV.....	23
3.3 SISTEMA LAGUNAR IV.....	25
3.4 DELTAS LAGUNARES HOLOCÊNICOS.....	30
<b>4. METODOLOGIA</b> .....	<b>32</b>
4.1 MORFOMETRIA DOS ELEMENTOS FISIAGRÁFICOS .....	32
4.2 PERFIS DE DECLIVIDADE .....	39
<b>5. VARIABILIDADE MORFODINÂMICA DE DELTAS LAGUNARES HOLOCÊNICOS DO LITORAL NORTE DO RIO GRANDE DO SUL.....</b>	<b>40</b>
<b>6. CONCLUSÕES</b> .....	<b>91</b>
<b>7. REFERÊNCIAS</b> .....	<b>93</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>99</b>
ANEXO A.....	99

## 1. INTRODUÇÃO

A Planície Costeira do Rio Grande do Sul (PCRS) abriga deltas lagunares preferencialmente localizados no Sistema Laguna-Barreira IV, em porções onde a linha de costa é convexa. Esses deltas estão condicionados pelo influxo sedimentar do campo de dunas que se desenvolvem nas regiões de projeção costeira, onde a linha de costa apresenta comportamento transgressivo segundo Dillenburg *et. al.* (2000). Dessa forma, os deltas lagunares Holocênicos da PCRS se desenvolvem como parte do processo de retrogradação da Barreira IV. É interessante notar que muitos desses deltas lagunares apresentam diferentes morfologias, tanto de uma lagoa para outra como em uma única lagoa, como é o caso das Lagoas do Gentil e Manuel Nunes localizadas no litoral norte do Rio Grande do Sul. Tais variações levam a questionar quais seriam os fatores envolvidos no controle dessas morfologias deltaicas. A hipótese sugerida é de que diferentes combinações de fatores como disponibilidade de sedimento, relevo do fundo lagunar, nível d'água, presença de vegetação e salinidade atuam na produção das diferentes morfologias.

Essa dissertação de mestrado compreende uma breve revisão sobre modelos clássicos de sistemas deltaicos e sistemas morfodinâmicos, apresentados como o estado da arte no segundo capítulo. O terceiro capítulo abrange a revisão detalhada do contexto geológico da área de estudo. A metodologia utilizada é baseada em métodos indiretos e está descrita no quarto capítulo. Os resultados obtidos e as discussões elaboradas estão integralmente apresentados dentro do quinto capítulo, correspondente ao artigo submetido à Revista Brasileira de Geomorfologia, intitulado "*Variabilidade Morfodinâmica de Deltas Lagunares Holocênicos do litoral norte do Rio Grande do Sul*". O sexto capítulo trás as conclusões apresentadas como tópicos, elencando dos principais fatores envolvidos no controle morfológico dos deltas lagunares estudados. A lista de figuras não inclui aquelas apresentadas dentro do artigo submetido, bem como as referências listadas no sétimo capítulo.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Compreender quais são os fatores que controlam os sistemas deltaicos e como esses interagem na produção da diversidade morfológica, utilizando as Lagoas do Gentil e Manuel Nunes localizadas no litoral norte da Planície Costeira do Rio Grande do Sul como estudos de caso.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Calcular os parâmetros morfométricos dos elementos fisiográficos que compõem diferentes sistemas deltaicos para diferentes instantes de tempo de forma a observar as possíveis variações ambientais e processos envolvidos.

## 1.2 MOTIVAÇÃO

A arquitetura estratigráfica é condicionada por processos que ocorrem em diferentes escalas de espaço e tempo, combinando processos alogênicos e autogênicos. Processos alogênicos correspondem à dinâmica de grande escala, relacionados principalmente às mudanças no nível de base. Enquanto processos autogênicos ocorrem em pequena a meso escala, sofrendo fortes influências por variações no transporte hidráulico e aporte de sedimentos, como é o caso da dinâmica costeira da Planície Costeira do Rio Grande do Sul nos últimos 6 ka (DILLENBURG *et al.* 2000; TRAVESSAS *et al.*, 2005; ROSA *et. al.*, 2017). A relação entre os fatores que compõem a rede de processos autogênicos e suas formas de registro podem contribuir para o avanço do entendimento sobre a evolução dos tratos de sistemas e ambientes de deposição. A presente dissertação busca compreender os processos internos aos sistemas deltaicos, baseando sua motivação em contribuir para o desenvolvimento de um novo paradigma de interpretação do registro sedimentar que destaca a importância dos fatores autogênicos, a Estratigrafia de Processos.

## 2. ESTADO DA ARTE

### 2.1 SISTEMAS DELTAICOS

Sistemas deltaicos podem ser sucintamente definidos como acumulações sedimentares formadas em desembocaduras de rios que encontram corpos d'água marinhos ou lagunares, onde a capacidade de retrabalhamento bacinal é inferior ao influxo sedimentar (CASTRO e CASTRO, 2008). Os processos exercem controle significativo sobre a geometria, gênese e distribuição dos sistemas deltaicos, abrangendo diferentes escalas de espaço e tempo (COLEMAN e WRIGHT, 1975; COWELL e THOM, 1997). Variações climáticas, ciclos glácio-eustáticos e a atividade tectônica atuam na ordem de milênios, associados a processos alogênicos. As variações do nível do mar e o comportamento tectônico controlam o nível de base por mecanismos de deposição e subsidência, respectivamente. Os fatores climáticos determinam a intensidade de intemperismo físicos, químicos e biológicos atuantes sobre uma bacia. Os processos inerentes aos sistemas deposicionais, ou processos autogênicos são condicionados pelos processos alogênicos. Compreendem o tipo de regime fluvial e o tipo de fluxo, o aporte sedimentar e os processos costeiros de ondas, marés e correntes litorâneas (BHATTACHARYA, 2006; CASTRO e CASTRO, 2008). Processos individuais controlam aspectos específicos do delta, mas o ambiente no qual todos os processos estão interagindo com diferentes intensidades determina a relação lateral e vertical final de cada delta (COLEMAN e WRIGHT, 1975).

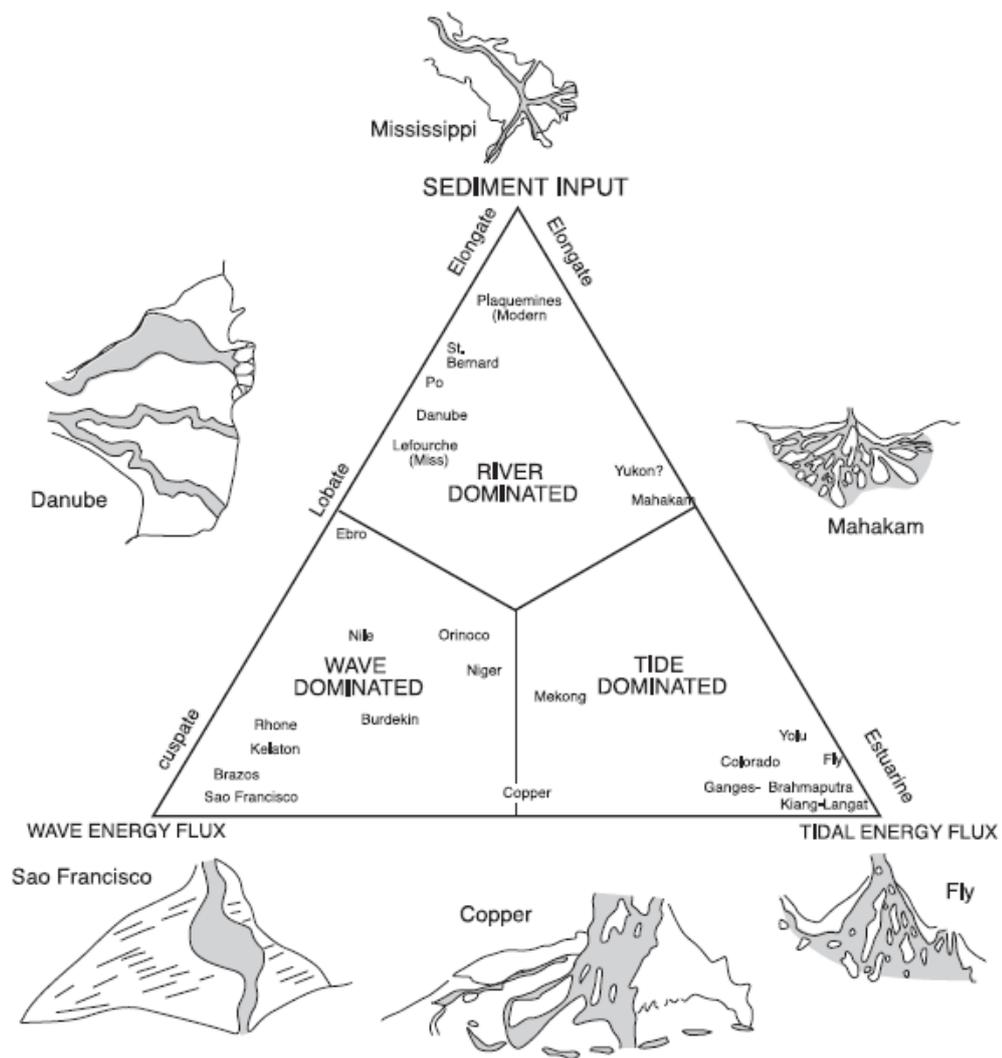
Para Dalrymple (1999), deltas possuem natureza fundamentalmente regressiva, ou seja, são formados em contextos ambientais onde a linha de costa migra em direção ao oceano e predominam os processos fluviais. Essa perspectiva, no entanto, está voltada para os deltas marinhos. Deltas lagunares são encontrados ao longo da Planície Costeira do Rio Grande do Sul (PCRS), preferencialmente condicionados pelo influxo sedimentar provido por campos de dunas que se desenvolvem no Sistema Barreira IV, em regiões de projeção costeira caracterizadas por Dillenburg *et. al.* (2000) como setores onde a linha de costa apresenta comportamento transgressivo. Dessa forma, enquanto deltas marinhos se desenvolvem em contextos de linha de costa regressiva (DALRYMPLE, 1999), os deltas lagunares da PCRS se desenvolvem como parte do processo de

retrogradação, como indicam Lima *et al.*, (2013), a partir das evidências do registro evolutivo da Barreira IV na localidade de Hermenegildo.

### **2.1.1 Classificação**

Diversos sistemas de classificação foram propostos para compreender as variabilidades morfológicas de sistemas deltaicos, sendo necessário conhecer os fatores forçantes envolvidos e a distribuição de fácies. Alguns modelos clássicos estão baseados nos processos atuantes sobre os sistemas, como Fischer *et al.* (1969) que identifica deltas altamente construtivos onde há predomínio de fácies fluviais de morfologias alongadas e lobadas; e deltas altamente destrutivos onde predominam as fácies marinhas com ação de ondas e marés de morfologias cuspidadas e franjadas, respectivamente. Galloway (1975) propôs uma classificação ternária onde os extremos indicam o predomínio da ação fluvial, das ondas, e das marés (figura 1), enquanto Orton e Reading (1993) descreve tipologias intermediárias que compreendem diferentes combinações entre esses processos.

Os fatores climáticos influenciam diretamente na composição, tamanho e transporte dos sedimentos e morfologia fluvial. Segundo Coleman e Wright (1975), deltas de climas áridos podem ser compostos por sedimentos evaporíticos, com regime fluvial irregular, canais instáveis e geralmente entrelaçados com maior carga de fundo e vegetação escassa. Enquanto em climas quentes a maior intensidade do intemperismo químico e presença de cobertura vegetal condiciona a formação de horizontes pedológicos de sedimentos finos, favorecendo o transporte de carga em suspensão pelos canais fluviais. Em climas temperados finas turfas são interdigitadas com clásticos finos, e em climas tropicais geram turfas espessas. (COLEMAN e WRIGHT, 1975).



**Figura 1.** Classificação tripartida em membros finais dominados por rios, ondas e marés onde os membros finais dominados pela maré são anotados como sendo estuarinos. (Galloway, 1975).

Orton e Reading (1993) destacam o tamanho de grão dominante, relacionando os sedimentos lamosos e sílticos aos deltas dominados por rios e marés, sedimentos arenosos finos relacionados a deltas dominados por rios e ondas, ocorrendo casos de domínio por rios e marés, enquanto os sedimentos cascalhosos e arenosos correspondem predominantemente a leques deltaicos depositados em um talude de gradiente elevado por processos aluviais.

Bates (1953) considera a densidade de fluxo dos canais fluviais, definindo três classes: Hipopical onde a maior densidade das águas marinhas permite que o fluxo de sedimentos seja transportado em suspensão; Homopical, quando as águas possuem densidades semelhantes, ocorrendo em lagos; e Hiperpical onde fluxos fluviais densos geram correntes de turbidez depositando leques nos sopés dos

taludes continentais e nas desembocaduras de cânions submarinos. Deltas tipo Gilbert correspondem a densidades de fluxo homopneumais e são normalmente descritos para ambientes lacustres de alto gradiente, com sedimentos predominantemente cascalhosos e camadas frontais de avalanche e podendo apresentar retrabalhamento por ondas (BHATTACHARYA, 2006).

### 2.1.2 Morfologia

Em linhas gerais, as morfologias desenvolvidas por deltas dominados por rios tendem a ser digitadas ou lobadas. Deltas influenciados por ondas apresentam lobos com frentes suaves e margens arqueadas ou cuspidadas. Enquanto os deltas dominados por marés formam corpos arenosos orientados paralelamente às direções das correntes de maré, tipicamente perpendiculares às linhas de costa regionais (figura 1). DALRYMPLE, 1992.

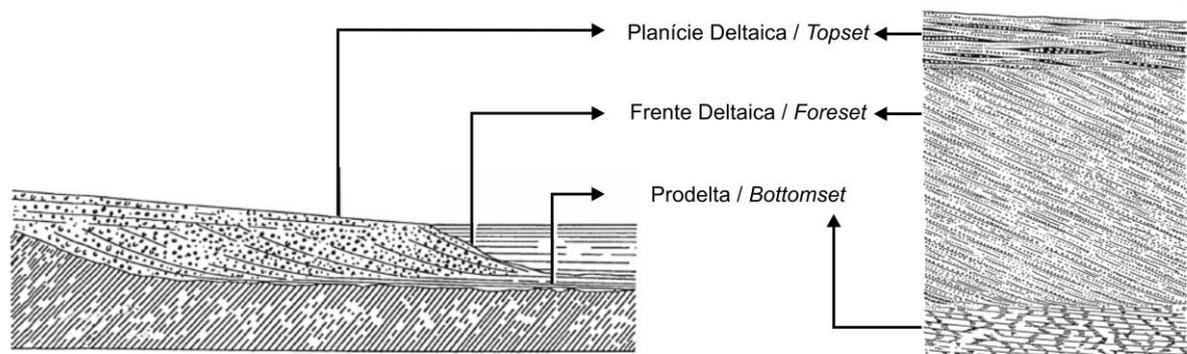
Os sistemas deltaicos são compartimentados em três sub-ambientes de deposição que se sobrepõem: planícies deltaicas, frentes deltaicas e prodeltas (figura 2). As suas características gerais são descritas por Cowell e Thom (1997), e Bhattacharya (2006) da seguinte forma:

- **Planícies deltaicas** são porções subaéreas onde dominam os processos fluviais e correspondem ao estrato superior denominado *topset*. Compõem um mosaico de canais de distribuição e ambientes intercanais que podem formar diferentes sub-ambientes a depender do clima, como baías, lagoas, estuários, planícies de inundação, marismas, pântanos, campos de dunas ou salinas. Os tipos de vegetação que se desenvolvem nesses ambientes dependem dos teores de salinidade e possibilitam a sedimentação de matéria orgânica, associada a depósitos de carvão. Além disso, pode-se subdividir a planície deltaica em: (i) superior, onde ocorrem depósitos de granulação mais grossa com base erosiva, associados aos canais fluviais; e (ii) inferior, onde os canais distributivos podem ser influenciados por ondas e marés. Deltas dominados por ondas geralmente têm menos canais distributivos do que aqueles dominados por rios.

- **Frentes deltaicas** são áreas de transição do ambiente fluvial para o marinho ou lagunar, onde ocorre a interação entre os processos fluviais e bacinais. A maior parte da deposição ativa ocorre na frente deltaica, formando barras de

desembocadura de geometrias sigmoidais. Correspondem ao estrato intermediário denominado *foreset* e em geral apresentam granulação mais grossa.

- **Prodeltas** são compostos principalmente por sedimentos finos depositados por suspensão ou correntes de turbidez. Correspondem aos estratos inferiores denominados *bottomset*, compostos predominantemente por laminações paralelas que se fundem suavemente com a frende deltaica e o fundo da bacia receptora. Geralmente apresentam continuidade lateral de menor variação litológica comparado a frente deltaica. Nas porções mais distais a deposição é relativamente lenta, permitindo ampla colonização de organismos que produzem bioturbações. Nas direções proximais pode haver maior estresse ambiental e maiores taxas de sedimentação, resultando em menos bioturbações.

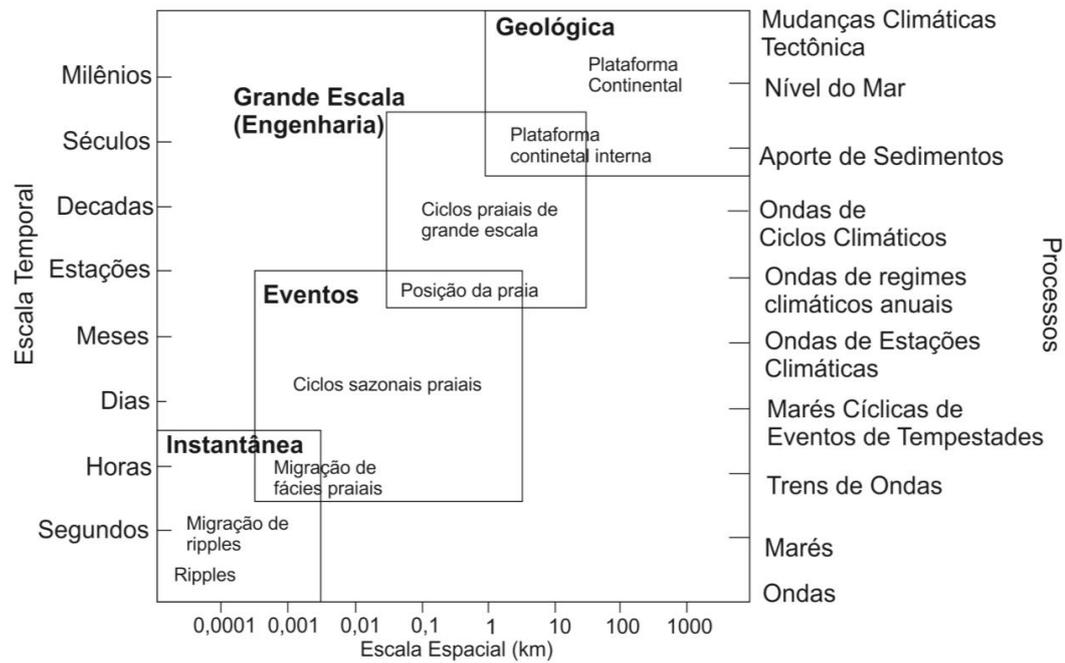


**Figura 2.** Seção transversal apresentando a sucessão vertical de fácies, indicando a divisão dos três sub-ambientes deltaicos e seus estratos correspondentes (*topset*, *foreset* e *bottomset*) (Elliott, 1986, *apud* Bhattacharya, 2006)

## 2.2 SISTEMAS MORFODINÂMICOS

A propriedade essencial dos processos morfodinâmicos costeiros é dada pela interação entre a topografia e a dinâmica dos fluidos que conduzem o transporte de sedimentos. A fronteira sólida da superfície topográfica exerce controle sobre os fluxos, os quais sofrem alterações espaciais em suas velocidades, pressões e / ou densidades, para conservar sua massa fluida. As mudanças no relevo decorrentes da continuidade dos fluxos envolvem múltiplas dimensões de espaço e tempo que variam em conjunto. As escalas em que os processos operam foram agrupadas em quatro classes por Cowell e Thom (1997), e estão sumarizadas na figura 3. Esse

jogo de interferências mútuas impulsiona mecanismos de retroalimentação responsáveis por tornar a evolução costeira parcialmente autodeterminada. Uma vez que são afetados pela topografia antecedente, as formas do passado se tornam responsáveis pela sensibilidade às condições iniciais de novos processos. Os mecanismos de retroalimentação tonam a evolução costeira altamente complexa por apresentar diferentes formas de interação, como: (i) auto-regulação (tendências de equilíbrio); (ii) auto-organização (o que leva a limiares e mudanças de regime); (iii) herança Markoviana (que introduz incerteza); (iv) não linearidade; e (v) não estacionariedade. Dentre as quais se destacam a auto-regulação e auto-organização. A auto-regulação resulta da retroalimentação negativa. Este mecanismo age contra saídas de um estado morfodinâmico, o qual tende a se reestabelecer o equilíbrio em resposta a pequenas perturbações. Podendo alcançar a estabilidade em uma escala de tempo relativa, dentro de um determinado intervalo de condições ambientais. A ação das ondas é um exemplo, operando em escalas de tempo instantâneas (minutos a horas) (figura 3). A auto-organização, é impulsionada inicialmente pela retroalimentação positiva, direcionando a evolução morfológica a um novo regime de equilíbrio. Isso ocorre através de alterações nas condições ambientais de contorno ou na resistência mecânica dos sedimentos, direcionando as variáveis do estado morfodinâmico para valores-limite da faixa onde opera a auto-regulação. Quando esses limiares são atingidos, ocorre a reversão do mecanismo de retroalimentação. A transformação de estado se dá de forma que um novo conjunto de processos opere com um novo conjunto de variáveis de estado. Grandes mudanças glacio-eustáticas no nível do mar e as principais intervenções de engenharia (figura 3), por exemplo, geralmente têm essas consequências. No entanto, a não linearidade é uma consequência inevitável dos efeitos de retroalimentação que torna a evolução costeira é um processo cumulativo, pois os resultados morfológicos estão incluídos entre os insumos para o próximo ciclo de mudança. Dessa forma, as variações das morfologias costeiras não podem ser explicadas individualmente, já que dependem do estado do sistema antecedente. Os princípios podem ser aplicados em todas as escalas. Além disso, é provável que a própria "interatividade" responsável pela não linearidade faça com que efeitos de pequena escala sejam compostos na evolução costeira em maior escala. (COWELL E THOM, 1997).



**Figura 3.** Representação das escalas espaciais e temporais apropriadas para o estudo da morfodinâmica costeira (Guimarães, 2014, modificado de Cowell e Thom, 1994)

### 3. CONTEXTO GEOLÓGICO

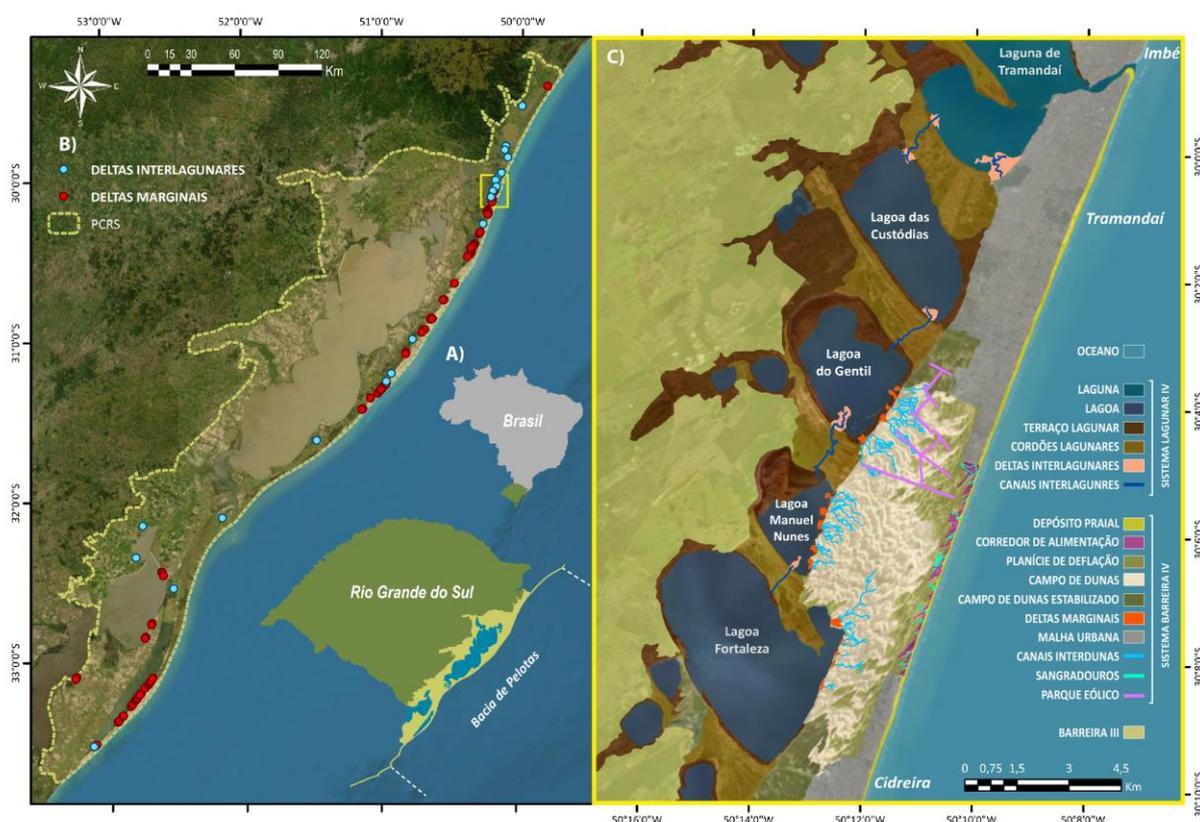
Partindo da escala tectônica, a área de estudo está inserida na Bacia de Pelotas. Uma bacia marginal de aproximadamente 210.000 Km<sup>2</sup>, originada por processos de rifteamento do supercontinente Gondwana, que levou à abertura do Oceano Atlântico Sul a partir do Cretáceo Inferior. Os esforços extensionais foram responsáveis por falhamentos normais sintéticos e antitéticos formando grabens e meio-grabens, configurando a geometria escalonada da bacia. (GAMBOA e RABINOWITZ, 1981; MOHRIAK, 2003; BARBOZA *et al.*, 2008.). As fases pós-rifte e drifte definidas por Bueno *et al.* (2007) para a Bacia de Pelotas marcam o seu preenchimento por sedimentos predominantemente clásticos, produzindo uma plataforma continental ampla e rasa com declividade suave, variando entre 0,03° e 0,08° (DILLENBURG *et al.*, 2009).

A porção emersa da Bacia de Pelotas corresponde à atual Planície Costeira do Rio Grande do Sul. É composta por quatro sistemas laguna-barreira formados sob influência de oscilações glacio-eustáticas, associados a estágios de nível do mar alto na transição de ciclo transgressivo para regressivo durante o período Quaternário (VILLWOCK e TOMAZELLI, 1995). São atribuídas as seguintes idades genéticas para os sistemas laguna-barreira: I) 325 ka (ROSA *et al.*, 2017); II) 230 ka (LOPES *et al.*, 2010; 2014); III) 125 ka (BUCHMANN e TOMAZELLI, 2003); e IV) 8 ka até o presente (HESP *et al.*, 2005; DILLENBURG *et al.*, 2009). Assim, os sistemas I, II e III correspondem a idades Pleistocênicas, e o Sistema IV à idade Holocênica. Os intervalos de aproximadamente 100 ka entre a ocorrência de cada sistema correspondem a variações de calor que a Terra recebe do Sol, resultado de variações orbitais do planeta, conhecidos como ciclos de Milankovitch.

Na escala dos depósitos Holocênicos, dada as baixas taxas de variação do nível do mar (DILLENBURG *et al.*, 2009), o preenchimento do espaço de acomodação é controlado pelo balanço de sedimentos associado a processos costeiros e sua relação com a orientação da linha de costa (TOLDO JR. *et al.*, 2006), que por sua vez é influenciada pela herança tectônica (DILLENBURG, 2000; ROSA *et al.*, 2009). A atual linha de costa tem orientação NE-SW, com ondulações suaves formando projeções e embaiamentos (figura 4). Nas regiões projetadas a linha de costa é transgressiva, a plataforma é íngreme e estreita e o padrão de empilhamento é retrogradacional. Enquanto nos embaiamentos a linha de costa é regressiva, a

plataforma é ampla e suave e o padrão de empilhamento é progradacional. (DILLENBURG *et al.*, 2000; MARTINHO *et al.*, 2010).

A área de estudo é localizada no litoral norte da PCRS, no Balneário de Jardim do Éden, entre os municípios de Tramandaí e Cidreira (figura 4), onde a barreira apresenta comportamento retrogradacional. Ao longo da PCRS, setores como este em retrogradação, desenvolvem extensos campos de dunas transgressivos, alimentados pelo sedimento disponibilizado a partir da ação erosiva nas projeções. Estes campos de dunas fazem limite com sistemas lagunares, possibilitando a deposição de deltas marginais. Aspectos destes sub-ambientes e seus fatores morfodinâmicos já descritos na bibliografia estão detalhados a seguir.



**Figura 4.** (A) A localização da área de estudo parte da escala da Bacia de Pelotas e abrange toda Planície Costeira do Rio Grande do Sul (PCRS), onde a linha de costa é sinuosa. (B) A presença de deltas lagunares marginais se concentra nas projeções costeiras e está condicionada a presença dos campos de dunas. (C) No Litoral Norte da PCRS, situado na extremidade de uma projeção costeira, deltas marginais são depositados entre o Campo de Dunas de Cidreira e as Lagoas do Gentil e Manuel Nunes. A legenda do mapeamento de maior escala indica os sub-ambientes geomorfológicos naturais e as intervenções antrópicas de uso do solo como elementos fisiográficos importantes que constituem o sistema deposicional.

### 3.1 CLIMA E PROCESSOS COSTEIROS

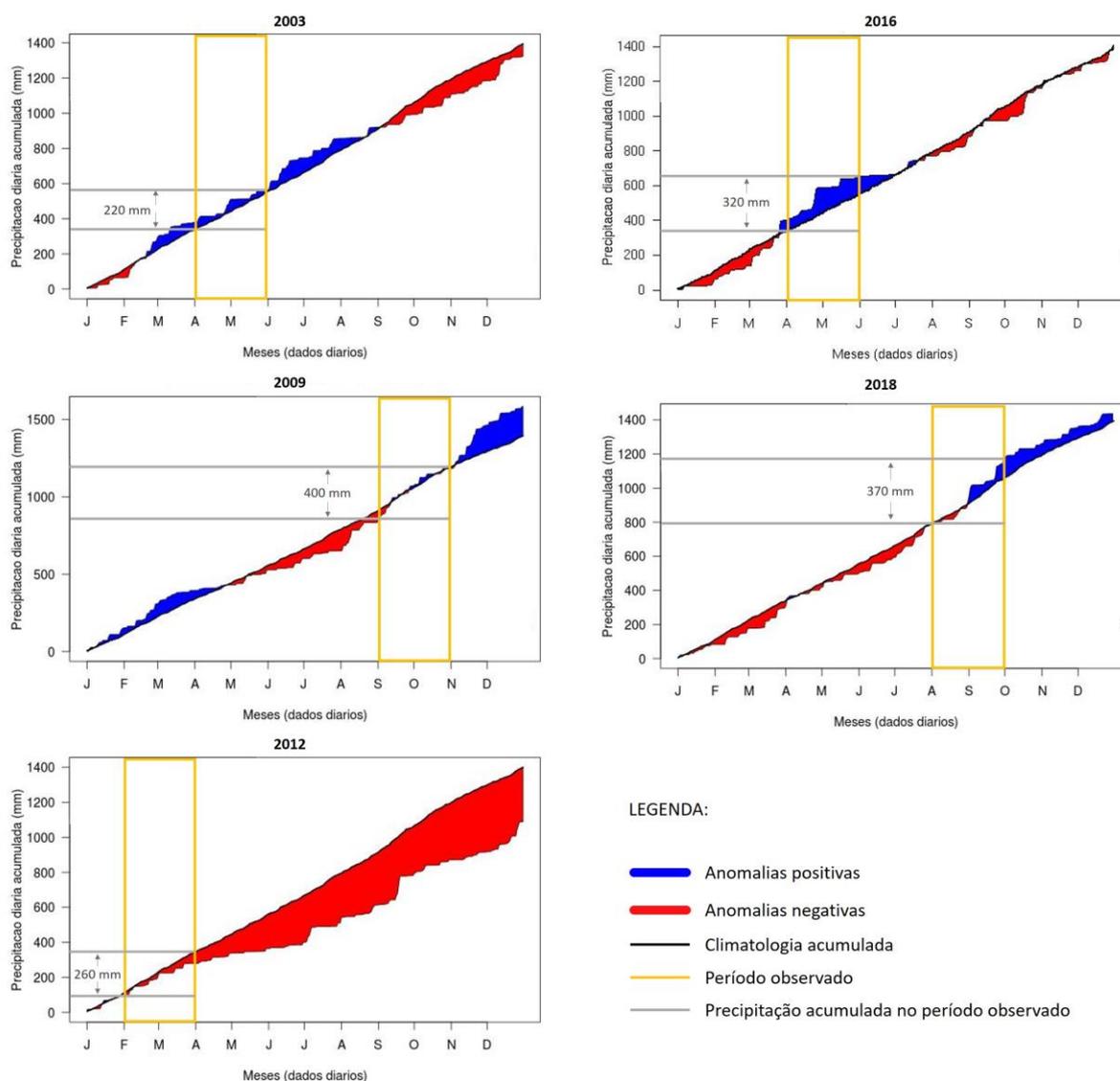
O clima na PCRS é subtropical temperado, sendo a região do litoral norte mais quente e úmida em relação ao resto da costa devido à influência que as escarpas da Serra Geral exercem no padrão de circulação atmosférica (MARTINHO, 2008). A temperatura média anual registrada para o município de Imbé, a norte de Tramandaí, situa-se em torno de 20°C, com amplitude térmica de aproximadamente 9°C. No inverno a umidade relativa do ar é mais elevada, ocorrendo picos de precipitação nos meses de agosto e setembro, enquanto o verão costuma ser mais seco com maiores taxas de evaporação, especialmente nos meses de abril, maio e novembro (HASENACH e FERRARO 1989; MARTINHO, 2008).

Dados de precipitação analisados por Martinho (2008), para Imbé, mostram uma tendência de aumento da pluviosidade em torno de 20 mm para o período de 1948 até 2003. Dados obtidos pelos Centros Regionais de Meteorologia do CPTEC/INPE (figura 5) apresentam as anomalias positivas e negativas com relação à climatologia acumulada calculada para a região do litoral norte da PCRS entre os anos de 1997 a 2014. As variações de precipitação diária acumulada estimadas para os períodos observados neste estudo são de: 220 mm durante os meses de abril e maio de 2003; 400 mm durante os meses de setembro e outubro de 2009; 260 mm durante fevereiro e março de 2012; 320 mm durante os meses de abril e março de 2016; e 370 mm durante os meses de agosto e setembro de 2018.

Os ventos mais frequentes e com maiores velocidades na região de Tramandaí provém de NE e NNE nas estações de primavera e verão, gerando um potencial de deriva dos ventos predominantemente para SW. Na passagem das frentes frias os ventos predominantes são provenientes de S e SE (TOLDO JR. *et al.*, 2006; MARTINHO 2008; MARTINHO *et al.*, 2010). Além disso, as condições climáticas da PCRS sofrem influência de eventos anômalos como El Niño e La Niña. Durante os eventos de La Niña ocorre decréscimo de precipitação e aumento no potencial de deriva dos ventos de NE, tornando o período favorável tanto para a formação de dunas, como de altas taxas de migração do campo de dunas (MARTINHO, 2008). As últimas ocorrências destes fenômenos estão descritas na tabela 1.

**Tabela 1.** Registro da ocorrência de fenômenos atmosféricos El Niño e La Niña do ano de 2002 até o presente. (CPETC/INPE: < <http://enos.cptec.inpe.br/> >)

<b>Fenômeno</b>	<b>Período de Ocorrência</b>	<b>Intensidade</b>
El Niño	2002 – 2003	Moderada
El Niño	2006 – 2007	Moderada
La Niña	2007 – 2008	Moderada
El Niño	2009 – 2010	Moderada
La Niña	2010 – 2011	Moderada
El Niño	2015 – 2016	Forte
La Niña	2017 - 2018	Moderada



**Figura 5.** Dados de precipitação diária acumulada, apresentando anomalias positivas e negativas com relação à climatologia acumulada calculada para o litoral norte da PCRS entre os anos de 1997 a 2014. Os retângulos amarelos abrangem períodos de tempo próximo as datas das imagens observadas nos anos de 2003, 2009, 2012, 2016 e 2018, enquanto as linhas cinzas indicam a precipitação diária acumulada para estes períodos com seus respectivos valores. (CPETC/INPE: <<http://clima1.cptec.inpe.br/estacaochuvosa/pt>>)

A ação das ondas é o principal fator no transporte e deposição de sedimentos ao longo da costa do RS apresentando altura significativa de 1,5 m e período entre 7 e 9 s para ondas de média a elevada energia. As ondas de NE são de menor altura e responsáveis por apenas 2% do transporte bruto de sedimento, enquanto as correntes litorâneas geradas no S, mesmo que episódicas, apresentam maior energia, transportando 30% dos sedimentos (TOLDO JR. *et al.*, 2006). O regime de maré astronômica é semi-diurna com amplitude média de 0,25 m, enquanto a maré meteorológica pode chegar a 1,2 m. (ALMEIDA *et al.*, 1999, *apud* TOLDO JR. *et al.*, 2006).

A distribuição das correntes litorâneas é bimodal, com direções NE e SW, controladas pelas variações climáticas sazonais. De outubro a março predominam correntes para SW, e em maio e agosto o domínio é de NE (NICOLODI *et al.*, 2000). O balanço de sedimentos na PCRS é controlado pelas componentes de transporte ao paralelo e perpendicular à costa, dirigidos pela deriva litorânea. Variações na orientação da linha de costa afetam diretamente o transporte de sedimentos. No caso da área de estudo, a geometria convexa da linha de costa e a plataforma estreita e íngreme fazem com o processo de refração e dissipação das ondas seja reduzido, resultando no aumento da energia das ondas e o consequente aumento do transporte de sedimentos ao longo da costa (MARTINHO *et al.*, 2009).

### 3.2 SISTEMA BARREIRA IV

O Sistema Barreira IV foi formado durante os estágios finais da transgressão marinha pós-glacial, há aproximadamente 7 – 8 ka (HESP *et al.*, 2005; DILLENBURG *et al.*, 2006). Segundo Travessas *et al.*, (2005), na região do Jardim do Éden a barreira apresenta comportamento de linha de costa transgressiva desde a sua implantação nos últimos 6 – 5 ka, evidenciado pela presença de depósitos eólicos sobrepostos à depósitos lagunares desde a atual linha de costa até a margem leste das lagoas costeiras. Esta característica, explica o autor, é uma resposta ao balanço de sedimentos negativo, controlado principalmente pela diferença de declividade do substrato entre as regiões adjacentes. Para o Jardim do

Éden a declividade apresentada é de  $0,067^\circ$ , enquanto ao norte é de  $0,062^\circ$  (Tramandaí), e ao sul é de  $0,069^\circ$  (Cidreira).

O sistema eólico predominante sobre a porção da barreira estudada é um campo de dunas migratórias (figura 4), com área de aproximadamente  $20,7 \text{ Km}^2$ , variando de 3,3 Km a 1,3 Km em sua largura, e com 11,7 Km de comprimento. Os ventos de NE fazem com que as dunas se movimentem em direção SW, obliquamente sobre os sistemas lagunares (MARTINHO *et al.*, 2010; TOMAZELLI *et al.*, 2017).

Nas proximidades das lagoas a velocidade de migração eólica diminui, conferindo ao campo de dunas um formato lobado. Este campo de dunas é composto por cadeias transversais e barcanóides, barcanas isoladas e dunas parabólicas de orientação NW-SE, formando regiões interdunas de mesma direção. A margem oeste da barreira apresenta canais de drenagem encaixados nas áreas de interdunas, a medida que as dunas migram em direção SW os canais interdunas são movimentados e, conseqüentemente, a rede de drenagem sofre reajustes em suas conexões. Os canais formados no interdunas desaguam nas lagoas formando deltas arenosos em suas margens, depositando leques arenosos sobre os cordões lagunares. Na margem leste da barreira, dunas frontais são recortadas por *blowouts* que transferem sedimentos da praia para corredores de areia que eventualmente migram sobre a planície de deflação e alimentam o campo de dunas. (MARTINHO, 2008; MARTINHO *et al.*, 2010)

Canais pluviais denominados de sangradouros (*washouts*) também são formados na planície de deflação e promovem o transporte de sedimentos para a zona de arrebenção através do rompimento das dunas frontais (CALLIARI e FIGUEIREDO, 2005).

O campo de dunas está ativo em maior parte da sua extensão, porém, algumas porções localizadas nas extremidades norte e sul encontram-se estabilizadas e com extensiva presença de vegetação invasora de pinus. Os fatores que contribuem tanto para a formação como para a estagnação de um campo de dunas são detalhados por Martinho *et al.*, (2010), e incluem o suprimento sedimentar, velocidade, direção e frequência dos ventos, energia das ondas, orientação da linha de costa em relação aos ventos efetivos, e cobertura vegetal. Os agentes que controlam estes fatores são: variação no nível relativo do mar (NRM); topografia antecedente; morfodinâmica praial; atividades humanas; e mudanças climáticas.

Contudo, a autora assume que o principal controle na evolução dos campos de dunas da PCRS é o clima úmido da região, indicando que o aumento de precipitações nas últimas décadas juntamente com a diminuição do potencial de deriva dos ventos e a expansão de áreas vegetadas promovem a estabilização dos campos de dunas. Além disso, Martinho *et al.*, 2010 reconhece ampla diminuição do campo de dunas a partir da década de 90, relacionada à urbanização junto à linha de costa, que interrompe os corredores de areia que alimentam o campo de dunas. Conseqüentemente, a progressão destas tendências além de causar uma estabilização generalizada, pode reduzir significativamente sua área ou até mesmo extinguir este ambiente.

### 3.3 SISTEMA LAGUNAR IV

A barreira holocênica do Rio Grande do Sul abriga sistemas lagunares em sua retaguarda e apresenta dois canais de conexão permanente com o oceano, um na Laguna dos Patos e outro na Laguna de Tramandaí (figura 4) (TRAVESSAS *et al.*, 2005). As lagoas holocênicas da PCRS se estabeleceram na posição atual durante o rebaixamento do nível relativo do mar depois que este atingiu sua máxima elevação há 5,6 ka (TOMAZELLI, 1990; TRAVESSAS *et al.*, 2005).

Segundo Cooper (1997) são cinco processos naturais fundamentais na evolução dos corpos lagunares:

- **Segmentação** – ocorre quando o eixo longitudinal da laguna se dispõe paralelo à direção do vento dominante. Os ventos atuantes influenciam a circulação hidráulica dos sistemas lagunares podendo gerar células diferenciadas de distribuição sedimentar, refletindo nas características granulométrica, químicas e biológicas dos sedimentos. Na área de estudo a persistente ação dos ventos de NE faz com que a redistribuição dos sedimentos forme pontais e cordões lagunares de orientação NW-SE que segmentam o sistema lagunar, dando origem a um rosário de lagoas (senso ZENKOWITCH, 1969, *apud* AHLERT *et al.*, 2013).

- **Acreção vertical** – é um processo natural e está ligado ao preenchimento do substrato lagunar por sedimentos provenientes de diferentes fontes. Os sedimentos mais finos geralmente se depositam em ambientes calmos e profundos.

Porém, na presença de salinidade a deposição é intensificada pela floculação dos sedimentos.

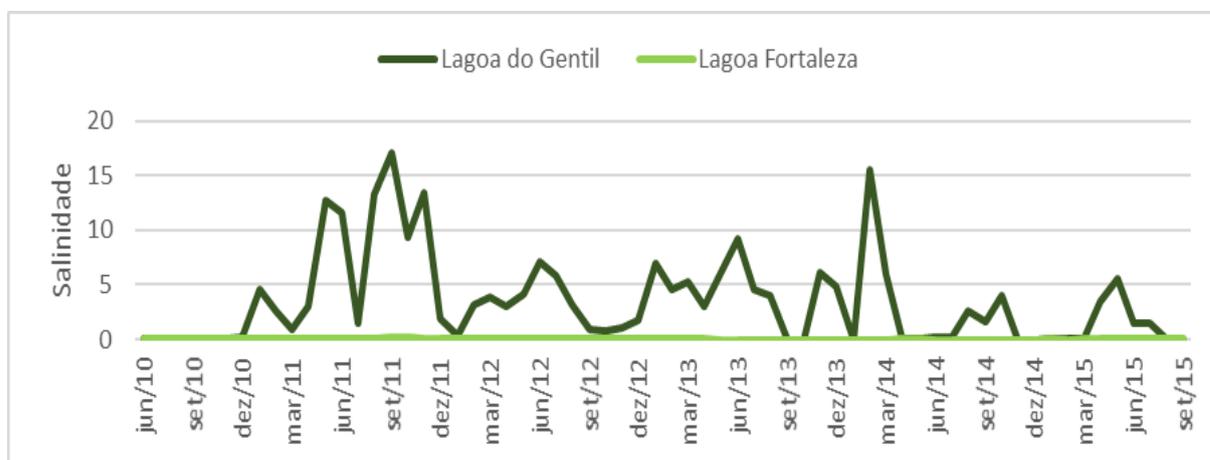
- **Progradação de deltas** – está diretamente associada à dinâmica de transporte de sedimentos no interior das lagoas e área de influência. Podem ser do tipo fluvial, deltas de maré vazante e deltas de maré enchente. Na área de estudo os deltas estão associados ao sistema eólico e a formação de canais aluviais.

- **Acréscimo lateral** – se relaciona à redução de áreas úmidas das lagoas em função do desenvolvimento natural de ecossistemas adjacentes e demais formações de sub-ambientes costeiros, como planícies de maré, campo de dunas ou formações vegetais.

- **Sedimentação** – pode estar associada à ação das marés ou mesmo pela progradação deltaica.

As lagoas estudadas estão compreendidas no sub-sistema sul da Bacia do Rio Tramandaí. Ambas as lagoas fluem no sentido norte, desaguando na Laguna de Tramandaí (figura 6) (CASTRO e ROCHA; 2016). Apesar do regime de micromarés, os ventos de NE amplificam o alcance da cunha salina no sentido SW, fazendo com que a circulação estuarina de água salobra se estenda da Laguna de Tramandaí até a Lagoa do Gentil (CASTRO e ROCHA; 2016). Análises das águas da Lagoa do Gentil realizadas por Rocha (2019), revelam variações de salinidade entre 0 e 17,09 para os períodos de junho de 2010 a outubro de 2015, predominando valores baixos (gráfico 1). Não há registros de monitoramento destes parâmetros para a Lagoa Manuel Nunes, mas sim para Fortaleza (figura 4). No entanto, as análises indicam valores de salinidade pouco significantes, atingindo valores máximos próximo a 0,2 (gráfico 1). No limite entre as Lagoas Manuel Nunes e Fortaleza há uma comporta que regula o fluxo no sentido norte. O motivo de contenção das águas na Lagoa Fortaleza está ligado ao bombeamento para irrigação de lavouras de arroz. A comporta é operada duas vezes por ano para manutenção do nível e minimização de cheias nas regiões adjacentes à Lagoa Fortaleza (CASTRO e ROCHA; 2016).

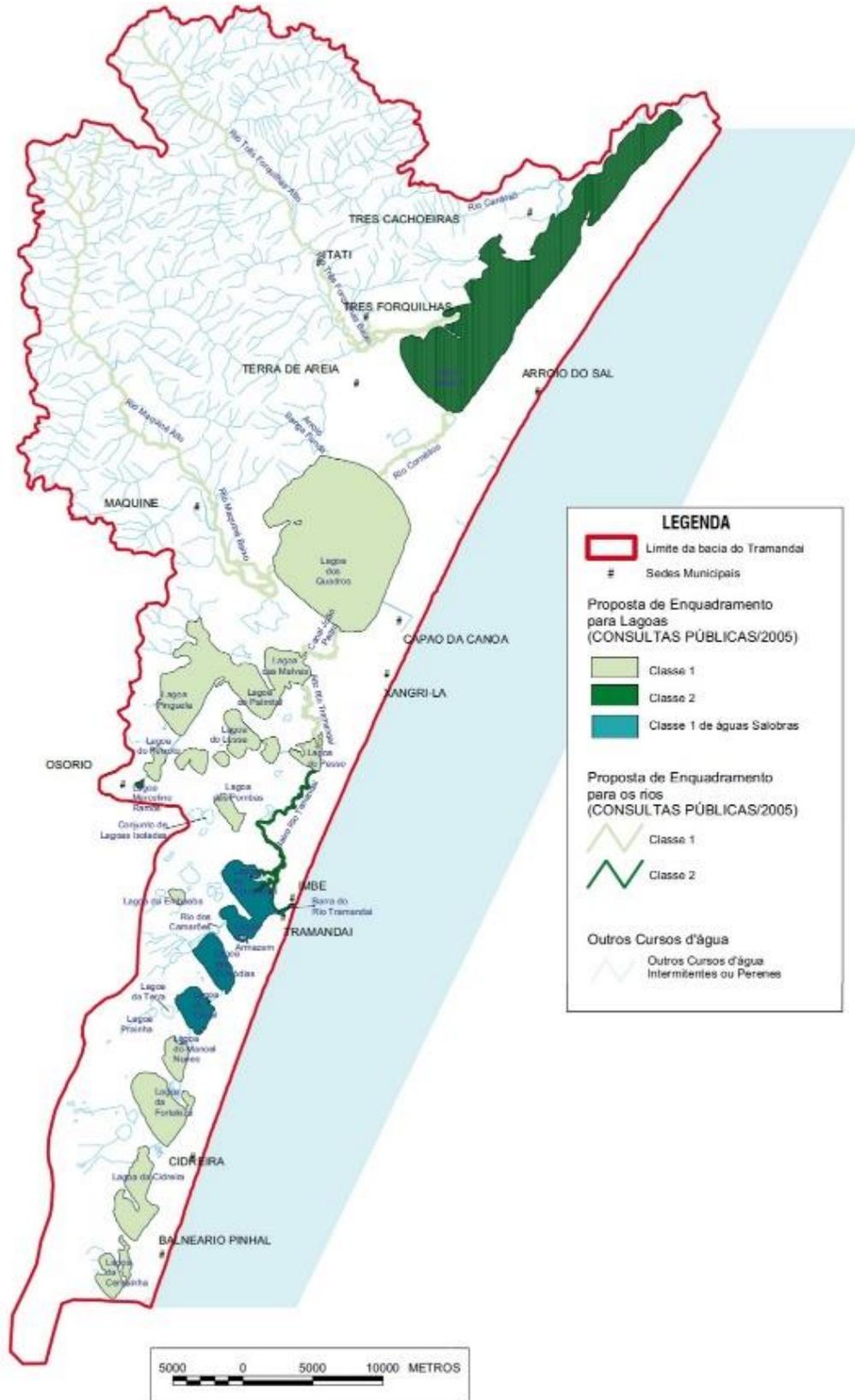
**Gráfico 1.** Variação da concentração de salinidade nas águas das Lagoas do Gentil e Fortaleza. (Dados extraídos do monitoramento de qualidade de águas superficiais da Bacia Hidrográfica do Rio Tramandaí - Relatório de dados brutos (ROCHA, 2019).



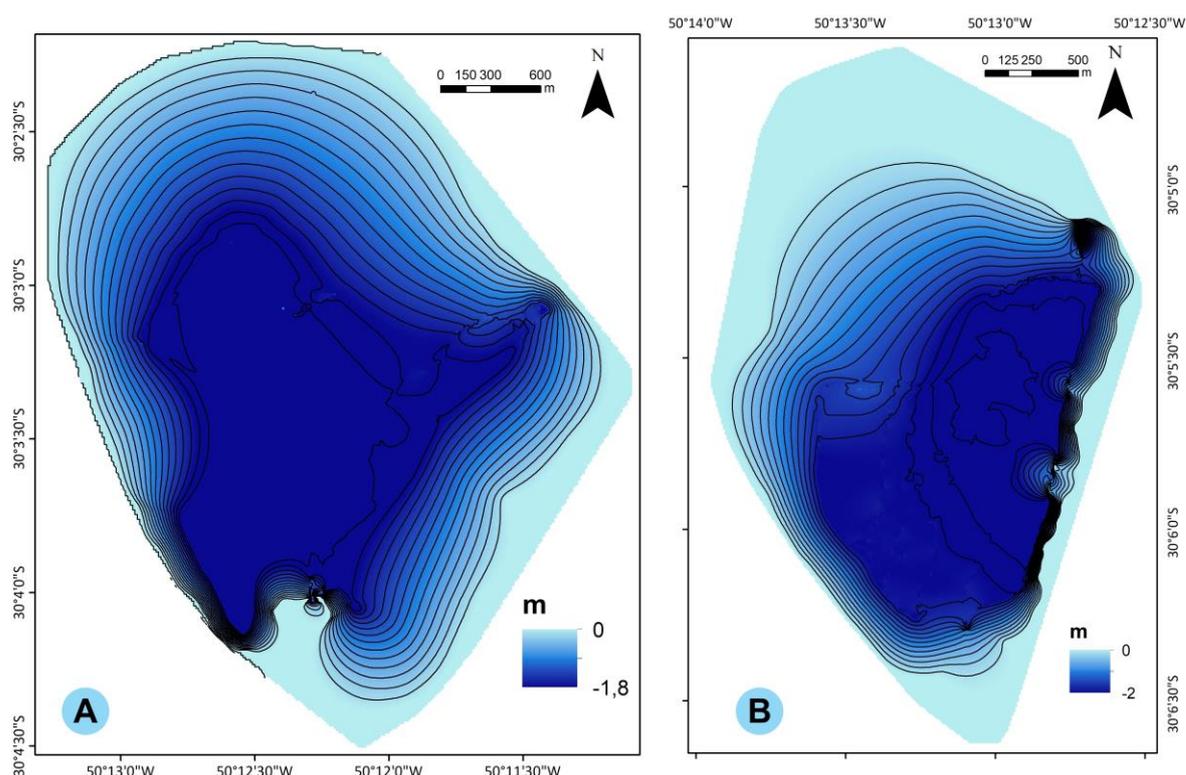
Localmente, a morfologia das lagoas é bastante diversa. Dados adquiridos por Ahlert *et al.* (2013) e Schäfer (2013) (tabela 2), bem como modelos batimétricos gerados por Trindade (2019) para as Lagoas do Gentil e Manuel Nunes (figura 7), indicam que na Lagoa do Gentil a margem onde se desenvolvem os deltas é mais ampla e rasa do que na Lagoa Manuel Nunes. Estas características permitem que toda lâmina d'água da Lagoa do Gentil receba luminosidade, conferindo maior transparência e possibilitando a realização de fotossíntese em toda sua profundidade (classificada como eufótica). Ao contrário, na Lagoa Manuel Nunes a luz penetra apenas até sua profundidade média, conferindo menor transparência. Os teores de fosfato, nitrogênio e clorofila-a, e estado trófico (tabela 2) indicam que o maior grau de eutrofização é sofrido pela Lagoa Manuel Nunes. Na Lagoa do Gentil, a baixa profundidade e presença de salinidade favorecem a maior proliferação da vegetação de macrófitas. Estas plantas possuem propriedades filtradoras e auxiliam na regeneração das condições ambientais da lagoa (SCHÄFER, 2013; CASTRO e ROCHA, 2016).

**Tabela 2.** Parâmetros físico-químicos obtidos para as lagoas costeiras no ano de 2012 extraídas de Ahlert *et al.*, (2013) e Schäfer (2013).

<b>Parâmetros físico-químicos</b>	<b>Lagoa do Gentil</b>	<b>Lagoa Manuel Nunes</b>
Área (Km <sup>2</sup> )	6,52	2,91
Volume (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	4,0	2,7
Profundidade Máxima (m)	1,45	1,96
Profundidade Média (m)	0,62	0,91
Profundidade Eufótica (m)	1,4	0,9
Transparência (m)	0,5 a 1	> 0,5
Teor de fosfato (mg/L)	0,07 (muito rico)	0,9 (extremamente rico)
Teor de nitrogênio amoniacal (mg/L)	0,03	0,05
Clorofila-a (mg/m <sup>3</sup> )	5,8 (pobre)	9,2 (rico)
Estado Trófico - Clorofila	Oligotrófico	Mesotrófico
Estado Trófico - Fósforo	Eutrófico	Eutrófico



**Figura 6.** Bacia hidrográfica do Rio Tramandaí com proposta de enquadramento realizado por Castro e Rocha, (2016) para as lagoas costeiras, onde classifica como salobras as águas da Lagoa do Gentil, e doces as águas da Lagoa Manuel Nunes.

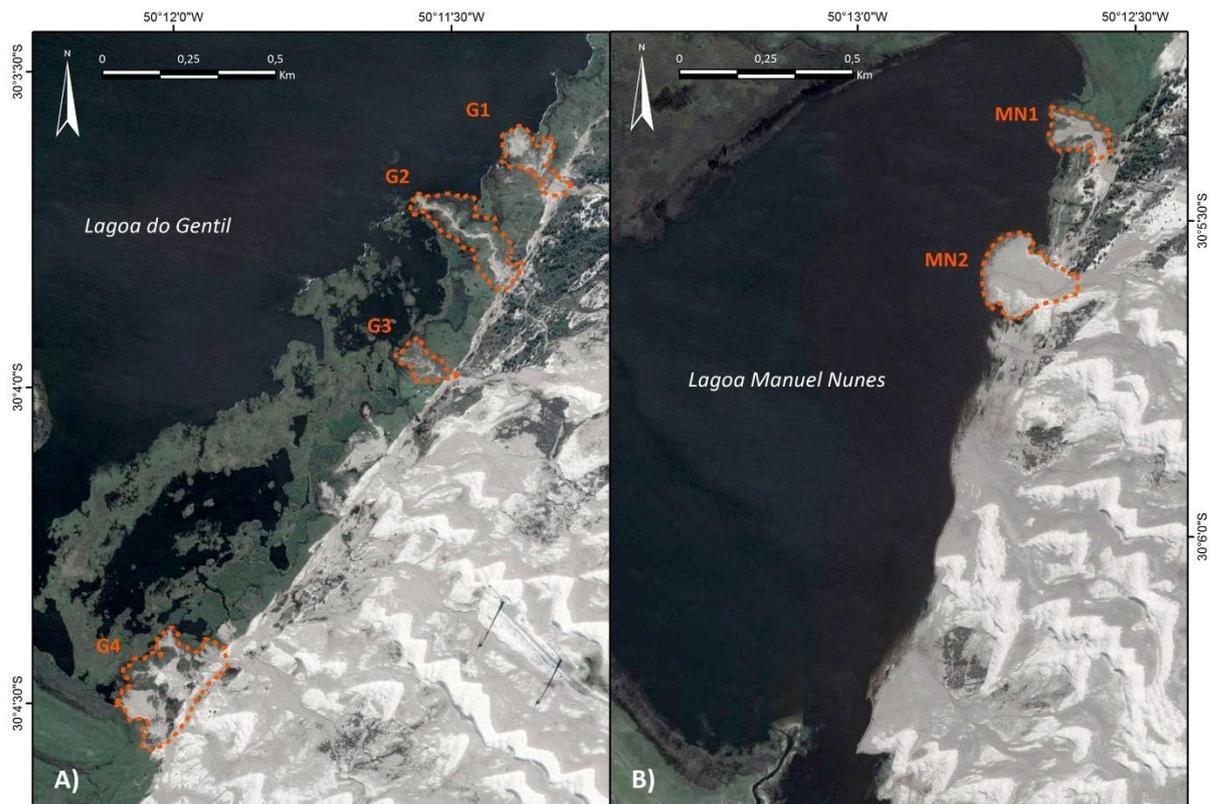


**Figura 7.** (A) Modelo batimétrico da Lagoa do Gentil; (B) Modelo batimétrico da Lagoa Manuel Nunes (*modificado* de TRINDADE, 2019).

### 3.4 DELTAS LAGUNARES HOLOCÊNICOS

Às margens das Lagoas do Gentil e Manuel Nunes se desenvolvem os sistemas deltaicos alimentados pelo aporte sedimentar do campo de dunas. Apesar de compartilharem da mesma bacia de drenagem, os deltas apresentam diferentes morfologias, ainda que formados na mesma bacia receptora (figura 8). Rosa *et al.*; (2016) notaram esta peculiar característica e atribuíram a diversidade morfológica às variações nas taxas de descarga de sedimento, considerando a presença de vegetação um fator importante na coesão dos sedimentos drenados a partir dos canais presentes nas planícies deltaicas. No trabalho citado, os autores descrevem alguns dos deltas também avaliados neste estudo de caso, como: (G2) Delta de morfologia digitada (*Mississippi/Birdsfoot*) de canalização forte e estável, com canais profundos e estreitos, o qual envolve longo período na sua construção com baixas taxas de descarga de sedimentos, permitindo o desenvolvimento de vegetação que auxilia em sua coesão; (G4) Delta misto (*Mix*) de evolução complexa alimentada por canais entrelaçados vindos de NE, N e S, que em 2004 apresentava-se como um

delta entrelaçado não coesivo e, posteriormente, assume uma morfologia semelhante a um delta do tipo digitado (*birdsfoot*), enquanto o desenvolvimento de vegetação aumenta nos lobos; e (MN1) Delta do tipo entrelaçado (*Braided*) composto por canais rasos na planície deltaica, que apresenta uma evolução rápida associada à descarga de sedimentos do campo de dunas e ausência de vegetação em sua superfície, conferindo-lhe um caráter difuso e com feições de retrabalhamento por ondas. As interpretações das condições de fluxo realizadas por Rosa et al (2016), a partir do cálculo do número de Froud, indicam que todos estes deltas estão sob condições semelhantes com fluxos subcríticos, mantendo em questionamento quais seriam os fatores que realmente controlam as diferenças morfológicas.



**Figura 8.** Deltas lagunares de diferentes morfologias condicionados pelo Campo de Dunas. (A) Margem leste da Lagoa do Gentil com indicação dos deltas estudados, denominados como G1, G2, G3 e G4. (B) Margem leste da Lagoa Manuel Nunes, indicando os deltas denominados como MN1 e MN2.

## 4. METODOLOGIA

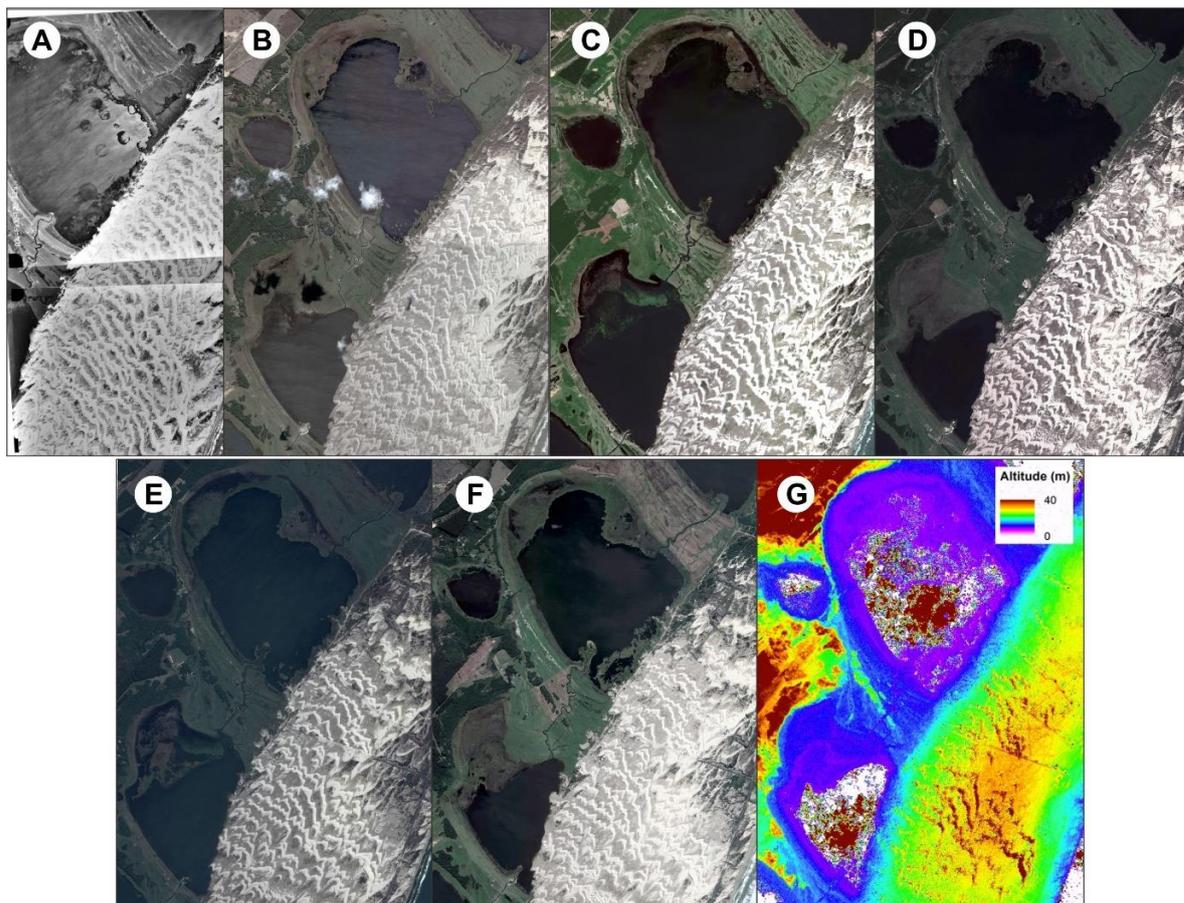
A aquisição dos dados morfométricos para realização da análise temporal dos sistemas deltaicos está baseada na utilizados métodos de sensoriamento remoto conjugados com sistemas de informação geográfica.

### 4.1 MORFOMETRIA DOS ELEMENTOS FISIOGRÁFICOS

Os elementos fisiográficos mapeados para a análise morfométrica, estão compreendidos nos seguintes sub-ambientes sedimentares: (i) *bacias receptoras*, que correspondem as Lagoas do Gentil e Manuel Nunes, e as vegetações de margem lagunar e de macrófitas aquáticas; (ii) *bacia de drenagem*, correspondente ao campo de dunas, neste caso, compartimentado em uma *sub-bacia de drenagem* para cada sistema de deltaico, com canais de drenagem aluviais e vegetação; e (iii) *deltas lagunares*, correspondendo ao mapeamento das planícies deltaicas. A delimitação dos elementos fisiográficos foi realizada através da extensão *ArcMap®* do *software ArcGis®*, em escala de 1:2.500 sobre imagens de satélite extraídas do *Google Earth®*. O mapeamento foi realizado para as datas de 23/05/2003, 26/10/2009, 17/03/2012, 13/05/2016 e 03/09/2018 (figura 9B). A tabela 3 apresenta os critérios descritivos de cada elemento fisiográfico que compõem os sub-ambientes citados.

Outros elementos que fazem parte dos sistemas mapeados estão descritos na tabela 4, mas não tiveram suas morfometrias quantificadas e foram traçados sobre a imagem do ano de 2018 do *BaseMap* no *ArcMap®* com escala de detalhe de 1:10.000. Dentre os quais também foram considerados os elementos de uso e ocupação do solo, como malha urbana e rede viária do parque eólico implantada sobre o campo de dunas em meados de 2011. Uma fotografia aérea de 1974 foi utilizada apenas para identificar se já havia indícios da presença dos deltas atuais (figura 9A).

Para auxiliar a definir limites topográficos das unidades geológicas foi utilizado um Modelo Digital de Elevação (MDE) do ALOS World 3D (AW3D) (figura 9C), o qual sofre influência da vegetação e das edificações e possui resolução espacial de 20 m.



**Figura 9.** Imagens utilizadas como base do mapeamento da área de estudo no litoral norte da PCRS. A) Fotografia aérea de 1974; Imagens de satélite do Google Earth® utilizados como base dos mapeamentos para análise temporal para as datas de: B) 23/05/2003; C) 26/10/2009; D) 17/03/2012; E) 13/05/2016; F) 03/09/2018; e G) Modelo Digital de Elevação (MDE) ALOS World 3D (AW3D).

**Tabela 3.** Produto final do mapeamento dos subambientes de deposição na região do Litoral Norte do Rio Grande do Sul.

Compartimentação geomorfológica		Características na Imagem de Satélite (R3G2B1)	Características no MDE
Sub-ambientes deposicionais	Elementos fisiográficos		
Bacias receptoras	Lagoas	Os sistemas lagunares possuem textura lisa de coloração azul escura e formas arredondadas a alongadas com orientações NW-SE. As margens a NW são arredondadas enquanto as de SE são retilíneas.	Modelo possui erros nos valores de altitude.

	Macrófitas aquáticas	Porções verdes de textura mosqueada a rugosa dentro dos sistemas lagunares. Foram mapeadas apenas as macrófitas concentradas na margem leste da Lagoa do Gentil.	Altitudes variam de 2 a 4,5 m com coloração lilás.
	Vegetação na margem lagunar	Faixa verde com textura predominantemente aveludada nas margens leste das Lagoas do Gentil e Manuel Nunes.	Altitudes entre 4 e 5 m e coloração azul escura.
Bacias de Drenagem	Vegetação no campo de dunas	Porções de coloração verde e cinza amarronado com texturas mosqueadas na região oeste do campo de dunas, próximo às lagoas.	Altitudes entre 6 e 8 m e coloração azul clara.
	<i>Pinus sp.</i>	Porções de coloração verde escuro com textura rugosa na região oeste do campo de dunas, próximo às lagoas.	Altitudes entre 6 e 8 m e coloração azul clara.
	Canais de drenagem interdunas	Canais pluviais entrelaçados e meandantes de orientação SE-NW que se formam na região interdunas e fluem em direção às lagoas costeiras. Apresentam coloração branca acinzentada e textura lisa.	Altitude de 4 a 8 m com coloração azulada.
	Sub-bacias de drenagem	Estas feições foram delimitadas utilizando feições de crista das dunas móveis como divisores de águas, limitando em torno dos canais de drenagem previamente traçados.	-

Deltas Lagunares	Planícies deltaicas	São protuberâncias localizadas nas margens leste dos corpos lagunares. Compostas por lobos arenosos com canais meandantes e entrelaçados de coloração bege e textura lisa; parcialmente cobertos por vegetação com texturas mosqueada e aveludada.	Altitudes entre 2 e 5 m e coloração azul escura.
------------------	---------------------	--	--

**Tabela 4.** Tabela com descrição dos critérios utilizados na compartimentação geomorfológica.

Elementos Geomorfológicos		Características na Imagem de Satélite (R3G2B1)	Características no MDE
Sistemas deposicionais	Sub-ambientes sedimentares		
Sistema Barreira III	Depósito praial	Apresenta coloração verde clara com textura mosqueada e rugosa com zonas de retrabalhamento eólico holocênicos.	Altitude varia entre 10 e 18 m, chegando a 40 m nas áreas com cultivo de eucalipto. As cores variam entre verde a vermelho intenso.
Sistema Barreira IV	Depósito praial	Faixa de coloração branca amarelada e textura lisa, correspondente à linha de costa.	Faixa azul escuro na linha de costa com altitude 1 a 5 m.
	Campo de dunas (ativo)	Porção da barreira dominada por dunas barcanas e cadeias barcanóides de orientação NW-SE. As dunas apresentam coloração branca enquanto as zonas úmidas do interdunas têm coloração acinzentada e textura lisa.	Zona com forma oval e alongada de coloração amarela alaranjada a verde na aérea central sobre a barreira IV. Altitudes variam de 4 m nas margens lagunares ao leste até 25 m no topo das dunas.

	Campo de dunas estabilizado	Áreas associadas às extremidades norte e sul do campo de dunas ativo, onde há feições de dunas parabólicas de cores brancas e texturas lisas, amplamente cobertas por vegetação de coloração verde e textura rugosa.	Possuem altitudes entre 8 a 15 m e coloração esverdeada a azulada.
	Planície de deflação	Áreas associadas à margem oeste do campo de dunas, com <i>blowouts</i> bastante vegetados onde formam-se canais de drenagem. Apresenta textura rugosa de coloração branca a cinza e verde.	Altitudes entre 8 a 15 m e coloração esverdeada a azulada.
	Corredores de alimentação	Dunas parabólicas de orientação NE-SW entre a linha de costa e a planície de deflação, com cores branca e bege.	Altitudes entre 5 a 10 m em coloração azul claro.
	Sangradouros	Canais meandantes perpendiculares a linha de costa que fluem da planície de deflação para a praia, de coloração verde escuro devido a umidade e presença de vegetação.	Altitudes entre 4 a 7 m em coloração azul escuro.
Sistema Lagunar IV	Lagoas e Laguna	Os sistemas lagunares possuem textura lisa de coloração azul escura e formas arredondadas a alongadas com orientações NW-SE. As margens a NW são arredondadas enquanto	Modelo possui erros nos valores de altitude.

		as de SE são retilíneas.	
	Terraço lagunar	Porções de textura rugosa de coloração verde escura a amarronada ao redor dos corpos lagunares.	Altitudes entre 3 e 6 m de coloração predominantemente azul escura.
	Cordões lagunares	Estruturas paralelas de segmentação das lagoas com orientação NW-SE e coloração verde clara a escura e textura mosqueada a rugosa, cortadas por canais interlagunares.	Altitudes de 4 a 8 m e coloração azulada. As áreas associadas com coloração verde a amarela correspondem árvores com altitudes de até 15 m.
	Canais interlagunares	Canais meandranes de coloração azul escuro que cortam os cordões lagunares com orientação NE-SW.	Altitudes de 3 a 4 m e coloração azul escuro.
Uso e ocupação antrópica	Malha urbana	Apresenta estrutura retangular disposta sobre a barreira Holocênica, com malha quadriculada, coloração levemente avermelhada e textura rugosa.	Porções esverdeadas a amareladas de formato alongado sobre a barreira IV, com altitudes entre 8 a 15 m.
	Parque eólico	Estruturas lineares de padrão retangular de coloração cinza correspondentes às vias asfaltadas que dão acesso às torres eólicas.	Altitudes entre 15 e 20 m com coloração laranja avermelhada.

Os parâmetros morfométricos obtidos para as planícies deltaicas, bacia de drenagem e bacia receptora foram calculados de acordo com Machado (1998), Silveira (2012) e Paz (2004), os quais foram dispostos em gráficos com auxílio do Excel®.

- *Área (A)*: Para as sub-bacias de drenagem corresponde a área plana entre os divisores topográficos. A área das planícies deltaicas corresponde aos limites visíveis entre leques recentemente depositados. Enquanto para as lagoas, consiste

na área plana que contorna sua superfície, sendo que as variações destas áreas superficiais estão diretamente relacionadas com o aumento e diminuição do nível d'água. Todos estes valores foram obtidos diretamente no *ArcMap®* a partir dos traçados sobre os elementos indicados.

- *Comprimento dos canais (L)*: Estes valores correspondem ao somatório das extensões dos canais de drenagem identificados como ativos na região do interdunas, obtidos a partir do cálculo de perímetro da rede de canais traçados no *ArcMap®*.

- *Comprimento dos canais principais (L<sub>c</sub>)*: Correspondem ao valor do perímetro para o canal que se conecta as drenagens do campo de dunas e estende-se até a frente deltaica.

- *Sinuosidade dos canais principais (S<sub>c</sub>)*: Corresponde à relação entre o comprimento do canal principal (L<sub>c</sub>) e a distância entre a nascente e a foz (d<sub>c</sub>) no mesmo canal medida em linha reta, expressando a quantidade de curvatura do canal, dado pela expressão:

$$S_c = L_c / d_c$$

- *Densidade de drenagem (DD)*: É definido pela relação entre o somatório dos comprimentos de todos os canais da bacia de drenagem (L) e a área da bacia (A). É dada pela equação:

$$DD = L / A$$

- *Comprimento máximo das lagoas*: Correspondem à linha que une os dois pontos mais afastados com orientação paralela a linha de costa, e possui caráter descritivo.

- *Largura máxima das lagoas*: Linha que une dois pontos mais afastados com orientação perpendicular a linha de costa, sendo uma medida tomada em ângulo reto a partir do eixo do comprimento máximo.

- *Largura média das lagoas*: Corresponde à razão entre a área e o comprimento máximo.
- *Relação comprimento/largura*: Quando calculado para as planícies deltaicas tem o objetivo de verificar se há maior expansão das áreas longitudinalmente, em direção ao fundo lagunar, ou lateralmente, sobre as margens lagunares. E quando calculada e para as lagoas, indicam a direção das áreas de baixa declividade onde ocorrem inundações periódicas.

#### 4.2 PERFIS DE DECLIVIDADE

O levantamento do perfil topográfico dos canais deltaicos foi realizado em fevereiro de 2019, utilizando um GNSS geodésico com sistema de posicionamento diferencial realizado em tempo real (*Real Time Kinematics – RTK*). Os dados de altimetria foram transformados em um arquivo vetorial no *ArcMap®*, de onde foram extraídos os valores para elaboração dos perfis de declividade das planícies deltaicas no *Excel®* (figura 8). Os perfis lagunares (figuras 5 e 6) e dos prodeltas (figura 9) foram elaborados no *Excel®* a partir da extração de valores de arquivos vetoriais no *ArcMap®*, correspondente aos modelos batimétricos gerados e disponibilizados por Trindade (2019).

## 5. VARIABILIDADE MORFODINÂMICA DE DELTAS LAGUNARES HOLOCÊNICOS DO LITORAL NORTE DO RIO GRANDE DO SUL

Este capítulo apresenta o artigo submetido à *Revista Brasileira de Geomorfologia*, e abaixo consta a carta que comprova a sua submissão.

14/01/2020

Email – Mariah Xavier Rocha – Outlook

### [RBG] Agradecimento pela submissão

Roberto Arnaldo Trancoso Gomes <robertogomes@unb.br>

Ter, 14/01/2020 15:24

Para: Mariah Xavier Rocha <mariah.xrocha@hotmail.com>

Mariah Xavier Rocha,

Agradecemos a submissão do trabalho "VARIABILIDADE MORFODINÂMICA DE DELTAS LAGUNARES HOLOCÊNICOS DO LITORAL NORTE DO RIO GRANDE DO SUL" para a revista *Revista Brasileira de Geomorfologia*.

Acompanhe o progresso da sua submissão por meio da interface de administração do sistema, disponível em:

URL da submissão:

<http://www.lsie.unb.br/rbg/index.php/rbg/author/submission/1838>

Login: mariahx

Em caso de dúvidas, entre em contato via e-mail.

Agradecemos mais uma vez considerar nossa revista como meio de compartilhar seu trabalho.

Editores da *Revista Brasileira de Geomorfologia*

---

*Revista Brasileira de Geomorfologia*

<http://www.lsie.unb.br/rbg>

**VARIABILIDADE MORFODINÂMICA DE DELTAS LAGUNARES HOLOCÊNICOS  
DO LITORAL NORTE DO RIO GRANDE DO SUL**

**MORPHODYNAMIC VARIABILITY OF HOLOCENE LAGOON DELTAS FROM THE  
NORTH COAST OF RIO GRANDE DO SUL**

**Mariah X. ROCHA<sup>1</sup> & Maria Luiza C. C. ROSA<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> – *Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. CEP: 91501-970. Brasil. E-mail: mariah.xrocha@hotmail.com*

<sup>2</sup> – *Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves 9500, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. CEP: 91501-970. Brasil. E-mail: mariah.xrocha@hotmail.com*

**Resumo:** Deltas lagunares estão distribuídos ao longo da Planície Costeira do Rio Grande do Sul (PCRS), localizados preferencialmente no Sistema Laguna-Barreira IV, em porções onde a linha de costa apresenta comportamento transgressivo. A maior parte dos deltas está condicionada pelo influxo sedimentar provido pelos campos de dunas que ali se desenvolvem, fazendo parte do processo de retrogradação do Sistema IV. No litoral norte da PCRS, diferentes morfologias deltaicas são observadas nas margens leste das Lagoas do Gentil e Manuel Nunes e este artigo tem como objetivo responder como os fatores controladores interagem na produção da diversidade morfológica. Para identificar as relações morfodinâmicas, realizou-se a análise morfométrica temporal dos elementos que compõem os sistemas deltaicos utilizando sensoriamento remoto conjugado com sistemas de informação geográfica. Os parâmetros morfométricos obtidos para os anos de 2003 a 2018 foram correlacionadas com perfis topográficos e modelos batimétricos. As morfologias deltaicas observadas variam entre lobadas, arqueadas e digitadas, e os fatores controladores compreendem principalmente disponibilidade de sedimentos, espaço de acomodação, presença de vegetação, processos eólicos

e atividades antrópicas. O aporte sedimentar está vinculado aos processos costeiros sobretudo aos fluxos eólicos que influenciam desde a ação das ondas até a migração do campo de dunas no sentido NE. O espaço de acomodação relaciona-se com os níveis de base dado pela batimetria das lagoas e as flutuações do nível d'água, que é controlado pelas precipitações e variações climáticas sazonais. A presença de vegetação no campo de dunas dificulta a entrada de sedimentos e aumenta a umidade no solo, propiciando a formação de canais aluviais coesos, sinuosos e estreitos. Na ausência de vegetação os canais são largos e difusos e os processos eólicos dominam. A presença de salinidade e a baixa profundidade da Lagoa do Gentil contribui para ampla proliferação das macrófitas aquáticas, as quais auxiliam na estabilização dos lobos deltaicos. Enquanto na Lagoa Manuel Nunes a ausência de salinidade e maiores profundidade na margem leste, refletem na ausência de macrófitas aquáticas junto aos deltas. A expansão da ocupação urbana sobre a Barreira IV faz com que o transporte de sedimentos da praia para o campo de dunas seja interrompido, diminuindo a disponibilidade de sedimentos, ao mesmo tempo em que propicia o aumento de umidade pela impermeabilização do solo e pela introdução de vegetação, como a espécie invasora *Pinus sp.* A implantação do parque eólico sobre o campo de dunas altera a forma e a extensão das sub-bacias de drenagem que alimentam os deltas lagunares, no entanto, apresentam pouco ou nenhum reflexo nas planícies deltaicas no período observado. As interações entre as causas e os efeitos que condicionam as morfologias deltaicas foram integradas em uma rede e a partir dessas relações foi sugerido um modelo evolutivo para dos deltas lagunares. Dentro da curta escala de tempo em que foram observados, as tendências evolutivas indicam que os sistemas deltaicos podem evoluir de morfologias arqueadas para lobadas, e de lobadas para digitadas.

**Palavras-chave:** Deltas lagunares; Morfologia deltaica; Planície Costeira do Rio Grande do Sul (PCRS).

**Abstract:** Lagoon deltas are distributed along the Rio Grande do Sul Coastal Plain (RSCP), preferentially located along Laguna-Barrier IV system, in portions where the coastline presents a transgressive behavior. Most deltas are conditioned by the sedimentary influx provided by dune field migration, as part of the Barrier IV retrograde process. In the northern coast of RSCP, different deltaic morphologies are

observed in the eastern margins of Gentil and Manuel Nunes lagoon. This article aims to answer how the controlling factors interact to produce morphological diversity. To identify the morphodynamic relationships, a temporal morphometric analysis of deltaic systems elements was performed using remote sensing integrated with Geographic Information Systems. The morphometric parameters obtained from 2003 to 2018 were correlated with actual topographic profiles and bathymetric models. Deltaic morphologies vary between lobates, arcuated and birdsfoot, and the main controlling factors comprise sediment availability, accommodation space, vegetation presence, wind processes and anthropic activities. Sediment input is linked to coastal processes, mainly the wind flows that influence wave action and the dune field migration towards NE. The accommodation space relates to the base levels given by lagoons bathymetry and fluctuations in the water level, which is controlled by rainfall and seasonal climatic variations. Vegetation presence in dune field makes it difficult for sediment to enter and increases soil moisture, leading to the formation of cohesive, winding and narrow alluvial channels. In the absence of vegetation the channels are wide and diffuse, with dominating wind processes. Salinity presence and Gentil Lagoon shallow depth contributes to aquatic macrophytes wide proliferation, which help delta lobes stabilization. On the other hand, salinity absence of Manuel Nunes Lagoon and greater depths of its eastern margin lead to the absence of aquatic macrophytes near deltas. Urban expansion over the Barrier IV System causes interruption of sediment transport from the beach to the dune field, reducing sediment availability. At the same time it increases soil moisture due to surface sealing and the vegetation introduction, such as the invasive species *Pinus sp.* The wind farm over the dune field changes the shape and extent of the drainage sub-basins that feed the lagoon deltas. However, it presents either small or no influence on the deltaic plains along the observed period. Interactions between causes and effects that conditioned deltaic morphologies were integrated in a network and from these relationships an evolutionary model for the lagoon deltas is suggested. Within the short timeframe in which they were observed, evolutionary trends indicate that delta systems can evolve from arcuate to lobed, and lobed to birdsfoot morphologies.

**Keywords:** Lagoon deltas; Delta morphology; Rio Grande do Sul Coastal Plain (RSCP).

## 1. Introdução

A Planície Costeira do Rio Grande do Sul (PCRS) compreende numerosos sistemas lagunares, onde é possível observar a presença de deltas marginais preferencialmente localizados no Sistema Laguna-Barreira IV descrito por Villwock e Tomazelli (1995), em porções onde a linha de costa é convexa (figura 1). Estes deltas estão condicionados pelo influxo sedimentar provido pelos campos de dunas que se desenvolvem nas regiões de projeção costeira, as quais são caracterizadas por Dillenburg *et al.* (2000) como setores onde a linha de costa apresenta comportamento transgressivo. Pode-se dizer que enquanto deltas marinhos se desenvolvem em contextos de linha de costa regressiva (DALRYMPLE, 1999), os atuais deltas lagunares da PCRS se desenvolvem como parte do processo de retrogradação do Sistema IV. Deltas interlagunares, no entanto, ocorrem ao longo de toda planície costeira.

É interessante notar que os deltas lagunares formados na interface do Sistema Laguna-Barreira IV apresentam diferentes morfologias, tanto de uma lagoa para outra como em uma única lagoa, como é o caso das lagoas localizadas no litoral norte do Rio Grande do Sul (figura 2). Estas observações levam a questionar quais seriam os fatores que controlam a morfologia desses deltas lagunares. A hipótese sugerida é de que diferentes combinações de fatores como disponibilidade de sedimento, relevo do fundo lagunar, nível d'água, presença de vegetação e salinidade atuam na produção das diferentes morfologias. Assim, o objetivo deste estudo é responder como os fatores controladores interagem na produção da diversidade deltaica, utilizando as Lagoas do Gentil e Manuel Nunes como estudos de caso.

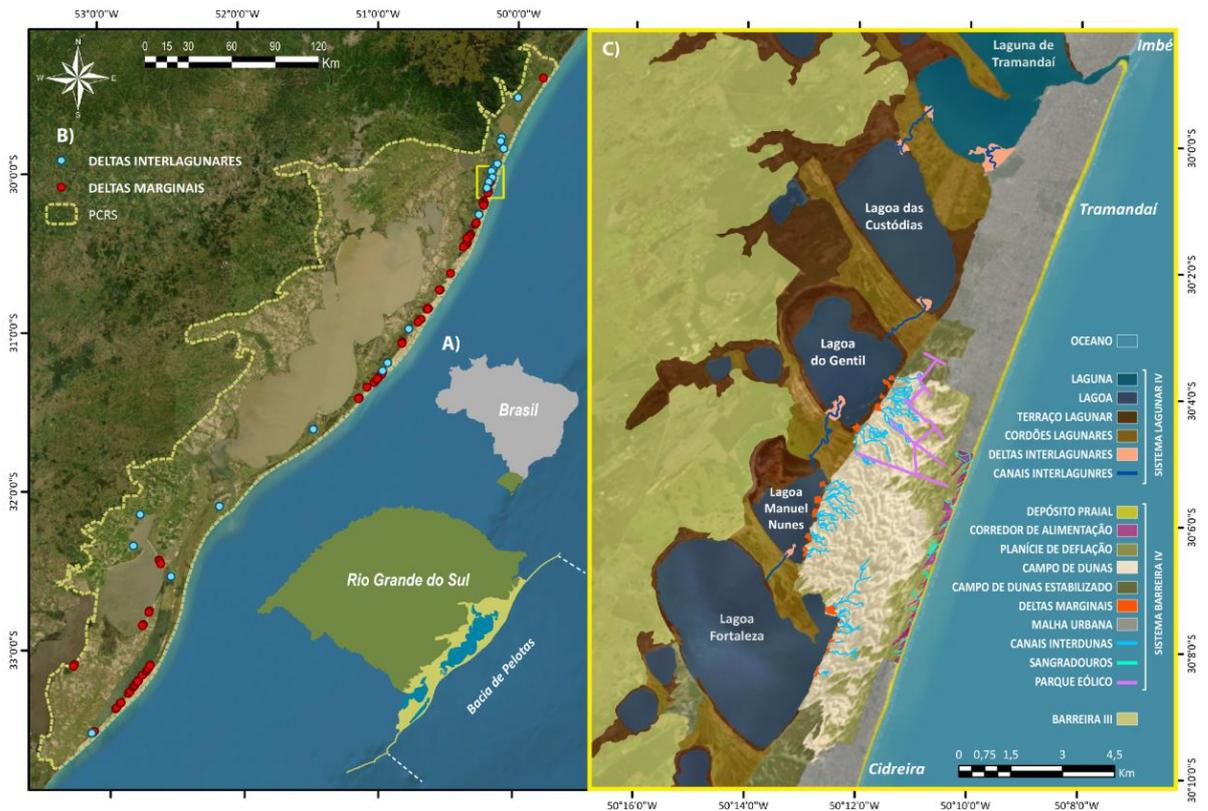


Figura 1 – (A) A localização da área de estudo parte da escala da Bacia de Pelotas e abrange toda Planície Costeira do Rio Grande do Sul (PCRS), onde a linha de costa é sinuosa. (B) A presença de deltas lagunares marginais se concentra nas projeções costeiras e está condicionada a presença dos campos de dunas. (C) No Litoral Norte da PCRS, situado na extremidade de uma projeção costeira, deltas marginais são depositados entre o Campo de Dunas de Cidreira e as Lagoas do Gentil e Manuel Nunes. A legenda do mapeamento de maior escala indica os sub-ambientes geomorfológicos naturais e as intervenções antrópicas de uso do solo como elementos fisiográficos importantes que constituem o sistema deposicional.

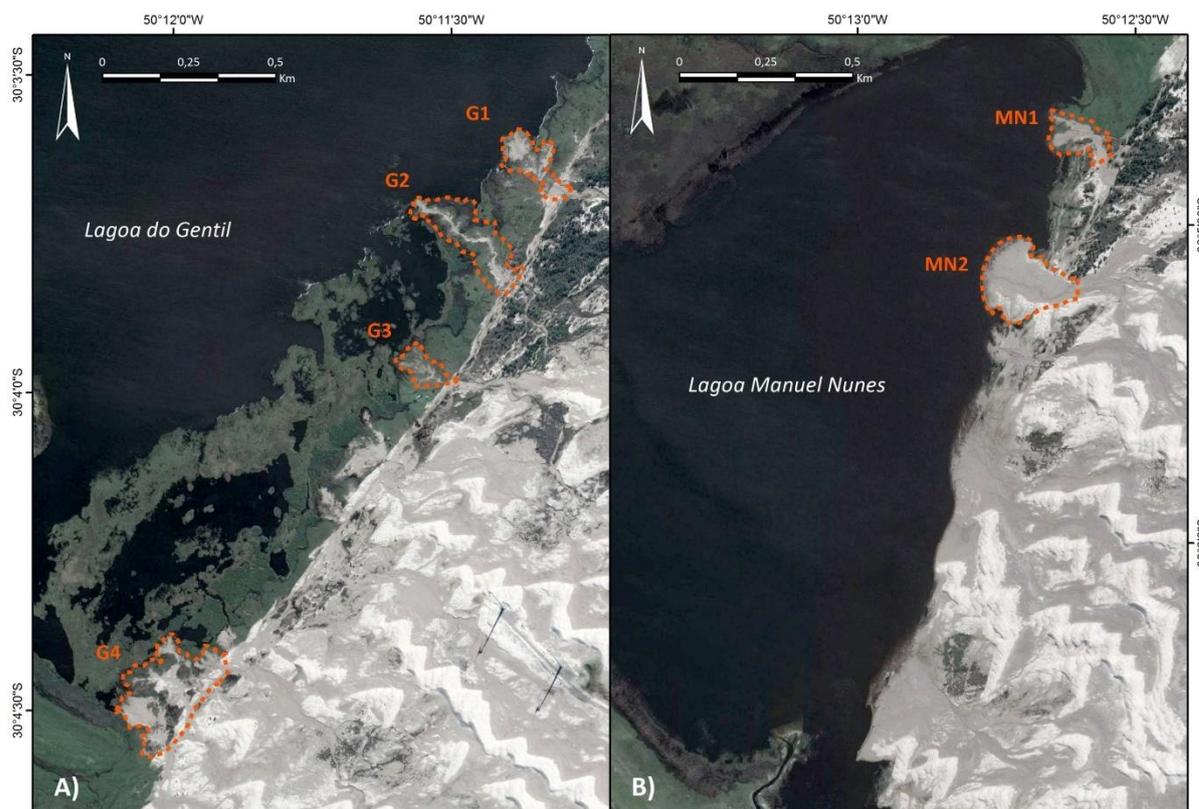


Figura 2 – Deltas lagunares de diferentes morfologias condicionados pelo Campo de Dunas. (A) Margem leste da Lagoa do Gentil com indicação dos deltas estudados, denominados como G1, G2, G3 e G4. (B) Margem leste da Lagoa Manuel Nunes, indicando os deltas denominados como MN1 e MN2.

## 2. Área de Estudo

A área de estudo está inserida na Bacia de Pelotas, a qual é preenchida por sedimentos predominantemente clásticos, produzindo uma plataforma continental ampla e rasa com declividade suave, variando entre  $0,03^\circ$  e  $0,08^\circ$  (DILLENBURG *et al.*, 2009). A porção emersa da Bacia de Pelotas corresponde à atual Planície Costeira do Rio Grande do Sul (PCRS), e é composta por quatro sistemas laguna-barreira formados sob influência de oscilações glacio-eustáticas, associados a estágios de nível do mar alto na transição de ciclo transgressivo para regressivo durante o período Quaternário (VILLWOCK e TOMAZELLI, 1995). São atribuídas as seguintes idades genéticas para os Sistemas Laguna-Barreira: I) 325 ka (ROSA *et al.*, 2017); II) 230 ka (LOPES *et al.*, 2010; 2014); III) 125 ka (BUCHMANN e TOMAZELLI, 2003); e IV) 8 ka até o presente (HESP *et al.*, 2005, DILLENBURG *et al.*, 2009). Assim, os Sistemas I, II e III correspondem a idades Pleistocênicas, e o Sistema IV à idade Holocênica.

Na escala dos depósitos Holocênicos, dada às baixas taxas de variação do nível do mar (DILLENBURG *et al.* 2009), o preenchimento do espaço de acomodação é controlado pelo balanço de sedimentos associado a processos costeiros e sua relação com a orientação da linha de costa (TOLDO JR. *et al.*, 2006), que por sua vez é influenciada pela herança tectônica (DILLENBURG, 2000; ROSA *et al.*, 2009). A atual linha de costa tem orientação NE-SW, com ondulações suaves formando embaiamentos e projeções (figura 1). Nas regiões de embaiamentos a linha de costa é regressiva, a plataforma é ampla e suave, e o padrão de empilhamento é progradacional, enquanto nas regiões projetadas a linha de costa é transgressiva, a plataforma é íngreme e estreita com padrão de empilhamento retrogradacional (DILLENBURG *et al.*, 2000; MARTINHO *et al.*, 2010). A geometria convexa da linha de costa e a plataforma estreita e íngreme fazem com que o processo de refração e dissipação das ondas seja reduzido, resultando no aumento da energia das ondas e o conseqüente aumento do transporte de sedimentos ao longo da costa (MARTINHO *et al.*, 2009).

A área de estudo está localizada no litoral norte da PCRS, entre o Balneário Jardim do Éden no município de Tramandaí e o município de Cidreira (figura 1). Nessa região a linha de costa apresenta comportamento transgressivo desde a implantação da barreira nos últimos 7 – 5 ka, aproximadamente, evidenciado pela presença de depósitos eólicos sobrepostos a depósitos lagunares, desde a atual linha de costa até a margem leste das lagoas costeiras, como resposta ao balanço de sedimentos negativo controlado principalmente pela declividade do substrato (TRAVESSAS *et al.*, 2005). Em setores como esse, extensos sistemas eólicos são dominados por campos de dunas migratórias alimentados por sedimentos disponibilizados a partir da ação erosiva nas projeções costeiras (MARTINHO *et al.*, 2010). A manutenção dos sistemas eólicos está relacionada aos processos costeiros, incluindo a ação dos ventos, ondas, marés e correntes litorâneas, e influenciados pelas condições climáticas (TOLDO JR. *et al.*, 2006; MARTINHO *et al.*, 2010).

O campo de dunas de Cidreira é composto predominantemente por cadeias barcanóides, dunas barcanas isoladas, lençóis de areia e as regiões interdunas. Dunas parabólicas de orientação NW-SE são encontradas nas extremidades sul e norte onde o campo de dunas está inativo, e também na extremidade leste, tanto em contato com a planície de deflação, como no contato com a praia, formando os

corredores de areia que alimentam o campo de dunas. Os ventos de NE fazem com que as dunas se movimentem em direção SW, obliquamente sobre os sistemas lagunares. (MARTINHO, *et al.*, 2010; TOMAZELLI *et al.*, 2017). A margem oeste do campo de dunas apresenta canais de drenagem pluviais encaixados nas áreas de interdunas. A medida que as dunas migram em direção SW as regiões interdunas são movimentadas e, conseqüentemente, a rede de drenagem sofre reajustes em suas conexões. Ao desagüarem nas lagoas as drenagens formam deltas lagunares.

As Lagoas do Gentil e Manuel Nunes estão compreendidas no sub-sistema sul da Bacia do Rio Tramandaí, apresentando interconexões e sentido de fluxo para norte, desagüando na Laguna de Tramandaí que apresenta conexão permanente com o oceano (figura 1) (CASTRO e ROCHA, 2016). Apesar do regime de micromarés, os ventos de NE amplificam o alcance da cunha salina no sentido SW, fazendo com que a circulação estuarina de água salobra se estenda da Laguna de Tramandaí até a Lagoa do Gentil (CASTRO e ROCHA, 2016). Análises das águas da Lagoa do Gentil realizadas por Rocha (2019), revelam variações de salinidade entre 0 e 17,09 para os períodos de junho de 2010 a outubro de 2015, predominando valores baixos. Enquanto para as águas da Lagoa Manuel Nunes não há registros de detecção de salinidade. Modelos batimétricos gerados em outubro de 2018 por Trindade (2019) (figuras 5 e 6), indicam que na Lagoa do Gentil a margem onde os deltas se desenvolvem é mais ampla e rasa do que na Lagoa Manuel Nunes. Segundo as características físico-químicas descritas por Ahlert *et al.* (2013) e Schäfer (2013) (tabela 1), a baixa profundidade da Lagoa do Gentil permite que toda lâmina d'água receba luminosidade, conferindo maior transparência e possibilitando a realização de fotossíntese em toda sua profundidade (classificada como eufótica). Ao contrário, na Lagoa Manuel Nunes a luz penetra apenas até sua profundidade média, conferindo menor transparência. Os teores de fosfato, nitrogênio, clorofila-a, e estado trófico indicam que o maior grau de eutrofização é sofrido pela Lagoa Manuel Nunes. Na Lagoa do Gentil, sua baixa profundidade e presença de salinidade favorecem a maior proliferação da vegetação de macrófitas.

Os deltas lagunares da área de estudo apresentam diferentes morfologias apesar de compartilharem da mesma bacia de drenagem, ou até a mesma bacia receptora. Rosa *et al.* (2016) notaram esta peculiaridade e atribuíram a diversidade morfológica às variações nas taxas de descarga, considerando a presença de vegetação um fator importante na coesão dos canais presentes nas planícies

deltaicas. No entanto, interpretações de Rosa *et al.* (2016) para as condições de fluxo a partir do número de *froud* para alguns deltas da Lagoas do Gentil e Manuel Nunes, indicam que todos estão sob condições semelhantes, com fluxos subcríticos, mantendo em questionamento quais seriam os fatores que realmente controlam as diferenças morfológicas.

**Tabela 1: Parâmetros físico-químicos das lagoas costeiras no ano de 2012 extraídas de Ahlert *et al.* (2013) e Schäfer (2013).**

Parâmetros físico-químicos	Lagoa do Gentil	Lagoa Manuel Nunes
Área (Km <sup>2</sup> )	6,52	2,91
Volume (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	4,0	2,7
Profundidade Máxima (m)	1,45	1,96
Profundidade Média (m)	0,62	0,91
Profundidade Eufótica (m)	1,4	0,9
Transparência (m)	0,5 a 1	> 0,5
Teor de fosfato (mg/L)	0,07 (muito rico)	0,9 (extremamente rico)
Teor de nitrogênio amoniacal (mg/L)	0,03	0,05
Clorofila-a (mg/m <sup>3</sup> )	5,8 (pobre)	9,2 (rico)
Estado Trófico - Clorofila	Oligotrófico	Mesotrófico
Estado Trófico - Fósforo	Eutrófico	Eutrófico

### 3. Materiais e Métodos

As variações morfológicas e suas relações dinâmicas, foram observadas a partir da análise morfométrica dos elementos que compõem os sistemas deltaicos para diferentes instantes de tempo através do sensoriamento remoto conjugado com sistemas de informação geográfica. Esses dados foram correlacionados com perfis topográficos das planícies deltaicas, e também com perfis de declividade extraídos dos modelos batimétricos de Trindade (2019).

#### 3.1 Mapeamento dos Elementos Fisiográficos

Os elementos fisiográficos mapeados para a análise morfométrica, estão compreendidos nos seguintes sub-ambientes sedimentares: (i) *bacias receptoras*, que correspondem as Lagoas do Gentil e Manuel Nunes, e as vegetações de margem lagunar e de macrófitas aquáticas; (ii) *bacia de drenagem*, correspondente

ao campo de dunas, neste caso, compartimentado em uma *sub-bacia de drenagem* para cada sistema de deltaico, com canais de drenagem aluviais e vegetação; e (iii) *deltas lagunares*, correspondendo ao mapeamento das planícies deltaicas (figura 4). A delimitação dos elementos fisiográficos foi realizada através da extensão *ArcMap®* do *software ArcGis®*, em escala de 1:2.500 sobre imagens de satélite extraídas do *Google Earth®*. O mapeamento foi realizado para as datas de 23/05/2003, 26/10/2009, 17/03/2012, 13/05/2016 e 03/09/2018 (figura 3B-F). Outros elementos que fazem parte dos sistemas mapeados, mas não tiveram suas morfometrias quantificadas, foram traçados sobre a imagem do ano de 2018 do *BaseMap* no *ArcMap®* com escala de detalhe de 1:10.000. Dentre os quais também foram considerados os elementos de uso e ocupação do solo, como malha urbana e rede viária do parque eólico implantada sobre o campo de dunas em meados de 2011. Uma fotografia aérea de 1974 foi utilizada apenas para identificar se já havia indícios da presença dos deltas atuais (figura 3A). Para auxiliar a definir limites topográficos das unidades geológicas foi utilizado um Modelo Digital de Elevação (MDE) do ALOS World 3D (AW3D) (figura 3G), o qual sofre influência da vegetação e das edificações e possui resolução espacial de 20 m.

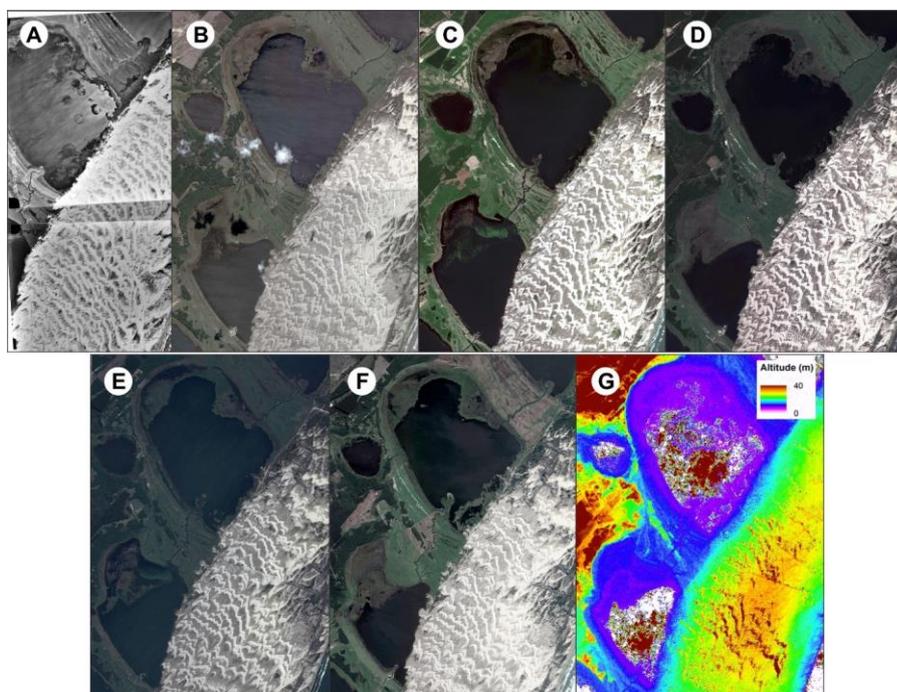


Figura 3 – Imagens utilizadas como base do mapeamento da área de estudo no litoral norte da PCRS. A) Fotografia aérea de 1974; Imagens de satélite do *Google Earth®* utilizados como base dos mapeamentos para análise temporal para as datas de: B) 23/05/2003; C) 26/10/2009; D) 17/03/2012; E) 13/05/2016; F) 03/09/2018; e G) Modelo Digital de Elevação (MDE) ALOS World 3D (AW3D).

### 3.2 Cálculo dos Parâmetros Morfométricos

A partir dos elementos fisiográficos traçados calcularam-se os valores de áreas e perímetros no *ArcMap*®. Esses valores possibilitaram o cálculo dos parâmetros morfométricos descritos a seguir, de acordo com Machado (1998), Silveira (2012) e Paz (2004), os quais foram dispostos em gráficos com auxílio do *Excel*® (gráficos 1 a 5).

- *Área (A)*: Nas sub-bacias de drenagem corresponde à área plana entre os divisores topográficos. A área das planícies deltaicas corresponde aos limites visíveis entre leques recentemente depositados. Enquanto para as lagoas, consiste na área plana que contorna sua superfície, sendo que as variações destas áreas superficiais estão diretamente relacionadas com o aumento e diminuição do nível d'água. Todos estes valores foram obtidos diretamente no *ArcMap*® a partir dos traçados sobre os elementos indicados.

- *Comprimento dos canais (L)*: Somatório das extensões dos canais de drenagem identificados como ativos na região do interdunas, obtidos a partir do cálculo de perímetro da rede de canais traçados no *ArcMap*®.

- *Comprimento dos canais principais (L<sub>c</sub>)*: Valor do perímetro para o canal que se conecta as drenagens do campo de dunas e estende-se até a frente deltaica.

- *Sinuosidade dos canais principais (S<sub>c</sub>)*: Relação entre o comprimento do canal principal (L<sub>c</sub>) e a distância entre a nascente e a foz (d<sub>c</sub>) no mesmo canal medida em linha reta, expressando a quantidade de curvatura do canal, dado pela expressão:

$$S_c = L_c / d_c$$

- *Densidade de drenagem (DD)*: Relação entre o somatório dos comprimentos de todos os canais da bacia de drenagem (L) e a área da bacia (A). É dada pela equação:

$$DD = L / A$$

- *Comprimento máximo das lagoas*: Linha que une os dois pontos mais afastados com orientação paralela a linha de costa, e possui caráter descritivo.
- *Largura máxima das lagoas*: Linha que une dois pontos mais afastados com orientação perpendicular a linha de costa, sendo uma medida tomada em ângulo reto a partir do eixo do comprimento máximo.
- *Largura média das lagoas*: Razão entre a área e o comprimento máximo.
- *Relação comprimento/largura*: Quando calculado para as planícies deltaicas tem o objetivo de verificar se há maior expansão das áreas longitudinalmente, em direção ao fundo lagunar, ou lateralmente, sobre as margens lagunares. E quando calculada e para as lagoas, indicam a direção das áreas de baixa declividade onde ocorrem inundações periódicas.

### **3.3 Perfis de Declividade**

O levantamento do perfil topográfico dos canais deltaicos foi realizado em fevereiro de 2019, utilizando um GNSS geodésico com sistema de posicionamento diferencial realizado em tempo real (*Real Time Kinematics – RTK*). Os dados de altimetria foram transformados em um arquivo vetorial no *ArcMap®*, de onde foram extraídos os valores para elaboração dos perfis de declividade das planícies deltaicas no *Excel®* (figura 8). Os perfis lagunares (figuras 5 e 6) e dos prodeltas (figura 9) foram elaborados no *Excel®* a partir da extração de valores de arquivos vetoriais no *ArcMap®*, correspondente aos modelos batimétricos gerados e disponibilizados por Trindade (2019).

## 4. Resultados

### 4.1 Bacias Receptoras

As imagens analisadas foram capturadas em diferentes datas e estações climáticas, evidenciando as variações de nível d'água das lagoas (figura 4) e, conseqüentemente, seus parâmetros morfométricos (gráfico 1, anexo 1). A Lagoa Manuel Nunes apresenta variações expressivas na área superficial, com aumento de 59,3% de 2003 a 2009, diminuição de 54,6% de 2009 a 2012, tornando a aumentar em 104,5% de 2012 a 2016, e novamente diminuindo em 51,7% de 2016 a 2018. Na Lagoa do Gentil as variações são bastante discretas, apresentando aumento de 2,8% na área superficial de 2003 a 2009, diminuição de 4% de 2009 a 2012, tornando a aumentar 0,3% de 2012 a 2016, e diminuindo novamente em 0,45% de 2016 a 2018. A vegetação de gramíneas presente nas margens lagunares diminuiu de 0,42 km<sup>2</sup> para 0,28 km<sup>2</sup> de 2003 a 2009, apresentando crescimento até 2018, quanto volta a totalizar 0,42 km<sup>2</sup> de cobertura. A área de cobertura da vegetação de macrófitas na Lagoa do Gentil apresenta diminuição de 58,46% de 2003 a 2009, aumento de 170,96% de 2009 a 2012, diminuindo novamente em 38,63% de 2012 a 2016, tornando a aumentar em 216,19% de 2016 a 2018 (gráfico 2).

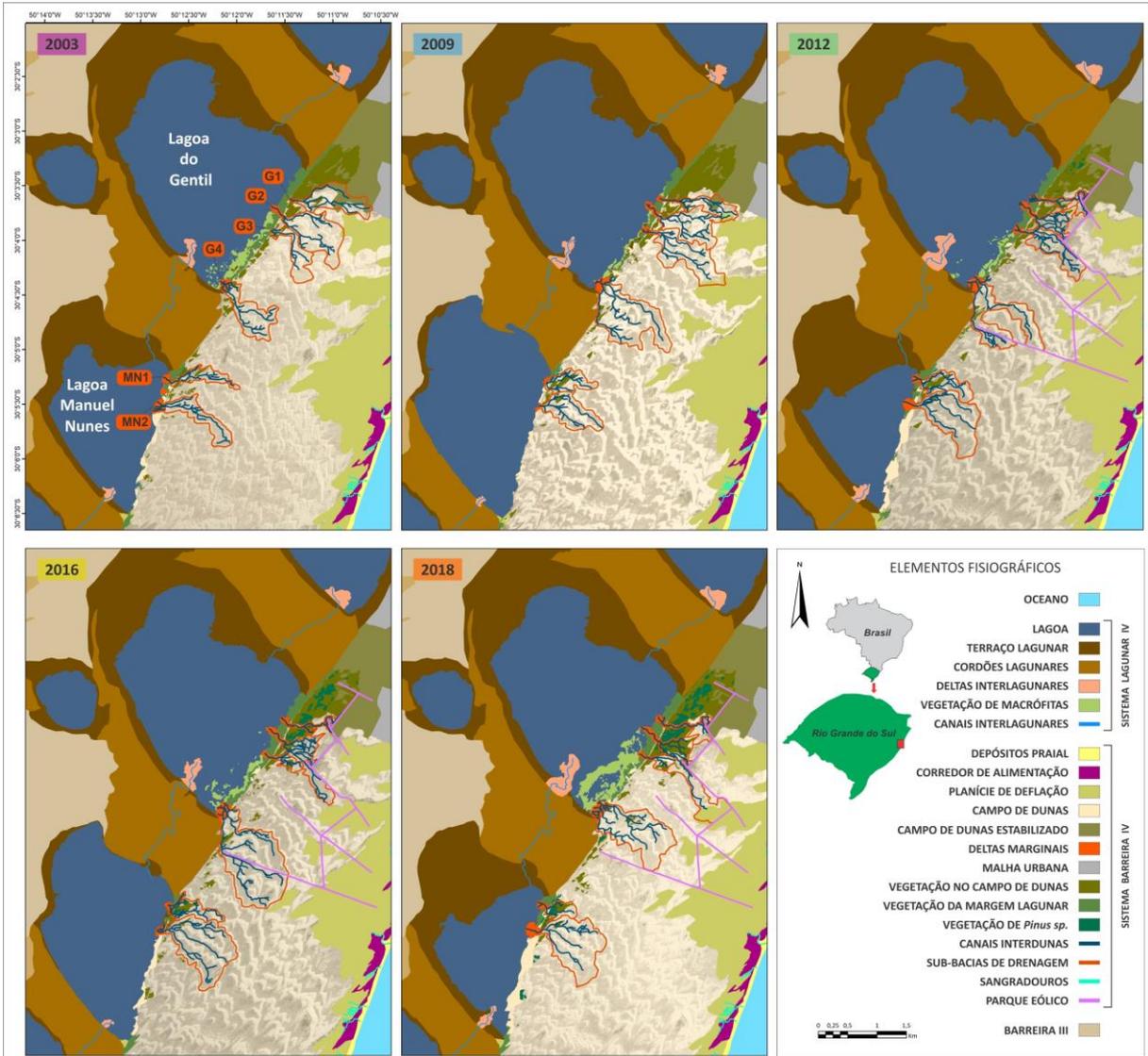
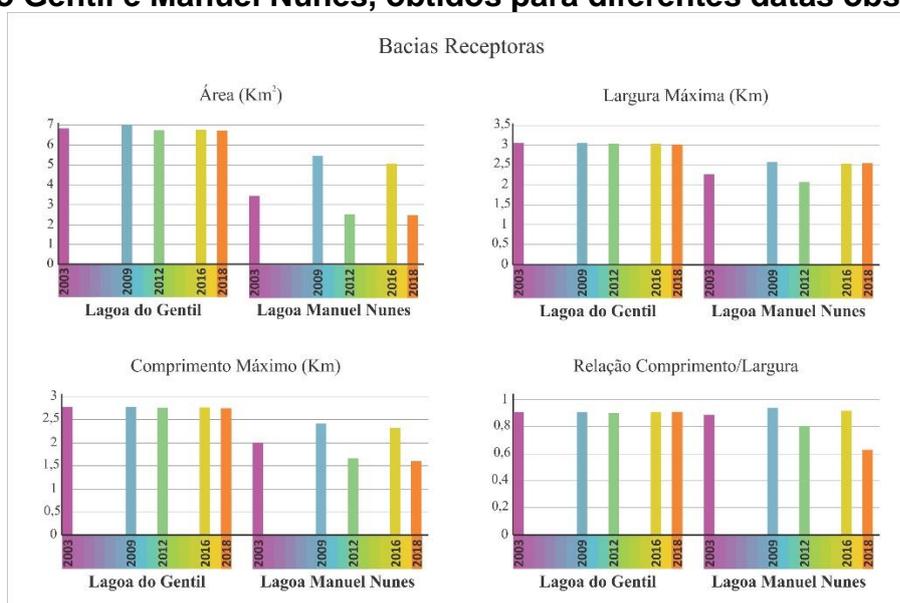
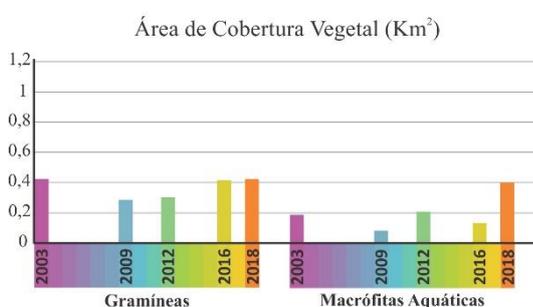


Figura 4 - Mapeamento dos elementos fisiográficos, evidenciando as variações morfológicas dos sub-ambientes costeiros do Sistema Laguna-Barreira IV, no Litoral Norte da Planície Costeira do Rio Grande do Sul, para diferentes instantes de tempo: 23/05/2003, 26/10/2009, 17/03/2012, 13/05/2016 e 03/09/2018. Notar a expressiva variação do nível d'água da Lagoa Manuel Nunes; o aumento da vegetação de macrófitas na Lagoa do Gentil e de *Pinus sp.* no campo de dunas; o crescimento das planícies deltaicas; variações nas formas das sub-bacias de drenagem e de seus canais associados; presença do parque eólico sobre o campo de dunas a partir de 2012, interferindo nas formas de algumas sub-bacias.

**Gráfico 1 - Variações dos parâmetros morfométricos das Bacias Receptoras - Lagoas do Gentil e Manuel Nunes, obtidos para diferentes datas observadas.**



**Gráfico 2 - Variações da cobertura vegetal na margem leste das lagoas costeiras. As gramíneas estão presentes nas margens lagunares com maior concentração na Lagoa do Gentil, assim como as macrófitas aquáticas que foram mapeadas apenas nessa lagoa.**

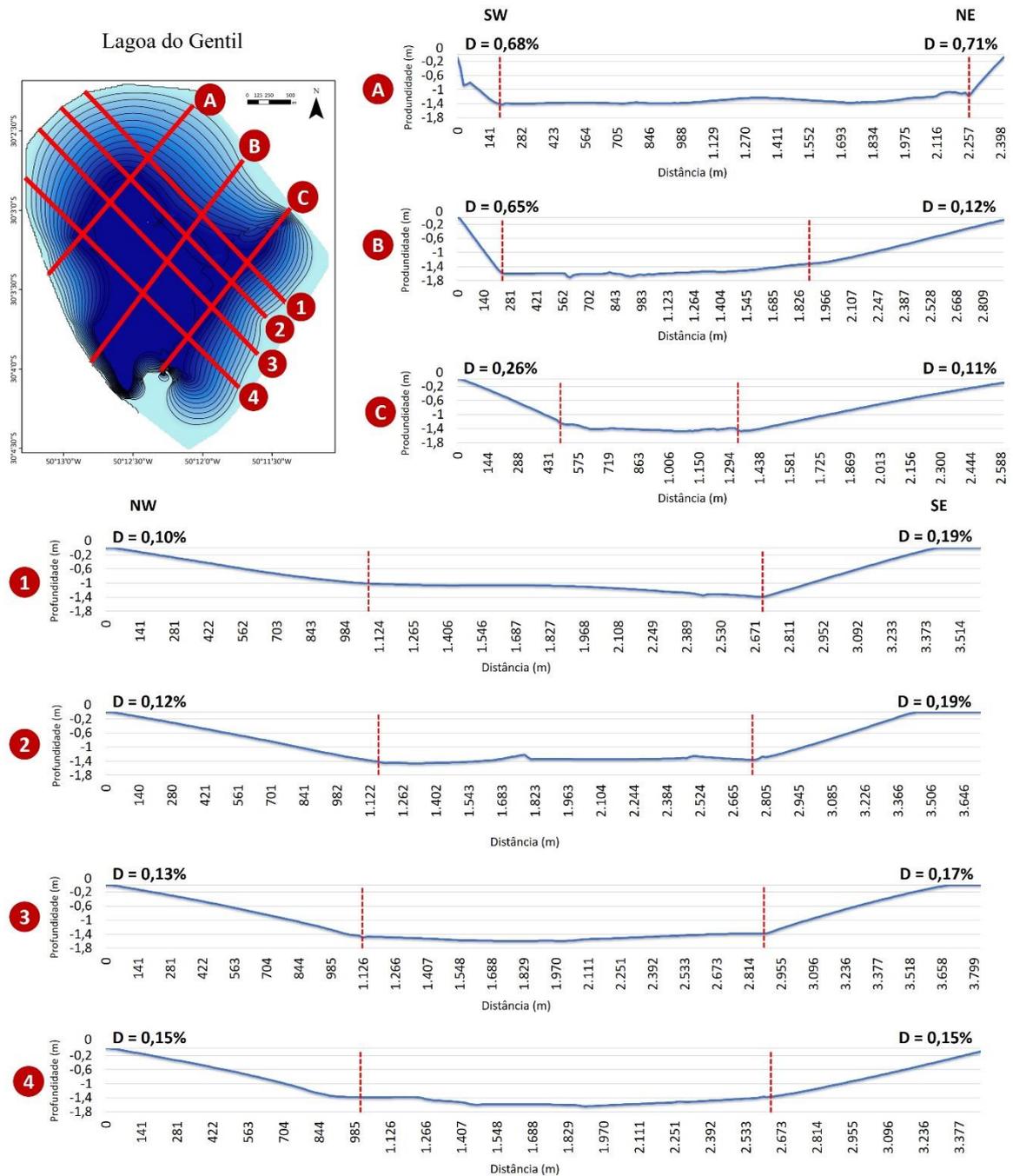


Os parâmetros morfométricos atuais das lagoas costeiras estão resumidos na tabela 2. As áreas calculadas para a superfície das lagoas correspondem a 6,67 km<sup>2</sup> para a Lagoa do Gentil e 2,42 km<sup>2</sup> para a Lagoa Manuel Nunes. As medidas de comprimento e largura máxima para a Lagoa do Gentil são de 2,72 km e 2,99 km, sendo a relação entre esses valores de 0,91, refletindo o formato alongado da lagoa na direção NW-SE. Para a Lagoa Manuel Nunes os valores são de 1,58 km e 2,52 km, com relação de 0,63, sendo o formato da lagoa aproximadamente triangular. O modelo batimétrico apresenta profundidade máxima de 2,0 m para a Lagoa do Gentil e 2,2 m para Manuel Nunes, com volume estimado de 6,7 10<sup>6</sup>m<sup>3</sup> e 3,2 10<sup>6</sup>m<sup>3</sup>, respectivamente. Na Lagoa do Gentil há declividades acentuadas nas margens

próximas aos canais interlagunares (figura 5), com valores maiores na margem SW dos perfis A e B, e na margem NE do perfil A. O perfil C, apresenta declividade intermediária na margem SW. As demais margens apresentam declividades suaves. Na Lagoa Manuel Nunes (figura 6), as maiores declividades são encontradas no limite com o campo de dunas, como é observado na margem E dos perfis 1 e 4, e próximo ao canal interlagunar na margem N do perfil A. Declividades moderadas são encontradas na margem W dos perfis 3 e 4, e na margem S dos perfis A, B e C. As declividades mais suaves estão concentradas na porção NW da lagoa, evidenciadas pela margem oeste dos perfis 1 e 2 e na margem norte dos perfis B e C. Já nos perfis 2 e 3, a margem leste apresenta suavização de declividade em razão da presença de prodeltas. Os deltas presentes da Lagoa do Gentil apresentam prodeltas de declividade mais suaves, com valores entre 0,16 e 0,22%, enquanto os deltas da Lagoa Manuel Nunes apresentam declividades mais acentuadas com valores de 0,36 a 0,40% (figura 9). Macrófitas estão presentes em ambas as lagoas, no entanto os sistemas deltaicos mais afetados pela presença dessas plantas estão na Lagoa do Gentil (figura 2), com área de aproximadamente 0,39 km<sup>2</sup> na margem leste.

**Tabela 2: Parâmetros morfométricos obtidos para as lagoas costeiras no ano de 2018**

Parâmetros morfométricos	Lagoa do Gentil	Lagoa Manuel Nunes
Área Superficial (Km <sup>2</sup> )	6,67	2,42
Perímetro (Km)	15,1	12,2
Volume (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	6,7	3,2
Profundidade Máxima (m)	2	2,2
Comprimento Máximo (Km)	2,72	1,58
Largura Máxima (Km)	2,99	2,52
Largura Média (Km)	2,45	1,53
Relação Comprimento/Largura	0,91	0,63



*Figura 5 – Perfis de declividade extraídos do modelo batimétrico de Trindade (2019), para a Lagoa do Gentil. Os traçados em vermelho indicam os limites das margens lagunares com declividades calculadas. As maiores declividades são encontradas próximas aos canais interlagunares, como nas margens SW dos perfis A e B, e margem NE do perfil A. Os demais perfis (1, 2, 3, 4 e C) apresentam declividades suaves.*

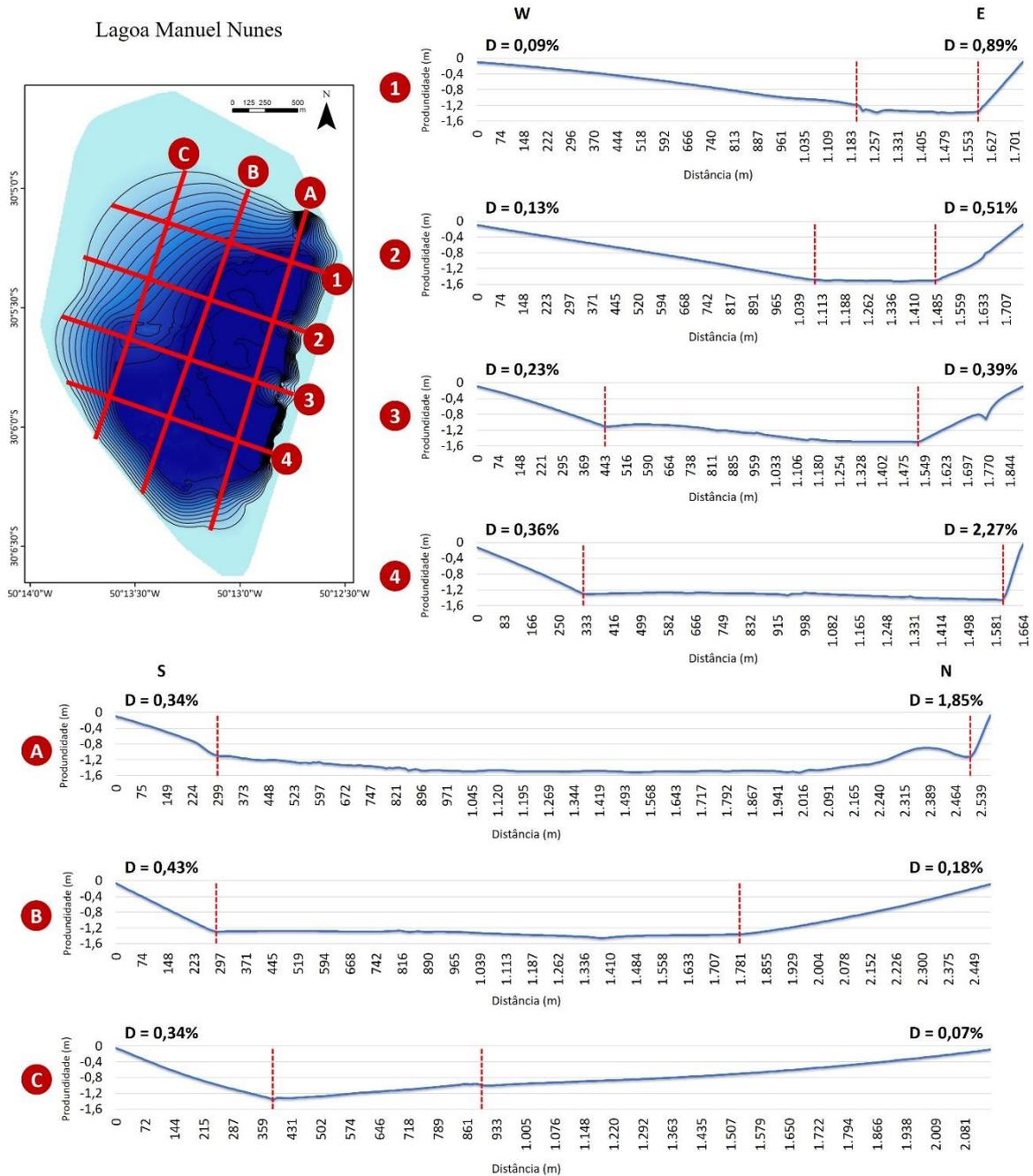
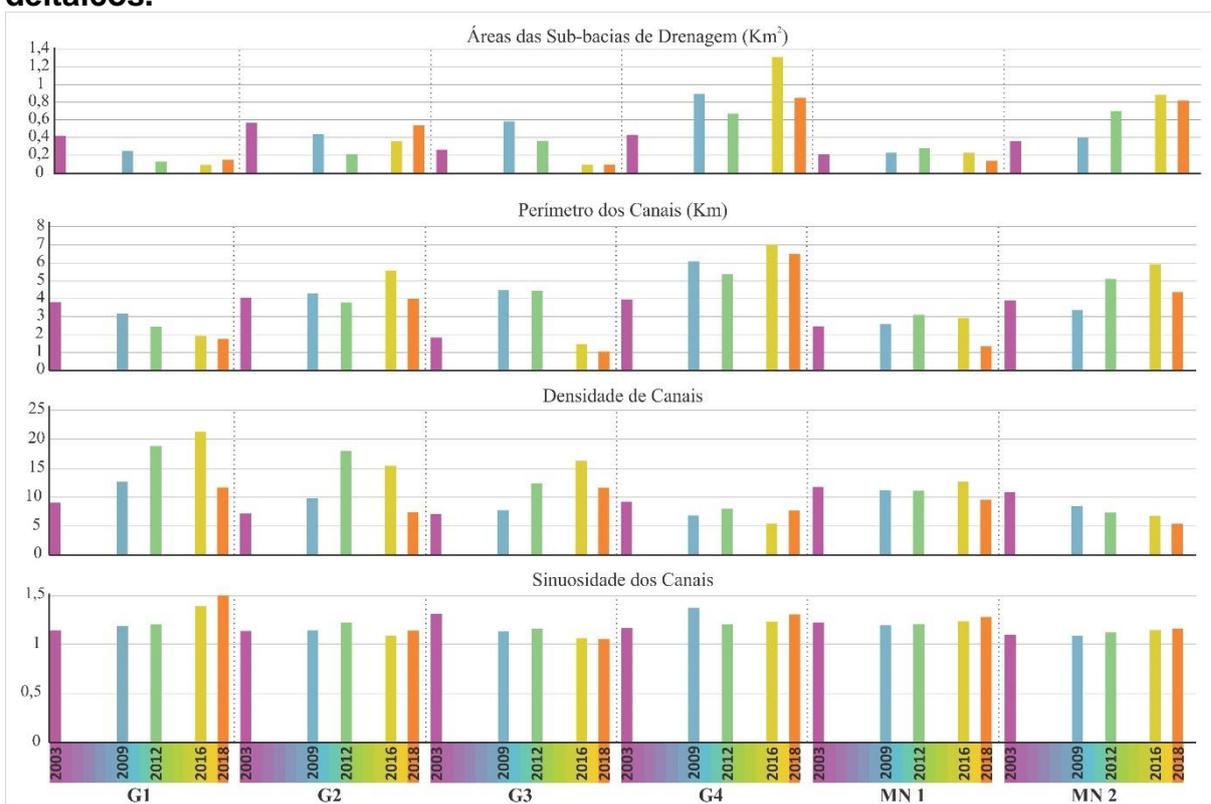


Figura 6 – Perfis de declividade extraídos do modelo batimétrico de Trindade (2019), para a Lagoa Manuel Nunes. Os traçados em vermelho indicam os limites das margens lagunares com declividades calculadas. As maiores declividades são encontradas na margem leste da lagoa, no limite com o campo de dunas, e também na proximidade do canal interlagunar que conecta a Lagoa Manuel Nunes com a Lagoa do Gentil. A porção S-SW da lagoa apresenta declividades moderadas, enquanto na porção NW as margens são bastante suaves.

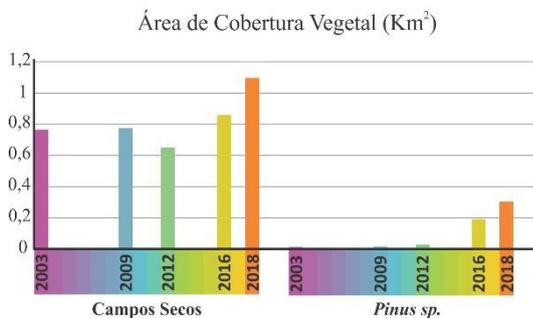
## 4.2 Bacias de Drenagem

Os campos secos observados nas áreas estabilizadas apresentam diminuição de 14,76% de 2003 a 2012, e aumento de 68,75% de 2012 a 2018. Na mesma região distingue-se a presença da espécie *Pinus sp.*, que entre 2003 e 2009 é pouco significativo, mas apresenta expressivo crescimento de 2012 a 2018 atingindo uma área de aproximadamente 0,3 km<sup>2</sup>. As variações morfométricas calculadas para cada sub-bacia de drenagem no período entre 2003 e 2018 são descritas a seguir e estão dispostas nos gráficos 3 e 4, e seus respectivos valores estão no anexo 2.

**Gráfico 3 - Variação temporal dos parâmetros morfométricos: Área, Perímetro dos canais de drenagem, Densidade de canais de drenagem e Sinuosidade do canal de drenagem principal para cada sub-bacia dos diferentes sistemas deltaicos.**



**Gráfico 4 - Variação temporal da cobertura vegetal sobre o campo de dunas. São encontrados campos secos onde destaca-se a crescente presença da espécie invasora de *Pinus sp.***



#### 4.2.1 Sub-bacia G1

Entre 2003 a 2018 a **área** diminuiu 64,3%, e o **perímetro** da rede de drenagem do apresentou diminuição de 53,85%, enquanto a **sinuosidade** dos canais aumentou de 31,6%. A **densidade** de canais aumentou 135,9% de 2003 a 2016, e diminuiu 45,2% em 2018.

#### 4.2.2 Sub-bacia G2

A **área** diminuiu em 63,2% de 2003 a 2012, e aumentou 157% de 2012 a 2018. Entre 2003 a 2018 a rede de drenagem varia seu **perímetro** de forma alternada, com aumento de 6% de 2003 a 2009, diminuição de 12% de 2009 a 2012, voltando a aumentar 46,7% de 2012 a 2016, e por fim, apresentando nova diminuição de 28,4% de 2016 a 2018. A **sinuosidade** dos canais aumenta 8% de 2003 a 2012, diminuindo 11,5% de 2012 a 2016, aumentando novamente entre 2016 e 2018 em 5,6%. A **densidade** de canais apresenta tendência oposta a área da sub-bacia, aumentando seu valor em 152,9% de 2003 a 2012, diminuindo em 59% de 2012 a 2018.

#### 4.2.3 Sub-bacia G3

A **área** e o **perímetro** da rede de drenagem aumentam 144,5% e 123% de 2003 a 2009, e diminuem 76,6% e 84,5% de 2012 a 2018, respectivamente. A

**sinuosidade** dos canais diminuiu 19,8% de 2003 a 2018. A **densidade** de canais aumenta em 131,5% de 2003 e 2016, e diminui 28,4% de 2016 a 2018.

#### 4.2.4 Sub-bacia G4

A **área** e o **perímetro** das drenagens variam alternadamente entre 2003 até 2018, apresentando uma tendência geral crescente para este período com aumento de 97,67% e 64,38%, respectivamente. A **sinuosidade** dos canais aumenta 18,1% de 2003 a 2009, diminui 12,4% de 2009 a 2012, e volta a aumentar em 8,3% de 2012 a 2018. A **densidade** de canais também apresenta variações, mas sua tendência geral é decrescente, apresentando diminuição total de 16,8% de 2003 a 2018.

#### 4.2.5 Sub-bacia MN1

No período de 2003 a 2012 a **área** aumentou em 33,33% e o **perímetro** das drenagens em 26,12%, diminuindo 50% e 56,82% de 2012 a 2018, respectivamente. A **sinuosidade** apresenta diminuição de 2,6% entre 2003 a 2009, e aumento de 7,6% de 2009 a 2018. A **densidade** dos canais diminui em 5,5% de 2003 a 2012, aumentando em 14,2% de 2012 a 2016, e diminuindo em 24,4% de 2016 a 2018.

#### 4.2.6 Sub-bacia MN2

A **área** aumenta 144,44% de 2003 a 2016, diminuindo 6,82% de 2016 a 2018. O **perímetro** das drenagens diminui 13,7% de 2003 a 2009, aumentando 76,65% de 2009 até 2016, com nova diminuição de 26,27% de 2016 a 2018. De 2003 a 2018 a **sinuosidade** varia discretamente, apresentando aumento total de 5,5%, enquanto a **densidade** de drenagens diminui em 50,7% no mesmo período.

Atualmente o campo de dunas apresenta área total de aproximadamente 20,7 km<sup>2</sup>, com largura variando de 3,3 km a 1,3 km, e comprimento de 11,7 km. As regiões estabilizadas têm cobertura vegetal de aproximadamente 1,8 km<sup>2</sup>, sendo especialmente abundante na porção norte junto a Lagoa do Gentil. A distância da barreira desde a margem leste da Lagoa do Gentil até a linha de costa, em 2018, é

de aproximadamente 3 km, sendo que 2,37 km correspondem ao campo de dunas e os outros 0,63 km correspondem a área coberta pela urbanização. A porção da barreira que vai da margem leste da Lagoa Manuel Nunes até a linha de costa é ocupada apenas pelo campo de dunas e apresenta uma distância média de aproximadamente 3,94 km. Demais parâmetros morfométricos obtidos para o ano de 2018 estão dispostos na tabela 3.

**Tabela 3: Valores obtidos para os parâmetros morfométricos das sub-bacias e canais de drenagem para o ano de 2018.**

Deltas	Sub-bacias		Canais de drenagem			
	Área (Km <sup>2</sup> )	Perímetro (Km)	Largura (m)	Perímetro total (Km)	Densidade	Sinuosidade do canal principal
G1	0,15	4,08	8 – 30	1,74	11,62	1,50
G2	0,54	6,9	4 – 27	3,96	7,34	1,14
G3	0,09	1,78	9,5 - 64	1,04	11,59	1,05
G4	0,85	5,17	7 - 70	6,47	7,61	1,30
MN1	0,14	2,12	7 - 20	1,33	9,50	1,28
MN2	0,82	4,92	10 - 80	4,35	5,31	1,16

### 4.3 Deltas Lagunares

#### 4.3.1 Delta G1

A fotografia aérea de 1974 mostra que já havia indícios da formação de um delta na posição atual de G1 com morfologia lobada (figura 7). Em **2003** a margem lagunar está coberta por vegetação e apenas há evidência de deposição de sedimentos arenosos na extremidade do canal ativo em uma área de 1,2 km<sup>2</sup>. Nesse período a relação entre o comprimento e largura da porção arenosa é de 1,71 (gráfico 6, anexo 3). Em **2009**, uma planície deltaica lobada com canais entrelaçados de fluxo desconfinado projeta-se sobre a lagoa, apresentando aumento de área da cobertura arenosa em 583,47% e aumento da relação C/L em 52,63% desde 2003. Em **2012** a planície deltaica apresenta dois grandes canais entrelaçados conectados ao campo de dunas por um canal meandrante, e aumento de área em 122,73%, enquanto a relação C/L diminui em 28,74% desde 2009. Em **2016**, o canal

meandrante sofre avulsão e canaliza a deposição de sedimentos para norte, dividindo-se em dois canais meandrantos que formam lobos arenosos, enquanto a porção ao sul aparece vegetada e parcialmente inundada. A área da planície sofre diminuição em 7,93%, enquanto a relação C/L aumenta 22,28% desde 2012. De 2016 a **2018**, há aumento de 11,03% em área e diminuição em 8,77% na sua relação C/L. A variação observada na **relação C/L** evidencia um crescimento mais significativo da planície deltaica em comprimento do que em largura.

#### 4.3.2 Delta G2

Em **2003** a planície deltaica apresenta morfologia lobada a digitada, com presença de vegetação. É composta por um canal principal que passa de entrelaçado a montante para meandrante a jusante, com fluxo é desconfinado na desembocadura. Nesse período a **área** é de 22,54 km<sup>2</sup> e relação C/L de 2,21 (gráficos 5 e 6, anexo 3). Em **2009**, a planície apresenta morfologia digitada e está parcialmente inundada, expondo a cobertura arenosa do canal principal. Há aumento da área em 47,87%, e da relação C/L em 12,67% desde 2003. Em **2012**, a planície deltaica está coberta por vegetação e cobertura arenosa pouco expressiva na margem sul do canal principal e na desembocadura, onde o fluxo permanece desconfinado. A área aumenta apenas em 1%, enquanto a relação C/L aumenta 6% desde 2009. Em **2016**, a planície tem sua extremidade inundada pelo nível d'água da lagoa, apresentando diminuição de 4,92% na relação C/L, e aumento da área em 6,57%. De 2016 a **2018** há aumento da área da planície em 2,15% e de 11,55% para a relação C/L, indicando maior crescimento em comprimento. Nota-se ainda que de 2003 a 2018 a desembocadura do canal distributário sofre avulsões fazendo com que o lobo depositado inflexione de sul para norte, e de norte para sul.

#### 4.3.3 Delta G3

Em **2003** inicia-se o desenvolvimento da planície deltaica composta por uma pequena cobertura arenosa de 1 km<sup>2</sup> sobre a margem vegetada da lagoa, com relação C/L de 2,29 (gráficos 5 e 6, anexo 3). Em **2009**, a planície deltaica apresenta composição essencialmente arenosa de fluxo desconfinado e morfologia lobada, com aumento de área em 958,25% e diminuição de 48% da relação C/L desde 2003.

Em **2012**, a planície está amalgamada com a margem lagunar, apresentando um canal meandrante e cobertura arenosa com presença de vegetação. Neste período a planície aumentou 37,43% de sua área e 28,57% da sua relação C/L. Em **2016** há ampla vegetação e o canal distributário está aparentemente inativo, causando diminuição de 6% na área e aumento de 53,6% na relação C/L desde 2012. Em **2018** o canal distributário está ativo e bifurcado, mas a planície continua com pouca cobertura arenosa e morfologia lobada, apresentando diminuição de 21,8% da sua área e de 9,36% de sua relação C/L. A variação da **relação C/L** indica que a planície cresceu tanto em comprimento quanto em largura, sendo o maior crescimento em comprimento entre 2016 e 2018.

#### 4.3.4 Delta G4

Em **1974**, havia presença de dois pequenos lobos individualizados e um leque formado pela queda de grãos de uma duna diretamente sobre a lagoa (“*fan delta*”) na atual posição de G4. Apenas na década de **1990** os lobos começam a se amalgamar assumindo morfologia mista. Em **2003**, há três lobos deltaicos conectados e compostos por canais entrelaçados largos (3 a 22 m) com cobertura arenosa e abundante presença de vegetação nas planícies intercanais, abrangendo uma área de 26,21 km<sup>2</sup>, e relação C/L de 0,72. Em **2009**, as porções vegetadas estão inundadas, evidenciando a cobertura arenosa da planície deltaica com morfologia lobada. O lobo a sul é avulsionado enquanto os demais progradam de forma desconfinada sob influência de novos canais formados no interdunas. Entre 2003 e 2009 houve aumento de 39,4% na área da planície, enquanto a relação C/L apresentou diminuição de 13,9%. Em **2012**, os canais distributários apresentam menores larguras variando de 2,5 a 13,6 m e presença de vegetação nas planícies intercanais. Entre 2009 e 2012 área da planície aumentou em 10,5% e a relação C/L em 141,9%. Em **2016**, as drenagens voltam a apresentar largura em torno de 18 m. A drenagem a sul é reconectada à planície e volta depositar sedimentos no lobo deltaico, apresentando uma área 25% maior do que em 2012, enquanto a relação C/L diminuiu em 49,3%. Em **2018**, há aumento da cobertura arenosa sobre a área vegetada, com o surgimento de um novo lobo depositado a norte. De 2016 a 2018 a área da planície aumentou 18,5% e a relação C/L 3,95%. As variações da relação C/L refletem a morfologia mista relacionada ao crescimento por amalgamação lateral

de planícies deltaicas, apresentando em geral, valores abaixo de 1 (gráfico 6, anexo 3).

#### 4.3.5 Delta MN1

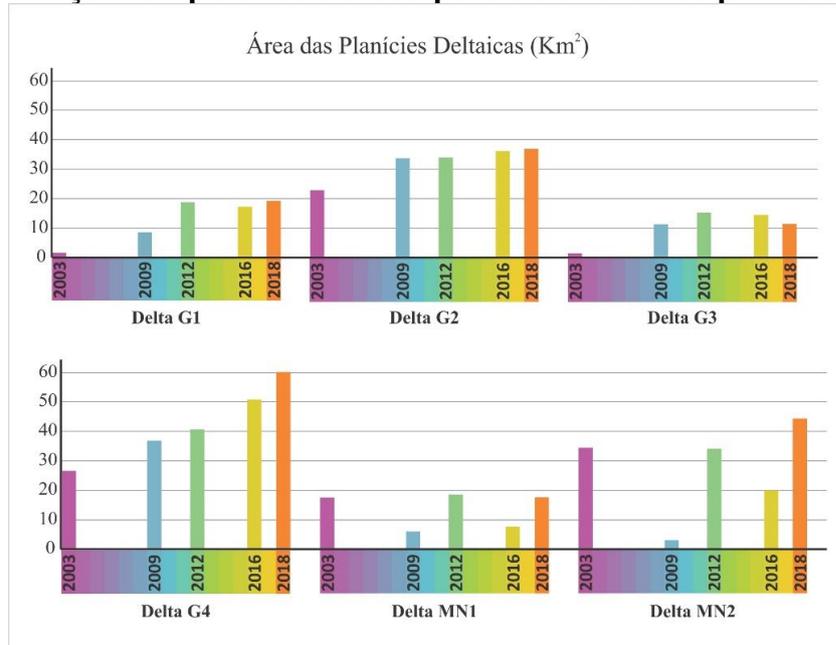
Em **1974**, há vestígios de um canal meandrante ativo, porém não há lobo deltaico formado, porém na década de 1980 a planície deltaica aparece desenvolvida. Em **2003**, a planície deltaica apresenta morfologia arqueada bem desenvolvida (tipo Nilo) de cobertura arenosa com área de 17,17 km<sup>2</sup>. Possui canais entrelaçados drenando a planície de forma desconfinada, e feições de retrabalhamento por onda na frente deltaica. Em **2009**, a planície deltaica aparece quase completamente submersa, expondo valores menores em 67% de área e 51% de relação C/L do que os valores observados em 2003. Em **2012**, a planície está novamente exposta, apresentando morfologia arqueada a lobada, com canais entrelaçados bem definidos e cobertura vegetal entre canais. Há aumento de em 222,8% de área e em 355,5% de relação C/L, entre 2009 e 2012. Na frente deltaica há feições de retrabalhamento por ondas. Em **2016**, o delta volta a ser inundado, expondo área 60% menor do que a observada em 2012, bem como há uma diminuição em 15,6% em sua relação C/L. Em **2018**, a planície volta a ser exposta, agora com morfologia lobada e maior desenvolvimento de vegetação. Durante os períodos de maior exposição das planícies deltaicas, os anos de 2003, 2012 e 2018, observa-se cordões lagunares se formando no limite sul entre as planícies deltaicas.

#### 4.3.6 Delta MN2

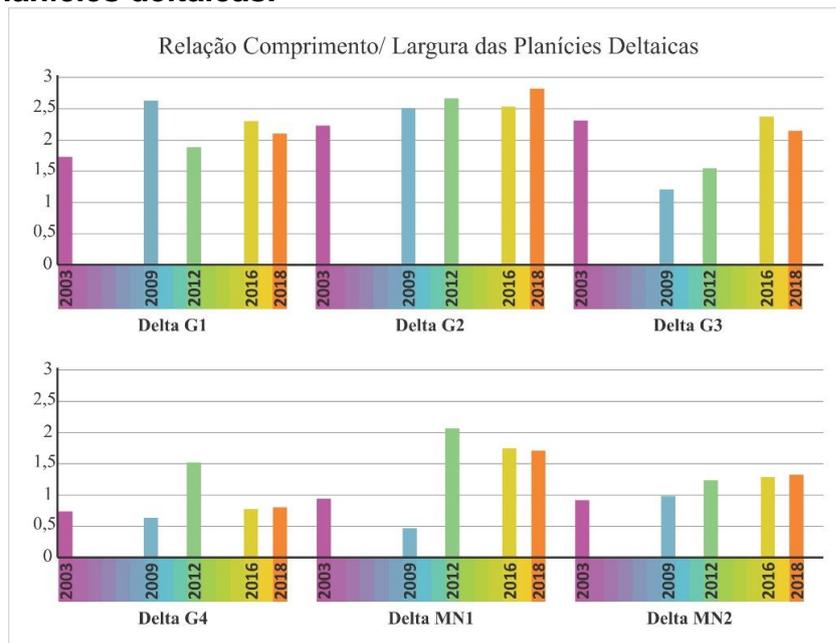
Em **1974**, na posição de MN2 há um leque de sedimentos do tipo “*fan delta*” com feições de retrabalhamento por onda. Na década de **1980** já há presença de planície deltaica. Em **2003**, a planície deltaica de morfologia arqueada (tipo Nilo) e cobertura arenosa e drenagem desconfinada de canais entrelaçados apresenta **área** de 34,11 km<sup>2</sup>. Lateralmente está conectada a outra planície deltaica a sul, e cordões lagunares a norte. A frente deltaica é retrabalhada por ondas. Em **2009**, a planície é inundada, expondo uma cobertura arenosa de canais entrelaçados 92% menor do que em 2003, enquanto a relação C/L aumenta em 7,8%. Em **2012**, a planície retorna com morfologia arqueada com aumento em 1.138,5% de área, e relação C/L

25,8% maior, comparadas ao ano de 2009. Em **2016**, novamente inundada, a planície apresenta diminui sua área de exposição em 42%, enquanto aumenta sua relação C/L em 4,1%, desde 2012. Em **2018**, a planície deltaica é novamente exposta, com aumento de 125% de sua área, e de 3,2% de sua relação C/L. As relações C/L indicam o progressivo aumento no comprimento da planície, mas preservando sua morfologia arqueada (gráficos 5 e 6, figura 9).

**Gráfico 5 - Variação temporal das áreas para as diferentes planícies deltaicas.**



**Gráfico 6 - Variação temporal da relação do comprimento / largura para as diferentes planícies deltaicas.**



### **4.3.6 Morfologias Deltaicas**

#### **4.3.6.1 Delta Arqueado**

O delta MN2, apresenta morfologia arqueada. É arenoso com ausência de vegetação, essencialmente composto por canais aluviais entrelaçados largos e rasos (figura 7, tabela 3). A frente deltaica é bastante contínua e com feições de retrabalhamento por ondas indicada pelo aparecimento periódico de um pequeno pontal na extremidade sul de sua frente deltaica. A planície apresenta declividade constante através de todo perfil (figura 8). No entanto, este valor de inclinação é relativamente baixo comparada a declividade total dos demais deltas, bem como a declividade na porção a montante do canal principal. Enquanto para a porção a jusante do canal e para o prodelta as inclinações são relativamente altas (figura 9).

#### **4.3.6.2 Deltas Lobados**

Os deltas com morfologia lobada em 2018 compreendem os sistemas G1, G3, G4 e MN1 (figura 7). Apresentam canais aluviais entrelaçados rasos e largos e canais meandantes de maior coesão formados na presença de ampla vegetação nas planícies entre canais. As frentes deltaicas se apresentam de forma descontínua e os prodeltas são especialmente vegetados nos deltas G4 e o G3. As declividades totais obtidas para as planícies deltaicas lobadas (figura 8) indicam valores superiores comparada com as demais morfologias, assim como a porção a montante, próxima ao campo de dunas. Os prodeltas variam de acordo com a batimetria das lagoas (figura 9).

#### **4.3.6.3 Delta Digitado**

O delta G2 tem morfologia digitada (*birdfoot*), indicando o domínio do canal aluvial. Apresenta drenagem principal bastante contínua e canalizada do tipo meandrante, tornando-se mais estreita em direção a lagoa e abrindo-se em um leque frontal (figura 7). Em torno do canal aluvial principal e de seus pequenos distributários, há ampla presença de vegetação. A frente deltaica é descontínua e o

prodelta é vegetado. A declividade da planície e do pródelta são suaves e praticamente constantes ao longo do perfil percorrido (figuras 8 e 9).

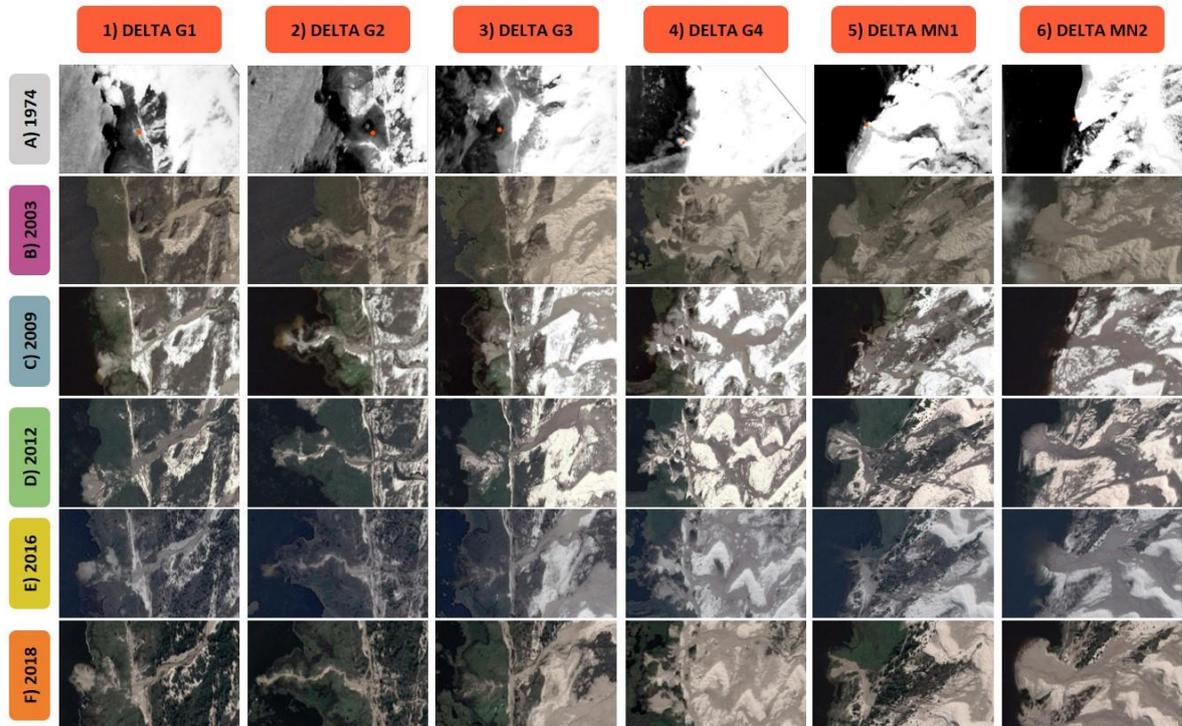


Figura 7 – Fotografia aérea de 1974 com a indicação (ponto laranja) das posições atuais dos deltas lagunares (A), demais imagens de satélite mostrando a variação temporal (B, C, D, E, e F) nas diferentes morfologias deltaicas (1, 2, 3, 4, 5 e 6).

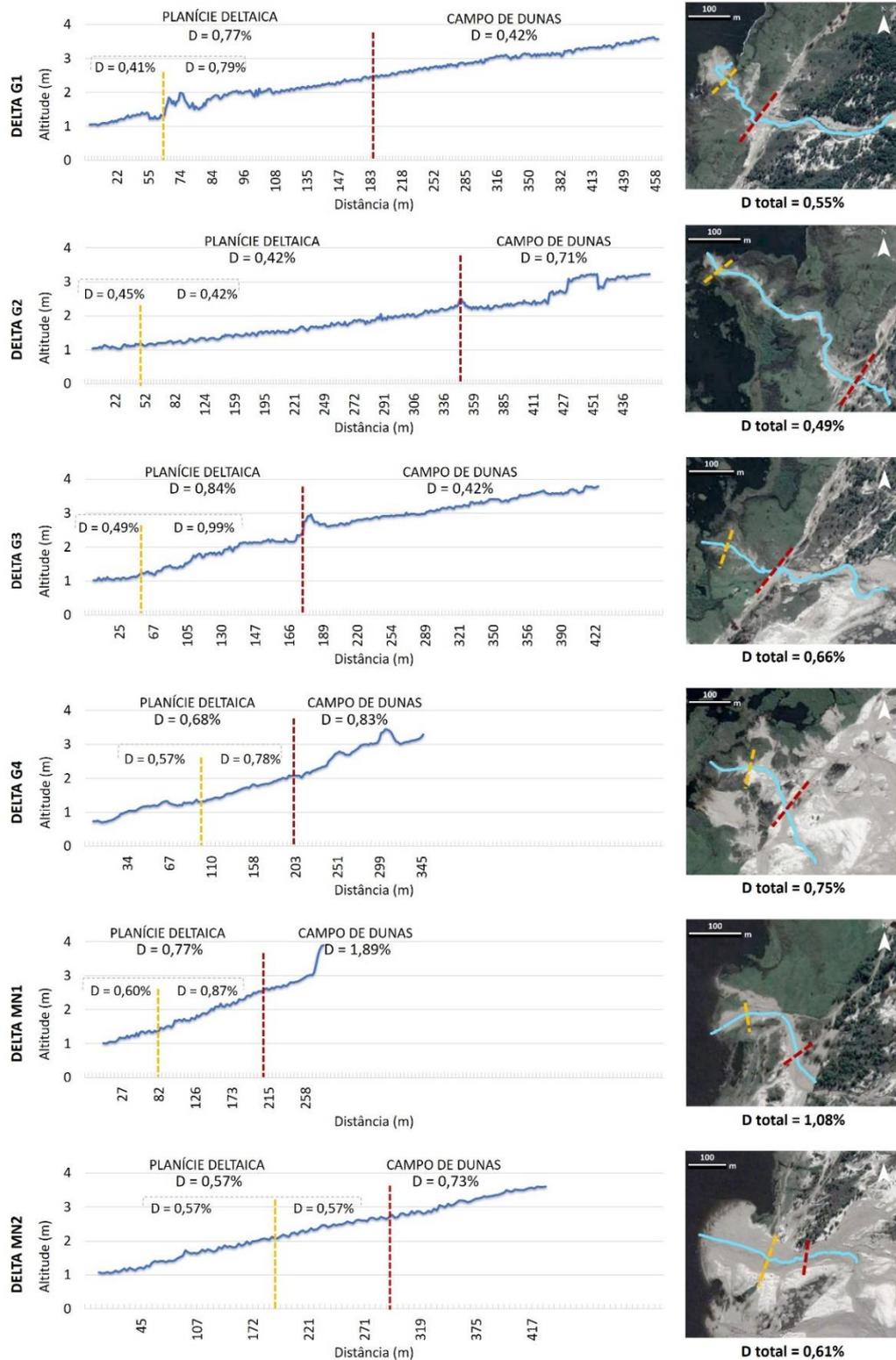


Figura 8 – Declividades dos principais canais de drenagem para cada sistema deltaico obtidas por caminhamento de RTK em 2019. Os perfis abrangem parte do campo de dunas (da extremidade direita até o traçado em vermelho) e as planícies deltaicas (do traçado vermelho até a extremidade esquerda), as quais são subdivididas afim de mostrar a variação das declividades entre a porção a montante (do traçado vermelho ao traçado amarelo) e a jusante (do traçado amarelo até a extremidade esquerda).

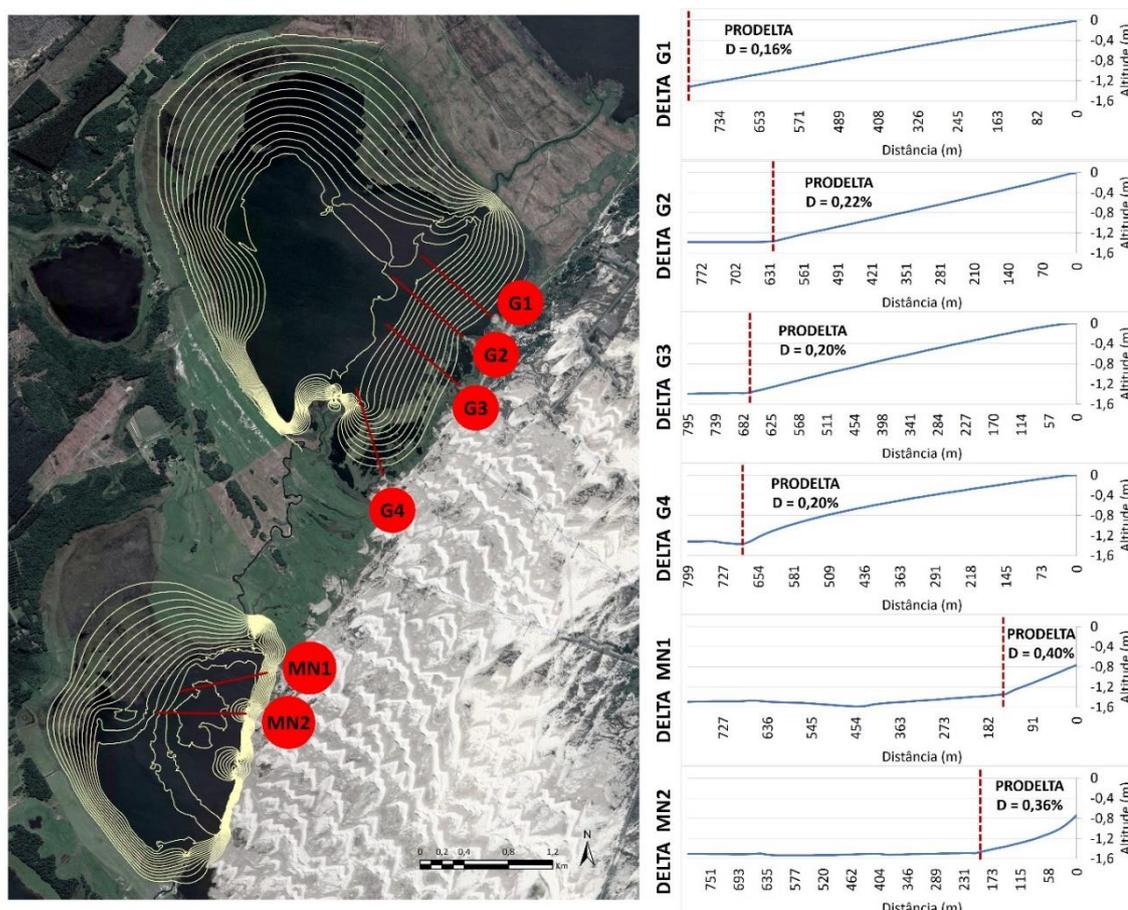


Figura 9 – Perfis de declividade obtidos a partir do modelo batimétrico. Os diferentes valores de declividades para as regiões de prodelta correspondem à porção localizada entre a extremidade direita e o traçado vermelho. Na Lagoa do Gentil, os prodeltas de G1, G2, G3 e G4 apresentam relevo suave, enquanto na Lagoa Manuel Nunes os prodeltas de MN1 e MN2 apresentam altas declividades.

## 5. Discussões

### 5.1 Classificação

Diversos sistemas de classificação foram propostos para compreender as variabilidades morfológicas de sistemas deltaicos. Alguns modelos clássicos estão baseados nos processos atuantes sobre os sistemas, como Fischer *et al.* (1969), Galloway (1975) e Orton e Reading (1993). Orton e Reading (1993) relacionam o tamanho dos sedimentos aos processos atuantes, enquanto Coleman e Wright (1975) relacionam a composição, tamanho e transporte dos sedimentos e morfologia fluvial aos fatores climáticos; Bates (1953) classifica canais fluviais a partir da densidade de fluxo. Esses modelos clássicos baseiam-se em sistemas deltaicos com

bacias de drenagem fluviais continentais e bacias receptoras marinhas, onde a resposta aos fatores alocíclicos (tectônico e climático) condicionam características topográficas e sedimentológicas diferentes daquelas encontradas na bacia de drenagem dos deltas lagunares associados aos sistemas eólicos costeiros. Portanto, as variações locais do ambiente de estudo, responsáveis pelas relações entre formas e processos dos deltas lagunares, não estão representadas por estes modelos de classificação.

No entanto, algumas aproximações com as classificações apresentadas são possíveis: (i) com relação aos processos, segundo a classificação de Fischer *et al.* (1969) o delta MN2 é considerado como um delta destrutivo, ou dominado por ondas segundo Galloway (1975), enquanto os demais deltas correspondem a deltas construtivos ou dominados por processos fluviais (FISHER *et al.*, 1969; GALLOWAY, 1975); (ii) são encontradas características híbridas relacionadas às influências climáticas na bacia de drenagem descritas por Coleman e Wright (1975), com porções de ampla cobertura vegetal e outras porções de vegetação é escassa onde os canais são entrelaçados. Contudo, mesmo apresentando variações na tipologia dos canais, todos os canais dos sistemas são efêmeros de fluxo subcrítico (ROSA *et al.*, 2016); (iii) segundo a classificação de Bates (1953) os fluxos são do tipo homopical; (iv) ao comparar os gradientes entre as bacias receptoras, a Lagoa Manuel Nunes apresenta valores elevados, sendo que o delta MN2 em 1974 (figuras 3A e 7) apresenta feições de avalanche e retrabalhamento por ondas, assemelhando-se aos deltas do tipo Gilbert. Segundo Bhattacharya (2006), deltas tipo Gilbert correspondem a densidades de fluxo homopical normalmente descritos para ambientes lacustres de alto gradiente, com sedimentos predominantemente cascalhosos e camadas frontais de avalanche podendo apresentar retrabalhamento por ondas. No entanto, tanto os deltas depositados nas Lagoas Manuel Nunes e Gentil são predominantemente compostos por areia fina (ROSA *et al.*, 2016).

## 5.3 Fatores Controladores

### 5.3.1 Aporte sedimentar

Ocorrem variações no sentido de NE-SW na disponibilidade de sedimentos na bacia de drenagem (figura 10). Está relacionado a este fator a capacidade dos sedimentos arenosos serem transportados pelos ventos da linha de costa para o campo de dunas através dos corredores de alimentação. Quando esta conexão está presente, há maior potencial de fluxo de sedimentos e maior largura do campo de dunas, como observa-se na porção sudoeste, lateralmente associada a Lagoa Manuel Nunes. Porém, quando há estabelecimento de urbanização junto à linha de costa, os corredores de alimentação são interrompidos e suprimidos, promovendo um déficit no aporte sedimentar na porção nordeste, junto à Lagoa do Gentil, onde há estabilização do sistema eólico com ampla presença de vegetação (figura 1).

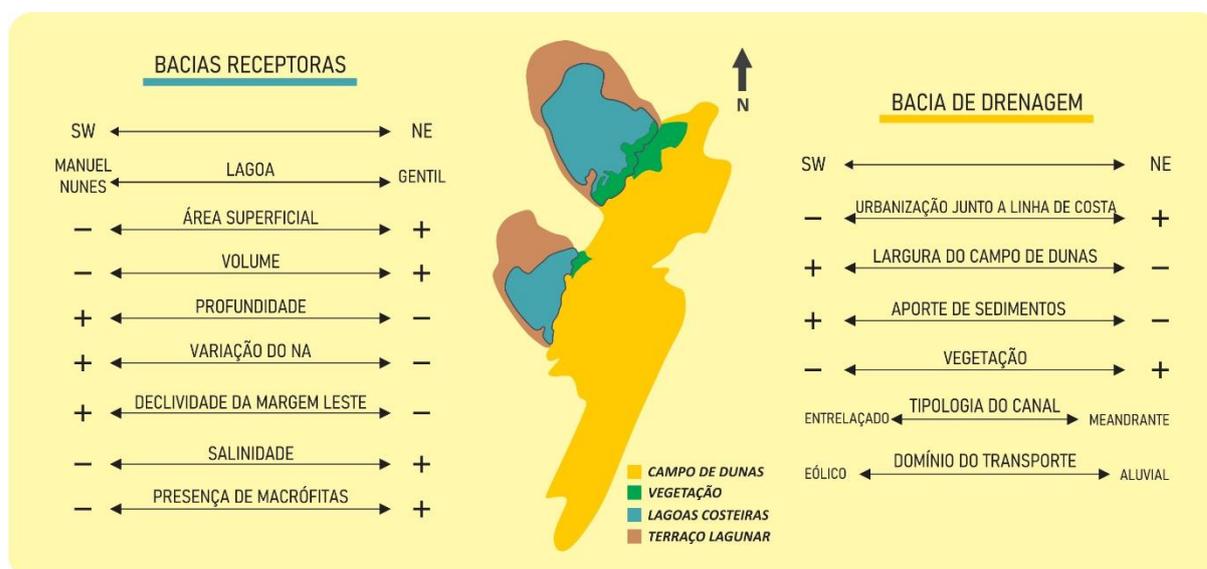


Figura 10: Variabilidade dos fatores controladores das morfologias deltaicas nas bacias receptoras e de drenagem.

### 5.3.2 Atividades antrópicas

As atividades humanas contribuem para a modificação da morfologia do campo de dunas através da remoção de dunas, expansão urbana e construção de estradas. Essas alterações ambientais promovem o bloqueio da entrada de sedimentos e influenciam no aumento de umidade e proliferação da vegetação sobre

o campo de dunas, auxiliando no processo de estabilização e extinção do campo de dunas (MARTINHO *et al.*, 2010). A presença do parque eólico altera a migração de algumas dunas e a rede de canais interdunas, refletindo muito pouco na alteração das planícies deltaicas durante o período observado. Neste sentido, a ocupação humana de maior impacto é dada pela urbanização e estabelecimento de moradias junto à linha de costa. Segundo Ellis (2011), uma variedade de novos padrões e processos ecológicos são causados pela transformação da maior parte da biosfera terrestre em biomas antropogênicos através das populações humanas e sua relação de uso da terra.

### 5.3.3 Vegetação

A presença de vegetação é expressiva nas sub-bacias dos deltas G1, G2 e G3, próximas a porção estabilizada do campo de dunas, tendendo a se proliferar em sentido ao SW (figura 10). Grande parte dessa vegetação é da espécie *Pinus sp.*, as quais são invasoras de rápida proliferação, introduzidas antropicamente. A presença de vegetação no campo de dunas influencia no aumento de umidade e da coesão, tornando canais de drenagem mais estreitos, profundos e persistentes (ROSA *et al.*, 2016), como observa-se nas sub-bacias de drenagem dos deltas G1, G2 e MN1. Por outro lado, a ausência de vegetação permite que os canais interdunas sejam largos, rasos e difusos (ROSA *et al.*, 2016), como observados nas sub-bacias de drenagem de G3, G4 e MN2 (figura 7). Verifica-se também a influência da vegetação na morfologia das planícies deltaicas, como em MN1 que apresentava cobertura arenosa e morfologia arqueada em 2003, tornando-se lobado a medida que a vegetação avançou a partir dos cordões lagunares sobre a sua planície em 2018.

Na Lagoa do Gentil, a presença das macrófitas aquáticas é distribuída em todo seu contorno, auxiliando na fixação e coesão das frentes deltaicas e prodeltas, bem como as vegetações rasteiras estabelecidas sobre as planícies deltaicas. Na Lagoa Manuel Nunes a maior presença de macrófitas está associada à sua porção mais rasa a NW, enquanto no limite com o campo de dunas, na margem a SE, as macrófitas estão ausentes propiciando maior susceptibilidade a erosão deltaica.

### **5.3.4 Salinidade**

Concentrações de salinidade são encontradas nas águas da Lagoa do Gentil (ROCHA, 2019), não sendo detectadas na Lagoa Manuel Nunes (CASTRO e ROCHA, 2016). Segundo Schäfer (2013), a salinidade torna as condições mais favoráveis para o amplo desenvolvimento de macrófitas. Contribui também para que haja maior estabilização dos sedimentos nas planícies, frentes deltaicas e prodeltas, pois segundo Winterwerp e Kesteren (2004), a salinidade influencia no aumento da coesão dos sedimentos pelo desenvolvimento de biofilmes produzidos por esteiras bacterianas associadas a microfítobentos, atuando na retenção da umidade no substrato e no potencial de preservação das estruturas deposicionais. A salinidade pode intensificar a deposição de sedimentos finos floculados, contribuindo para o processo de acreção vertical do corpo lagunar, influenciando o processo de envelhecimento lagunar (COOPER, 1997). Além disso, sua presença pode aumentar a densidade das águas, influenciando os tipos de fluxos como descrito no modelo de classificação de Bates (1953). No entanto, por se tratar de uma circulação estuarina em ambiente lagunar bastante protegido, os níveis de salinidade na Lagoa do Gentil não chegam a proporcionar um contraste de densidade com os fluxos aluviais.

### **5.3.5 Processos aluviais**

Os deltas G1 e G3 apresentaram diminuição do perímetro das drenagens entre o período de 2003 a 2018, ao mesmo tempo em que houve aumento da densidade de canais e as áreas das planícies cresceram em mais de 1000% (gráfico 3, figuras 4 e 7). A diminuição da área das sub-bacias está relacionada com interrupções dos canais causadas pela migração das dunas e pelas vias asfaltadas do parque eólico.

Durante a coleta de dados em fevereiro de 2019 foi possível observar a efemeridade dos canais aluviais, sendo que apenas G1, G2 e G3 foram capazes de produzir escoamento superficial desde o campo de dunas até a planície. Isto se deve a maior presença de vegetação e concentração de umidade na região, aumentando a coesão e o potencial do transporte aluvial, permitindo que haja aumento da sinuosidade dos canais como observado nos deltas G1 e G2.

### 5.3.6 Processos eólicos

A tendência de crescimento das planícies deltaicas de G4 e MN2 indicam que a migração das dunas pode favorecer a quantidade de sedimento disponível nas proximidades das planícies, contribuindo para a progradação deltaica. Nesse contexto o transporte eólico é tão relevante para o crescimento dos deltas quanto a existência de longos perímetros de canais na bacia de drenagem. Isso ocorre em razão da alta permeabilidade do solo arenoso do campo de dunas, fazendo com que o escoamento superficial não seja efetivo ao longo de toda extensão dos canais. Em diferentes configurações e proporções a influência do transporte eólico também é observada na morfodinâmica de alguns deltas do Mar Mediterrâneo, como o Delta del Elbro e o Delta Rhône, e no Mar Adriático o Delta Po (JÍMENEZ *et al.*, 1995). Os efeitos morfológicos do transporte eólico atuam em múltiplas escalas de tempo em um sistema costeiro, desde a evolução do campo de dunas como da barreira (MARTINHO *et al.*, 2010; JÍMENEZ *et al.*, 1995), o que também influenciará na evolução dos deltas associados.

No delta MN2 observa-se feições de retrabalhamento por ondas e a formação de um pontal arenoso, indicando a ação de corrente de sentido predominante NE-SW, concordando com o sentido dos ventos predominantes que geram ondulações na Lagoa Manuel Nunes (figura 7).

### 5.3.7 Condicionamento topográfico

As declividades das planícies deltaicas e dos prodeltas são coerentes com a batimetria, onde a profundidade e as inclinações são mais acentuadas na Lagoa Manuel Nunes e as mais suaves na Lagoa do Gentil (figuras 8 e 9). Estes condicionamentos topográficos refletem na distribuição das macrófitas aquáticas, as quais se estabelecem preferencialmente nas margens mais rasas enquanto em profundidades maiores estão ausentes, como nota-se o contraste entre as margens NW e SE da Lagoa Manuel Nunes, respectivamente.

As maiores declividades para a porção do campo de dunas são representadas pelos deltas G4 e MN1 (figura 8), os quais estão posicionados entre o campo de dunas e os cordões lagunares (figuras 2). A menor altitude da frente deltaica é encontrada em G4, atingindo 0,73 m enquanto os demais estão próximos

a 1 m (figura 8). Estes dados indicam a influência do condicionamento topográfico do fundo lagunar pretérito associado à evolução geológica do Sistema Laguna-Barreira IV, onde a ação dos ventos deu origem aos cordões lagunares e possibilitou a sua sobreposição pela migração do campo de dunas em sentido SW. O controle topográfico condiciona a deposição dos lobos amalgamados em G4 pelo encontro da desembocadura de vários canais de drenagem. Segundo Cowell e Thom (1997), a resposta das condições topográficas oferecem a essência do comportamento morfodinâmico através dos efeitos do transporte de sedimentos. Dessa forma, as variações topográficas existentes ao longo do Sistema Laguna-Barreira IV condicionam a complexidade morfológica como uma resposta as variabilidades locais.

### **5.3.8 Variação do nível d'água**

As variações de área superficial de ambas as lagoas indicam a ocorrência periódica da variação do nível d'água (gráfico 1), as quais estão relacionadas com as precipitações e a sazonalidade do clima regional. A Lagoa Manuel Nunes apresenta resposta mais expressiva na variação do nível d'água em função do fluxo hidráulico de SW-NE que periodicamente transporta grandes volumes de água da Lagoa Fortaleza para seu interior (CASTRO e ROCHA, 2016) e de sua batimetria. Enquanto o nível d'água apresenta elevação, as planícies deltaicas são afogadas, diminuindo a área superficial da planície deltaica emersa. A combinação destas características na Lagoa Manuel Nunes favorece o retrabalhamento por ondas e a susceptibilidade à erosão dos deltas arenosos.

Mesmo que a variação do nível d'água da Lagoa Manuel Nunes afogue as planícies deltaicas periodicamente, o delta MN2 apresenta morfologia constantemente arqueada com aumento gradativo da área quando exposto em períodos de nível d'água mais baixos. Logo, períodos mais úmidos, apesar de submeter os deltas ao maior potencial de erosão, aumentam o espaço de acomodação na bacia receptora. Ao mesmo tempo, aumenta o potencial de transporte aluvial pelos canais, auxiliando a progradação deltaica.

#### 5.4 Sistemas Morfodinâmicos

A análise dos fatores controladores dos deltas lagunares holocênicos possibilitou tecer uma rede de interações que estão sumarizadas na figura 11. Esses fatores correspondem aos **processos autocíclicos**, ou seja, aqueles relacionados à dinâmica própria do sistema deposicional.

As propriedades essenciais dos processos morfodinâmicos costeiros que alteram a paisagem são atribuíveis ao ciclo de ajuste mútuo entre a topografia e a dinâmica dos fluidos que conduzem o transporte de sedimentos (COWELL e THOM, 1997). Logo, os fatores (fluxos) criam o registro geológico (topografia), o qual responde influenciando os fatores e criando novos registros. Nessa interação cíclica de causa-efeito-causa, ocorrem mudanças ambientais em múltiplas escalas de espaço e tempo, produzindo um sistema que se retroalimenta. Segundo Cowell e Thom (1997) os sistemas de retroalimentação são responsáveis principalmente pelos mecanismos de auto-regulação e auto-organização dos processos morfodinâmicos. Além disso, podem tornar a evolução costeira parcialmente autodeterminada uma vez que o estado é afetado pela topografia antecedente e esta herança é responsável pela “sensibilidade às condições iniciais”, ampliando a complexidade da evolução costeira. Aplicando a concepção de Cowell e Thom, (1997) para os deltas estudados, o delta arqueado MN2, pode ser atribuído a um sistema de retroalimentação negativo, o qual é responsável pelo mecanismo de auto-regulação onde o equilíbrio é restabelecido e o padrão morfológico é mantido mesmo não apresentando um estado estacionário. Enquanto o delta lobado MN1 apresenta um sistema de retroalimentação positivo, o qual implica em um mecanismo de auto-organização. Este sistema de evolução morfológica envolve a direção de um novo regime de equilíbrio após as mudanças das condições de contorno do processo (Cowell e Thom, 1997), neste caso, relacionado ao estabelecimento da vegetação na planície deltaica.

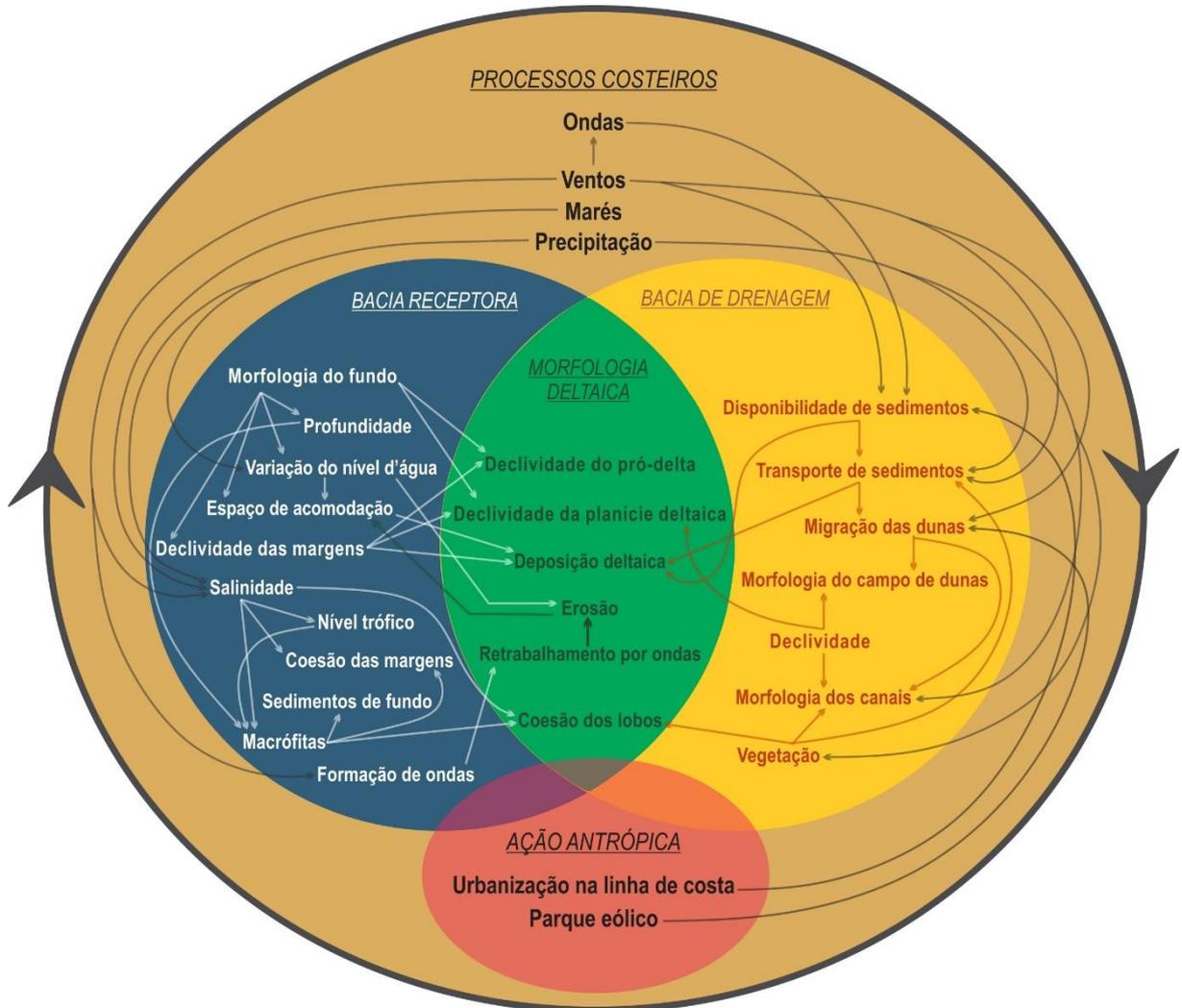


Figura 11: Rede de fatores que controlam a geomorfologia dos deltas lagunares na área de estudo, indicando as interações entre os processos autocíclicos e os elementos morfológicos.

A tendência de controle exercido por fatores autocíclicos a partir do Holoceno é descrita por Guimarães (2010) para o delta marinho do Rio São Francisco, onde a retroalimentação de processos impulsiona a diminuição da taxa de deriva litorânea controlada pela mudança de orientação da linha de costa e da batimetria. Também no delta São Francisco algumas condições de contorno são modificadas pela construção de barragens na bacia de drenagem a partir da década de 1940, são apontadas por Guimarães (2010), como um dos fatores que causam a diminuição da disponibilidade de sedimentos e evidenciam a participação das atividades antrópicas na morfodinâmica costeira. No litoral norte da PCRS a expansão urbana passou a avançar sobre a linha de costa após 1974, com maior expressão entre 1991 a 2000 onde a taxa anual foi de aproximadamente 2,83% (MOURA *et al.*, 2015). No campo de dunas da área de estudo o parque eólico foi implantado no ano de 2011. Desde

então as alterações ambientais promovidas pelas atividades humanas na região tornam-se parte dos fatores que controlam o registro geológico juntamente com os processos costeiros ao propiciar a diminuição do aporte sedimentar e o aumento de umidade e vegetação. Os depósitos antropogenicamente modificados, que formam a parte superior da geosfera, são denominados de arqueosfera por Capelotti (2010). Segundo Edgeworth *et al.* (2015), em meio a arqueosfera, os processos de formação do solo apresentam fluxos e refluxos entre os fatores climáticos, biológicos, geomorfológicos e antropológicos e que se transformam longo do tempo conferindo uma poligênese ao solo.

As variações de alcance dos efeitos da ação antrópica condicionam diferentes respostas às alterações morfodinâmicas, contribuindo para a ocorrência de variações laterais no registro dos deltas lagunares. Assim, esta evolução geológica é marcada por diacronismos de influência antropogênica sobre o Sistema Laguna-Barreira holocênico. Edgeworth *et al.* (2015) contesta a existência de uma data precisa e globalmente síncrona para estabelecer os limites de depósitos antropocênicos. Não há uma divisão, mas sim uma mistura entre forças antropogênicas, biológicas e geológicas na configuração morfológica e estratigráfica, onde os processos indicam ser diacrônicos desde o início do desenvolvimento. Segundo Edgeworth *et al.* (2015), “a diacronia reflete o caráter mutável e acelerador do impacto humano na superfície da Terra”. Essa visão, no entanto, deve ser ponderada pela escala de observação: o diacronismo será relativamente maior, quanto menor for o período de tempo do registro analisado.

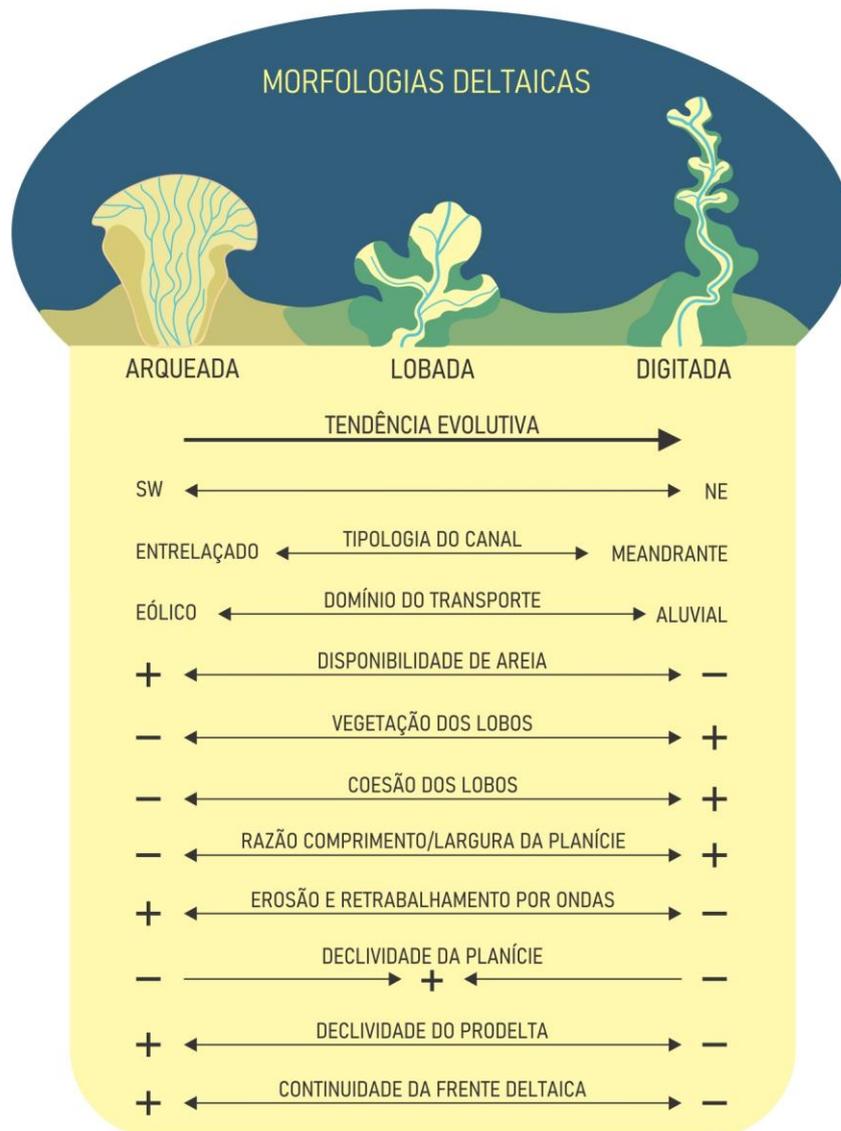
### **5.5 Tendências Evolutivas**

Naturalmente, a tendência nos setores em retrogradação é que a migração do campo de dunas persista sobre as lagoas costeiras. A entrada de areia nas lagoas promove diminuição e raseamento podendo formar uma zona pantanosa e culminar na extinção dos corpos lagunares, como observado por Lima *et al.* (2013) na porção sul da Lagoa da Mangueira, litoral sul da PCRS. Além dos fatores ligados aos fluxos costeiros, o processo biológico de aumento da biomassa de macrófitas aquáticas atua no envelhecimento natural das lagoas costeiras (SCHÄFER, 2013). A Lagoa Manuel Nunes, apresenta ampla área vegetada na margem oeste e níveis tróficos mais elevados (CASTRO e ROCHA, 2016), além de sofrer maior entrada de

sedimentos pela migração do campo de dunas. No entanto, é a Lagoa do Gentil que apresenta menor profundidade e nível de envelhecimento mais avançado (SCHÄFER, 2013).

O campo de dunas tende a se estabilizar pelo aumento de umidade e vegetação, bem como pelo crescimento da urbanização junto à linha de costa e pela diminuição do potencial de deriva dos ventos (MARTINHO *et al.*, 2010). Dessa forma, a disponibilidade de sedimentos tenderia à diminuição, enquanto o aumento das áreas vegetadas faria com que os canais entrelaçados, largos e difusos do interdunas passassem a canais mais bem estabilizados do tipo meandrante, podendo culminar na extinção das drenagens e na estabilização das margens lagunares.

As tendências de diminuição de aporte sedimentar juntamente com o aumento de vegetação no campo de dunas, planícies deltaicas e lagoas, indicam que os sistemas deltaicos podem evoluir de morfologias arqueadas para lobadas, e de lobadas para digitadas. A figura 12 apresenta o modelo evolutivo em correlação linear com os fatores controladores das morfologias deltaicas. As variações morfológicas ao longo do modelo evolutivo proposto podem ser compreendidas, de acordo com Cowell e Thom (1997), como a passagem de um sistema de retroalimentação negativa para um sistema de retroalimentação positiva a partir das alterações das condições ambientais (figuras 10 e 12).



*Figura 12: Variabilidade dos fatores controladores associados às morfologias deltaicas e suas tendências evolutivas.*

## 6. Considerações Finais

Ao tentar classificar os deltas lagunares estudados notou-se que as particularidades morfológicas apresentadas não são representadas de maneira fidedigna pelos modelos clássicos, sendo mais adequado a utilizar a sumarização das principais características morfológicas locais. Dentre os fatores determinantes para o desenvolvimento desses deltas, destacam-se: disponibilidade de sedimentos, espaço de acomodação, processos eólicos, presença de vegetação e ação antrópica.

Além das forçantes inerentes ao sistema, as características de uso e ocupação do solo introduzem modificações nas condições de contorno dos deltas lagunares holocênicos. Portanto, os fatores abióticos conduzem a evolução geomorfológica dos ambientes deposicionais costeiros, condicionando o desenvolvimento biótico que, por sua vez, provoca a alteração da diversidade geomorfológica. Assim, os processos geológicos, ecológicos e antropológicos no ambiente costeiro estão intimamente interligados na rede morfodinâmica como sistemas que se retroalimentam.

### **Agradecimentos**

As autoras agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), ao Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica (CECO), ao Centro de Estudos Costeiros, Limnológicos e Marinhos – Ceclimar, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de mestrado. Agradecemos a Simone Trindade e José Carlos Nunes pela colaboração com os dados batimétricos. Agradecemos também ao professor Felipe Caron e aos colegas Nícolas Bose, Volney Bitencourt, Bruno Fontoura e Caleb Ribeiro pelo auxílio na aquisição de dados durante trabalhos de campo.

### **Referências Bibliográficas**

- AHLERT, S.; SCHÄFER, A.; SCHUH, S. M.; MARCHETT, C. A. (2013). Morfologia. In: SCHÄFER, A.; LANZER, R.; SCUR, L. (org.) Atlas socioambiental: municípios de Cidreira, Balneário Pinhal e Palmares do Sul. EDUCS, Caxias do Sul: p. 57-62.
- BATES, C. C. Rational theory of delta formation. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, v. 37, n. 9, p. 2119-62, 1953.
- BHATTACHARYA, J. P. (2006). Deltas. In POSAMENTIER, H. W.; WALKER, R. G. (org.) **Facies models revisited**. Society for Sedimentary Geology, Tulsa, Oklahoma, USA: p. 237-285.

- BUCHMANN F. S. C.; TOMAZELLI, L. J. Relict nearshore shoals of Rio Grande do Sul, southern Brazil: origin and effects on nearby modern beaches. **Journal of Coastal Research**, n. 35, p. 318-322, 2003.
- CAPELOTTI, P. J. **The human archaeology of space: Lunar, planetary and interstellar relics of exploration**. McFarland and Company, 2010. 189p.
- CASTRO, D.; ROCHA, C. M. **Qualidade das águas na bacia hidrográfica do rio Tramandaí**. Primeira ed. Porto Alegre: Via Sapiens, 2016. 172 p.
- COLEMAN, J. M.; WRIGHT, L. D. (1975). Modern River Deltas: Variability of Processes and Sand Bodies. In BROUSSARD, M. L. **Deltas: Models for Exploration**. Houston Geological Society, Texas, USA: p. 99-149.
- COOPER, J. A. G. (1997). Lagoons and microtidal coasts. In CARTER, R.W.G.; WOODROFFE, C. D. **Coastal Evolution - Late Quaternary Shoreline Morphodynamics**. Cambridge University Press, Cambridge, UK: p. 219-266.
- COWELL, P. J.; THOM, B. G. (1997). Morphodynamics of coastal evolution. In CARTER, R.W.G.; WOODROFFE, C. D. Coastal Evolution - Late Quaternary Shoreline Morphodynamics. Cambridge University Press, Cambridge, UK: p. 33-86.
- DALRYMPLE, R. W. Tide-dominated deltas: do they exist or are they all estuaries. **American Association of Petroleum Geologists Annual Meeting, Official Program**, p. A29-A30, 1999.
- DILLENBURG, S. R.; ROY, P. S.; COWELL, P. J.; TOMAZELLI, L. J. Influence of antecedent topography on coastal evolution as tested by shoreface translation-barrier model (STM). **Journal of coastal research**, n. 16 (1) p. 71-81, 2000.
- DILLENBURG, S. R.; TOMAZELLI, L. J.; HESP, P. A.; BARBOZA, E. G.; CLEROT, L. C. P.; SILVA, D. B. Stratigraphy and evolution of a prograded transgressive

dunefield barrier in southern Brazil. **Journal of Coastal research**, SI, n. 39, p. 132-135, 2006.

DILLENBURG, S.R.; BARBOZA, E. G.; TOMAZELLI, L. J.; HESP, P.A.; CLEROT, L. C. P.; AYUP-ZOUAIN, R. N. (2009). The Holocene coastal barriers of Rio Grande do Sul. In DILLENBURG, S.R.; HESP, P.A. **Geology and geomorphology of Holocene coastal barriers of Brazil**. Springer, Berlin: p. 53-88.

EDGEWORTH, M.; RICHTER, D. B.; WATERS, C.; HAFF, P.; NEAL, C.; PRICE, S. J. Diachronous beginnings of the Anthropocene The lower bounding surface of anthropogenic deposits. **The Anthropocene Review**, v. 2, n. 1, p. 33-58, 2015.

ELLIS, E. C. Anthropogenic transformation of the terrestrial biosphere. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 369, n. 1938, p. 1010-1035, 2011.

FISHER, W.L.; BROWN, L.F.; SCOTT, A.J.; MCGOWEN, J.H. Delta Systems in the Exploration for Oil and Gas. **Bureau of Economic Geology**. 1969.

GALLOWAY, W.E. (1975). Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional systems. In BROUSSARD, M. L. **Deltas: Models for Exploration**. Houston Geological Society, Texas, USA: p. 87–98.

GUIMARÃES, J. K. **Evolução do delta do rio São Francisco - estratigrafia do Quaternário e relações morfodinâmicas**. Tese (Doutorado em Geociências). Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador. 2010. 145p.

HESP, P. A.; DILLENBURG, S. R.; BARBOZA, E. G.; TOMAZELLI, L. J.; AYUP-ZOUAIN, R. N.; ESTEVES, L. S.; GRUBER, N. L. S.; TOLDO JR., E. E.; TABAJARA, L. L. C. A.; CLEROT, L. C. P. Beach ridges, foredunes or transgressive dunefields? Definitions and an examination of the Torres to Tramandaí barrier system, Southern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências** v. 77, n. 3, p. 493-508, 2005.

- JIMENEZ, J. A.; CAPOBIANCO, M.; SUANEZ, S.; RUOL, P.; FRAUNIÉ P.; STIVE, M. J. F. Coastal processes along the Ebro, Po and Rhone deltas. In: Proceedings of the second International Conference on the Mediterranean Coastal Environment (MEDCOAST 95), 1995, Autoritat Portuaria de Tarragona, Spain. 2, p. 827-840.
- LIMA, L. G.; DILLENBURG, S. R.; MEDEANIC, E. G.; BARBOZA; E. G.; ROSA, M. L. C. C., TOMAZELLI, L. J.; DEHNHARDT, B. A.; CARON, F. Sea-level rise and sediment budget controlling the evolution of a transgressive barrier in southern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 42, p. 27-38, 2013.
- LOPES, R. P.; OLIVEIRA, L. C.; FIGUEIREDO, A. M. G.; KINOSHITA, A.; BAFFA, O.; BUCHMANN, F. S. ESR dating of Pleistocene mammal teeth and its implications for the biostratigraphy and geological evolution of the coastal plain, Rio Grande do Sul, southern Brazil. **Quaternary International**, v. 212, n. 2, p. 213-222, 2010.
- LOPES, R. P.; KINOSHITA, A.; BAFFA, O.; FIGUEIREDO, A. M. G.; DILLENBURG, S. R.; SCHULTZ, C. L.; PEREIRA, J. C. ESR dating of Pleistocene mammals and marine shells from the coastal plain of Rio Grande do Sul state, southern Brazil. **Quaternary International**, v. 352, p. 124-134, 2014.
- MACHADO, N. A. F. Morfologia das Lagoas Costeiras Figueira e Fortaleza, Litoral Norte e Médio do Rio Grande do Sul. In: II Simpósio Brasileiro de restingas e Lagoas Costeiras, (SBL SBB), 2., 1998, Macaé - RJ. Anais. 1998.
- MARTINHO, C. T. **Morfodinâmica e evolução de campos de dunas transgressivos quaternários do litoral do Rio Grande do Sul**. Tese (Doutorado em geociências). Instituto de geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2008. 215p.

- MARTINHO, C. T.; DILLENBURG, S. R.; HESP, P. Wave energy and longshore sediment transport gradients controlling barrier evolution in Rio Grande do Sul, Brazil. **Journal of Coastal Research**, v. 25, n. 2, p. 285-293, 2009.
- MARTINHO, C. T.; HESP, P. A.; DILLENBURG, S. R. Morphological and temporal variations of transgressive dunefields of the northern and mid-littoral Rio Grande do Sul coast, Southern Brazil. **Geomorphology**, v. 117, n. 1-2, p. 14-32, 2010.
- MOURA, N. S. V.; MORAN, E. F.; STROHAECKER, T. M.; KUNST, A. V. A urbanização na zona costeira: processos locais e regionais e as transformações ambientais-o caso do Litoral Norte do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. **Ciência e Natura**, v. 37, n. 42, p. 594-612, 2015.
- ORTON, G., AND READING, H.G. Variability of deltaic processes in terms of sediment supply, with particular emphasis on grain size. **Sedimentology**, v. 40, p. 475–512, 1993.
- PAZ, A. R. Hidrologia aplicada. Apostila. 2004. 138p. Disponível em: <[http://www.ct.ufpb.br/~adrianorpaz/artigos/apostila\\_HIDROLOGIA\\_APLICADA\\_UERGS.pdf](http://www.ct.ufpb.br/~adrianorpaz/artigos/apostila_HIDROLOGIA_APLICADA_UERGS.pdf)>. Acesso em 10 de junho de 2019.
- ROCHA, C. M. Monitoramento de qualidade de águas superficiais da Bacia Hidrográfica do Rio Tramandaí: Relatório de dados brutos-Período 2008-2011. 2019. 29p.
- ROCHA, C. M. Monitoramento de qualidade de águas superficiais da Bacia Hidrográfica do Rio Tramandaí: Relatório de dados brutos-Período 2011-2013. 2019. 23p.
- ROCHA, C. M. Monitoramento de qualidade de águas superficiais da Bacia Hidrográfica do Rio Tramandaí: Relatório de dados brutos-Período 2013-2014. 2019. 18p.

- ROCHA, C. M. Monitoramento de qualidade de águas superficiais da Bacia Hidrográfica do Rio Tramandaí: Relatório de dados brutos-Período 2014-2015. 2019. 27p.
- ROSA, M. L. C. C.; BARBOZA, E. G.; ABREU, V. S., TOMAZELLI, L. J., DILLENBURG, S. R. High-Frequency Sequences in the Quaternary of Pelotas Basin (coastal plain): a record of degradational stacking as a function of longer-term base-level fall. **Brazilian Journal of Geology**, v. 47, n. 2, p. 183-207, 2017.
- ROSA, M. L. C. C.; HOYAL, D.; BARBOZA, E. G.; FEDELE, J.; ABREU, V. River-dominated deltas: upscaling autogenic and allogenic processes observed in laboratory experiments to field examples of small deltas in southern Brazil. Autogenic dynamics and self-organization in sedimentary systems. **Society for Sedimentary Geology (SEPM)**. Special Publication, v. 106, p. 176-197, 2016.
- ROSA, M. L. C. C.; TOMAZELLI, L. J.; COSTA, A. F. U. Integração de métodos potenciais (gravimetria e magnetometria) na caracterização do embasamento da região sudoeste da Bacia de Pelotas, sul do Brasil. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 27, n. 4, p. 641-657, 2009.
- SCHÄFER, A. (2013). Caracterização física e química. In: SCHÄFER, A.; LANZER, R.; SCUR, L. (org.) **Atlas socioambiental: municípios de Cidreira, Balneário Pinhal e Palmares do Sul**. EDUCS, Caxias do Sul: p. 92-100.
- SCHÄFER, A. (2013). Envelhecimento das lagoas. In: SCHÄFER, A.; LANZER, R.; SCUR, L. (org.) **Atlas socioambiental: municípios de Cidreira, Balneário Pinhal e Palmares do Sul**. EDUCS, Caxias do Sul: p. 103-106.
- SILVEIRA, A. L. L. (2012) Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In: TUCCI, C. E. M. (org.) **Hidrologia: ciência e aplicação**. Editora da Universidade / UFRGS, Porto Alegre: p. 35-50.
- TOLDO JR, E. E.; ALMEIDA, L. E. S. B.; NICOLODI, J. L.; ABSALONSEN, L.; GRUBER, N. L. S. 2006. O controle da deriva litorânea no desenvolvimento do

campo de dunas e da antepraia no litoral médio do Rio Grande do Sul. **Pesquisas em Geociências**, v. 33, n. 2, p. 35-42, 2006.

TOMAZELLI, L. J.; DILLENBURG S. R.; VILLWOCK J. A. (2000) Late Quaternary geological history of Rio Grande do Sul coastal plain, southern Brazil. **Revista Brasileira de Geociências** v. 30, n. 3, p. 474-476, 2017.

TRAVESSAS, F. A.; DILLENBURG, S. R.; CLEROT, L. C. P. Estratigrafia e evolução da barreira holocênica do Rio Grande do Sul no trecho Tramandaí - Cidreira (RS). **Boletim Paranaense de Geociências**, n. 57, p. 57-73, 2005.

TRINDADE, S. Morfologia de fundo das Lagoas do Gentil e Manuel Nunes, litoral norte do Rio Grande do Sul - Relatório de Estágio. 47p. 2019.

VILLWOCK, J.A.; TOMAZELLI, L.J. Geologia Costeira do Rio Grande do Sul. **Notas Técnicas**, v. 8, p. 1-45, 1995.

WINTERWERP, J. C.; VAN KESTEREN, W. G. M. **Introduction to the Physics of Cohesive Sediment in the Marine Environment**. Editor T. Van Loon, Elsevier, 2004. 429p.

## ANEXOS

**Anexo 1 - Valores obtidos para os parâmetros morfométricos das bacias receptoras em diferentes instantes de tempo.**

Lagoas	Ano	Área superficial I (km <sup>2</sup> )	Comprimento máximo (km)	Largura máxima (km)	Largura média (km)	Relação C/L	Área com Macrófitas (km <sup>2</sup> )
Gentil	2003	6,77	2,75	3,03	2,46	0,91	0,18
	2009	6,96	2,75	3,03	2,53	0,91	0,07
	2012	6,68	2,73	3,02	2,45	0,90	0,20
	2016	6,70	2,74	3,01	2,45	0,91	0,12
	2018	6,67	2,72	2,99	2,45	0,91	0,39
Manuel Nunes	2003	3,39	1,98	2,24	1,71	0,88	-
	2009	5,40	2,39	2,55	2,26	0,94	-
	2012	2,45	1,65	2,05	1,48	0,80	-
	2016	5,01	2,30	2,51	2,18	0,92	-
	2018	2,42	1,58	2,52	1,53	0,63	-

**Anexo 2 - Valores obtidos para os parâmetros morfométricos das sub-bacias de drenagem e seus canais de drenagem associados em diferentes instantes de tempo.**

Deltas	Ano	SUB-BACIAS		CANAIS DE DRENAGEM		
		Área (km <sup>2</sup> )	Perímetro (km)	Perímetro (km)	Densidade	Sinuosidade do canal principal
G1	2003	0,42	3,79	3,77	8,99	1,14
	2009	0,25	3,81	3,14	12,56	1,19
	2012	0,13	3,78	2,43	18,73	1,20
	2016	0,09	3,96	1,91	21,21	1,39
G2	2003	0,57	4,53	4,04	7,09	1,13
	2009	0,44	4,66	4,28	9,73	1,14
	2012	0,21	3,54	3,77	17,93	1,22
	2016	0,36	5,43	5,53	15,36	1,08
G3	2003	0,26	3,56	1,82	6,99	1,31
	2009	0,58	5,20	4,45	7,67	1,13
	2012	0,36	4,27	4,43	12,31	1,16
	2016	0,09	2,12	1,46	16,18	1,06
G4	2003	0,43	4,23	3,94	9,15	1,16
	2009	0,89	5,70	6,05	6,80	1,37
	2012	0,67	7,70	5,34	7,96	1,20
	2016	1,31	6,18	7,0	5,34	1,23
MN1	2003	0,21	3,71	2,45	11,65	1,22
	2009	0,23	2,85	2,56	11,13	1,19
	2012	0,28	3,26	3,08	11,01	1,21
	2016	0,23	3,36	2,89	12,57	1,23
MN2	2003	0,36	4,28	3,87	10,76	1,10
	2009	0,4	3,21	3,34	8,36	1,08
	2012	0,70	4,58	5,07	7,25	1,12
	2016	0,88	5,04	5,90	6,71	1,14

**Anexo 3 - Valores obtidos para os parâmetros morfométricos das planícies deltaicas em diferentes instantes de tempo.**

<b>Deltas</b>	<b>Ano</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Relação C/L</b>
<b>G1</b>	<b>2003</b>	1,21	1,71
	<b>2009</b>	8,27	2,61
	<b>2012</b>	18,42	1,86
	<b>2016</b>	16,96	2,28
	<b>2018</b>	18,83	2,08
<b>G2</b>	<b>2003</b>	22,54	2,21
	<b>2009</b>	33,33	2,49
	<b>2012</b>	33,66	2,64
	<b>2016</b>	35,87	2,51
	<b>2018</b>	36,64	2,80
<b>G3</b>	<b>2003</b>	1,03	2,29
	<b>2009</b>	10,90	1,19
	<b>2012</b>	14,98	1,53
	<b>2016</b>	14,08	2,35
	<b>2018</b>	11,01	2,13
<b>G4</b>	<b>2003</b>	26,21	0,72
	<b>2009</b>	36,53	0,62
	<b>2012</b>	40,37	1,50
	<b>2016</b>	50,50	0,76
	<b>2018</b>	59,84	0,79
<b>MN1</b>	<b>2003</b>	17,17	0,92
	<b>2009</b>	5,65	0,45
	<b>2012</b>	18,24	2,05
	<b>2016</b>	7,31	1,73
	<b>2018</b>	17,31	1,69
<b>MN2</b>	<b>2003</b>	34,11	0,90
	<b>2009</b>	2,73	0,97
	<b>2012</b>	33,81	1,22
	<b>2016</b>	19,59	1,27
	<b>2018</b>	44,07	1,31

## 6. CONCLUSÕES

Dentre os fatores determinantes para o desenvolvimento de deltas, destacam-se:

*Disponibilidade de sedimentos* - O aporte sedimentar dos deltas lagunares holocênicos está vinculado aos processos costeiros, desde a ação das ondas que traz sedimentos da plataforma continental para a face da praia pela deriva litorânea (TOLDO JR. *et al.*, 2006), até a ação dos ventos de sentido NE, que transporta sedimentos para o campo de dunas.

*Espaço de acomodação* - Os níveis de base dos sistemas deltaicos estão relacionados a batimetria das lagoas e o espaço de acomodação pode variar de acordo com as flutuações do nível d'água lagunar, o qual é controlado pelas precipitações e a combinação das variações climáticas sazonais.

*Presença de vegetação* - No campo de dunas a vegetação barra a entrada de sedimentos e retém a umidade. Assim, nos setores vegetados o transporte é de dominado pelos canais aluviais, e nos setores onde não há vegetação o domínio é do transporte eólico.

*Processos eólicos* - A deposição dos deltas lagunares associados aos campos de dunas depende principalmente dos *fluxos eólicos* que, por sua vez, interagem com a presença de *umidade, vegetação e urbanização* na criação das diferentes morfologias deltaicas.

*Ação antrópica* - O crescimento da malha urbana sobre as linhas de costa forma causa um grande impacto ao barrar o aporte sedimentar impedindo a alimentação dos corredores de areia, bem como contribui para o aumento da vegetação, promovendo a estabilização e a extinção do campo de dunas. A presença do parque eólico altera a migração de algumas dunas e a rede de canais interdunas, que estão associadas com pouco ou nenhum reflexo nas planícies deltaicas entre o período observado. Neste sentido a ocupação humana de maior impacto é dada pela urbanização e estabelecimento de moradias junto a linha de costa.

Além das forçantes inerentes ao sistema, as características de uso e ocupação do solo tanto pela interação antrópica quanto pela proliferação da vegetação, introduzem modificações nas condições de contorno dos sistemas

deltaicos. Portanto, os fatores abióticos conduzem a evolução geomorfológica dos ambientes deposicionais costeiros, condicionando o desenvolvimento biótico, que por sua vez, provoca a alteração da diversidade geomorfológica. Assim, os processos geológicos, ecológicos e antropológicos no ambiente costeiro estão intimamente interligados na rede morfodinâmica como sistemas que se retroalimentam.

Os próximos passos importantes para o avanço do conhecimento desses sistemas deltaicos incluem medir fluxos hidrodinâmicos para cada sistema, calcular o transporte de sedimentos, e monitorar os níveis d'água das lagoas. O conhecimento dos aspectos em superfície aliados a investigação da subsuperfície dos deltas lagunares será fundamental para a elaboração de modelos de fácies bem como para compreender os processos envolvidos na estratigrafia de alta frequência desses depósitos e a evolução do mecanismo de retrogradação do Sistema Laguna-Barreira IV.

## 7. REFERÊNCIAS

AHLERT, S.; SCHÄFER, A.; SCHUH, S. M.; MARCHETT, C. A. (2013). Morfologia. In: SCHÄFER, A.; LANZER, R.; SCUR, L. (org.) **Atlas socioambiental: municípios de Cidreira, Balneário Pinhal e Palmares do Sul**. EDUCS, Caxias do Sul: p. 57-62.

BARBOZA, E. G.; ROSA, M. L. C. C.; AYUP-ZOUAIN, R. N. Cronoestratigrafia da Bacia de Pelotas: uma revisão das seqüências deposicionais. **Gravel**, v. 6, n. 1, p. 125-138, 2008.

BATES, C. C. Rational theory of delta formation. **American Association of Petroleum Geologists Bulletin**, v. 37, n. 9, p. 2119-62, 1953.

BHATTACHARYA, J. P. (2006). Deltas. In POSAMENTIER, H. W.; WALKER, R. G. (org.) **Facies models revisited**. Society for Sedimentary Geology, Tulsa, Oklahoma, USA: p. 237-285.

BUCHMANN F. S. C.; TOMAZELLI, L. J. Relict nearshore shoals of Rio Grande do Sul, southern Brazil: origin and effects on nearby modern beaches. **Journal of Coastal Research**, n. 35, p. 318-322, 2003.

BUENO, G. V.; ZACHARIAS, A. A.; OREIRO, S. G.; CUPERTINO J. A.; FALKENHEIN, F. U. H.; MARTINS-NETO, A. M. Bacia de Pelotas. **Boletim de Geociências da PETROBRAS**, v. 15, n. 2, p. 551-559, 2007.

CALLIARI, L. J.; FIGUEIREDO, S. A. D. Sangradouros: distribuição espacial, variação sazonal, padrões morfológicos e implicações no gerenciamento costeiro. **Gravel**. n. 3, p. 47 – 57, 2005.

CASTRO, J. C. C.; CASTRO, M. R. (2008). Ambientes Deltaicos. In SILVA, A. J. C. L. P.; ARAGÃO, M. A. N. F.; MAGALHÃES, A. J. C. (org.) **Ambientes de sedimentação siliciclástica do Brasil**. Beca Edições, São Paulo: p. 171 - 193.

CASTRO, D.; ROCHA, C. M. **Qualidade das águas na bacia hidrográfica do rio Tramandaí**. Primeira ed. Porto Alegre: Via Sapiens, 2016. 172 p.

COLEMAN, J. M.; WRIGHT, L. D. (1975). Modern River Deltas: Variability of Processes and Sand Bodies. In BROUSSARD, M. L. **Deltas: Models for Exploration**. Houston Geological Society, Texas, USA: p. 99-149.

COOPER, J. A. G. (1997). Lagoons and microtidal coasts. In CARTER, R.W.G.; WOODROFFE, C. D. **Coastal Evolution - Late Quaternary Shoreline Morphodynamics**. Cambridge University Press, Cambridge, UK: p. 219-266.

COWELL, P. J.; THOM, B. G. (1997). Morphodynamics of coastal evolution. In CARTER, R.W.G.; WOODROFFE, C. D. **Coastal Evolution - Late Quaternary Shoreline Morphodynamics**. Cambridge University Press, Cambridge, UK: p. 33-86.

CPTEC, Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. São Paulo, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Disponível em: <<http://clima1.cptec.inpe.br/estacaochuvosa/pt>>. Acesso em: 16 jan. 2019.

\_\_\_\_\_. Disponível em: <<http://enos.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: 18 jan. 2019.

DALRYMPLE, R.W. (1992). Tidal depositional systems. In: WALKER, R.G., and JAMES, N.P. (org.) **Facies Models: Response to Sea-Level Change**. Geological Association of Canada, Newfoundland, Canada: p. 195–218.

\_\_\_\_\_. Tide-dominated deltas: do they exist or are they all estuaries. **American Association of Petroleum Geologists Annual Meeting, Official Program**, p. A29-A30, 1999.

DILLENBURG, S. R.; ROY, P. S.; COWELL, P. J.; TOMAZELLI, L. J. Influence of antecedent topography on coastal evolution as tested by shoreface translation-barrier model (STM). **Journal of coastal research**, n. 16 (1) p. 71-81, 2000.

DILLENBURG, S. R.; TOMAZELLI, L. J.; HESP, P. A.; BARBOZA, E. G.; CLEROT, L. C. P.; SILVA, D. B. Stratigraphy and evolution of a prograded transgressive dunefield barrier in southern Brazil. **Journal of Coastal research**, SI, n. 39, p. 132-135, 2006.

DILLENBURG, S.R.; BARBOZA, E. G.; TOMAZELLI, L. J.; HESP, P.A.; CLEROT, L. C. P.; AYUP-ZOUAIN, R. N. (2009). The Holocene coastal barriers of Rio Grande do Sul. In DILLENBURG, S.R.; HESP, P.A. **Geology and geomorphology of Holocene coastal barriers of Brazil**. Springer, Berlin: p. 53-88.

FISHER, W.L.; BROWN, L.F.; SCOTT, A.J.; MCGOWEN, J.H. Delta Systems in the Exploration for Oil and Gas. **Bureau of Economic Geology**. 1969.

GALLOWAY, W.E. (1975). Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional systems. In BROUSSARD, M. L. *Deltas: Models for Exploration*. Houston Geological Society, Texas, USA: p. 87–98.

GAMBOA, L. A. P.; RABINOWITZ, P. D. The Rio Grande Fracture Zone in the western South Atlantic and its tectonic implications. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 52, n. 2, p. 410-418. 1981.

GUIMARÃES, L. S. et al. Morfodinâmica de um delta artificial na margem oeste da Lagoa Mangueira–RS. Tese (Doutorado em geociências). Instituto de geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2014. 123p.

HASENACK, H. & FERRARO, L.W. Considerações sobre o clima da região de Tramandaí, RS. **Pesquisas em Geociências**, v. 22, n. 22, p. 53-70, 1989.

HESP, P. A.; DILLENBURG, S. R.; BARBOZA, E. G.; TOMAZELLI, L. J.; AYUP-ZOUAIN, R. N.; ESTEVES, L. S.; GRUBER, N. L. S.; TOLDO JR., E. E.; TABAJARA, L. L. C. A.; CLEROT, L. C. P. Beach ridges, foredunes or transgressive dunefields? Definitions and an examination of the Torres to Tramandaí barrier system, Southern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências** v. 77, n. 3, p. 493-508, 2005.

LIMA, L. G.; DILLENBURG, S. R.; MEDEANIC, E. G.; BARBOZA, E. G.; ROSA, M. L. C. C., TOMAZELLI, L. J.; DEHNHARDT, B. A.; CARON, F. Sea-level rise and sediment budget controlling the evolution of a transgressive barrier in southern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 42, p. 27-38, 2013.

LOPES, R. P.; OLIVEIRA, L. C.; FIGUEIREDO, A. M. G.; KINOSHITA, A.; BAFFA, O.; BUCHMANN, F. S. ESR dating of Pleistocene mammal teeth and its implications for the biostratigraphy and geological evolution of the coastal plain, Rio Grande do Sul, southern Brazil. **Quaternary International**, v. 212, n. 2, p. 213-222, 2010.

LOPES, R. P.; KINOSHITA, A.; BAFFA, O.; FIGUEIREDO, A. M. G.; DILLENBURG, S. R.; SCHULTZ, C. L.; PEREIRA, J. C. ESR dating of Pleistocene mammals and marine shells from the coastal plain of Rio Grande do Sul state, southern Brazil. **Quaternary International**, v. 352, p. 124-134, 2014.

MACHADO, N. A. F. Morfologia das Lagoas Costeiras Figueira e Fortaleza, Litoral Norte e Médio do Rio Grande do Sul. In: II Simpósio Brasileiro de restingas e Lagoas Costeiras, (SBL SBB), 2., 1998, Macaé - RJ. Anais. 1998.

MARTINHO, C. T. **Morfodinâmica e evolução de campos de dunas transgressivos quaternários do litoral do Rio Grande do Sul**. Tese (Doutorado em geociências). Instituto de geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2008. 215p.

MARTINHO, C. T.; DILLENBURG, S. R.; HESP, P. Wave energy and longshore sediment transport gradients controlling barrier evolution in Rio Grande do Sul, Brazil. **Journal of Coastal Research**, v. 25, n. 2, p. 285-293, 2009.

MARTINHO, C. T.; HESP, P. A.; DILLENBURG, S. R. Morphological and temporal variations of transgressive dunefields of the northern and mid-littoral Rio Grande do Sul coast, Southern Brazil. **Geomorphology**, v. 117, n. 1-2, p. 14-32, 2010.

MOHRIAK, W. U. (2003). Bacias sedimentares da margem continental Brasileira. In BIZZI, L. A., SCHOBENHAUS, C.; VIDOTTI, R. M.; GONÇALVES, J. H. (org.) **Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil: texto, mapas e SIG**. CPRM, Brasil: p. 87-165.

NICOLODI, J. L.; TOLDO JR.; E. E.; GRUBER, N. L. S. Análise da Direcionalidade das Correntes Litorâneas no Litoral Norte do Rio Grande do Sul. In: **Anais da Semana Nacional de Oceanografia (AOCEANO)**, 13. Itajaí, SC, p. 461-463, 2000.

ORTON, G., AND READING, H.G. Variability of deltaic processes in terms of sediment supply, with particular emphasis on grain size. **Sedimentology**, v. 40, p. 475-512, 1993.

PAZ, A. R. Hidrologia aplicada. Apostila. 2004. 138p. Disponível em: <[http://www.ct.ufpb.br/~adrianorpaz/artigos/apostila\\_HIDROLOGIA\\_APLICADA\\_UE\\_RGS.pdf](http://www.ct.ufpb.br/~adrianorpaz/artigos/apostila_HIDROLOGIA_APLICADA_UE_RGS.pdf)>. Acesso em 10 de junho de 2019.

ROCHA, C. M. Monitoramento de qualidade de águas superficiais da Bacia Hidrográfica do Rio Tramandaí: Relatório de dados brutos-Período 2008-2011. 2019. 29p.

\_\_\_\_\_. Monitoramento de qualidade de águas superficiais da Bacia Hidrográfica do Rio Tramandaí: Relatório de dados brutos-Período 2011-2013. 2019. 23p.

\_\_\_\_\_. Monitoramento de qualidade de águas superficiais da Bacia Hidrográfica do Rio Tramandaí: Relatório de dados brutos-Período 2013-2014. 2019. 18p.

\_\_\_\_\_. Monitoramento de qualidade de águas superficiais da Bacia Hidrográfica do Rio Tramandaí: Relatório de dados brutos-Período 2014-2015. 2019. 27p.

ROSA, M. L. C. C.; TOMAZELLI, L. J.; COSTA, A. F. U. Integração de métodos potenciais (gravimetria e magnetometria) na caracterização do embasamento da região sudoeste da Bacia de Pelotas, sul do Brasil. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 27, n. 4, p. 641-657, 2009.

ROSA, M. L. C. C.; HOYAL, D.; BARBOZA, E. G.; FEDELE, J.; ABREU, V. River-dominated deltas: upscaling autogenic and allogenic processes observed in laboratory experiments to field examples of small deltas in southern Brazil. Autogenic dynamics and self-organization in sedimentary systems. **Society for Sedimentary Geology (SEPM)**. Special Publication, v. 106, p. 176-197, 2016.

ROSA, M. L. C. C.; BARBOZA, E. G.; ABREU, V. S., TOMAZELLI, L. J., DILLENBURG, S. R. High-Frequency Sequences in the Quaternary of Pelotas Basin (coastal plain): a record of degradational stacking as a function of longer-term base-level fall. **Brazilian Journal of Geology**, v. 47, n. 2, p. 183-207, 2017.

ROSA, M. L. C. C.; BARBOZA, E. G.; DILLENBURG, S. R. Estratigrafia de processos: a relação deste novo paradigma com o comportamento da Barreira Holocênica na Bacia de Pelotas. In: **Anais do XVI Congresso Associação Brasileira do Quaternário (ABEQUA)** 16., 2017, Bertioga - São Paulo.

SCHÄFER, A. (2013). Caracterização física e química. In: SCHÄFER, A.; LANZER, R.; SCUR, L. (org.) **Atlas socioambiental: municípios de Cidreira, Balneário Pinhal e Palmares do Sul**. EDUCS, Caxias do Sul: p. 92-100.

\_\_\_\_\_. Envelhecimento das lagoas. In: SCHÄFER, A.; LANZER, R.; SCUR, L. (org.) **Atlas socioambiental: municípios de Cidreira, Balneário Pinhal e Palmares do Sul**. EDUCS, Caxias do Sul: p. 103-106.

SILVEIRA, A. L. L. (2012) Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In: TUCCI, C. E. M. (org.) **Hidrologia: ciência e aplicação**. Editora da Universidade / UFRGS, Porto Alegre: p. 35-50.

TOLDO JR, E. E.; ALMEIDA, L. E. S. B.; NICOLODI, J. L.; ABSALONSEN, L.; GRUBER, N. L. S. 2006. O controle da deriva litorânea no desenvolvimento do campo de dunas e da antepraia no litoral médio do Rio Grande do Sul. **Pesquisas em Geociências**, v. 33, n. 2, p. 35-42, 2006.

TOMAZELLI, L. J. **Contribuição ao estudo dos sistemas deposicionais holocênicos do nordeste da Província Costeira do Rio Grande do Sul—com ênfase no sistema eólico**. Tese (Doutorado em geociências). Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 1990. 270p.

TOMAZELLI, L. J.; DILLENBURG S. R.; VILLWOCK J. A. (2000) Late Quaternary geological history of Rio Grande do Sul coastal plain, southern Brazil. **Revista Brasileira de Geociências** v. 30, n. 3, p. 474-476, 2017.

TRAVESSAS, F. A.; DILLENBURG, S. R.; CLEROT, L. C. P. Estratigrafia e evolução da barreira holocênica do Rio Grande do Sul no trecho Tramandaí - Cidreira (RS). **Boletim Paranaense de Geociências**, n. 57, p. 57-73, 2005.

TRINDADE, S. Morfologia de fundo das Lagoas do Gentil e Manuel Nunes, litoral norte do Rio Grande do Sul - Relatório de Estágio. 47p. 2019.

VILLWOCK, J.A.; TOMAZELLI, L.J. Geologia Costeira do Rio Grande do Sul. **Notas Técnicas**, v. 8, p. 1-45, 1995.

## ANEXOS

### ANEXO A

Resumo expandido apresentado no III Semana Acadêmica dos Pós-graduandos do Instituto de Geociências da UFRGS.

## ANÁLISE MORFOLÓGICA DE DELTAS LAGUNARES HOLOCÊNICOS DA PLANÍCIE COSTEIRA DO RIO GRANDE DO SUL

Rocha, M. X.<sup>1</sup>; Rosa, M. L. C. C. <sup>1</sup>; Trindade, S.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>– Programa de Pós-Graduação em Geociências - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

<sup>2</sup>– Graduação em Geociências - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**Abstract:** This research aims to identify the network of factors that control the production of the morphological diversity of the lagoon deltas present at the limit of the Holocene Laguna-Barrier system, in two lagoons located on the northern coast of the Rio Grande do Sul Coastal Plain (PCRS). It is noted that in this environment the action of the winds, acting in the coastal drift, through the beach, to the coastal lagoons, is the fundamental process of the barrier lagoon system morphology, resulting in the production of the morphology of the eolian and lagoon sub-environments. In the delta sub-environment, wind acts as: (i) sediment availability vector, which is the fundamental condition for a delta. (ii) action of waves reworking the deltaic front and prodelta; (iii) and, expansion of the saline wedge in the Gentil Lagoon. The presence of vegetation can shape deltaic systems when: (i) *Macrophytes* stabilize deltaic fronts; (ii) vegetation growth in the dune field may block the entry of new sediment; (iii) increase soil moisture in the dune field and stabilize interdune drainage channels. The absence of vegetation is also decisive in the morphology of the deltas, as shown by Manuel Nunes Lagoon.

**Palavras-chave:** *Lagoon delta, Morphological Variation Rio Grande do Sul Coastal Plain.*

### Introdução

A Planície Costeira do Rio Grande do Sul (PCRS) compreende numerosos sistemas lagunares, onde é possível observar a presença de deltas marginais preferencialmente localizados no sistema definido por TOMAZELLI e VILLWOCK (2000) como Laguna-barreira IV, em porções onde a linha de costa é convexa e apresenta comportamento transgressivo (DILLENBURG, et al., 2000). Neste cenário, os atuais deltas lagunares da PCRS se desenvolvem como parte de um processo de retrogradação da Barreira IV, através do influxo sedimentar provido pelos campos de dunas móveis que migram em sentido SW. Os deltas lagunares apresentam diferentes tipos morfológicos e o objetivo deste estudo é responder quais são os fatores controladores e como interagem na produção da diversidade morfológica dos deltas na área das lagoas do Gentil e Manuel Nunes, localizadas no litoral norte do Rio Grande do Sul.

### **Metodologia**

Para aquisição dos dados, foram utilizados métodos de sensoriamento remoto conjugados com sistemas de informação geográfica, como: (i) mapeamento dos elementos geomorfológicos a partir de imagens de satélite do *Google Earth*® entre os anos de 2003 a 2018, processados no *ArcMap*®, que serviram como base para cálculos morfométricos utilizados na análise temporal da distribuição espacial dos sub-ambientes deltaicos; (ii) dados batimétricos adquiridos em outubro de 2018 por um *Side Scan, Humminbird 798 ci HD* e GPS acoplado, com frequências de 455 kHz e 255 kHz, que foram processados no *Surfer*®, possibilitando a modelagem do fundo lagunar. Cálculos de declividade das margens lagunares foram realizados a partir de perfis gerados no *ArcMap*® sobre o modelo batimétrico; (iii) caminhamentos nos canais distributários principais dos deltas lagunares foram levantados em fevereiro de 2012, a partir de um GNSS geodésico com sistema de posicionamento diferencial realizado em tempo real (*Real Time Kinematics – RTK*), com a finalidade de calcular a declividade das planícies deltaicas.

### **Resultados e Discussões**

Os deltas analisados foram denominados G1 a G4 na Lagoa do Gentil, e MN1 e MN2 na Lagoa Manuel Nunes. As variações dos elementos geomorfológicos, entre 2003 e 2018, podem ser observadas na figura 1. É possível notar a variação do nível d'água da Lagoa Manuel Nunes, o desenvolvimento da vegetação na Lagoa do Gentil e no campo de dunas (próximo aos cordões lagunares), o crescimento das planícies deltaicas, a variação das formas das sub-bacias de drenagem e de seus canais associados, bem como a implantação do parque eólico sobre o campo de dunas.

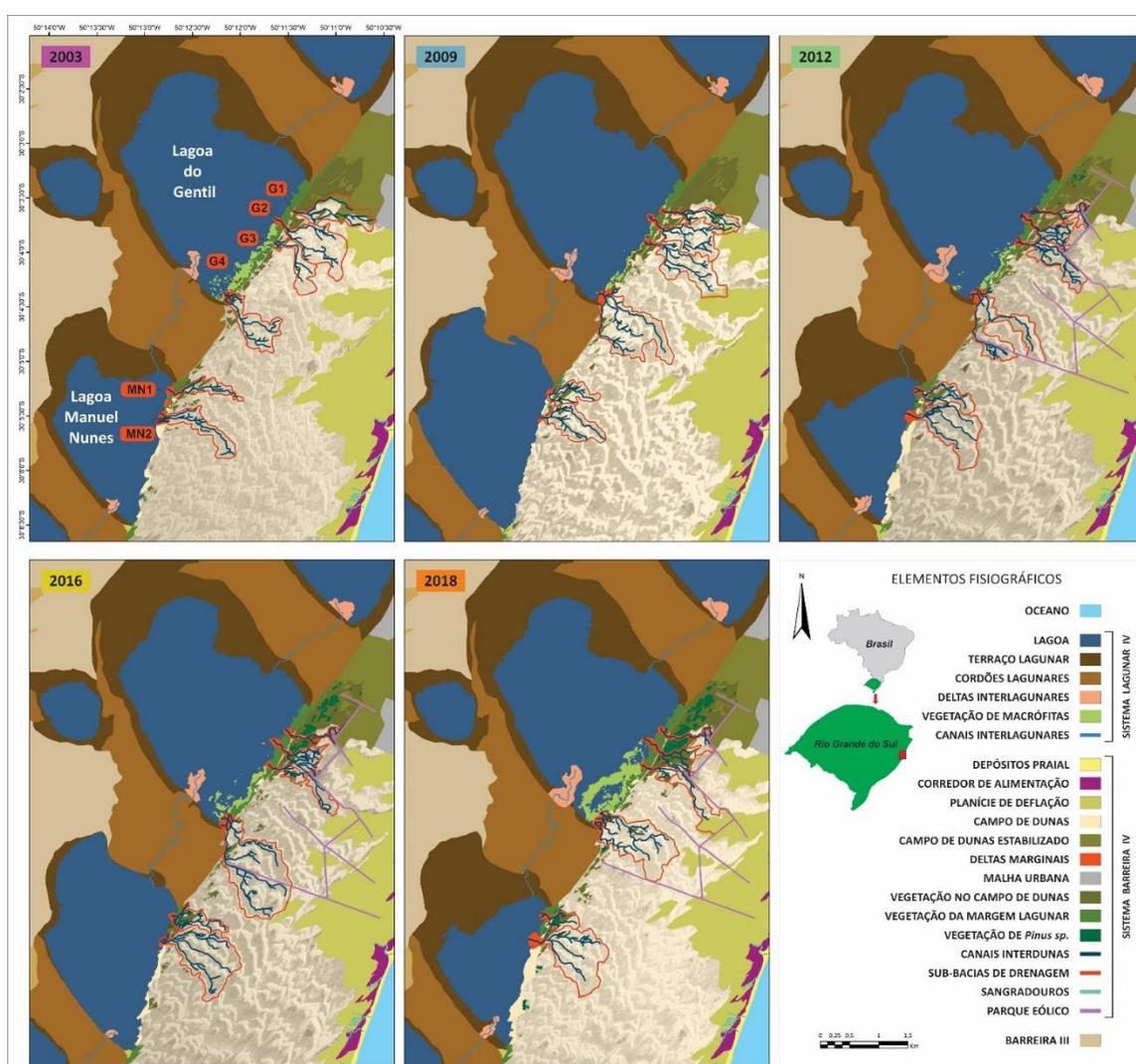


Figura 1: Mapeamento dos elementos fisiográficos que compõem os sub-ambientes sedimentares para a área de estudo entre 2003 e 2018.

Em 2018 as morfologias deltaicas de G1, G3, G4 e MN1 podem ser classificadas como lobadas, enquanto o delta G2 é do tipo digitado (Mississippi) e o delta MN2 do

tipo arqueado (Nilo). Porém, antes de 2016, o delta MN1 tinha cobertura arenosa e morfologia arqueada, tornando-se lobado a medida que a vegetação avançou sobre a planície deltaica. Os deltas G1 e G3 eram muito pouco desenvolvidos em 2003, crescendo expressivamente até 2018, com aumento de mais de 1000% em suas áreas, ao mesmo tempo em que o perímetro das drenagens de suas sub-bacias diminuía. Essas tendências indicam que a presença de sedimentos nas proximidades das planícies deltaicas contribui mais para o crescimento dos deltas do que extensos perímetros de canais da bacia de drenagem. Isso ocorre em razão da alta permeabilidade do solo arenoso do campo de dunas, fazendo com que o escoamento superficial não seja efetivo ao longo de toda extensão dos canais formados nos interdunas. O delta G4, ao contrário dos demais deltas lobados, é formado pela amalgamação de pequenos lobos arenosos. Essa característica é favorecida pela topografia das margens nesta extremidade da lagoa, onde o campo de dunas cavalga sobre o cordão lagunar. As planícies dos deltas do tipo Mississipi e Nilo apresentam menores declividades ( $D_t$ ) do que os deltas do tipo lobado (figura 2). O delta G2 mantém sua morfologia digitada desde 2003, com crescimento lento e progressivo. Mesmo que a variação do nível d'água da Lagoa Manuel Nunes inunde periodicamente as planícies deltaicas, o delta MN2 apresenta morfologia constantemente arqueada.

As principais diferenças entre as bacias receptoras (lagoas) são que a Lagoa do Gentil tem menor profundidade (CASTRO; ROCHA, 2016), relevo suave, e maiores concentrações de salinidade (ROCHA, 2019), tornando as condições mais favoráveis para o desenvolvimento das macrófitas; enquanto a Lagoa Manuel Nunes tem profundidade um pouco maior, a margem leste mais íngreme, e maiores variações no seu nível d'água (figura 1), favorecendo o desenvolvimento de deltas arenosos com retrabalhamento por ondas (figura 2). No campo de dunas, a porção próxima dos deltas G1, G2 e G3, os canais de drenagem são entrelaçados e meandantes, mais estreitos, profundos e estabilizados pela presença de vegetação. Nos deltas G4, MN1 e MN2 os canais de drenagem são entrelaçados, largos, rasos e difusos.

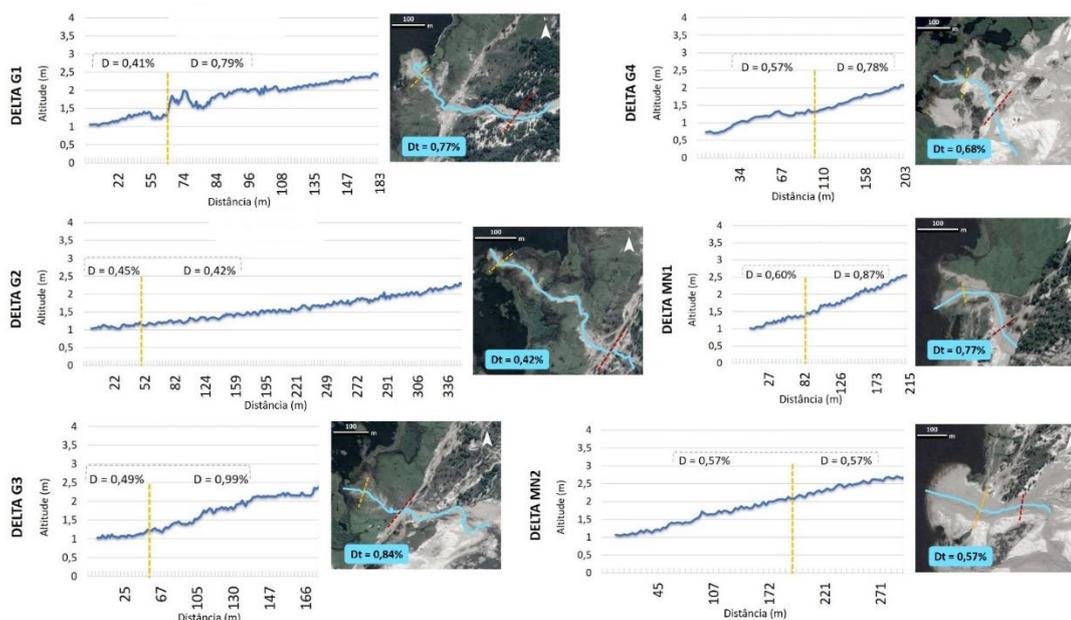


Figura 2: Perfis de declividade dos canais principais das planícies deltaicas, adquiridos por levantamento topográfico em fevereiro de 2019. São dados os valores de declividade total (Dt) dos canais a partir do limite traçado em vermelho, e das porções a jusante e montante, limitadas pelo traçado amarelo.

### Conclusões

Os fatores determinantes para o desenvolvimento de deltas é a *disponibilidade de sedimentos e espaço de acomodação*. O aporte sedimentar dos deltas lagunares holocênicos está vinculado aos processos costeiros, desde a ação das ondas que traz sedimentos da plataforma continental para a face da praia pela deriva litorânea (TOLDO JR. *et al.*, 2006), até a ação dos ventos de sentido NE, que transporta sedimentos para o campo de dunas. Assim, considera-se que a deposição dos deltas lagunares depende principalmente dos fluxos eólicos que, por sua vez, interagem com a presença de umidade e de vegetação. No campo de dunas a vegetação barra a entrada de sedimentos e retém a umidade, dificultando o transporte eólico. Porém, o crescimento da malha urbana sobre as linhas de costa forma uma grande barreira ainda mais impactante, que impede a alimentação dos corredores de sedimentos, levando a estabilização e extinção dos deltas lagunares. A presença do parque eólico altera a migração de algumas dunas e a rede de canais interdunas, que estão associadas com pouco ou nenhum reflexo nas planícies deltaicas entre o período observado. Ainda, a vegetação atua na estabilização dos canais de drenagem, podendo modificar as morfologias dos canais entrelaçados

para o tipo meandrante. A proliferação de macrófitas nas lagoas, influenciada pela profundidade e salinidade das águas, também auxilia na estabilização das frentes deltaicas, possibilitando a progradação das planícies deltaicas de forma a transformar progressivamente as morfologias lobadas em digitadas. Na ausência de vegetação no campo de dunas e/ou nas lagoas, os deltas lagunares são essencialmente arenosos e mais susceptíveis a processos de erosão por inundações e ondas.

### Referências

CASTRO, Dilton de; ROCHA, Cacinele Mariana da. **Qualidade das Águas da Bacia do Tramandaí**. Porto Alegre: Via Sapiens, 2016. 171 p.

DILLENBURG, Sergio R.; ROY, Peter S.; COWELL, Peter J.; TOMAZELLI, Luiz J. Influence of antecedent topography on coastal evolution as tested by the shoreface translation-barrier model (STM). **Journal of Coastal Research**, v. 16, n. 1, 2012.

ROCHA, Cacinele Mariana da. Monitoramento de qualidade de águas superficiais da Bacia Hidrográfica do Rio Tramandaí: Relatório de dados brutos-Período 2013-2014. 2019. Disponível em <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/189030>. Acesso em: 10 jun. 2019.

TOLDO Jr, Elírio; ALMEIDA, Luiz; NICOLODI, João; ABSALONSEN, Luciano; & GRUBER, Nelson. O controle da deriva litorânea no desenvolvimento do campo de dunas e da antepraia no litoral médio do Rio Grande do Sul. **Pesquisas em Geociências**, 33(2), 35-42, 2006.

TOMAZELLI, Luiz J.; VILLWOCK, Jorge A. O cenozóico costeiro do Rio Grande do Sul. **Geologia do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre. Ed. CIGO/UFRGS, 2000. p. 375-406.

<b>ANEXO I</b>
Título da Dissertação/Tese:
<b>“VARIABILIDADE MORFODINÂMICA DE DELTAS LAGUNARES HOLOCÊNICOS DO LITORAL NORTE DO RIO GRANDE DO SUL”</b>
Área de Concentração: Geologia Marinha
Autora: <b>Mariah Xavier Rocha</b>
Orientadora: Profa. Dra. Maria Luiza Correa da Camara Rosa
Examinador: Profa. Dra. Samanta da Costa Cristiano
Data: 06 de fevereiro de 2020
Conceito: A
<b>PARECER:</b>
<p>A dissertação de mestrado da geóloga Mariah Xavier Rocha apresenta informações inéditas e relevantes que contribuem para o conhecimento da morfodinâmica de deltas lagunares holocênicos e das influências sobre os processos de forma integrada. O estudo é completo e contempla a aplicação adequada de métodos científicos, com aplicação de análises e técnicas de estudos geomorfológicos em sistemas costeiros, e de sensoriamento remoto conjugado a sistemas de informação geográfica. Mesmo abordando os diferentes aspectos locais separadamente, consegue integrá-los de forma adequada. Os métodos estão detalhados e de acordo com os objetivos da dissertação. No entanto, acho cansativa a repetição da metodologia e outros dados e figuras no “corpo” da dissertação e no artigo, mesmo que esteja de acordo com o modelo do PPGGEO. De qualquer forma, o trabalho está agradável à leitura, bem escrito, apresenta formatação e figuras caprichadas, gostei muito das cores relativas aos anos que se relacionam em gráficos e figuras, são pequenos detalhes que evidenciam a dedicação de Mariah e empenho com a ciência.</p> <p>Contribuições gerais:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>i) Desmembrar a figura 1 do artigo, retirar Brasil e Rio Grande do Sul de dentro do Oceano Atlântico, e identificá-lo;</li> <li>ii) A figura 7 do artigo poderia ser mais bem valorizada e entendida com o</li> </ol>

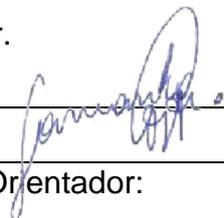
aumento das imagens e repetição do ponto laranja nas atuais;

- iii) Existem estudos que tratam da relação entre aspectos bióticos e abióticos que poderiam ser citados para embasar a conclusão, mas de qualquer forma, está ótimo.

Agradeço por fazer parte da avaliação desta dissertação nitidamente construída com dedicação e orientação adequada. Existem pequenos detalhes ao longo do texto que passaram despercebidos, mas que não interferem na qualidade do trabalho apresentado. Considero a dissertação de Mariah excelente, pois observa a natureza costeira de forma holística, sistêmica, abordando aspectos bióticos, abióticos e antropogênicos, interagindo em processos que condicionam a morfodinâmica dos deltas lagunares. Se houver concordância dos demais membros da banca indico conceito A com louvor.

É o parecer.

Assinatura:



Data: 06/ 02/2019

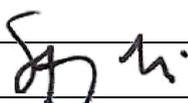
Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno:

<b>ANEXO I</b>
Título da Dissertação:
<b>“VARIABILIDADE MORFODINÂMICA DE DELTAS LAGUNARES HOLOCÊNICOS DO LITORAL NORTE DO RIO GRANDE DO SUL”</b>
Área de Concentração: Geologia Marinha
Autora: <b>Mariah Xavier Rocha</b>
Orientadora: Profa. Dra. Maria Luiza Correa da Camara Rosa
Examinador: Prof. Dr. Luiz José Tomazelli
Data: 06/02/2020
Conceito: A (Excelente)
<b>PARECER</b>
<p>Trata-se de uma Dissertação de Mestrado apresentada na modalidade de monografia tradicional, acrescida de um artigo científico submetido à Revista Brasileira de Geomorfologia. A autora aborda um tema interessante, tanto sob o ponto de vista científico como sob os aspectos ambientais relacionados à evolução dos corpos lagunares do Litoral Norte da Planície Costeira do Rio Grande do Sul. Os objetos específicos de estudo são os deltas desenvolvidos nas margens de dois corpos lagunares do Litoral Norte: as lagoas do Gentil e Manuel Nunes.</p> <p>O texto geral da dissertação está bem escrito, com uma redação clara e bastante precisa. Na sua maioria, as ilustrações são adequadas e necessárias à compreensão do texto.</p> <p>O erro mais significativo que observei na dissertação – e que aparece tanto na monografia (resumo e abstract, pg. 6 e 7) como no artigo encaminhado à publicação (resumo e abstract, pg. 42 e 43) - refere-se ao sentido de migração das dunas eólicas, um dos fatores mais importantes no controle da variabilidade morfológica dos deltas lagunares, como a própria autora mostra claramente ao longo de seu trabalho. Em ambos os textos a autora afirma que essa migração se dá no sentido NE quando, obviamente, ela se dá no sentido contrário, ou seja, no sentido SW. Esta migração, controlada pelos ventos dominantes provenientes de NE é explicitada pela própria autora ao longo da dissertação (pg. 24). Fica claro que o reconhecimento de uma migração para NE foi um lapso de redação por parte da autora e que, a meu ver, deverá ser corrigido no artigo a ser publicado.</p> <p>A meu ver a autora conseguiu atingir a maioria dos objetivos propostos para sua dissertação. O trabalho representa uma importante contribuição à</p>

compreensão da história evolutiva dos corpos lagunares do Litoral Norte da PCRS, demonstrando que sua evolução é controlada, em grande parte, pela morfologia e distribuição espacial dos corpos deltaicos que se desenvolvem ao longo de suas margens. O trabalho atende plenamente os requisitos exigidos para uma Dissertação de Mestrado.

Assinatura:



Ciente do Orientador:

Ciente do Aluno:

## ANEXO I

**Título:** Variabilidade Morfodinâmica de Deltas Lagunares Holocênicos do Litoral Norte do Rio Grande do Sul

**Área de Concentração:** Geologia Marinha

**Autor:** Mariah Xavier Rocha

**Orientador:** Profa. Dra. Maria Luiza Correa da Camara Rosa

**Examinador:** Prof. Elírio E. Toldo Jr

**Data:** 05/02/2020

### **Conceito: A**

A candidata possui capacidade técnica e conhecimentos para o desenvolvimento do Plano da Dissertação e interesse pelo tema de estudo. Também, e muito importante, demonstrou domínio dos métodos utilizados.

A motivação apresentada pela autora “A arquitetura estratigráfica é condicionada por processos que ocorrem em diferentes escalas de espaço e tempo, combinando processos alogênicos e autogênicos” atende adequadamente os objetivos da Dissertação. Ou seja, “Compreender quais são os fatores que controlam os sistemas deltaicos e como esses interagem na produção da diversidade morfológica, utilizando as Lagoas do Gentil e Manuel Nunes localizadas no litoral norte da Planície Costeira do Rio Grande do Sul como estudos de caso”.

A autora ao afirmar que as classificações deltaicas existentes na literatura não representam as variações locais do ambiente de estudo, deveria ponderar as diferentes escalas espaço-temporal e processos propostos por Cowell e Thom (1994, Fig. 3).

Os deltas intralagunares e, principalmente, os deltas marginais, representam depósitos holocênicos ou atuais?

De outro modo: os deltas intralagunares e, principalmente, os deltas marginais são depósitos representativos da escala de engenharia ou da escala geológica, e respectivos processos?

Portanto, como comparar processos diferentes em escalas diferentes, uma vez que as classificações existentes na literatura contemplam somente aqueles na escala de tempo geológica?

Os resultados apresentados no capítulo 5 estão muito bem estruturados, de modo a atender os objetivos da Dissertação.

A autora apresenta um consistente modelo científico, fundamento em 08 fatores controladores, aplicado a classificação de deltas atuais. Também, estes parâmetros, na totalidade ou parcialmente, podem ser aplicados no estudo de sistemas deltaicos antigos (escala geológica), e deste modo podem contribuir na compreensão genética e evolução destes depósitos.

Nos capítulos 1 a 4, e nas figuras correspondentes do capítulo 5: a legenda da Fig. 4 contém informações excessivas. A Fig. 4A e 4C são úteis para o leitor, principalmente a FIG 4C que deveria ser ampliada para destacar os depósitos deltaicos. A Fig. 4B é desnecessária.

Várias figuras contem legenda com texto excessivo, por exemplo, Figs 8, 9.

Falta legibilidade na Fig. 6.

A Fig. 5 deve apresentar o título dos eixos gráficos na mesma fonte e tamanho utilizado no manuscrito.

A Fig. 4, capítulo 5, é muito importante e contem um ótimo resumo dos elementos fisiográficos. O texto da legenda é excessivo. A figura não permite “notar a expressiva variação do nível d’água da Lagoa Manuel Nunes”, ou seja, a figura permite notar expressiva variação da área superficial da Lagoa Manuel Nunes.

A Fig. 7, capítulo 5, também é muito importante para compreensão dos resultados, entretanto, é pobre em legibilidade.



Prof. Elírio Toldo Jr.

