

“Programa de Monitoramento do Sítio de Despejo e Área Adjacente do Material Dragado do Canal de Acesso ao Porto do Rio Grande”

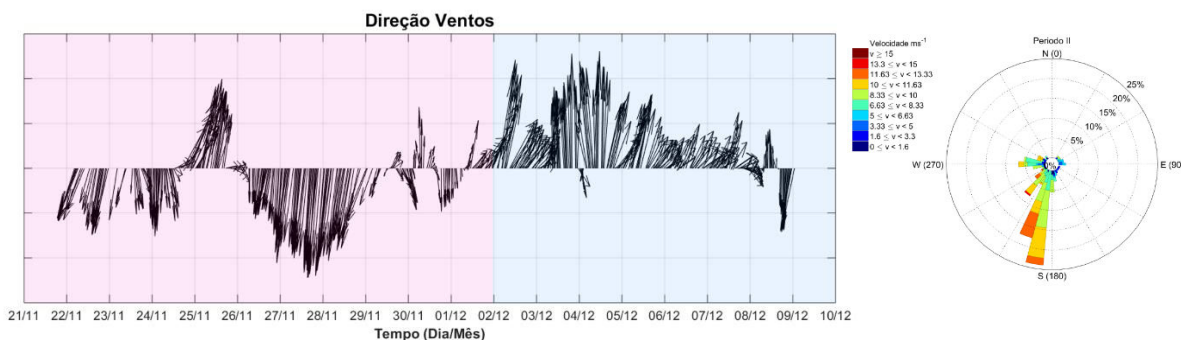
**Nota Técnica (19/12/2018)**

O evento do ciclone extratropical, ocorrido entre os dias 2 e 8 de dezembro de 2018, lançou o bolsão de lama que se encontrava na região antepraial para a praia do Cassino. A Nota Técnica da Equipe SiMCosta/FURG de 11/12/2018 explica o estágio da condução do Programa de Monitoramento, dá explicações sobre as possíveis causas do aparecimento do bolsão de lama detectado em 20/11/2018, e fornece outras informações.

Portanto, esta Nota Técnica tem o objetivo de prestar esclarecimentos a todos os setores envolvidos nas operações da dragagem do canal de acesso ao Porto do Rio Grande. A Nota Técnica é subdividida em seções, a saber: (a) Considerações sobre o ciclone extratropical e seus efeitos sobre a hidrodinâmica das águas costeiras; (b) Considerações sobre as plumas documentadas em fotos aéreas; (c) Considerações sobre o sítio de despejo; (d) Análise de imagens de satélites da região sob investigação e (e) Conclusões preliminares.

**a) Sobre o ciclone extratropical e seus efeitos sobre a hidrodinâmica das águas costeiras**

O ciclone extratropical, ao passar pela região sul do país, em especial ao longo da costa gaúcha, promoveu ventos oriundos do Sul com intensidade variável, chegando ao máximo de 13.5 m/s, porém consistentemente durante aproximadamente 6 dias. A Figura 1 mostra a variabilidade do vento entre 22/11 e 09/12. O ciclone extratropical ocorreu entre aproximadamente 02 e 08 de dezembro (período sinalizado pela cor azul).



**Figura 1** – Ventos obtidos na boia RS-05 fundeada nas proximidades do sítio de despejo. Na figura à esquerda mostra os ventos em dois períodos distintos, de 22/11 a 02/12 (em rosa) e de 02/12 a 09/12 (em azul). Na figura à direita, a rosa dos ventos mostra a predominância de ventos do quadrante sul para o período de 02/12 a 09/12.

Os ventos de sul, soprando nessa intensidade por esse período, provocam um transporte de massa e volume de águas oceânicas para a costa gaúcha e, no caso específico do estuário da Lagoa dos Patos, a água oceânica salina adentra o estuário com muita força nesse curto período de tempo. A boia SiMCosta RS-01, instalada no Museu Oceanográfico, acusou salinidade 30 (típica de águas oceânicas). A região próxima do Canal de São Gonçalo em Pelotas também registrou valores próximos aos de águas oceânicas.

Ao elevar o nível próximo à costa, estes ventos acarretam alteração na zona de rebentação de ondas que se inicia em uma área mais distante da costa. As ondas registradas pela boia SiMCosta RS-05 tinham de 2 m a 2,5 m de altura e período em torno de 10 s que duraram praticamente os seis dias do ciclone.

Com estas informações relativas às ondas medidas durante o ciclone pela boia RS-05 e utilizando-se de um modelo de ondas obtidos em [www.simplecoast.com/wp-content/uploads/.../Waveparameters.xls](http://www.simplecoast.com/wp-content/uploads/.../Waveparameters.xls) foram calculados alguns parâmetros da onda para as profundidades de 20 m, 10 m e 6m, mostrados na Tabela 1.

**Tabela 1** – Características das propriedades das ondas quando da passagem do ciclone extratropical.

<b>Profundidade (m)</b>	<b>Comprimento (m)</b>	<b>Velocidade orbital no fundo(m/s)</b>	<b>Altura da onda (m)</b>
20	121,2	0,5	2,5
10	92,3	1,0	3,4
6	73,6	1,5	4,0

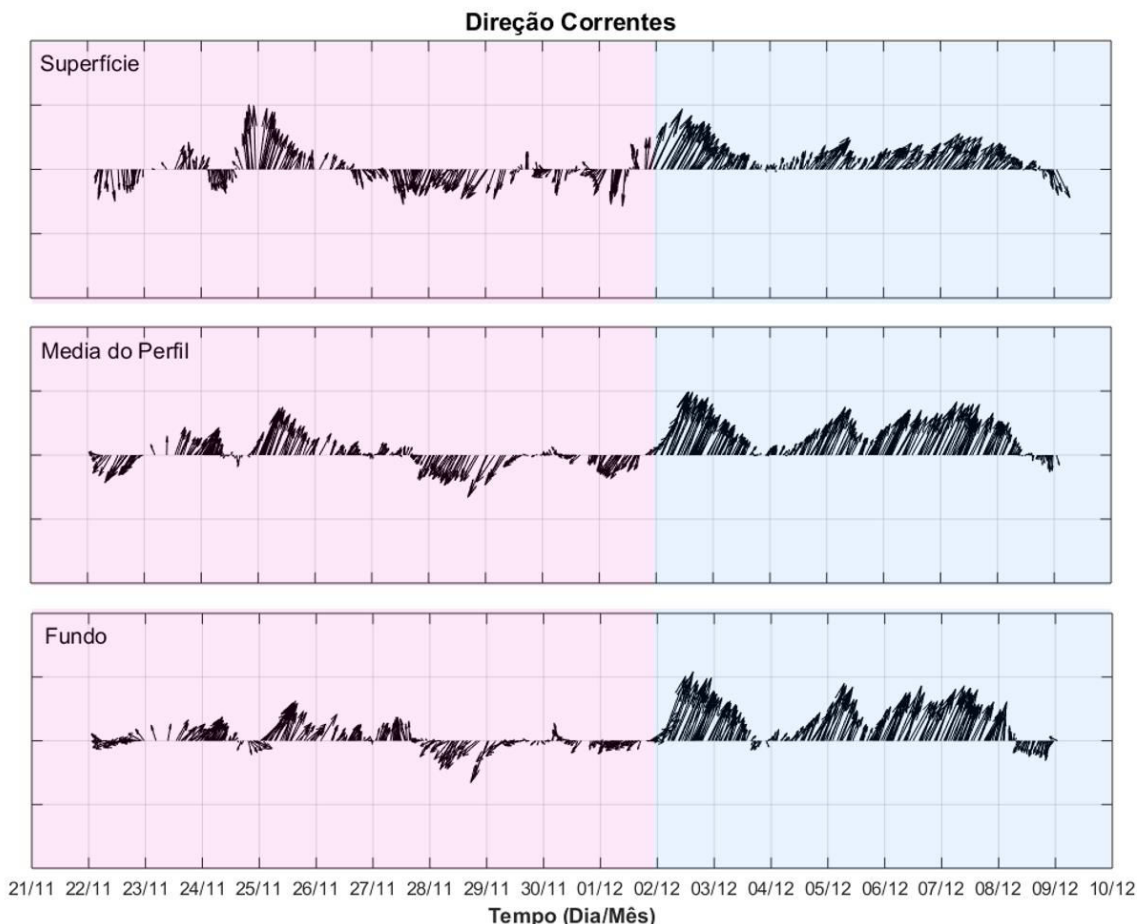
Deste modelo verifica-se que a onda aumenta de altura à medida que progride para áreas de menor profundidade e a velocidade de orbital de fundo se intensifica podendo causar erosão mesmo em fundos lamosos, ou, em função da pressão exercida, a liquefação de áreas do banco de lama. São possibilidades de que, infelizmente, não dispomos de informações suficientes para comprovar se isso ocorreu.

Após a passagem do ciclone extratropical, o sistema hidrodinâmico do complexo estuário Lagoa dos Patos/costa adjacente procura retornar ao seu equilíbrio normal, com águas estuarinas fluindo em direção ao oceano. Ao sair do estuário, as águas transportam o material particulado que se encontrava na coluna de água em direção ao oceano adjacente (pois o ciclone já passou), e a pluma da Lagoa dos Patos, que desaparece durante o evento, volta a se formar, lançando muito material no oceano adjacente.

A pluma da Lagoa dos Patos, ao se formar, vai girar no sentido sul-sudoeste pois os ventos do quadrante sul já encerraram e, agora, ventos de nordeste passam a dominar a região. Observe na Figura 1 que no dia 08 já ocorre a inversão do vento, que antes era de sul, passando para nordeste. Há pequena oscilação durante o dia 8, mas após o meio dia o vento era predominantemente de nordeste.

A Figura 2 mostra as correntes observadas na boia RS-05, fundeada aproximadamente 20 km da praia do Cassino. É visível a correlação entre ventos e correntes, independente da profundidade. Observe a inversão das correntes que ocorre no dia 08, após o término do ciclone.

Importante salientar que a deposição da lama fluida na praia do Cassino se deu durante o evento do ciclone e não após o mesmo.



**Figura 2** – Correntes obtidas na superfície, média e fundo com dados do correntógrafo instalado na boia RS-05, fundeada nas proximidades do sítio de despejo. Similarmente à figura 1, as correntes são mostradas em dois períodos distintos, de 22/11 a 02/12 (em rosa) e de 02/12 a 09/12 (em azul).

### **b) Considerações sobre as plumas documentadas em fotos aéreas**

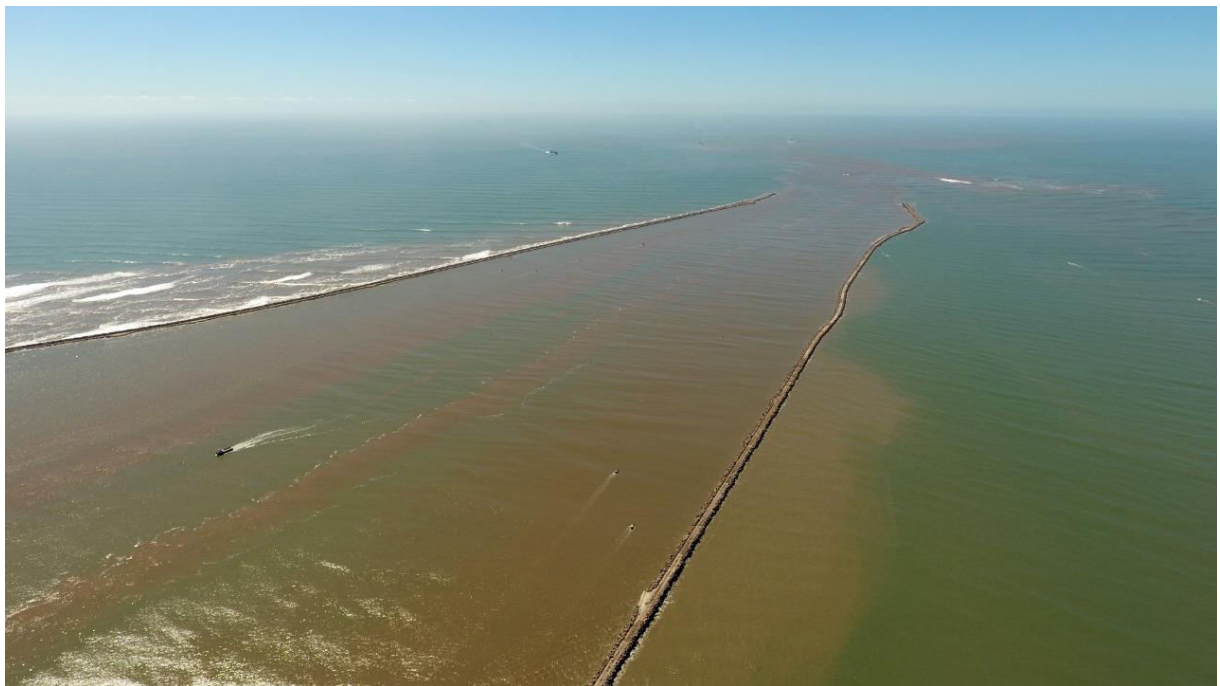
As fotos aéreas que serão apresentadas aqui nesta seção foram tiradas sequencialmente a partir de um drone no dia 08/12/2018 ao redor do meio dia. Fotos semelhantes a essas foram publicadas na internet pelo “Movimento SOS-Classino”.

A Figura 3 abaixo, serve como referência ao que pode acontecer de forma geral na área entre os molhes. Nela se observa a ressuspensão do fundo do canal pela passagem de um navio graneleiro que entra em direção ao porto. Duas franjas de material em suspensão ladeiam esta faixa de sedimentos causada pelo navio e estão associadas ao fluxo natural de água da Lagoa dos Patos em direção ao oceano. De acordo com os registros de velocidade e direção de correntes obtidos a partir de um perfilador acústico de correntes posicionado na profundidade de 16 m em frente da Estação dos Práticos da Barra este processo de vazante estava iniciando quando esta foto foi tirada. Em seu pico os valores de correntes atingiram máximos de 1.5 m/s (~3 nós) em toda a coluna de água. Nesse dia, os ventos eram de NNE com máximo de 3.8 nós de velocidade, o que corresponde a 1/3 da velocidade do vento durante o ciclone extratropical.



**Figura 3** - A ressuspensão de material depositado no canal de acesso por um navio graneleiro e fluxo de material em suspensão em direção ao mar da Lagoa dos Patos em 8/12/2018. Foto: Pablo Beck.

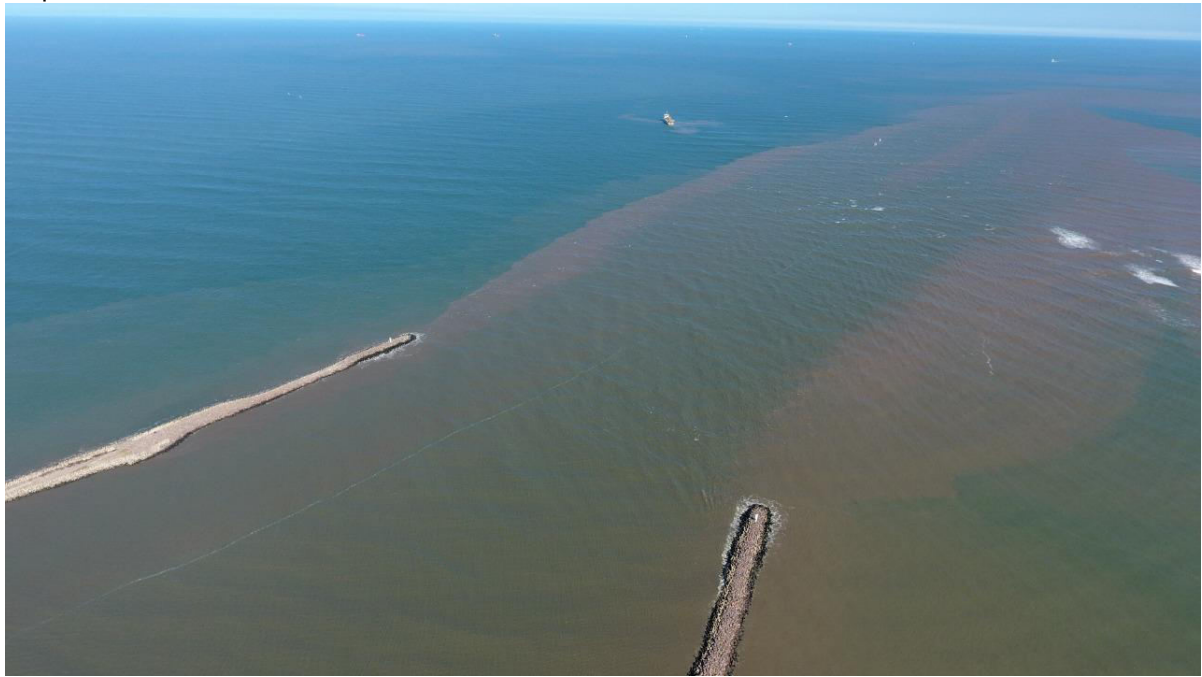
Na Figura 4, a fotografia do drone mostra a extremidade dos Molhes e pode-se ver o fluxo de água com material em suspensão adentrando a porção oceânica. O rastro de sedimentos em suspensão, deixado pelo navio, é também visível e se dirige para mar aberto, consequência das correntes de vazante. Observa-se, também, um fluxo de sedimentos ocorrendo de forma lateral aos molhes, mas é notável o que acontece no Molhe Oeste. Na boca dos molhes aparece uma zona de alta concentração de material em suspensão que será discutida a seguir.



**Figura 4** – Foto aérea da região os Molhes mostrando o fluxo de material em suspensão superficial em direção ao oceano em 08/12/2018. Foto: Pablo Beck.



Na Figura 5, a foto aérea mostra em detalhes a região da extremidade dos molhes. A pluma de sedimentos está sendo formada, se ajustando às correntes costeiras e ao regime de ventos que impera na região. Observa-se que este material em suspensão que, no início tem uma direção alinhada aos molhes (SE), aos poucos começa a girar para Sudoeste, se dividindo em alguns ramos. As manchas brancas são devidas à rebentação de ondas que ocorrem no banco das Três Marias. A foto da Figura 5 mostra também, a ressuspensão de sedimentos finos causada por um cargueiro à esquerda do limite da pluma



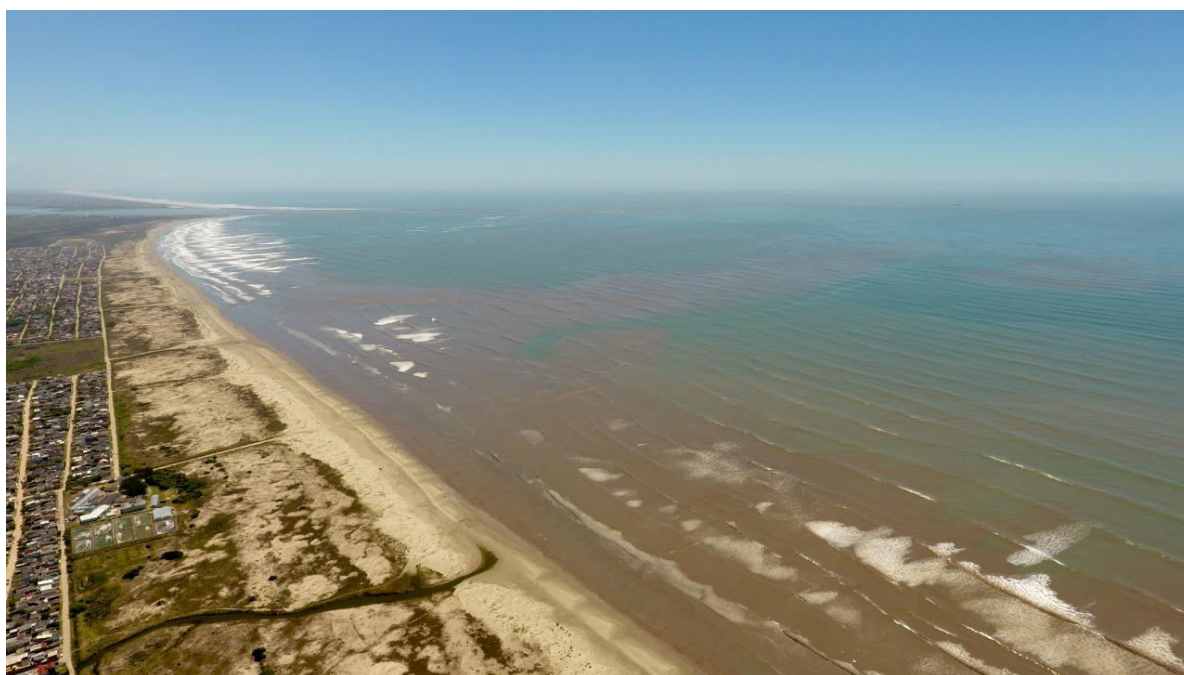
**Figura 5** - Foto aérea mostrando o comportamento da pluma de sedimentos saindo na extremidade dos Molhes em 08/12/2018. Foto: Pablo Beck.

A Figura 6 mostra a foto aérea na região do banco das Três Marias, local que se observa normalmente a quebra de ondas. A foto mostra o início do desenvolvimento da pluma da Lagoa dos Patos. Na foto, as seguintes observações podem ser feitas: no extremo superior aparece parte da pluma com giro para Sudoeste e, próximo à cabeça do Molhe Oeste uma língua de água com sedimentos dirigidos “aparentemente” para região em frente da Praia do Cassino.



**Figura 6** - Foto aérea de 08/12/2018 mostrando o comportamento da pluma de sedimentos na região do banco das Três Marias. Foto: Pablo Beck.

As Figuras 7 e 8 mostram a região da praia do Cassino com a presença de bolsões de lama e feições alongadas em direção ao oceano. Na Figura 6, não é possível distinguir a ligação entre essas feições alongadas com o que se observa na região do Molhes da Barra. Ou seja, a presença de ventos de nordeste, após a passagem do ciclone, inicia um movimento das águas para offshore. As feições alongadas, ao seu final, formam feições de “cogumelos” (ver Figura 8) que indicam que o movimento da pluma de sedimentos é no sentido da praia para o mar adentro. Na Figura 8, especificamente, linhas brancas são adicionadas para mostrar que o movimento das águas é no sentido da praia para o oceano aberto, pois não aparece plumas de sedimentos entre os molhes e essas feições alongadas.



**Figura 7** - Foto aérea de 08/12/2018 mostrando pluma de sedimentos e bolsões de lama na Praia do Cassino. Foto: Pablo Beck.

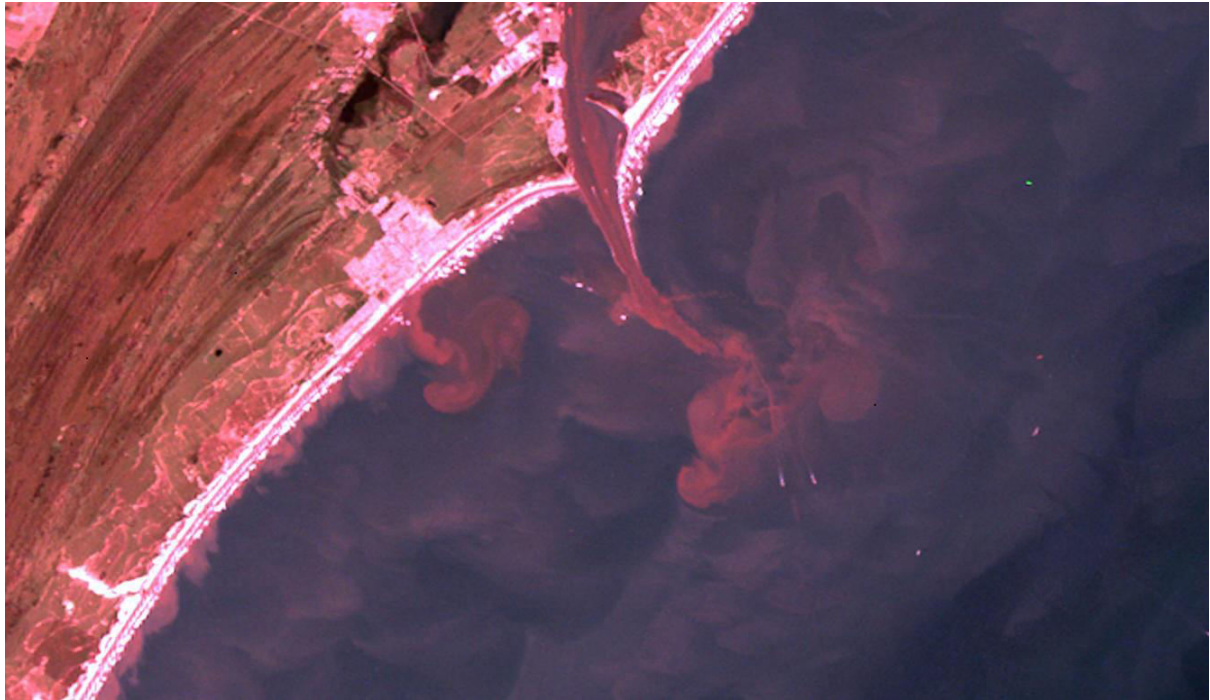


**Figura 8** – Foto aérea de 08/12/2018 mostrando pluma de sedimentos na porção próxima da Praia do Cassino. As linhas brancas mostram que o fluxo é possivelmente dirigido da praia para o oceano, com a formação típica de “cogumelos”. O retângulo amarelo mostra uma extensa área sem a presença de pluma de sedimentos. Adaptado da foto obtida pelo “Movimento SOS-Cassino”.

A imagem do satélite brasileiro CBERS-4, obtida entre 10 e 12h no dia 08/12/2018 (Figura 9) - mesmo dia das fotos aéreas -, mostra nitidamente a separação entre as plumas que são observadas nas fotografias aéreas. A pluma da Lagoa dos Patos está em fase de formação, com carga de material em suspensão saindo dos Molhes, dirigindo-se inicialmente para sudeste. Na região da Praia do Cassino, próxima ao bolsão de lama fluida, observa-se a pluma que se propaga da região praial para o oceano aberto e, à medida que se propagada para a região oceânica, a pluma forma feições na forma de “cogumelo” ou de “martelo”, consideradas comuns na hidrodinâmica de fluidos geofísicos.

Ou seja, as plumas mostradas nas fotos aéreas são de fontes distintas: uma decorre do material em suspensão saindo dos Molhes e a outra do material em suspensão saindo das proximidades da Praia do Cassino em direção ao mar.





**Figura 9** – Imagem do satélite brasileiro CBERS-4, obtida entre 10-12h em 08/12/2018, mostrando a pluma de sedimentos superficiais na saída dos Molhes e a pluma de sedimentos saindo da região da Praia do Cassino. Observe que as duas plumas possuem fontes diferentes.

Conclusão preliminar sobre as análises das fotos aéreas:

- a) a passagem do ciclone extratropical perturbou fortemente o sistema hidrodinâmico da região estuarina e costeira da Lagoa dos Patos. Águas oceânicas adentraram o estuário ao longo do evento. A lama fluida, presente na região próxima ao Bairro da Querência, foi lançada na praia devido a incursão de ventos e ondas do quadrante sul que predominaram por dias consecutivos;
- b) ao cessar o evento, a hidrodinâmica regional tende a voltar ao equilíbrio, com ventos agora soprando de nordeste, favorecendo ao aporte de águas que se encontravam na região estuarina e próximo da praia para o oceano aberto.
- c) material em suspensão que se encontrava retido no interior do estuário retorna ao oceano formando pluma de sedimentos superficiais que agora adentram o oceano.
- e) as plumas de sedimentos presentes nas fotos aéreas na região da praia do Cassino não mostram que o fluxo de sedimento percorreu o trajeto dos Molhes até a Praia. Pelo contrário, as formas de “cogumelos” que aparecem nas fotos, sugerem que o fluxo é dirigido da praia para oceano, o que é comprovado pela imagem de satélite CBERS-4 (Figura 9).
- d) material que se encontrava no fundo do estuário, na forma de lama fluida, pode ter saído após a passagem do evento, porém não pode ser facilmente detectado em fotografias aéreas ou imagens de satélites. A lama fluida possui densidade acima (~ 20%) da água do mar. Portanto ela se desloca ao longo do fundo oceânico, e é praticamente impossível de enxergá-la em fotografias aéreas ou imagens de satélites, exceto quando a lama já se encontra na antepraia e, ou seja, em regiões bem rasas.

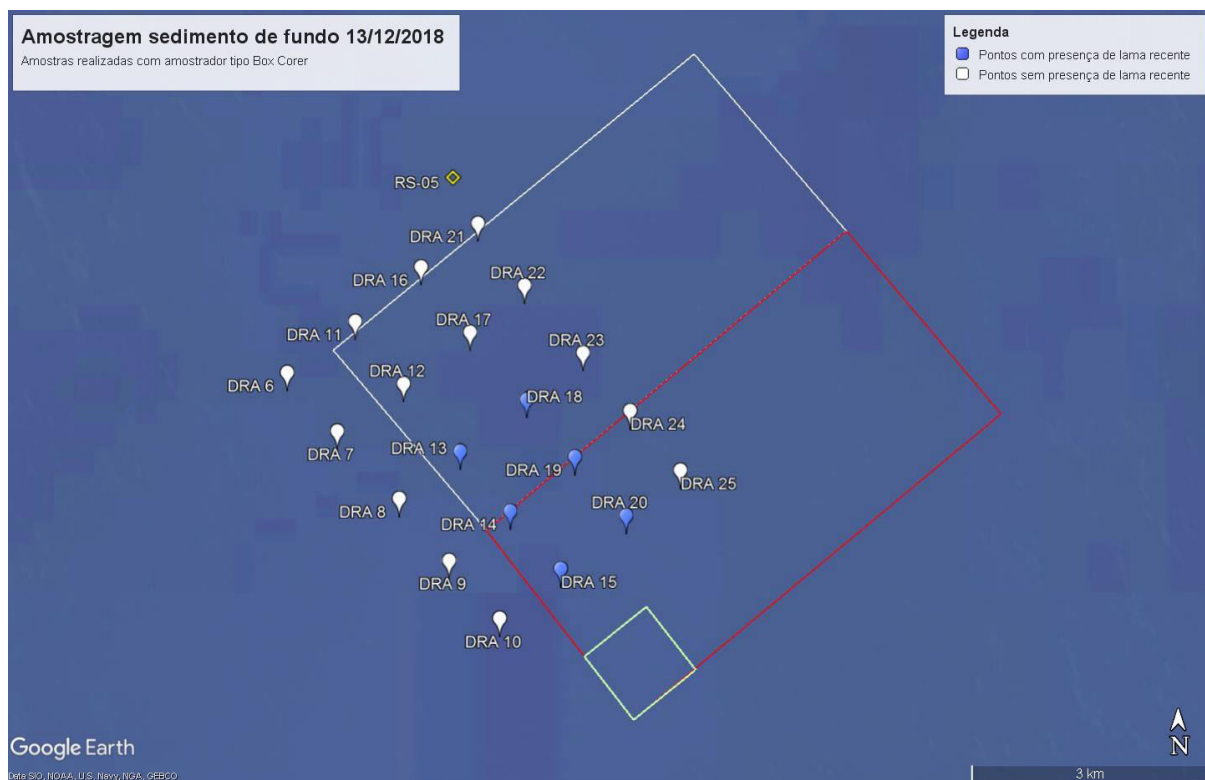
### **c) Sobre o sítio de despejo**

O sítio de despejo foi licenciado pelo IBAMA, anteriormente ao início do Programa de Monitoramento. Independentemente disso, uma análise da probabilidade do material depositado no sítio de despejo retornar à costa gaúcha foi realizada, baseada nos dados de correntes da boia SiMCosta RS-05. As análises mostraram o padrão já conhecido das correntes na região, com predominância de correntes



para sudoeste (paralelas à costa), com inversões para NE devidas a fatores meteorológicos e da presença da pluma de água menos salgada (ou mais doce) da Lagoa dos Patos. De forma resumida, as correntes dominantes são paralelas à linha de costa do Rio Grande do Sul. Aproximadamente 11% das correntes médias são dirigidas para o quadrante N-NO, que possuem a tendência de levar material em suspensão ou de fundo para a costa, porém análises mais detalhadas mostram que elas são relativamente baixas, e que não poderiam transportar material do sítio de despejo, especialmente lama fluida, diretamente para a zona do Cassino. Com base nas correntes médias de dezembro de 2016 a outubro de 2017, foram feitas estimativas da trajetória percorrida pela pluma do material dragado e lançado no sítio de despejo. Os resultados mostram que essas plumas não se deslocam diretamente para a região do Cassino. Como a boia RS-05 está distante aproximadamente 6,5km do sítio de despejo, o que faz com que a distância a ser percorrida pela pluma até chegar à região praiaral seria ainda maior, tornando, portanto, mais difícil este processo.

Em 13/12/2018, as condições de mar permitiram para uma visita do grupo SiMCosta/FURG ao sítio de despejo. Amostras de sedimentos do fundo mar foram coletadas com box-core, sendo que das 20 coletas realizadas, em somente 6 (seis) locais foram encontradas lama fluída (Figura 10) e próximos do sítio de despejo. O grupo SiMCosta/FURG está realizando o monitoramento do bolsão de lama ao redor do sítio de despejo nesta semana. Os resultados serão conhecidos em breve.



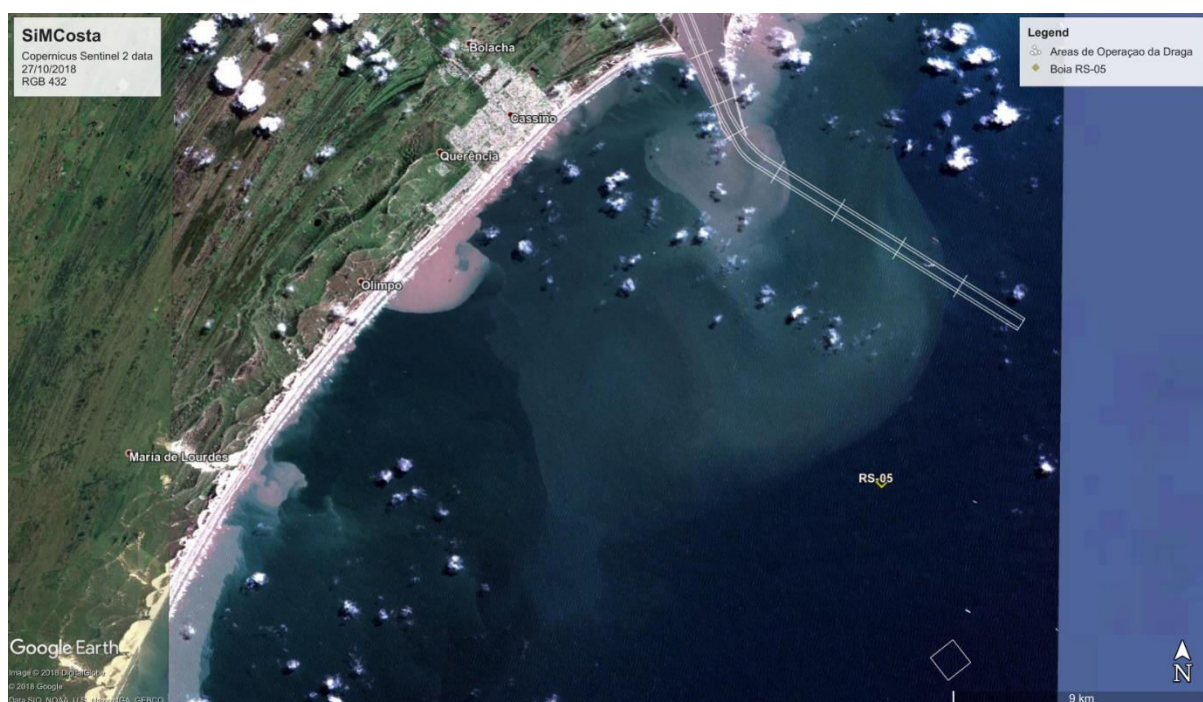
**Figura 10** – Amostragem de sedimentos de fundo, realizado em 13/12/2018, nas proximidades do sítio de despejo (pequeno quadrado no vértice inferior do retângulo em vermelho). Os locais onde foram encontrados lama fluída estão marcados em azul. Em branco estão os locais onde não há lama fluída.

#### d) Análise de imagens de satélites da região sob investigação

A seguir apresentamos uma série de imagens obtidas por sensores a bordo dos satélites da missão Copernicus Sentinel-2, que compreende o uso simultâneo de dois satélites em órbitas polares, porém desfasados de 180°. Essa configuração permite a aquisição de imagens da cor do mar em regiões

costeiras, com resolução espacial de 10m. As Figuras de 11 a 19 mostram as imagens de composição colorida dos dias 27/10 (antes do início da dragagem), 04/11, 09/11, 21/11, 06/12 e 09/12. Em todas as imagens acima, pode-se observar o material particulado em suspensão em diversos locais, o que confere uma tonalidade diferente à cor do mar, distinguindo assim águas costeiras de oceânicas.

Observe que a imagem de 27/10 (Figura 11), portanto antes do início da dragagem, há material em suspensão nas proximidades da Praia do Cassino. A pluma da Lagoa dos Patos está mais restrita à região dos Molhes. Nesta imagem, observa-se uma zona de alta turbidez entre os locais marcados como Maria de Lourdes, Olimpo e Querência. Pode-se ver a complexidade de todo este processo com uma pluma recém-formada na desembocadura da Lagoa dos Patos enquanto que outra ainda está se dissipando. Outro aspecto importante é quando se dá um *zoom* nessa imagem com foco no bolsão de alta turbidez (Figura 12), se verifica algumas regiões com várias linhas de quebras de ondas e outras com menor número, mas não se pode afirmar que já existia bolsão de lama na região.



**Figura 11** – Imagem do dia 27/10/2018, antes do início das atividades da Dragagem.



**Figura 12** – Zoom da Imagem do dia 27/10/2018, antes do início das atividades da Dragagem. Linhas vermelhas apontam regiões com distintas linhas de quebra de ondas.

A imagem de satélite do dia 04/11 (seis dias após o início da dragagem, Figura 13), após análises mais minuciosas, mostra aparente atenuação das ondas em alguns pontos da praia do Cassino, mas não certeza de presença de lama fluida submersa.





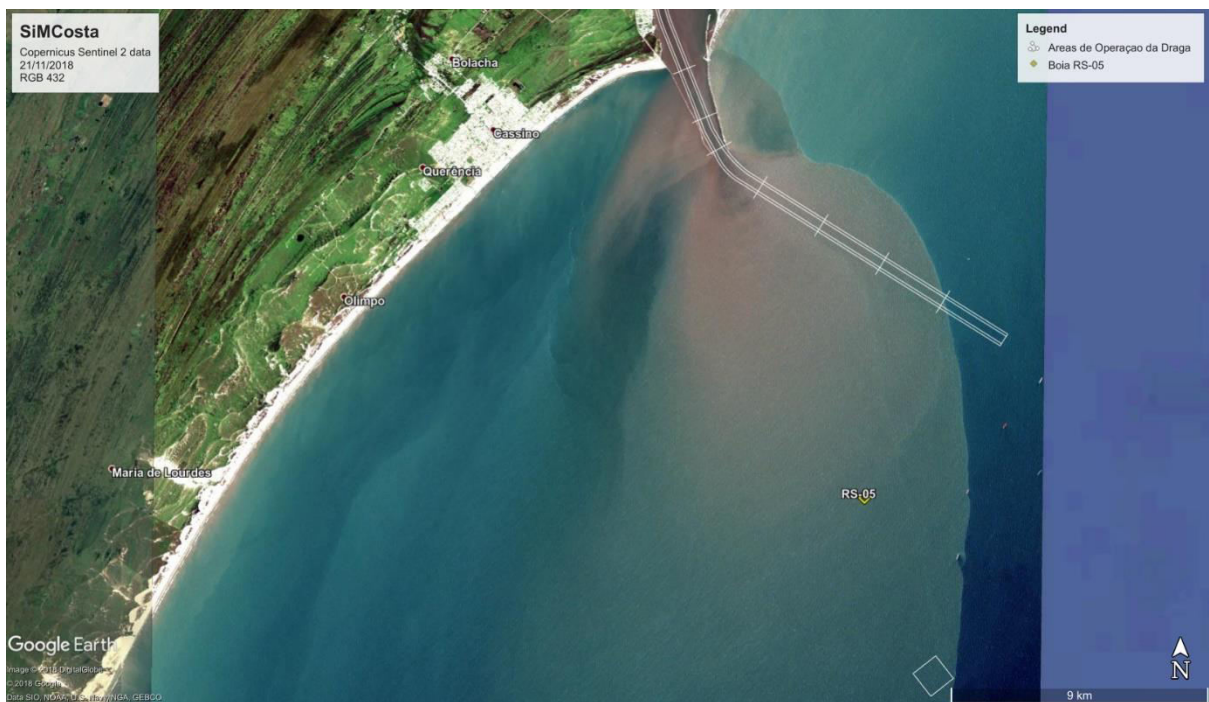
**Figura 13** – Imagem de 04/11/2018 do satélite Sentinel 2 MSI RGB 432 (composição colorida), com resolução espacial de 10m. Análise detalhada da imagem mostra atenuação das ondas na região do bairro Querência/Cassino.

As imagens do dia 09/11 (Figura 14) e 21/11 (Figura 15) mostram a pluma da Lagoa em sua plenitude, com forte fluxo para a região oceânica adjacente. A imagem do dia 06/12 (Figura 16) mostra a destruição da pluma por fortes ventos de sul e correntes dirigidas para o setor norte. A tensão de cisalhamento é forte para o aparecimento de feições paralelas à praia. A imagem do dia 09/12 (Figura 17) mostra o retorno da pluma da Lagoa dos Patos, aproximadamente 3 dias após a passagem do ciclone extratropical.

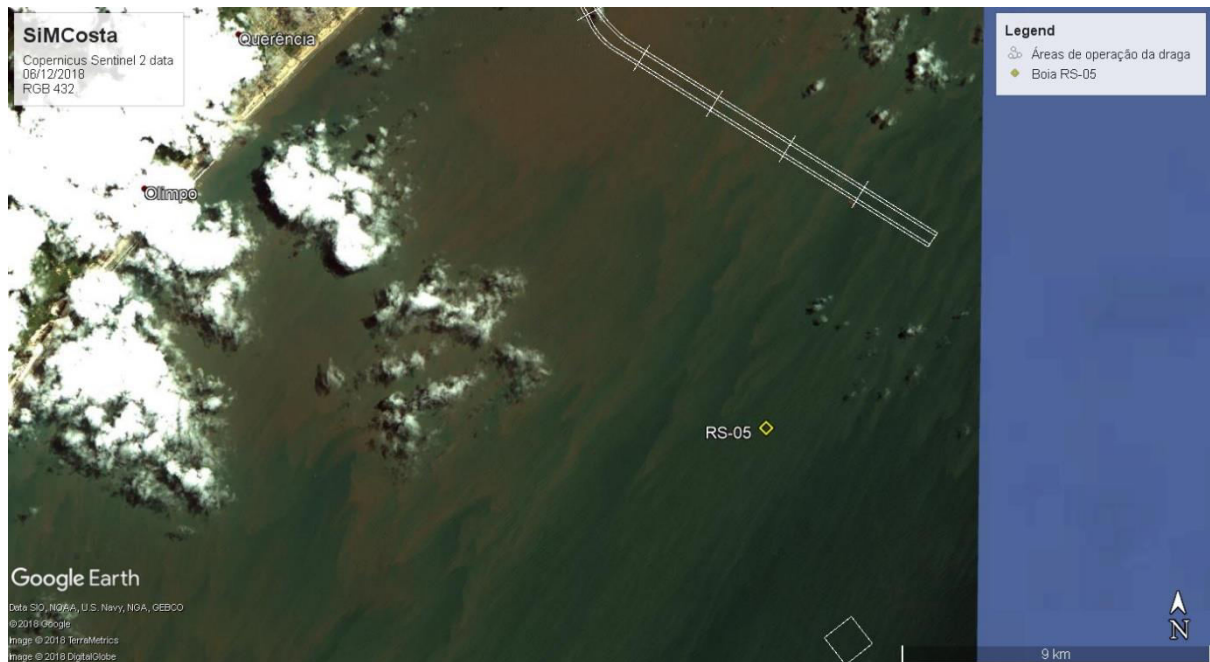




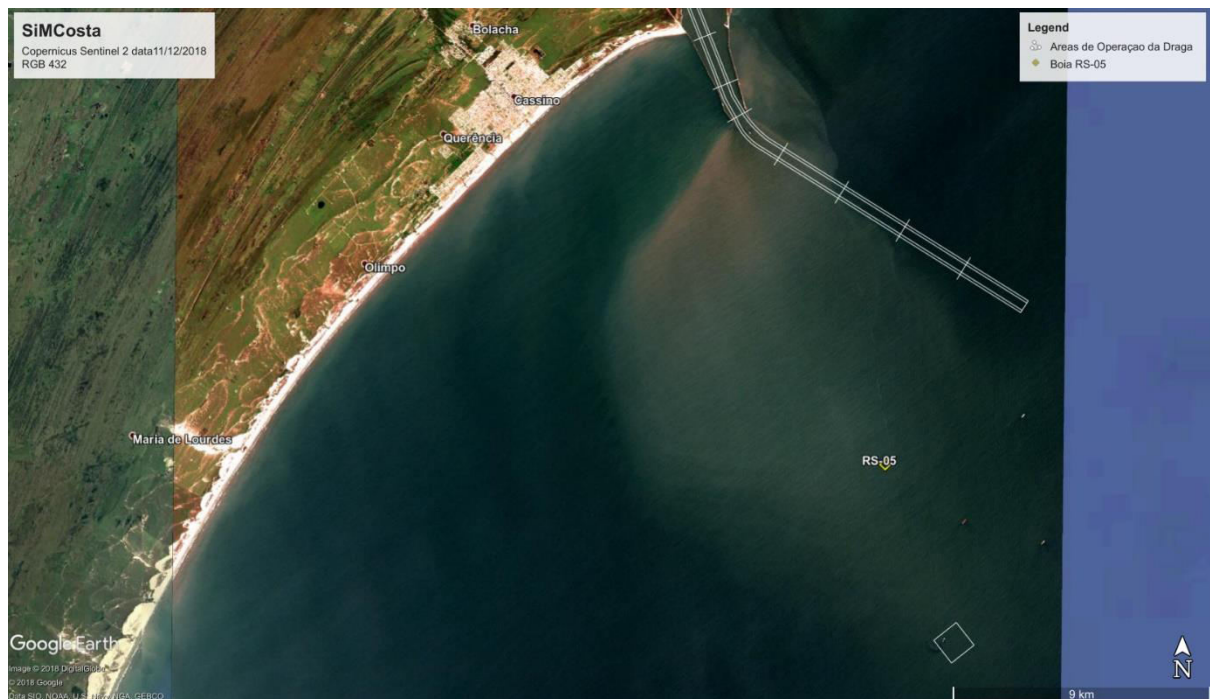
**Figura 14** – Imagem do dia 09/11/2018.



**Figura 15**– Imagem do dia 21/11/2018.



**Figura 16** – Imagem do dia 06/12/2018, durante o evento do ciclone extratropical.



**Figura 17** – Imagem do dia 11/12/2018, após o evento do ciclone extratropical.

As imagens de satélites mostradas acima demonstram a complexidade do sistema hidrodinâmico e de transporte de sedimentos (coesivos e não-coesivos) nas imediações da costa da cidade do Rio Grande.

#### e) Conclusões preliminares

Considerando os aspectos abordados nesta nota, é possível apresentar as seguintes conclusões preliminares sobre a operação de dragagem em curso no Porto de Rio Grande e o evento de deposição de lama na praia do Cassino:

- A deposição de lama na Praia do Cassino ocorrida em 07/12/2018 foi causada pela ação do ciclone extratropical que influenciou fortemente o regime de ventos e correntes entre 02 e 08/12/2018, alterando a dinâmica hidrodinâmica e de transporte de sedimentos do estuário da Lagoa dos Patos e costa adjacente;
- As imagens de satélites dão sinais de atenuação de ondas na região antepraial do Cassino, porém não conclusivas sobre a presença de bolsões de lama fluida antes do início das operações de dragagem;
- As análises realizadas até o momento não indicam a ocorrência de transporte de sedimentos do atual sítio de despejo ou mesmo contribuição do mesmo para o bolsão de lama da região antepraial do Cassino;
- A origem precisa da lama que atingiu a praia do cassino em 07/12/2018 e a eventual contribuição do processo de dragagem continuam sob investigação pelo Programa de Monitoramento SiMCosta/FURG.

Cabe ainda destacar que o volume de análises e conclusões obtidas em pouco mais de um mês é resultado do trabalho dedicado de um conjunto de pesquisadores e estudantes envolvidos nas atividades do Programa de Monitoramento SiMCosta/FURG e que já vem produzindo avanços importantes em pouco tempo de monitoramento.

Estes avanços contribuirão significativamente para a compreensão da complexa hidrodinâmica do estuário da Lagoa dos Patos e para o aprimoramento deste e dos próximos processos de dragagem do Porto do Rio Grande.

Rio Grande, 19 de dezembro de 2018

Equipe SiMCosta/FURG