



# FLUXOS GRAVITACIONAIS DE SEDIMENTOS SUSTENTADOS POR ONDAS: SUA IMPORTÂNCIA COMO AGENTES NO TRANSPORTE SEDIMENTAR COSTEIRO

*Julia Machado Pelegrini<sup>1</sup> & Eduardo Puhl<sup>2</sup>*

**ABSTRACT** – The coastal zone is subject by several sources and sinks of sediment which are influenced by different factors: waves, current, tides, wind, etc. Understanding the effect of these elements into the coastal zone is essential to coastal management. Density currents can be supported by the action of waves and currents in order to transport sediment away from the coast; these flows were observed in field campaigns and are called Wave-Supported Sediment Gravity Flows. They start acting after high energy storms which suspend the sediment close to the shore, after this a density current is formed taking out sediment from the coast. The lack of sediment at the coast can lead to several problems: shoreline recession, loss of natural habitats, increasing the frequency of coastal flooding, etc. In this work physical modeling is used to investigate the ignition and development of these currents. The experiment used a small wave channel 0.98 m long equipped with a manual wave generator. Different waves were formed according to the frequency and amplitude of the oscillation of the wave generator. At the other end of the channel an artificial beach was built using granulated Melamine. At the end is observed that the generation of the flow is helped by high frequency waves, high slopes at the shore and by varying wave energy gradually along the experiment. Besides improving the knowledge of the dynamics of the sediment at the coast, these results can help numerical models at validation and calibration steps.

**Palavras-Chave** – dinâmica costeira, transporte de sedimentos, modelagem física.

## 1 - INTRODUÇÃO

O movimento dos sedimentos na zona costeira é muito complexo pois envolve diversos fatores, tais como: ondas, correntes litorâneas, vento, tectônica, geologia e geografia do ambiente (Alfredini e Arasaki, 2009). Um dos agentes de transporte de sedimentos são as chamadas correntes de densidade que retiram parte do sedimento da zona costeira em direção a águas profundas. Neste caso, dificilmente o sedimento consegue retornar à zona costeira, acarretando um desequilíbrio negativo (erosão costeira) no balanço sedimentar da costa, podendo ocasionar efeitos negativos na costa: recuo da linha de praia, perda de habitats naturais, maior frequência

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul, [julia.pelegrini26@gmail.com](mailto:julia.pelegrini26@gmail.com), +55 51 34706332

<sup>2</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Núcleo de Estudos de Correntes de Densidade, Departamento de Hidromecânica e Hidrologia, [eduardo.puhl@ufrgs.br](mailto:eduardo.puhl@ufrgs.br), 55 51 3308 7596



de inundações, etc. As correntes de densidade são fluxos gravitacionais cujo movimento é governado pela diferença de densidade com o fluido ambiente, no caso exemplificado, causada pela presença de sólidos dissolvidos.

No ambiente costeiro, as correntes de densidade são favorecidas pelas ondas de tempestade que colocam o sedimento em suspensão e, na calmaria, formam um fluxo gravitacional que pode carregar o sedimento para grandes profundidades (Wright et al., 2001). Estas correntes, chamados Fluxos Gravitacionais de Sedimentos Sustentados por Ondas (FGSSO), diferenciam-se das correntes de densidade, pois precisam de alguma fonte de energia adicional, como as ondas, as marés ou correntes para realizar o transporte de sedimento (Parsons et al., 2007). Este transporte é realizado por curtas distâncias, pois à medida que o fluxo gravitacional oscilatório se direciona para águas profundas, as velocidades orbitais junto ao fundo diminuem e, combinadas com a diminuição da declividade em perfis praias côncavos, tendem a gerar depósitos na plataforma.

Várias evidências em campo atestaram a ação dos FGSSO, dentre os quais estão as campanhas de campo no Delta do Amazonas (Sternberg et al., 1996), no Rio Amarelo (Wright et al., 1990), no Rio Pó (Sherwood et al., 2004) e no Rio Eel (Puig et al., 2004). Nesta última, foram observados depósitos gerados pela cheia fluvial do rio Eel até a profundidade de 40 m, inclusive testemunhos obtidos por perfuração encontraram depósitos espessos na região de profundidade 50-100 m (Wheatcroft e Borgeld, 2000). Estas evidências sugerem que houve um processo de ressuspensão dos sedimentos na plataforma devido à correntes e/ou ondas (Harris et al., 2004).

A investigação das condições de iniciação e a interação das ondas e correntes no desenvolvimento dos FGSSO vêm sendo estudada através de modelos teóricos (e.g. Wright et al., 2001; Friedrichs e Scully, 2007) e modelos numéricos (e.g. Harris et al., 2004; Hsu et al., 2009). Porém, devido às complexidades inerentes da modelagem numérica da camada limite turbulenta com sedimento em suspensão, diversas simplificações e parametrizações devem ser realizadas (Hsu et al., 2009). Logo, dados de campo ou de laboratório são necessários para calibração e validação de tais modelos. Porém, a coleta dos dados em campo necessita de grandes esforços (e.g. equipe, recursos, equipamentos e transporte), além de dependerem a imprevisibilidade do fenômeno. Já a modelagem física tem vantagens como a observação direta do processo, o controle das principais condições e fatores e, em geral, a fácil repetição do experimento. Porém, pouco são os estudos realizados em laboratório (van Kessel e Kranenburg, 1998; Lamb e Parsons, 2005) com este fim, deixando uma lacuna a ser preenchida.

Neste sentido, este trabalho vem suprir a deficiência de observações em laboratório deste tipo de fenômeno, buscando obter parâmetros qualitativos e quantitativos para geração e

desenvolvimento dos Fluxos Gravitacionais de Sedimentos Sustentados por Ondas (FGSSO). Através do uso do modelo físico irá se buscar identificar os diferentes fatores que favorecem a ignição destes fluxos.

## 2 - MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos de laboratório foram baseados nas observações em campo de FGSSO, os quais associam a sua ignição por eventos de alta energia, ressuspensão do sedimento que se encontra em águas rasas. Depois, em períodos de calmaria, a ação das ondas e correntes, juntamente com a gravidade, mantem o transporte declive abaixo.

O modelo físico utilizado para as simulações físicas (Figura 1a) foi o Canal de Ondas de Pequena Escala, onde todos os ensaios foram realizados. Este canal tem 40 cm de altura, 15 cm de largura e 98 cm de comprimento, e na extremidade há um batedor manual de 45 cm de altura e largura pouco menor do que a largura do canal, com perfeito encaixe para a geração das ondulações. O canal é estanque e, na parede traseira, uma escala centimétrica serve de referência para as medidas de distância. O sedimento escolhido para as simulações (Figura 1b) foi a Melamina, a qual possui densidade 1,5, ou seja, próxima da água; porém maior, facilitando sua sedimentação. A granulometria se encontra na faixa da areia grossa, com diâmetro 50% de 390  $\mu\text{m}$ .

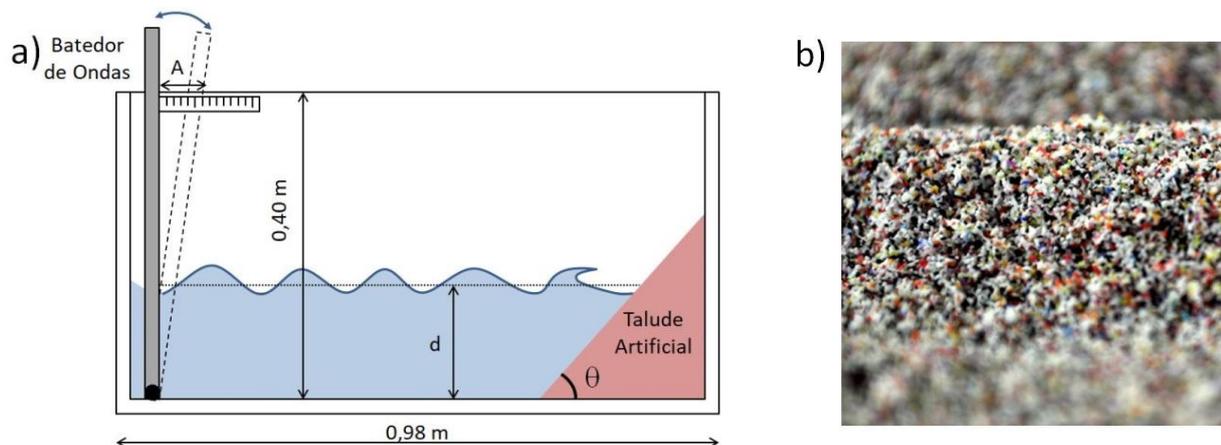


Figura 1 – (a) Esquema do Canal de Ondas e Parâmetros das Simulações (b) Melamina granulada (fonte: autoria própria).

A metodologia do ensaio consistia em, anteriormente ao experimento, construir um talude de sedimentos sintético com inclinação mais próxima ao ângulo de repouso natural do sedimento (30°). Depois, o canal era cheio lentamente com água limpa sem que houvesse modificação no talude. O início do experimento se dava pela geração das ondas com o batedor manual,



movimentando-se com frequência ( $f$ ) e amplitudes ( $A$ ) pré-definidas, controladas por um metrônomo (em bpm: batidas por minuto) e uma régua instalada no canal, respectivamente. A partir desta interação, observou-se a formação, ou não, de um Fluxo Gravitacional de Sedimentos Sustentado pelas Ondas (FGSSO). Os ensaios tinham duração média de 3 minutos, nos quais uma série de aprox. 200 ondas incidia contra o talude. Os critérios para o fim dos ensaios foram ou a erosão da parte subaérea do talude ou erosão do talude incipiente.

Foram feitos 8 ensaios principais (Tabela 1), nos quais diferentes parâmetros foram alterados e sua influência na ignição e desenvolvimento dos FGSSO foi observada.

Tabela 1 – Ensaios realizados e os parâmetros utilizados.

| Exp. | Frequência do Batedor, $f$ [bpm] | Amplitude do batedor, $A$ [cm]   | Inclinação do Talude, $\theta$ [°] | Profundidade, $d$ [cm] |
|------|----------------------------------|--|------------------------------------|------------------------|
| 1    | 80                               | Início em 7 cm, variando abruptamente até 14 cm                        | 29,1                               | 10                     |
| 2    | 80                               | Início em 7 cm, variando gradualmente até 14 cm e regredindo para 7 cm | 29,1                               | 10                     |
| 3    | 80                               |  | 25,3                               | 10                     |
| 4    | 80                               |  | 25,3                               | 7                      |
| 5    | 80                               |  | 25,3                               | 8                      |
| 6    | 80                               |  | 25,3                               | 16                     |
| 7    | 80                               |  | 29,1                               | 10                     |
| 8    | 60                               |  | 29,1                               | 10                     |

### 3 - RESULTADOS

Foram analisados cinco diferentes parâmetros no qual foram modificados através das simulações: a amplitude do batedor de ondas, a frequência do batedor de ondas, o ângulo de inclinação do talude, a profundidade da coluna d'água e a circulação do canal.

Inicialmente, observou-se que a manutenção de uma mesma amplitude no batedor não condicionada a formação dos FGSSO, portanto foi implementada uma variação na amplitude do batedor ( $A$ ) ao longo do experimento. Desta maneira, buscou-se simular a variação de energia de uma tempestade natural. No Experimento 1 foi realizada uma variação abrupta, ou seja, depois de cerca de 1 minuto de incidência de ondas com  $A=7$  cm, bruscamente variou-se a amplitude para  $A=14$  cm. Com a alteração da amplitude foi formada um FGSSO, porém houve forte reflexão de ondas dentro do canal. Nos outros experimentos, a variação aplicada era gradual, ou seja, iniciava-se em  $A=7$  cm, depois de 10 oscilações, aumentava-se a amplitude em 1 cm, assim sucessivamente até que alcançava-se  $A=14$  cm. Posteriormente, reduzia-se novamente a amplitude até  $A=7$  cm, o que favoreceu a formação dos FGSSO e reduzindo a reflexão de ondas no canal.

Analisando a frequência do batedor de ondas ( $f$ ) nos Experimentos 2 e 8, observou-se que no primeiro experimento, que tem uma frequência de 80 bpm, formou-se uma corrente de densidade, como demonstra a Figura 2. Da mesma forma, no Experimento 8 (60 bpm) foi formado um FGSSO, porém a suspensão de sedimentos devido às ondas foi reduzida, ou seja, a diminuição da frequência é desfavorável para a formação das correntes de densidade, visto que uma maior concentração de sedimentos em suspensão tende a favorecer a formação dos FGSSO.

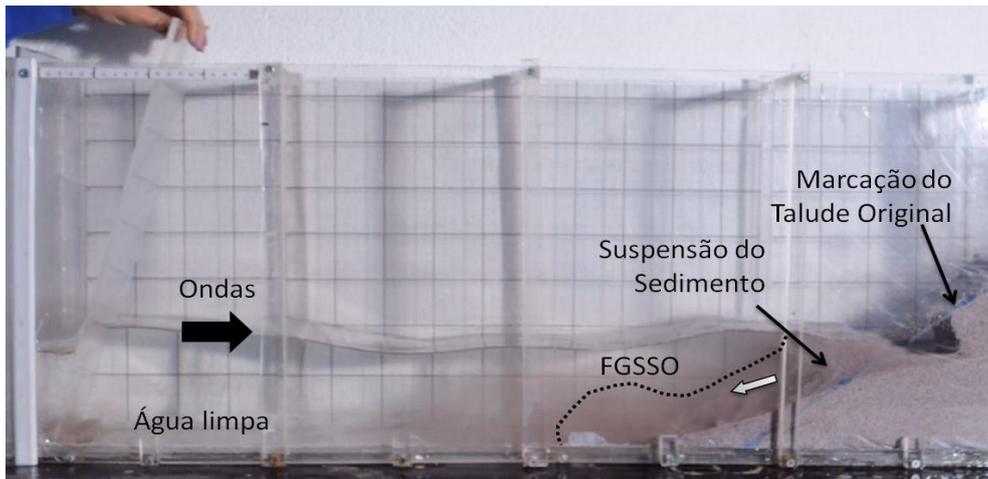


Figura 2 – Formação da corrente de densidade no experimento 2 (fonte: autoria própria).

O parâmetro do ângulo de inclinação do talude ( $\theta$ ) foi analisado através do Experimento 3, onde diminuiu-se  $\theta$  em  $4^\circ$ . Essa diminuição foi muito importante, pois apesar de terem sido mantidos constantes os outros fatores do Experimento 2, não formou-se um FGSSO, mesmo ocorrendo erosão no talude, como demonstra a Figura 3. Ou seja, o que menor o ângulo de inclinação da melamina é mais desfavorável a formação de correntes de densidade.



Figura 3 – Registro do final Experimento 3, onde não ocorreu a formação de FGSSO, apesar da suspensão do sedimento junto ao talude (fonte: autoria própria).

A alteração da profundidade da coluna d'água no canal foi analisada nos Experimentos 4, 5 e 6, onde, nos dois primeiros, há uma redução na coluna d'água e no último há um aumento na coluna d'água. Notou-se que com a diminuição da coluna d'água (Figura 4a) as ondas geradas pelo batedor são de menores dimensões, o que não favoreceu a formação dos FGSSO. No experimento de maior lâmina de água (cobrindo o talude), não houve (Figura 4b) formação da corrente, o que pode estar relacionado com a menor velocidade orbital junto ao talude. Ou seja, a profundidade da coluna d'água é desfavorável para a formação de correntes de densidade.

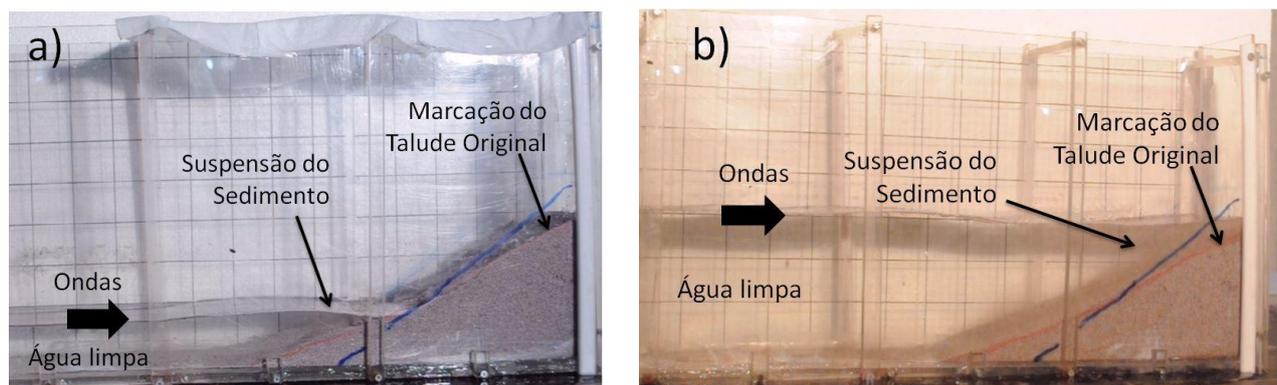


Figura 4 – (a) Experimento 4 sendo executado; (b) Experimento 6 sendo executado (fonte: autoria própria).

Por último a circulação do canal foi analisada a partir da hipótese de que a corrente estaria sendo afetada pela velocidade de deriva no canal. Assim no Experimento 7, foi injetado corante em alguns pontos ao longo do canal, buscando visualizar a circulação interna. A análise da Figura 5 mostra que não há movimento significativo capaz de influenciar a geração e desenvolvimento dos FGSSO. Logo, a velocidade de deriva dentro do canal não teve influência na formação de corrente de densidade.

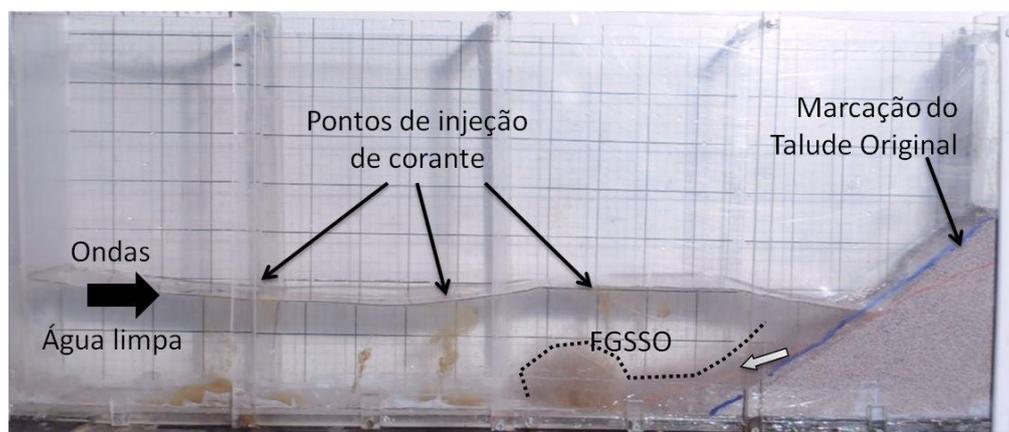


Figura 5 – Registro do Experimento 7, indicando a formação do FGSSO e os pontos de injeção de corante para investigação da circulação interna do canal (fonte: autoria própria).



## 4 - CONCLUSÃO

Foi possível desenvolver uma metodologia científica para geração dos FGSSO em laboratório, observando-se a influência dos diferentes parâmetros experimentais. O desenvolvimento da metodologia se deu a partir das observações do fenômeno em campo, adaptando os parâmetros experimentais para permitir a formação dos Fluxos Gravitacionais de Sedimentos Sustentados por Ondas (FGSSO). Os principais fatores que influenciam positivamente na formação dos fluxos são: maior frequência do batedor, maior inclinação do talude e variação gradual da amplitude do batedor. Além disso, não foi observada a influência da velocidade de deriva para geração e desenvolvimento dos FGSSO.

### BIBLIOGRAFIA

- ALFREDINI, P. & ARASAKI, E. (2009). *Obras e gestão de portos e costas : a técnica aliada ao enfoque logístico e ambiental*. 2. ed. rev. e ampl. São Paulo : Edgard Blucher.
- BATES, C.C. (1953). *Rational Theory of Delta Formation*. AAPG Bulletin 37.
- FRIEDRICH, C.T., AND SCULLY, M.E., 2007, Modeling deposition by wave-supported gravity flows on the Po River prodelta: from seasonal floods to prograding clinofolds: *Continental Shelf Research*, v. 27, p. 322–337.
- HARRIS, C. K., P. A. TRAYKOVSKI, AND R. W. GEYER (2004), *Including a nearbed turbid layer in a three-dimensional sediment transport model with application to the Eel River shelf, northern California*, in *Proceedings of the Eighth Conference on Estuarine and Coastal Modeling*, edited by M. Spaulding, pp. 784– 803, Am. Soc. of Civ. Eng., Reston, Va.
- HARRIS, C. K., P. A. TRAYKOVSKI, AND W. R. GEYER (2005), *Flood dispersal and deposition by near-bed gravitational sediment flows and oceanographic transport: A numerical modeling study of the Eel River shelf, northern California*, *J. Geophys. Res.*, 110, C09025, doi:10.1029/2004JC002727.
- HUGHES, S.A. (1993). *Physical models and laboratory techniques in coastal engineering*. Singapore : World Scientific.
- HSU, T.-J., P. A. TRAYKOVSKI, AND G. C. KINEKE (2007), *On modeling boundary layer and gravity-driven fluid mud transport*, *J. Geophys. Res.*, 112, C04011, doi:10.1029/2006JC003719.
- HSU, T.-J., C. E. OZDEMIR, AND P. A. TRAYKOVSKI (2009), *High-resolution numerical modeling of wave-supported gravity-driven mudflows*, *J. Geophys. Res.*, 114, C05014, doi:10.1029/2008JC005006.
- KINEKE, G.C.; STERNBERG, R.W.; TROWBRIDGE, J.H. & GEYER, W.R.. (1996). *Fluid mud processes on the Amazon continental shelf*. *Continental Shelf Research* 16:667–696.
- LAMB, M. P., AND J. D. PARSONS (2005), *High-density suspensions formed under waves*, *J. Sediment. Res.*, 75, 386–397, doi:10.2110/jsr.2005.030
- MULDER, T. & SYVITSKI, J.P.M. (1995). *Turbidity currents generated at river mouths during exceptional discharges to the world oceans*. *J. Geol.* 103:285–299.
- MULDER, T.; SYVITSKI, J.P.M.; MIGEON, S.; FAUGERES, J.C. & SAVOYE, B., (2003), *Marine hyperpycnal flows: Initiation, behavior and related deposits: A review*. *Marine and Petroleum Geology* 20(6–8):861–882.



- PARKER, G. (1982). *Conditions for the ignition of catastrophically erosive turbidity currents*. *Marine Geology* 46: 307 – 327.
- PARSONS, J. D., FRIEDRICHS, C. T., MOHRIG, D., TRAYKOVSKI, P., IMRAN ET AL. (2007). *The mechanics of marine sediment gravity flows*. In: Nittrouer, C., Austin, J., Field, M., Steckler, M., Syvitski, J. and Wiberg, P. (Eds.) *Continental Margin Sedimentation: Transport to Sequence*, Wiley-Blackwell.
- PUIG, P.; OGSTON, A.S.; MULLENBACH, B.L.; NITTROUER, C.A.; PARSONS, J.D. & STERNBERG, R.W., (2004) “*Storm-induced sediment gravity flows at the head of the Eel submarine canyon, northern California margin*”. *Journal of Geophysical Research* 109(C3):(19-1–19-10).
- SHERWOOD, C. R., ET AL. (2004), *Sediment dynamics in the Adriatic Sea investigated with coupled models*, *Oceanography*, 17, 58– 69.
- STERNBERG, R.W.; CACCHIONE, D.A.; PAULSON, B.; KINEKE, G.C. & DRAKE, D.E., (1996). *Observations of sediment transport on the Amazon subaqueous delta*. *Continental Shelf Research* 16:697–715.
- TRAYKOVSKI, P.; GEYER, W.R.; IRISH, J.D. & LYNCH, J.F., (2000). “*The role of wave-induced density-driven fluid mud flows for cross-shelf transport on the Eel River continental shelf*”. *Continental Shelf Research* 20:2113–2140.
- VAN KESSEL, T., AND C. KRANENBURG (1998), *Wave-induced liquefaction and flow of subaqueous mud layers*, *Coastal Eng.* 34: 109–127.
- WHEATCROFT, R. A., AND J. C. BORGELD (2000), *Oceanic flood deposits on the northern California shelf: Large-scale distribution and small-scale physical properties*, *Cont. Shelf Res.*, 20, 2163 – 2190, doi:10.1016/S0278-4343(00)00066-2.
- WRIGHT, L.D. & FRIEDRICHS, C.T. (2006). “*Gravity-driven sediment transport on continental shelves: A status report.*” *Continental Shelf Research* 26:2092–2107.
- WRIGHT, L.D.; FRIEDRICHS, C.T.; KIM, S.C. & SCULLY, M.E. (2001). “*Effects of ambient currents and waves on gravity-driven sediment transport on continental shelves*”. *Marine Geology* 175:25–45.
- WRIGHT, L.D.; WISEMAN, W.J.; YANG, Z.-S.; BORNHOLD, B.D.; KELLER, G.H.; PRIOR, D.B. & SUHAYDA, J.M., (1990). “*Processes of marine dispersal and deposition of suspended silts off the modern mouth of the Huanghe (Yellow River)*”. *Continental Shelf Research* 10:1–40.