

DINÂMICA DE SEDIMENTOS FINOS EM ZONAS DE CULTIVO DE MOLUSCOS MARINHOSC. A. D'AQUINO¹; C.A.F. SCHETTINI²; C.E.V. de CARVALHO³¹Centro de Estudos Costeiros e Oceânicos – CECO/IG/UFRGS

C.P. 15001, CEP 91509-900 Porto Alegre - RS

cadaquino@lycos.com²Centro de Ciências Tecnológicas da Terra e do Mar – CTTMar/UNIVALI

R. Uruguai, 458 – Itajaí – SC – 88302.202

guto@cttmar.univali.br (Autor para correspondência)³Centro de Ciências Biológicas – CBB/UENF

Av. Alberto Lamego, 2000 – Campos dos Goytacazes – RJ

carvalho@uenf.br**RESUMO**

Este trabalho apresenta um estudo dos efeitos da hidrodinâmica sobre os processos sedimentológicos em zonas de cultivo de mexilhões. No período de 10 a 27 de julho de 1999, foi realizado um experimento intensivo com aquisição de dados oceanográficos e sedimentológicos na região de cultivo de moluscos marinhos da Enseada do Itapocoroy, município de Penha, SC. O experimento consistiu da instalação de correntógrafo e ondógrafo em um tripé com sensores nivelados a 1 m acima do fundo. Junto ao tripé foi acoplado um sistema para fixação de armadilhas de sedimentos. As armadilhas foram niveladas a 0,5, 1,0 e 1,5 m acima do fundo, sendo trocadas diariamente. O período de realização do experimento foi marcado pela entrada de duas frentes frias, as quais aumentaram a altura significativa das ondas em aproximadamente 0,10 m. As correntes não sofreram alteração significativa de intensidade durante todo o experimento, mantendo uma média de 4,7 cm.s⁻¹. As taxas de sedimentação potenciais das armadilhas foram maiores durante os períodos de maior atividade de ondas. Um modelo conceptual da sedimentologia sob os cultivos, baseado nos dados obtidos, sugere que a entrada de material em suspensão ocorre por advecção, sendo filtrada pelos organismos e sedimentada como pelotas fecais. As ondas atuam na desintegração das pelotas fecais e ressuspensão, sendo as correntes responsáveis pelo transporte advectivo, removendo o material fino da região de cultivo.

PALAVRAS-CHAVE: hidrodinâmica, sedimentologia, sedimentos finos, cultivo de bivalves marinhos.**ABSTRACT****REMOBILIZATION OF FINE-GRAINED SEDIMENTS UNDER BLUE MUSSEL PLOTS.**

This paper presents a study of the role of the hydrodynamics on sedimentologic processes under blue mussel aquaculture plots. During the period from July 10th to July 27th, 1999, an intensive experiment was carried out to acquire oceanographic and sedimentologic data at the blue mussel aquaculture site of Itapocoroy embayment, Penha County, SC. The experiment consisted on the mooring of a wave and current meter, fixed in a tripod with its sensors leveled at 1 m above the bottom. A sediment trap system was attached to the mooring. The sediment traps were replaced every day, and placed at 0.5, 1.0 and 1.5 m above the bottom. During the experiment, two periods of high wave action due to by the passage of frontal systems, reaching a significant maximum wave height of 0,25 m. The currents had no noticeable variation during the entire experiment, presenting an averaged velocity of 4.7 cm.s⁻¹. The potential sedimentation rates from the sediment traps were highest during highest wave activity. A conceptual model of the sedimentology under the mussel culture based on the observations suggests that the suspended sediments enter in the embayment by advection, being filtered by organisms and settled as fecal pellets. Wave energy destroys the pellets and allows the desagregated sediment to be more effectively resuspended, and transported by the currents away from the aquaculture sites.

KEY WORDS: hydrodynamics, sedimentology, fine sediment, blue mussel aquaculture.**1 – INTRODUÇÃO**

O cultivo de moluscos marinhos é uma atividade que vêm crescendo em Santa Catarina e regiões do Brasil de maneira significativa nos últimos anos, principalmente por ser considerada uma boa alternativa econômica para as comunidades de pescadores artesanais. Além dos benefícios econômicos e culturais nas comunidades de pescadores artesanais, o incremento na atividade de cultivo de moluscos marinhos trás consigo impactos ambientais para as regiões onde se desenvolve. Entre eles, o incremento no fluxo vertical de partículas é um dos efeitos comumente observados (Schettini *et al.* 1997), que pode ser estimado através da taxa de sedimentação potencial.

Taxa de sedimentação potencial é o fluxo vertical de partículas para baixo, envolvendo processos como a advecção e a ressuspensão. É função da concentração de sedimentos em suspensão na água, do tempo de permanência da armadilha de sedimento no meio e da área da boca da armadilha (Schettini *et al.* 2004). O aumento na taxa de sedimentação potencial pode ocorrer principalmente em função de dois fatores: a biodeposição e a condição hidrodinâmica local. A sedimentação efetiva dá-se pelo equilíbrio entre deposição e erosão dos sedimentos no fundo, sendo observada somente em uma escala de tempo maior.

Os sedimentos finos provenientes do intemperismo continental chegam a plataforma interna através dos estuários, onde vão sofrer diversos processos, podendo permanecer suspensos por um longo período, ficando neste estado por estarem em um equilíbrio entre sua velocidade de sedimentação e o grau de turbulência do meio (Allen 1985).

Durante a dispersão dos sedimentos finos ao longo da plataforma, parte desse material permanece junto a costa ficando disponível na coluna de água. Os moluscos marinhos cultivados são filtradores, alimentando-se essencialmente do material particulado em suspensão (Dame 1996). Neste processo, o animal ingere indiscriminadamente todas as partículas, porém assimilando somente as de natureza orgânica. A fração orgânica do material em suspensão é constituída de plâncton e detritos, e a fração inorgânica é constituída de sedimentos de tamanho argila na forma de flocos.

O material ingerido que não é nutricionalmente utilizado pelo organismo é excretado na forma de fezes e pseudo-fezes. Esse processo consiste no agrupamento de partículas tamanho argila em pelotas fecais, as quais apresentam um comportamento sedimentológico semelhante à grãos de areia, possibilitando a sua permanência em ambientes de maior energia (Pryor 1975). As pelotas fecais sedimentam com velocidade ordens de grandeza maior do que o material particulado em suspensão original, podendo gerar o acúmulo de sedimentos finos sob a região de cultivo, sendo este processo denominado de biodeposição.

A bioacumulação de sedimentos finos sob estruturas de cultivo ocorre quando o tempo de residência das pelotas fecais é superior ao tempo necessário para a sua desintegração, ressuspensão e remoção. Devido a grande biomassa de moluscos concentrada em uma região de cultivo a biodeposição pode, muitas vezes, ultrapassar a capacidade suporte do ambiente (Schettini 1997), tendo as ondas e correntes um papel importante na preservação da qualidade ambiental nestes locais.

A circulação de água nas regiões de cultivo é dada principalmente pelas correntes costeiras, ondas e regime de maré, formando a hidrodinâmica da região. As ondas de superfície geradas por ventos atuam junto ao fundo fragmentando as pelotas fecais e ressuspendendo o material sedimentado. Parte deste material retrabalhado pode ser então transportado pelas correntes. Sendo este processo fundamental para a manutenção da qualidade do sedimento de fundo e das águas da região de cultivo.

Porém, locais de situação abrigada onde a circulação fica comprometida, podem apresentar uma menor taxa de renovação de águas através das correntes costeiras. Segundo Suplicy (2000), quando acima das densidades desejáveis e principalmente em locais rasos com limitada circulação de água é que os biodepósitos (fezes e pseudofezes) e animais que despençam dos cultivos podem levar a impactos negativos sobre o sedimento. O objetivo deste trabalho é avaliar a remobilização de sedimentos finos em zonas de cultivo de moluscos marinhos e descrever quantitativamente o papel das ondas e correntes neste processo e na qualidade do material remobilizado, em termos quantitativos de teor de matéria orgânica, carbono, nitrogênio e concentração de metais pesados.

2 – ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado na enseada da Armação do Itapocoroy situada no Município de Penha – SC (Fig. 1). A enseada abriga uma comunidade de pescadores artesanais, sendo um local propício para o desenvolvimento de diversas atividades antrópicas, dentre elas o cultivo de moluscos marinhos, hoje também uma atividade sócio econômica alternativa para a região.

A enseada possui uma costa recortada, formada por elevações de rochas ígneas, tornando a enseada um local parcialmente abrigado. A orientação da linha de costa na direção leste-oeste protege o local do ataque direto de ondas provenientes do quadrante sul. Tem uma profundidade média inferior a 10 m, temperaturas médias de 18 °C no inverno, e salinidades médias inferiores a 33. A amplitude de maré média de 0,8 m, sendo a máxima sizígia de 1,2 m caracterizando um regime de micro marés (Schettini *et al.* 1999).

O clima de ventos regional é dominado por ventos de nordeste de pouca intensidade. Este padrão é alterado com a entrada de sistemas frontais que trazem ventos mais intensos, e na maior parte das vezes oriundos do quadrante sul.

Ondas provenientes de nordeste predominam durante a maior parte do tempo, apesar de sua posição abrigada a enseada recebe esporadicamente ondulações proveniente de leste, sendo este o sistema de ondas mais energético que atua na dinâmica sedimentar da enseada (Schettini *et al.* 1999). As correntes na enseada apresentam velocidades relativamente baixas, obedecendo mais diretamente o regime de ventos do que a oscilação causada pelas marés (Schettini *et al.* 1999). Devido a sua proximidade da desembocadura do estuário do Rio Itajaí-açu, menos de 30 km ao sul, a enseada está sob contínua influência de águas menos salgadas e mais turbidas da zona de influência da frente costeira gerada pelas águas do rio (Schettini *et al.* 1999).

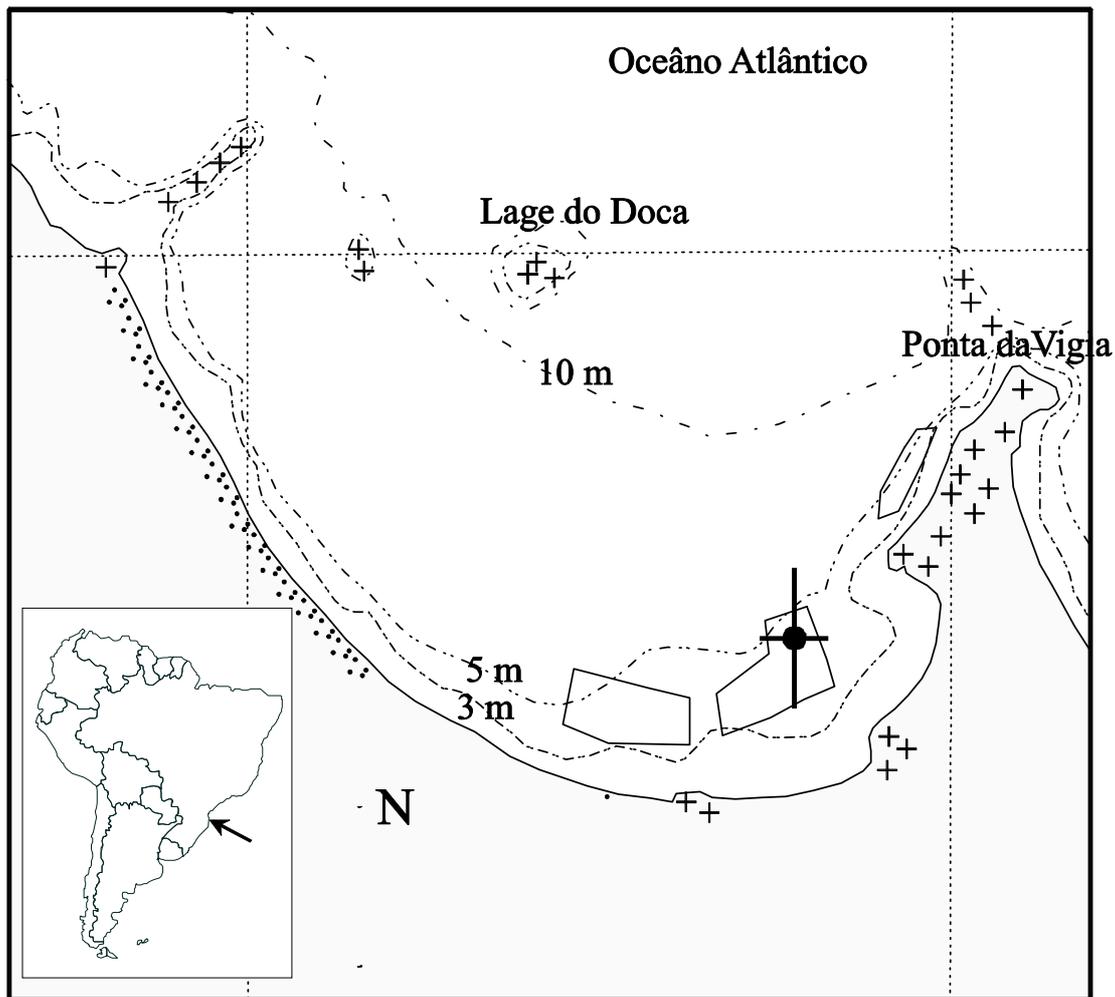


FIGURA 1 – Enseada da Armação do Itapocoroy, SC. A cruz com círculo indica localização do fundeio do tripé sob o cultivo principal de moluscos.

3 – MATERIAL E MÉTODOS

3.1 – AQUISIÇÃO DOS DADOS

No período de 10 a 27 de julho de 1999, foi realizada uma campanha de coleta de dados oceanográficos sob a região de cultivo da Enseada do Itapocoroy. Um sistema de tripé fixo no fundo foi instalado sob a principal

zona de cultivo na enseada. Este tripé sustentava um correntógrafo marca Falmouth™ modelo 3D-ACM WAVE®, para medição de correntes, ondas, salinidade, temperatura, turbidez e pressão, juntamente a um sistema de armadilhas de sedimentos. Os sensores do correntógrafo foram posicionados a aproximadamente 1 m acima do fundo. As armadilhas de sedimento foram posicionadas duas a duas em três níveis, a 0,5, 1,0 e 1,5 m acima do fundo, sob uma coluna de água de aproximadamente 5 m.

As armadilhas utilizadas foram feitas de canos de PVC fechados na parte inferior, com 4 cm de diâmetro e 25 cm de comprimento tendo uma razão maior que 5, sendo esta considerada a proporção ótima para medição de fluxos verticais em fluídos horizontais com velocidade moderada (Hargrave & Burns, 1979). As armadilhas de sedimento foram substituídas a cada 24 horas com auxílio de mergulho autônomo. A cada troca de armadilhas a anterior foi cuidadosamente fechada e substituída, procurando evitar qualquer movimentação das partículas depositadas no fundo. O material coletado foi armazenado em frascos de vidro e resfriado para posterior análise conforme o método já utilizado por D'Aquino & Schettini (1997). As amostras do material retido nas armadilhas foram fotografadas para posterior análise visual da qualidade do material.

Durante os 15 dias do experimento, abrangendo períodos de maré de sizígia e quadratura, dados de corrente, pressão, salinidade, temperatura e turbidez foram registrados a cada 30 minutos a partir de médias de 2 minutos de coleta à 5,5 Hz. Dados de ondas foram coletados a cada 90 minutos em séries temporais contínuas de 10 minutos à 5,5 Hz. Os dados de turbidez foram coletados por um sensor de retro espalhamento óptico, sendo posteriormente convertidos em concentração de sedimentos em suspensão através de uma curva de calibração (D'Aquino & Schettini 1998). Dados de vento foram obtidos de uma estação meteorológica automática localizada no Campus I da UNIVALI, marca DAVIS™ modelo WEATHER MONITOR II®, localizada a aproximadamente 20 km da área de estudo.

3.2 – ANÁLISE DOS DADOS

3.2.1 – Tensão de Cisalhamento do Fluxo

A tensão de cisalhamento de correntes (τ_c) foi calculada segundo a lei quadrática da tensão por:

$$\tau_c = Cd * \rho_w * U_{100}^2 \quad (1)$$

onde Cd é o coeficiente de arrasto ($1,1 \cdot 10^{-3}$, Sternberg 1972), ρ_w a densidade da água e U_{100} é a velocidade de corrente a 1 m acima do fundo.

A altura máxima, altura significativa e período das ondas foram calculados também com rotinas em ambiente Matlab® (MathWorks Inc.™). A tensão de cisalhamento das ondas (τ_w) foi calculada segundo Dean e Dalrymple (1991), como:

$$\tau_w = \frac{(\rho_w * f)}{(8 * Ub^2)} \quad (2)$$

onde Ub a velocidade orbital máxima junto ao fundo e f , o fator de fricção dado pela razão $8/Re^{1/2}$. Re é o número de Reynolds, estimado por

$$Re = \frac{(Ub * \zeta b)}{\mu} \quad (3)$$

sendo ζb a escala de distância do deslocamento oscilatório da onda dado por:

$$\zeta b = \frac{Ub}{S} \quad (4)$$

onde S a frequência angular obtida por $2\pi/T$, onde T é o período da onda.

A velocidade orbital no fundo é calculada por:

$$Ub = \frac{g * a}{S * \cosh(zK)} \quad (5)$$

sendo g a aceleração da gravidade, a a altura significativa de onda obtida experimentalmente, K o número de onda, calculado por:

$$K = \frac{S}{\sqrt{(g * h)}} \quad (6)$$

onde h é a profundidade local.

3.2.2 – Conteúdo das Armadilhas de Sedimento

Em laboratório as amostras retiradas das armadilhas de sedimento tiveram seus volumes aferidos a 200 ml com água destilada, sendo então homogeneizadas com agitador magnético e quarteadas em alíquotas de 25 ou 50 ml. As alíquotas foram filtradas a vácuo em filtros de fibra de vidro Whatman™ GFF, previamente secos em estufa por 24 horas à 60 °C e pesados. A técnica de extração de alíquotas permite quantificar o material total retido nas armadilhas e o uso dos filtros para diversas análises destrutivas de maneira eficiente através da ponderação sobre o volume filtrado (Schettini 1998). A taxa de sedimentação potencial Qt é então calculada por:

$$Qt = \frac{M}{t * A} \quad (7)$$

onde t é o tempo de permanência da armadilha na água em dias e A área da boca da armadilha, fornecendo o resultado em quilogramas de material sedimentado por metro quadrado por dia (Schettini *et al.* 1997). O teor de matéria orgânica foi obtido pela queima do material em forno mufla durante 4 horas à 550 °C.

A relação da taxa de sedimentação potencial com a matéria orgânica e com a tensão de cisalhamento foi verificada através de regressão linear, para as variáveis que apresentaram relações não lineares foi aplicada a transformação de logaritmo linearizando-as. O nível de significância (p) das regressões foi avaliada aplicando-se a ANOVA sobre a regressão linear considerando-se α 0,05 (Zar, 1984). Para verificar a significância do coeficiente de correlação linear (r) foi utilizada a tabela de valores críticos (apêndice B, table B.17) conforme Zar (1984).

A determinação dos teores de carbono e nitrogênio total das amostras foi realizada em um analisador de elementos tipo CHNS/O, marca Perkin Elmer™ (2400 Series II)®.

4 – RESULTADOS

Durante o período de experimento não foi verificada a presença de nenhum evento meteorológico marcante, como por exemplo, a entrada de frentes frias, conforme indica a variação da pressão atmosférica (Tab.1). A velocidade média dos ventos foi $4,5 \text{ m.s}^{-1}$, com dois picos de maiores velocidades, $8,3 \text{ m.s}^{-1}$ no dia 4 e 7 m.s^{-1} no dia 13. Os ventos apresentaram direção predominante para sudoeste (SW) sendo que, ventos de nordeste (NE) também foram registrados.

A velocidade média de correntes durante o período foi $4,7 \text{ cm.s}^{-1}$, com máxima de $12,5 \text{ cm.s}^{-1}$ (Tab. 1). A direção predominante das correntes foi para nordeste, com alguns eventos isolados de maiores intensidades nas direções sul e sudeste. A velocidade e direção de corrente é apresentada na Figura 2 (A e B).

TABELA 1 – Resumo dos dados médios, máximos e mínimos encontrados para os parâmetros oceanográficos com temperatura ($^{\circ}\text{C}$), salinidade (PSU), concentração de material particulado em suspensão (g.m^{-3}), velocidade de corrente (cm.s^{-1}), tensão de cisalhamento de correntes e ondas (N.m^2), altura significativa de ondas (m), velocidade do vento é dada (m.s^{-1}) e pressão atmosférica (bar).

Parâmetros	Médio	Máximo	Mínimo
Salinidade	29,8	32,6	23,4
Temperatura	18,3	19,9	17,5
Velocidade vento	4,5	8,3	0,2
Pressão ATM	1022	1029	1013
Concentração (MPS)	0,020	0,144	0,006
Hs de ondas	0,102	0,238	0,044
Velocidade de corrente	4,7	12,5	0,2
Tensão cis. ondas	0,069	0,165	0,026
Tensão cis. corrente	0,003	0,018	0,001

O experimento abrangeu um período completo de maré de sizígia, um de quadratura, finalizando no início de um novo período de sizígia. A altura significativa de onda (Hs) é apresentada na Figura 2 (C) e a média durante o experimento foi $0,10 \pm 0,02 \text{ m}$, sendo a altura significativa máxima de $0,24 \text{ m}$ observada no dia 4. O período de onda (T) é apresentada na Figura 2 (D), o período médio foi de 6 s . A tensão de cisalhamento gerada pelas correntes média foi $0,003 \text{ N.m}^2$, com máxima de $0,018 \text{ N.m}^2$ nos dias 1 e 17 (Tab. 1). A tensão de cisalhamento de ondas média foi $0,07 \text{ N.m}^2$ com máxima de $0,165 \text{ N.m}^2$ no dia 5 (Tab. 1). A Figura 3 (E e F), apresenta o comportamento das tensões de cisalhamento de correntes e ondas durante os dias de experimento.

A salinidade média durante o experimento foi de $29,8 \text{ psu}$ e a temperatura média foi de $18,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (Tab. 1).

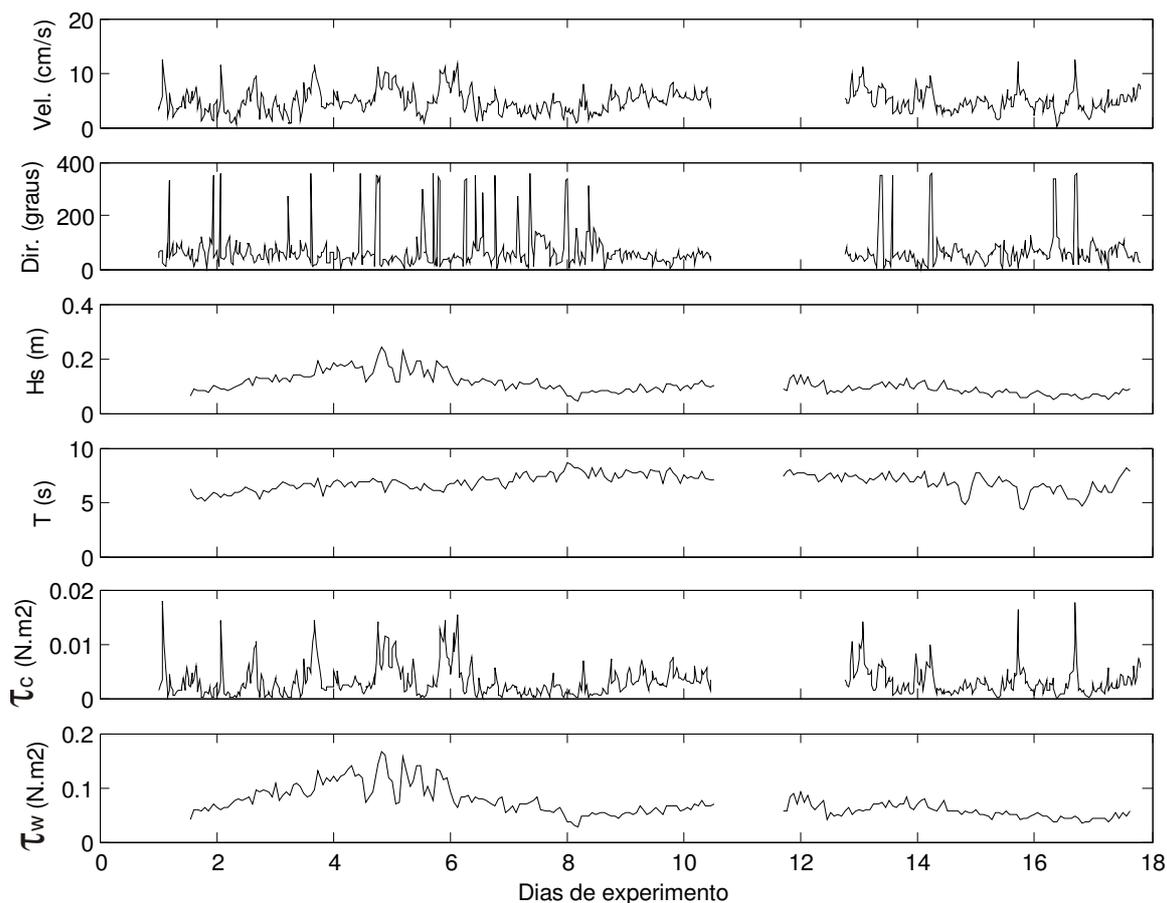


FIGURA 2 – Variação dos parâmetros observados e calculados para o período de 10 a 27 de julho de 1999: A) velocidade das correntes; B) direção das correntes; C) altura significativa de onda; D) período de onda; E) tensão de cisalhamento de correntes (τ_c); e, F) tensão de cisalhamento de onda (τ_w).

A concentração de material particulado em suspensão apresentou suas maiores concentrações entre os dias 2 e 6, com valor máximo de 144 g.m^{-3} . A média durante todo período foi 20 g.m^{-3} (Tab. 1).

A taxa de sedimentação potencial média encontrada para todo período foi $262 \text{ g.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ e para cada nível foi 380, 226 e $181 \text{ g.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$, para 0,5, 1 e 1,5 m acima do fundo, respectivamente (Tab. 2). A maior taxa de sedimentação encontrada foi $1050 \text{ g.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ a 0,5 m acima do fundo. O menor valor encontrado foi $6 \text{ g.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ no dia 11 a 1 m acima do fundo. A Tabela 3 apresenta o resumo dos parâmetros obtidos através da aplicação do teste estatístico ANOVA para verificação da significância das regressões realizadas entre a taxa de sedimentação potencial e tensão de cisalhamento de ondas e correntes e a matéria orgânica.

TABELA 2 – Resumo dos dados médios encontrados para os parâmetros sedimentológicos. Sendo a taxa de sedimentação potencial apresentada em três alturas acima do fundo em $\text{g.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$. A matéria orgânica, carbono e nitrogênio estão apresentados em percentual (%).

Parâmetros	Média	Máximo	Mínimo
Qt 1,5	181	42	14
Qt 1,0	226	58	6
Qt 0,5	380	1050	7
MO (%)	2,4	4,4	1,4
C (%)	5,0	8,7	2,7
N (%)	0,6	1,3	0,3

TABELA 3 – Resumo dos parâmetros obtidos através da aplicação do teste estatístico ANOVA, para verificar a significância das regressões, considerando-se α 0,05.

Parâmetros	R ²	Fcal	p
$Qt_{0,5} \times \tau_c$	0,08	1,2	0,28
$Qt_{1,0} \times \tau_c$	0,02	0,3	0,56
$Qt_{1,5} \times \tau_c$	0,12	1,7	0,20
$Qt_{0,5} \times \tau_w$	0,30	5,7	0,03
$Qt_{1,0} \times \tau_w$	0,25	4,5	0,05
$Qt_{1,5} \times \tau_w$	0,35	7,0	0,01
MO x $Qt_{0,5}$	0,84	78,0	0,000001
MO x $Qt_{1,0}$	0,74	41,0	0,00002
MO x $Qt_{1,5}$	0,70	33,7	0,00006

O percentual de matéria orgânica médio encontrado nos filtros foi de $2,4 \pm 1$ % (Tab. 2). A Figura 3 apresenta a variação vertical e temporal da taxa de sedimentação potencial e do percentual de matéria orgânica. O percentual de carbono apresentou uma média de 5 % e o nitrogênio teve média de 0,6 % (Tab. 2).

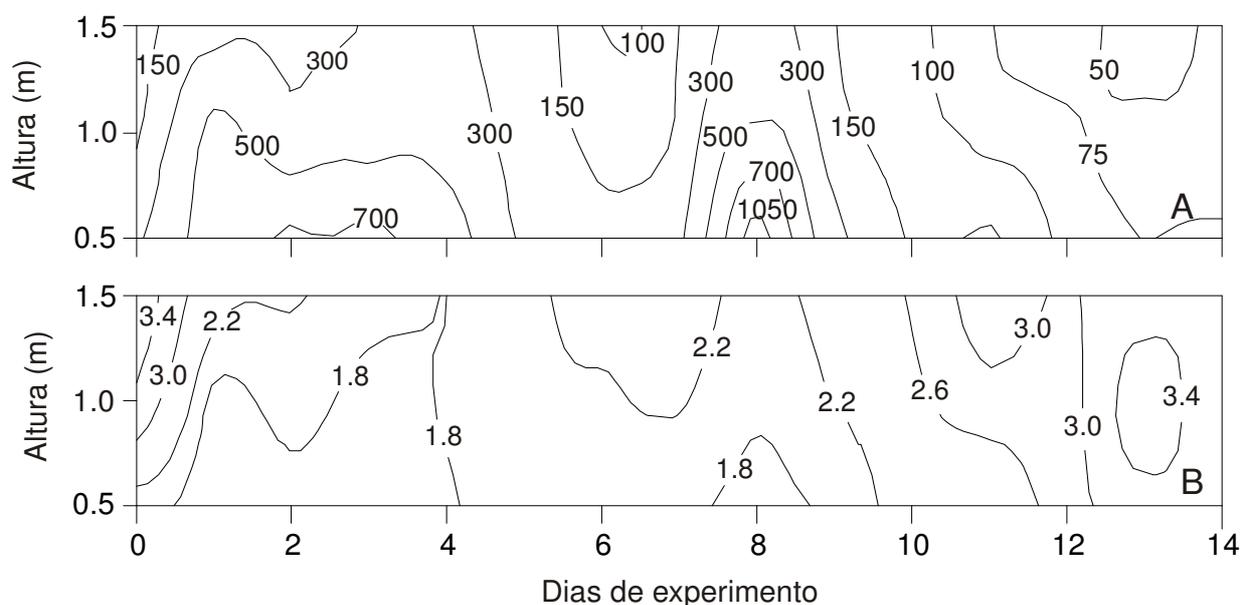


FIGURA 3 – Distribuição espacial: A) da taxa de sedimentação potencial ($g.m^{-2}.dia^{-1}$); e, B) do conteúdo de matéria orgânica (%).

5 – DISCUSSÃO

O fluxo vertical de partículas é parte das diversas etapas as quais os sedimentos finos estão sujeitos no processo de dispersão sobre a plataforma continental. Segundo Komar (1976), o fluxo vertical de partículas F pode ser definido como:

$$F = C * w_s + v_s \frac{\partial C}{\partial z} \quad (8)$$

onde w_s a velocidade de decantação e v_s o coeficiente de difusibilidade turbulenta. O primeiro termo do lado direito da equação representa a taxa de remoção de sedimentos da coluna de água. O segundo termo representa a dispersão vertical e manutenção da suspensão. Quando F for maior ou igual a zero, o sedimento permanecerá em suspensão, caso contrário, a sedimentação estará ocorrendo. A velocidade de sedimentação de sedimentos finos é um parâmetro complexo de se obter devido as propriedades físico-químicas das partículas, densidade, diâmetro, mineralogia dos argilo-minerais envolvidos, estado de agregação, e dos processos biológicos sofridos pelas partículas (Winterwerp & Van Kesteren 2004).

O fluxo vertical de sedimentos pode ser influenciado pelas correntes e ondas através da dissipação turbulenta causada pela tensão de cisalhamento do escoamento junto ao fundo. A dissipação de energia gera a difusibilidade vertical criando uma componente para cima que contrabalança a força peso das partículas em suspensão com sentido para baixo. Quando a primeira é gerada em excesso, os sedimentos depositados podem ser ressuspensos na coluna de água (Allen 1985; Dyer 1986). Uma vez ressuspensos na coluna de água, os sedimentos comporão a parte autóctona da taxa de sedimentação potencial. A taxa de sedimentação potencial representa o fluxo vertical de partículas em direção ao fundo, juntamente com o material advectado de outros locais. É dita potencial, pois representa um processo em escala de tempo curta, e não implica na sedimentação efetiva, na qual as partículas sedimentares comporão o leito consolidado em escala de tempo maior (Wright & Nittrouer 1995).

O material que fica acumulado na armadilha de sedimentos pode ser proveniente de processos de decantação (pelotas fecais), ressuspensão (material fino e/ou pelotas desintegradas) ou advecção (material aloctono), onde os dois primeiros são processos locais e o último um processo remoto.

Sanford (1994) destaca que a força de correntes geradas pelo vento tem grande importância na determinação do transporte horizontal de sedimentos em suspensão e pelo comportamento deste na coluna de água. A magnitude da velocidade de corrente observada durante o experimento foi bastante baixa, tendo média da ordem de 5 cm.s^{-1} . Mesmo sendo de magnitude reduzida, esta já seria suficiente para gerar a ressuspensão de flocos orgânicos (Amos & Gibson 1994).

Porém, não foi observada uma relação significativa entre a velocidade de corrente e a concentração de sedimentos em suspensão (p igual a 0,28, 0,56 e 0,20 vide Tabela 3) conforme mostra a Figura 4. A baixa relação entre velocidade de corrente e concentração de sedimentos sugere que esta tem pouco efeito como agente de ressuspensão, e que a origem do material pode ser atribuída a advecção e/ou ressuspensão por ondas.

Por outro lado, a tensão de cisalhamento gerada por ondas foi bem maior do que a tensão de cisalhamento gerada por correntes, em média 10 vezes maior. Isto é refletido na relação entre a taxa de sedimentação potencial com a tensão de cisalhamento das ondas (Fig. 4), onde se observou significância nesta relação (p igual a 0,03, 0,05 e 0,01 vide Tabela 3). Cacchione & Southard (1974) sugerem que as ondas são responsáveis por movimentos nos sedimentos. Lund-Hansen *et al* (1999) observaram num experimento com armadilhas de sedimento em uma lagoa costeira dois forte eventos de ressuspensão e os relacionaram com o incremento na tensão de cisalhamento gerada por ondas. A tensão de cisalhamento de ondas é a força física que vai representar a atuação das ondas no fundo, podendo ou não mover partículas depositadas. Conforme observado na Figura 4 a tensão de cisalhamento gerada por ondas explica aproximadamente 30 % da taxa de sedimentação potencial. Observou-se que a taxa de sedimentação potencial aumenta com o aumento da tensão de cisalhamento fornecida pelas ondas, que por sua vez é o resultado do incremento na altura significativa de onda pode gerar um aumento na transferência de energia para o fundo por fricção. Conforme elas desintegram, o menor tamanho das partículas aumenta a disponibilidade de sedimentos por ressuspensão, aumentando assim, conseqüentemente, a taxa de sedimentação potencial. Este processo depende da disponibilidade de sedimentos estocados na forma de pelotas

no fundo, e uma vez que todo o material fino seja remobilizado, a relação deixa de existir. Este processo de desintegração de pelotas fecais e aumento na taxa de sedimentação potencial ocorreu durante o experimento, onde observamos uma relação inversa entre a taxa de sedimentação potencial e o percentual de matéria orgânica. Processo este que pode ser explicado pela dissolução da matéria orgânica sofrida durante a quebra das pelotas, restando o material mineralizado em maior quantidade.

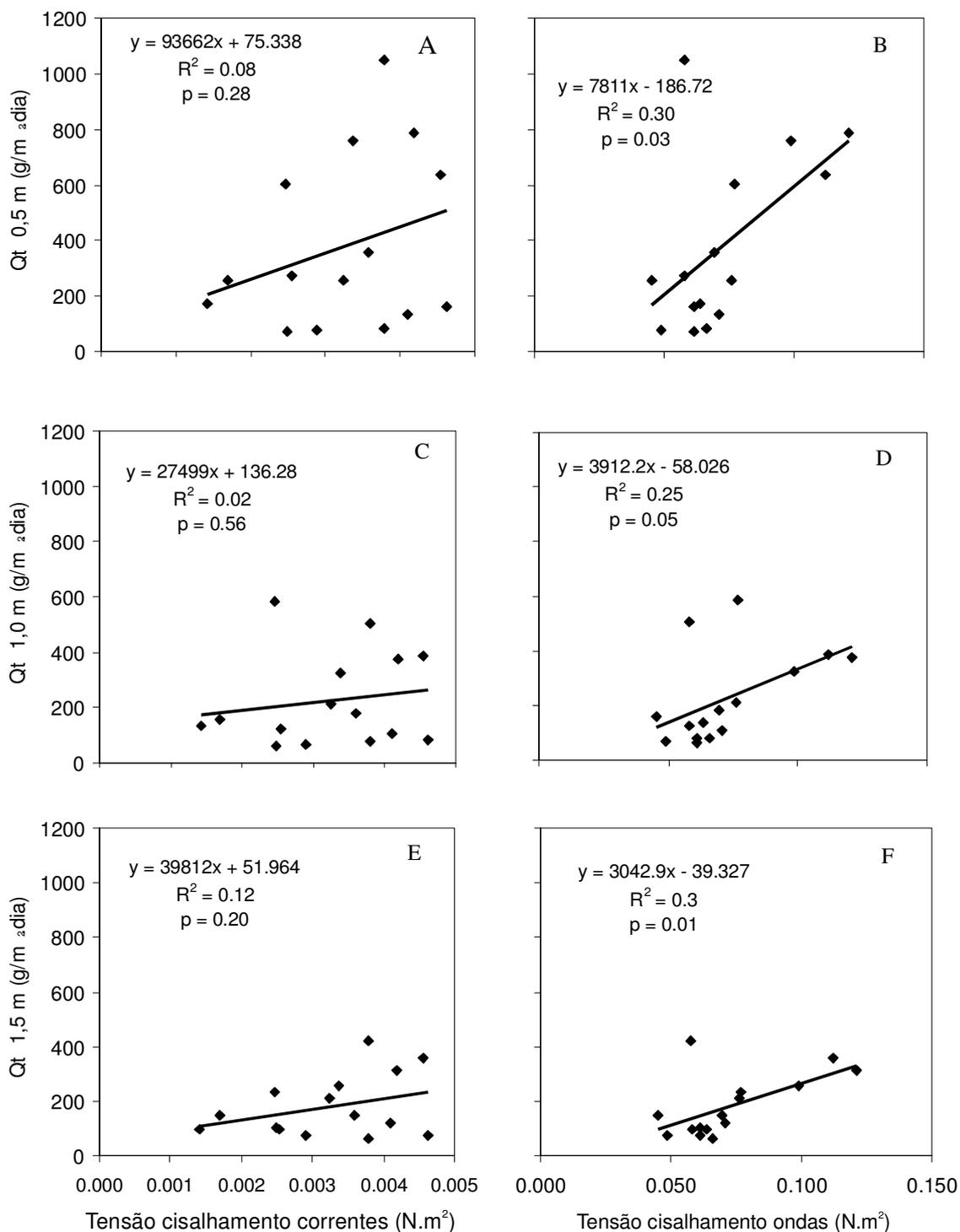


FIGURA 4 – Relação entre a taxa de sedimentação potencial (Q_t) a 0,5 (A e B), 1 (C e D) e 1,5 m (E e F) acima do fundo, e tensão de cisalhamento de corrente (painel esquerdo) e de onda (painel direito).

As maiores taxas de sedimentação potencial não foram observadas exatamente no pico da tensão de cisalhamento de ondas, mas no período em que a tensão estava aumentando em torno de 0,03 e 0,04 N.m², sendo isto observado no segundo e nono dias de experimento, período em que a energia do sistema era suficiente para ressuspender as partículas, porém não demasiada para carregá-las para fora do cultivo. Após o dia 12 a taxa de sedimentação potencial teve uma queda, aumentando e diminuindo de novo juntamente com a variação da tensão de cisalhamento de ondas. O segundo período de máxima taxa de sedimentação potencial foi de curta duração, ocorreu no dia 19, com um aumento da tensão de cisalhamento de ondas.

A porção da taxa de sedimentação potencial que não pode ser explicado diretamente pela decantação e nem ressuspensão pode ser atribuído ao processo de advecção, ou seja, de material alóctone que entra no sistema. Segundo Trochimczuk F° & Schettini (2003) observaram, a pluma do rio Itajaí-Açu é rica em material particulado em suspensão, e sofre predominantemente um desvio na direção norte-nordeste, ficando retida próxima à costa. Através de diagrama TS (Fig. 5), podemos observar a predominância de uma única massa de água durante o experimento, a água costeira de inverno, que apresenta salinidade variando entre 30 e 34, e temperaturas entre 18 e 19 °C (Schettini *et al.* 1999). Os pontos dispersos no diagrama TS podem ser interpretados como indicativos da entrada de frentes geradas pela pluma do rio Itajaí-Açu, apontando assim a pluma como fonte eventual de sedimentos finos (alóctones) para a região do cultivo de moluscos marinhos na enseada da Armação do Itapocoroy.

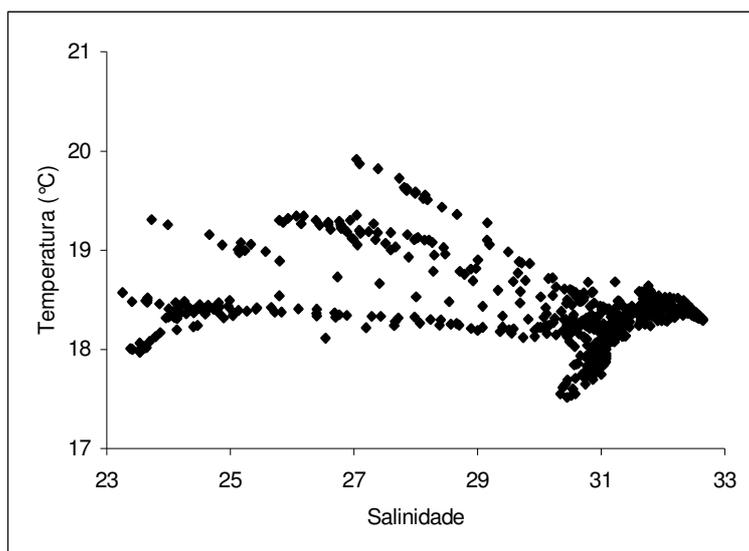


FIGURA 5 – Gráfico TS, indicativo da presença de massas d'água.

A composição do material ressuspensionado varia também em função da intensidade do evento que gerou a ressuspensão. Segundo Timothy & Pond (1997) o material ressuspensionado que alcança as armadilhas reflete a composição dos sedimentos de fundo. O material do fundo ressuspensionado é composto de material inorgânico, flocos de sedimentos finos, detritos e fragmentos de pelotas fecais, tendo cada um tamanho e densidade diferentes. Durante períodos de baixa taxa de sedimentação potencial observa-se a predominância de pelotas fecais retidas na armadilha de sedimento (decantação). Nos períodos de maiores taxas de sedimentação observa-se grande quantidade de material desagregado e ainda a presença de pelotas fecais.

A matéria orgânica apresentou relação inversa com a taxa de sedimentação potencial (r igual a -0,92, -0,93 e -0,93) nas três profundidades, com as maiores concentrações ocorrendo nos períodos de baixa taxa de sedimentação (Fig. 6). Isto indica que nestes períodos de baixa energia de ondas o material que sedimenta é composto principalmente por pelotas fecais, e quanto mais afastado do fundo, menor quantidade de material fino

desagregado retido nas armadilhas. A menor quantidade de matéria orgânica nos eventos de maiores taxas de sedimentação pode ser explicada pela diluição causada pela ressuspensão do material de fundo.

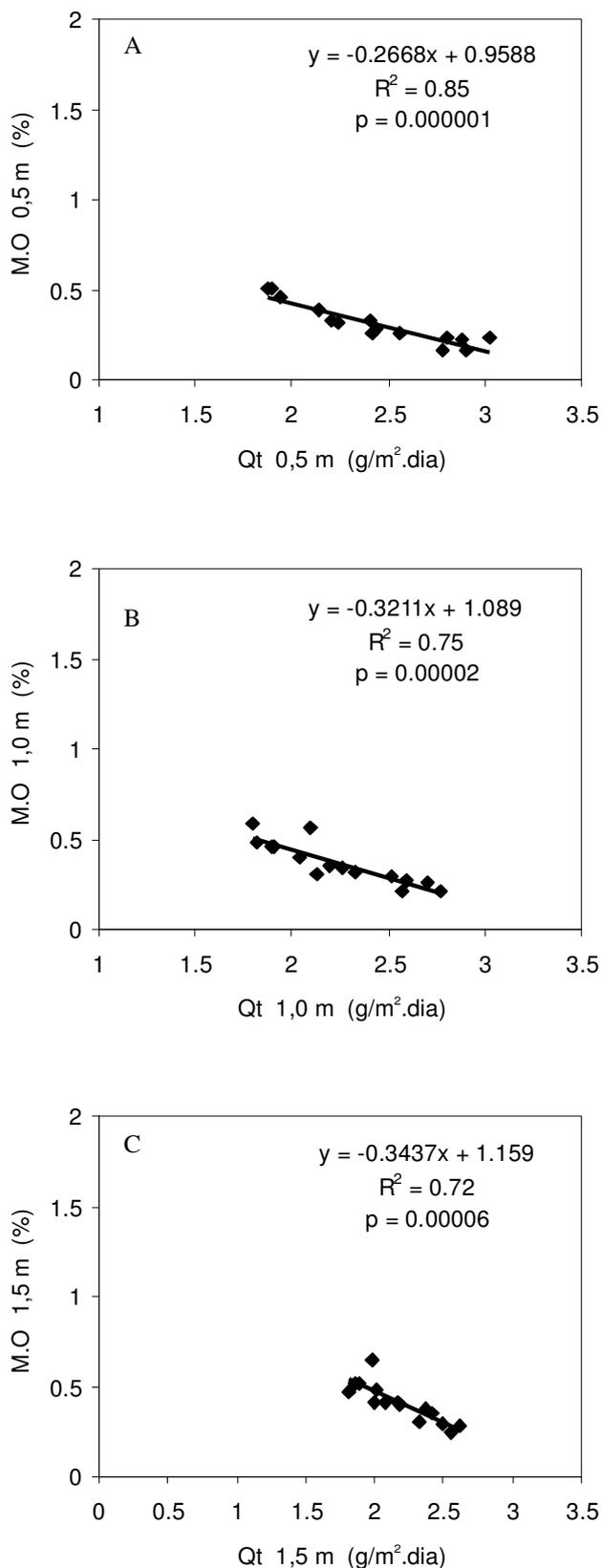


FIGURA 6 – Relação entre a taxa de sedimentação potencial ((g.m⁻².dia⁻¹) e matéria orgânica (%) em três diferentes alturas: A) 0,5; B) 1; e C) 1,5 m acima do fundo

6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

A dinâmica do material em suspensão presente na enseada sofre influencia do cultivo de moluscos principalmente através do processo de peletização ao qual é submetido quando penetra na região de cultivo. Este fenômeno altera a taxa de sedimentação potencial e qualidade do material em suspensão.

Os processos locais que compõe a taxa de sedimentação são a decantação e a ressuspensão causada por ondas, e o principal componente remoto é a advecção. A tensão de cisalhamento de ondas estimada foi bastante superior a de correntes, de forma que as ondas desempenham o papel mais importante sobre a dinâmica dos sedimentos finos na enseada, sendo as principais responsáveis pela ressuspensão de sedimentos finos, tanto por desintegração das pelotas fecais, como pela transferência de energia para o fundo através da tensão de cisalhamento. As correntes vão atuar sobre os sedimentos finos, presentes por advecção ou por ressuspensão, transportando o material em suspensão para o sentido predominante das correntes.

Um modelo conceptual da sedimentologia sob os cultivos, baseado nos dados obtidos, sugere que entrada de material em suspensão ocorre por advecção, é filtrado pelos organismos e decanta (sedimenta) como pelotas fecais. As ondas atuam na desintegração das pelotas fecais e na ressuspensão, as correntes responsáveis pelo transporte advectivo, inserem e removem o material fino da região de cultivo (Fig. 7).

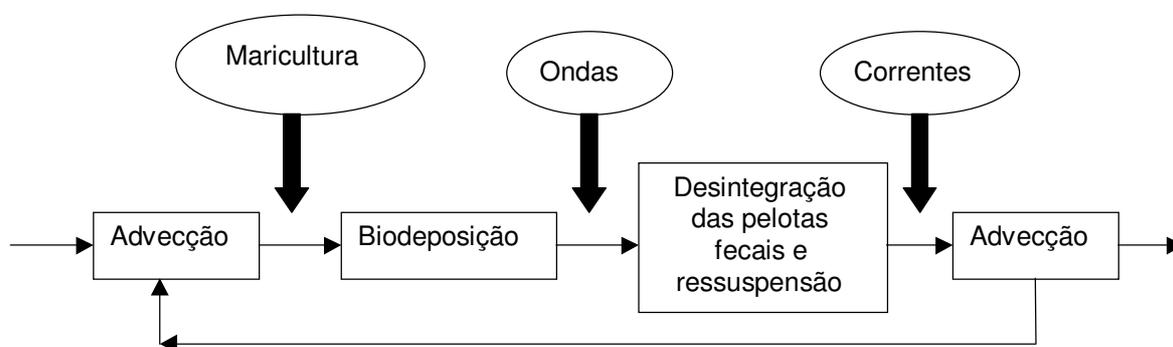


FIGURA 7 – Modelo sedimentar hidrodinâmico da enseada da armação do Itapocoroy, no período de 10 a 27 de julho de 1999.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Eliane C. Truccolo pela participação na atividades de campo; a Adriano Marenzi e Gilberto Manzone pelo apoio logístico no Campus V da UNIVALI; ao CNPq pelo bolsa de iniciação científica para Carla de Abreu D'Aquino no período de execução do trabalho. Carlos Schettini é bolsista do CNPq – 307556/2004-2.

LITERATURA CITADA

- ALLEN, JRL. 1985. Principles of physical sedimentology. London, Chapman & Hall, 430p.
- AMOS, CL & GIBSON, AJ. 1994. The stability of dredge material at dumpsite B, Miramich Bay, new Brunswick, Canada. RODAC, GSC. *Open file report* n°3020.
- CACCHIONE, DA & SOUTHARD, JB., 1974. Incipient sediment movemet by shoaling internal gravity waves. *J. Geophys. Res.*, 79:2237-2242.
- DAME, RF. 1996. Ecology of marine bivalves: an ecosystem approach. CRC – marine science series. 36p
- D'AQUINO, CA & SCHETTINI, CAF. 1997. Avaliação da taxa de sedimentação e ressuspensão na região de cultivo de moluscos na enseada da Armação do Itapocoroy, SC. X SNO. Itajaí, *Anais FACIMAR*, p472-474.

- D'AQUINO, CA & SCHETTINI, CAF. 1998. Determinação de sedimentos em suspensão por reflexão ótica em ambientes mixo halinos: análise de erros. XI SNO. Rio Grande. Anais, p372-373.
- DEAN, RG & DALRYMPLE, RA. 1991. Water wavemechanics for engineers and scientists. *Advanced Series on Ocean engineering*. Vol. 2. Ed. World Scientific. 263:271p.
- DYER, KR. 1986. Coastal and estuarine sediment dynamics. New York, John Wiley and Sons, 342p.
- HARGRAVE, BT & BURNS, W. 1979. Assessment of sediment trap collection efficiency. *Limnol. and Oceanogr.* 24:1124-1136.
- KOMAR, PD. 1976. Boundary layer flow under steady unidirectional currents. In: STANLEY, DJ. & SWIFT, DJP. Marine sediment transport and environmental management. New York, John Wiley & Sons, p91-106.
- LUND-HANSEN, LC, PETERSSON, M. and NURJAYA, W. 1999. Vertical sediment fluxes and wave-induced sediment resuspension in a shallow-water coastal lagoon. *Estuaries* 22:39-46.
- PRYOR, WA. 1975. Biogenic sedimentation and alteration of argillaceous sediments in shallow marine environments. *Geol. Soc. of America Bulletin*, 86:1244-1254.
- SANFORD, LP. 1994. Wave-forced resuspension of upper Cheasapeake bay muds. *Estuaries*, vol.17. p148-15.
- SCHETTINI, CAF. 1997. Impactos ambientais associados ao cultivo de moluscos marinhos. X SNO. Itajaí, *Anais FACIMAR*, p551-555.
- SCHETTINI, CAF. 1998. Nota sobre um procedimento de quarteramento de amostras obtidas com armadilhas de sedimento utilizadas em águas costeiras. *Notas Técnicas da Facimar*, 2:175-179.
- SCHETTINI, CAF.; RESGALLA Jr., C.; KUROSHIMA, KN. 1997. Avaliação da taxa de sedimentação na região de cultivo de moluscos na enseada da Armação de Itapocoroy - SC. *Notas Técnicas da Facimar*, 1:1-8.
- SCHETTINI, CAF.; PROENÇA, LA & D'AQUINO, CA. 1998. O papel da ressuspensão de sedimentos sob uma região de cultivo de moluscos marinhos na remoção de matéria orgânica do sedimento de fundo. In: VI Simpósio de Ecossistemas Brasileiros. Águas de Lindóia, *Anais ACIESP*, v 3, p431-437.
- SCHETTINI, CAF.; CARVALHO, JLB.; TRUCCOLO, EC. 1999. Aspectos hidrodinâmicos da enseada da Armação de Itapocoroy, SC. *Notas Técnicas da Facimar*, 3:99-109.
- SCHETTINI, C.A.F.; D'AQUINO, C.A. and CARVALHO, C.E.V. de, 2004. Fine sediment dynamics under blue mussel aquaculture plots in semi-sheltered bight: the Armação do Itapocoroy, SC, Brazil. *JCR*, SI 39 (Proceedings of the 8th International Coastal Symposium). Itajaí, SC – Brazil, ISSN 0749-0208.
- STERNBERG, RW. 1972. Predicting initial motion and bedload transport of sediment particles in the shallow marine environments. In: L.C. Lund-Hansen, M. Petersson and W. Nurjaya, 1999. *Estuaries* p39-46.
- SUPLICY, F. 2000. A capacidade suporte nos cultivos de moluscos. *Panorama da Aquicultura*, 21-24.
- TIMOTHY, DA. & POND S. 1997. Describing additional fluxes to deep sediment traps and water-column decay in a costal environment. *J. Coast Res.*, 55:383-406.
- TROCHIMCZUK F°, A. & SCHETTINI, CAF. 2003. Avaliação da dispersão especial da pluma do estuário do rio Itajaí-Açu em diferentes períodos de descarga. *Notas Técnicas da Facimar*, 7:83-96.
- WATTS, SEJ. & SMITH BJ. 1994. The contribution of highway runoff to river sediment and implications for the impounding of urban estuaries, a case study of Belfast. *The Science of Total Environment*, 146/147: 507-514.
- WINTERWERP, JC & VAN KESTEREN, WGM. 2004. Introduction to the physics of cohesive sediment dynamics in the marine environment. *Developments in Sedimentology* 56. Elsevier. Series editor: T. van Loon.
- WRIGTH, LD & NITTROUER, CA. 1995. Dispersal of river sediments in coastal seas: six contrasting cases. *Estuaries*, 18(3):494-508.
- ZAR, J. H. 1984. Bioestatistical analysis. Prentice Hall Ed. 718 pp.