

MODELAGEM DO VENTO ATRAVÉS DO MÉTODO LATTICE BOLTZMANN

Marcos Antonio da R. Ferreira¹; Rafael L. Cancian²; Antonio H. F. Klein³; Franklin Misael P. Tena⁴.

Laboratório de Computação Aplicada: marcos@cttmar.univali.br¹, cancian@cttmar.univali.br²,
klein@cttmar.univali.br³, Laboratório de Modelagem Ambiental: franklin@cttmar.univali.br⁴, CTTMAR – Centro de
Ciências da Terra e do Mar, UNIVALI, Rua Uruguai, 458 – Centro – P.O. Box 360 – CEP 88302 202,
Itajaí/SC, Phone: +55 47 3417960

RESUMO

A utilização de ferramentas de predição para o transporte eólico possibilita avaliar de forma mais exata a evolução de ambientes tão dinâmicos como as dunas costeiras. O presente trabalho objetiva desenvolver um modelo computacional de simulação do transporte de sedimento em ambiente de dunas costeiras, visando quantificar o efeito de fatores físicos (tais como a inércia) sobre este fenômeno, utilizando técnicas *Cellular Automata* do Modelo de Chopard & Masselot e processamento paralelo.

ABSTRACT

The use of prediction tools for the sediment transport makes possible to evaluate in a more exact way the evolution of atmospheres as dynamic as the coastal dunes. The present work aims at to develop a model computational of simulation of the sediment transport in atmosphere of coastal dunes, seeking to quantify the effect of physical factors (such as the inertia) on this phenomenon, using techniques Cellular Automata of the Model of Chopard & Masselot and parallel processing.

Palavras-Chave: transporte de sedimento, autômato celulares, simulação de sistemas.

1. INTRODUÇÃO

O ambiente praiial é um sistema extremamente dinâmico e sensível a mudanças. Constantemente sofre reajustes por parte de fenômenos físicos e biológicos. Dentre os fenômenos físicos, os processos hidrodinâmicos e eólicos são os mais importantes, pois atuam como agentes transformadores da topografia das praias.

Em condições normais, as praias se encontram em equilíbrio dinâmico, ou seja, as mudanças provocadas por processos eólicos ou hidrodinâmicos são caracterizadas por um ciclo de erosão e deposição de sedimento. Entretanto, esse equilíbrio dinâmico das praias vem sofrendo, com os passar dos anos, a ação de um novo agente promotor de mudanças, a atividade humana. As praias e os sistemas de dunas costeiras sempre foram ambientes atrativos para as atividades humanas, principalmente para a ocupação residencial, recreação e exploração de matérias-primas para as indústrias. A pressão das atividades humanas sobre o ambiente praiial frequentemente tem como resultado a degradação do mesmo sob a forma de erosão e má qualidade da água.

Dentre os sub-ambientes que compõem o sistema praia-duna, o sub-sistema de dunas costeiras atualmente é o que mais sofre interação com as atividades humanas, sendo que as atividades de recreação e a ocupação são frequentes (HESP, 2001). Como resultado há um grande interesse de pesquisadores para entender o processo de erosão e formação das dunas costeiras e na produção de estudos sobre o impacto da atividade humana e gerenciamento dos recursos naturais das dunas (ARENS, 2001; CARTER, 1988; HESP, 2001; VAN BOXEL et al., 1999).

A dinâmica do processo de erosão, transporte e deposição de sedimento sobre a ação do vento são pontos cruciais para a compreensão da formação e evolução das dunas costeiras. Por essa razão, é desejável ter um modelo de previsão de transporte de sedimento pelo vento.

Com o objetivo representar com mais detalhes o transporte eólico, este trabalho propõe implementar um modelo computacional de simulação do transporte de sedimento pelo vento em ambientes de dunas costeiras, usando técnicas de simulação ao invés de modelos numéricos tradicionais. Dentre estes fatores, segundo JACKSON (1996), o efeito da inércia se sobressai como um parâmetro crítico para obtenção da taxa precisa de transporte.

2. OS AUTÔMATOS CELULARES NA SIMULAÇÃO DE SISTEMAS COMPLEXOS

Para WOLFRAM (1983), Autômatos Celulares são simples idealizações matemáticas de sistemas naturais. Consistem de uma grade espacial chamada *lattice* composta de células idênticas e discretas, onde cada célula possui um conjunto finito de valores. O valor de cada célula se modifica em etapas discretas de tempo de acordo com regras específicas que determina o valor de cada célula conforme seu valor atual e de suas vizinhas.

Originalmente, Autômatos Celulares foram introduzidos por John von Neumann na década de 50, utilizando uma sugestão do matemático Stanislaw Ulam. A proposta de von Neumann era utilizar os Autômatos Celulares para conceber máquinas que se auto reproduzissem (SMITH, 1994). Porém, só em 1970 com o trabalho de John Conway com o seu “Jogo da Vida”, os Autômatos Celulares começaram a ser utilizados para a simulação em vários campos das ciências físicas e biológicas. Surgiram propostas de modelos para representar fenômenos físicos que utilizavam a proposta de entender processos complexos utilizando propriedades universais comuns a muitos sistemas (SCHATTEN, 1999).

O primeiro *Lattice Gas Cellular Automata* (LGCA), um tipo especial de Autômato Celular utilizado para a simulação de fluxo de fluido e para outros problemas físicos, foi proposto em 1973 por Hardy, Pomeau e Pazzis. O nome deste modelo é HPP, que é derivado das iniciais dos

nomes dos seus três autores. Embora o modelo HPP conserve a massa e o momentum de um sistema, ele não obtém resultados satisfatórios como os das equações de Navier-Stokes em um limite macroscópico. Em 1986, Frisch, Hasslacher e Pomeau descobriram um LGCA que utiliza um *lattice* com um formato hexagonal simétrico. Esse modelo foi chamado de FHP e obtém resultados equivalentes à Equação de Navier-Stokes em limites macroscópicos (WOLF-GLADROW, 2000). Com a necessidade da simulação de sistemas mais complexos, no fim da década de 80 surgiu a evolução dos modelos LGCA: uma nova classe especial de Autômato Celular chamada de LBM (*Lattice Boltzmann Model*). Em um LBM é utilizado um novo nível de abstração: as colisões das partículas de fluido não são mais definidas de maneira explícita (maneira tradicional da interação entre partículas de fluido nos LGCA), mas através de equações que reproduzem a Equação de Navier-Stokes (CHOPARD et al., 1998).

3. MODELO LBGK PARA A SIMULAÇÃO DO VENTO

Para modelar o fluxo de vento sobre as dunas, a escolha de uma técnica LBM recaiu sobre o modelo LBGK (*Lattice Bhatnagar-Gross-Krook*) utilizado no modelo transporte eólico de sedimento proposto por CHOPARD & MASSELOT (1998). Esse modelo tem a vantagem de permitir a utilização de um alto valor do número de Reynolds (o movimento de vento normalmente é um fluxo do tipo turbulento, que é caracterizado por possuir um alto valor do número de Reynolds). No LBGK se utiliza $F_i(r, t)$, que indica a probabilidade de uma partícula entrar na posição r (definido por coordenadas x e z modelo) do *lattice* no tempo t , com a velocidade v_i na direção i . No LBGK, $i=1, \dots, 8$, designa as direções geográficas (E, NE, N, NW, W, SW, S e SE) em *lattice* bidimensional (Figura 1). A direção $i = 0$ indica partículas em repouso dentro da célula ($v_0 = 0$) (CHOPARD et. al, 1998).

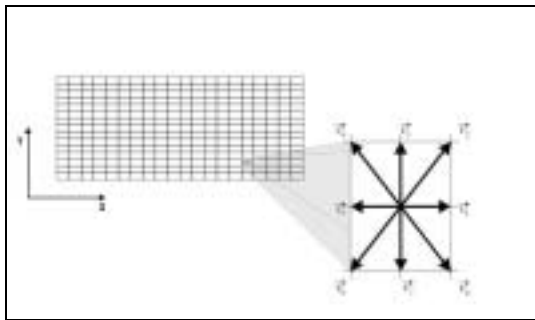


Figura 1. Uma célula do *Lattice* no modelo LBGK. Fonte: CHOPARD & DROZ (1998).

O termo de evolução do fluido pode ser expresso da seguinte forma (CHOPARD & DROZ, 1998):

$$F_i(r + \vec{c}_i, t + \Delta t) = F_i(r, t) + \frac{1}{\tau} \left[F_i^{eq}(\vec{u}(r, t), \rho(r, t)) - F_i(r, t) \right] \quad (1)$$

Onde τ é o tempo de relaxamento e $F_i^{eq}(u, \rho)$ é a distribuição de equilíbrio:

$$F_i^{eq}(u, \rho) = t_i \rho \left[1 + \frac{\vec{c}_i \cdot \vec{u}}{c_s^2} + \left(\frac{\vec{c}_i \cdot \vec{u}}{c_s^2} \right)^2 - \frac{u \cdot u}{2c_s^2} \right] \quad (2)$$

Em que $c_s^2 = \frac{1}{3}$ é a velocidade do som e o termo t_i é: $t_0 = \frac{4}{9}$, para partículas em repouso; $t_1 = t_3 = t_5 = t_7 = \frac{1}{9}$, para partículas horizontais e verticais; $t_2 = t_4 = t_6 = t_8 = \frac{1}{36}$, para as partículas em diagonal. A vantagem do modelo LBGK é possibilitar a utilização de um elevado número de Reynolds e permitir a definição da viscosidade (ν) ajustando o tempo de relaxamento de acordo com a equação 2 :

$$\nu = \frac{2\tau - 1}{6} \quad (3)$$

Viscosidade é a propriedade de um fluido que indica quanto de impulso é “difundido” pelo fluido em um fluxo com padrão não homogêneo. É equivalente dizer que a viscosidade descreve a tensão que acontece entre duas camadas de fluido que se movem em velocidades diferentes. Um alto valor de viscosidade em um fluido produz a força de arrasto deste, por consequência um baixo valor de viscosidade de um fluido resulta em uma força de arrasto fraca ou inexistente (CHOPARD & DROZ, 1998).

Neste trabalho, o ajuste da viscosidade do sistema é um ponto crítico, devido ao seguinte fato: para que uma simulação do transporte eólico de sedimento seja equivalente ao fenômeno observado no “mundo real” é necessário que o sistema obtenha um alto valor do número de Reynolds (acima de 2000). Para obter esse valor, é necessário o ajuste da viscosidade utilizando a equação 2. Porém, para certos valores de viscosidade, ocorre a instabilidade numérica do sistema (como exemplo de valor podemos citar $\tau = 0.5$). Para solucionar esse problema é necessária a utilização do método do modelo de subgrid (CHOPARD et al., 1998).

O objetivo do modelo de subgrid é fazer a viscosidade variar localmente (em cada célula) a cada interação de tempo da simulação, a fim de que esta se auto ajuste ao padrão do fluxo, esse método abordagem padrão em CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Assume-se no modelo de subgrid que a efetiva viscosidade resulta de escalas indeterminadas, e de que esta escala está abaixo do espaçamento determinado para uma célula do *lattice* (λ) (CHOPARD & DROZ, 1998). No modelo de subgrid existe a exigência do cálculo de um novo tempo de relaxamento (τ') em cada interação da simulação. O novo tempo de relaxamento é recalculado da seguinte forma:

$$\tau' = \tau + 3C_{smago}^2 |S_F| \quad (4)$$

Onde $\tau = 0.5$ e $C_{smago} > 0$ são a constante de Smagorinski. Já a definição de S_F (magnitude de esforço do tensor) é feita diretamente através de:

$$|S_F| = \frac{-\tau + \sqrt{\tau^2 + 18\lambda^2 C_{smago}^2 \sqrt{\Pi_{i,j} \Pi_{i,j}}}}{6\lambda^2 C_{smago}^2} \quad (5)$$

Em que Π , é o *nonequilibrium momentum flux tensor*:

$$\Pi_{i,j} = c_{i\alpha} c_{j,\alpha} (F_i - F_i^{eq}) \quad (6)$$

Por tanto, a nova viscosidade (ν') seria assim obtida:

$$\nu' = \nu + \nu_t \quad (7)$$

Em que, ν_t seria viscosidade do redemoinho Smagorinski:

$$\nu_t = C_{smago}^2 \lambda^2 |S_F| \quad (8)$$

4. RESULTADOS OBTIDOS

Para teste do modelo vento, foi utilizado os seguintes experimentos propostos por MASSELOT (2000) e CHOPARD & DROZ (1998): evolução do fluxo de um fluido em canal aberto com um obstáculo (experimento *von Karman street*) e o experimento do perfil de velocidade de um fluxo em um canal.

O experimento *von Karman street* (Figura 2) possibilita a visualização gráfica da evolução do fluxo em um canal aberto com obstáculo. Os parâmetros utilizados na simulação foram: *lattice* com as dimensões 120x30 e número de iterações 5000. Os parâmetros utilizados para as características do fluido foram: $\tau = 0.5$, $C_{smago} = 0.01$, velocidade inicial do fluido = $0.1 \lambda/t$. O resultado da visualização, produzido pela ferramenta computacional Matlab®, permite verificar a presença de vórtices após o obstáculo, o que, segundo MASSELOT (2000), caracteriza um fluxo do tipo turbulento (o número de Reynolds neste experimento está em $\cong 4000$).

O segundo experimento realizado é o perfil de velocidade de um fluxo em um canal. Neste experimento, é realizada a coleta da velocidade do vento em diferentes alturas do sistema e para diferentes tipos de fluxos (laminar e turbulento). Os parâmetros utilizados no sistema foram: *lattice* com as dimensões 80x30; utilização da posição 20 do *lattice* para produção do perfil, 5000 iterações para a simulação.

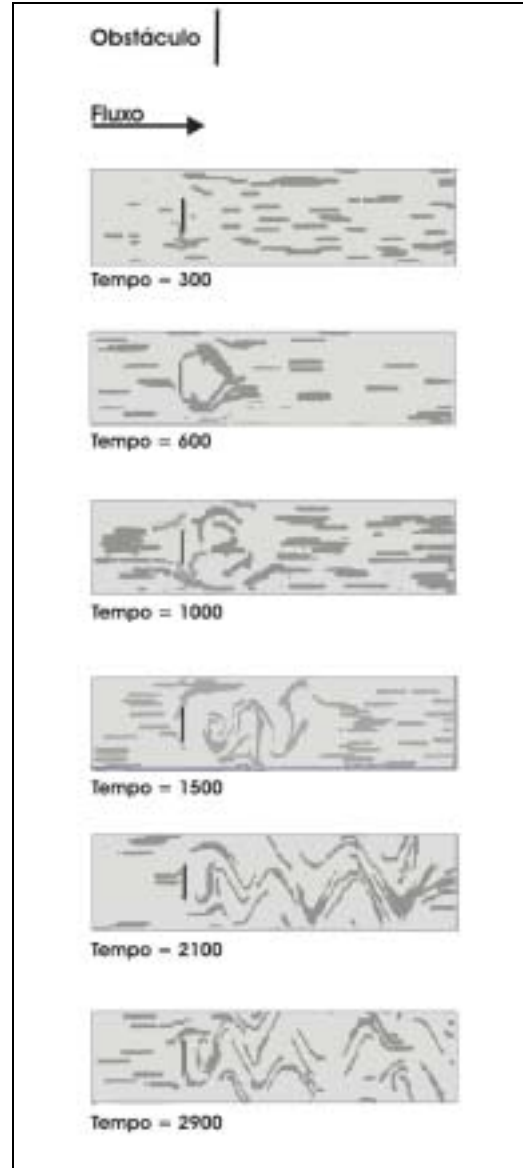


Figura 2. Visualização gráfica do experimento *von Karman street*.

Para as características do fluido turbulento foram utilizados os seguintes parâmetros: $\tau = 0.5$, $C_{smago} = 0.01$, velocidade inicial do fluido = $0.1 \lambda/t$ (Figura 3A).

Para as características do fluido laminar foram utilizados os parâmetros: $\tau = 1.0$, $C_{smago} = 0.01$, velocidade inicial do fluido = $0.1 \lambda/t$. (Figura 3B).

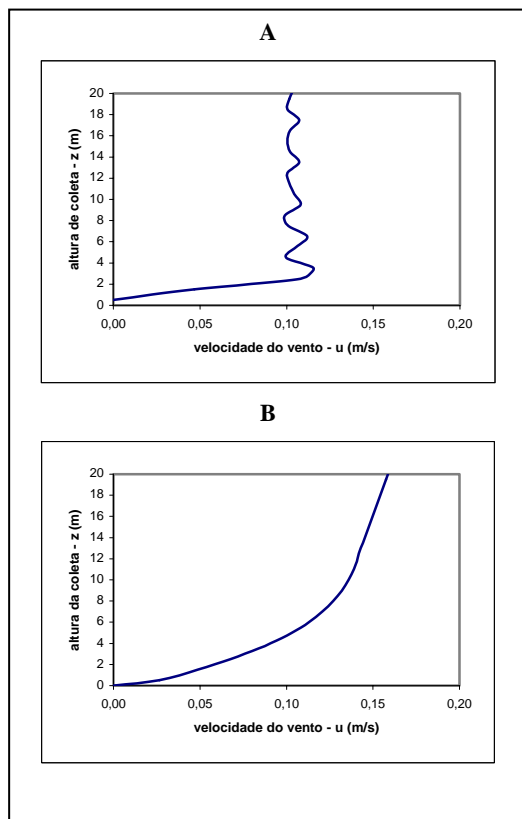


Figura 3. Gráficos do experimento de perfis de velocidade. Na parte superior (A) um perfil de um fluxo do tipo turbulento, na inferior (B) um perfil de um fluxo do tipo laminar.

A análise de ambos perfis da Figura 3 demonstra como a o valor dos parâmetros de características do fluido produz fluxos de tipos distintos. Na Figura 3A mostra-se a resposta do modelo usando parâmetros que representam fluxo do tipo turbulento; e na Figura 3B mostra-se a resposta do modelo quando os parâmetros são para um fluxo laminar. As repostas são compatíveis com os modelos de camada limite apresentado na literatura (FOX & MCDONALD, 1998).

A próxima etapa do trabalho de modelagem do fluido é a elaboração de mais testes baseados em experimentos empíricos de transporte de sedimento em dunas costeiras. O objetivo destes é calibrar os parâmetros do modelo de tal forma que as simulações reproduzam os experimentos reais.

AGRADECIMENTOS

Ao Centro de Ciência da Terra e do Mar (CTT-Mar/UNIVALI) pelo apoio no andamento deste projeto.

Aos Dr. Bastien Chopard (da University of Geneva) e Dr. Alexandre Masselot pela ajuda na compreensão do funcionamento do modelo de evolução do vento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARENS, S. M., JUNGERIUS, P. D., VAN DER MEULEN, F., (2001). Coastal Dunes. In: Habitat conservation : Managing in Physical Enviroments, p. 229-272.
CARTER, R. W. G., (1988). Coastal Environments. An introduction to the physical, ecological and cultural systems of coastlines. Academic Press, 617 p.

CHOPARD, B., DROZ, M., (1998). Cellular Automata modeling of physical systems. Cambrdiger University Press, 341 p. (Collection Aléa-Saclay: Monographs and text in Statistical Physics).
CHOPARD, B., MASSELOT, A., (1998). Cellular Automata and Lattice Boltzmann methods a new approach to computational fluid dynamics and particle transport. Parallel Computer Group, University of Geneva, Geneva, Switzerland, p. 9.
CHOPARD, B., LUTHI, P., MASSELOT, A., (1998). Cellular Automata and Lattice Boltzmann techniques: An a pproach to model and simulate complex systems. Computer Science Department, University of Geneva, Switzerland, p. 137.
FOX, R.W., MCDONALD, A. T., (1998). Introdução à mecânica dos fluídos, 4 ed., Rio de Janeiro: LTC, 662 p.
HESP, P. A., (2001). Coastal sand dunes. Form and Function. CDVN technical bulletin n. 4, Massey University . 28 p.
JACKSON, D.W.T., (1996). Potencial inertial effects aeolian sand transport; preliminary results. In: Sedimentary Geology 106, p 193-201.
MASSELOT, A., (2000). A new numerical approach to snow transport and deposition by wind: a parallel lattice gas model. Ph.D thesis, Faculté des sciences de Université de Genève, 157p.
MOMIJI, H., (2001). Mathematical modelling of dynamics and morphology of aeolian dunes and dune field. PhD thesis, University of London, 180p.
NAMIKAS, S. L, SHERMAN, D. J., (1998). AEOLUS II: an interactive program for the simulation of aeolian sedimentation. Geomorphology 22, p. 135-149.
SCHATTEN, A., (1999). Cellular Automata: Digital World. Disponível em: <www.ifs.tuwinn.ac.at/~aschatt/info/ca/ca.html#.introduction>. Acesso em: 19 fev. 2002.
SMITH, M. A., (1994). Cellular Automata Methods in Mathematical Physics. PhD thesis, Massachusetts Institute of Tecnology, 243p.
VAN BOXEL, J. H., ARENS, S. M., VAN DIJK, P. M., (1999). Aeolian Processes across Transverse Dunes I: Modelling the Air Flow. Earth Surf. Process. Landforms 24, 255 p.
WOLF-GLADROW, D. A., (2000). Lattice-Gas Cellular Automata and Lattice Boltzmann Models: an introduction. Springer, 273p.