



**Pedro Hugo Michelle Marie Ghislain Cambier**

**Simulação Computacional Tridimensional da Formação e  
Evolução de Plataformas Carbonáticas**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientador: Luiz Fernando Campos Ramos Martha

Rio de Janeiro, março de 2011



**Pedro Hugo Michelle Marie Ghislain Cambier**

**Simulação Computacional Tridimensional da Formação e  
Evolução de Plataformas Carbonáticas**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da PUC-Rio. Comissão Examinadora abaixo.

**Prof. Luiz Fernando Campos Ramos Martha**  
Orientador  
Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Prof. Eurípedes do Amaral Vargas Jr.**  
Departamento de Engenharia Civil – PUC-Rio

**Prof<sup>a</sup>. Elisa Dominguez Sotelino**  
Universidade de Virginia Tech

**Dr. Marcelo Costa Monteiro**  
CENPES/Petrobras

**Prof. José Eugenio Leal**  
Coordenador Setorial do Centro  
Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 24 de março de 2011.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Pedro Hugo Michelle Marie Ghislain Cambier**

Graduou-se em Engenharia Civil com ênfase em Estruturas na PUC-Rio em 2008 e atualmente trabalha como pesquisador no Tecgraf/PUC-Rio

#### Ficha Catalográfica

Cambier, Pedro Hugo Michelle Marie Ghislain

Simulação computacional tridimensional da formação e evolução das plataformas carbonáticas / Pedro Hugo Michelle Marie Ghislain Cambier ; orientador: Luiz Fernando Campos Ramos Martha. – 2011.  
105 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)-Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2011.  
Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Computação gráfica. 3. Plataformas carbonáticas. 4. Modelagem geológica. 5. MATLAB. I. Martha, Luiz Fernando Campos Ramos. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

## **Agradecimentos**

Aos meus pais Philippe “*kibi*” e Cecilia “*mamãe*”, minha irmã “*Piep*”, minha tia “*Predileta*”, minhas primas “*Lele*” e “*Tata*”, meu querido padrinho tricolor “*Huguinho*” e toda minha família pelo apoio e incentivo.

À minha namorada Carolina por estar sempre ao meu lado quando eu preciso, agüentando meus desesperos e por todo o apoio e amor. À sua linda família por repor minhas energias com deliciosos almoços.

Aos amigos da PUC-Rio, da graduação e da Pós, em especial Paloma e Fernanda, aos amigos mais antigos do ND e aos amigos do velho continente pelos momentos de descontração.

Ao meu professor e orientador Luiz Fernando Martha, pela oportunidade que me proporcionou de realizar esta pesquisa, pela orientação e contribuição neste trabalho e por sempre ter acreditado em mim.

Ao Dr. Marcelo Monteiro do CENPES / Petrobras pelo tempo e atenção dispensados, pela ajuda e bons conselhos na área de carbonatos.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Civil da Puc-Rio, em especial à Rita, sempre disposta, gentil e ajudando muito.

Ao Dr. Georg Warrlich pelas dicas e ajuda.

Aos amigos e colegas do Tecgraf, pela amizade, companheirismo, ótimos conselhos e ocasionais cervejas no Pires, pois ninguém é de ferro. Em especial, Alonso “*Peitodoleme*” Carbono, Antonio Sergio, Fábio “*Sócio*” Figueiredo, Fransisco “*Chico*”, Mauro “*Futeboléprahomem*” Carrion, Rafael “*Bronquidão*” Sousa e Zé “*Crusasé*” Berutti.

Ao Tecgraf e seus funcionários por proporcionarem todas as condições necessárias para que esta pesquisa pudesse ser realizada e pelo apoio financeiro e de infra-estrutura.

## Resumo

Cambier, PedroHugo Michelle Marie Ghislain; Martha, Luiz Fernando Campos Ramos. **Simulação Computacional Tridimensional da Formação e Evolução de Plataformas Carbonáticas**. Rio de Janeiro, 2011. 105p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Em geologia sedimentar estudam-se as formações e evoluções de sedimentos que formam camadas rochosas que encobrem a crosta terrestre. Diferentes processos físicos, químicos e biológicos são responsáveis pela formação e distribuição de sedimentos. Em um ambiente subaquoso são predominantes as rochas sedimentares de origem terrígena e carbonática. As rochas carbonáticas são oriundas de processos químicos, bioquímicos e aloquímicos envolvendo a deposição e decomposição de organismos ricos em cálcio como algas, conchas e corais. Essas rochas vêm sendo amplamente estudadas na indústria de óleo e gás, pois podem ser bons reservatórios de hidrocarbonetos. Tendo em vista a importância destas rochas, este trabalho concentra-se na formação e evolução de plataformas carbonáticas, existentes principalmente em ambientes de águas quentes e claras. Neste contexto, é proposto um modelo matemático determinístico que possa representar a evolução de plataformas carbonáticas dados alguns parâmetros iniciais como a subsidência inicial, taxas de crescimento e variações do nível do mar. Em cima deste modelo matemático foi desenvolvido um simulador computacional de sedimentação carbonática tridimensional, CarbSM, que leva em conta três fábricas carbonáticas: interior da plataforma, borda da plataforma e águas profundas. Com esses ambientes são associadas taxas máximas de crescimento *in situ*, além de funções restritivas, tais como: profundidade, condições marinhas e sedimentação terrígena; possibilitando o cálculo das taxas resultantes. Desta forma, o sistema é capaz de simular a evolução de plataformas carbonáticas em diversos cenários geológicos. Para entrada de dados e análise dos resultados obtidos, CarbSM oferece uma extensa interface ao usuário e utiliza técnicas de computação gráfica para visualização tridimensional interativa dos modelos

## **Palavras-chave**

Computação gráfica; plataformas carbonáticas; modelagem geológica; MATLAB.

## Abstract

Cambier, Pedro Hugo Michelle Marie Ghislain; Martha, Luiz Fernando Campos Ramos. **Tridimensional Computational Simulation of the formation and Evolution of Carbonate Platforms**. Rio de Janeiro, 2011. 105p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Sedimentary geology focuses on the formation and evolution of the Earth's surface. Various physical, chemical and biological processes are responsible for supplying and distributing sediments. The presence of sedimentary rocks of siliciclastic and carbonate origins are dominant in subaqueous environments. Carbonate rocks are originated from biochemical processes involving the deposition and decomposition of calcium rich organism such as algae, shells and corals. These types of rocks are of great interest for the oil and gas industry due to their potential to form good hydrocarbon reservoirs. Therefore, this work studies the formation and evolution of carbonate platforms, most common in clear and hot waters. A deterministic mathematical model is proposed to represent the evolution of carbonate platforms given a set of entry data like initial subsidence, growth rates and sea level fluctuations. Based on this mathematical model a tridimensional carbonate sedimentation computational simulator, CarbSM, was developed taking into account three carbonate factories: platform interior, platform margin and deep-water carbonates. These environments are linked to maximum *in situ* growth rates and the resulting rates are obtained through a series of restriction functions, such as: depth, marine conditions and clastic sedimentation. This way, the developed tool can simulate the evolution of carbonate platforms within diverse geological scenarios. CarbSM offers an extensive user interface and uses computer graphics rendering techniques for data input and interactive tridimensional visualization of the simulated models.

## Keywords

Computer graphics; carbonate platforms; geological modeling; MATLAB..

## Sumário

1	Introdução	15
1.1.	Rochas carbonáticas	15
1.2.	Organização da dissertação	18
1.3.	Ambientes deposicionais	18
1.3.1.	Águas rasas e abertas	19
1.3.2.	Águas rasas e restritas	20
1.3.3.	Águas profundas	21
1.3.4.	Ambientes terrestres	22
1.4.	Modelagem numérica	22
1.5.	Motivação	26
1.6.	Objetivos	27
2	Plataformas Carbonáticas	29
2.1.	Plataforma com bordas	29
2.2.	Rampa sem bordas	31
2.3.	Plataforma Epicontinental	32
2.4.	Plataforma Isolada	32
2.5.	Plataforma Afogada	33
3	Modelagem direta de sistemas carbonáticos	34
3.1.	Simulação unidimensional de depósitos carbonáticos	34
3.2.	Simulação bidimensional direta de recife de corais	36
3.3.	Simulação bidimensional direta de plataformas carbonáticas	39
3.4.	Simulação tridimensional direta de plataformas carbonáticas	42
4	Modelo geológico	47
4.1.	Eustasia e Subsidência	47
4.2.	Produção Carbonática	51
4.2.1.	Restrição por profundidade	52
4.2.2.	Restrição por condições marinhas	55

4.2.3. Restrição por deposição de sedimentos soltos	58
4.2.4. Restrição por profundidade para carbonatos de águas profundas	59
4.2.5. Produção carbonática resultante	60
4.3. Sedimentação carbonática	60
4.4. Classificação da sedimentação carbonática	61
5 Modelo computacional	63
5.1. Sistema CarbSM	63
5.2. Rotinas computacionais	64
5.2.1. Superfície Inicial	64
5.2.2. Convolução	67
5.2.3. Sedimentação carbonática	72
5.2.4. Rotina Principal	73
5.3. Interface Gráfica	74
5.3.1. Tela principal	74
5.3.2. Entrada de dados	75
6 Exemplo de Aplicação	80
6.1. Parâmetros de entrada	81
6.1.1. Superfície inicial	81
6.1.2. Curva de nível do mar	83
6.1.3. Taxas e Restrições	84
6.1.4. Resumo dos parâmetros de entrada	85
6.2. Resultados	86
6.2.1. Lowstand System Tract (LST)	86
6.2.2. Transgressive System Tract (TST)	90
6.2.3. Highstand System Tract (HST)	93
6.2.4. Lowstand System Tract Final	96
7 Conclusões e Trabalhos futuros	99
8 Referências Bibliográficas	101

## Lista de figuras

Figura 1.1. Exemplo da localização de depósitos carbonáticos modernos	17
Figura 1.2. Exemplo moderno de recife de corais	19
Figura 1.3. Exemplo moderno de estromatólitos em Shark Bay, Austrália	20
Figura 1.4. Estalagmites e Estalactites	22
Figura 1.5. – Ilustração dos diferentes tipos de modelagem numérica utilizados na geologia sedimentar.	24
Figura 1.6. Tela principal do STENO e seu diálogo de aportes de sedimentos.	26
Figura 1.7. Modelo no STENO com sedimentos clásticos após alguns passos da simulação	27
Figura 2.1. Plataforma carbonática com borda acentuada.	30
Figura 2.2. Rampa Carbonática com pequena inclinação.	31
Figura 2.3. Plataforma Epêirica.	32
Figura 2.4. Plataforma Isolada.	33
Figura 2.5. Plataforma Afogada.	33
Figura 3.1. Subsidência e variação do nível do mar, com os depósitos carbonáticos unidimensionais de Read <i>et al.</i> (1983).	35
Figura 3.2. Exemplo de resultados obtidos com o programa de simulação unidimensional <i>Mr. Sediment</i> (Goldhammer <i>et al.</i> , 1987)	36
Figura 3.3. Taxas de crescimento de corais Caribenhos e curva de intensidade de luz comparada com função de crescimento de corais (Bosscher e Schlager, 1992).	38
Figura 3.4. Resultados de uma simulação de crescimento de corais com a dada curva de variação de nível do mar (Bosscher e Schlager, 1992).	39
Figura 3.5. Exemplos de resultados obtidos no programa MAPS (Demicco e Spencer, 1989).	40
Figura 3.6. Imagens do resultado de uma simulação em CARBPLAT (Bosscher e Southam, 1992) com alguns planos aproximados.	41

Figura 3.7. Exemplos de simulações com diferentes parâmetros de entradas modeladas em CARBONATE (Bosence e Waltham, 1990).	42
Figura 3.8. Algumas telas do programa GPM (Hill, J. <i>et al.</i> , 2009), (A) antes da simulação, (B) depois da simulação com uma área em destaque mais detalhada.	43
Figura 3.9. Exemplos de resultados obtidos pelo programa SIMSAFADIM (Bitzer e Salas, 2002).	44
Figura 3.10. Exemplo de modelo de um atol no programa CARBONATE 3D (Warrlich <i>et al.</i> , 2002).	45
Figura 3.11. Modelagem da bacia de Níjar, Espanha, utilizando o programa CARBONATE 3D (Warrlich <i>et al.</i> , 2005).	45
Figura 4.1. Conceitos de eustasia, subsidência e nível relativo do mar.	48
Figura 4.2. Exemplo de curva de nível relativo do mar utilizada no modelo.	49
Figura 4.3.: Ciclos na curva de nível do mar onde ocorrem os principais <i>System Tracts</i> .	51
Figura 4.4. Função de restrição por profundidade.	54
Figura 4.5. Perfil de profundidade suavizado e normal através de um corte transversal de uma plataforma carbonática.	56
Figura 4.6. Exemplo de uma superfície suavizada com um filtro Gaussiano.	57
Figura 4.7. Função de restrição devido à deposição de sedimentos soltos.	59
Figura 4.8. Classificação de rochas carbonáticas segundo Dunham (1962)	61
Figura 5.1. Pontos de controle predeterminados e área a ser modelada.	65
Figura 5.2. Grid interpolado com $\beta = 1$ .	67
Figura 5.3. Mesmo Grid interpolado com $\beta = 4$	67
Figura 5.4. O <i>grid</i> principal da superfície deposicional com um filtro Gaussiano aplicado em um de seus nós.	69
Figura 5.5. Exemplo de valores inexistentes na aplicação do filtro no nó $(nx, 1)$ .	71
Figura 5.6. Matriz auxiliar <i>z<sub>aux</sub></i> com as regiões onde os valores da borda	

da matriz $z$ são replicados.	72
Figura 5.7. Camada de sedimentos adicionais, $\Delta s$ , calculadas na rotina do tempo $(t+\Delta t)$ é sobreposta à camada de deposições antigas, $s(t)$	73
Figura 5.8. Tela principal do programa CarbSM com os controles de visualização, o <i>canvas</i> principal e o menu de entrada de dados	75
Figura 5.9. <i>Menu</i> para entrada dos dados necessários para rodar a simulação do CarbSM	75
Figura 5.10. Entrada de dados para taxas máximas de produção carbonática para as diferentes fábricas	76
Figura 5.11. Entrada dos tempos da simulação	76
Figura 5.12. Definição da curva do nível relativo do mar.	77
Figura 5.13. Definição dos parâmetros das funções de restrição e do uso das mesmas.	78
Figura 5.14. Diálogo para definição do <i>grid</i> que será utilizado na simulação	79
Figura 5.15. Visualização dos resultados	79
Figura 6.1. Modelo conceitual de Handford e Loucks (1993) de um atol sob condições de vento predominante.	81
Figura 6.2. Pontos gerados no software <i>Surfer</i> e importados para dentro do CarbSM.	82
Figura 6.3. Superfície inicial gerada no CarbSM com uma interpolação linear.	82
Figura 6.4. Curva de nível do mar utilizada no modelo, baseada na utilizada no modelo conceitual de Handford e Loucks (1993).	84
Figura 6.5. <i>Lowstand System Tract</i> no modelo de Handford e Loucks (1993).	87
Figura 6.6. Variação eustática no período <i>LST</i> analisado	87
Figura 6.7. Modelo do período <i>LST</i> simulado em CarbSM, mostrando o nível do mar do fim do período <i>LST</i> .	88
Figura 6.8. Vista em planta do modelo simulado no período <i>LST</i> .	88
Figura 6.9. Corte transversal AA da Figura 6.8., as linhas pretas são linhas de tempo de 200 kA.	89
Figura 6.10. Legenda de cores utilizadas em CarbSM.	89

Figura 6.11. <i>Trangressive Systems Tract</i> no modelo de Handford e Loucks (1993).	90
Figura 6.12. Variações eustáticas no período <i>TST</i> analisado.	91
Figura 6.13. Modelo do período <i>TST</i> simulado em CarbSM.	91
Figura 6.14 Vista em planta do modelo simulado no período <i>TST</i> .	92
Figura 6.15. Corte transversal AA da Figura 6.14.	92
Figura 6.16. <i>Highstand Systems Tract</i> no modelo de Handford e Loucks (1993).	94
Figura 6.17. Variação eustática no período <i>HST</i>	94
Figura 6.18. Modelo do período <i>HST</i> simulado em CarbSM, com o nível do mar a mostra.	94
Figura 6.19 Vista em planta do modelo simulado no período <i>HST</i>	95
Figura 6.20. Corte transversal AA da Figura 6.19.	95
Figura 6.21. Corte transversal de um atol conceitual idealizado após os quatro ciclos levados em conta no modelo de Handford e Loucks (1993).	96
Figura 6.22. Variação eustática no período <i>LST</i> final	97
Figura 6.23. Modelo do período <i>LST</i> final simulado em CarbSM, com o nível do mar a mostra.	97
Figura 6.24 Vista em planta do modelo simulado no período <i>LST</i> final.	98
Figura 6.25. Corte transversal AA da Figura 6.24.	98

## Lista de tabelas

Tabela 1: Classificação dos sedimentos carbonáticos nesse trabalho 62

# 1 Introdução

A geologia sedimentar se preocupa em estudar as formações e evoluções dos sedimentos que formam as camadas rochosas que encobrem a crosta terrestre. Com os conhecimentos em sedimentologia e estratigrafia pode-se avaliar os possíveis resultados de diversos processos físicos, químicos e biológicos responsáveis pela formação e distribuição de sedimentos. Esses sedimentos são responsáveis pelo desenvolvimento de rochas sedimentares. Em um ambiente subaquoso são predominantes rochas sedimentares de origem terrígena e carbonática. As rochas terrígenas são oriundas de sedimentos erodidos de rochas ígneas, metamórficas e sedimentares preexistentes e transportados através de meios fluviais e eólicos, entre outros. As variações do nível do mar e das condições climáticas ao longo do tempo influenciam muito a distribuição de sedimentos e são os principais controles do crescimento das rochas carbonáticas, que compõem entre 19 e 22% da totalidade das rochas sedimentares que cobrem a crosta terrestre (Reading, 1978).

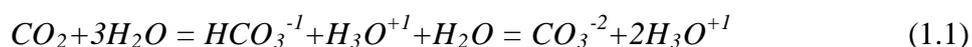
Esse trabalho trata da simulação numérica computacional da formação e evolução de plataformas carbonáticas.

## 1.1. Rochas carbonáticas

As rochas carbonáticas são formadas a partir de processos químicos, bioquímicos e aloquímicos envolvendo a deposição e decomposição de organismos ricos em cálcio, como algas, conchas, corais e moluscos. Tendo sua formação estritamente ligada à vida marinha, micro e macroscópica, as rochas carbonáticas dependem de vários fatores que controlam a vida dos organismos para se desenvolverem. As condições climáticas restringem bastante o crescimento carbonático: temperaturas mais quentes e uma boa radiação solar são essenciais. As condições marinhas em que os organismos vivem influenciam bastante na formação de rochas carbonáticas pela necessidade de níveis de

salinidade aceitáveis e da boa renovação de nutrientes. Por isso, em uma região marítima mais restringida, ou seja, mais distante do mar aberto, somente organismos específicos adaptados a níveis mais altos de salinidade e à menor renovação de nutrientes são responsáveis pelo crescimento de rochas carbonáticas. Enquanto em regiões mais próximas ao mar aberto, uma maior variedade de organismos ajuda o crescimento carbonático, obtendo tipicamente taxas mais altas de crescimento. Devido à propriedade autotrófica das algas, a maioria dos carbonatos se encontra em águas rasas e claras devido à necessidade de radiação solar, por isso em ambientes com grande aporte de sedimentos terrígenos, a água tende a ficar mais turva, restringindo muito a presença e evolução dos organismos necessários para formar rochas carbonáticas. Em profundidades maiores a energia solar é quase totalmente absorvida, limitando a produção carbonática à dependência de alguns organismos adaptados aos baixos níveis de energia solar, possibilitando a deposição de sedimentos carbonáticos em ambientes mais profundos, porém em escalas muito inferiores.

As rochas carbonáticas são compostas de minerais carbonáticos como a calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), a dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) a siderita ( $\text{FeCO}_3$ ) e a magnesita ( $\text{MgCO}_3$ ), entre outras. O íon carbonático ( $\text{CO}_3^{-2}$ ), obtido através da eq. 1.1 depende muito da presença de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) na água e sua não-solubilização, por isso também a importância de baixas profundidades e altas temperaturas, já que sua solubilidade aumenta em pressões mais altas e temperaturas mais baixas (Zeller e Wray, 1956).



Os íons resultantes da eq. 1.1 têm baixa estabilidade em pressões mais baixas, facilitando sua reação com íons de cálcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ) formando assim a calcita e outros minerais carbonáticos de forma análoga. Em temperaturas mais baixas e pressões mais altas, a calcita se dissolve mais facilmente da seguinte forma (Zeller e Wray, 1956):



Assim sendo a água do mar fica saturada com calcita em temperaturas mais elevadas e profundidades mais baixas, levando à sua precipitação e à formação de rochas carbonáticas.

As taxas de produção carbonática são consideradas como crescimento vertical por intervalo de tempo (m/kA), assim sendo, além dos fatores previamente descritos, outro fator limitante do crescimento carbonático é o espaço de acomodação disponível, definido como a diferença entre a camada do fundo do mar e o nível do mar. Esse espaço pode variar com o tempo devido ao próprio crescimento carbonático, às flutuações do nível do mar e à subsidência do fundo do mar por movimentações tectônicas. Caso o espaço de acomodação cresça mais rápido do que a sedimentação carbonática, ela pode se afogar, caso contrário, não há crescimento vertical devido à falta de espaço e essa deverá migrar para outras localidades (Bosscher, 1992). Assim sendo, a evolução de plataformas carbonáticas tem como controle importante as mudanças nos espaços de acomodação (Precht, 1988) e são inclusive ótimos registros dessas (Schlager, 1981).

Deve-se salientar outro fator importante na evolução de plataformas carbonáticas, além da produção *in situ*, decorrente da deposição de organismos marinhos, a erosão subaquosa, diagênese e redeposição dos sedimentos erodidos pode mudar significativamente a geometria das plataformas. Essa erosão se deve principalmente à ação das ondas, das correntezas e instabilidades de taludes. A direção dominante do vento em um ambiente de produção carbonática é o principal controle dos fatores erosivos e redeposicionais.

Pode-se observar que as condições para formações de depósitos carbonáticos são bastante diversas. Em tempos atuais, as áreas de deposições carbonáticas são relativamente restritas (Figura 1.1.). Entretanto, no passado podem ter ocorrido situações mais propícias e abrangentes para esse tipo de deposição.



Figura 1.1. Exemplo da localização de depósitos carbonáticos modernos

## **1.2. Organização da dissertação**

Neste capítulo foram resumidas as principais características da formação e evolução de plataformas carbonáticas. Também foi descrito o contexto para o desenvolvimento deste trabalho e os seus principais objetivos. No próximo capítulo é feita uma revisão bibliográfica sobre os trabalhos e programas de modelagem direta de sistemas carbonáticos, considerando exemplos de uma, duas ou três dimensões.

O terceiro capítulo apresenta o modelo geológico empregado no desenvolvimento do programa e demonstra os modelos matemáticos dos principais processos simulados. Os principais métodos computacionais adotados em CarbSM para representar os modelos vistos no terceiro capítulo são explicados no capítulo 4. No quinto capítulo, o modelo computacional é testado em uma simulação de uma plataforma carbonática isolada conceitual e idealizada por Handford e Loucks (1993). Finalmente, no sexto e derradeiro capítulo são discutidas as conclusões deste trabalho e são sugeridos futuros trabalhos para complementar o que foi desenvolvido até agora.

## **1.3. Ambientes deposicionais**

Inúmeros processos influem na geração de sedimentos carbonáticos *in situ*. Além disso, fatores biológicos e químicos responsáveis pelo desenvolvimento de rochas carbonáticas oferecem diferentes situações ideais para a evolução dessas. Em relação à sensibilidade às condições marinhas descritas anteriormente, existem ambientes compatíveis para cada tipo de processo de produção carbonática. Por isso, pode-se agrupar esses processos em alguns ambientes deposicionais que apresentam condições marinhas ideais para os diversos tipos de fácies carbonáticas. As mais comuns descritas na literatura são: águas rasas e abertas, águas rasas e restritas, bacia e talude, e ambientes terrestres (Reading, 1978, Tucker & Wright, 1990, Warrlich, 2000); que serão descritas mais detalhadamente nos próximos itens.

### 1.3.1. Águas rasas e abertas



Figura 1.2. Exemplo moderno de recife de corais

O primeiro ambiente deposicional de plataformas carbonáticas é o de produção em águas rasas e abertas. Neste ambiente, os organismos responsáveis por suas fácies carbonáticas características, não toleram condições de hipersalinidade e índices de nutrientes muito altos, e necessitam de uma boa renovação de água marinha. Estruturas robustas de recifes de corais (Figura 1.2.) e acúmulos de matéria orgânica são comumente encontradas em águas rasas e início de taludes e formam as bordas de grandes plataformas carbonáticas. A parte de trás dos recifes também pode ter características parecidas mesclando características de ambientes de águas restritas. Apresentam estruturas bastante rígidas e com um crescimento bastante rápido, capaz de acompanhar em muitos casos a elevação progressiva do nível do mar e o espaço de acomodação é criado a partir da subsidência tectônica, assim apresentam muitas vezes estruturas com paredes muito íngremes. Em casos em que o crescimento carbonático não acompanha a elevação do nível do mar, a maior parte do ambiente recifal é afogada. Porém, podem aparecer alguns pináculos em locais restritos das margens da plataforma que conseguiram acompanhar a elevação do nível do mar, no lado interno ou no lado externo.

Com o rebaixamento do nível do mar a plataforma evolui nos taludes dos depósitos anteriores em direção ao mar aberto enquanto antigos depósitos de

margens da plataforma sofrem erosão ao ficarem expostos acima do nível do mar. Na parte superior da plataforma, as estruturas de bordas são geralmente estreitas, com menos de 100 metros de largura, em comparação com a parte interna da plataforma que pode ter até alguns quilômetros de largura, mas devido à migração da borda em direção ao mar no rebaixamento do nível do mar, essas fácies podem ser mais extensas levando em conta camadas deposicionais mais antigas.

O potencial para reservatório de hidrocarbonetos dessas estruturas é geralmente bastante alto devido a boa porosidade gerada pela deposição de sedimentos oriundos de organismos de diversos tamanhos. Porém essa porosidade é algumas vezes preenchida por cimentos carbonáticos e sedimentos menores que preenchem os vazios.

### 1.3.2. Águas rasas e restritas



Figura 1.3. Exemplo moderno de estromatólitos em Shark Bay, Austrália

O segundo ambiente é o de produção em águas rasas que apresenta pouca renovação de água marinha onde os organismos responsáveis pelo crescimento carbonático toleram melhor condições de hipersalinidade. Geralmente acontecem em áreas protegidas por recifes e apresentam taxas de crescimento menores comparadas com as taxas das bordas. As fácies mais comuns nessas condições são

areias e argilas carbonáticas. Nesses ambientes são evidentes os efeitos causados pelas marés formando camadas bastante finas, bem regulares e homogêneas, porém em alguns locais podem ser menos regulares devido aos caminhos preferenciais da água do mar durante as mudanças de marés e de vegetações que podem acumular sedimentos em um determinado ponto.

As areias e argilas carbonáticas encontradas nesses ambientes são formadas de maneira compacta e geralmente proporcionam baixas porosidades e permeabilidades gerando bons seladores de possíveis reservatórios de hidrocarbonetos. Em condições de hipersalinidade, é mais comum a formação de estromatólitos (Figura 1.3) que devido a uma maior porosidade apresentam boas características para futuros reservatórios de hidrocarbonetos.

### **1.3.3. Águas profundas**

Em ambientes de mar aberto e com grandes profundidades os organismos responsáveis pela produção carbonática de ambientes rasos não atuam. Com isso, outros organismos que não conseguem se desenvolver em ambientes rasos devido à competição com os organismos ali presentes são responsáveis pela produção carbonática em águas profundas. Estes organismos, porém, geram taxas de crescimento bastante inferiores às taxas de águas rasas. Geralmente esses sedimentos são formados perto da superfície do mar e são então depositados em profundidades sem influência das ondas. Formam camadas bastante regulares e homogêneas e de espessuras finas devido à deposição predominantemente gravitacional e de forma devagar. Outros depósitos carbonáticos em ambientes de águas profundas ocorrem devido a fluxos gravitacionais de carbonatos previamente depositados nos taludes das plataformas carbonáticas. Esses fluxos gravitacionais podem ocorrer tanto para depósitos terrígenos como para depósitos carbonáticos e apresentam espessuras variáveis. Ocorrem devido à ação de terremotos, instabilidade de taludes, tempestades e variações do nível do mar, entre outros.

Como são compostas geralmente por sedimentos argilosos, suas formações proporcionam pequena porosidade, porém em alguns casos são frágeis e

suscetíveis a fraturas e por isso, podem gerar bons reservatórios de hidrocarbonetos.

#### **1.3.4. Ambientes terrestres**

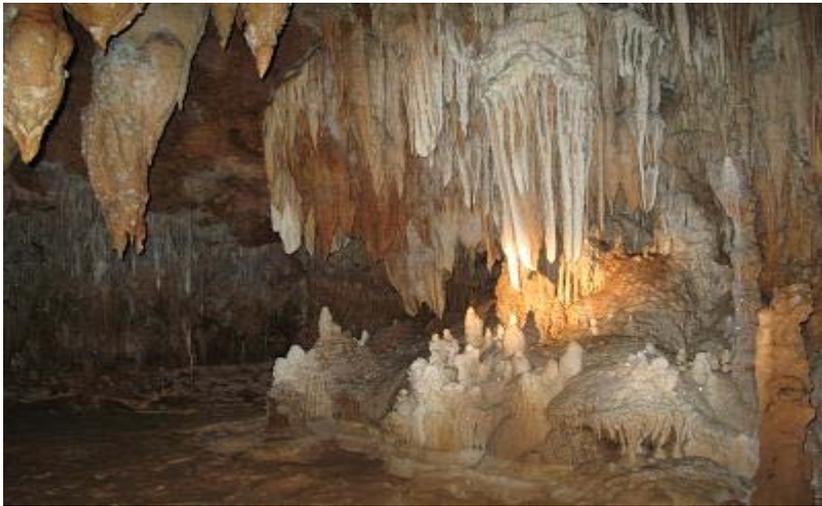


Figura 1.4. Estalagmites e Estalactites

Depósitos carbonáticos também podem ser encontrados em ambientes não-marinhos em formação de dunas, lagos e cavernas. Sedimentos arenosos carbonáticos soltos em ambientes marinhos próximos à costa, em momentos de maré baixa são transportados pela ação do vento e formam dunas carbonáticas. Em lagos salinos pode-se ter a presença de camadas finas de depósitos carbonáticos de tamanho argiloso que são distinguidos dos depósitos marinhos pela ausência de fauna marinha e presença de outros sedimentos não-marinhos. Os depósitos carbonáticos em cavernas mais comuns são as estalactites e estalagmites (Figura 1.4.) que se formam em cavernas de calcários através da água da chuva que transporta minerais carbonáticos. Esse ambiente deposicional não faz parte desse trabalho e seus processos não foram levados em conta nos modelos que se concentram na produção carbonática em ambientes exclusivamente marinhos.

#### **1.4. Modelagem numérica**

O que são modelos? Modelos são ferramentas intelectuais para facilitar o entendimento de processos complexos (Lehr, 1990). Em todas as ciências o

conhecimento dos processos e relações é obtido desenvolvendo modelos e testando seus resultados em comparação às observações (Hardy, 1994). Muitos modelos são inicialmente somente conceituais, porém alguns evoluem para uma formulação matemática e podem gerar previsões quantitativas com as seguintes vantagens: geram hipóteses menos ambíguas e mais fáceis de serem testadas, descartam hipóteses que pareçam plausíveis sugerindo novas nunca anteriormente pensadas e abrem o caminho para perguntas mais precisas (Paola, 2000). Um dos focos principais da geologia sedimentar reside em determinar os processos pelos quais as bacias sedimentares são preenchidas, conjunto esse de fatores implícitos no conceito de modelo geológico (Faccion, 2002). Com os avanços recentes em geologia, ocasionando o surgimento da estratigrafia sísmica (Posamentier *et al.*, 1988, Vail *et al.*, 1991) e genética (Cross, 1988, Homewood *et al.*, 1992) nos últimos trinta anos, os conhecimentos dos processos da geologia sedimentar cresceram significativamente para escalas amplas de tempo e espaço (Granjeon, 1997). Diferentes tipos de modelos são utilizados por geólogos para modelar tais processos:

- **Modelos conceituais:** baseado na teoria e observações de casos reais (por exemplo, afloramentos).
- **Modelos físicos:** são modelos experimentais, visando reproduzir fenômenos geológicos sob condições quantitativas controladas.
- **Modelos numéricos:** utilizam algoritmos matemáticos para simular e tentar reproduzir a geometria e a coerência quantitativa de um modelo geológico (Carvalho, 2003).

Os modelos numéricos podem ser divididos em dois grupos principais, modelagem determinística e estocástica. Na determinística não é utilizado nenhum elemento de natureza aleatória, para modelagens com as mesmas condições iniciais e mesmos dados de entrada, obtêm-se os mesmos resultados. Na estocástica, elementos aleatórios são utilizados na modelagem, podendo gerar diferentes resultados partindo dos mesmos dados de entrada e mesmas condições iniciais.

Na modelagem estratigráfica pode-se partir de dados e condições iniciais determinados e chegar a uma situação sedimentar final (modelagem direta), ou

partir de uma geometria conhecida e determinar os parâmetros e processos que originaram essa geometria (modelagem inversa) (Carvalho, 2003). A Figura 1.5. ilustra esses conceitos utilizados na modelagem numérica estratigráfica com exemplos de algumas técnicas conhecidas.

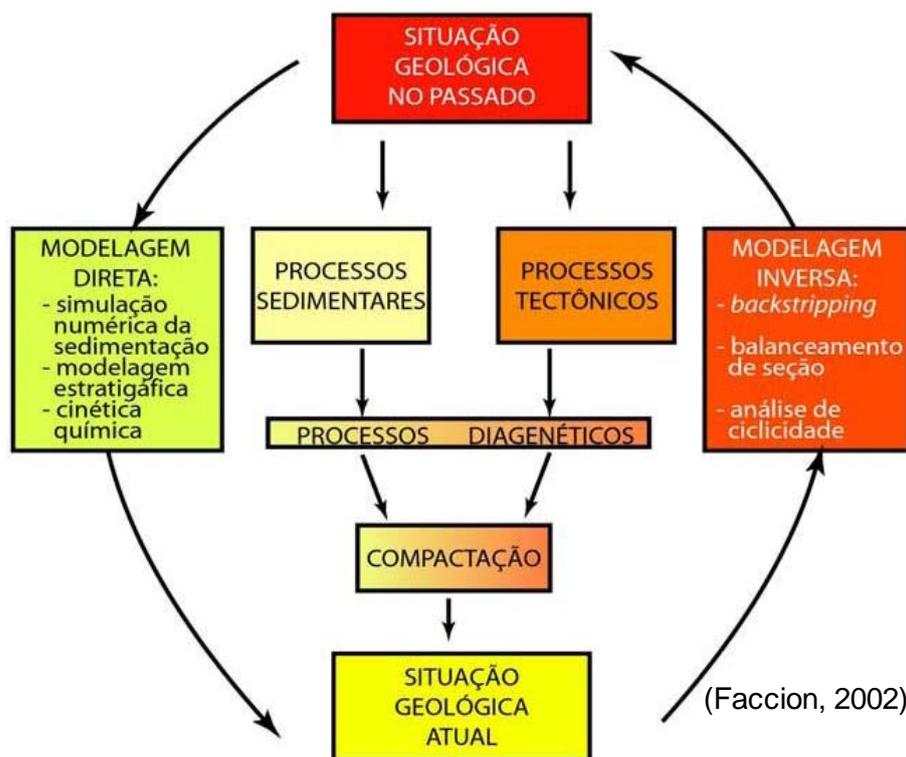


Figura 1.5. – Ilustração dos diferentes tipos de modelagem numérica utilizados na geologia sedimentar.

Modelos devem ser vistos com dois níveis de confiabilidade (Watney *et al.*, 1999):

1. Como ferramentas de aprendizagem para estudar diferentes hipóteses.
2. Como ferramentas de cálculo preciso para responder perguntas específicas.

Erros que comprometem a confiabilidade de um modelo podem aparecer em distintas formas. O erro pode estar na formulação matemática do modelo, na simplificação do modelo real, nos erros numéricos, no tratamento das incertezas e imprecisões dos parâmetros de entrada ou na variabilidade de sistemas naturais complexos. É de fundamental importância a aquisição de bons dados para auxiliar

a modelagem. Sem bons dados não se obtêm bons resultados. Para o uso de modelos com fins do melhor entendimento de fenômenos geológicos é crucial a obtenção de boas observações geológicas (Dalmasso *et al.*, 2001).

Uma grande vantagem da modelagem numérica na geologia sedimentar reside nas escalas de tempo geológicas, impossíveis de serem modeladas experimentalmente. Esses modelos podem testar diferentes hipóteses a partir da interação e variações dos parâmetros controladores, podendo assim simular e quantificar os processos físicos e biológicos para reproduzir geometrias e morfologias de corpos sedimentares (Watney *et al.*, 1999). Modelando áreas geológicas já conhecidas detalhadamente através de dados sísmicos do campo, é possível calibrar os parâmetros do modelo numérico para assim poder simular outras áreas carentes de dados. Modelos dessas áreas são muitas vezes obtidos extrapolando-se os dados conhecidos. Porém, com um modelo numérico estratigráfico baseado em conceitos físicos e biológicos e utilizando algoritmos matemáticos consegue-se muito mais precisão nos resultados. A modelagem estratigráfica conecta os processos sedimentares ao produto geológico de maneira mais direta comparada à geoestatística e oferece mais entendimento da evolução estratigráfica (Warrlich *et al.*, 2007).

No caso mais específico de sedimentação carbonática, é difícil determinar quais processos geram hiatos, como acontece a expansão lateral das plataformas carbonáticas e como são criados geometrias estratigráficas bastante complexas. O entendimento dessas complexidades e o estudo de diferentes situações e suas consequências são de grande importância para ajudar a conceituar e modelar estratigrafias carbonáticas (Burgess e Wright, 2003). Sabe-se que taxas de sedimentação carbonáticas modernas são bastante elevadas (Bosscher e Schlager, 1992). Comparando-as com taxas retiradas a partir dos estudos de depósitos antigos, verifica-se que essas são significativamente inferiores, geralmente uma ou mais ordens de magnitude (Sadler, 1981, 1994, Schlager, 2000). Isso se deve principalmente ao fato de essas taxas serem geradas a longo prazo, incluindo mudanças geológicas que podem afetar a evolução da sedimentação carbonática, como afogamento por subsidência tectônica e/ou elevação do nível do mar, ou erosão elevada. Assim sendo, a modelagem numérica pode ajudar no entendimento desses fatores, testando diferentes hipóteses e estudando seus resultados.

## 1.5. Motivação

O primeiro contato do grupo de pesquisa do Tecgraf/PUC-Rio com modelagem geológica sedimentar foi dada com o desenvolvimento do STENO, simulador numérico de sedimentação siliciclástica tridimensional com ênfase nos processos deposicionais em ambientes de plataforma, talude e bacia (Carvalho, 2003). O STENO (Figura 1.6. e 1.7.) distribui sedimentos siliciclásticos oriundos de aportes pré-definidos pelos ambientes deposicionais. Esses sedimentos são transportados segundo uma solução simplificada das equações de *Navier-Stokes* onde é aplicada a Segunda Lei de Newton à Equação da Continuidade, para simulação do fluxo bidimensional de um fluido incompressível, em regime permanente, não-viscoso, em função da batimetria da região a ser modelada através de uma malha regular definido pelo usuário. O STENO trabalha com tempo de simulação na ordem de milhões de anos, com passos de tempo de milhares de anos e em malhas de centenas de  $\text{km}^2$  contendo células de  $100 \text{ m}^2$  a  $5 \text{ km}^2$ .

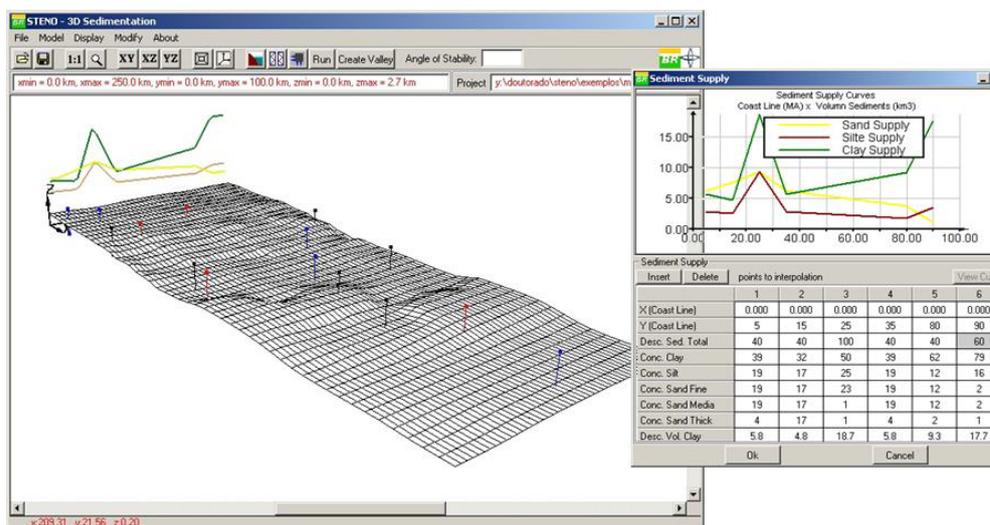


Figura 1.6. Tela principal do STENO e seu diálogo de aportes de sedimentos.

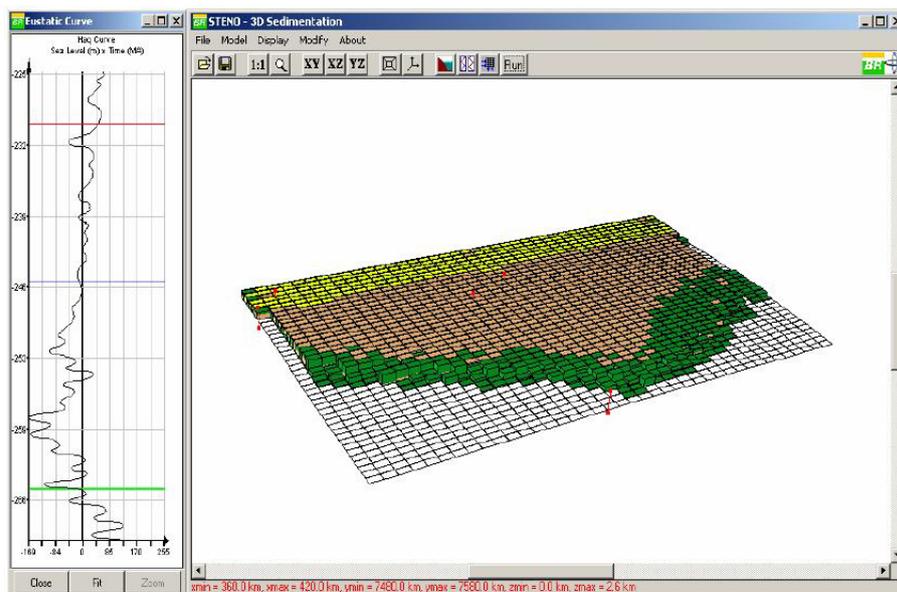


Figura 1.7. Modelo no STENO com sedimentos clásticos após alguns passos da simulação

Inicialmente, o STENO somente incorporava modelos de sedimentação siliciclástica e após um tempo adicionou módulos de sedimentação carbonática baseados nos modelos desenvolvidos no simulador SEDPAK (Kendall *et al.*, 1991a). Porém, essa implementação, acabou sendo subutilizada devido às diferenças nas escalas de atuação dos modelos siliciclástico e carbonático e à não-definição dos diferentes ambientes responsáveis pela produção carbonática.

Os depósitos carbonáticos sempre tiveram bons potenciais para reservatórios de hidrocarbonetos e, por isso, suas formações sempre foram bastante estudadas. Após a descoberta dos reservatórios do pré-sal, houve um *boom* de interesse em rochas carbonáticas e suas formações para auxiliar no descobrimento de novos reservatórios de maneira mais eficiente. Com base na experiência adquirida em modelagem geológica pelos trabalhos no STENO, e a crescente demanda por modelos de sedimentação carbonática, foi iniciada uma pesquisa pelo presente grupo de pesquisa, o que motivou este trabalho.

## 1.6. Objetivos

O principal objetivo desse trabalho é o desenvolvimento de CarbSM (Carbonate Sedimentation Model), um *software* para simulação computacional

tridimensional da formação e evolução de plataformas carbonáticas. O modelo direto e determinístico leva em conta produção carbonática *in situ* de três diferentes ambientes deposicionais: águas rasas e abertas (áreas de borda de plataformas), águas rasas e restritas (interior de plataformas) e águas profundas. Cada um desses ambientes trabalha com taxas máximas de crescimento carbonático que são restringidos através de uma série de funções que levam em conta a presença da luz, condições marinhas e taxas de sedimentação terrígena. Calculando essas funções de restrição para cada ponto do modelo, uma taxa resultante é encontrada para cada passo de tempo. O principal controle do espaço disponível para sedimentação é a curva de variação relativa do nível do mar. Os passos de tempo utilizados no modelo são na ordem 0.1-10 kA e a malha com resolução de 100-500 m. Inicialmente, um dos objetivos desse trabalho foi de criar um modelo específico para o caso dos depósitos encontrados na camada pré-sal no Brasil. Essa hipótese foi descartada após um tempo pesquisando, pois as características dos ambientes deposicionais dos reservatórios do pré-sal ainda são bastante nebulosas e seriam difíceis de quantificar em um modelo matemático. Por isso foi, preferencial iniciar-se no vasto mundo de sedimentação carbonática com um modelo mais geral.

Para entrada de dados foi desenvolvida uma amigável e intuitiva interface gráfica e para melhor análise dos modelos tridimensionais foram implementados ferramentas de visualização interativa, como planos de corte e iso-superfícies, por exemplo. Todos os algoritmos e interfaces gráficas foram desenvolvidos no ambiente MATLAB (The Mathworks Inc., 2008).

Em relação aos principais programas estudados (ver próximo capítulo), a principal vantagem em desenvolver o presente programa foi de ter um modelo bastante geral que possa simular diversos cenários geológicos, além de ter uma boa interface gráfica com ferramentas de visualização tridimensional.

## **2**

### **Plataformas Carbonáticas**

Muitos termos foram utilizados para descrever depósitos carbonáticos em grandes escalas em diversos trabalhos (Ahr, 1973, Ginsburg & James, 1974, Wilson, 1975, Kendall & Schlager, 1981, Read, 1982, Tucker, 1985a), porém atualmente chegou-se a um consenso para utilizar o termo plataforma carbonática como um termo geral para descrever grandes sequências de depósitos carbonáticos em uma grande variedade de configurações geotectônicas e tem diversas subcategorias como: plataforma com bordas, rampa sem bordas, plataforma epêirica, plataforma isolada e plataforma afogada (Tucker & Wright, 1990).

#### **2.1.**

##### **Plataforma com bordas**

Uma plataforma carbonática com borda (Figura 2.1.) apresenta ambientes de águas rasas seguidos por um talude acentuado em direção às águas profundas. Apresenta uma borda íngreme de depósitos robustos de barreiras recifais nos limites das águas rasas e tem uma parte interna de lagunas restritas bastante largas. A região das bordas costuma ser bastante turbulenta e agitada com alta energia hidrodinâmica. As barreiras recifais costumam ser resistentes o suficiente para proteger a área interna da ação das ondas, formando ambientes de águas calmas e restritas. Em muitos casos essas áreas lagunais somente são perturbadas em eventos catastróficos como grandes tempestades. Em alguns casos em que a barreira de recifes apresenta falhas, as áreas lagunais podem ser mais abertas e mais afetadas por correntes e ondas. Um bom exemplo atual de plataformas com borda é a Grande Barreira de Coral na costa nordeste do estado Australiano de Queensland.

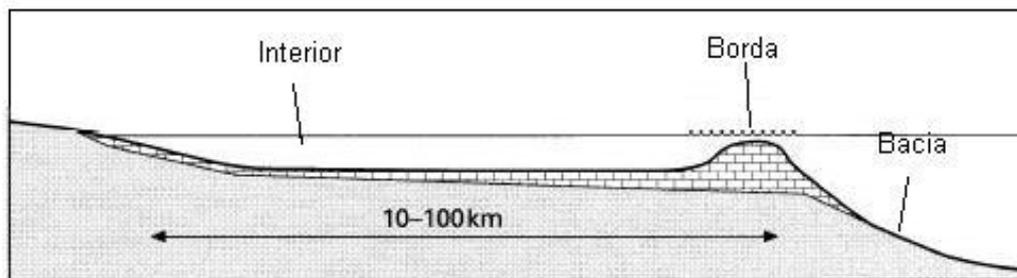


Figura 2.1. Plataforma carbonática com borda acentuada.

As plataformas com bordas respondem de maneiras distintas às flutuações do nível relativo do mar (James & Mountjoy, 1983). Quando o nível do mar aumenta em uma velocidade compatível às taxas de produção carbonática das bordas da plataforma, essa borda se mantém na mesma posição e cresce predominantemente na direção vertical. Como as taxas de crescimentos nas bordas são bastante superiores às taxas do interior da plataforma e das partes mais profundas no exterior, os taludes próximos às bordas ficam cada vez mais acentuados nessas condições. No interior da plataforma a sedimentação carbonática vai depender bastante de fatores climáticos e o grau de conexão com o mar aberto.

Quando a produção carbonática nas bordas está muito alta e cresce verticalmente mais rápido do que a elevação do nível do mar, a borda da plataforma migra em direção à bacia. As partes internas da plataforma chegam perto do nível do mar e geralmente tem conexão mínima com o mar aberto e demonstram condições de hipersalinidade e muitas vezes exposição à intemperismos atmosféricos. Em casos de elevação do nível do mar mais rápido do que as taxas de produção carbonáticas nas bordas das plataformas, essas bordas podem regredir e migrar em direção à costa de maneira bastante descontínua ou de maneira mais gradual, dependendo da velocidade da elevação do nível do mar. Quando a elevação do nível do mar é rápido demais, a produção carbonática nas bordas não consegue acompanhar essa elevação e acaba se afogando, parando a produção e é coberto por camadas de depósitos carbonáticos de águas profundas.

Em situações contrárias, quando o nível do mar rebaixa, as bordas podem ficar aparentes acima do nível do mar e sofrer intemperismos atmosféricos e estreitos depósitos de águas rasas aparecem nos taludes das antigas bordas em direção à bacia.

## 2.2. Rampa sem bordas

A rampa carbonática sem borda (Figura 2.2.) é uma superfície com decaimento suave em que barreiras recifais estão ausentes, impossibilitando assim a identificação de uma borda protetora, apesar de apresentar alguns recifes pontuais. Perto da costa são predominantes depósitos arenosos moldados pela ação das ondas e marés e em direção à bacia os depósitos ficam mais argilosos. Apesar das diferenças em suas composições, as rampas carbonáticas têm características parecidas com as plataformas siliciclásticas em bacias abertas. As rampas não apresentam discontinuidades significativas em suas inclinações na transição entre a plataforma e os ambientes mais profundos da bacia. Devido à falta de uma barreira protetora, os depósitos próximos à costa são constantemente influenciados pela ação das ondas e mudanças de marés. Em rampas a energia hidrodinâmica é menor em comparação à energia encontrada nas barreiras de plataformas com bordas onde ondas de águas profundas atingem taludes acentuados, mas a energia é bastante expressiva e bem maior comparando com ambientes lagunais das plataformas com borda. Um bom exemplo atual de rampas carbonáticas sem bordas é na Costa Trucial do Golfo da Pérsia (Loreau & Purser, 1973).

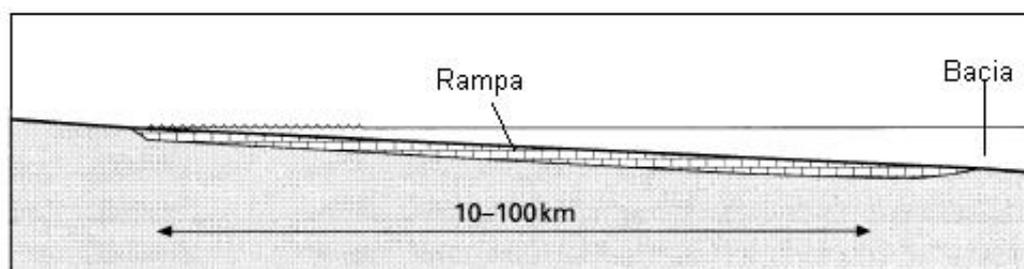


Figura 2.2. Rampa Carbonática com pequena inclinação.

Flutuações do nível do mar e subsidência tectônica serão determinantes nas espessuras resultantes e migrações laterais dos depósitos em rampas carbonáticas. Essas flutuações são mais importantes nas partes mais rasas da rampa e nas partes mais profundas as mudanças influenciam no nível da base das ondas que são responsáveis por alguns retrabalhamentos de sedimentos previamente depositados.

Quando as variações são muito rápidas fica mais difícil identificar o efeito dessas mudanças nas rampas carbonáticas além de um possível afogamento.

### 2.3. Plataforma Epicontinental

Plataformas carbonáticas epicontinentais são grandes depósitos carbonáticos em águas marinhas rasas sobre extensos blocos continentais com topografia bastante regular (Figura 2.3.). Pelas suas dimensões e baixíssimas profundidades, os ambientes marinhos epicontinentais têm pouca influência de marés e correntes e pequenas ondas gerando depósitos regulares e com grande crescimento horizontal e somente sofrem maiores influências de ondas durante grandes tempestades. O crescimento carbonáticos nesses ambientes acontecia muitas vezes em condições de hipersalinidade. Plataformas epicontinentais muito extensas como existiam antigamente não acontecem em tempos atuais. Um exemplo atual que tem características parecidas, com águas rasas em uma boa extensão e pouca influência de marés e ondas, é a parte interna dos bancos oolíticos das Bahamas.

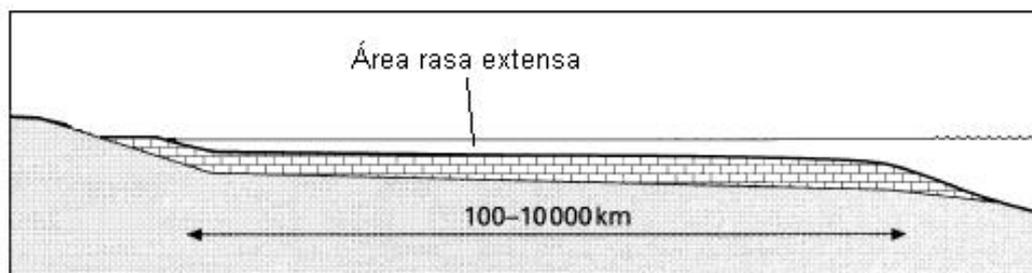


Figura 2.3. Plataforma Epêirica.

### 2.4. Plataforma Isolada

Plataformas isoladas (Figura 2.4.) são caracterizadas por depósitos carbonáticos de águas rasas rodeados por águas profundas em todas as direções. São de extensões variadas, porém quando muito grandes encaixam nas categorias previamente discutidas. Nas plataformas isoladas menores podem ser vistos características específicas a essas categorias, já que suas margens são sujeitas a diferentes cenários de ondas e correntes, dependendo da orientação em relação às margens do vento e tempestades prevalentes. Plataformas isoladas apresentam

em suas bordas estruturas recifais com taludes acentuados em direção a águas bastante profundas e depósitos carbonáticos de fração arenosa e argilosa em seu interior. Um atol é um tipo de plataforma isolada que é especificamente formada por cima de extintos vulcões após sofrerem subsidência.

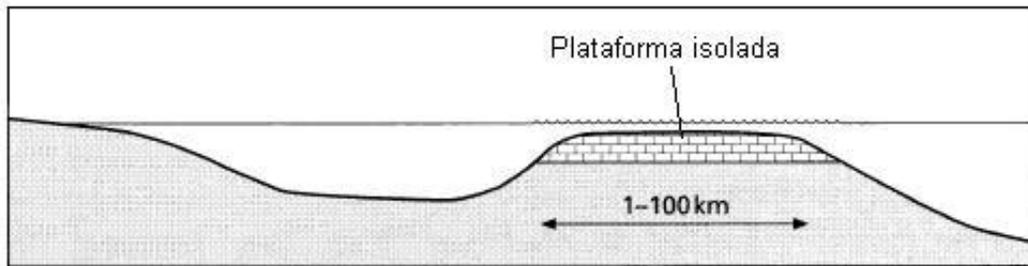


Figura 2.4. Plataforma Isolada.

## 2.5. Plataforma Afogada

Uma subida muito rápida no nível do mar tem de ocorrer para afogar completamente uma plataforma carbonática (Figura 2.5.). Como foi mostrado nos itens anteriores, geralmente os depósitos carbonáticos nas bordas das plataformas conseguem acompanhar o ritmo da elevação do nível do mar. Uma elevação mais drástico no nível relativo do mar pode ocorrer devido a subsidências causadas por falhas tectônicas ou por grandes degelos. Outro cenário que pode afogar uma plataforma sem elevações significativos do nível do mar é quando a produção carbonática é restringida devido a fatores bioquímicos na água marinhas ou grandes mudanças climáticas. Plataformas afogadas apresentam finas camadas de depósitos de águas profundas sobrepostas às antigas camadas de depósitos de águas rasas. Muitas plataformas afogadas modernas podem ser encontradas no Pacífico e no Oceano Índico.

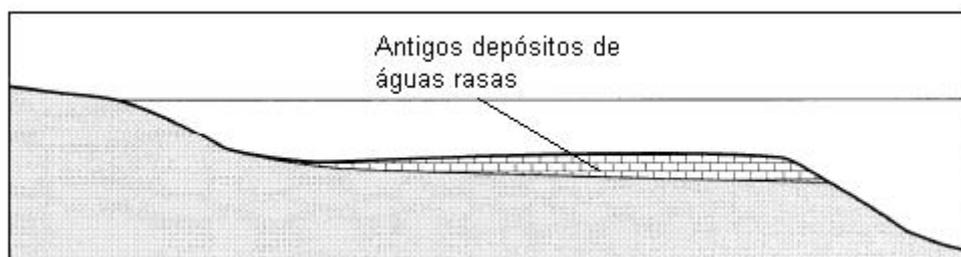


Figura 2.5. Plataforma Afogada.

### 3

## Modelagem direta de sistemas carbonáticos

Uma revisão foi feita analisando diversos exemplos de modelagem direta de sistemas carbonáticos para estudar possíveis implementações de simulação numérica de deposição carbonática. Estes modelos trabalham em uma, duas ou três dimensões, sendo que a simulação tem focado em modelos 2 D pois são mais rápidos mas modelos 3 D sempre existiram. Porém com os avanços em computação eficiente, velocidade computacional e memória, os modelos 3 D estão ganhando força por apresentarem resultados mais confiáveis. Curiosamente, um dos primeiros simuladores de produção carbonática desenvolvido por Harbaugh e Bonham-Carter (1970) trabalhava em um ambiente tridimensional e apresentava cortes transversais e visualização tridimensional das superfícies topográficas criadas. Após isso, porém, a maioria dos modelos era gerada em ambientes uni e bidimensionais, voltando com o 3 D somente no final da década de 1980.

### 3.1.

#### Simulação unidimensional de depósitos carbonáticos

Muitos modelos de sistemas carbonáticos tinham interesse em estudar a ciclicidade das deposições carbonáticas devido a pequenas mudanças no nível relativo do mar (Turcotte e Willemann, 1983; Cisne *et al.*, 1984; Read *et al.*, 1986; Goldhammer *et al.*, 1987; Watney *et al.*, 1991). Como esses modelos estavam principalmente preocupados em observar como as mudanças de nível do mar eustático podem influenciar na evolução das plataformas carbonáticas, as extensões laterais não eram de muita importância e se fazia uso de algoritmos unidimensionais para simular a produção carbonática *in situ*. Erosão era levada em conta somente para ser subtraída da produção carbonática resultante e não se levava em conta o sedimento produzido. Seções verticais eram criadas a fim de comparar o efeito das mudanças do nível do mar com dados reais.

O trabalho de Turcotte e Willemann (1983) foi um dos primeiros a utilizar curvas harmônicas sobrepostas para simular a ciclicidade do nível do mar com

subsidiência constante. Um modelo unidimensional com produção e remoção de sedimentos foi desenvolvido. Para conseguir um entendimento mais quantitativo dos controles da deposição carbonática, Read *et al.* (1986) desenvolveram um simulador unidimensional (Figura 3.1.) com taxas de sedimentação carbonática que dependiam de profundidade, variações do nível do mar, fácies, subsidiência linear e ação de marés.

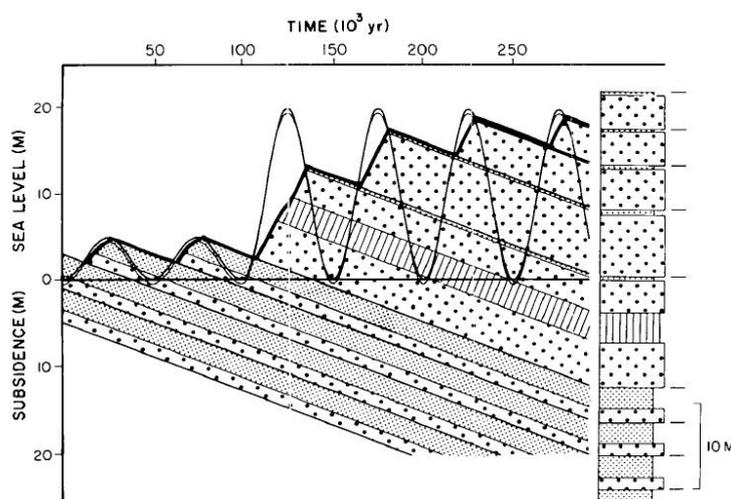


Figura 3.1. Subsidiência e variação do nível do mar, com os depósitos carbonáticos unidimensionais de Read *et al.* (1983).

Goldhammer *et al.* (1987) desenvolveram um sistema computacional chamado *Mr. Sediment* (Figura 3.2.) para testar suas hipóteses sobre ciclicidades de Milankovich em plataformas carbonáticas Triássicas das Dolomitas. Utilizando taxas de depósitos modernos e ciclicidade eustática do Pleistoceno, *Mr. Sediment* conseguiu reproduzir espessuras observadas em 1D. Watney *et al.* (1991) apresentaram um modelo unidimensional bastante parecido com o demonstrado em *Mr. Sediment*, porém com taxas de sedimentação mais complexas que decrescem em maiores profundidades e são sujeitos a fatores de restrição devido a subidas rápidas do nível do mar. Esse modelo foi utilizado para simular deposições carbonáticas na Pennsylvania utilizando taxas de crescimento atuais, curvas eustáticas do Pleistoceno e estimativas de taxas de subsidiência da Pennsylvania.

Esses modelos são suficientes para simular a ciclicidade pontual de um sistema carbonático, porém não levam em consideração a variação das taxas de

produção em relação à variação das profundidades ao longo de uma bacia a ser modelada. Muitas geometrias sedimentares presentes em plataformas carbonáticas se apresentam em formas bidimensionais e, por isso, foram iniciados trabalhos para simulação bidimensional de deposição carbonáticas.

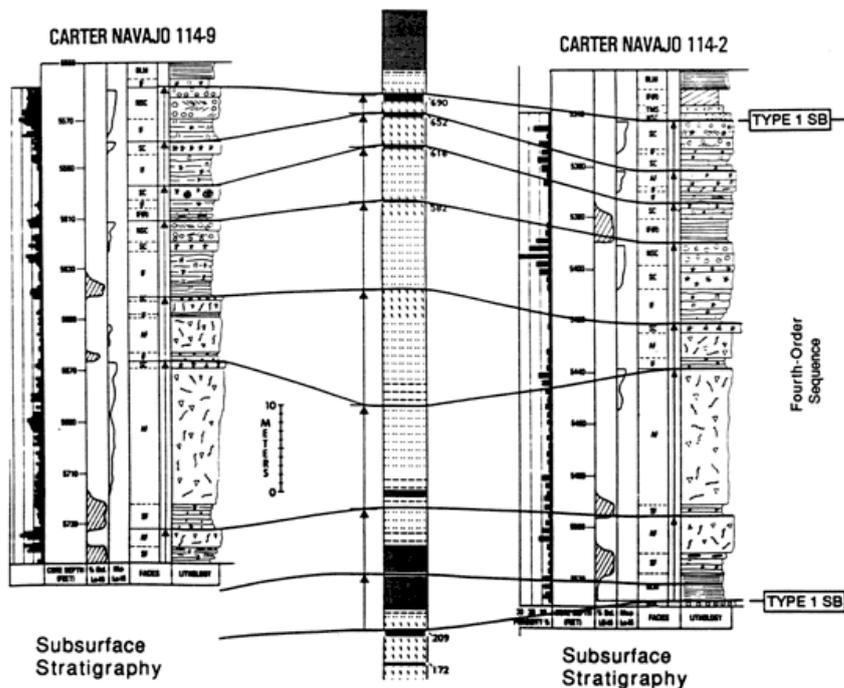


Figura 3.2. Exemplo de resultados obtidos com o programa de simulação unidimensional *Mr. Sediment* (Goldhammer *et al.*, 1987)

### 3.2. Simulação bidimensional direta de recife de corais

Como os dados de entrada para tais simulações são bastante difíceis de serem quantificados para o passado geológico, surgiram modelos que focaram simular ambientes deposicionais carbonáticos do Holoceno e Pleistoceno, pois para esses as taxas de crescimento são facilmente adquiridas e os históricos de nível do mar são bastante conhecidos (Chappel, 1980; Graus *et al.*, 1984; Paulay e McEdward, 1990; Bosscher e Schlager, 1992).

Esses trabalhos se focam somente na produção e crescimento recifes de corais com algoritmos bidimensionais, sem levar em conta processos de erosão e dispersão. As escalas de tempo são de alguns milhares de anos e as escalas espaciais de alguns quilômetros. Esses modelos estudam a variação de geometrias

carbonáticas devido às flutuações do nível do mar, à subsidência tectônica e a fatores ambientais como atenuação da luz solar com a profundidade e turbidez da água. Essas interações seriam difíceis de serem analisadas de maneira qualitativa, pois envolvem processos de longa duração. Por isso, o grande interesse por modelos computacionais.

A energia das ondas e a atenuação da energia solar através da água são os principais fatores limitantes do crescimento de recifes de corais nos trabalhos de Chappell (1980) e Graus *et al.* (1984). A variação do nível do mar é simulada no máximo até alguns milhares de anos. Chappell (1980) comparou o resultados dos recifes simulados com recifes da Nova Guiné e Graus *et al.* se concentraram na zona de recifes de Discovery Bay na Jamaica. Paulay e McEdward (1990) incorporaram erosão por meios fluviais, marinhos e subaéreos em seus modelos de recifes, porém os sedimentos erodidos são simplesmente retirados do sistema e não são redistribuídos. A descrição teórica mais completa do crescimento de corais em função da profundidade foi dada por Bosscher e Schlager (1992). As taxas de crescimento pela profundidade são derivadas a partir de funções de intensidade de luz variando com a profundidade; não há inclusão de funções de erosão e dispersão de sedimentos (Figuras 3.3. e 3.4.). Assim foi concluído, a partir de comparações dos modelos simulados com medições do campo, que o principal controle de crescimento de corais para os períodos estudados é a penetração da luz solar através da água.

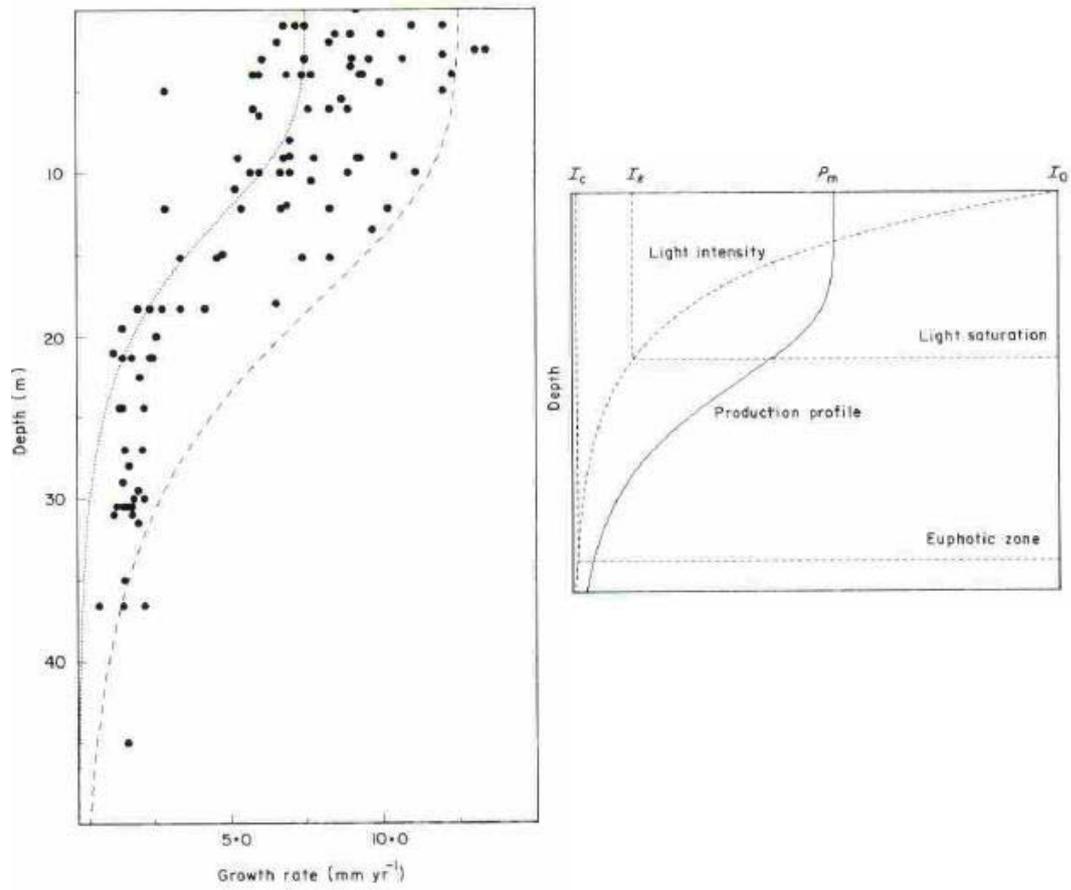


Figura 3.3. Taxas de crescimento de corais Caribenhos e curva de intensidade de luz comparada com função de crescimento de corais (Bosscher e Schlager, 1992).

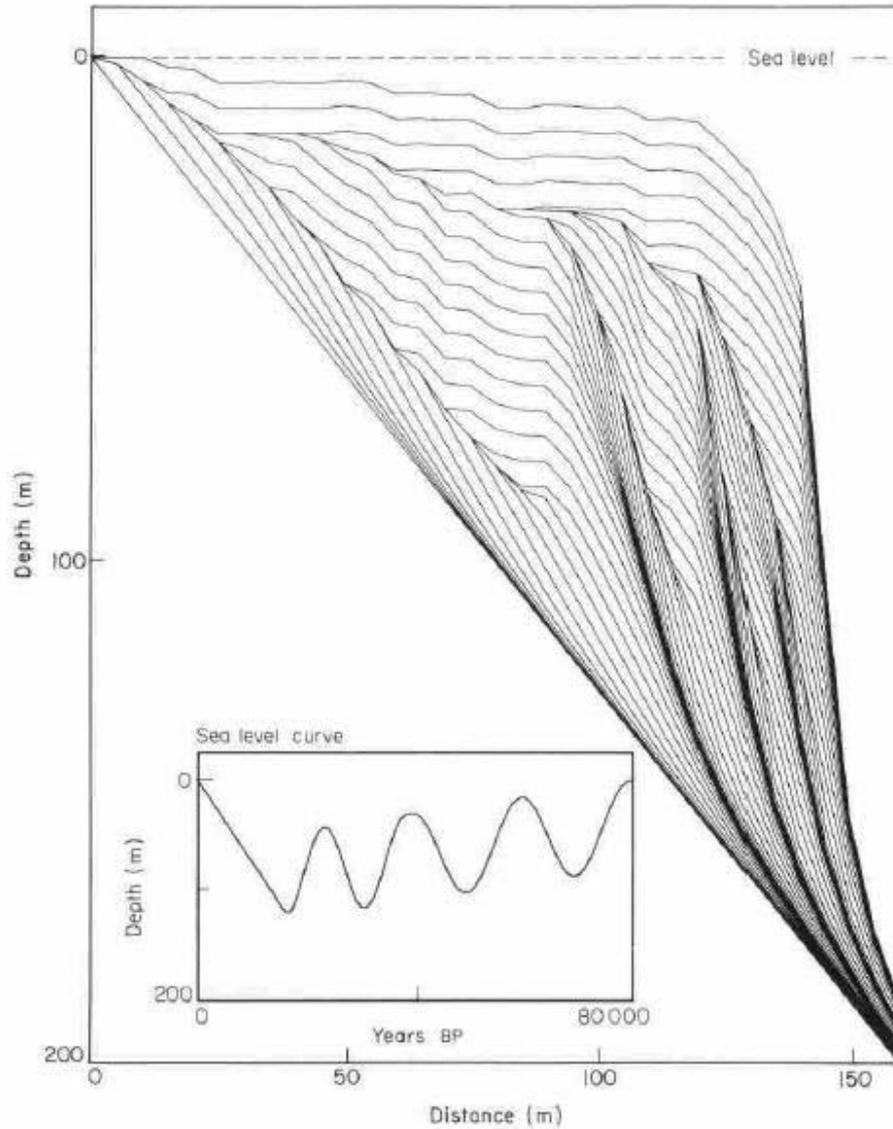


Figura 3.4. Resultados de uma simulação de crescimento de corais com a dada curva de variação de nível do mar (Bosscher e Schlager, 1992).

### 3.3. Simulação bidimensional direta de plataformas carbonáticas

Programas mais gerais para simular a formação e evolução de plataformas carbonáticas mais extensas somente começaram a aparecer no final da década de 80. Demicco e Spencer (1989), Read *et al.* 1991 e Goldhammer *et al.* (1993) simularam sedimentação carbonática em função da profundidade, flutuações do nível do mar e subsidência tectônica. Programas bidimensionais eram utilizados para tentar compreender o comportamento de plataformas carbonáticas em relação aos mecanismos controladores. Lerche *et al.* (1987), Bice (1988), Bosence e

Waltham (1990) e Bosscher e Southam (1992) desenvolveram programas para criar diversos modelos, testando uma variedade de parâmetros de entrada para investigar como as plataformas se comportavam, comparando com cenários geológicos da estratigrafia de sequências.

Dois programas similares foram desenvolvidos de maneira independente, MAPS (Figura 3.5.), de Demicco e Spencer (1989) e *Dr. Sediment* de Goldhammer *et al.* (1993). Ambos usaram a profundidade de deposição como indicador de fácies e se concentraram em ambientes rasos. Eles removeram sedimentos por erosão, que eram então redistribuídos. MAPS foi utilizado com sucesso para reproduzir fácies de uma plataforma carbonática do Cambriano, como foi mostrado em Demicco *et al.* (1991). Em Read *et al.* (1991), o programa unidimensional previamente desenvolvido foi estendido para casos bidimensionais que simula deposição dependente da profundidade com suas respectivas fácies. Nesse simulador, subsidência bacinal e flutuações do nível do mar são os principais controles e inclui erosão subaérea, mas sem redistribuição. O programa foi utilizado para simulações de milhões de anos e algumas comparações com dados do campo foram demonstradas por Koerschner e Read (1989), Osleger e Read (1991) e Erlick e Read (1991), em cujos trabalhos foram definidos os ciclos de nível do mar e investigadas as formações de ciclos carbonáticos.

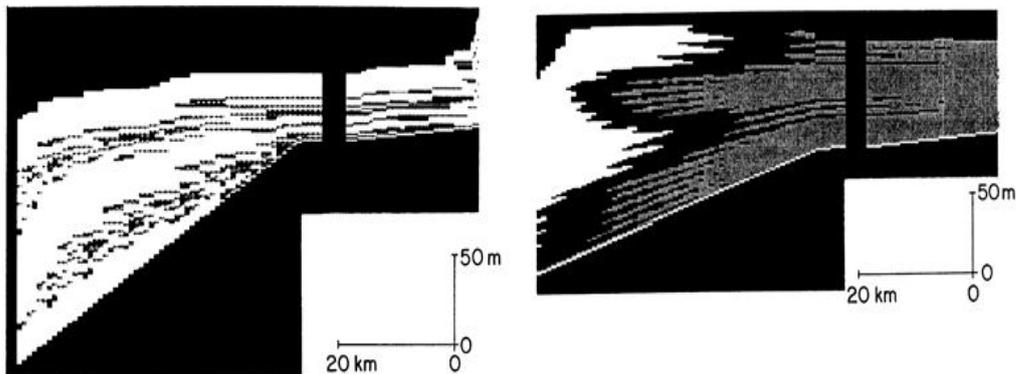


Figura 3.5. Exemplos de resultados obtidos no programa MAPS (Demicco e Spencer, 1989).

Bice (1988) foi o primeiro a incluir dispersão de sedimentos em um simulador puro de carbonatos. Com o objetivo de aproximar em grande escala o

efeito da dispersão de sedimentos, geometrias predefinidas de sedimentos redepositados são incluídas onde o crescimento *in situ* não ocupou todo o espaço deposicional disponível entre o fundo do mar e a base das ondas. CARBPLAT (Figura 3.6.) de Bosscher e Southam (1992) trabalha de maneira similar, porém os sedimentos excedentes são espalhados por cima da plataforma carbonática seguindo uma função mais sofisticada. Harris (1991) desenvolveu o programa MARGIN que encaixa de maneira puramente geométrica sedimentos erodidos.

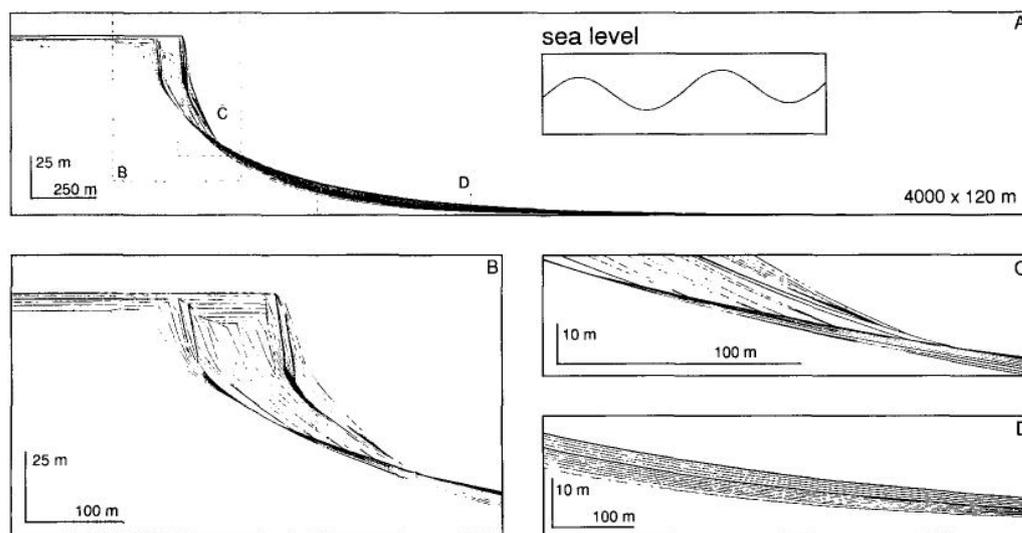


Figura 3.6. Imagens do resultado de uma simulação em CARBPLAT (Bosscher e Southam, 1992) com alguns planos aproximados.

Uma boa evolução dos simuladores de plataformas carbonáticas veio com o programa CARBONATE (Bosence e Waltham, 1990) (Figura 3.7.). Processos de transporte sedimentar, no lugar de encaixes geométricos, foram utilizados para redistribuir sedimentos soltos por erosão subaérea e subaquosa de depósitos anteriores. Nesse programa, taxas de crescimentos variam lateralmente para simular ambientes deposicionais de lagunas e margens de plataforma. As funções que determinam as taxas de deposição resultantes são definidas pelo usuário baseadas em medições no campo e não levam em conta funções da atenuação da luz e condições marinhas. Uma versão mais avançada de CARBONATE é utilizada para reproduzir depósitos do Mioceno em Mallorca (Bosence *et al.*, 1994). Um algoritmo de distribuição de sedimentos mais sofisticado foi utilizado levando em conta efeitos difusivos nos taludes. Esses algoritmos de distribuição

sedimentar são parecidos com os desenvolvidos em simuladores de sedimentação clástica.

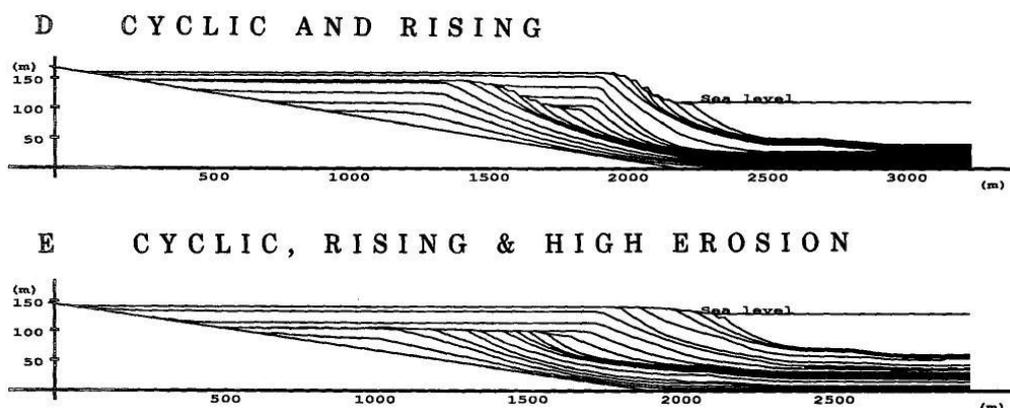


Figura 3.7. Exemplos de simulações com diferentes parâmetros de entradas modeladas em CARBONATE (Bosence e Waltham, 1990).

O SEDPAK (Kendall *et al.*, 1991) gera modelos geométricos bidimensionais e simula sedimentação em ambientes carbonáticos, siliciclásticos e mistos. Espaço de acomodação, subsidência, produção de sedimentos e mudanças de nível do mar trabalham são os principais controles utilizados no programa.

### 3.4.

#### Simulação tridimensional direta de plataformas carbonáticas

Até há algum tempo, era pouca a viabilidade de desenvolver boas ferramentas computacionais para simulação tridimensional de plataformas carbonáticas por causa das limitações em capacidade computacional. Agora a realidade é outra e já existem disponíveis alguns trabalhos sobre simulações tridimensionais de sistemas carbonáticos, apesar de na maioria dos casos os cálculos serem feitos sobre superfícies bidimensionais gerando resultados tridimensionais.

O *Carbonate Geologic Process Modeler* (GPM) (Hill, J. *et al.*, 2009) (Figura 3.8.) simula crescimento de recifes e lagunas carbonáticas em função da penetração da luz na água, ação de ondas e níveis de supersaturação carbonática. Transporte de sedimentos também foi implementado e o programa foi desenvolvido para ser aplicado em vários tipos de plataformas carbonáticas, como plataformas com borda, rampas e plataformas isoladas. Para diferenciar ambientes

de borda de ambientes internos, o GPM utiliza um algoritmo baseado na equação da onda que determina, para cada ponto na malha, o tempo de residência, que é uma aproximação do tempo que leva para a água marinha ser renovada em determinado ponto. Quanto maior o tempo de residência em um ponto, mais restrito é o ambiente onde se encontra esse ponto.

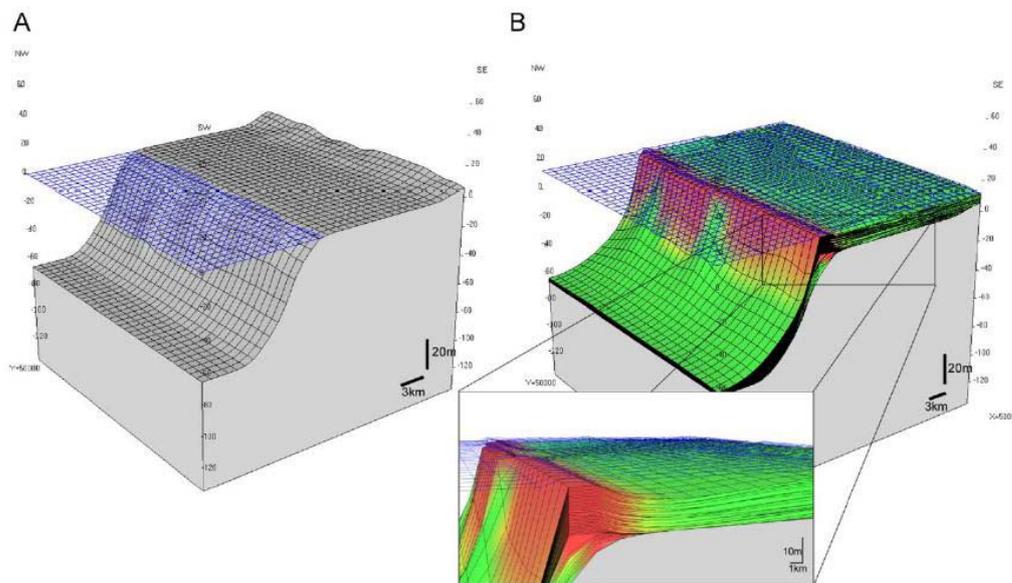


Figura 3.8. Algumas telas do programa GPM (Hill, J. *et al.*, 2009), (A) antes da simulação, (B) depois da simulação com uma área em destaque mais detalhada.

Um modelo de simulação tridimensional de produção, transporte e deposição de sedimentos carbonáticos é apresentado por Bitzer e Salas (2002) com o programa SIMSAFADIM (*SIMulation of Stratigraphic Architecture and Facies Distribution Model*) (Figura 3.9.). O modelo de transporte e deposição é baseado em fluxo potencial e inclui transporte advectivo, dispersivo e difusivo, a deposição de um sedimento depende das velocidades do fluxo, da profundidade e de velocidades de deposição. Os modelos de produção carbonática são baseados em modelos uni e bidimensionais previamente desenvolvidos em Bitzer e Salas (2001). A sedimentação carbonática é simulada considerando dinâmicas populacionais de organismos produtores seguindo modelos de predador-presa que foram inicialmente desenvolvidos por Lotka (1924) e Volterra (1931). Uma série de equações diferenciais ordinárias controla as interações entre as populações de predadores e presas que dividem o mesmo habitat, essas equações incorporam diversos processos que afetam populações dos organismos.

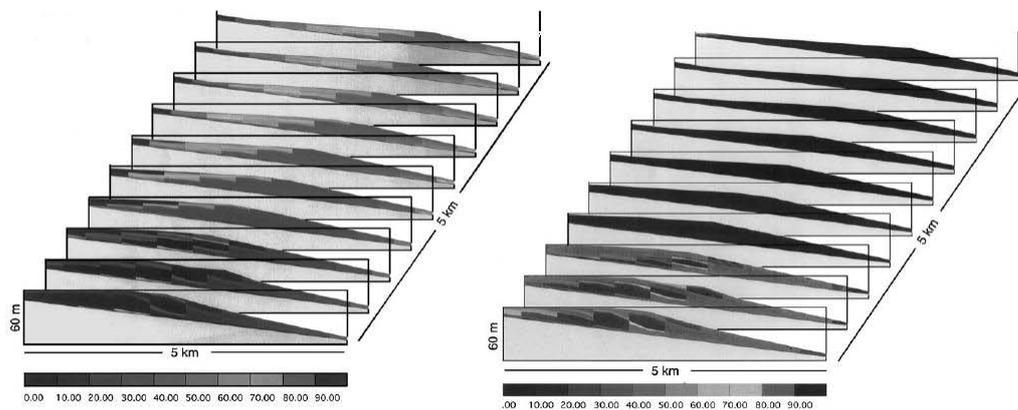


Figura 3.9. Exemplos de resultados obtidos pelo programa SIMSAFADIM (Bitzer e Salas, 2002).

Um modelo tridimensional bastante completo foi desenvolvido por Warrlich *et al.* (2002), CARBONATE 3D (Figura 3.10.), simula o desenvolvimento estratigráfico e sedimentológico de plataformas carbonáticas e ambientes mistos terrígenos-carbonáticos. O programa foca nos seguintes processos sedimentares: produção de carbonatos de águas rasas e abertas, produção de carbonatos de águas rasas e restritas, produção de carbonatos de águas profundas, entrada de sedimentos siliciclásticos finos e grossos e erosão subaquosa e subaérea e redeposição de sedimentos. CARBONATE 3D pode ser utilizado para simular vários cenários geológicos e foi capaz de recriar plataformas carbonáticas do Mioceno na bacia de Níjar, Espanha (Warrlich *et al.* 2005) (Figura 3.11.).

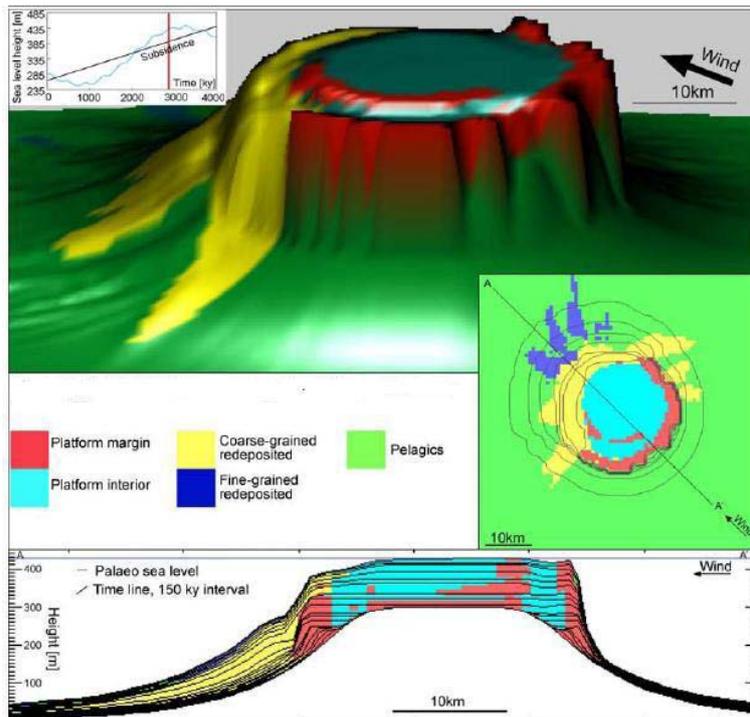


Figura 3.10. Exemplo de modelo de um atol no programa CARBONATE 3D (Warrlich *et al.*, 2002).

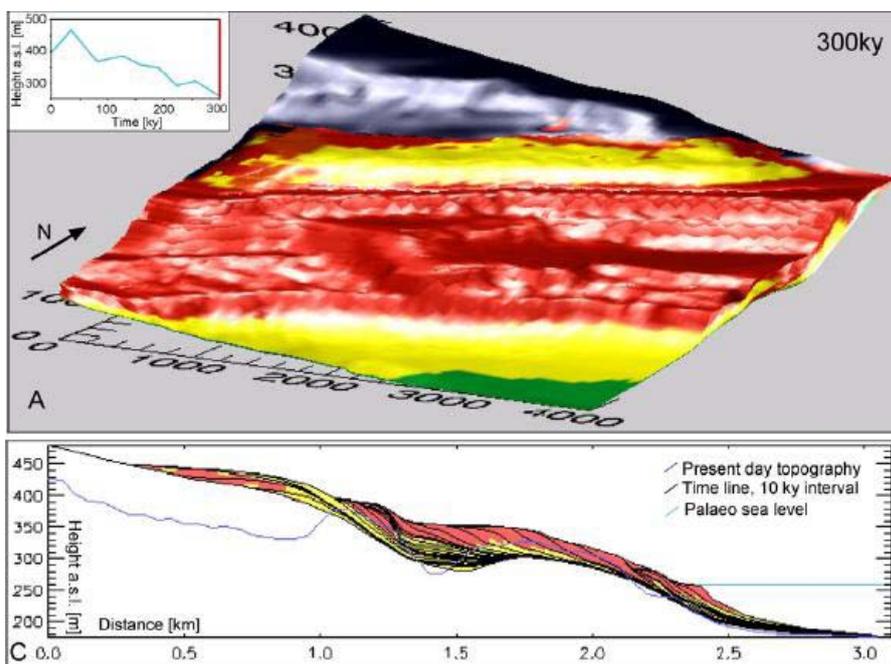


Figura 3.11. Modelagem da bacia de Níjar, Espanha, utilizando o programa CARBONATE 3D (Warrlich *et al.*, 2005).

Alguns trabalhos desenvolveram modelos de sedimentação carbonática tridimensional implementando métodos estocásticos (Burgess *et al.*, 2000) e com

elementos de lógica Fuzzy (Nordhund, 1996, 2000), outros empregaram modelos inversos (Granjeon e Joseph, 1999). Métodos estocásticos estão ficando bastante populares porque fenômenos climáticos e biológicos têm caráter aleatório; e a lógica Fuzzy ajuda bastante para uma identificação mais adequada de fácies. Esses métodos, porém, não foram estudados nesse trabalho, que se concentra em modelos diretos e determinísticos.

## 4 Modelo geológico

Neste capítulo são descritos os processos geológicos considerados neste trabalho para modelagem direta e determinística da formação e evolução de plataformas carbonáticas. As formulações matemáticas ligadas a esses processos são demonstradas e seus parâmetros explicados.

### 4.1. Eustasia e Subsidência

A eustasia é a variação absoluta do nível do mar pelo tempo geológico causado por efeitos tectônicos, climáticos e gravitacionais, principalmente. A subsidência é a movimentação vertical negativa do substrato das bacias causada por efeitos tectônicos e térmicos. Juntando esses dois fenômenos geológicos, pode-se descrever curvas de variação do nível relativo do mar. Essa superposição indica o espaço de acomodação disponível entre o topo do nível do mar e o embasamento do fundo do mar. Movimentações tectônicas não são simuladas neste modelo, porém são incorporadas nas curvas relativas. Para áreas não muito acima de 10 km por 10 km onde não se identifica subsidência extensiva, o uso de curvas de nível de mar relativo é bastante satisfatório (Warrlich, 2001). Na Figura 4.1., pode-se ter uma melhor visualização desses conceitos (Posamentier *et al*, 1988):

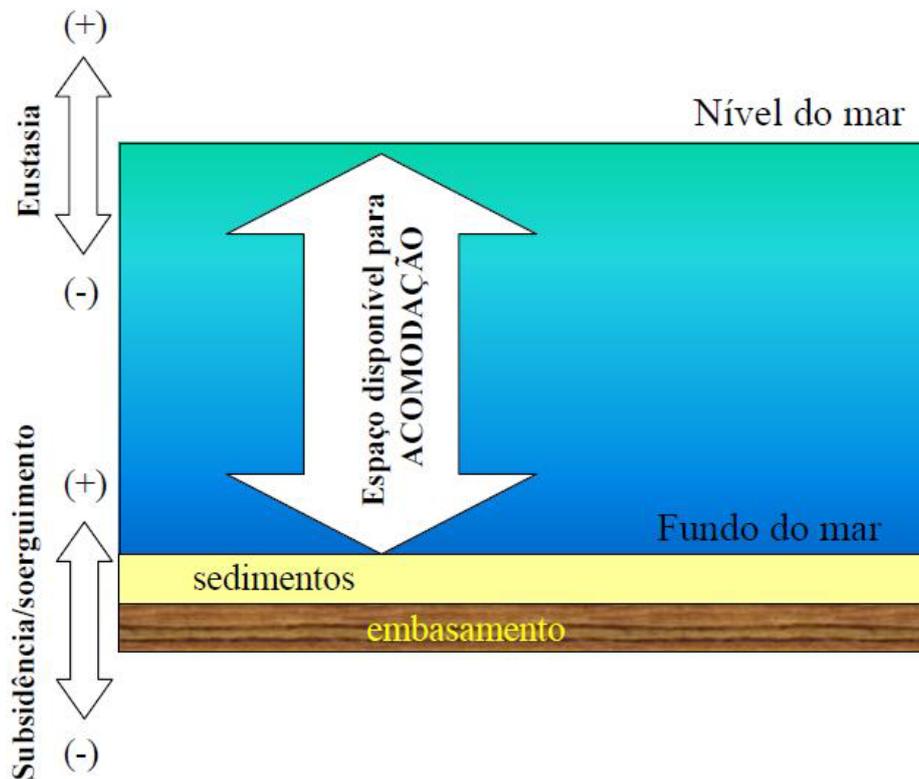


Figura 4.1. Conceitos de eustasia, subsidência e nível relativo do mar.

Na geologia sedimentar, dois principais tipos de curvas eustáticas são utilizados: curvas de baixa frequência (Haq *et al*, 1987; Harland, 1982) e curvas de alta frequência. As curvas de alta frequência são curvas harmônicas sobrepostas baseadas na equação do movimento ondulatório:

$$NM = A \sin(\omega t + \theta) \quad (4.1)$$

Sendo:

$NM$  – nível do mar;

$A$  – amplitude máxima das flutuações do nível do mar;

$\omega = 2\pi/T$ , onde  $T$  é o período em que essa amplitude máxima se repete;

$t$  – o tempo geológico;

$\theta$  – angulo de fase da equação de movimento ondulatório.

Na modelagem de deposição carbonática, é comum a sobreposição de curvas com os seguintes períodos: 1 000 000 a 10 000 000 de anos (terceira ordem), 100 000 a 400 000 anos (quarta ordem) e aproximadamente 40 000 anos (quinta ordem) (Reading & Levell, 1996). Para simular o efeito da subsidência, é

acrescentada uma parcela de variação linear à Eq. 4.1, fazendo com que a função senoidal da curva eustática seja superposta à variação linear da subsidência, montando assim a curva da variação do nível relativo do mar. A Figura 4.2. mostra um exemplo de curva de variação do nível relativo do mar, para um período de terceira ordem superposto a um período de quarta ordem e uma subsidência linear.

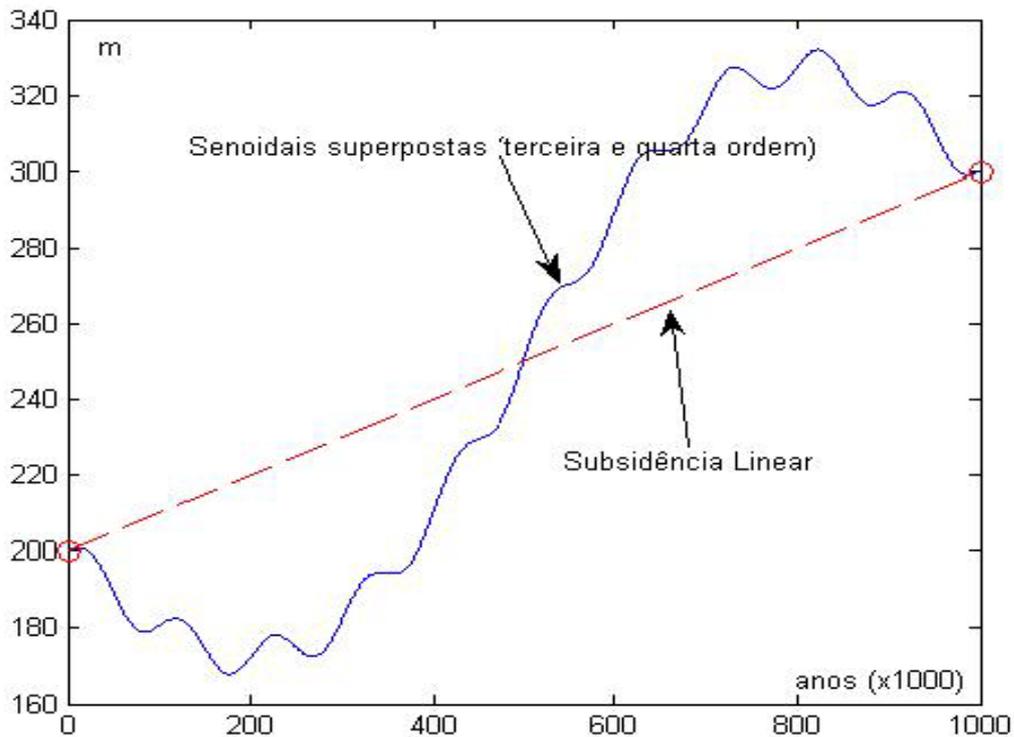


Figura 4.2. Exemplo de curva de nível relativo do mar utilizada no modelo.

E a nova equação do nível do mar fica:

$$NM = A1.\text{sen}(\omega1.t + \theta) + A2.\text{sen}(\omega2.t) + at \quad (4.2)$$

Sendo:

$\alpha$  - a variação linear da subsidência;

$A1$  e  $A2$  - a amplitude relativa ao período de menor e maior ordem, respectivamente;

$\omega1$  e  $\omega2$  - frequência angular relativos ao período de menor e maior ordem, respectivamente.

As curvas de variação do nível do mar são fortemente ligadas aos *Systems Tracts*, que são unidades estratigráficas associadas geneticamente que foram depositadas durante fases específicas do ciclo de nível relativo do mar (Posamentier *et al.*, 1988). Essas unidades aparecem em forma de aglomerados tridimensionais de fácies e definidas baseando-se em superfícies limitantes e sua posição dentro de um ciclo (Van Wagoner *et al.*, 1988). Durante um ciclo de nível relativo do mar, três principais *Systems Tracts* foram vistos neste trabalho:

- *Lowstand Systems Tracts (LST)*: acontece durante um intervalo de rebaixamento do nível do mar e um crescimento lento subsequente. Neste intervalo pode ocorrer do espaço de acomodação ser menor do que a velocidade de deposição, ocorrendo migração para locais mais profundos.
- *Transgressive Systems Tracts (TST)*: são depositados durante a rápida subida do nível do mar, em muitos casos a subida pode ser mais rápida do que o aporte de sedimentos terrígenos e/ou o crescimento carbonático *in situ*. A velocidade máxima de elevação do nível do mar acontece durante o *TST*, e o fim do ciclo acontece quando as taxas de sedimentação conseguem acompanhar novamente a subida do nível do mar.
- *Highstand Systems Tracts (HST)*: este ciclo ocorre quando a sedimentação já é maior do que a criação de espaço de acomodação. No final do ciclo o nível do mar começa a descer novamente entrando em um *LST*.

Suas relações com as curvas de nível do mar são mostradas na Figura 4.3.

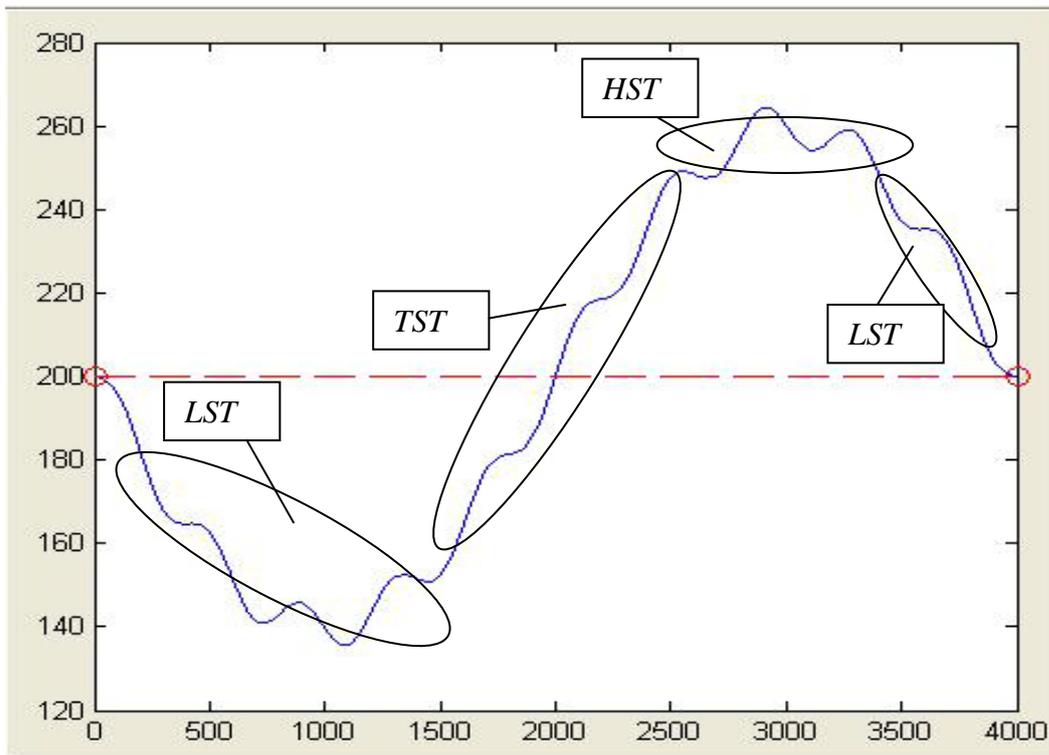


Figura 4.3.: Ciclos na curva de nível do mar onde ocorrem os principais *System Tracts*.

## 4.2. Produção Carbonática

Como descrito anteriormente, três tipos de fábricas carbonáticas são utilizadas nesse trabalho: águas rasas abertas, águas rasas restritas e águas profundas. Cada uma dessas fábricas será relacionada com uma taxa máxima de produção *in situ*. Nos recifes antigos, as taxas de crescimento costumam ser mais baixas do que as taxas encontradas em exemplos modernos, isto ocorre principalmente pelo fato de os recifes antigos terem sofrido mais com a influência das flutuações do nível do mar, algo que não pode ser verificado em recifes modernos pela escala geológica de tempo. A partir da recomposição dos dados antigos com os modernos, as taxas máximas de produção carbonática *in situ*, em metros por mil anos (m/kA), para as três fábricas, podem ser derivadas e são o ponto de partida do modelo. Essas taxas representam o crescimento vertical positivo em metros, para cada mil anos, de uma determinada fábrica carbonática em suas condições perfeitas de produção. As condições de produção podem variar devido à presença de luz, e paralelamente, à batimetria do fundo do mar e às condições marinhas. Para representar as condições de produção, são utilizadas

diversas funções de restrição (Chappell, 1980), que, em função das condições apresentadas, reduzem as taxas máximas de produção para cada fábrica carbonática. Essas funções variam de 0 a 1 e à partir delas podemos calcular a taxa resultante de produção para um determinado carbonato:

$$P_R(x,y,z) = P_M * S(x,y,z) \quad (4.3)$$

Sendo:

$P_R$  - Taxa resultante de produção para determinado carbonato

$P_M$  - Taxa máxima de produção para determinado carbonato

$S(x,y,z)$  - Função de restrição

Assim sendo, em seu valor máximo de 1, a função de restrição indica condições perfeitas de produção e conseqüentemente taxas máximas de crescimento carbonático *in situ*. Quando nula, a função de restrição indica condição adversas à produção e crescimento carbonático nulo. Diferentes funções de restrição são utilizadas para quantificar cada uma das condições ideais de produção e juntadas de forma adequada para representar a condição de crescimento de cada fábrica carbonática. A Eq. 4.3 pode, então, ser desenvolvida para cada tipo de carbonato:

$$P_R(x, y, z, c) = P_M(c) * \prod_{i=1}^n S_i(x, y, z) \quad (4.4)$$

Sendo:

$c$  - Tipo de carbonato

$n$  - Quantidade de funções de restrição necessárias para quantificar as condições de produção do carbonato  $c$ .

A seguir serão relacionadas as funções de restrição utilizadas nesse trabalho.

#### **4.2.1. Restrição por profundidade**

Essa restrição se aplica nos carbonatos de águas rasas devido à dependência à fotossíntese dos organismos produtores dessas regiões. A disponibilidade de luz é um fator importante para o crescimento desses organismos (Bosscher &

Schlager, 1992). Esse fato é controlado pela profundidade, já que a luz é absorvida ao longo da coluna d'água, e pela turbidez da água nessa região. Inúmeras medições comprovaram que a intensidade de radiação solar disponível em uma determinada profundidade decresce exponencialmente seguindo a lei de Beer-Lambert (Chalker, 1981; Bosscher 1992). Para águas mais turvas a intensidade da radiação solar decresce mais rapidamente:

$$I_z = I_o e^{\frac{-z}{\sigma_d}} \quad (4.5)$$

Sendo:

$I_z$  - Intensidade da radiação solar na profundidade  $z$

$I_o$  - Intensidade da radiação solar na superfície do nível do mar

$z$  - Profundidade em m

$\sigma_d$  - Profundidade de atenuação da função exponencial em m. Para águas claras, essa profundidade é da ordem dos 30 metros, em águas turvas varia de 1 a 5 metros.

A atenuação da radiação solar pela profundidade é bem quantificada na literatura, porém é preciso saber o impacto que essa atenuação tem sobre os organismos responsáveis pelo crescimento das rochas carbonáticas. Essa relação é bastante complicada de se obter e foi através de estudos em recifes modernos que foi constatado que o crescimento próximo do nível do mar é bastante constante e cai drasticamente em profundidades acima de uma profundidade limite para níveis de luminosidade ideal de um determinado organismo. Daí foi retirada a seguinte relação de proporcionalidade (Bosscher & Schlager, 1992; Bosscher, 1992):

$$P(z, c) \equiv \tanh(L * e^{\frac{-z}{\sigma_d}}) \quad (4.6)$$

Sendo:

$P$  - Taxa de produção de um determinado carbonato na profundidade  $z$

$L$  - Fator adimensional de transição entre a região de profundidades onde as condições de luminosidade são próximas do ideal e as profundidades onde a produção decai exponencialmente

Analisando o lado direito da relação 4.6 de proporcionalidade, é constatado que ela tem um domínio entre 0 e 1, sendo uma boa candidata para a função de restrição por profundidade. Falta considerar o efeito de restrição devido à ação das ondas, esse pode ser representado de maneira bem simples como um crescimento linear à partir do nível do mar até o nível de base das ondas. Para um nível de base das ondas,  $z_b$ , pode-se definir a função de restrição por profundidade,  $S_{od}$ , como sendo:

$$S_{od} = \frac{z}{z_b} \quad (4.7)$$

para valores de  $z$  entre 0 e  $z_b$ ;

$$S_{od} = \tanh\left(L * e^{\frac{-(z-z_b)}{\sigma_d}}\right) \quad (4.8)$$

para valores de  $z$  acima de  $z_b$ .

A Figura 4.4 a seguir mostra o formato da função de restrição por profundidade  $S_{od}$ .

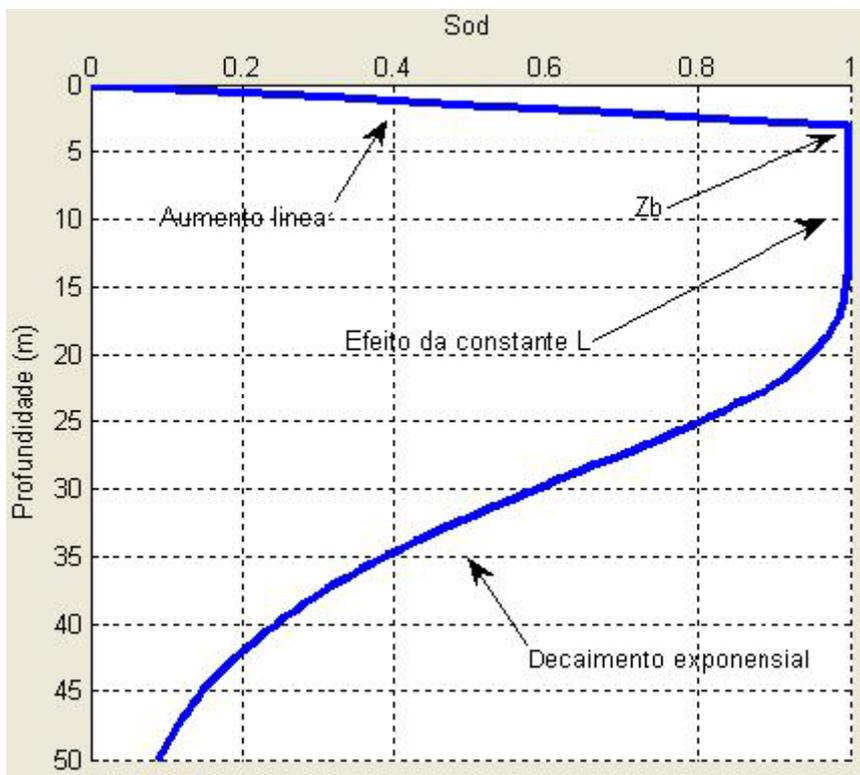


Figura 4.4. Função de restrição por profundidade.

#### 4.2.2. Restrição por condições marinhas

Os organismos produtores de rochas carbonáticas em águas rasas, além da luminosidade, necessitam de condições marinhas ideais em relação à salinidade, a nutrientes e a temperatura. Essas condições podem mudar bastante devido ao posicionamento geométrico em uma plataforma carbonática. Em um local mais próximo a mar aberto, há uma recirculação maior da água marinha, mantendo assim os níveis de salinidade parecidos com os do mar aberto e obtendo uma boa renovação de nutrientes. Em águas restritas são muitas vezes encontradas situações de hipersalinidade e de baixa renovação de nutrientes. São essas condições que separam as duas fábricas carbonáticas de águas rasas: águas rasas restritas e águas rasas abertas. Como é muito difícil de quantificar níveis de salinidade e nutrientes para o passado geológico, esse problema foi transformado em um problema geométrico (Warrlich *et al.*, 2002). Locais na margem de uma plataforma, ou seja, de baixa profundidade, porém próximos de locais de maior profundidade são considerados de águas abertas e locais no interior de uma plataforma, ou seja, de baixa profundidade e envolvidos de locais de baixa profundidade, são considerados de águas restritas. A função de restrição por condições marinhas será relacionada à distância da região estudada até locais de borda de plataforma. Porém essas distâncias são complicadas de calcular, principalmente para geometrias irregulares. Uma maneira relativamente simples, e possível de automatizar computacionalmente, para se ter uma noção dessas distâncias é utilizando um perfil de profundidades suavizadas (Warrlich *et al.*, 2002).

A profundidade suavizada de um ponto na superfície do fundo do mar sofre influências das profundidades dos pontos em seu entorno, assim pode-se determinar a posição relativa desse ponto através de sua profundidade suavizada. Para efetuar esta suavização, a profundidade em cada ponto da superfície original do fundo do mar é ajustada através de um filtro que leva em conta a influência das profundidades dos pontos em seu entorno. Esta influência é maior para pontos mais próximos do ponto em questão e decresce até um nível irrelevante para pontos mais distantes. Baseando-se nestas profundidades suavizadas, é possível determinar para cada ponto seu grau de proximidade com regiões mais profundas

e regiões mais rasas; e conseqüentemente determinar seu posicionamento na plataforma carbonática em relação à borda e à parte interna.

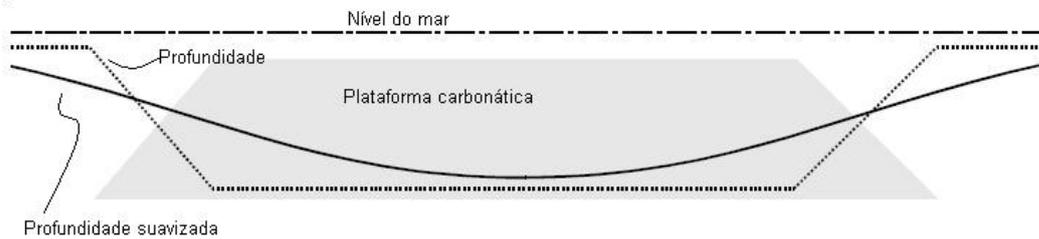


Figura 4.5. Perfil de profundidade suavizado e normal através de um corte transversal de uma plataforma carbonática.

Uma análise na Figura 4.5 mostra que para profundidades originais iguais, um ponto na borda da plataforma tem uma profundidade suavizada maior que um ponto no interior da plataforma. No ponto da borda, apesar de sua profundidade original ser igual ao do ponto mais interno, a profundidade suavizada tem mais influência dos pontos em seu entorno com maiores profundidades. Baseado nesse fato será feita uma suavização da superfície do fundo do mar utilizando um filtro Gaussiano (Figura 4.6.) a partir da seguinte convolução (Warrlich, 2001):

$$z_s(x, y) = z(x, y) \otimes G(x, y) \quad (4.9)$$

Sendo:

$z_s(x, y)$  - Profundidade suavizada em  $(x, y)$

$z(x, y)$  - Profundidade em  $(x, y)$

$G(x, y)$  - Filtro Gaussiano utilizado como *kernel* da convolução

$$G(x, y) = \frac{1}{\pi\sigma_G} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma_G^2}} \quad (4.10)$$

Sendo:

$\sigma_G$  - Desvio padrão da distribuição de Gauss, quanto maior, maior será a área de influência da suavização.

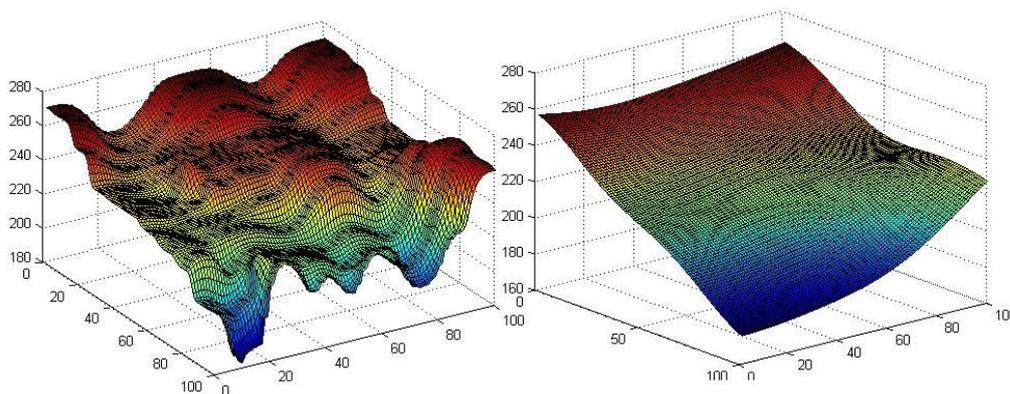


Figura 4.6. Exemplo de uma superfície suavizada com um filtro Gaussiano.

A função de restrição por condições marinhas é quantificada pelas profundidades suavizadas. Para isso, pode-se usar uma função exponencial parecida com a função de restrição por profundidade (Warrlich *et al.*, 2002):

$$S_{OM}(x, y) = 1 - e^{\frac{-z_S(x, y)}{\sigma_M}} \quad (4.11)$$

Sendo:

$S_{OM}(x, y)$  - Restrição devido ao desvio de condições marinhas ideais para carbonatos de águas abertas

$\sigma_M$  - Fator de atenuação exponencial

Dessa forma, a restrição terá valor nulo para valores nulos da profundidade suavizada e crescerá exponencialmente junto à mesma.

No caso de carbonatos de águas rasas e restritas, suas condições ideais de crescimento acontecem justamente em locais de interior de plataforma e se pode usar o mesmo perfil de profundidades suavizadas para determinar sua função de restrição (Warrlich, 2001):

$$S_{RM} = 1 - S_{OM} \quad (4.12)$$

Sendo:

$S_{RM}$  - Restrição devido ao desvio de condições marinhas ideais para carbonatos de águas restritas

### 4.2.3. Restrição por deposição de sedimentos soltos

Taxas de deposição de sedimentos soltos transportados, sejam de origem terrígena proveniente de aporte fluvial ou de origem carbonática previamente depositada *in situ* e depois erodidas, podem inibir o crescimento *in situ* de rochas carbonáticas. Esses sedimentos soltos, de tamanho argiloso ou arenoso, depositados podem cobrir e extinguir os organismos responsáveis pela produção carbonática e deixam o fundo do mar com uma densidade menor, diminuindo a capacidade dos organismos de se prenderem no fundo e montarem suas colônias (Granjeon, 1997). A restrição por deposição de sedimentos soltos (Figura 4.7.) é definida a partir de uma taxa limite, abaixo de qual a deposição não incomoda a atividade dos organismos. Acima dessa taxa limite, a produção carbonática decai exponencialmente (Lawrance *et al*, 1987; Aigner *et al*, 1989):

$$S_{SC}(x, y) = e^{\frac{-(s(x,y)-s_L)}{\sigma_s}} \quad (4.13)$$

para  $s(x,y) \geq s_L$ ;

$$S_{SC}(x, y) = 1; \quad s(x, y) \leq s_L \quad (4.14)$$

para  $s(x,y) \leq s_L$ .

Sendo:

$s(x,y)$  - Taxa de deposição de sedimentos soltos em  $(x,y)$

$s_L$  - Taxa de deposição limite para início da restrição

$\sigma_s$  - Atenuação exponencial

$S_{SC}$  - Restrição devido à deposição de sedimentos soltos

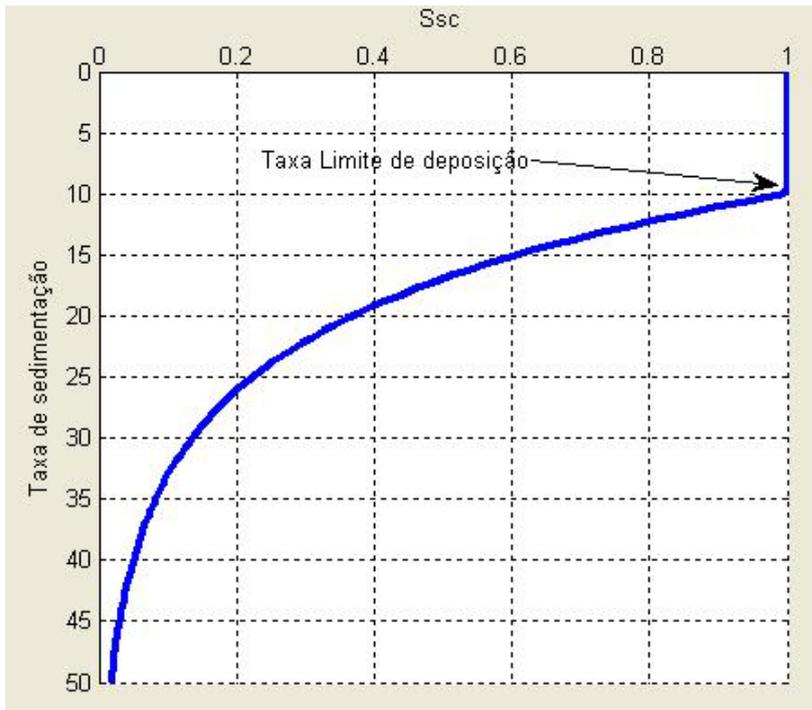


Figura 4.7. Função de restrição devido à deposição de sedimentos soltos.

#### 4.2.4. Restrição por profundidade para carbonatos de águas profundas

Os organismos presentes em águas profundas também podem produzir rochas carbonáticas, porém com taxas bastante inferiores às de rochas em águas rasas. As taxas desse tipo de produção são máximas em regiões de alto mar com grandes profundidades e diminuem drasticamente ao se aproximar dos taludes costeiros. Em águas mais rasas, os organismos de águas profundas não conseguem competir com os organismos de águas rasas que tem taxas de produção muito mais elevadas. Assim sendo, a restrição à produção nas regiões profundas é em função somente da profundidade e, mais uma vez, pode ser utilizada uma exponencial para definir essa função de restrição (Bowman & Vail, 1999):

$$S_{PP} = 1 - e^{\frac{-z(x,y)}{\sigma_p}} \quad (4.15)$$

Sendo:

$S_{PP}$  - Função de restrição por profundidade para carbonatos de águas profundas

$\sigma_p$  - Fator de atenuação exponencial

#### 4.2.5. Produção carbonática resultante

A partir das funções de restrição, a Eq. 4.4 pode ser desenvolvida para cada fábrica carbonática. Deve-se salientar que muitas das funções de restrição apresentadas anteriormente são em função da profundidade que por sua vez é em função da superfície do fundo do mar,  $z(x,y)$ , e que essa superfície varia ao longo do tempo conforme a plataforma vai evoluindo. Por isso, a produção carbonática resultante será sempre em função do espaço e do tempo.

Águas rasas e abertas:

$$P_{RA}(x, y, z(t)) = P_{MA} * S_{OD}(x, y, z(t)) * S_{OM}(x, y, z(t)) * S_{SC}(x, y) \quad (4.16)$$

Águas rasas e restritas:

$$P_{RR}(x, y, z(t)) = P_{MR} * S_{OD}(x, y, z(t)) * S_{RM}(x, y, z(t)) * S_{SC}(x, y) \quad (4.17)$$

Águas profundas:

$$P_{RP}(x, y, z(t)) = P_{MP} * S_{PP}(x, y, z(t)) * S_{SC}(x, y) \quad (4.18)$$

Sendo:

$P_{RA}(x, y, z(t))$ ,  $P_{RR}(x, y, z(t))$  e  $P_{RP}(x, y, z(t))$  as taxas resultantes de crescimento carbonático, no ponto  $(x,y,z(t))$ , no tempo  $t$ , em águas rasas abertas, águas rasas restritas e águas profundas, respectivamente.

$P_{MA}$ ,  $P_{MR}$  e  $P_{MP}$  as taxas máximas de crescimento carbonático para condições ideais, em águas rasas abertas, águas rasas restritas e águas profundas, respectivamente.

#### 4.3. Sedimentação carbonática

Depois de calculadas as taxas resultantes de crescimento carbonático para cada fábrica, deve-se definir como a plataforma carbonática evolui através do tempo. O acréscimo da camada de sedimento para cada ponto da superfície será a soma das taxas de crescimento por um determinado intervalo de tempo e é descrito com a seguinte equação:

$$\frac{d}{dt} s(x, y, z(t)) = P_{RA}(x, y, z(t)) + P_{RR}(x, y, z(t)) + P_{RP}(x, y, z(t)) \quad (4.19)$$

Sendo:

$ds(x,y,z)$  - Acréscimo infinitesimal da camada de sedimento carbonático

$dt$  - Intervalo infinitesimal de tempo

#### 4.4. Classificação da sedimentação carbonática

Após a definição da quantidade de sedimento produzido para um intervalo de tempo, ainda é necessário definir uma classificação satisfatória desses sedimentos para facilitar a análise dos resultados. Os ambientes de baixa energia hidrodinâmica costumam apresentar sedimentos de granulometria mais fina enquanto ambientes de alta energia hidrodinâmica apresentam sedimentos mais grossos. Nesse trabalho, as regiões de águas rasas e restritas e de águas profundas serão consideradas de baixa energia hidrodinâmica e as regiões de águas rasas e abertas, de alta energia. Baseado nisso foi feita uma adaptação à classificação proposta por Dunham (1962), conforme indicado na Figura 4.8.:

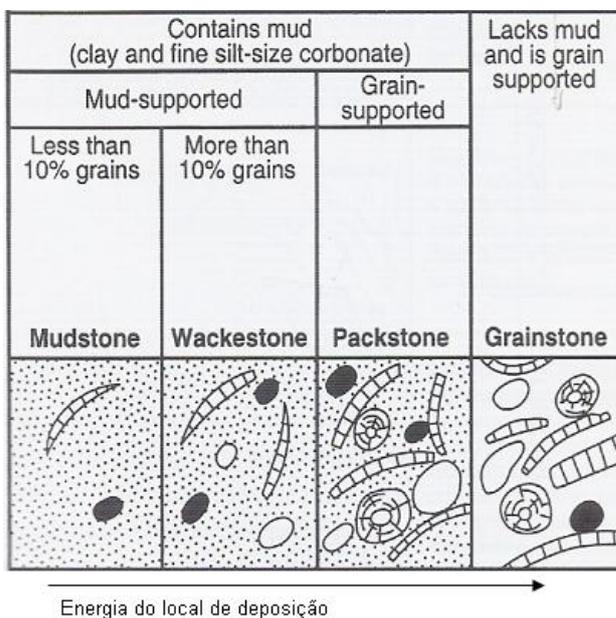


Figura 4.8. Classificação de rochas carbonáticas segundo Dunham (1962)

Adaptando essa classificação às fábricas carbonáticas simuladas nesse trabalho, a classificação mostrada na tabela 1 é proposta:

Tabela 1: Classificação dos sedimentos carbonáticos nesse trabalho

Classificação	Parcela borda plataforma	Sedimento fino predominante
<i>Mudstone</i> Pelágico	0 - 10 %	Águas profundas
<i>Wackestone</i> Pelágico	10 - 50 %	Águas profundas
<i>Packstone</i> Pelágico	50 - 90 %	Águas profundas
<i>Mudstone</i> Lagunal	0 - 10 %	Águas rasas restritas
<i>Wackestone</i> Lagunal	10 - 50 %	Águas rasas restritas
<i>Packstone</i> Lagunal	50 - 90 %	Águas rasas restritas
<i>Grainstone</i>	> 90 %	Qualquer um

## 5 Modelo computacional

Por estar inserido na linha de pesquisa de *Computação Gráfica Aplicada* do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio, parte extensa desse trabalho foi a elaboração de um modelo computacional completo para simulação de sedimentação carbonática. Um programa, totalmente desenvolvido no ambiente MATLAB (The Mathworks Inc., 2008), junta uma interface ao usuário intuitiva a técnicas de computação gráfica interativa. O CarbSM (*CARBonate Sedimentation Model*) efetua o pré e pós processamento junto aos algoritmos de deposição carbonática.

### 5.1. Sistema CarbSM

O MATLAB é um ambiente de programação muito utilizado no meio científico por ser prático de programar, apresentar uma estrutura interna preparada pra resolver sistemas de equações e por oferecer muitas opções de saídas gráficas. Sua estrutura de dados básica é uma matriz flexível a vários tipos de dados e que não necessita ser inicializada. Todas as operações trabalham em cima dessas matrizes e por isso o sistema todo é muito otimizado para lidar com matrizes. Portanto, o MATLAB apresenta um forte potencial para atuar na área científica que muitas vezes precisa de um sistema computacional para resolver grandes sistemas de equações que são armazenadas em forma matricial. CarbSM foi todo escrito seguindo conceitos de POO (Programação Orientada a Objetos) para conseguir uma estrutura de dados consistente, de fácil manutenção e melhor organização. Os recursos de POO para MATLAB não oferecem tanta flexibilidade como em outras linguagens orientadas a objetos, como C++ ou Java, mas são suficientes para criar um programa bem estruturado e consistente que sirva para o que esse trabalho se propõe a fazer.

Classes são criadas para juntar propriedades e métodos (funções) que podem ser aplicados em diversos objetos. Cada objeto tem suas propriedades que podem

ser modificadas e acessadas através de seus métodos. Em CarbSM foram criadas as seguintes classes:

- CarbonateSurface: guarda as matrizes com as coordenadas  $x$ ,  $y$ ,  $z$  e utiliza métodos para calcular a evolução temporal da superfície carbonática
- Restrictions: tem como propriedades os parâmetros necessários para o cálculo das funções de restrições e as matrizes contendo os valores das restrições para toda a superfície
- Carbonates: guarda os valores das taxas máximas de cada ambiente de deposição carbonática e as matrizes com as taxas resultantes para toda a superfície após aplicação das restrições
- CarbonateFile: classe que gerencia a escrita e leitura dos modelos gerados no CarbSM
- CarbonateModel: classe geral que inicializa os objetos das outras classes e gerencia a inicialização dos parâmetros e todo o processo da modelagem em si
- CarbonateVis: classe que faz a conexão entre a estrutura de dados do modelo e os elementos da interface gráfica.

## 5.2. Rotinas computacionais

Dentro dessas classes estão todas as rotinas que efetuam a modelagem computacional dos depósitos carbonáticos, referentes aos processos geológicos descritos no capítulo anterior. Essa seção dará uma explicação sobre as principais rotinas do modelo geológico e seus algoritmos empregados.

### 5.2.1. Superfície Inicial

O primeiro passo da simulação consiste em definir a superfície inicial em que os algoritmos de deposição serão aplicados. Para isso, é necessário um conjunto de dados anteriormente adquiridos chamados *pontos de controle*. Pontos de controle são conjuntos de pontos no formato  $(x, y, z)$  a partir dos quais se define a área que pretende ser modelada (Figura 5.1.). Não necessariamente esses

conjuntos serão os limites da superfície inicial. Os pontos de controle são somente os pontos que são utilizados para determinar uma representação matemática da superfície inicial. Essa representação matemática é obtida aplicando-se um método de interpolação nos pontos de controle. Estes pontos são geralmente obtidos no campo para casos de modelagens reais e quanto mais pontos de controle, mais próximo da realidade será a superfície resultante, necessitando de no mínimo um ponto para poder gerar a superfície. Porém este mínimo não apresenta um resultado muito convincente.

A superfície inicial obtida é um *grid* discreto bidimensional com espaçamento regular nas direções  $x$  e  $y$ . Em cada nó do *grid* será calculado o valor de  $z$  adequado a partir da interpolação dos pontos de controle. Esse trabalho utiliza o Método do Inverso da Potência das Distâncias (IPD) (Landim, 2000), um método de interpolação local, determinístico e exato, bastante utilizado em Sistemas de Informação Geográfica. O método consiste em fazer uma média ponderada dos valores de  $z$  dos pontos de controle para os nós do *grid*, sendo que os pontos mais distantes têm peso menor. Esse peso é determinado utilizando o inverso da potência da distância, no plano  $XY$ , do ponto de controle para o nó do *grid*. Os valores de  $z$  para pontos do *grid* que coincidem com algum ponto de controle não será interpolado e o valor exato de  $z$  do ponto de controle coincidente será utilizado no *grid*.

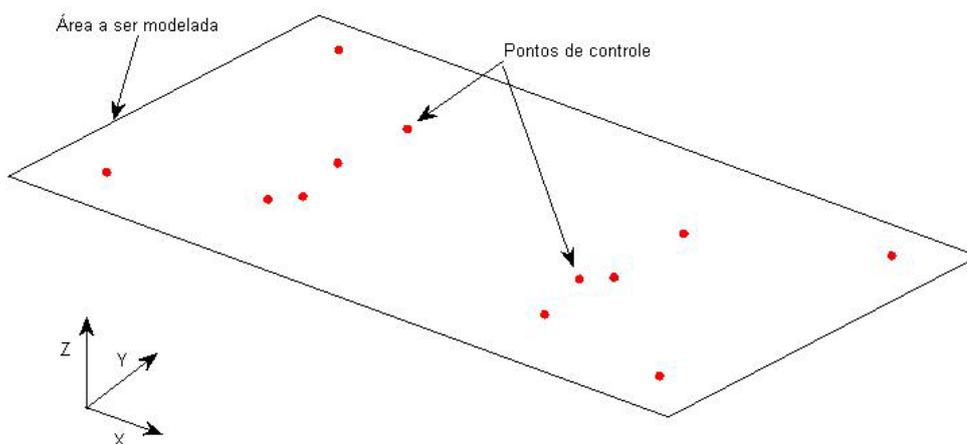


Figura 5.1. Pontos de controle predeterminados e área a ser modelada.

Para cada nó do *grid* a ser interpolado, o valor de  $z$  é calculado com as seguintes equações:

$$z(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{z_i}{h_{ij}^\beta}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_{ij}^\beta}} \quad (5.1)$$

$$h_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (5.2.)$$

Sendo:

$z(x, y)$  - o valor de  $z$  interpolado no nó do *grid*  $(x, y)$ ;

$z_i$  - o valor de  $z$  conhecido de um ponto de controle  $i$ ;

$n$  - o número de pontos de controle disponíveis;

$h_{ij}$  - distância entre o nó do *grid*  $j$  e o ponto de controle  $i$ , calculado pela Eq.

5.1;

$\beta$  - expoente da potência da distância.

Pode acontecer de alguns pontos de controle terem a mesma posição em  $xy$  que alguns nós do *grid*, para isto pode-se usar a seguinte condição para garantir o mesmo valor de  $z$  para esses casos:

$$z(x, y) = z_i \quad (5.3)$$

O valor do expoente da potência da distância é bastante importante e influencia no resultado final da interpolação. Quanto mais alto o valor do expoente, mais peso se dá aos pontos de controle mais próximos e menos peso aos pontos mais distantes. Um expoente mais baixo gera uma superfície mais suave e um expoente mais alto gere uma superfície com maiores variações de  $z$ . Para demonstrar essa diferença, a área referente à Figura 5.1. foi subdividido para obter um *grid* com 40 nós nas direção  $x$  e  $y$ . O Método do Inverso da Potência das Distâncias foi aplicado inicialmente com  $\beta = 1$  (Figura 5.2.) e depois com  $\beta = 4$  (Figura 5.3.). No segundo caso os extremos tem maior magnitude e os pontos de controle mais afastados têm menor influência nos resultados, obtendo-se uma feição mais ondulada.

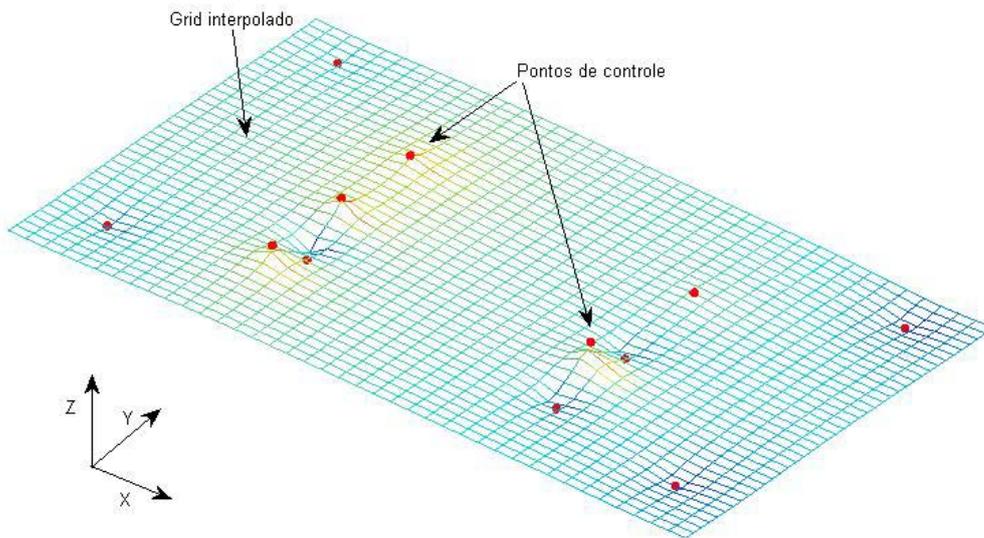


Figura 5.2. Grid interpolado com  $\beta = 1$ .

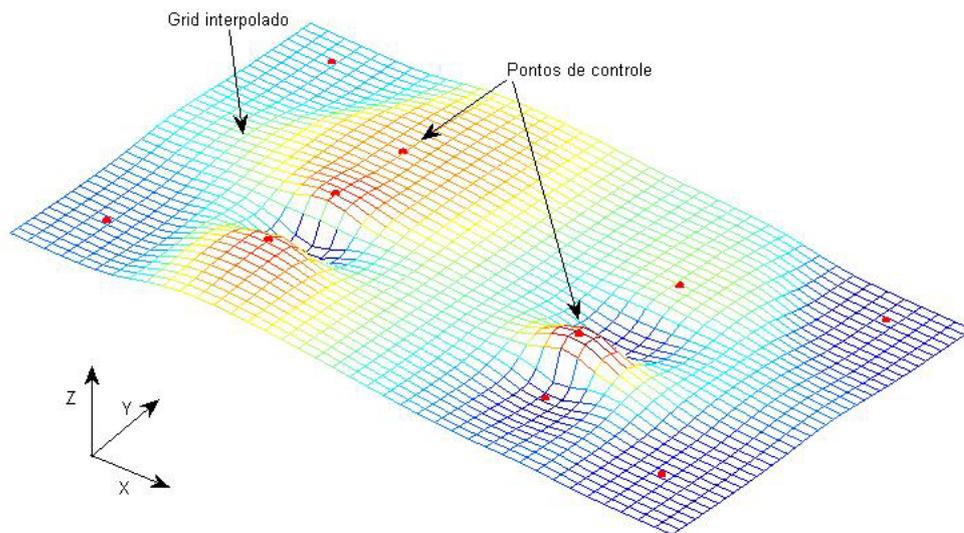


Figura 5.3. Mesmo Grid interpolado com  $\beta = 4$

### 5.2.2. Convolução

A convolução é uma operação matemática na área de análise funcional que junta duas funções para criar uma terceira. Ela é definida como a integral do produto de uma das funções com uma cópia invertida, com relação a um

determinado plano, da outra. A função resultante depende do valor desse deslocamento:

$$(f \otimes g)(t) = \int_0^t f(\tau) * g(t - \tau) dt \quad (5.4)$$

Para funções discretas, pode-se aproximar a integral com um somatório:

$$(f \otimes g)[m] = \sum_x f[x] * g[m - x] \quad (5.5)$$

Operações de convolução podem ser utilizadas para resolver sistemas de equações lineares, mas são principalmente usadas em algoritmos de processamento de sinais e imagens. A Eq. 5.5 é expandida para casos bidimensionais da seguinte forma:

$$(f(x, y) \otimes g(x, y))[m, n] = \sum_x \sum_y f[x, y] * g[m - x, n - y] \quad (5.6)$$

No CarbSM, a convolução bidimensional é utilizada cada vez que é preciso determinar a função de redução por condições marinhas. A superfície deposicional é suavizada seguindo a Eq. 5.6 de forma que  $f(x, y)$  seja a superfície a ser suavizada e  $g(x, y)$  seja o *kernel* do filtro Gaussiano, como mostrado na Eq. 4.9. O alcance do filtro é definido pelo termo  $\sigma_G$ , o desvio padrão da Gaussiana; quanto maior, maior será o alcance. Para aplicar o filtro, é necessário determinar inicialmente esse alcance em número de nós para poder montar a matriz *kernel* do filtro.

$$nfx = \sigma_G / \Delta x \quad (5.7)$$

$$nfy = \sigma_G / \Delta y \quad (5.8)$$

Sendo:

$nfx, nfy$  – número de nós na direção  $x$  e  $y$ , respectivamente, do *kernel*

$\Delta x, \Delta y$  – incremento em  $x$  e  $y$ , respectivamente, do *grid* principal

Tendo as dimensões prontas, a matriz do filtro Gaussiano pode ser montada e aplicada na matriz do *grid* principal. Para cada nó do *grid*, o filtro é aplicado de modo a sempre ter seu elemento central coincidindo com o nó em questão. Ou seja, considerando o nó  $i, j$ , o filtro é aplicado do nó  $i - ((nfx - 1) / 2)$  até  $i + ((nfx - 1) / 2)$  na direção  $x$  e do nó  $j - ((nfy - 1) / 2)$  até  $j + ((nfy - 1) / 2)$  na direção  $y$  como pode ser visto na Figura 5.4.

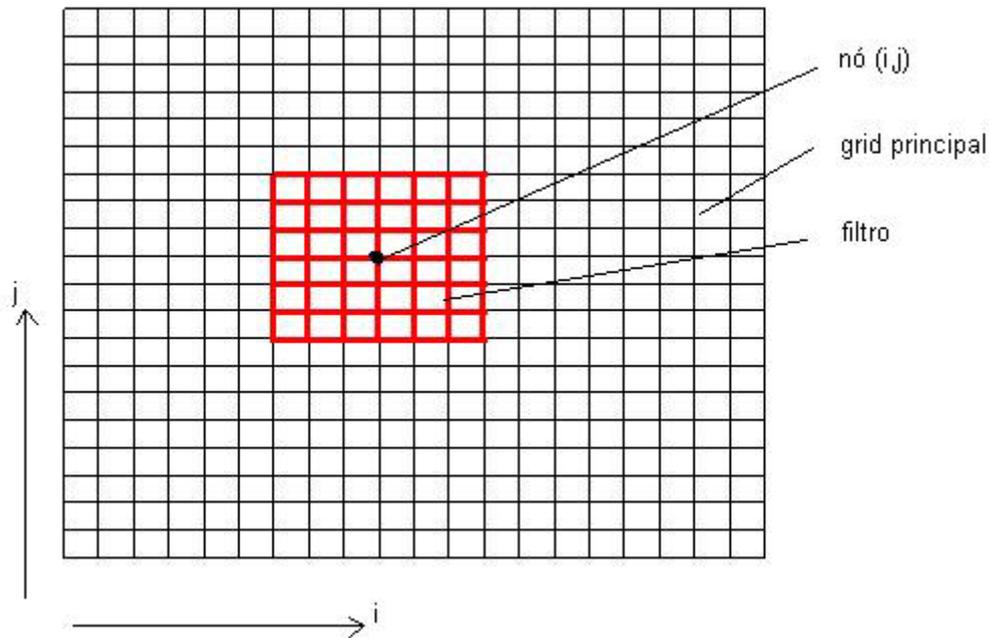


Figura 5.4. O *grid* principal da superfície deposicional com um filtro Gaussiano aplicado em um de seus nós.

O algoritmo de filtro percorre cada nó do *grid* e aplica o *kernel* de forma centralizada no nó, como mostra a Figura 5.4. A função Gaussiana é então aplicada em cima das coordenadas dos nós dentro do alcance do filtro da seguinte maneira, segundo a Eq. 5.6:

$$z_{s,ij} = \sum_{if=i-((nfx-1)/2)}^{i+((nfx-1)/2)} \sum_{jf=j-((nfy-1)/2)}^{j+((nfy-1)/2)} z_{ij} * G(x_{if,jf}, y_{if,jf}) \quad (5.9)$$

Sendo:

$z_{s,ij}$ , o valor da coordenada  $z$  da superfície deposicional suavizada no nó  $i, j$

$z_{ij}$ , o valor da coordenada  $z$  da superfície deposicional no nó  $i, j$

$G$ , a função Gaussiana mostrada na Eq.4.10

$x_{iff}$  e  $y_{iff}$ , as coordenadas  $x$  e  $y$ , respectivamente, da superfície deposicional

Em vários pontos do *grid* perto das bordas do modelo, o filtro Gaussiano vai tentar acessar nós inexistentes por estarem fora da região do modelo (Figura 5.5.). Para cuidar dessas condições, os valores das coordenadas  $z$  das bordas são replicadas para os nós virtuais fora do modelo. Para tornar o algoritmo mais eficiente, um *grid* auxiliar é criado com as bordas expandidas já contendo os valores replicados para os nós virtuais. Outra solução para tratar das condições de borda seria de simplesmente dispensar os pontos do filtro Gaussiano que ficariam fora do *grid* principal. Desta maneira, para cada ponto a ser suavizado, teria que ser feito uma verificação para saber quais pontos do filtro Gaussiano estariam dentro do *grid* principal e descartar os outros pontos. Este método, porém, se mostra bem menos eficiente, pois o MATLAB não trabalha bem com verificações e trabalha de maneira muito mais eficiente com aplicações matriciais diretas, por isso esta hipótese foi descartada.

Assim sendo, a Eq. 5.9 é executada como uma multiplicação de matrizes. Também por esse motivo, fica muito mais eficiente gerar uma matriz auxiliar estendida nas bordas e trabalhar com ela. Depois de ter passado por todos os nós da matriz original com o algoritmo de suavização, os valores obtidos são retirados da matriz auxiliar e colocados na matriz  $z_s$ . A matriz  $z$ , com as coordenadas do *grid* principal é montada inicialmente com  $n_x$  e  $n_y$  nós na direção  $x$  e  $y$ , respectivamente. A matriz auxiliar,  $z_{aux}$ , é então montada com  $n_x+(nfx-1)$  e  $n_y+(nfy-1)$  nós na direção  $x$  e  $y$ , respectivamente. Os valores referentes à matriz  $z$  são inseridos de maneira central na matriz auxiliar, de  $1+((nfx-1)/2)$  até  $nax-((nfx-1)/2)$  na direção  $x$  e de  $1+((nfy-1)/2)$  até  $nay-((nfy-1)/2)$  na direção  $y$ . Sendo  $nax$  e  $nay$  o número total de nós nas direções  $x$  e  $y$  da matriz auxiliar  $z_{aux}$ .

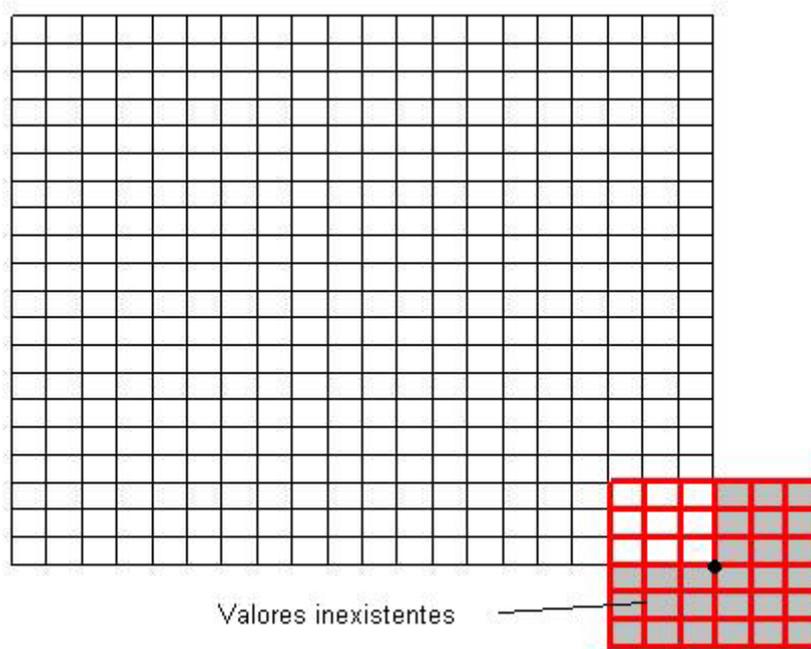


Figura 5.5. Exemplo de valores inexistentes na aplicação do filtro no nó  $(nx, 1)$ .

Os valores de borda de  $z$  são replicados da seguinte maneira para dentro da matriz  $z_{aux}$ , e as regiões detalhadas são indicadas na Figura 5.6:

1. De  $1 + ((nfx-1)/2)$  até  $nax - ((nfx-1)/2)$  na direção  $x$  e  $1$  até  $(nfy-1)/2$  na direção  $y = z(i, 1)$
2. De  $1 + ((nfx-1)/2)$  até  $nax - ((nfx-1)/2)$  na direção  $x$  e  $nay - ((nfy-1)/2)$  até  $nay$  na direção  $y = z(i, ny)$
3. De  $1$  até  $(nfx-1)/2$  na direção  $x$  e  $1 + ((nfy-1)/2)$  até  $nay - ((nfy-1)/2)$  na direção  $y = z(1, j)$
4. De  $nax - ((nfx-1)/2)$  até  $nax$  na direção  $x$  e  $1 + ((nfy-1)/2)$  até  $nay - ((nfy-1)/2)$  na direção  $y = z(nx, j)$
5. De  $1$  até  $(nfx-1)/2$  na direção  $x$  e  $1$  até  $(nfy-1)/2$  na direção  $y = z(1, 1)$
6. De  $1$  até  $(nfx-1)/2$  na direção  $x$  e  $nay - ((nfy-1)/2)$  até  $nay$  na direção  $y = z(1, ny)$
7. De  $nax - ((nfx-1)/2)$  até  $nax$  na direção  $x$  e  $nay - ((nfy-1)/2)$  até  $nay$  na direção  $y = z(nx, ny)$
8. De  $nax - ((nfx-1)/2)$  até  $nax$  na direção  $x$  e  $1$  até  $(nfy-1)/2$  na direção  $y = z(nx, 1)$

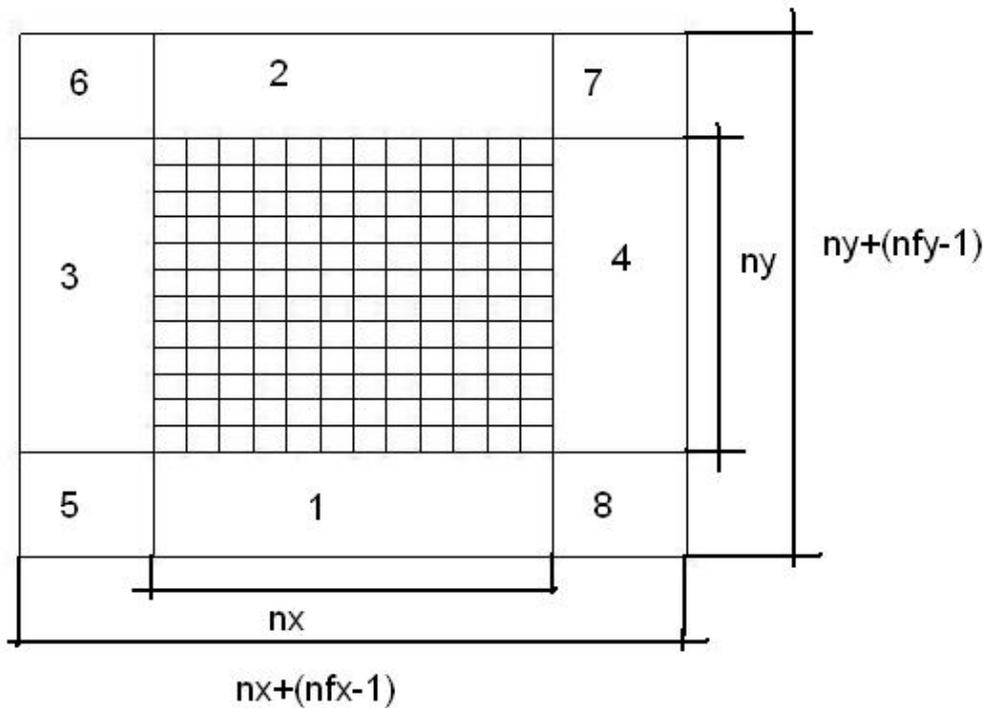


Figura 5.6. Matriz auxiliar  $z_{aux}$  com as regiões onde os valores da borda da matriz  $z$  são replicados.

Pode-se então calcular os valores para  $z_s$  a partir da matriz auxiliar e depois do cálculo essa matriz é descartada. Deve-se salientar também que os valores de  $z_s$  somente são utilizados para calcular os valores das funções de restrição  $S_{OM}$  e  $S_{RM}$  e os depósitos resultantes são somados na matriz das coordenadas  $z$  do *grid* principal, sem suavização.

### 5.2.3. Sedimentação carbonática

Após definir a superfície inicial e calcular todas as funções de restrição por todo o *grid* principal, falta aplicar a equação diferencial Eq. 4.19 para poder calcular a nova camada de acréscimo de sedimentos carbonáticos sobre as camadas já depositadas. O problema é resolvido de forma explícita, pegando os valores já calculados de um passo de tempo anterior para encontrar valores no passo de tempo atual. A derivada da Eq. 4.19 é aproximada utilizando o método numérico de Diferenças Finitas que é bastante simples de ser aplicado nesse caso:

$$(P_{RA}(t) + P_{RR}(t) + P_{RP}(t)) * \Delta t \quad (5.10)$$

Com isso, é obtida a camada de sedimentos a ser acrescentada para um determinado passo de tempo e a espessura em cada nó do *grid* é somada ao que se tinha antes (Figura 5.7).

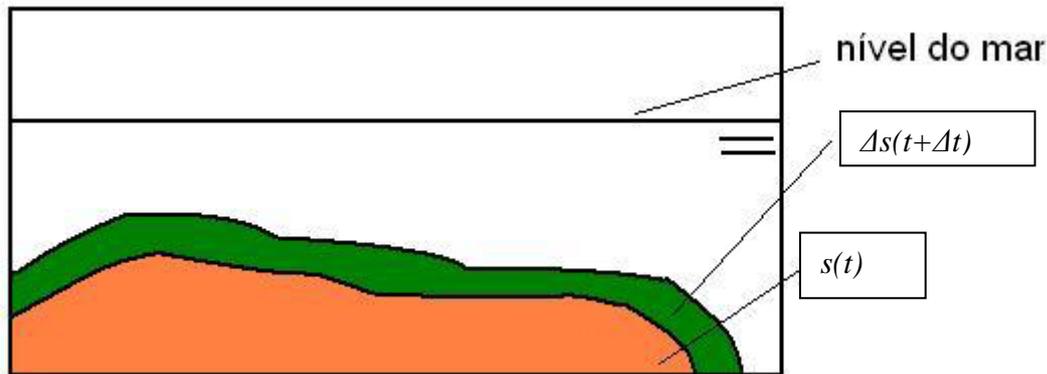


Figura 5.7. Camada de sedimentos adicionais,  $\Delta s$ , calculadas na rotina do tempo  $(t+\Delta t)$  é sobreposta à camada de deposições antigas,  $s(t)$

A matriz com os valores de  $\Delta s(t+\Delta t)$  define um valor de espessura adicional para cada nó do *grid*, mas ainda precisa identificar qual tipo de sedimento vai ser adicionado. Para isso, é calculado o valor relativo de sedimento adicional para cada um dos ambientes deposicionais.

$$PR_{RA} = (P_{RA}(t) * dt / ds(t+dt)) * 100 \quad (5.11)$$

$$PR_{RR} = (P_{RR}(t) * dt / ds(t+dt)) * 100 \quad (5.12)$$

$$PR_{RP} = (P_{RP}(t) * dt / ds(t+dt)) * 100 \quad (5.13)$$

Esses valores percentuais são aplicados na Tabela 1 e é determinado qual tipo de sedimento a ser depositado. Os tipos de depósito em cada nó são armazenadas em uma matriz que é utilizada no momento em que CarbSM desenha as camadas sedimentares.

#### 5.2.4. Rotina Principal

A rotina principal para gerar uma modelagem em CarbSM segue os seguintes passos:

1. Geração da superfície inicial, adicionando pontos de controle e determinando número de nós, distância entre nós e orientação do *grid*
2. Entrada de dados das taxas máximas de crescimento carbonático e dos parâmetros controladores das funções de restrição
3. Determinação do tempo total de simulação e do tamanho do passo de tempo
4. Geração da curva da variação de nível do mar
5. *Loop* através dos passos de tempo
  - 5.1. Suavização da superfície do passo de tempo anterior utilizando filtro Gaussiano para determinar o posicionamento relativo de cada ponto dentro da plataforma carbonática
  - 5.2. Cálculo dos valores das funções de restrição para todo o *grid*
  - 5.3. Aplicação das restrições em cima das taxas máxima de crescimento carbonático para obter  $P_{RA}$ ,  $P_{RR}$  e  $P_{RP}$
  - 5.4. Cálculo dos valores de acréscimo relativo para cada ambiente deposicional,  $PR_{RA}$ ,  $PR_{RR}$  e  $PR_{RP}$
  - 5.5. Atualização na superfície deposicional e armazenamento da matriz dos tipos de sedimentos; fim do *loop*
6. Preparo dos planos de corte e geração do modelo de visualização

### **5.3. Interface Gráfica**

Nessa seção será mostrados os principais componentes da interface gráfica do programa CarbSM.

#### **5.3.1. Tela principal**

A tela principal de CarbSM (Figura 5.8.) tem como parte central o *canvas* onde é desenhada a superfície resultante, tem todos os controles de visualização dos resultados e um menu para entrada de dados iniciais.

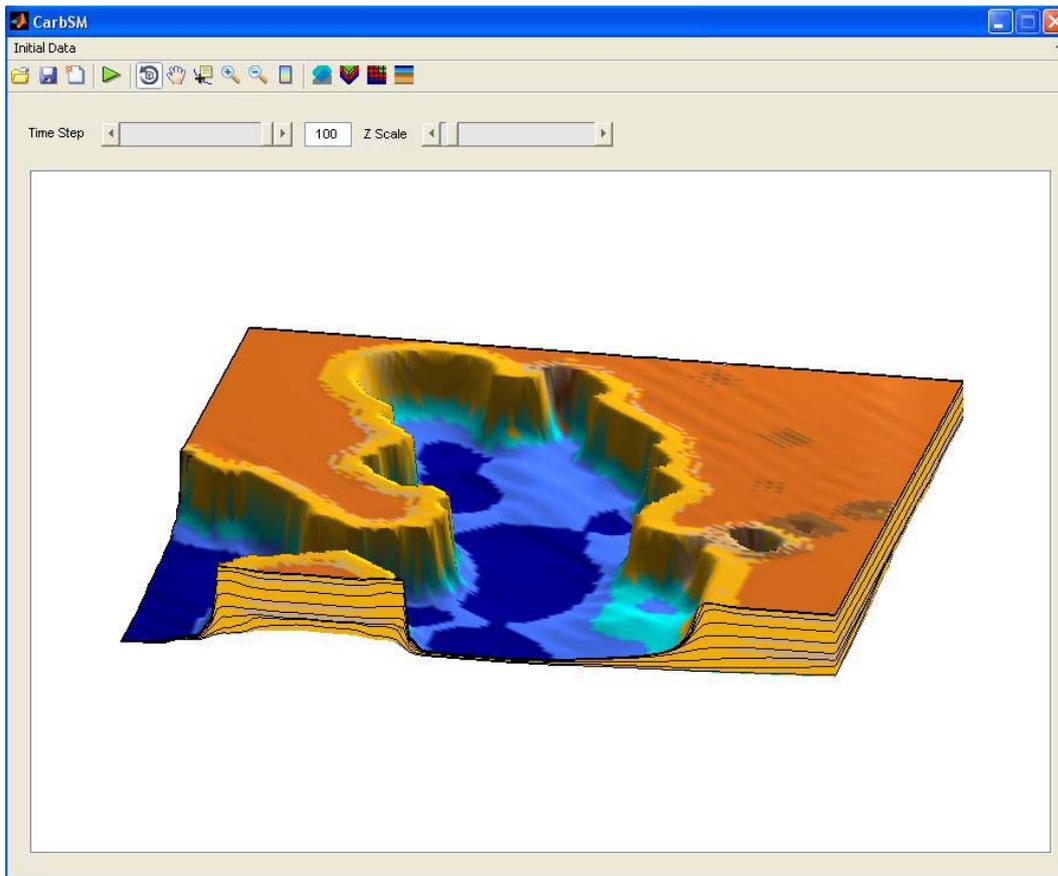


Figura 5.8. Tela principal do programa CarbSM com os controles de visualização, o *canvas* principal e o menu de entrada de dados

### 5.3.2. Entrada de dados



Figura 5.9. *Menu* para entrada dos dados necessários para rodar a simulação do CarbSM

A entrada de dados (Figura 5.9.) é dividida pelos seguintes itens:

- Taxas máximas de produção carbonática (Figura 5.10.):

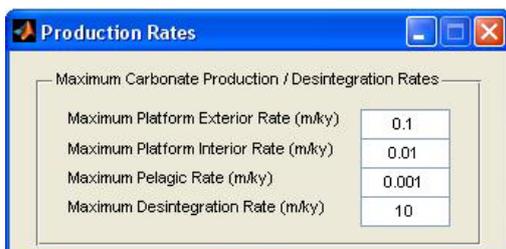


Figura 5.10. Entrada de dados para taxas máximas de produção carbonática para as diferentes fábricas

- Tempo de simulação

No tempo de simulação é definido o tempo total da simulação, o intervalo de tempo da simulação e o intervalo para as curvas de tempo na visualização do modelo resultante (Figura 5.11.):

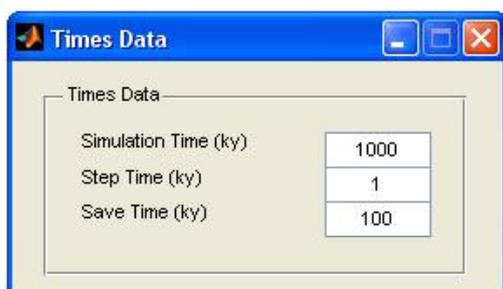


Figura 5.11. Entrada dos tempos da simulação

- Definição da curva do nível relativa do mar (Figura 5.12.)

Aqui é definida e ajustada a curva de nível relativo do mar, segundo a Eq. 4.2. Outras curvas que não podem ser definidas através da equação podem ser carregadas por arquivo de texto. Além de entrar com os parâmetros da Eq. 4.2 para calcular a curva, o usuário tem a opção de fazer um ajuste fino do nível inicial do mar e da subsidência linear com ajuda do mouse na curva.

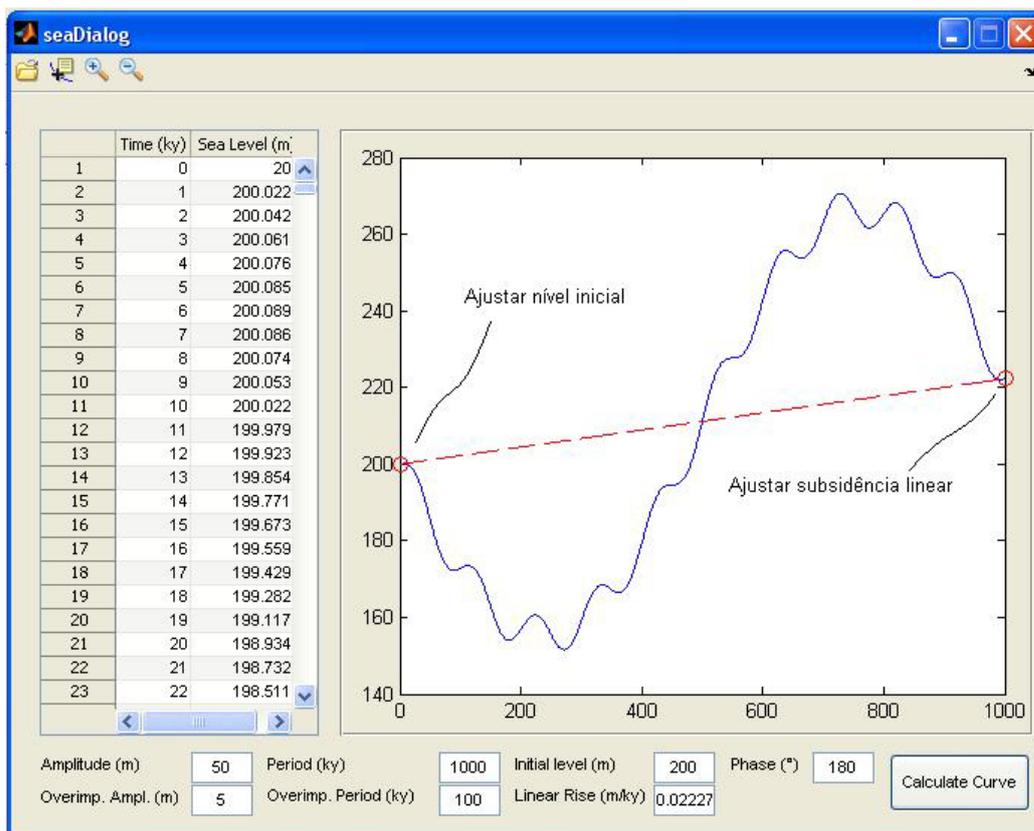


Figura 5.12. Definição da curva do nível relativo do mar.

- Funções de restrição (Figura 5.13.)

Para definição das funções de restrição utilizadas no modelo, basta o usuário entrar com todos os parâmetros apresentados na seção anterior, além de ter uma visualização das curvas geradas. Dependendo das condições da bacia a ser simulada, o usuário pode optar pelas funções de restrição a serem ativadas para a simulação:

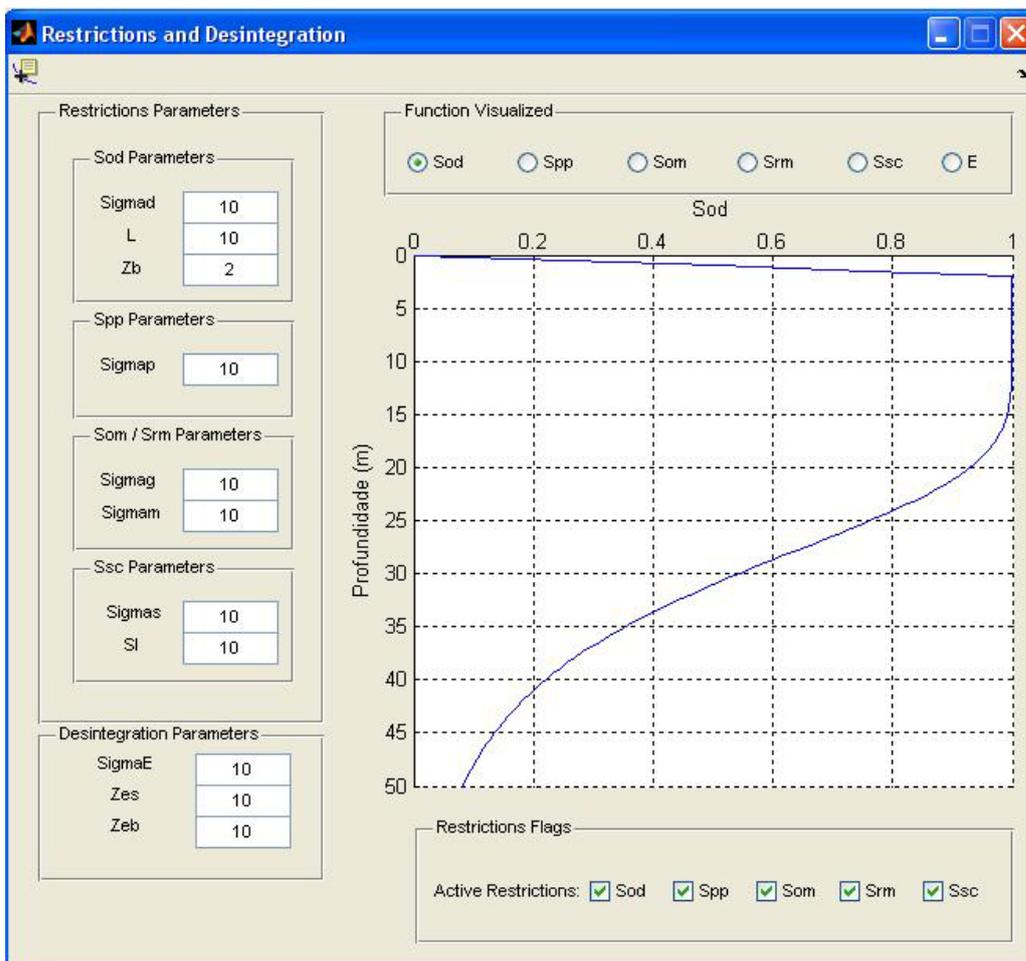


Figura 5.13. Definição dos parâmetros das funções de restrição e do uso das mesmas.

- Superfície inicial (Figura 5.14.)

Para iniciar a simulação, é necessário definir uma superfície inicial que é interpolada através dos pontos de controle lidos de um arquivo texto. Após a leitura dos pontos de controle é selecionada a área que se deseja usar na simulação. Então o usuário define todos os parâmetros do *grid* a ser interpolado, como número de nós nas direções  $x$  e  $y$ , a distância uniforme entre os nós e o expoente para o algoritmo de interpolação. Além disto, o diálogo também apresenta vários controles para melhorar a visualização do *grid* criado.

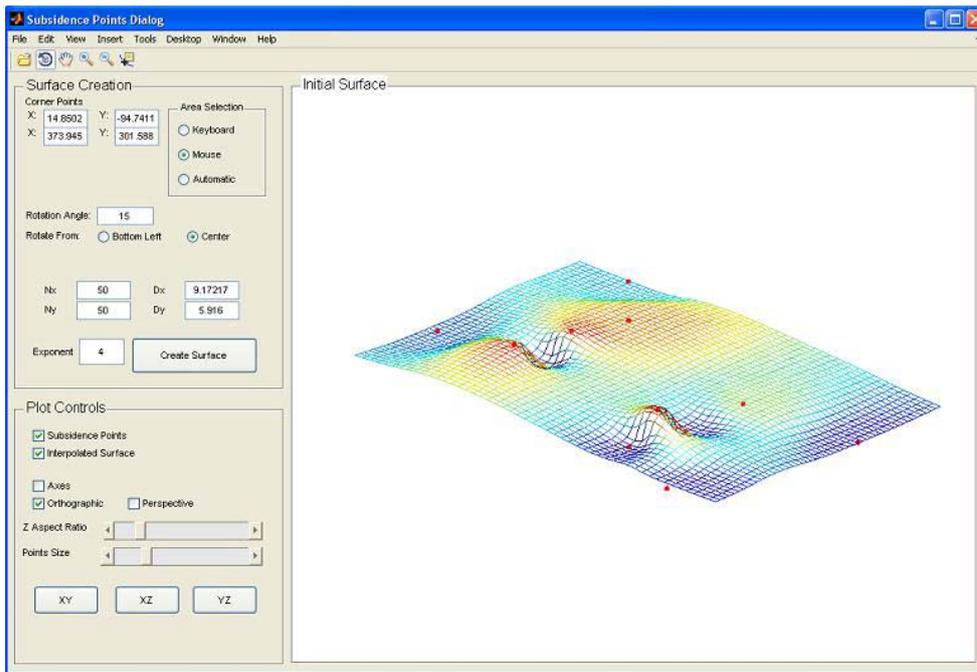


Figura 5.14. Diálogo para definição do *grid* que será utilizado na simulação

- Visualização da superfície resultante (Figura 5.15.)

Depois de feita a simulação, a tela principal de CarbSM apresenta o modelo resultante e algumas opções de visualização.

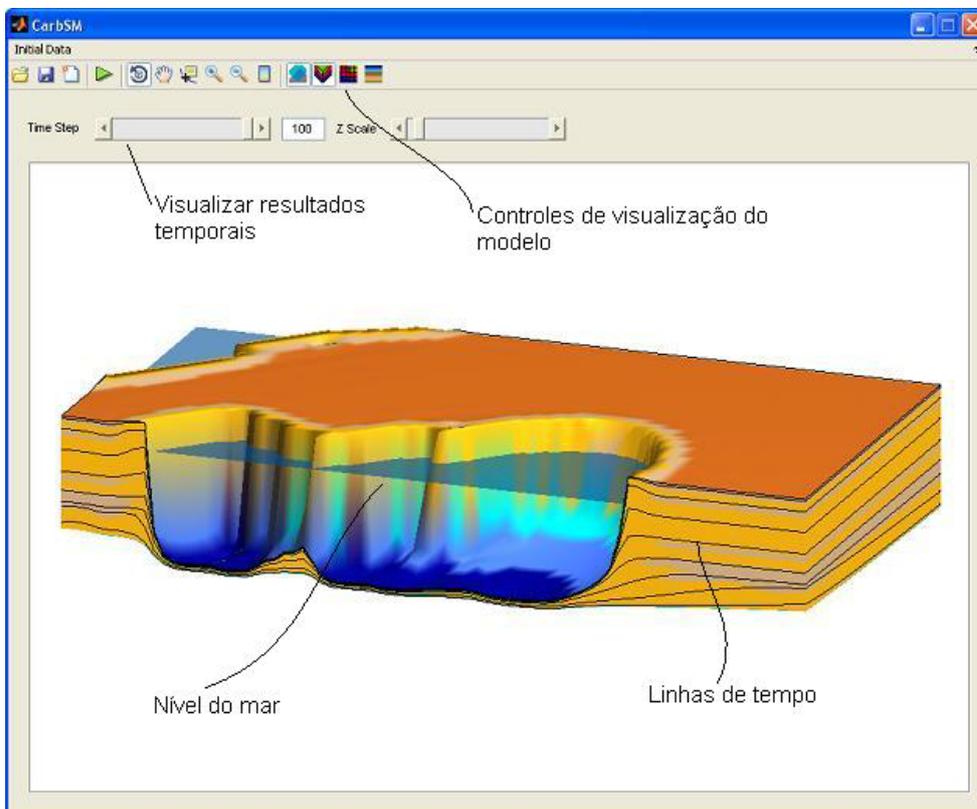


Figura 5.15. Visualização dos resultados

## **6**

### **Exemplo de Aplicação**

A aplicação do programa CarbSM foi feita com base em um modelo conceitual (Figura 6.1.) idealizado de um atol durante o período de um ciclo de nível do mar de terceira ordem descrito por Handford e Loucks (1993). O modelo conceitual leva em conta os efeitos que a direção principal do vento tem sobre a distribuição das fácies pela plataforma, e apesar de ser um importante controle, esses efeitos não serão vistos nesse trabalho, pois não foi implementado um módulo que leve em conta efeitos dinâmicos.

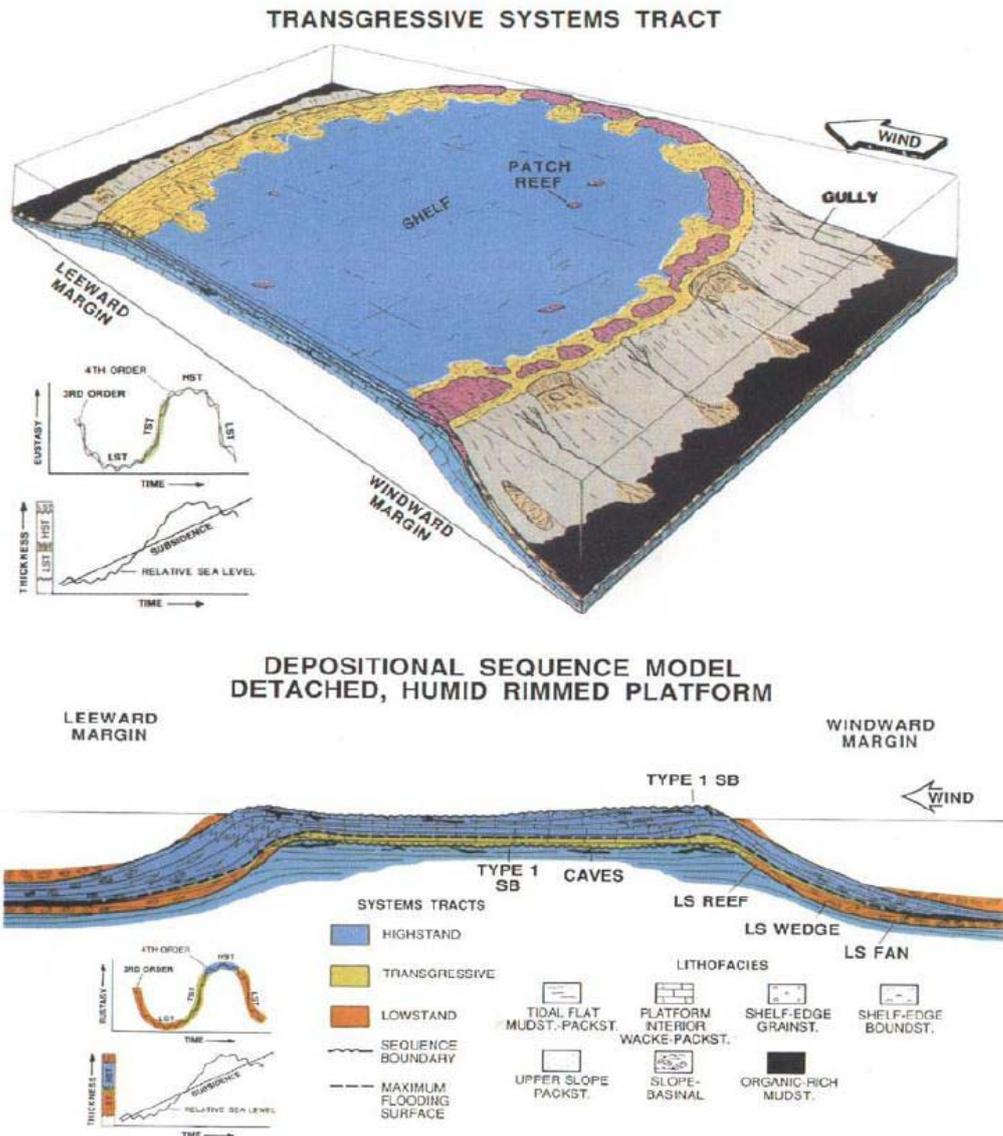


Figura 6.1. Modelo conceitual de Handford e Loucks (1993) de um atol sob condições de vento predominante.

## 6.1. Parâmetros de entrada

### 6.1.1. Superfície inicial

Uma superfície inicial precisa ser definida para poder gerar o modelo. Como não está sendo simulado um modelo real, não se tinha onde conseguir os pontos de controle necessários para gerar a superfície, por isso foram gerados no *software Surfer* os pontos (Figura 6.2) a fim de conseguir o formato desejado. Como os pontos foram gerados de maneira regular, não foi aplicada a interpolação por IDP

(Eq. 5.1), padrão no CarbSM, que é mais aplicável a casos de amostras reais de pontos. Nesse caso foi aplicada uma interpolação linear para obter uma superfície mais regular (Figura 6.3.).

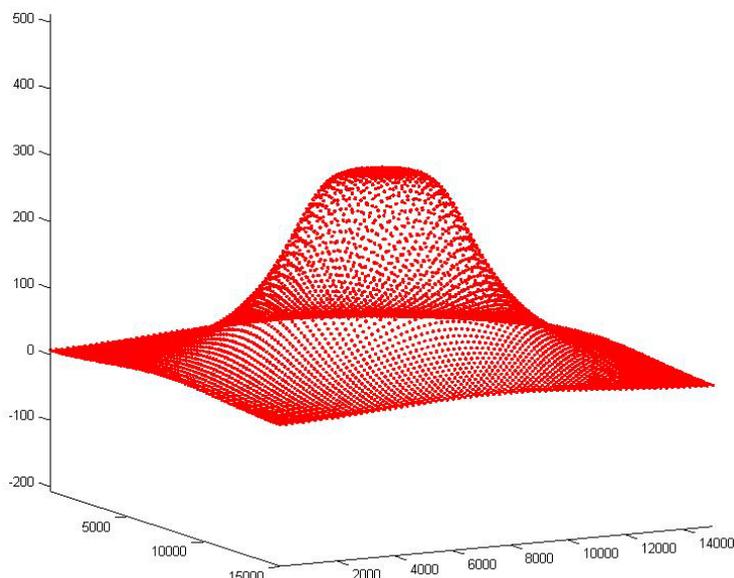


Figura 6.2. Pontos gerados no software *Surfer* e importados para dentro do CarbSM.

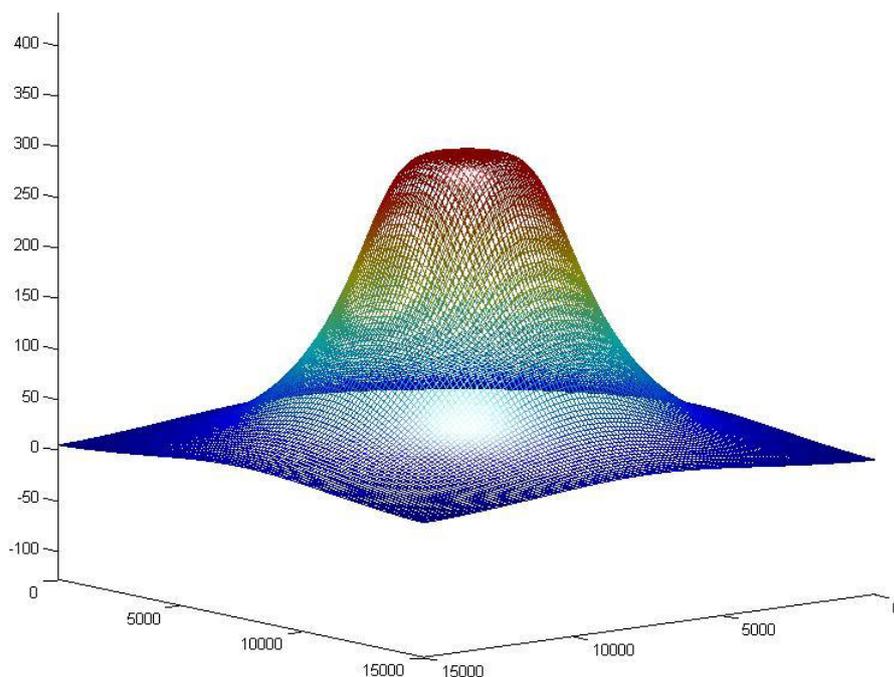


Figura 6.3. Superfície inicial gerada no CarbSM com uma interpolação linear.

A superfície tem 120 nós em  $x$  e em  $y$ , e os valores de  $\Delta x$  e  $\Delta y$  são ambos de 126,05 metros, totalizando um modelo de aproximadamente 15 km por 15 km, e tem por volta de 300 metros na sua profundidade máxima. Essas dimensões foram

baseadas nas dimensões de um típico atol do Pacífico, como, por exemplo, Mururoa (Buigues, 1997).

### **6.1.2. Curva de nível do mar**

Em Handford e Loucks (1993) uma ciclicidade de quarta ordem sobreposta a uma ciclicidade de terceira ordem foi utilizada em seu modelo conceitual. Os ciclos de terceira ordem tem uma duração de 1 Ma a 10 Ma (Reading e Levell, 1996) e tem uma amplitude entre 50 e 80 metros (Haq *et al.*, 1987). Ciclos de quarta ordem duram entre 100 e 400 ka (Reading e Levell, 1996) e costumam ter uma amplitude de alguns metros até dezenas de metros (Goodwin e Anderson, 1985). Nessa modelagem foram utilizados (Figura 6.4.):

- Ciclicidade de terceira ordem com período de 4 Ma e 60 metros de amplitude
- Ciclicidade de quarta ordem com período de 400 ka e 5 metros de amplitude
- Uma pequena subsidência linear com inclinação de aproximadamente 0.025

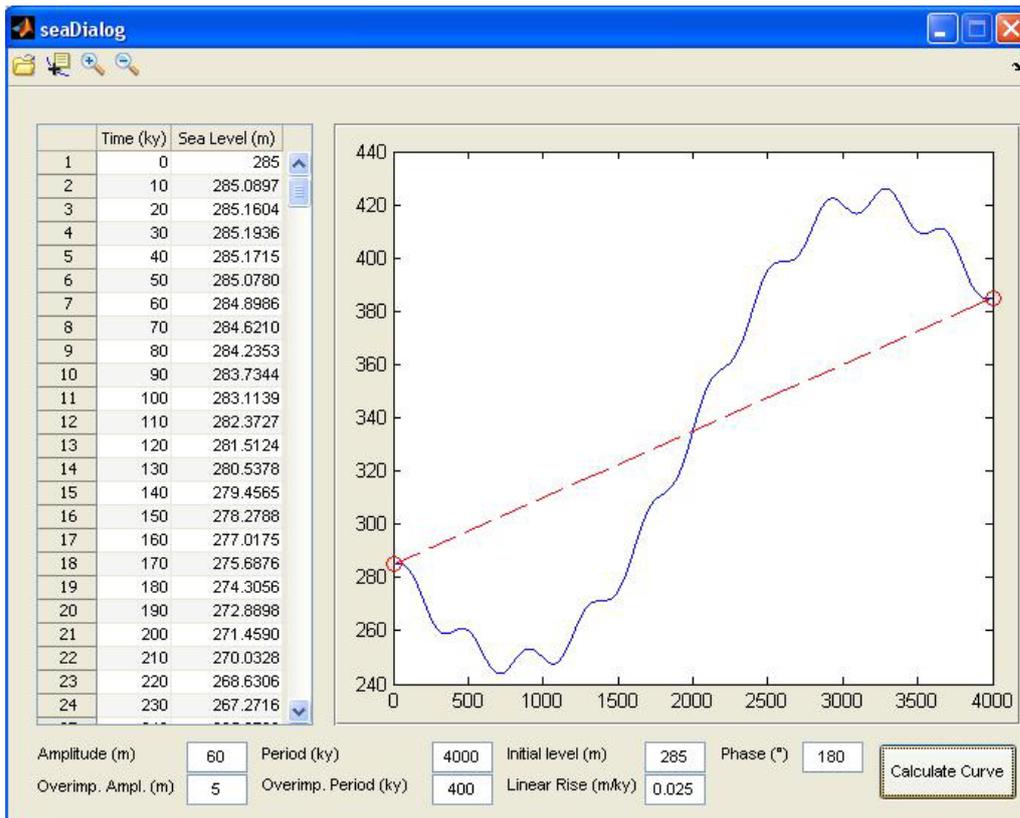


Figura 6.4. Curva de nível do mar utilizada no modelo, baseada na utilizada no modelo conceitual de Handford e Loucks (1993).

### 6.1.3. Taxas e Restrições

Alguns parâmetros podem ser retirados a partir de estudos de situações geológicas reais atuais obtidas no campo. Quando o simulador obtém bons resultados com esses parâmetros, significa que o modelo é capaz de reproduzir os principais controles geométricos e ambientais da produção carbonática de um atol. Para determinar as taxas máximas de crescimento carbonático no ambiente de margens de plataformas, taxas atuais de crescimento de corais foram utilizadas, como na maioria dos outros programas de simulação de carbonatos. Schlager (1981) e Kukul (1971) observaram taxas máximas de 15 m/kA em corais atuais. Como nessas taxas não estão incluídos nenhum efeito de possíveis hiatus que podem ocorrer em um intervalo muito grande de tempo e que os ambientes de margem de plataforma incluem outros tipos de organismos além dos corais, modeladores de sistemas carbonáticos tem utilizado taxas médias entre 1 e 5 m/kA para modelar margens de plataforma do Mioceno (Bosence *et al.*, 1994). Os

parâmetros para definir as restrições devidas à distancia para águas abertas, à taxa de atenuação e ao desvio padrão do filtro Gaussiano (que representa a distância até onde a suavização faz efeito para um determinado nó) podem ser quantificados através da observação da ordem de grandeza do tamanho de lagunas e atóis modernos e suas profundidades. Em Warrlich *et al.* (2002), a taxa de atenuação é por volta algumas dezenas de metros e o desvio padrão do filtro na ordem de algumas centenas de metros. As taxas máximas de produção carbonática em ambientes de interior de plataforma costumam ser de um terço a um quinto das taxas das margens (Davies, 1983, Smith, 1983). As taxas de crescimento de carbonatos de águas profundas costumam variar entre 0.005 e 0.08 m/kA (Enos, 1991). Quando cai a profundidade, essas taxas são praticamente nulas, pois os organismos responsáveis pelo crescimento das margens da plataforma dominam o ambiente.

#### 6.1.4. Resumo dos parâmetros de entrada

1. Gerais
  - 1.1. Tempo de simulação: 4000 kA
  - 1.2. Passo de tempo: 10 kA
  - 1.3. Discretização da malha:  $\Delta x = \Delta y = 126.05$  m
2. Produção Carbonática
  - 2.1. Taxa máxima de crescimento em águas rasas e abertas:  $P_{MA} = 3.5$  m/kA
  - 2.2. Taxa máxima de crescimento em águas rasas e restritas:  $P_{MR} = 0.3$  m/kA
  - 2.3. Taxa máxima de crescimento em águas profundas:  $P_{MP} = 0.01$  m/kA
  - 2.4. Parâmetro de atenuação por profundidade em águas rasas:  $\sigma_D = 15$  m
  - 2.5. Nível de base das ondas:  $z_b = 1.5$  m
  - 2.6. Fator adimensional de decaimento para carbonatos de águas rasas:  $L = 7$
  - 2.7. Taxa de deposição de sedimentos soltos limite para início da restrição:  $s_L = 0.01$  m/kA
  - 2.8. Atenuação exponencial da restrição por sedimentos soltos:  $\sigma_s = 0.1$  m
  - 2.9. Atenuação exponencial por profundidade em águas profundas:  $\sigma_P = 100$  m
  - 2.10. Taxa de atenuação por profundidade suavizada:  $\sigma_M = 10$  m
  - 2.11. Alcance do filtro Gaussiano:  $\sigma_G = 2500$  m

### 3. Curva do nível do mar

3.1. Período da ciclicidade de terceira ordem:  $\omega_1 = 4000$  kA

3.2. Período da ciclicidade de quarta ordem:  $\omega_2 = 400$  kA

3.3. Amplitude da ciclicidade de terceira ordem:  $A_1 = 60$  m

3.4. Amplitude da ciclicidade de quarta ordem:  $A_2 = 5$  m

3.5. Fase inicial:  $\theta = 180$  graus

3.6. Inclinação da subsidência linear:  $\alpha = 0,025$  m/kA

## 6.2. Resultados

Os resultados obtidos foram analisado separadamente para cada *Systems Tract* mostrado no modelo conceitual.

### 6.2.1. Lowstand System Tract (LST)

Nos períodos de *lowstand*, recifes aparecem sem muitos depósitos lagunais em volta do topo do atol exposto à atmosfera, os taludes começam a crescer, causando instabilidades nos taludes que levam a fluxos gravitacionais em direção à bacia. Os efeitos do vento geralmente ainda não aparecem muito, pois ainda há pouca erosão (Handford e Loucks, 1993).

O modelo conceitual de Handford e Loucks é mostrado na Figura 6.5, a Figura 6.6 mostra a variação eustática no período analisado. A Figura 6.7 mostra uma visão geral do modelo gerado no CarbSM, com a uma visão de planta na Figura 6.8 e um corte transversal na Figura 6.9. A Figura 6.10 mostra como é feita a identificação dos tipos de sedimentos carbonáticos modelados.

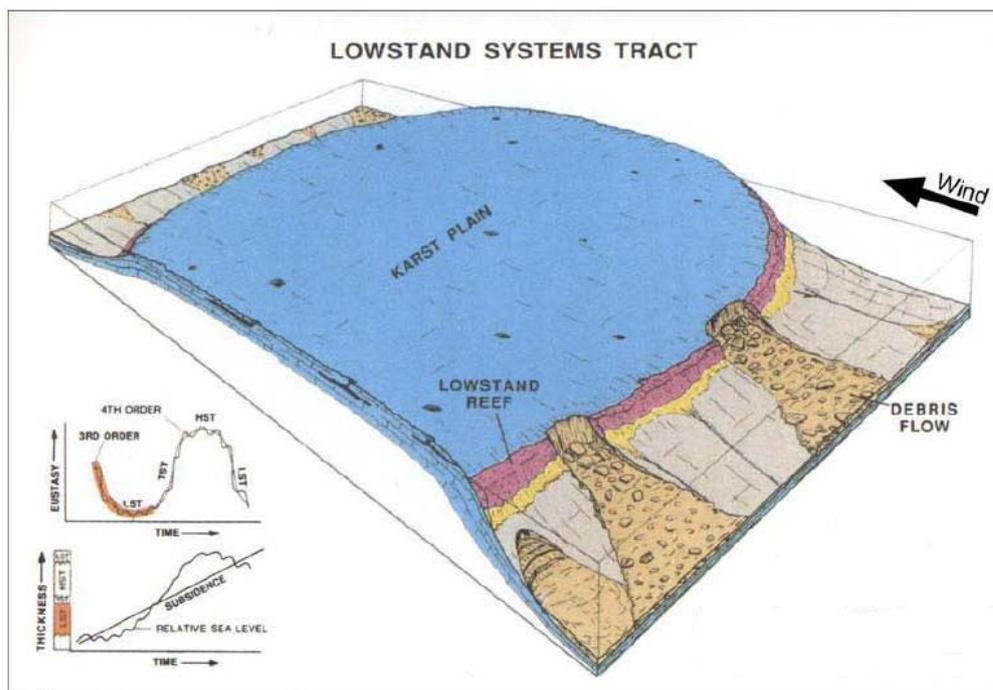


Figura 6.5. *Lowstand System Tract* no modelo de Handford e Loucks (1993).

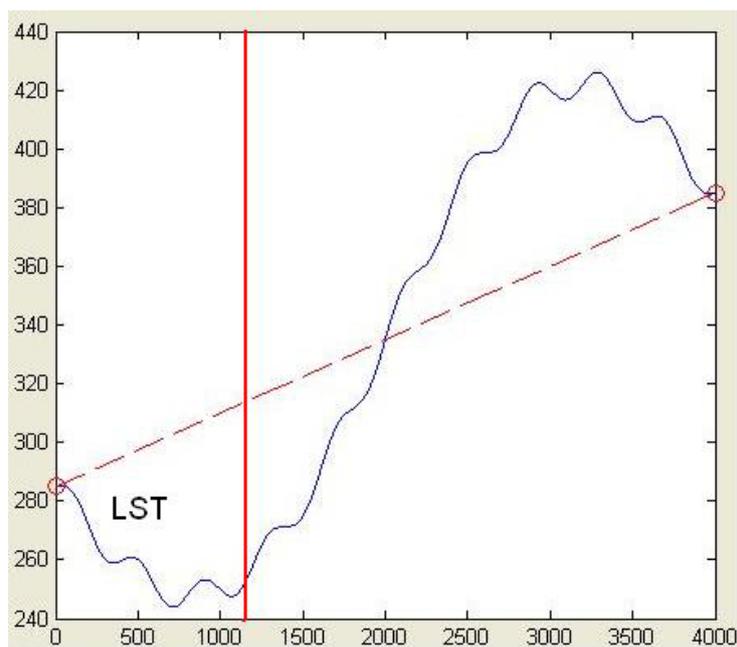


Figura 6.6. Variação eustática no período *LST* analisado

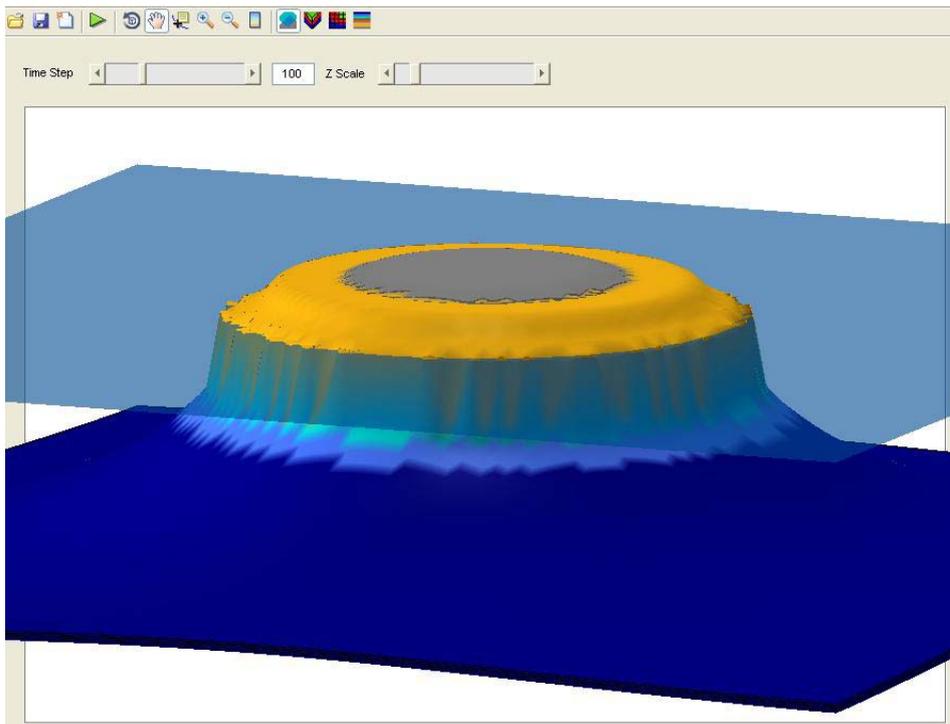


Figura 6.7. Modelo do período *LST* simulado em CarbSM, mostrando o nível do mar do fim do período *LST*.

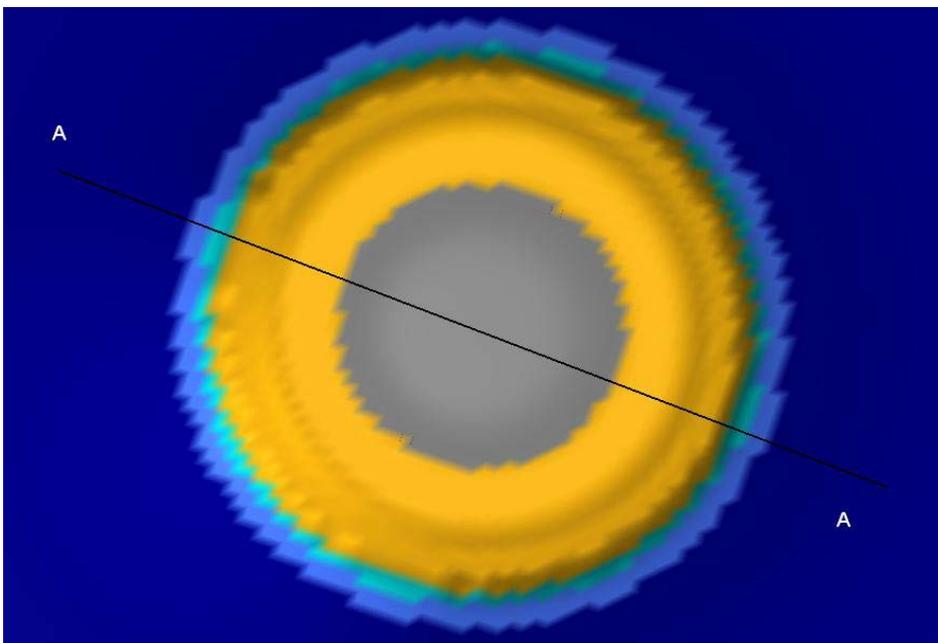


Figura 6.8. Vista em planta do modelo simulado no período *LST*.



Figura 6.9. Corte transversal AA da Figura 6.8., as linhas pretas são linhas de tempo de 200 kA.



Figura 6.10. Legenda de cores utilizadas em CarbSM.

As características procuradas foram bem reproduzidas por CarbSM, apesar da falta do efeito da direção principal do vento e da ação das ondas. Porém, como foi citado anteriormente, nesse estado da formação do atol, esses efeitos não são muito importantes (Handford e Loucks, 1993). Por isso e pelo fato da superfície inicial ter sido bem regular, a distribuição de sedimentos fica bastante simétrica.

### 6.2.2. Transgressive System Tract (TST)

Nesse período, com a elevação do nível do mar relativo, o topo da plataforma é totalmente submerso e começam a aparecer depósitos de ambientes lagunais com pequenos recifes isolados. A borda da plataforma evolui por cima dos antigos depósitos em direção à parte mais interna da plataforma pra conseguir acompanhar a elevação do nível do mar. Quando o nível do mar sobe muito rápido ou a produção carbonática demora um pouco para começar em uma área recém coberta pelo mar, a deposição pode ser bastante condensada (Handford e Loucks, 1993).

O modelo conceitual de Handford e Loucks é mostrado na Figura 6.11, a Figura 6.12 mostra a variação eustática no período analisado. A Figura 6.13 mostra uma visão geral do modelo gerado no CarbSM, com a uma visão de planta na Figura 6.14 e um corte transversal na Figura 6.15.

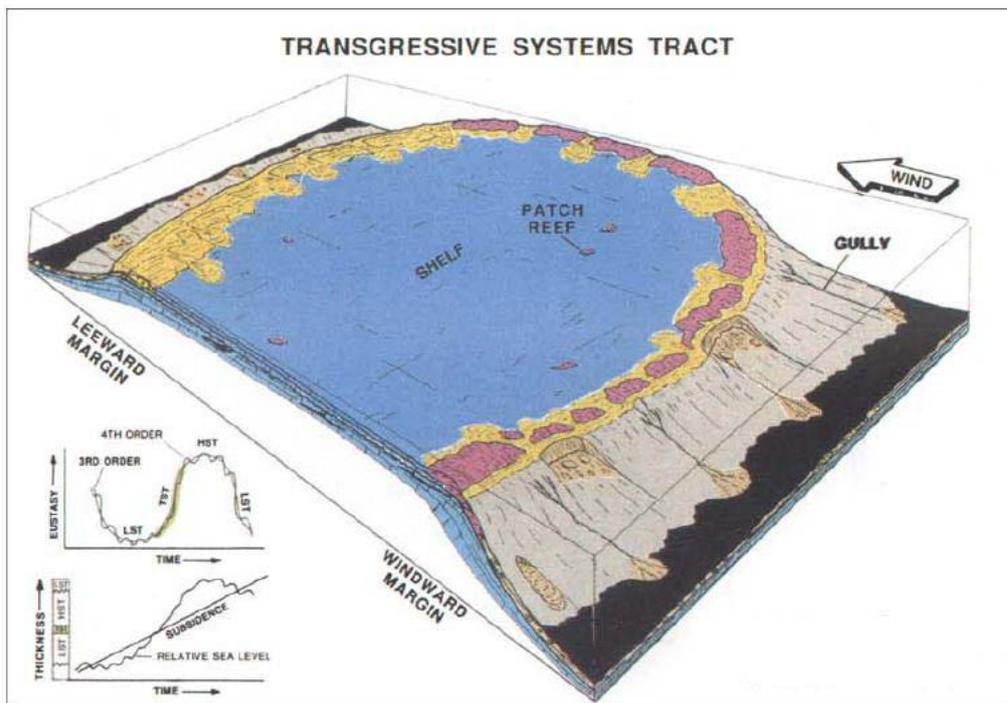


Figura 6.11. *Transgressive Systems Tract* no modelo de Handford e Loucks (1993).

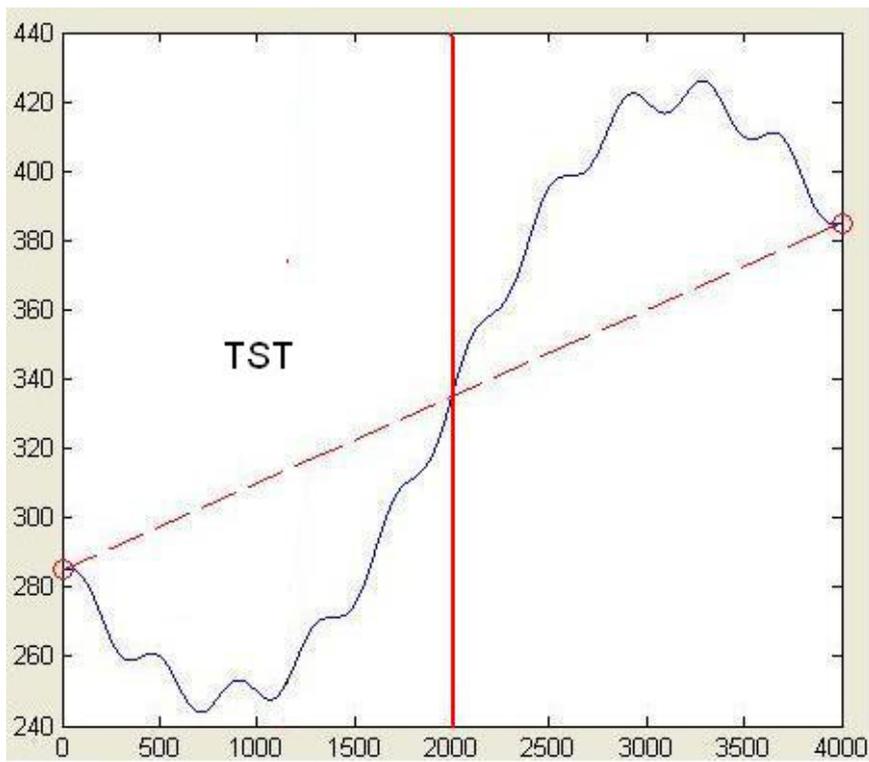


Figura 6.12. Variações eustáticas no período *TST* analisado.

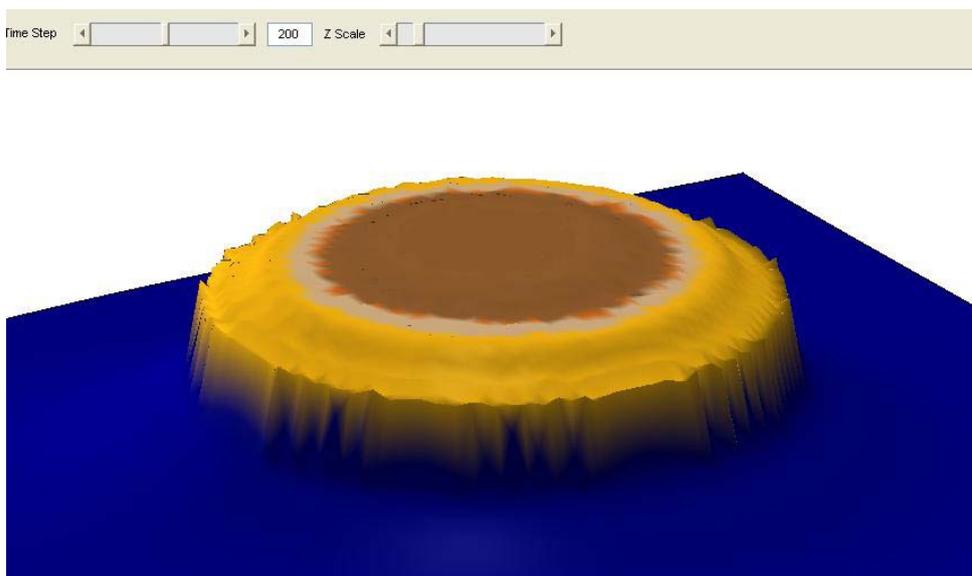


Figura 6.13. Modelo do período *TST* simulado em CarbSM.

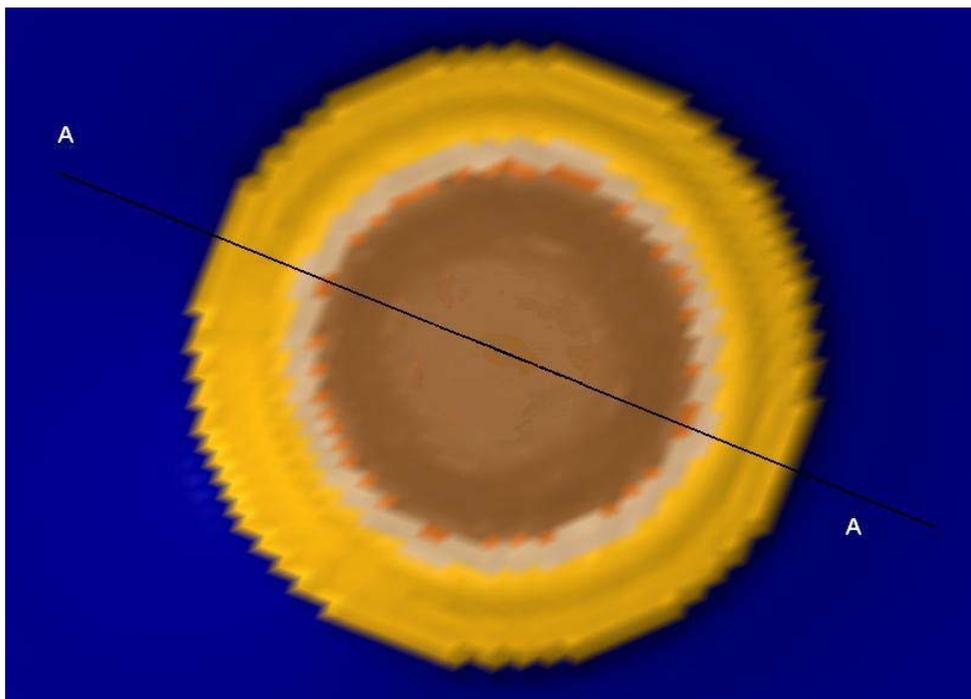


Figura 6.14 Vista em planta do modelo simulado no período *TST*.



Figura 6.15. Corte transversal AA da Figura 6.14.

Com os parâmetros utilizados na simulação, a evolução da plataforma consegue acompanhar sem muitas dificuldades o nível do mar, o que pode ser percebido no modelo simulado com CarbSM. As bordas da plataforma começam a subir e migrar para áreas mais internas e começam a aparecer sedimentos lagunais. Como o tempo de espera para produção carbonática para áreas recém cobertas pelo mar não está sendo modelado, camadas mais finas no início do

período TST não são encontradas no modelo simulado, ao contrário do modelo conceitual.

### 6.2.3. Highstand System Tract (HST)

As características típicas de um atol em período de HST são: alta produção carbonática, interior da plataforma bastante restrita e exportação de sedimentos para fora da plataforma (Handford e Loucks, 1993). O espaço de acomodação é suficiente para as margens da plataforma evoluírem bastante e há mais efeitos da erosão que deposita os sedimentos erodidos das margens do lado contra a direção do vento para dentro da laguna. Sedimentos erodidos mais finos são transportados nas margens a favor da direção do vento e exportados para fora da plataforma carbonática, levando a uma evolução parcial da plataforma em direção a favor do vento para a bacia. O nível do mar já não aumenta tanto quanto no TST e o espaço de acomodação no topo da plataforma fica menor, diminuindo a produção de carbonatos de interior de plataforma.

O modelo conceitual de Handford e Loucks é mostrado na Figura 6.16, a Figura 6.17 mostra a variação eustática no período analisado. A Figura 6.18 mostra uma visão geral do modelo gerado no CarbSM, com a uma visão de planta na Figura 6.19 e um corte transversal na Figura 6.20.

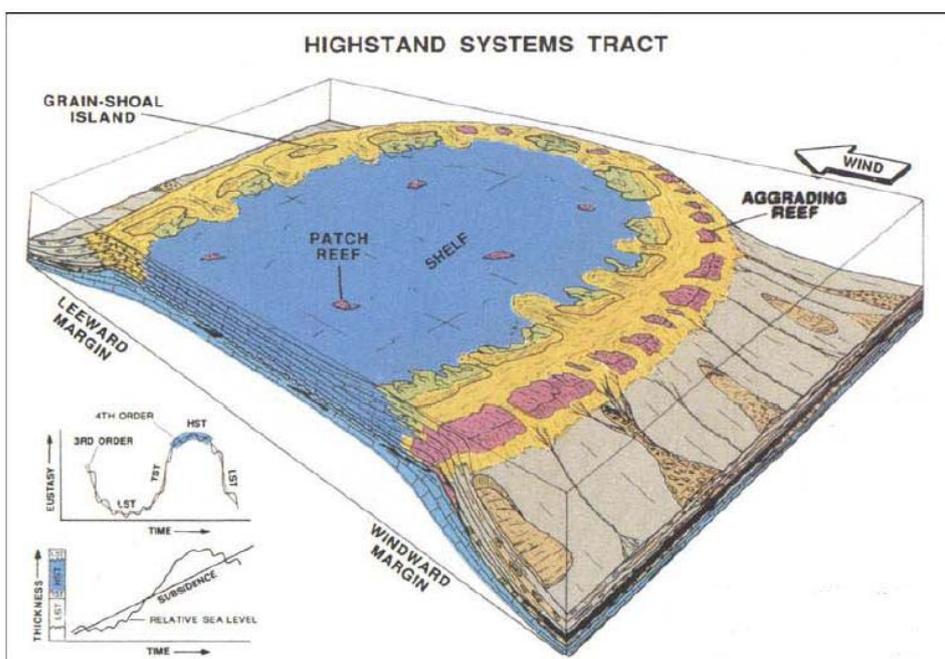


Figura 6.16. *Highstand Systems Tract* no modelo de Handford e Loucks (1993).

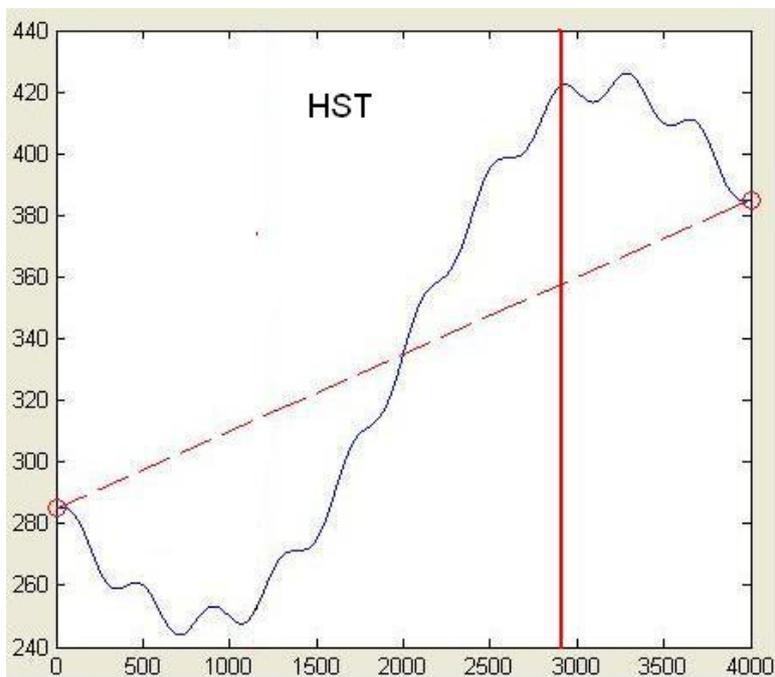


Figura 6.17. Variação eustática no período *HST*

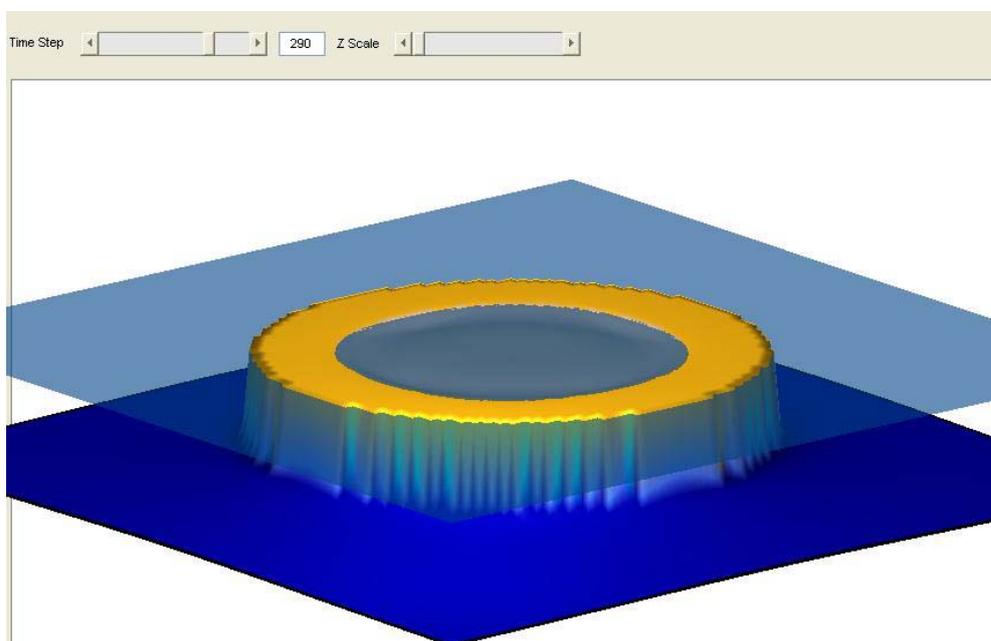


Figura 6.18. Modelo do período *HST* simulado em CarbsM, com o nível do mar a mostra.

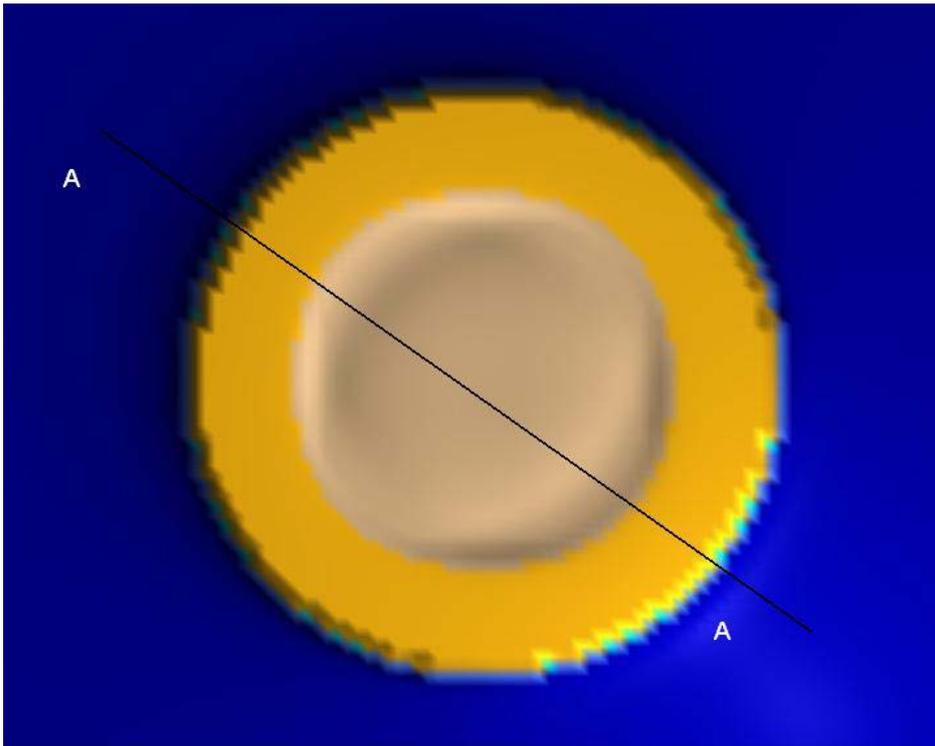


Figura 6.19 Vista em planta do modelo simulado no período *HST*



Figura 6.20. Corte transversal AA da Figura 6.19.

A partir do período *HST*, os efeitos dinâmicos presentes em uma plataforma carbonática se tornam muito importantes para seu desenvolvimento. Por isso, os resultados de CarbsM não são completos por não estar modelando esses efeitos. Com as águas mais rasas no topo da plataforma, o ambiente fica mais restrito e longe do mar aberto e pode-se notar um melhor crescimento de carbonatos de interior de plataforma. O crescimento no topo da plataforma consegue acompanhar a pequena elevação no nível do mar, porém essa morfologia não é muito realística, pois muitos atóis atuais têm lagunas mais profundas provocadas pelo afogamento por causa da subida no nível do mar.

#### 6.2.4. Lowstand System Tract Final

No ciclo de *Lowstand System Tract* final, o nível relativo do mar cai 30 metros em 800 kA, deixando a mostra parte dos sedimentos carbonáticos que sofrem erosão subaérea. Geralmente essa erosão gera sedimentos mais finos, aumenta os depósitos desses sedimentos nas margens e na bacia direcionadas a favor da principal direção do vento (Handford e Loucks, 1993). O abaixamento do nível do mar gera uma pequena evolução das margens em direção à bacia, já que não há mais espaço pra crescer verticalmente e o crescimento só acontecer lateralmente, sobre os sedimentos anteriormente depositados. Porém, como no caso de um atol são comuns taludes muito íngremes, fica mais difícil da plataforma evoluir por cima desses taludes.

O corte transversal do modelo conceitual de Handford e Loucks é mostrado na Figura 6.21, a Figura 6.22 mostra a variação eustática da simulação completa. A Figura 6.23 mostra uma visão geral do modelo gerado no CarbSM, com a uma visão de planta na Figura 6.24 e um corte transversal na Figura 6.25.

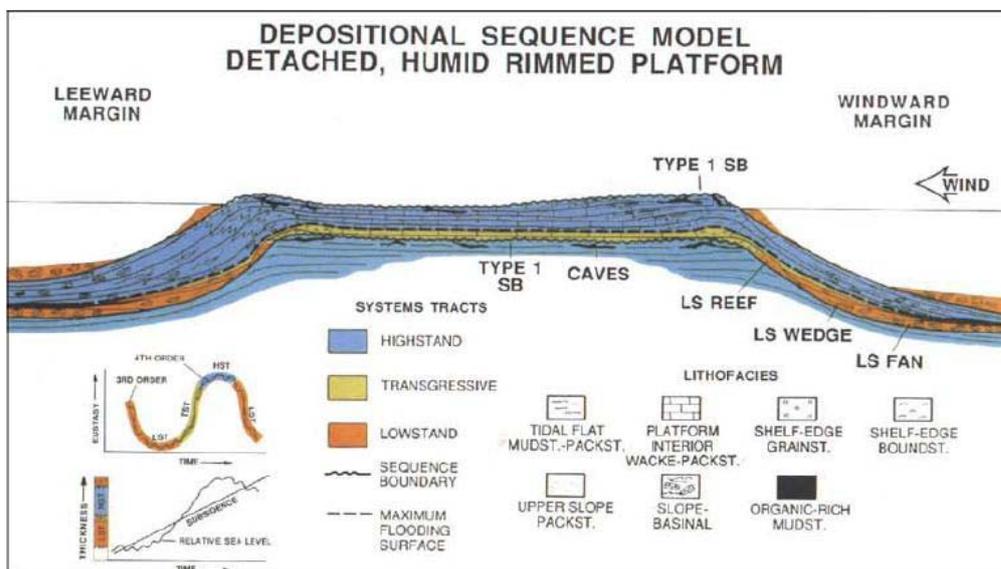


Figura 6.21. Corte transversal de um atol conceitual idealizado após os quatro ciclos levados em conta no modelo de Handford e Loucks (1993).

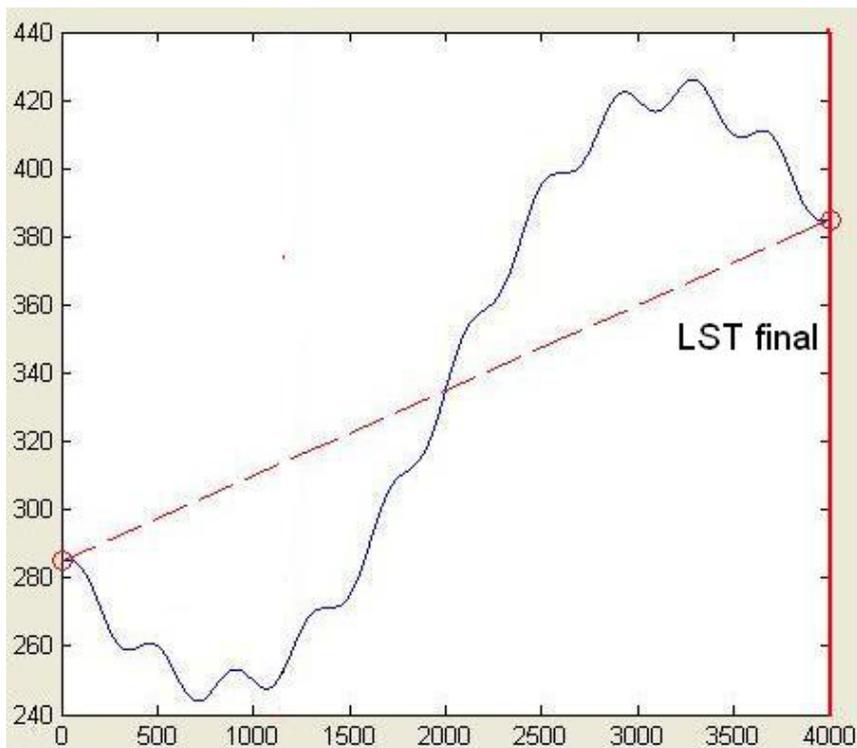


Figura 6.22. Variação eustática no período *LST final*

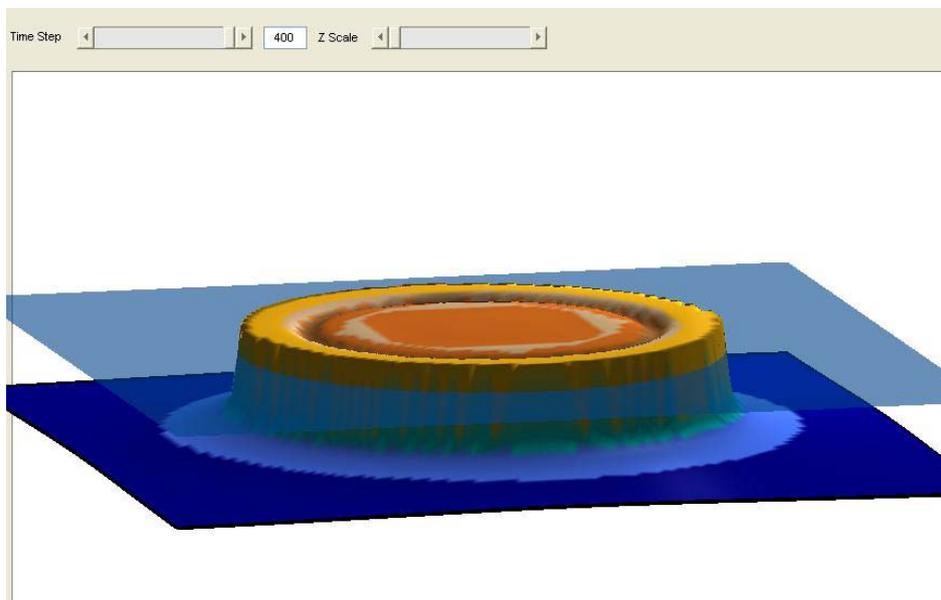


Figura 6.23. Modelo do período *LST final* simulado em CarbSM, com o nível do mar a mostra.

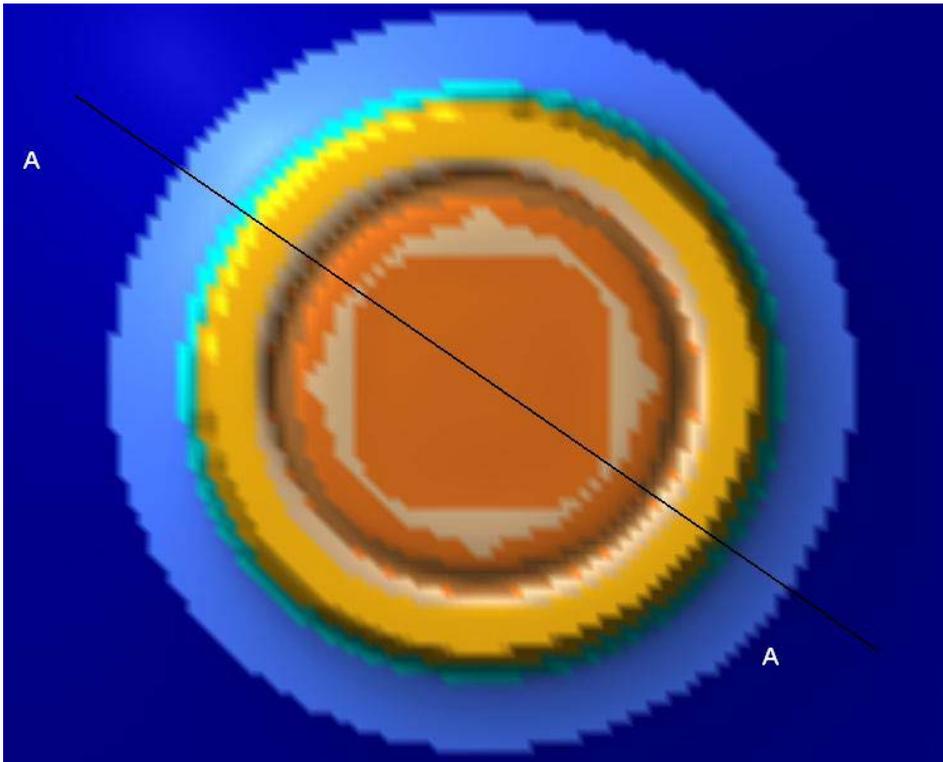


Figura 6.24 Vista em planta do modelo simulado no período *LST* final.



Figura 6.25. Corte transversal AA da Figura 6.24.

Fica claro que a parte superior da plataforma não muda nada, pois está acima do nível do mar e não pode crescer, e como também não há modelo de erosão, o sedimento fica intacto. As margens migram um pouco em direção à bacia, mas não muito, pois os antigos taludes inclinados dificultam a deposição carbonática. Praticamente não há produção de sedimento de interior de plataforma já que a parte mais interna foi praticamente toda descoberta pelo nível do mar e as regiões subaquosas são de margem de plataforma e bacia.

## 7

### Conclusões e Trabalhos futuros

O objetivo desse trabalho foi mostrar o desenvolvimento de um programa computacional de simulação determinística de sedimentação carbonática. Foi testado em um modelo conceitual para avaliar o comportamento da simulação e verificar a coerência dos resultados. Na modelagem geológica, uma grande dificuldade é a definição dos parâmetros iniciais do passado geológico. Fazendo vários testes com diferentes valores desses parâmetros, é fácil de constatar o quanto eles influem nos resultados finais, necessitando de uma boa calibragem para representar adequadamente um exemplo real.

O modelo conceitual de atol de Handford e Loucks (1993) foi testado em as principais etapas dos ciclos de nível de mar e as comparações foram satisfatórias durante os ciclos de LST inicial e TST. Porém para os ciclos de HST e LST final, apesar de mostrar coerências, a falta de um algoritmo que leve em conta os efeitos dinâmicos é bastante percebida. Todavia, esse modelo já proporciona uma ótima maneira de estudar e testar os principais controles pra evolução de plataformas carbonáticas: as flutuações de nível do mar e a posição relativa na plataforma. Geometrias bastante convincentes são recriadas, sofrendo com excesso de simetria o que retira um pouco da credibilidade do modelo. Um dos principais trabalhos futuros é o desenvolvimento de um módulo que leve em conta os efeitos dinâmicos em uma plataforma carbonática, como efeito das ondas e de correntes (provocadas por ventos), que causem erosão subaquosa e façam o transporte de sedimentos pela plataforma.

Já que o objetivo primário desse trabalho foi de implementar uma modelagem direta, não houveram muitas menções sobre o uso de modelagem estocástica para modelos carbonáticos. Porém, é de grande interesse para futuros trabalhos o estudo e a implementação de modelos estocásticos aliados a modelos determinísticos para gerar resultados mais completos.

Parte do objetivo desse trabalho também foi testar as possibilidades de desenvolvimento no ambiente MATLAB e esse se mostrou uma excelente

ferramenta para o presente tipo de aplicação. Além de apresentar um código fácil de entender e de programar, a imensidade de funções pré-definidas ajuda muito no desenvolvimento de qualquer programa computacional no meio científico. Aliado a isso estão as poderosas ferramentas gráficas para visualização de resultados, oferecendo inúmeras opções para fácil adaptação de qualquer tipo de problema. Por fim, se obtém um programa computacional completo e, se programado corretamente, com desempenho não muito longe de outras linguagens de programação como C e C++, servindo como um excelente ambiente para desenvolvimento de protótipos.

- Ahr, W. M. (1973). The Carbonate Ramp: an alternative to the shelf model: *Trans. Gulf Coast Assoc. Geol. Socs.*, v. 23, p. 221-225
- Ainger, T., Doyle, M., Lawrence, D.T., Epting, M. E van Vliet, A. (1989). Quantitative modeling of carbonate platforms: some examples. Em: *Controls on carbonate platform and basin development*, SEPM Spec. Publ., v.44, p.27-37
- Bice, D. (1988). Synthetic stratigraphy of carbonate platform and basin systems. *Geology*, v.16, p.703-706
- Bitzer, K., Salas, R., 2002. SIMSAFADIM: Three dimensional simulation of stratigraphic architecture and facies distribution modeling of carbonate sediments. *Computers & Geoscience* 28, 1177–1192.
- Bosence, D.W.J., Waltham, D. (1990): Computer modelling of the internal architecture of carbonate platforms. *Geology*, 18, 26-30.
- Bosence, D.W.J., Pomar, L., Waltham, D. A. and Lankester, T.H.G. (1994): Computer modelling a Miocene carbonate platform, Mallorca, Spain. *AAPG Bull.*, v.78, 247-266.
- Bosscher, H. & Schlager, W. (1992). Computer simulation of reef growth. *Sedimentology*, v.39, p.503-512.
- Bosscher, H. e Schlager, W. (1992). Computer simulation of reef growth. *Sedimentology*, v. 39, p. 503-512
- Bosscher, S.A. e Vail P.R.(1992). CARBPLAT – a computer model to simulate the development of carbonate platforms. *Geology*, v.20, p.235-238
- Bowman, S.A. e Vail P.R. (1999). Interpreting the stratigraphy of the Baltimore canyon section, offshore New Jersey with PHIL, a stratigraphic simulator. Em: *Numerical experiments in stratigraphy: Recent advances in stratigraphic and sedimentologic computer simulations* (Ed. Por W. Harbaugh, W.L. Watney, E.C. Rankey, R. Slingerland, R.H., Goldstein and E.K. Franseen) SEPM Spec. Publ. # 62 p.117-138.
- Buigues, D.C. (1997). Geology and hydrogeology of Mururoa and Fangataufa, French Polynesia. In: *Geology and Hydrogeology of Carbonate Islands*, (Ed. by H.L. Vacher & T.M. Quinn), Elsevier Science B.V., Amsterdam, p.433-452.
- Burgess, P.M., Wright, V.P, Emery, D. (2000). Investigating parasequence and sequence formation in peritidal systems using 3D numerical forward modelling. *Abstracts of Applications of numerical modelling in stratigraphy and basin analysis* p.13.
- Burgess, P.M. e Wright, V.P. (2003). Numerical forward modeling of carbonate platform dynamics: an evaluation of complexity and completeness in carbonate strata. *Journal of Sedimentary Research*, v. 73, p. 637-652

Carvalho, C.V.A. (2003) Simulação de transporte e deposição de sedimentos siliciclásticos em ambientes de plataforma, talude e bacia. Tese de Doutorado da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 131 pp.

Chalker, B.E., (1981). Simulating light saturation curves for photosynthesis and calcification by reef-building corals. *Marine Biology*., v. 63, p. 135-141

Chappell, J. (1980). Coral morphology, diversity and reef growth. *Nature* v.286, p.249-252

Cisne, J. L., Gildner, R. F. & Rabe, B. D. (1984). Epeiric sedimentation and sea level: synthetic ecostratigraphy. *Lethaia*, v. 17, p. 267-288.

Davies, P.J. (1983). Reef growth. In: *Perspectives on Coral reefs: Australian Institute of Marine Science Contribution*, (Ed by Barnes, D.J.) #200, p.69-106.

Demico, R. V. and Spencer, R. J. (1989). MAPS- A BASIC program to model accumulation of platform sediments. *Computers & Geoscience*, v. 15, No. 1, p. 95-105.

Demico, R. V., Spencer, R. J., Waters, B. B. and Cloyd, K. C. (1991). Two dimensional computer models of a Cambrian shelf deposit. In: *Sedimentary Modeling: Computer Simulations and Methods for Improved Parameter Definition* (Ed. by E. K. Franseen, W. L. Watney, C. G. St. C. Kendall and W. Ross) *Kansas Geol. Surv. Bull.*, 233, p. 463-472.

Dunham, R.J. (1962). Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: *Classification of Carbonate Rocks* (Ed. by W.E. Ham), Mem. Am. Ass. petrol. Geol., v.1,p.108- 121

Enos, P. (1991). Sedimentary parameters for computer modelling In: *Sedimentary Modeling: Computer Simulations and Methods for Improved Parameter Definition* (Ed. by E. K. Franseen, W. L. Watney, C. G. St. C. Kendall and W. Ross) *Kansas Geol. Surv. Bull.*, 233, p. 63-99

Erlick, M. and Read, J. F. (1991). Cyclic ramp-tobasin carbonate deposits, Lower Mississippian, Wyoming and Montana: a combined field and computer modeling study. *J. of Sed. Petrology*, v. 61, No. 7, p. 1194-1224.

Faccion, J.C (2002)., Relatório Interno Cenpes/PETROBRAS, Rio de Janeiro

Ginsburg, R.N & James, N.P. (1974). Spectrum of Holocene reef building communities in the western Atlantic, Chapter 7, In, *Principles of Benthic Community Analysis*, A.M. Zeigler, K.R. Walker, E.J. Anderson, and N.P. James, eds., University of Miami, Comparative Sedimentology Laboratory, Sedimenta IV.

Goldhammer, R.K., Dunn, P.A., Hardie, L.A.,(1987). High frequency glacio-eustatic sealevel oscillations with Milankowich characteristics recorded in the middle Triassic platform carbonates in Northern Italy. *Am. J. of Science*, v. 287, p. 853-892.

Goodwin, P.W. & Anderson, E.J. (1985). Punctuated aggradational cycles: a general hypothesis of episodic stratigraphic accumulation. *J. Geol.*, v.93, p.515-536.

Granjeon, D. (1997), “Conception et Applications D’un Modelé Diffusif 3D Multilithologique”, Tese de Doutorado, Institut Français du Pétrole, Université Rennes

Graus, R. R., Macintyre, I. G., Herchenroder, B. E., (1984). Computer simulation of the reef zonation at Discovery bay, Jamaica: Hurricane disruption and long-term physical oceanographic controls. *Coral Reefs* v.3, p. 59-63.

Handford, C.R. & Loucks, R.G. (1993).

Carbonate depositional sequences and systems tracts – responses of carbonate platforms to relative sea-level changes. In: *Carbonate Sequence Stratigraphy* (Ed. by R.G. Loucks & J.S. Sarg) *Mem. Am. Ass. Petrol. Geol.*, v.57, p.3- 41.

Haq, B.U., Hardenbol, J., Vail, P.R. (1987). Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic. *Science*, v. 235, p.1156-1167

James, N.P. & Mountjoy, E.W. (1983). Shelf slope break in fossil carbonate platforms: an overview. Em: *The Shelf-break: Critical Interface on Continental Margins* (Ed. D.J. Stanley & G.T. Moore) *Spec. Publ. Soc. Econ. Paleont. Miner.* 33, 189-206

Kendall, C.G.St.C., and W. Schlager, (1981), Carbonates and relative changes in sea level: *Marine Geology* v. 44, p. 181-212. 1980

Koerschner, W. F. and Read, J. F. (1989). Field and modeling studies of Cambrian carbonate cycles, Virginia Appalachians. *J. of Sed. Petrology*, v. 59, No. 4, p. 654-687.

Kukal, Z. (1971). *The Geology of recent sediments*: Academic Press, London, 490p

Lamdim, P. M., B. (2000), “Texto Didático 2 – Introdução aos Métodos de Estimativa espacial para confecção de mapas”, UNESP/Rio Claro

Lawrence, D.T., Doyle, M., Snelson, S. e Horsfield, W.T. (1987). Stratigraphic modeling of sedimentary basins. SEG 57th Anual International Meeting Expanded Abstracts Volume, p. 407-408

Lerche, I., Dromgoole, E., Kendall, C.G.ST.C., Walter, L.M., Scaturro, D.(1987). Geometry of carbonate bodies: A quantitative investigation of factors influencing their evolution. *Carbonates and Evaporites*, v.2, No.1, p. 15-42.

Loreau, J.P. & Purser, B.H. (1973). Distribution and ultra-structure of Holocene ooids in the Persian Gulf. Em: *The Persian Gulf* (Ed. B.H. Purser) pp. 279-328. Springer-Verlag, Berlin

Mathworks Inc, The (2008). *Matlab User’s Guide*, [http://www.mathworks.com/help/techdoc/matlab\\_product\\_page.html](http://www.mathworks.com/help/techdoc/matlab_product_page.html)

Nordlund, U. (1996). Formalising geological knowledge – with an example of modeling stratigraphy using fuzzy logic. *J. Sedim. Res.*, v. 66, p.689-698.

Norlund, U. (1999). FUZZIM: forward stratigraphic modelling made simple. *Comput. Geosci.*, v.25, p.449-456.

- Osleger, D. and Read, J. F. (1991). Relation of eustacy to stacking patterns of metre-scale cycles, Late Cambrian, U.S.A. *J. of Sed. Petrology*, v. 61, No. 7, p. 1225-1252.
- Paola, C. (2000). Quantitative models of sedimentary basin filling. *Sedimentology*, v. 47, p.121-178.
- Paulay, G. and McEdward, L.R. (1990). A simulation model of island reef morphology: the effects of sea level fluctuations, growth, subsidence and erosion. *Coral Reefs*, v.9, p.51-62.
- Posamentier, H. W. & Vail, P. R. (1988), "Eustatic Control on clastic deposition II – Sequences and systems tracts models.", In: Wilgus, C.K.;Hastings, B.S.; Kendal, C.G.S.C.; "Sea-Level Changes – an Integrated Approach.", Tulsa, SEPM, p. 125-154, (SEPM sp. Pd. #42)
- Read, J.F. (1982). Carbonate Platform of passive (extensional) continental margins types, characteristics and evolution. *Tectonophys.* 81, 195-212
- Reading, H. G. & Levell, B.K. (1996). Controls on the sedimentary rock record. In: *Sedimentary environments: processes, facies and stratigraphy* (Ed. by H.G. Reading) Blackwell Science, London, p.5-36.
- Reading, H. G. (1978), *Sedimentary Environments and Facies*: Elsevier, 557 p.
- SADLER, P.M., (1981), Sediment accumulation rates and the completeness of stratigraphic sections: *Journal of Geology*, v. 89, p. 569–584
- SADLER, P.M., (1994), The expected duration of upward-shallowing peritidal carbonate cycles and their terminal hiatuses: *Geological Society of America, Bulletin*, v. 106, p. 791–802
- Schlager, W. (1981). The paradox of drowned reefs and carbonate platforms. *Geol. Soc. Of América Bull.*, v.92, p.197-211.
- Schlager, W., (2000), Sedimentation rates and growth potential of tropical cool-water, and mudmound carbonate systems, em Insalaco, E., Shelton, P.W., and Palmer, T.J., eds., *Carbonate Platform Systems: Components and Interactions*: Geological Society of London, Special Publication 178, p. 217–228
- Smith, S.V. (1983). Coral reef calcification. In: *Perspectives on Coral reefs*: Australian Institute of Marine Science Contribution, (Ed by Barnes, D.J.) #200, p.240-247.
- Tucker, M.E. (1985a). Shallow marine carbonate facies and facies models . Em: *Sedimentology: Recent Developments and Applied Aspects* (Ed. P.J. Brenchley e B.P.J. Williams) Spec. Publ. Geol. Soc. Lond. 18, 139-161
- Tucker, ME and Wright, VP. (1990). *Carbonate Sedimentology*. Blackwell, 482p
- Turcotte, D.L. & Willemann, R.J (1983). Synthetic cyclic stratigraphy. *Earth & Planetary Science Letters*, v.63, p.89-96
- Vail, P.R., 1987, *Seismic stratigraphy interpretation procedure*. In: Bally, A.W. (Ed.), *Atlas of Seismic Stratigraphy*, vol. 27. American Association of Petroleum Geologists Studies in Geology, pp. 1–10.
- Van Wagoner, J.C., Posamentier, H.W., Mitchum, R.M., Vail, P.R., Sarg, J.F., Loutit, T.S., Hardenbol, J., 1988, *An overview of sequence stratigraphy and key*

*definitions*. In: Wilgus, C.K., Hastings, B.S., Kendall, C.G.St.C., Posamentier, H.W., Ross, C.A., Van Wagoner, J.C. (Eds.), *Sea Level Changes—An Integrated Approach*, vol. 42. SEPM Special Publication, pp. 39–45.

Warrlich, G.M.D. (2001) Computer modelling of carbonate platform evolution. Tese de Doutorado, University of London, 268 pp.

Warrlich, G.M.D., Bosence, D., Waltham, D., Wood, C., Boylan, A., Badenas, B. (2008). 3D stratigraphic forward modelling for analysis and prediction of carbonate platform stratigraphies in exploration and production. *Marine and Petroleum Geology*, v. 25, p. 35-58

Watney, W. L., Wong, J.-C. and French, J. A. Jr.(1991).Computer simulation of the UpperPennsylvanian (Missourian) carbonate-dominatedcycles in western Kansas.In: *Sedimentary Modeling: Computer Simulationsand Methods for Improved Parameter Definition*(Ed. by E. K. Franseen, W. L. Watney, C. G. St.C. Kendall and W. Ross) *Kansas Geol. Surv. Bull.*, 233, p. 415-430.

Watney, W.L.; Rankey, E.C. e Harbaugh, W. (1999). Perspectives on stratigraphic simulation models: current approaches and future opportunities. Em: Numerical experiments in stratigraphy: Recent advances in stratigraphic and sedimentologic computer simulations. Simulations. (Ed. Por W. Harbaugh, W.L. Watney, E.C. Rankey, R. Slingerland, R.H., Goldstein and E.K. Franseen) SEPM Spec. Publ. # 62 p.3-21

Zeller, E.J., and Wray, J.C., 1956. Factors influencing precipitation of carbonates. *Amer. Assoc. Petrol. Geologists Bulletin*, v. 40, p. 122-139