

MODELAGEM DINÂMICA E GEOPROCESSAMENTO

Bianca Maria Pedrosa

Gilberto Câmara

8.1 INTRODUÇÃO

Historicamente, a tecnologia de Geoprocessamento enfatizou a representação de fenômenos espaciais no computador de forma estática. Isto se deve ao fato de que a principal abstração utilizada em Sistemas de Informação Geográfica (GIS) é o mapa. No entanto, um significativo conjunto de fenômenos espaciais, tais como escoamento de água da chuva, planejamento urbano e dispersão de sementes, entre outros, são inerentemente dinâmicos e as representações estáticas comumente utilizadas em GIS não os capturam de forma adequada. Deste modo, um dos grandes desafios da Ciência da Informação Espacial é o desenvolvimento de técnicas e abstrações que sejam capazes de representar adequadamente fenômenos espaço-temporais dinâmicos.

O uso de modelos temporais em GIS vem sendo investigado com afinco na literatura recente (Worboys 1995). Neste trabalho, estaremos dando ênfase a abordagem de representação da dinâmica espaço-temporal por autômatos celulares. Nesta abordagem o espaço é representado através de um *array* de células em que cada célula pode assumir diferentes estados ao longo do tempo. O tempo varia em intervalos discretos e o estado de todas as células muda simultaneamente em função do seu próprio estado, do estado das demais células em sua vizinhança e de acordo com um conjunto específico de regras de transição (Engelen 1995).

Neste trabalho, será abordado os requisitos necessários as abordagens utilizadas para desenvolver sistemas espaciais dinâmicos, os conceitos computacionais e geográficos envolvidos e algumas das aplicações de Modelagem dinâmica em Geoprocessamento.

No capítulo 2 serão apresentados os princípios básicos para representar os principais componentes de um modelo espacial dinâmico. No capítulo 3 serão abordados os conceitos básicos e os principais aspectos computacionais envolvidos na modelagem dinâmica de processos físicos. Será apresentado também um exemplo de modelagem utilizando o aplicativo PCRaster. No capítulo 4 serão apresentados dois exemplos de aplicações computacionais para modelagem dinâmica de processos urbanos, o Citylife e o modelo Multi-escala.

8.2 PRINCÍPIOS BÁSICOS

A atual geração de GIS configura uma tecnologia estabelecida para armazenar, organizar, recuperar e modificar informações sobre a distribuição espacial de recursos naturais, dados geo-demográficos, redes de utilidade pública e muitos outros tipos de dados localizáveis na superfície da terra. Nesta área, um dos principais desafios para os próximos anos é transformar estes sistemas, essencialmente estáticos, em ferramentas capazes de prover representações realistas de processos espaço-temporais. A modelagem de grande quantidade de processos físicos, em aplicações como Geomorfologia, Estudos Climáticos, Dinâmica Populacional e Impacto Ambiental, requer que os GIS tenham capacidade de representar os tipos de processos dinâmicos encontrados em estudos de sistemas físicos e sócio-econômicos.

Neste contexto, a Modelagem Dinâmica (Burrough 1998) procura transcender as limitações atuais da tecnologia de Geoprocessamento, fortemente baseada numa visão estática, bidimensional do mundo. O objetivo dos modelos dinâmicos em GIS é realizar a simulação numérica de processos dependentes do tempo, como nos modelos hidrológicos, que simulam o fluxo e transporte de água. Na definição de Burrough, “um modelo espacial dinâmico é uma representação matemática de um processo do mundo real em que uma localização na superfície terrestre muda em resposta a variações nas forças dirigidas”.

Tipicamente, GIS são desenvolvidos a partir de suposições pré-estabelecidas quanto a homogeneidade, uniformidade e universalidade das propriedades de seus principais componentes, que incluem o espaço e as relações espaciais, o tempo e o modelo matemático que descreve o fenômeno. Entretanto, para modelar processos dinâmicos em GIS com o nível necessário de realismo, estas suposições rígidas têm que ser flexibilizadas de tal forma que o sistema seja capaz de representar (Couclelis 1997):

O espaço como uma entidade não homogênea tanto nas suas propriedades quanto na sua estrutura.

As vizinhanças como relações não estacionárias

As regras de transição como regras não universais.

A variação do tempo como um processo regular ou irregular.

O sistema como um ambiente aberto a influências externas.

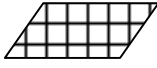



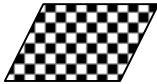
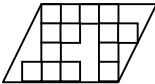
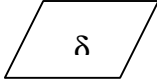

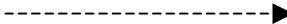
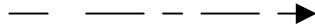

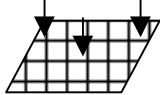
Espaço	Estrutura	regular 	irregular 
	Propriedades	uniforme 	não uniforme 
Vizinhança	estacionária 	não estacionária 	
Função de Transição	universal 	não universal 	
Tempo	regularidade 	irregularidade 	
Sistema	fechado 	aberto 	

Figura 8.1 – Requisitos para modelagem dinâmica em GIS (fonte: Couclelis, 1997)

Na figura 8.1 estão representados os requisitos mencionados acima. A regularidade do espaço diz respeito a forma como ele é distribuído e pode ser regular, isto é, dividido em partes iguais, ou irregular, distribuído de forma diferenciada. As vizinhanças, que geralmente são concebidas como tendo a mesma configuração para todo ponto no espaço, deve superar esta estacionaridade e poder ser representada com diferentes configurações em diferentes pontos do espaço. Por exemplo, em determinado ponto uma célula pode ter vizinhança 4 e em outro vizinhança 8. O sistema deve permitir que mais de uma função de transição possa ser aplicada, permitir que o tempo seja representado em intervalos variáveis (meses, anos) e suportar a inclusão de variáveis externas.

Para implementar sistemas espaciais dinâmicos com as características mencionadas acima, alguns princípios básicos relativos aos principais elementos destes sistemas devem ser considerados. Entre estes elementos destacam-se a questão da representação do espaço e do tempo, o modelo dinâmico a ser utilizado para a representação do fenômeno espacial e a abordagem computacional para implementar estes princípios de forma integrada e consistente. Nas seções seguintes, discutiremos cada um destes elementos.

8.2.1 O Espaço

O espaço é o conceito chave na geografia e, por extensão, na Ciência da Informação Espacial. Tradicionalmente, os geógrafos fazem uma distinção entre os conceitos de espaço absoluto e espaço relativo.

“Espaço absoluto, também chamado Cartesiano ou Newtoniano, é um container de coisas e eventos, uma estrutura para localizar pontos, trajetórias e objetos. Espaço relativo, ou Leibnitziano, é o espaço constituído pelas relações espaciais entre coisas e eventos” (Couclelis 1997).

Santos (1996) refere-se a distinção entre espaço absoluto e espaço relativo como o “espaço dos fixos” e o “espaço dos fluxos”. Em termos de representações computacionais pode-se, de forma aproximada, traduzir estes conceitos como a distinção entre as representações associadas a recobrimentos planares (mapas de polígonos e matrizes) e representações associadas a conectividade (grafos). Um caso típico de medida realizada no espaço absoluto são os índices de auto-correlação espacial. Neste caso, um dos instrumentos básicos é a matriz de proximidade espacial, cujo cálculo usualmente é feito em função de distância euclidiana entre objetos ou da existência de uma fronteira entre eles. Na Figura 8.2 está representado um mapa temático e sua respectiva matriz de proximidade, definida com base nas fronteiras existentes entre os objetos.

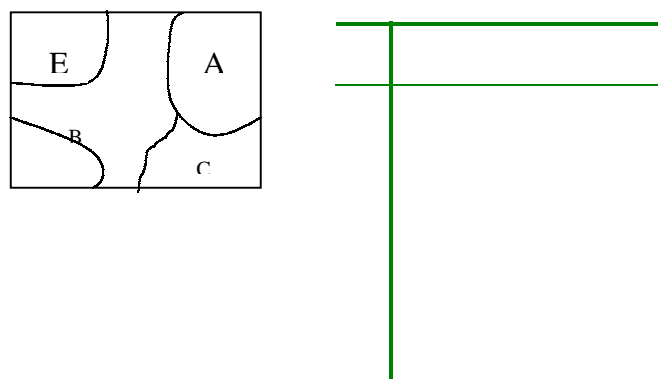


Figura 8.2 – Um mapa poligonal e sua matriz de proximidade

Em muitos fenômenos geográficos, os objetos estabelecem relações entre si que independem das relações espaciais típicas como as relações topológicas, direcionais e de distância. Estes fenômenos geralmente incluem relações como fluxo de pessoas ou materiais, conexões funcionais de influência, comunicação e acessibilidade, entre outras (Couclelis 1999). Um exemplo de fenômeno em que a dimensão espacial requer o

conceito de espaço relativo é o caso de fluxo de pessoas pela rede de transporte metroviário de uma cidade. O fluxo de pessoas a partir de uma mesma origem tem diferentes destinos, Figura 8.3, e a relação entre a origem e destino é estabelecida com base em relações de conectividade e acessibilidade.

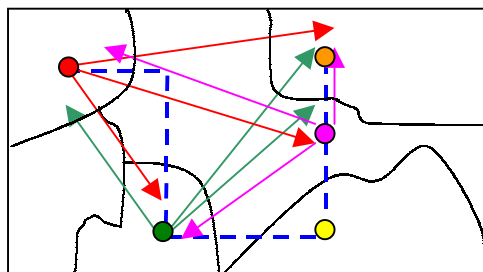
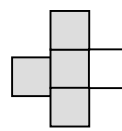
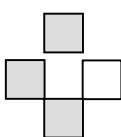
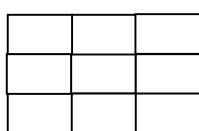


Figura 8.3 – Mapa do Fluxo de Pessoas em uma rede de transporte

Couclelis (1997) propõe a idéia de espaço próximo, como uma extensão dos conceitos de espaço absoluto e relativo. No espaço próximo o conceito chave é a vizinhança associada à noção de proximidade, que conduzem também ao conceito de proximidade funcional ou influência. O conceito de vizinhança é facilmente visualizado em representações matriciais do espaço. Algumas operações espaciais disponíveis em GIS como filtros espaciais, por exemplo, utilizam a noção de espaço próximo de forma limitada. No filtro espacial, o estado de uma célula (um pixel de uma imagem) é modificado com base nos estados das demais células em sua vizinhança, definida através de uma máscara. A seguir é apresentado um exemplo de filtro espacial e o estado de uma célula qualquer antes (Figura 8.4b) e após (Figura 8.4c) a aplicação do filtro espacial.



a) Máscara

b) estado da célula central antes do filtro

c) estado da célula central após o filtro

Figura 8.4 – Exemplo de Filtro espacial

A abstração fundamental na maior parte dos GIS atuais é o conceito de mapa, fortemente relacionado com noções cartográficas e portanto, do espaço absoluto. Em processos dinâmicos a noção de espaço relativo e próximo são fundamentais para estabelecer e representar fluxos e conexões entre entidades do sistema.

8.2.2 O Tempo

Conceitualmente, pode-se representar o tempo através de diferentes estruturas, definidas, principalmente, com base em três aspectos da representação temporal: granularidade, variação e ordem no tempo (Figura 5).

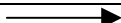


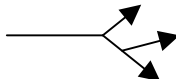


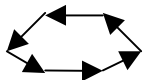

Ordem no tempo	Variação Temporal	Granularidade
linear 	discreto 	instante 
ramificado 	contínuo 	intervalo 
ciclício 		período 

Figura 5 - Estruturas temporais (fonte: Worboys, 1998)

A ordem temporal refere-se ao modo como o tempo flui. Neste caso, pode-se assumir que o tempo flui de forma linear, ramificada ou cíclica. No tempo linear considera-se que o tempo flui seqüencialmente, ou seja, existe uma ordem de precedência entre os pontos no tempo, de tal forma que cada ponto tenha apenas um sucessor e um antecessor. No tempo ramificado múltiplos pontos podem ser os sucessores ou antecessores imediatos de um mesmo ponto. O tempo cíclico é utilizado para modelar eventos e processos recorrentes (Edelweiss and Oliveira 1994).

Com relação à variação temporal duas possibilidades podem ser consideradas: tempo contínuo e discreto. Uma variável temporal contínua é usada em processos que demandam medidas de tempo com níveis arbitrários de precisão. Por exemplo, a expansão da área de desmatamento de uma floresta entre dois instantes de tempo medidos pode ser interpolada. A Figura 6 apresenta mapas de uma área desmatada em dois instantes t e t' . Se necessário, pode-se gerar um novo mapa para representar a área desmatada entre os instantes t e t' porque este processo é contínuo no tempo.

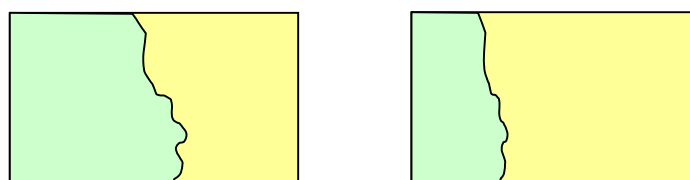


Figura 6 – Área Desmatada da floresta em dois instantes t e t'

Uma variável temporal discreta é usada quando o tempo é medido em certos pontos ou intervalos e a variação é descontínua entre estes pontos. Uma delimitação de lotes de um cadastro imobiliário pode ocupar uma posição num instante t e outra num instante t' , mas não faz sentido dizer que a delimitação ocupou alguma posição intermediária entre t e t' . Na figura 7, no instante t existem 4 lotes em uma área residencial, no instante t' os lotes 2 e 3 são unidos formando um novo lote 5.

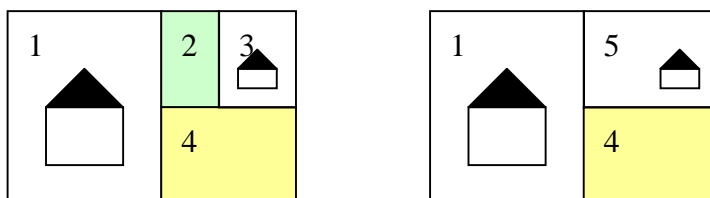


Figura 7 – Delimitação de lotes de um cadastro imobiliário em dois instantes t e t'

Associado ao conceito de variação temporal discreta, existe o conceito de *Chronos*. Um *chronon* é a menor duração de tempo suportada por um sistema e pode variar em diferentes aplicações (Edelweiss and Oliveira 1994).

A granularidade temporal de um sistema está diretamente relacionada com a duração de um *chronon*. As diferentes granularidades de um sistema temporal conduzem à definição de instante e intervalo de tempo. Um instante de tempo representa um ponto particular no tempo, um intervalo é o tempo decorrido entre dois instantes e um período consiste de uma seqüência de intervalos de tempo .

Em sistemas computacionais, representa-se o tempo em pelo menos duas dimensões:

- tempo válido (*valid time*) - corresponde ao tempo em que um evento ocorre no domínio da aplicação.
- tempo de transação (*transaction time*) – corresponde ao tempo em que transações acontecem dentro do sistema de informação (Worboys 1995).

Adicionalmente, existe o conceito de “tempo definido pelo usuário”, consistindo de propriedades definidas explicitamente pelos usuários em um domínio temporal e manipuladas pelo programa de aplicação (Edelweiss and Oliveira 1994).

A incorporação da dimensão temporal em um sistema de informação não se restringe apenas à questão da representação do tempo, mas inclui também questões relativas a sua recuperação. Um GIS temporal deve ser capaz de recuperar informações através de consultas definidas sobre critérios temporais, como por exemplo:

Quais rodovias do Brasil foram recuperadas **a partir de 1980** e **agora** permitem uma velocidade superior a 100km/h ?

Qual rio teve a maior taxa de poluição **entre 1970 e 1985**?

Quais as cidades em que a cobertura vegetal aumentou em pelo menos 5% **durante** os últimos 5 anos?

Para resolver consultas como as relacionadas acima, um GIS tem que prover um conjunto de operadores e funções que permitam a avaliação de relacionamentos como os de precedência, sobreposição, igualdade e pertinência entre dois intervalos de tempo (Figura 8).

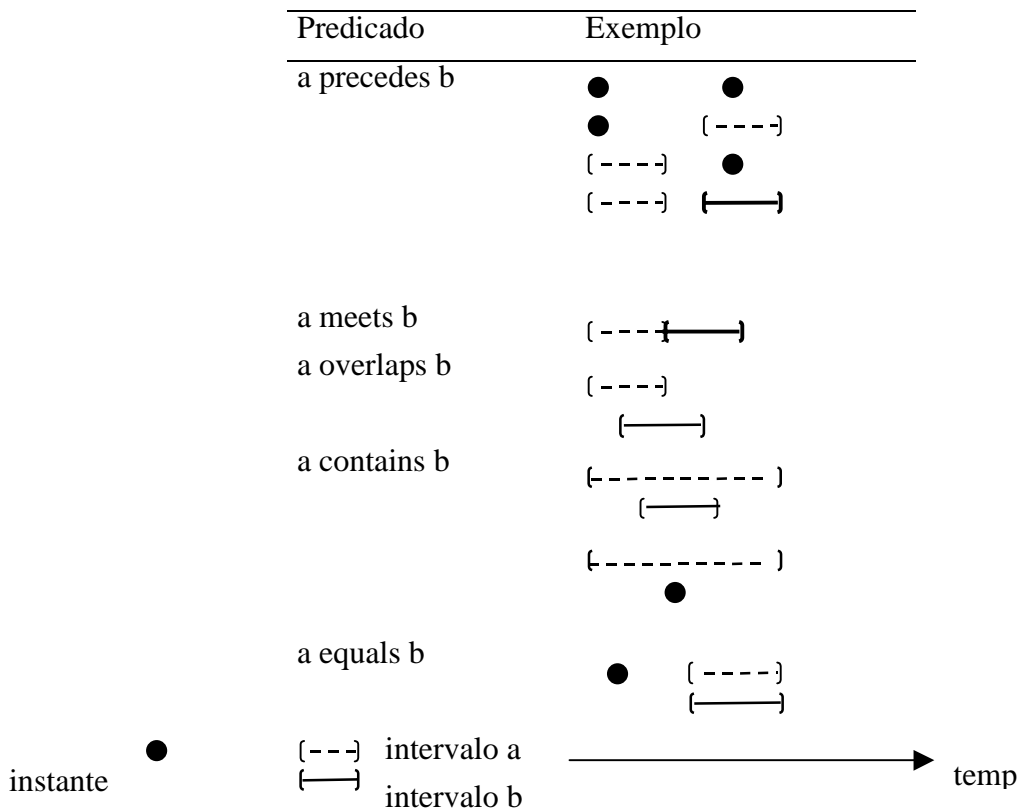


Figura 8 – Predicados temporais (fonte: Voigtmann, 1996)

Para exemplificar consultas envolvendo predicados como os apresentados na Figura 8, utilizaremos uma linguagem de consulta temporal especialmente desenvolvida para aplicações em geoprocessamento, chamada T/OOGQL (Voigtmann 1996). Esta linguagem é uma extensão ao SQL (Structured Query Language) com suporte para tipos de dados espaciais e temporais.

Quanto aos operadores espaciais, a linguagem T/OOGQL oferece os clássicos *cross*, *overlap*, *touch* e *in*, entre outros. Quanto aos aspectos temporais, a linguagem T/OOGQL trabalha com os conceitos de timestamp (definição explícita de tempo associada a uma informação), tempo válido e tempo transacional, e oferece as seguintes funções:

Função	Descrição
First(), Last()	retorna o primeiro e último timestamp associado a um atributo, objeto ou relacionamento
FirstValue(), LastValue()	retorna o primeiro e último valor associado a um atributo, objeto ou relacionamento
Begin(), End()	retorna o início e o fim de um timestamp
Period(b,f), Period(d)	retorna um período tendo início b e final f ou um período de duração d
Day(), Month(), Year()	construtores de timestamps para descrever um dia, mês ou ano
date(), time(), datetime()	construtores de timestamps para descrever uma data, hora ou data e hora
years(n), months(n), days(n)	retorna um intervalo de tempo com a duração de n dias, n meses ou n anos

Figura 9 – Funções Temporais do T/OOGQL

A seguir, demonstraremos o uso da linguagem T/OOGQL em alguns exemplos de consultas que envolvem tanto operadores temporais quanto espaciais:

1. Quais rodovias do Brasil foram recuperadas a partir de 1980 e agora permitem uma velocidade ≥ 100 km/h ?

```
select snapshot r
from railroad r, state s
where s.name="Brasil" and (r cross s or r in s) and
      r.max_speed>=100 and
      Begin( Year(1980) ) vt_precedes r.max_speed
```

2. Qual rio teve a maior taxa de poluição entre 1970 e 1985?

```
query_time:Period (Begin (Year(1970)), End(Year(1985)))
select r.name
from river r
where exists rp in r.pollution:
      rp.max_pollution(query_time) >=max (select
      max_pollution (query_time) from river_pollution)
```

3. Quais as cidades em que a cobertura vegetal aumentou em pelo menos 5% durante os últimos 5 anos?

```
select c.name
from city c
where c.vegetation.coverage("Wood",c.geometry,now)
      >= min(c.vegetation.coverage("Wood",c.geometry,
      Period(now-years(5)),now))+5
```

Nas consultas apresentadas acima, as cláusulas *select*, *from* e *where* são similares às de qualquer linguagem baseada em SQL. Os prefixos *vt* e *tt* são abreviações para tempo válido e tempo de transação, respectivamente. As palavra reservada *Snapshot*, presente na cláusula *select* da primeira consulta, tem o mesmo significado da Linguagem TSQL2 (uma extensão temporal para a linguagem SQL2), ou seja, gera um resultado de consulta instântaneo, sem timestamps associados (Voigtmann 1996).

8.3 MODELOS

Modelos espaciais dinâmicos descrevem a evolução de padrões espaciais de um sistema ao longo do tempo. Segundo Lambin(1994) um modelo deve responder as seguintes questões:

- Quais variáveis ambientais e culturais contribuem para explicar o fenômeno e quais são os processos ecológicos e sócio-econômicos existentes por trás do fenômeno?
- Como o processo evolui?
- Onde ocorrem os fenômenos?

Estas questões chaves podem ser identificadas como as clássicas “Porque”, “Quando” e “Onde”. Um modelo que responde a estas questões é capaz de descrever quantitativamente um fenômeno e prever sua evolução, integrando suas escalas temporal e espacial.

8.3.1 Tipos de modelos

Um modelo é constituído de pelo menos três elementos: variáveis, relacionamentos e processos. Ao se construir um modelo, dependendo do objetivo, pode-se dar ênfase a um ou outro destes elementos. Nesta visão, os modelos podem ser classificados em empíricos e de sistemas. Modelos empíricos focalizam os relacionamentos entre as variáveis do modelo, a partir da suposição de que os relacionamentos observados no passado continuarão no futuro. Modelos de sistemas são descrições matemáticas de processos complexos que interagem entre si, enfatizando as interações entre todos os componentes de um sistema (Lambin 1994).

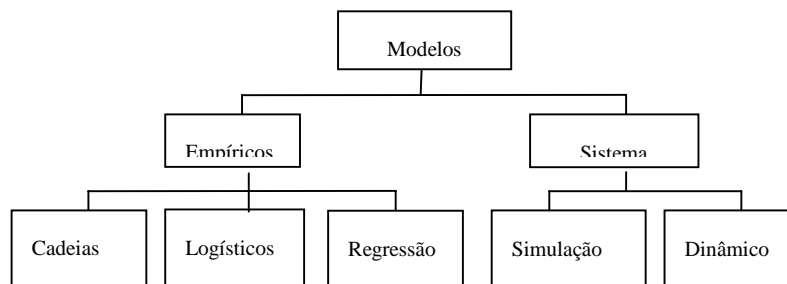


Figura 8.10 – Tipos de modelos

8.3.1.1 Modelos Empíricos

Os modelos empíricos, em sua dimensão procedural, possuem três componentes chaves: uma configuração inicial, uma função de mudança e uma configuração de saída. A configuração inicial de um modelo dinâmico pode ser obtida através de dados históricos do fenômeno em estudo, chamados de séries temporais. Neste caso, equações diferenciais (totais ou parciais) que incluem pelo menos um termo derivado no tempo podem ser utilizadas para representar o modelo e o processo é classificado como determinístico. Quando variáveis aleatórias são utilizadas para explicar um sistema o processo é classificado como estocástico-probabilístico.

Modelos empíricos são caracterizados pela simplicidade dos modelos matemáticos empregados e pelo número reduzido de variáveis envolvidas. Estes modelos são eficientes em fazer previsões, embora apresentem limitações em abordar a evolução espacial e identificar os aspectos causais do sistema. A seguir, serão apresentados três modelos empíricos: cadeias de markov, modelos logísticos de difusão e modelos de regressão.

Cadeias de Markov

Cadeias de Markov são modelos matemáticos para descrever processos estocásticos e podem denotadas por:

$$\Pi_{(t+1)} = P^n . \Pi_{(t)}$$

onde $\Pi_{(t)}$ é o estado do sistema no tempo t , $\Pi_{(t+1)}$ é o estado do sistema após o intervalo $t+1$ e P^n são os estados passíveis de acontecer, que são representados em matrizes de possibilidades de transição. Essas matrizes de transição representam a possibilidade de um determinado estado i permanecer o mesmo ou mudar para o estado j durante o intervalo de tempo $t \rightarrow t+1$. As probabilidades de transição são usualmente derivadas de amostras relativas a um certo intervalo de tempo. Cadeias de Markov de 1ª ordem assumem que o estado futuro do sistema depende apenas do seu estado presente e das possibilidades de transição, sendo independente da trajetória que o levou aquele estado (estados em um tempo $t-1$). Este modelo não ignora o passado, mas assume que toda a informação do passado está concentrada no presente estado do sistema. Desta forma, as interações são instantâneas, sendo irrelevante o tempo de permanência das variáveis em cada estado (Soares Filho 1998).

Outra característica das cadeias de Markov é que as probabilidades de transição não mudam com o tempo, o que o caracteriza como um processo estacionário.

As principais vantagens das cadeias de Markov são a simplicidade operacional e matemática do modelo aliadas a facilidade com que podem ser aplicadas a dados provenientes de sensoriamento remoto e implementadas em GIS. Outra grande vantagem é o fato de não necessitar de grande quantidade de dados antigos para prever o futuro.

As principais limitações das cadeias de markov incluem o fato do modelo não explicar o fenômeno (Porque) e ser limitado na resposta espacial (Onde), entretanto o modelo pode fazer predições (Quando) desde que os processos sejam estacionários. Além disto, o modelo não suporta de imediato a inclusão de variáveis exógenas como variáveis sócio-econômicas ou outras forças dirigidas, embora esta limitação possa ser superada. Em (Lambin 1994) são apresentadas várias abordagens para superar as principais limitações de cadeias de Markov em modelagem dinâmica.

Modelos logísticos de Difusão

Modelos logísticos são utilizados para descrever matematicamente fenômenos em que as variáveis inicialmente apresentam variações em um ritmo lento, depois o ritmo de variações se intensifica, voltando a reduzir-se até que o nível de saturação seja atingido. Este modelo leva em conta as interações temporais entre as variáveis do sistema, podendo ser expresso por:

$$dP/dt = r P [(U - P) / U]$$

onde P é a variável de um fenômeno de crescimento ao longo do tempo t, como aumento da população, por exemplo; r é a taxa de crescimento e U uma função de crescimento (Lambin 1994). Dentre os modelos baseados em funções logísticas destacam-se os modelos de difusão. Tais modelos enfatizam a velocidade do processo e permitem a inclusão de variáveis relacionadas às causas do fenômeno.

Os principais elementos de um modelo espacial de difusão são (Soares Filho 1998):

- meio ambiente (isotrópico ou heterogêneo)
- tempo (contínuo ou discretizado)
- item a ser difundido (material, pessoas, informação, doença)
- locais de origem
- locais de destino
- caminhos a serem percorridos

Estes elementos interagem entre si através de um mecanismo em que pode-se identificar quatro estágios:

- Estágio inicial – neste estágio tem início o processo de difusão.
- Estágio de difusão – tem início o processo de espalhamento
- Estágio de condensação – diminui o ritmo do espalhamento.
- Estágio de saturação – ocorre a desaceleração ou encerramento do processo de difusão.

O processo de espalhamento em modelos de difusão pode se dar por expansão ou realocação. Nos modelos de difusão por expansão a informação ou material se espalha de uma região para outra, permanecendo na região original. Nos modelos de difusão por realocação os objetos se movem para novas regiões, abandonando as áreas originais (Soares Filho 1998). Modelos de difusão não explicam as causas de um fenômeno, embora possam integrar variáveis ecológicas e sócio-econômicas. Sua maior contribuição está na predição do comportamento futuro do fenômeno. Quanto à dimensão espacial, o modelo em si não a incorpora, mas ela pode ser introduzida através da integração deste modelo com um GIS (Lambin 1994).

Modelos de Regressão

O objetivo dos modelos de regressão é estabelecer relações estatísticas entre um fenômeno em estudo e as variáveis independentes, chamadas forças dirigidas, que exercem influência sobre ele. Sendo assim, o modelo suporta a inclusão de variáveis exógenas como as sócio-econômicas. Isto contribui para o entendimento do fenômeno em estudo, mas é insuficiente para explicá-lo, pois a identificação de um relacionamento estatístico entre duas variáveis por si só não estabelece um relacionamento causal entre elas. Por exemplo, pode-se identificar através de um modelo de regressão que o crescimento populacional tem relação com o crescimento do desmatamento de uma determinada região, entretanto, o modelo de regressão não explica os mecanismos que ligam estas variáveis (Lambin 1994).

Matematicamente, o modelo estabelece um relacionamento linear entre as variáveis dependentes e independentes através da expressão:

$$y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_i x_i + E$$

onde:

y = mudança ocorrida em um determinado tempo

x_i = variáveis independentes (forças dirigidas)

A_i = Coeficientes de regressão dos relacionamentos

E = Componente de erro

Em modelos de regressão a dimensão temporal é considerada, mas a distribuição espacial do fenômeno não é abordada, limitação esta que pode ser superada se o modelo for combinado com GIS. Outra limitação deste modelo é que ele se aplica apenas a processos estacionários (Lambin 1994).

Um exemplo de modelo de regressão é o implementado por Reis e Margulis (1991) para modelar o desmatamento da Amazônia em função da densidade espacial das atividades econômicas da região. Neste modelo, num primeiro estágio, áreas desmatadas são relacionadas com a densidade populacional, áreas cultivadas, distância de centros urbanos e proximidade de rodovias, entre outras variáveis. Num segundo estágio, o modelo relaciona o crescimento de determinadas atividades (colonização, cultivo, pecuária) entre 1980 e 1985 com a densidade destas atividades em 1980, obtendo assim o padrão de crescimento espacial de cada atividade. Então, partindo da suposição de que este padrão espacial de crescimento irá se manter no futuro, o modelo faz projeções sobre a tendência de desmatamento para o período de 1985-2000 (Lambin 1994).

8.3.2 Modelos de Sistemas

Modelos de sistemas procuram descrever o sistema como um todo, isto é, tentam representar as interações entre todos os seus componentes. Uma característica chave destes modelos é a eficiência com que abordam a dimensão espacial, implementando conceitos como as relações de vizinhança e suportando o uso combinado de múltiplas escalas. A seguir, descreveremos as características de gerais de duas classes de modelos de sistema: os modelos de simulação de ecossistemas e os modelos de simulação dinâmica espacial.

Modelos de Simulação de Ecossistemas

Modelos de Ecossistemas são projetados para imitar o comportamento de um sistema, enfatizando as interações entre todos os seus componentes. Estes modelos são baseados na composição de ecossistemas complexos em um número de equações diferenciais (Lambin 1994). A construção de um modelo de simulação requer que os principais aspectos que afetam o fenômeno estejam bem integrados, que seus relacionamentos funcionais estejam bem representados e que o modelo possa prever os impactos ecológicos e econômicos das mudanças ao longo do tempo.

Estes modelos são adequados para representar processos não estacionários, mas apresentam limitações quanto ao aspecto espacial, pois tratam o espaço como uma entidade homogênea (Lambin 1994).

Modelos de Simulação Dinâmica Espacial

Modelos de Simulação Dinâmica Espacial baseiam-se em modelos de ecossistemas com extensões para acomodar a heterogeneidade espacial e processos humanos de tomada de decisão.

Uma abordagem para desenvolver modelos de simulação dinâmica espacial é representar o espaço como uma matriz de células e aplicar as equações matemáticas a cada uma das células da matriz, simultaneamente. Cada célula do modelo está conectada com suas células vizinhas, de tal forma que é possível estabelecer um fluxo entre células adjacentes. Isto simplifica sobremaneira o mecanismo de predições do sistema porque por exemplo, se uma célula tem três vizinhos com estado x , é altamente provável que o estado desta célula venha a ser x também. Entretanto, este raciocínio simplista pode ser aperfeiçoado em regras de transição. Outro aperfeiçoamento desse modelo é a possibilidade de incorporar processos de tomada de decisões. Modelos que incorporam este mecanismo são chamados modelos baseados em regras. As regras de tomada de decisão são representadas através de abstrações muito semelhantes àquelas que ocorrem na mente humana.

Um exemplo de modelo com as funcionalidades mencionadas acima é o DELTA (Dynamic Ecological Land Tenure Analysis), um sistema desenvolvido para integrar

aspectos sócio-econômicos da colonização amazônica e aspectos ecológicos do desmatamento e da liberação de carbono no Estado de Rondônia.

O DELTA consiste em três submodelos integrados que simulam, respectivamente, a difusão da colonização, mudança do uso do solo e liberação de carbono. Os submodelos são examinados em diferentes escalas, o que caracteriza o modelo como multi-escala. Além disso, o modelo é considerado “a playing game tool”, pois não se restringe a fazer previsões, mas sim a servir como instrumento para responder “what if questions” (Lambin 1994).

Para finalizar, um resumo das características-chaves de cada tipo de modelo, segundo o potencial de cada um deles para responder as perguntas porque, quando e onde é apresentado a seguir:

Modelo	Porquê	Quando	Onde
Cadeias de Markov	não pode explicar a razão de um fenômeno por ser processo estocástico e não suportar a inclusão de variáveis exógenas	pode prever a evolução de processos estacionários	pode prever distribuições espaciais de elementos do modelo se for combinado com GIS
Logístico de Difusão	permite a inclusão de poucas variáveis exógenas, entretanto é um modelo descritivo, não suportando investigações exploratórias	suporta a dimensão temporal, podendo prever a evolução de processos não estacionários	pode prever distribuições espaciais de elementos do modelo se for combinado com GIS
Regressão	contribui para identificar forças direcionadoras, entretanto são modelos descritivos, não sendo capaz de estabelecer relações causais entre as variáveis	pode prever a evolução de processos estacionários	não são modelos espaciais, entretanto podem ser combinados com GIS
Simulação de Ecossistemas	modelo exploratório que requer descrições funcionais dos sistemas ecológicos	pode formular cenários de mudanças futuras no uso do solo, baseado nos parâmetros do modelo	apresenta dificuldades na representação espacial
Simulação Espacial Dinâmica	requer modelos funcionais espacialmente definidos	pode prever mudanças temporais no uso do solo, baseado nos parâmetros do modelo	pode prever evolução de padrões espaciais em processos determinísticos

8.3.3 Autômatos Celulares

Em 1982 John Conway apresentou o Jogo da Vida (*The Game of Life*), demonstrando que regras muito simples quando aplicadas repetidamente sobre estados aleatórios, produzem resultados semelhantes à forma como certos sistemas evoluem no mundo real. No Jogo da Vida o espaço é representado como uma grade de células, algumas das quais estão vivas e outras mortas. Dado um estado inicial aleatório, a cada geração, novas células nascem e algumas morrem. O que determina o estado de uma célula é sua vizinhança que, neste caso, é definida por quatro células adjacentes. Uma célula viva morre se tiver duas ou três células vizinhas vivas. Por outro lado, uma célula morta renasce, se tiver três células vizinhas vivas. Este sistema deu grande popularidade aos conceitos de autômatos celulares, que foram inicialmente apresentados por John Von Neumann (Roy, 1996).

Nos últimos anos, os conceitos de autômatos celulares tem sido utilizados para modelar fenômenos físicos e urbanos (Batty 1999, Burrough, 1998; Roy, 1996; Engelen, 1995; Câmara, 1996). Nesta abordagem o espaço é representado por um mosaico de células, geralmente de tamanhos e formatos idênticos (*regular tessellations*). Algumas das formas mais simples utilizadas para representar células em autômatos celulares são apresentadas na figura 8.12.

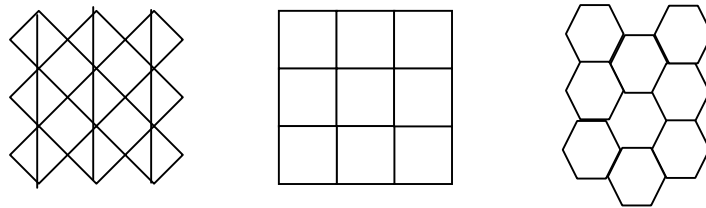


Figura 8.12 – Representações de células em autômatos celulares (fonte: Câmara, 1996)

Sobre cada célula de um autômato celular são aplicadas regras de transição. Regras de transição determinam quando e porque o estado de uma célula se altera e podem ser qualitativas ou quantitativas.

Para ilustrar como se dá o mecanismo de aplicação das regras de transição, apresentaremos um exemplo simples baseado em (Câmara 1996). Neste exemplo, uma célula pode assumir dois estados (branco e preto) e sua vizinhança é definida sobre duas células adjacentes. As regras de transição especificam que o estado de uma célula num instante $t+1$ é igual ao dos seus vizinhos no instante t , se estes vizinhos tiverem os estados iguais; caso contrário, o estado da célula permanece o mesmo. Para entender o exemplo é necessário identificar os componentes básicos do autômato celular clássico, que são:

- espaço euclidiano, dividido em um *array* de células
- uma vizinhança de tamanho e formato definidos (Figura 13a)
- um conjunto de estados discretos (Figura 13b)
- um conjunto de regras de transição (Figura 13c)
- um conjunto de intervalos de tempo, com atualização simultânea das células (Figura 13d)

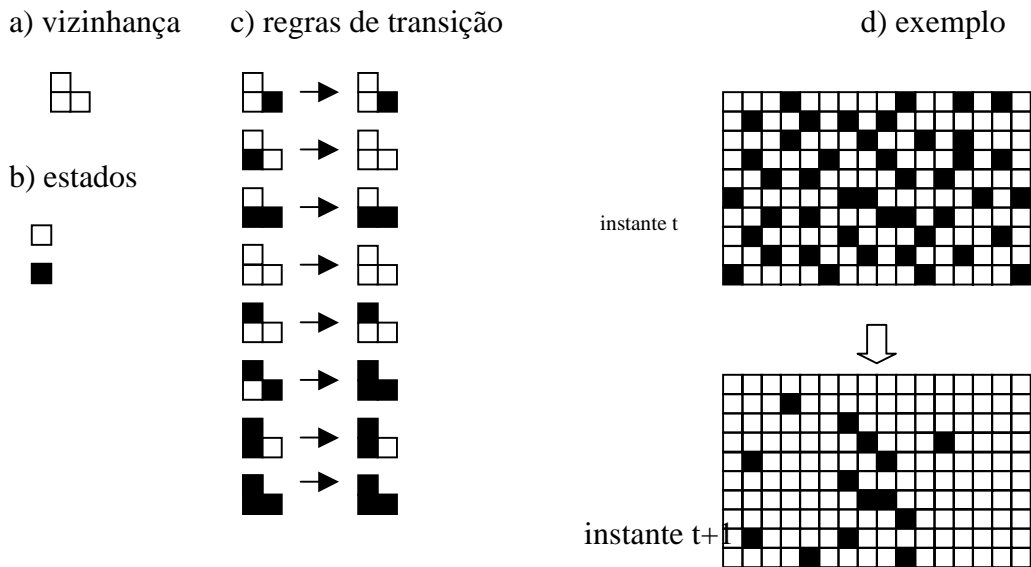


Figura 8.13 – Exemplo de autômato celular (Fonte: Câmara,1966)

A dinâmica de aplicação das regras de transição em um autômato celular é semelhante a de um filtro espacial. Desta forma, todas as células são avaliadas e, quando for o caso, modificadas para um novo estado. Na figura 13 d, a primeira célula da segunda linha do autômato tem, no instante t, o estado branco e suas vizinhas possuem estados diferentes (uma é branca e outra preta). Neste caso o estado da célula permanece o mesmo (1ª regra de transição). Seguindo o mesmo mecanismo, a segunda célula da segunda linha, tem no instante t o estado preto e suas vizinhas tem ambas o estado branco, logo o estado desta célula sofre uma transição para branco (2ª regra de transição). O processo segue este mecanismo para as demais células até que todas tenham sido avaliadas.

No exemplo acima, pode-se observar que as mudanças geradas por autômatos celulares são estritamente locais, isto é, baseadas nas vizinhanças de cada célula. Nesta perspectiva, pode-se dizer que sua aplicação é eficiente em processos em que a ordem global emerge de ações locais e descentralizadas (Batty 2000).

8.4 MODELAGEM DINÂMICA DE PROCESSOS FÍSICOS

Na seção anterior foram apresentados os princípios básicos relativos aos principais componentes de um modelo espacial dinâmico. Estes modelos são utilizados para explicar a ocorrência de um fenômeno, seu padrão espacial e sua evolução ao longo do tempo, respondendo assim às questões chaves porque, onde e quando, respectivamente. Dentre as diversas aplicações da modelagem espaço-temporal podemos identificar dois grandes grupos de processos: os físicos e os de planejamento urbano. Estes grupos possuem variáveis e comportamentos diferenciados que exigem diferentes abordagens de implementação. Nesta seção focalizaremos alguns aspectos computacionais presentes em modelagem dinâmica de processos físicos e apresentaremos um exemplo de modelagem dinâmica utilizando o aplicativo PCRaster.

8.4.1 Aspectos Computacionais

Fenômenos físicos tais como o escoamento da água da chuva e a difusão de plantas, encontrados na hidrologia e ecologia, respectivamente, são exemplos de fenômenos com alto índice de variação do estado da superfície ao longo do tempo. A complexidade dos modelos dinâmicos depende da dimensão em que tais modelos operam, 2 ou 3D, e dos equacionamentos matemáticos que utiliza. O mais simples dos modelos dinâmicos é chamado **modelo pontual sem memória**. Neste modelo, o estado de uma célula é modificado apenas pela variável fornecida como entrada para esta célula em um determinado instante t (Figura 14a). As demais células, bem como o estado desta célula em instantes anteriores não afetam o estado da célula naquele momento. Sendo assim, o estado de uma célula num processo pontual sem memória é uma função matemática operando na variável de entrada da célula no instante t (Figura 14b).

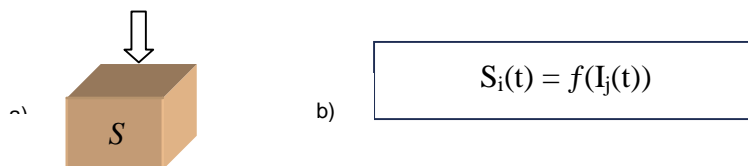


Figura 14 – Célula cujo estado depende apenas da variável de entrada (I) (fonte: Burrough, 1998)

Processos pontuais com memória referem-se a processos em que o estado de uma célula no instante $t+1$ retêm informações sobre seu estado no instante t . A memória da célula é determinada por uma função g operando no estado inicial da célula (Figura 15b). Um exemplo clássico para ilustrar o caso de processos pontuais com memória é o caso da água da chuva no solo. Quando o solo não consegue mais absorver água deve ocorrer algum transporte de material. Neste caso esta distribuição de material pode ser feita verticalmente, isto é, das células superiores para as inferiores (fluxo gravitacional – *Darcy's law*), como mostra a Figura 15a.

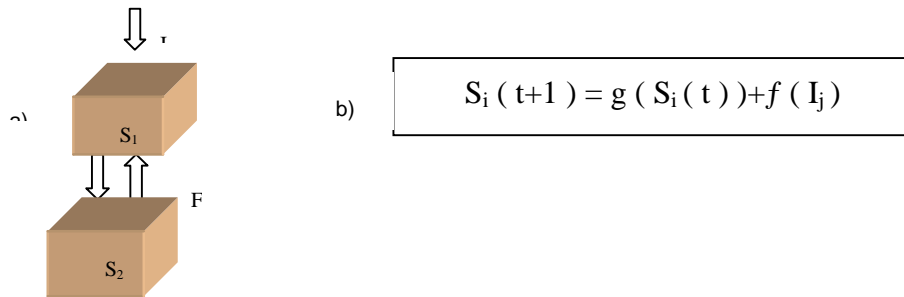


Figura 15 – Célula com adjacência vertical (fonte: Burrough, 1998)

Outra forma possível de transporte de material, considerando ainda o exemplo da água da chuva no solo, é através da adjacência lateral (processo de dispersão), Figura 16a. Neste caso existem mais variáveis envolvidas, o estado de uma célula depende do seu estado anterior, do fluxo de material e das entradas naquele intervalo de tempo (Figura 16b).

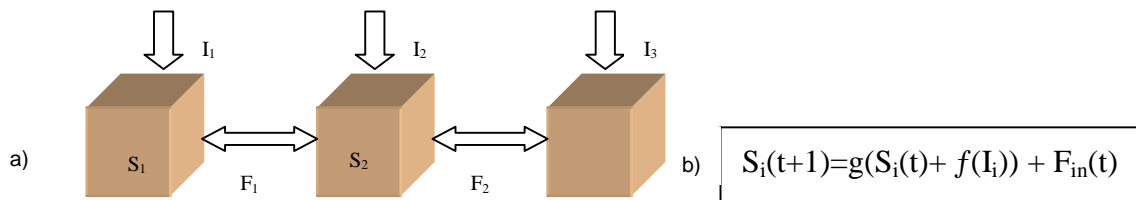


Figura 16 – Célula com adjacência horizontal (fonte: Burrough, 1998)

As células podem também ser conectadas por ligações topológicas (Figura 17). Estas ligações geralmente são baseadas em aspectos físicos do transporte de material. No caso da água de chuva, uma boa orientação para modelar o fluxo de material de célula para célula é conhecer a topologia do terreno.

Para que o fluxo de material de célula para célula possa ser computado a partir da topologia do terreno é necessário modelar esta topologia em uma forma computacionalmente apropriada. As redes *Local Drain Direction* (LDD), Figura 18, apresentam uma estrutura de dados computacional que viabiliza a interação entre as células. Nesta estrutura, que corresponde a um *array* de células (*cellarray*), cada célula

possui um atributo que indica a direção de fluxo. Esta direção pode ser para um dos seus oito vizinhos, considerando o espaço 2D.

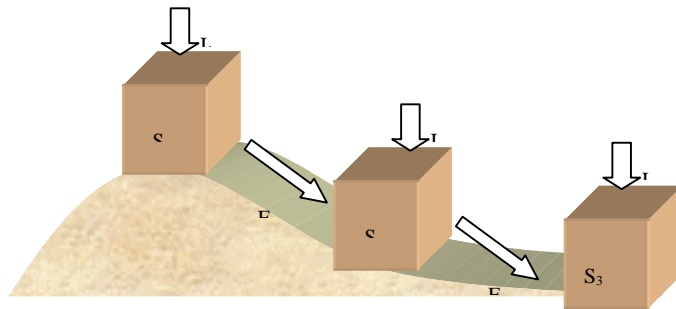


Figura 17 – Células com adjacência direcionada pela topologia (fonte: Burrough, 1998)

Para gerar a rede LDD existem vários algoritmos dentre os quais o D8 (*Deterministic algorithm*) destaca-se pela sua simplicidade (Burrough and McDonnel 1998). Neste algoritmo, a direção do fluxo é determinada pela direção mais inclinada dentro de uma janela 3x3 de células. Numa rede LDD existem dois tipos de células *upstream* e *target*. A célula *target* é a célula para onde todo o fluxo é direcionado. As demais células são chamadas *upstream*.

C_u ↓	C_u ↓	C_u ↓	C_u ↙	C_u ↙
C_u ↓	C_u ↓	C_u ↙	C_u ↙	C_u ↙
C_u ↘	C_u ↓	C_u ↙	C_u ↙	C_u ↙
C_u ↘	C_u ↓	C_u ←	C_u ←	C_u ←
C_u →	C_g ●	C_u ←	C_u ←	C_u ←

Figura 18 – Local Drain Direction (fonte: Burrough, 1998)

O material pode fluir por uma rede LDD a partir de diferentes funções, tais como:

- fluxo acumulado - calcula o novo estado dos atributos de uma célula, somando o valor original da célula mais a soma acumulada de todas as células *upstream*, cujo fluxo passa por esta célula;
- capacidade de transporte de uma célula - limita o fluxo de célula para célula a um atributo de capacidade de transporte fornecido em valores absolutos;
- fração de transporte - limita o fluxo sobre a rede a um parâmetro que controla a proporção de material que pode fluir por cada célula.

- valor limite – modifica o acúmulo de fluxo sobre a rede limitando o transporte de valores superiores a um determinado limite mínimo por célula.
- valor de disparo – permite o fluxo de material apenas se um valor de disparo for excedido.

8.4.2 PCRaster

Para demonstrar a aplicabilidade dos conceitos vistos nas seções anteriores, apresentaremos um exemplo de fenômeno físico que requer modelagem dinâmica para ser representado. Para modelar este fenômeno utilizaremos um aplicativo chamado PCRaster.

PCRaster é um *toolkit* para modelagem dinâmica que opera no modo matricial (*Raster*) e oferece um conjunto de ferramentas para análise espacial e temporal, funções para dispersão espacial e transporte sobre redes topológicas e um conjunto de métodos geoestatísticos para interpolação e simulação espacial. No PCRaster os resultados podem ser exibidos de forma dinâmica em 2 ou 3D. Para ilustrar o uso do PCRaster utilizaremos como exemplo um caso de escoamento de água da chuva em uma Bacia.

Para modelar este processo é necessário fornecer como entradas para o sistema o Modelo Numérico do Terreno (MNT) e as séries temporais com os dados de precipitação pluviométrica. A partir do MNT (Figura 20) é gerada a rede LDD, que é a rede de drenagem por onde a água excedente flui. A água excedente é toda a água que não foi infiltrada, por já ter excedido a capacidade de infiltração da célula. Para determinar o padrão espacial do processo de infiltração, um mapa de solos da área em estudo tem que ser fornecido. A partir destes dados, o programa é executado e gera um conjunto de mapas resultantes (Figura 19).

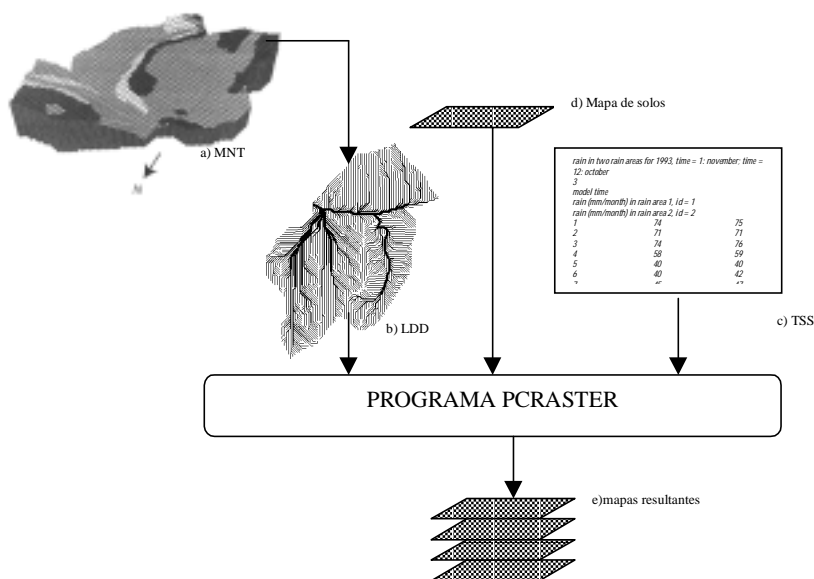


Figura 19 – Esquema simplificado das entradas e saídas do PCRaster

As séries temporais são arquivos ascii, contendo dados armazenados de forma tabular (Figura 21). Os dados fornecidos na séries temporais são utilizados para calcular o novo estado das células. Uma das funções de fluxo de material, comentadas na seção anterior, é selecionada pelo usuário para calcular o fluxo de água de célula para célula.

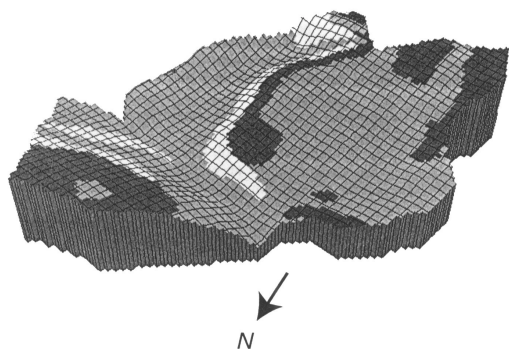


Figura 20 - MNT da área de estudo

```
rain in two rain areas for 1993, time =
1: november; time = 12: october
3
model time
rain (mm/month) in rain area 1, id = 1
rain (mm/month) in rain area 2, id = 2
1      74      75
2      71      71
3      74      76
4      58      59
5      40      40
6      40      42
7      45      47
8      62      64
9      80      78
10     80      85
11     75      79
12     67      69
```

Figura 21 – Série temporal dos índices pluviométricos

Um programa PCRaster (arquivos **.mod**) é organizado em cinco seções: *binding*, *areamap*, *timer*, *initial* e *dynamic*. A seção *binding* é onde são definidas as ligações entre as variáveis do programa e os arquivos. Estas ligações tem dupla direção, tanto podem determinar que as variáveis serão gravadas nos arquivos especificados (caso em que é executado um comando *report* na seção *dynamic*), quanto podem apenas indicar que as variáveis receberão valores provenientes dos arquivos especificados. Depois, na seção *areamap*, deve ser definido o formato geral dos mapas do modelo. Todos os mapas utilizados em um modelo devem ter o mesmo tamanho, localização geográfica e resolução. Na seção *timer*, o domínio de tempo do modelo é definido através de uma declaração que fornece os tempos inicial e final da execução do modelo, bem como o intervalo ou passo em que este tempo deve variar ao longo da execução do modelo. A seção *initial* é utilizada para inicializar as variáveis do programa. Esta seção é executada antes da primeira execução da seção *dynamic*. A seção *dynamic* é a parte principal de um programa PCRaster. Descreve as mudanças temporais das variáveis ou mapas do modelo. A principal característica desta seção é ser iterativa, isto é, é repetida, do início ao final, para todo o intervalo de tempo definido na seção *timer*. A seguir é apresentado um exemplo de programa PCRaster para calcular a precipitação da bacia, de nosso exemplo.

```

# model for simulation of rainfall
# one timeslice represents one month

binding
  RainTimeSeries=rain12.tss;# timeseries with rainfall (mm) per month
                                # for two rain areas
  Precip=rain;                  # reported maps with precipitation,
                                # rain is suffix of filenames
  RainAreas=rainarea.map;      # map with two rain areas

areamap
  clone.map;

timer
  1 12 1;

initial
  # this section is empty

dynamic
  # precipitation
  report Precip=timeinputscalar(RainTimeSeries,RainAreas);

```

Figura 22 – Programa PCRaster para calcular a precipitação

No programa acima, na seção `binding` as variáveis dos programas foram associadas a arquivos do Banco de dados. A declaração `RainTimeSeries=rain12.tss;` especifica que será utilizada a série temporal armazenada no arquivo `rain12.tss` (Figura 21). Depois, na declaração `Precip=rain;` é definido que o nome dos mapas de precipitação resultantes serão gravados em arquivos nomeados por `rain0000.xxx` (onde `xxx` varia de 001 a 012, porque a precipitação será calculada para 12 meses, conforme definido na seção `timer`). Na seção `timer` é especificado `1 12 1`, que significa que o programa deve executar a seção `dynamic` 12 vezes, a variável que controla estas repetições começa com o valor 1 e é incrementada no passo 1. Na seção `dynamic`, a precipitação é calculada através da expressão `report Precip = timeinputscalar (RainTimeSeries, RainAreas);` onde: `Timeinputscalar` é uma função que requer dois parâmetros: a série temporal e o mapa sobre o qual deve ser calculada a precipitação.

Depois de calculada a precipitação, pode-se facilmente estender o programa anterior para calcular a precipitação total em m^3/s . Para isto, basta incluir na seção `dynamic` a seguinte expressão:

```
report VolumePrecip=maptotal(Precip)*(cellarea()/2628);
```

onde $1/2628$ é o fator de conversão da área celular (Km^2) e `Precip`(mm/month) para m^3/s .

Nesta instrução a operação `maptotal` calcula a soma dos valores das células em `Precip`. Esta soma é multiplicada pela área de uma célula do mapa (`cellArea()`) e dividida pelo fator de conversão para m^3/s .

Para calcular a precipitação efetiva, a evapo-transpiração deve ser incluída no modelo. Assumindo que as condições do solo não influenciam na taxa de evapo-transpiração, pode-se calcular a evaporação para um mês (`Evap`, mm/mês) através da expressão:

$$\text{Evap} = K * \text{EvapRef}$$

onde:

- `EvapRef` é uma referência, um padrão da superfície do solo durante o mês em questão. Existe um valor diferente para cada mês e para cada classe de uso do solo.
- `K` é um coeficiente constante no tempo para uma classe de uso do solo.

Depois, calcula-se a precipitação excedente, através da expressão:

$$\text{PrecipSurplus} = \text{Precip} - \text{Evap};$$

Se a precipitação excedente for positiva em um mês, será adicionada ao solo. Se a quantidade máxima de água no solo for atingida, a parte restante do excedente não será mais adicionada no solo. Esta quantidade é chamada água excedente no solo e será escoada para o subsolo. Quando a precipitação excedente for negativa, a quantidade de água no solo será subtraída, em valores absolutos, pela precipitação excedente naquele mês.

Depois de calculada o balanço de água no solo, pode-se estender o modelo para modelar o escoamento de água na área em estudo. Isto é feito com o mapa de direção de drenagem local (`local drain direction map – ldd`).

Uma função de transporte de material tem que ser selecionada. Neste exemplo vamos utilizar a função de fluxo acumulado, que no PCRaster é implementada com o nome de `accuflux` e tem a seguinte sintaxe:

$$\text{Resultfluxmap} = \text{accuflux}(\text{lddmap}, \text{materialmap});$$

onde: `lddmap` é a rede `ldd` (Figura 23), `materialmap` é um mapa do material a ser transportado e `Resultfluxmap` é o mapa resultante. Na Figura 8.24 é apresentada a seção `dynamic` do programa PCRaster que implementa o modelo descrito.

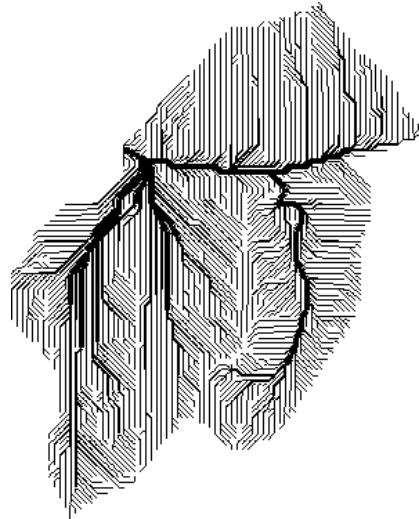


Figura 23 - LDD

```

dynamic
# precipitation
report Precip=timeinputscalar(RainTimeSeries,RainAreas);
# total volume precipitation over study area, in cubic metres per second
report VolumePrecip=maptotal(Precip)*(cellarea()/2628);
# reference evapotranspiration
EvapRef=timeinputscalar(EvapRefTimeSeries,1);
# evapotranspiration
report Evap=K*EvapRef;
# precipitation surplus
report PrecipSurplus=Precip-Evap;
# intermediate soilwater content: soilwater plus precipitation surplus
Soilwater=Soilwater+PrecipSurplus;
# soil water surplus (mm/month)
report SoilwaterSurplus=max(Soilwater-MaxSoilwater,0);
# soilwater content, no saturation
report Soilwater=min(Soilwater,MaxSoilwater);
# discharge in mm/month
DischargeMM=accuflux(Ldd,SoilwaterSurplus);
# discharge in metres3/second
report Discharge=DischargeMM*(cellarea()/2628);

```

Figura 24 – Seção dynamic de programa PCRaster para escoamento da água da chuva

8.5 MODELAGEM DINÂMICA DE PROCESSOS URBANOS

Na modelagem dinâmica de processos urbanos, os autômatos celulares são usualmente utilizados para modelar o uso do solo. Tradicionalmente, autômatos celulares são implementados segundo critérios estritamente locais, isto é, a dinâmica de aplicação das regras de transição baseiam-se principalmente na vizinhança de uma célula. Entretanto, em muitos casos de processos urbanos, a função de transição deve levar em conta diferentes fatores, incluindo: os efeitos da vizinhança, a qualidade do solo (fator ambiental), as taxas demográficas da região (fator social), a demanda por uma determinada atividade econômica e o comportamento dos agentes econômicos.

Nesta seção, para representar a modelagem dinâmica de processos urbanos serão apresentadas duas aplicações diferentes. A primeira consiste numa aplicação baseada nos princípios básicos de autômatos celulares, proposta por (Roy and Snickars 1996). A segunda aplicação, chamada Modelo Multi-Escala Integrado (Engelen 1995), apresenta uma estrutura sofisticada, capaz de integrar as variáveis sócio-econômicas e ambientais de sistemas urbanos.

8.5.1 *Citylife*

Numa tentativa de estudar a aplicabilidade de autômatos celulares na dinâmica urbana, (Roy and Snickars 1996) implementou o *Citylife*, baseado no *The Game of life*. No *Citylife* o espaço é representado como uma grade regular de células em que cada célula representa uma unidade do espaço ocupada por alguma atividade urbana típica, como por exemplo: área verde, residencial e trabalho. A partir de um estado inicial e um conjunto de regras de transição, o sistema cresce e evolui espacialmente.

Cada célula no sistema tem uma atratividade para cada tipo de atividade urbana definida pela função:

$$A_i(k) = \sum_l b(k,l) * a_i(l)$$

onde: $b(k,l)$ é um coeficiente que indica a probabilidade de uma célula do tipo k se transformar em uma célula tipo l (Tabela 1).

$a_i(l)$ “acessibilidade” da célula i para células contendo uma atividade do tipo l . Definida pela função:

$$a_i(k) = \sum_j \exp(-\mu(k) * d_{ij}(k)) * x_j(k) / N(k)$$

onde: $x_j(k) = 1$ se a célula j é utilizada para a atividade k , 0 caso contrário;

$d_{ij}(k)$ = distância da célula i para a célula j para uma atividade do tipo k

$\mu(k)$ = coeficiente de “acessibilidade” para uma atividade do tipo k

$N(k)$ = número de células contendo uma atividade do tipo k , onde \sum_j

$x_j(k) = N(k)$

Dado um estado inicial, o sistema aloca novas células para cada uma das atividades disponíveis. O número de células a ser alocado para cada atividade depende do número de células do estado inicial. Assim, por exemplo se no estado inicial são alocadas duas células para áreas verdes, duas células para área de trabalho e quatro células para áreas residenciais (Figura 25 a), então a cada geração o sistema alocará mais duas células para áreas verdes, mais duas células para áreas de trabalho e quatro células adicionais para áreas residenciais. O critério para seleção de uma célula é a sua atratividade para a atividade, será selecionada a célula com maior atratividade ($A_i(k)$).

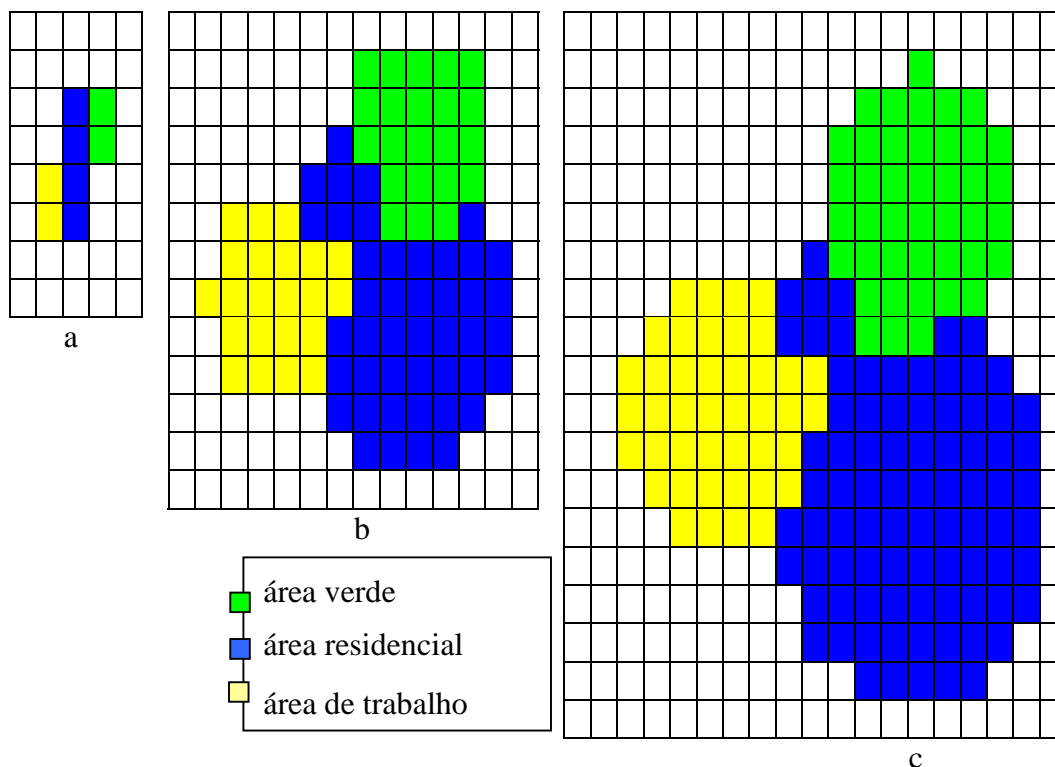


Figura 25 – Citylife a) estado inicial b) após 10 gerações c) após 20 gerações (fonte: Roy and Snickars 1996).

O mecanismo de expansão do Citylife é considerado evolucionário (estado futuro do sistema depende da trajetória seguida) e baseado na competição entre as células (Roy and Snickars 1996).

Para o exemplo apresentado na Figura 25 adotou-se os seguintes coeficientes de interação entre as atividades:

	Verde	Residencial	Trabalho
Verde	1	0	0
Residencial	0	1	0
Trabalho	0	0	1

Tabela 1 – Coeficientes de probabilidade

Uma restrição do *citylife* é considerar que uma vez que uma célula for ocupada por uma atividade ela permanecerá nesta atividade. Desta forma, este sistema adota um modelo dinâmico espacial de difusão por expansão e não de realocação.

8.5.2 *Modelo Multi-Escala Integrado*

Como já mencionado, fatores sócio-econômicos são inerentes ao planejamento urbano. Na literatura recente, verifica-se uma tendência de propostas de extensões ao modelo de autômato celular clássico, visando integrar fatores ambientais e sócio-econômicos, para representar a dinâmica espacial de fenômenos urbanos.

Entre estas propostas destaca-se a de Engelen (1995), que apresenta uma estrutura de modelagem dinâmica e de suporte a decisão capaz de operar em uma variedade de escalas. Esta estrutura é constituída de dois níveis denominados macro e micro escalas. Na macro escala estão representadas as variáveis ecológicas e sócio-econômicas que afetam o sistema como um todo. A micro escala representa a dimensão espacial do modelo. Estas escalas interagem intensivamente entre si e com um Banco de Dados Geográfico, a partir do qual obtêm os dados necessários para as simulações (Figura 26).

A macro escala possui três componentes representando os subsistemas natural, econômico e social. Estes sub-modelos estão conectados através de uma rede de influência mútua e recíproca. O subsistema natural representa condições ambientais tais como temperatura, precipitação e poluição. O subsistema social inclui dados demográficos como nascimentos, morte e migração. O subsistema econômico é fortemente determinado pelas mudanças ocorridas no subsistema natural e pelas demandas sociais. Neste sentido, ele pode gerar demandas como, por exemplo, a necessidade por mais células residenciais quando a população aumenta.

A micro escala consiste em um autômato celular sobre o qual são aplicadas regras de transição para calcular as mudanças no uso do solo.

Para ilustrar o uso deste modelo, consideraremos dados de um estudo para analisar os impactos de mudanças climáticas em uma ilha do Caribe. Estes dados estão disponíveis na homepage do RIKS (*Research Institute for Knowledge Systems* – www.riks.nl).

Neste exemplo, a macro escala inclui no subsistema natural apenas mudanças climáticas, no subsistema social inclui dados relativos a população, nascimentos e mortes e no subsistema econômico as demandas geradas a partir da interação deste subsistema com os demais (Figura 27).

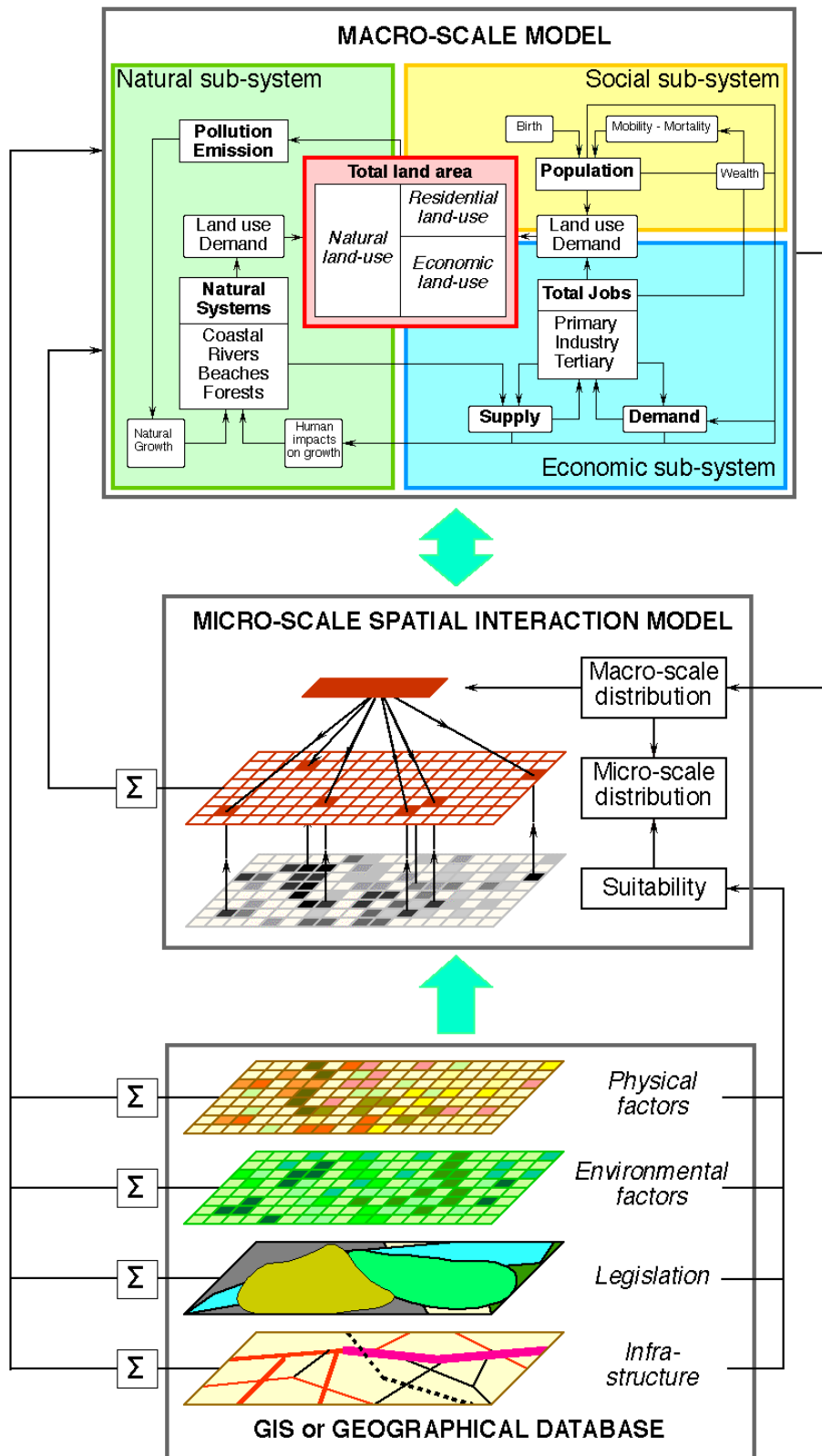


Figura 26 Integração entre o Modelo Multi-Escala e GIS fonte:(Engelen 1995) .

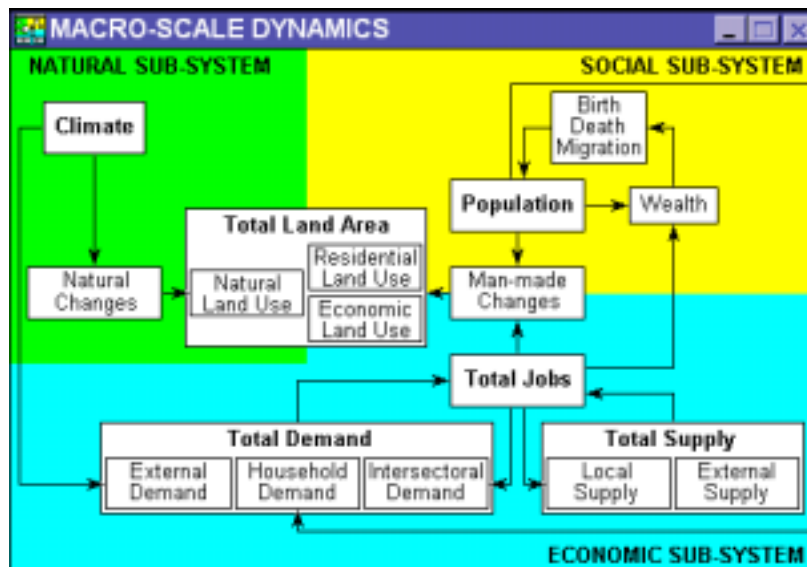


Figura 27 – A macro escala (fonte: Engelen 1995)

As condições climáticas (*climate*) do modelo são definidas a partir de variáveis ambientais tais como temperatura, precipitação e nível do mar, e das relações de influência existentes entre elas.

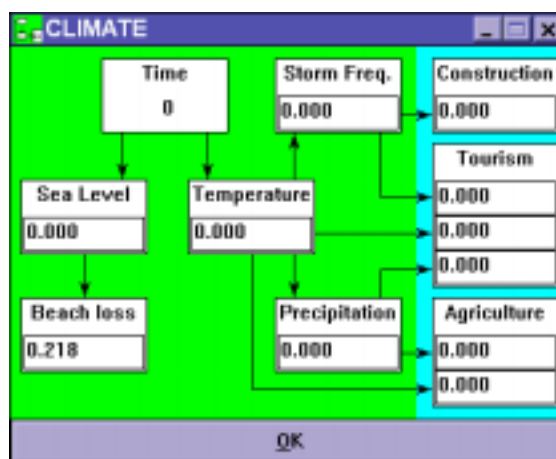


Figura 28 – O Subsistema Natural

A Figura 28 mostra que variações na temperatura e no nível do mar afetam as demais variáveis. Estas relações de influência são também expressas de forma explícita, através de gráficos e tabelas e podem ser manipulados pelo usuário de forma independente e interativa. Esta funcionalidade caracteriza este modelo como um

modelo exploratório, pois permite que o usuário avalie um fenômeno a partir de diferentes cenários (*what if questions*).

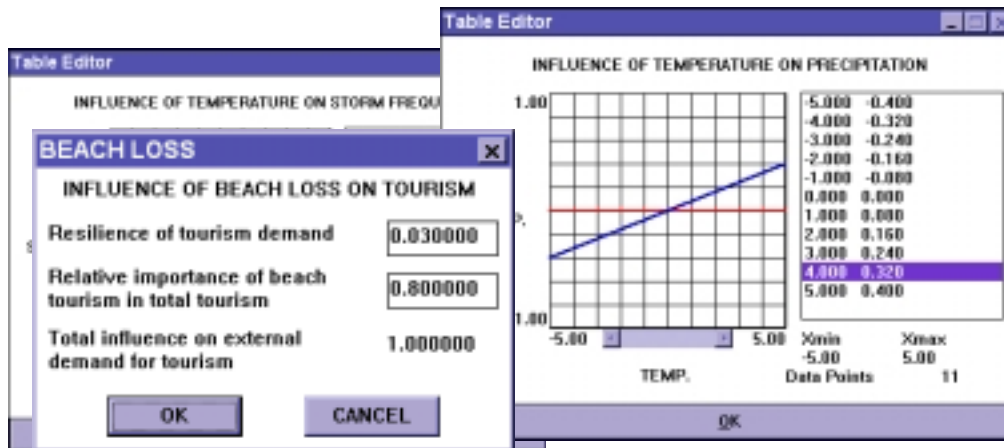


Figura 29 – Os componentes do clima

As variáveis sociais, de forma análoga às naturais, podem ser manipuladas de forma interativa e independente. Entretanto, as variáveis econômicas são geradas a partir do comportamento dos subsistemas natural e social. Para o cálculo destas variáveis são utilizados coeficientes para medir o crescimento populacional e da oferta de empregos, por exemplo, e determinar o espaço necessário (demanda do solo) para acomodar as atividades econômicas (turismo, indústrias) afetadas por estes coeficientes.

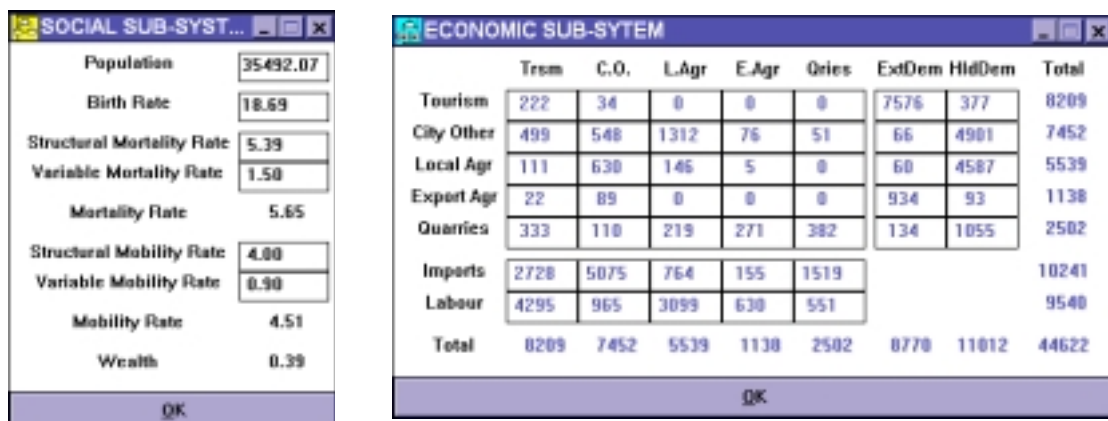


Figura 30 – Subsistemas Social e Econômico

Na micro escala, cada estado de célula representa uma categoria de uso do solo (Figura 31). Os estados são divididos em duas categorias: funções e feições. Funções são usos do solo ativos, tais como residencial, floresta, comercial. Em princípio, uma célula função pode mudar para qualquer um dos estados possíveis. Feições são usos do solo fixos, tais como rios, parques e aeroportos. Embora as feições não estejam sujeitas às mudanças geradas pelas regras de transição do autômato celular, eventualmente elas podem ser convertidas através de um processo especial ou uma intervenção exógena. Feições aparecem como argumentos das regras e podem afetar a transição de células vizinhas. Assim, por exemplo, a existência de um parque pode influenciar a transição de células vizinhas em células residenciais (White and Engelen 1997).

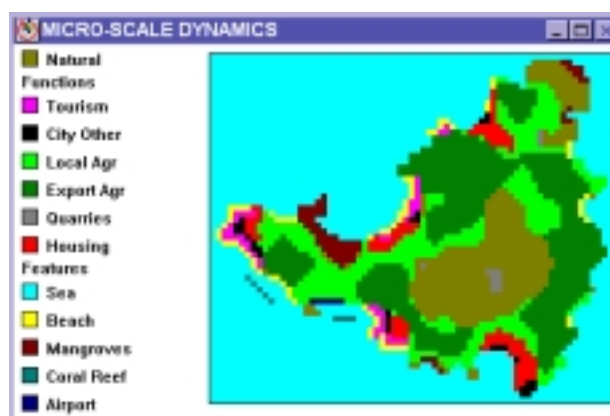


Figura 31 – A micro escala

A demanda do solo para as várias atividades é fornecida pela macro escala, de acordo com um mecanismo baseado em três classes de prioridades. As regras de prioridade um são intervenções do usuário como, por exemplo, a inclusão de um aeroporto. As regras de prioridade dois são regidas pelo subsistema natural e geram certas transições diretamente, sem interferência do autômato celular. Por exemplo, se o nível do mar sobe, células com baixa elevação são convertidas em praias ou mangues (White and Engelen 1997). As regras de prioridade três se aplicam às células ativas (funções). Para cada célula ativa é calculado um vetor de potencialidades, em que cada potencialidade representa o grau de atração de uma célula para um determinado estado (z). O potencial (P_z) de uma célula depende de três fatores:

- a adequabilidade da célula para a atividade z (S_z)
- efeito agregado das células na vizinhança (N_z)
- uma perturbação estocástica (ϵ_z)

Estes fatores se relacionam da seguinte forma:

$$P_z = S_z N_z + \epsilon_z$$

O efeito agregado da vizinhança (N_z) leva em consideração principalmente a localização das células. A vizinhança de uma célula é uma região circular com um número variável de células, organizadas em zonas de distâncias. Assim, a fórmula para calcular o efeito agregado de vizinhança consiste em:

$$N_z = \sum L_{d,i} W_{z,y,d}$$

onde:

- $W_{z,y,d}$ parâmetro de peso aplicado a células no estado y na distância d
- i índice das células na zona de distância d
- $L_{d,i}$ 1 se a célula i na distância d está no estado y ; 0, caso contrário.

A regra de transição estabelece que cada célula ativa é convertida para o estado para o qual seu potencial é maior, mas até que a demanda por células deste estado seja atendida. Depois deste ponto, nenhuma outra célula é convertida para este estado. Os potenciais para tal estado são ignorados nas conversões subsequentes.

Os resultados das simulações são apresentados de forma dinâmica na tela do computador, isto é, o usuário acompanha todas as transições. Na Figura 32, são apresentados os resultados de uma simulação para 40 anos em que se trabalhou com dois cenários. No primeiro cenário, Figura 32 a, assumiu-se que não haveria mudanças climáticas, ou seja, a temperatura e o nível do mar se manteriam ao longo do tempo. No segundo cenário, Figura 32 b, considerou-se que a temperatura aumentaria em 2C e o nível do mar em +20cm. Em ambos os casos partiu-se da configuração inicial apresentada na Figura 31 e considerou-se que a população apresentaria um crescimento de 2% ao ano e um número total de 11000 vagas de empregos, distribuídas em diferentes atividades.

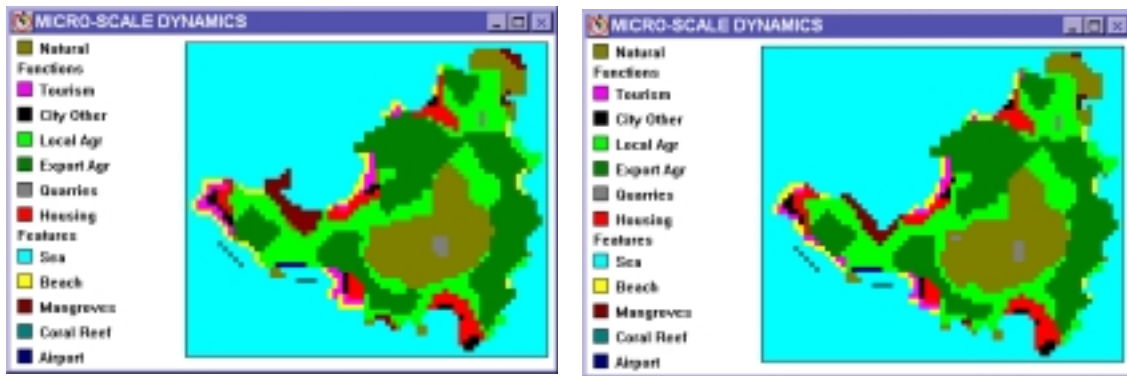


Figura 32 – Simulações a) sem mudanças climáticas b) com mudanças climáticas

Na Figura 32 b, simulada com o cenário de mudanças climáticas, pode-se observar uma redução da área das praias e mangue, como consequência do aumento do nível do mar.

8.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo teve por objetivo apresentar os principais conceitos e aspectos computacionais envolvidos em sistemas de modelagem espacial dinâmica. Na dimensão conceitual, verificou-se que cada um dos elementos chaves de um modelo dinâmico, tais como espaço, tempo e modelo matemático permitem diferentes representações computacionais. A escolha de uma forma de representação para um destes elementos afeta os demais, uma vez que as escalas de todos os elementos devem ser integradas.

No contexto computacional, foi explorado a solução baseada em autômatos celulares. No estudo desta abordagem de implementação, verificou-se que processos físicos e urbanos possuem mecanismos distintos para aplicação de regras de transição. Enquanto os processos físicos podem ser descritos por modelos determinísticos, os processos urbanos são caracterizados como processos estocásticos e são altamente influenciados por variáveis exógenas. Nos processos físicos, pode-se considerar a topologia do terreno, o que, apesar das críticas ao modo como as redes de drenagem LDD são geradas (discretização do fluxo em 45°, introdução de artefatos, (Burrough and McDonnel 1998)), produz padrões espaciais coerentes com os que acabam se desenvolvendo naturalmente no mundo real. Quanto à modelagem de processos urbanos, sistemas como os desenvolvidos pelo RIKS (www.riks.nl) apresentam grande flexibilidade para a inclusão de variáveis que aumentam a precisão das predições,

entretanto, são sistemas de estrutura complexa, de difícil entendimento e implementação.

Não existe uma solução única para modelar fenômenos espaciais dinâmicos. A solução ideal para cada caso deve ser buscada tentando responder o porque, onde e quando de cada fenômeno, através da integração das escalas temporal e espacial articulada com o modelo matemático definido para descrever o fenômeno e prever sua evolução.

Cadeias de Markov, modelos logísticos de Difusão e Regressão são eficientes em modelar processos estacionários mas são desprovidos de funcionalidades específicas para a representação espacial. Entretanto, estes modelos utilizam equações matemáticas simples e requerem poucos dados, além de serem compatíveis com o formato de dados oriundos de fontes de sensoriamento remoto e, como consequência, facilmente implementados em GIS.

Modelos de Sistemas são classificados como modelos exploratórios, porque fornecem condições para que várias simulações possam ser investigadas a partir de diferentes cenários. Entretanto, estes modelos requerem um profundo nível de conhecimento do fenômeno em estudo e acabam por se tornar sistemas altamente especializados, não podendo ser aplicados a outras classes de fenômenos.

Diferentes modelos servem a diferentes propósitos, logo eles não são excludentes, mas sim complementares. Nesta perspectiva, Lambin (1994) sugere que ao se construir um modelo deve-se fazê-lo de forma gradual, começando por Cadeias de Markov, que são os mais simples, e ir incorporando novos elementos (variáveis exógenas) e funções (determinísticas) ao projeto.

A dimensão espacial deve ser também introduzida de forma gradual, começando com as relações espaciais mais elementares como as de vizinhança, refinando continuamente, de forma a contemplar a noção de espaço relativo e suporte a representações em múltiplas escalas.

Modelos espaciais dinâmicos construídos com esta visão de projeto devem ser capazes de representar de forma realista os fenômenos dinâmicos encontrados na natureza, superando as limitações dos modelos atuais, baseados em concepções limitadas quanto às representações do espaço, do tempo e dos processos.

Referências Bibliográficas

- Batty, M. (1999). Modeling urban dynamics through GIS-based cellular automata. Computers, Environment and Urban Systems **23**: 205-233.
- Batty, M. (2000). GeoComputation Using Cellular Automata. GeoComputation. S. Openshaw and R. J. Abraham, Taylor&Francis: 95-126.
- Burrough, P. (1998). Dynamic Modelling And Geocomputation. Geocomputation: A Primer. P. Longley, M. Batty and R. McDonnel. London, John Wiley & Sons.
- Burrough, P. and R. McDonnel (1998). Principles of Geographical Information Systems. Oxford, OUP.
- Câmara, A. S. (1996). Spatial Simulation Modelling. Spatial Analytical Perspectives on GIS. M. Fisher. London, Taylor & Francis: 213-218.
- Couclelis, H. (1997). "From Cellular Automata to Urban Models: New Principles for Model Development and Implementation." Environment and Planning B: Planning and Design **24**: 165-174.
- Couclelis, H. (1999). Space, Time, Geography. Geographical Information Systems. P. Longley, M. Goodchild, D. Maguire and D. Rhind. New York, John Wiley: 29-38.
- Edelweiss, N. and J. P. M. Oliveira (1994). Modelagem de Aspectos Temporais de Sistemas de Informação. Recife, UFPE-DI.
- Engelen, G. (1995). "Using Cellular Automata for Integrated Modelling of Socio-environmental Systems." Environmental Monitoring and Assessment **34**: 203-214.
- Lambin, E. F. (1994). Modeling Deforestation Processes - A Review, Trees series B: Research Report . European Commission, Luxembourg.
- Reis, E. J. and S. Margulis (1991). Options for Slowing Amazon Jungle Clearing. Global warming: economic policy responses. R. Dornbusch and J. M. Poterba. Cambridge, The MIT Press: 335-375.
- Roy, G. G. and F. Snickars (1996). Citylife: A study of cellular automata in urban dynamics. Spatial Analytical Perspectives on GIS. M. Fisher. London, Taylor & Francis: 213-218.
- Santos, M. (1996). A Natureza do Espaço: Técnica e Tempo, Razão e Emoção. São Paulo, HUCITEC.
- Soares Filho, B. S. (1998). Modelagem dinâmica de paisagem de uma região de fronteira de colonização amazônica. Escola Politécnica. São Paulo, Universidade de São Paulo.
- Voigtmann, A. B., L.; Hinrichs K.H. (1996). Temporal Extensions for an Object-Oriented Geo-Data Model. Spatial Data Handling - 1996 (SDH'96).

White, R. and G. Engelen (1997). "Cellular Automata as the Basis of Integrated Dynamic Regional Modelling." Environment and Planning B: Planning and Design **24**: 165-174.

Worboys, M. F. (1995). GIS - A Computing Perspective. Bristol, PA, Taylor & Francis Inc.