REPRESENTAÇÕES COMPUTACIONAIS DO ESPAÇO: FUNDAMENTOS EPISTEMOLÓGICOS DA CIÊNCIA DA GEOINFORMAÇÃO

Gilberto CÂMARA[1]
Antônio Miguel Vieira MONTEIRO[2]
José Simeão de MEDEIROS[3]

Resumo

Este trabalho propõe uma fundamentação teórica para a disciplina de Ciência da Geoinformação. A partir da apresentação de conceitos de *espaço* desenvolvidos ao longo do século XX pela Geografia, os autores analisam em que medida estes conceitos podem ser capturados em representações computacionais e quais as limitações da atual geração de SIG. Na concepção apresentada, as diferentes teorias do *espaço geográfico* podem representar um ponto de partida para o estabelecimento dos fundamentos epistemológicos da Ciência da Geoinformação e para a concepção de uma nova geração de SIG.

Abstract

This work proposes a theoretical foundation for Geographical Information Science. Taking the concepts of geographical space developed by Geography in the 20th Century as a basis, the authors analyze how these concepts can be captured in computational representations and thus indicate the limitations of the current generation of geographical information technology. We believe that the different concepts of *geographical space* can be a fundamental starting point to establish the epistemological foundations of

---

[1] Pesquisador Senior, Coordenador Geral de Observação da Terra, INPE (gilberto@dpi.inpe.br)

[2] Engenheiro Senior, Chefe da Divisão de Processamento de Imagens, INPE (miguel@dpi.inpe.br).

[3] Pesquisador Senior, Divisão de Sensoriamento Remoto, INPE (simeao@ltid.inpe.br)

Geographical Information Science and to the conception of a new generation of GIS technology.

1 Da Necessidade de Conceitos

A tecnologia de sistemas de informação geográfica (SIG) evoluiu de maneira muito rápida a partir da década de 70. Como este desenvolvimento foi motivado desde o início por forte interesse comercial, não foi acompanhado por um correspondente avanço nas bases conceituais da geoinformação; como resultado, o aprendizado do Geoprocessamento tornou-se singularmente dificultado. Ao contrário de outras disciplinas, não há um corpo básico de conceitos teóricos que sirva de suporte para o aprendizado da tecnologia, mas uma diversidade de noções empíricas, por vezes contraditórias. Muitos livros-texto e cursos são organizados e apresentados em função de um sistema específico, sem fornecer ao aluno uma visão sólida de fundamentos de aplicação geral.

As raízes deste problema estão na própria natureza interdisciplinar (alguns diriam *transdisciplinar*) da Ciência da Geoinformação. Ponto de convergência de áreas como Informática, Geografia, Planejamento Urbano, Engenharia, Estatística e Ciências do Ambiente, a Ciência da Geoinformação ainda não se consolidou como disciplina científica independente; para que isto aconteça, será preciso estabelecer um conjunto de conceitos teóricos, cuja aplicação seja genérica e independente de aspectos de implementação.

Para estabelecer as bases epistemológicas da Ciência da Geoinformação, será preciso – em primeiro lugar – identificar as fontes de contribuição teórica nas quais poderemos buscar bases para a reflexão. Este trabalho propõe tomar o conceito de *espaço geográfico* como uma noção-chave, a partir do qual podemos construir os fundamentos teóricos desta nova disciplina científica. Buscaremos entender o alcance e a abrangência de diferentes concepções de espaço, e compará-las com suas possíveis representações computacionais. Ao revisar estas concepções, na perspectiva da construção de sistemas de informação, estaremos contribuindo não apenas para a fundamentação teórica

da Ciência da Geoinformação, como ainda buscando inspiração para o projeto das novas gerações de SIG.

Consideramos que, apesar de seu caráter interdisciplinar, o fundamento básico da Ciência da Geoinformação é a *construção de representações computacionais do espaço*. Além de serem instrumentos técnicos onipresentes, que vem afetando tanto as relações de produção quanto as relações sociais, computadores são *ferramentas de representação* da realidade. Com tal, as estruturas de dados e algoritmos disponíveis num determinado estágio de evolução da tecnologia de SIG *condicionam* as formas de expressão computacional dos problemas geográficos. O efeito resultante pode ser chamado de "reificação geográfica": muitos usuários de SIG acabam tomando as estruturas computacionais pela realidade, sem sequer ter consciência de suas limitações.

Ao fazer uma revisão das diferentes concepções de *espaço geográfico*, não pretendemos estabelecer juízo de valor, mas estabelecer como a tecnologia de SIG permite a expressão computacional destes conceitos e o que estas diferentes escolas nos podem ensinar sobre as limitações atuais do Geoprocessamento. Para tanto, selecionamos alguns autores representativos de diferentes correntes da geografia. No caso da Geografia Regional, partimos dos conceitos de HARTSHORNE (1936). Para a Geografia Quantitativa (no Brasil também chamada de Teorética), tomamos como base HARVEY (1969) e CHORLEY (1967). Nossa discussão da Geografia Crítica está baseada nos trabalhos de SANTOS (1978), SANTOS (1985), SANTOS (1996), CASTELLS (1999) e HARVEY (1989). Para esta revisão, utilizamos ainda os trabalhos de CHRISTOFOLETTI (1985), MORAES (1995) e CORRÊA (1995). Para as denominações das diferentes escolas de Geografia, adotamos a terminologia de MORAES (1995).

2 A Geografia Idiográfica de Hartshorne e o Geoprocessamento

Em seu livro "Os Princípios e a Natureza da Geografia", Hartshorne procurou consolidar uma base teórica para os estudos geográficos baseada no conceito da "unicidade". Na sua visão, o objeto de estudo da Geografia seria "o

estudo de fenômenos individuais" e a "a preocupação com o único que na geografia não está limitada ao fenômeno mas também se aplica a relacionamentos entre os fenômenos" (HARTSHORNE, 1936).

O conceito de "unidade-área" é apresentado por HARTSHORNE (1936) como elemento básico de uma sistemática de estudos geográficos, denominada pelo autor de "estudos de variação de áreas". Na visão de Hartshorne, uma *unit-area* é uma partição do espaço geográfico, definida pelo pesquisador em função do objeto de estudo e da escala de trabalho, que apresenta características individuais próprias; estas "unidades-área" seriam a base de um sistema de classificação e organização do espaço. A partir da decomposição do espaço em "unidades-área", o pesquisador poderá relacionar, para cada uma destas partições, às correspondentes características que as individualizam em relação a todas as demais componentes do espaço. Hartshorne chamou esta abordagem de "Geografia Idiográfica".

Hartshorne argumenta que o caráter de cada área seria dado pela integração das diferentes variáveis geográficas, tomadas em conjunto. MORAES (1995) assim exemplifica o método proposto por Hartshorne:

> *"O pesquisador seleciona dois ou mais fenômenos (p.ex. clima, produção agrícola, tecnologia disponível), observa-os, relaciona-os; repete várias vezes este procedimento, tentando abarcar o maior número de fenômenos (tipo de solo, destino da produção, número de cidades, tamanho do mercado consumidor, hidrografia, etc.). Uma vez de posse de vários fenômenos agrupados e inter-relacionados, integra-os. (...) Este processo pode ser repetido várias vezes, até o pesquisador compreender o caráter da área enfocada (...)*
>
> *O pesquisador pode parar na primeira integração, e reproduzir a análise (tomando os mesmos fenômenos e fazendo as mesmas inter-relações) em outros lugares. As comparações das integrações obtidas permitiriam chegar a um* ***padrão de variação*** *daqueles fenômenos tratados."*

A proposta de Hartshorne contribuiu para dar uma base metodológica para o uso do conceito de "unidade de área" em Geoprocessamento. A representação computacional correspondente aos conceitos de "unidade-área" em Hartshorne é o *polígono fechado*, associado a um *conjunto de atributos* armazenados num banco de dados relacional, que delimita e descreve cada região de estudo,. Um procedimento típico para aplicar a abordagem de Hartshorne em um ambiente de SIG seria:

- Tomando-se como base uma representação pictórica do espaço (como uma foto aérea ou imagem de satélite) e levantamentos preliminares de campo, realiza-se a delimitação das unidades-área na região de estudo, segundo aspectos físico-biótico, sócio-econômicos, antropológicos, etc.
- Como alternativa, utilizam-se dados de cartografia temática e análises booleanas do tipo "SE...ENTÃO" para produzir um mapa de interseções dos diversos conjuntos de interesse. Estas interseções delimitam as unidades-área.
- Através de levantamentos de campo ou da integração de dados já disponíveis, como mapas temáticos diversos, caracteriza-se cada unidade-área com os atributos que a singularizam das demais unidades. O resultado é um banco de dados geográficos com unidades-área delimitadas por polígonos, com um conjunto de atributos descritivos para cada unidade.
- Através de ferramentas de consulta (por atributos e espacial) do SIG, pode-se inferir as relações conjuntas entre as diversas unidades-área.

Do ponto de vista da representação computacional, o conceito de "unidade-área" de Hartshorne é análogo aos conceitos de *unidade de paisagem* (NAVEH and LIEBERMAN, 1993) e *land-unit* (ZONNEVELD, 1989), todos baseados no conceito-chave de delimitação de unidades homogêneas. Numa visão geral, pode-se dizer que a atual geração de SIG permite a realização dos conceitos de Hartshorne (e equivalentes), com poucas limitações.

3 A Geografia Quantitativa e o Geoprocessamento

A base da Geografia Quantitativa (também chamada nos países de língua inglesa de *New Geography*) é a busca da aplicação do método hipótetico-dedutivo que caracteriza as ciências naturais nos estudos geográficos. Típico desta perspectiva é o livro *Explanation in Geography* (HARVEY, 1969), que propunha uma aplicação dos paradigmas de generalização e refutação, amplamente utilizados por disciplinas como Física, Química e Biologia, para os estudos geográficos. A lógica subjacente ao método hipotético-dedutivo é a de que existe uma realidade externa à nossa existência, e esta realidade pode ser capturada (ainda que de forma aproximada) utilizando os princípios da lógica e da matemática. Através de estudo e análise, os fenômenos podem ser explicados através de teorias científicas, que devem ser passíveis de experimentação e portanto, de refutação (POPPER, 1975).

Ao criticar a falta de teorias explícitas na Geografia Idiográfica, os geógrafos desta escola passaram a utilizar teorias disponíveis em outras disciplinas científicas (CHRISTOFOLETTI, 1985). Na perspectiva da Geografia Quantitativa, é preciso construir modelos a ser utilizados na análise dos sistemas geográficos; estes modelos, construídos de forma teórica, devem ser verificados e validados com dados de campo a partir de técnicas estatísticas (CHORLEY and HAGGETT, 1967). Neste contexto, o estudo dos padrões de distribuição espacial dos fenômenos (eventos pontuais, áreas e redes) passa a formar a base para estudos quantitativos do espaço. A Geografia Quantitativa coloca grande ênfase em técnicas de Análise Espacial e Geoestatística (BAILEY and GATTREL, 1995) e assim, conceitos advindos da Estatística Espacial passam a fazer parte do repertório dos geógrafos. Em particular, sobressai a idéia de *autocorrelação espacial* (GOODCHILD, 1988), como expressão básica da dependência entre observações no espaço em regiões vizinhas. Outro forte conceito oriundo da teoria estatística é a noção de *processo estacionário*, que indica uma área de trabalho na qual as relações entre as medidas são função da distância. Estes conceitos permitem a construção de superfícies, a partir de amostras de campos, com o uso de procedimentos geoestatísticos como a

krigagem, ao qual podemos associar medidas de *incerteza*. Inicialmente propostas para a modelagem de recursos naturais (GOOVAERTS, 1997), as técnicas de estatística espacial vem sendo cada vez mais utilizadas para análise espacial de dados sócio-econômicos (ANSELIN, 1988) (GETIS and ORD, 1996).

Vale notar que a caracterização de vizinhanças e processos estacionários é feita no *espaço absoluto* (ou cartesiano), definido a partir das relações espaciais típicas como as relações topológicas, direcionais e de distância. Alternativamente, HARVEY (1969) advoga o uso do *espaço relativo (ou espaço das redes),* definido a partir das relações de *conectividade* entre os objetos, relações estas que implicam custos – dinheiro, tempo, energia – para se vencer a fricção imposta pela conexão (CORRÊA, 1995). Entre os fenômenos geográficos representados no espaço relativo, incluem-se relações como fluxo de pessoas ou materiais, conexões funcionais de influência, comunicação e acessibilidade os objetos estabelecem relações entre si que dependem da conectividade.

A Geografia Quantitativa também tem buscado suporte computacional na Inteligência Artificial, em áreas como Redes Neurais, Autômatos Celulares e Lógica Nebulosa ("fuzzy logic") (BURROUGH and FRANK, 1996; OPENSHAW and OPENSHAW, 1997). No caso da lógica nebulosa (para citar um exemplo), a motivação básica parte das limitações das representações exatas (tipicamente realizadas por meio de polígonos). No dizer de Burrough:

> *"Os limites desenhados em mapas temáticos (como solo, vegetação, ou geologia) raramente são precisos e desenhá-los como linhas finas muitas vezes não representa adequadamente seu caráter. Assim, talvez não nos devamos preocupar tanto com localizações exatas e representações gráficas elegantes. Se pudermos aceitar que limites precisos entre padrões de vegetação e solo raramente ocorrem, nós estaríamos livres dos problemas de erros topológicos associados como superposição e interseção de mapas"(BURROUGH, 1986).*

Com a escola Quantitativa, os estudos geográficos passam a incorporar, de forma intrínseca, o computador como ferramenta de análise. Neste sentido, o aparecimento, em meados da década de 70, dos primeiros sistemas de informação geográfica (SIG), deu grande impulso a esta escola. Ainda hoje, em países como os Estados Unidos, em que a Geografia Quantitativa é a visão dominante, os SIG são apresentados como as ferramentas fundamentais para os estudos geográficos, como indica o recente estudo da "National Academy of Sciences" (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 1997).

De uma forma bastante geral, pode-se dizer a forma privilegiada de representação computacional associada à Geografia Quantitativa são as *superfícies*, que no computador correspondem a grades regulares e malhas triangulares e as *redes*, representadas por *matrizes de interação espacial*. As *superfícies* podem ser computadas a partir de dados de campo e também "dissolvendo-se" os limites poligonais que correspondem às unidades-área.

As *redes* são representadas através de matrizes de interação espacial, nas quais cada localidade onde se originam e destinam fluxos é representada por um ponto no espaço e os fluxos entre estas entidades são indicados como entradas numa matriz origem-destino. A partir desta matriz, pode-se computar modelos de alocação de recursos, usualmente apenas baseados em fluxos de recursos ou fluxos de transporte. Dentre estes modelos, destacam-se os *modelos gravitacionais*, assim chamados porque baseados na idéia de "atração" entre localidades a partir de "massas" atribuídas aos atributos destas localidades e da distância entre elas.

Apesar da forte relação entre os conceitos da Geografia Quantitativa e o Geoprocessamento, apenas a partir de meados da década de 90 os SIG passam a dispor de representações computacionais adequadas à plena expressão dos conceitos desta escola. As técnicas de geoestatística ainda estão em processo de integração aos principais sistemas de informação geográfica, e os processos de modelagem e propagação de incerteza (HEUVELINK, 1998) ainda precisam ser plenamente incorporados aos SIG.

Adicionalmente, a tecnologia atual de Geoprocessamento ainda enfatiza a representação de fenômenos espaciais no computador de forma estática. 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 utilizadas em SIG não os capturam de forma adequada. Deste modo, um dos grandes desafios da Ciência da Geoinformação é o desenvolvimento de técnicas e abstrações que sejam capazes de representar adequadamente fenômenos dinâmicos.

Para representar os conceitos de modelos espaço-temporais, apenas a representação de superfícies em grades regulares não é suficiente. As leis que governam a dinâmica dos processos (sejam estes físicos ou sociais), precisam ser expressas através de equações iterativas, que incorporadas ao ambiente de SIG, permitem a simulação de fenômenos espaço-temporais (BURROUGH, 1998). Nos anos recentes, o desenvolvimento de técnicas de modelagem dinâmica tem tomado duas grandes direções:

- modelos de processos físicos, tipicamente associados a problemas hidrológicos ou ecológicos, como os disponíveis no ambiente *PCRaster* (WESSELING, KARSSENBERG et al., 1996).
- modelos de sistemas sócio-econômicos, que variam desde modelos de micro-escala baseados em autômatos celulares (COUCLELIS, 1997) a modelos multi-escala que incorporam efeitos de variáveis exógenas (WHITE and ENGELEN, 1997).

Deste modo, o desafio de incorporação da Geografia Quantitativa ao SIG ainda não está plenamente realizado. Especialmente no caso de modelos para processos espaço-temporais, os SIG ainda se comportam mais como "sistemas cartográficos de informação" do que como "sistemas de informação geográfica", devido à natureza estática de suas representações computacionais. Esperamos que os próximos anos tragam avanços substanciais nestas técnicas, especialmente no caso de modelagem dinâmica.

4 A Geografia Crítica e o Geoprocessamento

4.1 Introdução

A ênfase da Geografia Quantitativa no uso de grandezas mensuráveis para caracterização do espaço geográfico vem sendo objeto de fortes críticas nas últimas duas décadas. Estas críticas argumentam que, apesar dos resultados obtidos no estudo dos padrões espaciais, as técnicas da Geografia Quantitativa não conseguem explicar os processos sócio-econômicos subjacentes a estas distribuições, nem capturar o componente das ações e intenções dos agentes sociais (HARVEY, 1988). A visão desta nova escola, aqui chamada de *Geografia Crítica* adotando a terminologia de Moraes (1995), é ainda motivada pelo contexto de uma diferenciação ideológica. Para os críticos mais extremados, a Geografia Quantitativa estaria comprometida com uma grande visão ideológica associada à expansão do capitalismo, e os muitos teóricos da Geografia Crítica tomam por base a filosofia marxista na construção de seus conceitos.

Vale ressaltar que não pretendemos realizar, no contexto deste artigo, que busca examinar os conceitos básicos da Ciência da Geoinformação, uma análise comparativa entre a Geografia Crítica e a Geografia Quantitativa. Importa considerar aqui a relevância conceitos teóricos de espaço apresentados pelos proponentes da Geografia Crítica para o projeto de uma nova geração de SIG. Neste contexto, estaremos analisando, conceitos propostos por David Harvey, Manuel Castells e Milton Santos. Em especial, Milton Santos é um dos geógrafos mais empenhados em apresentar novos conceitos de espaço geográfico. Em seus trabalhos, Santos dá especial ênfase ao papel da tecnologia como vetor de mudanças da sociedade e condicionante da ocupação do espaço, no que denomina o "meio técnico-científico-informacional". Apesar de enfatizar a contribuição da tecnologia para a Geografia, Santos não examina em detalhe o problema do uso direto de ferramentas tecnológicas como SIG em estudos geográficos. Mesmo assim, seus conceitos são extremamente relevantes para a definição de uma epistemologia da Ciência da Geoinformação, como se verá a seguir.

No caso de Milton Santos, é preciso considerar que o próprio autor apresenta diferentes concepções do espaço geográfico, ao longo de sua carreira. Deste modo, examinaremos nas próximas seções três concepções distintas (mas complementares) de espaço em Milton Santos. Na seção 4.2, a noção que *"o espaço é organizado pelas relações de forma, função, estrutura e processo*" (SANTOS, 1985), na seção 4.3, a idéia que *"o espaço é um sistema de fixos e fluxos"* (SANTOS, 1978) e na seção 4.4, o mais recente conceito: *"o espaço é um sistema de objetos e um sistema de ações"* (SANTOS, 1996).

4.2 Milton Santos e as Dualidades Forma-Função e Estrutura-Processo

Em seu livro "Espaço e Método", SANTOS (1985) utiliza os conceitos de *forma*, *função*, *estrutura* e *processo* para descrever as relações que explicam a organização do espaço. A *forma* é o aspecto visível do objeto, referindo-se, ainda, ao seu arranjo, que passa a constituir um padrão espacial; a *função* constitui uma tarefa, atividade ou papel a ser desempenhado pelo objeto; a *estrutura* refere-se à maneira pela qual os objetos estão inter-relacionados entre si, não possui uma exterioridade imediata - ela é invisível, subjacente à forma, uma espécie de matriz na qual a forma é gerada; o *processo* é uma estrutura em seu movimento de transformação, ou seja, é uma ação que se realiza continuamente visando um resultado qualquer, implicando tempo e mudança. Para citar o autor:

> *"Forma, função, estrutura e processo são quatro termos disjuntivos associados, a empregar segundo um contexto do mundo de todo dia. Tomados individualmente apresentam apenas realidades, limitadas do mundo. Considerados em conjunto, porém, e relacionados entre si, eles constroem uma base teórica e metodológica a partir da qual podemos discutir os fenômenos espaciais em totalidade".* (SANTOS, 1985).

A relevância deste conceito de espaço para a Ciência da Geoinformação é mais conceitual do que prática, pois aponta essencialmente para limitações dos sistemas computacionais de representação de informação. Nesta perspectiva,

pode-se afirmar que as técnicas atuais de Geoprocessamento não conseguem resolver de forma plena as dualidades *forma-função* e *estrutura-processo,* pois o uso de representações computacionais geométricas (como polígonos ou grades regulares) e de modelos funcionais (cadeias de Markov, modelos de difusão espacial) sempre implica numa materialização das noções de espaço. Na atual geração de SIG, podemos caracterizar adequadamente a *forma* de organização do espaço, mas não a *função* de cada um de seus componentes; podemos ainda estabelecer qual a *estrutura* do espaço, ao modelar a distribuição geográfica das variáveis em estudo, mas não capturarmos, em toda a sua plenitude, a natureza dinâmica dos *processos* de constante transformação da natureza, em conseqüência das ações do homem.

Mesmo quando utilizamos ferramentas de modelagem dinâmica (COUCLELIS, 1997; BURROUGH, 1998), e realizamos aproximações dos processos físicos e urbanos de uso e transformação do espaço, a ênfase das representações computacionais é sempre nos aspectos *estruturais* do espaço (como no uso de autômatos celulares para modelar transições do uso do solo urbano). Deste modo, as dualidades *forma-função* e *estrutura-processo* apontam para deficiências estruturais de todos os sistemas de informação, no atual estágio do conhecimento. Para remover estes limites, será preciso avançar muito na direção de técnicas de Representação do Conhecimento e Inteligência Artificial (SOWA, 2000), o que leva a considerações mais genéricas (e fora do escopo deste artigo) sobre as próprias limitações do computador enquanto tecnologia de processamento da informação. O leitor interessado deve referir-se a PENROSE (1989) e SEARLE (1984).

4.3 Harvey, Castells, Santos: A Compressão do Espaço-Tempo e a Geografia da Redes

Em *"A Condição Pósmoderna"* (HARVEY, 1989), David Harvey faz uma análise abrangente das novas relações de produção da sociedade atual. Para Harvey, a mudança cultural mais importante nos anos recentes é aquela provocada pelo impacto na experiência humana com os novos conceitos de

espaço e tempo. Ele lembra que do século XVI ao XIX a velocidade média das diligências e dos navios a vela era de 20 km/h. A partir de meados do século XIX, as locomotivas a vapor chegavam a 100 km/h. Com os aviões a jato a partir de meados do século XX, alcançamos 800 Km/h. Atualmente, com as telecomunicações, podemos trocar documentos e realizar reuniões com pessoas em outros lugares do mundo de forma simultânea. Segundo Harvey, a compressão do espaço-tempo é uma componente essencial das novas formas de produção capitalista, em que o capital financeiro adquire autonomia com relação ao capital industrial e à própria governabilidade das nações. Neste cenário, o fluxo internacional de recursos (feito quase exclusivamente com suporte de telecomunicações) restringe o poder regulador dos Estados de uma forma inédita na História.

Quais as conseqüências deste conceito para a Ciência da Geoinformação? Observemos que a maior parte das técnicas de Análise Espacial (BAILEY and GATTREL, 1995) está baseada no conceito de *proximidade*. Medidas como o variograma e os indicadores locais e globais de autocorrelação espacial fazem uso implícito da "lei de Tobler": *"no mundo, todas as coisas se parecem; mas coisas mais próximas são mais parecidas que aquelas mais distantes"* (TOBLER, 1979). A compressão do espaço-tempo subverte esta lógica previsível de organização do espaço e estabelece um substancial desafio conceitual para sua representação computacional. Do ponto de vista da Análise Geográfica, os conceitos de Harvey implicam que a forma tradicional de expressar as relações espaciais entre entidades geográficas (propriedades como *adjacência* e *distância euclidiana*) capturam apenas efeitos locais, e não permitem representar a dinâmica dos fenômenos sociais e econômicos de nosso tempo.

Numa visão mais abstrata do que prática, alguns autores tem se referido a "espaços de geometria variável" (CASTELLS, 1999) para denotar a situação em que as articulações materiais entre os agentes econômicos e sociais ocorrem de forma muitas vezes independentes da contigüidade física. Esta situação nos leva a novos conceitos do espaço, em que os *fluxos* passam a ser um componente essencial. "Fluxos de capital, fluxos da informação, fluxos de tecnologia, fluxos de interação organizacional, fluxos de imagens, sons e símbolos" (CASTELLS,

1999) tornam-se elementos constituidores de nossa sociedade, questionando a aplicabilidade geral da lei de Tobler.

O resultado da compressão do espaço-tempo gerada pelos avanços da tecnologia e pela crescente integração das práticas econômicas tem levado a novas definições do espaço. Milton Santos fala em "espaço de fixos e espaço de fluxos" (SANTOS, 1978) e Manuel Castells em "espaço de fluxos e espaço de lugares". Subjacente a estas noções está o processo de "crescente internacionalização da produção capitalista, que resulta em padrões de localização que alteram profundamente as características do espaço industrial e seu impacto no desenvolvimento urbano" (CASTELLS, 1999).

O "espaço de lugares" representa os arranjos espaciais formados por localizações contíguas, numa interação definida pela própria condição de moradia das pessoas e sua lógica cotidiana. No entanto, o "espaço dos fluxos" é, crescentemente, o determinante das relações de poder e dos movimentos de circulação de bens e serviços. Isto gera uma "esquizofrenia estrutural entre duas lógicas espaciais", que "ameaça romper os canais de comunicação da sociedade" (CASTELLS, 1999).

Os desafios para a Ciência da Geoinformação são aqui consideráveis. Em especial, trata-se de combinar os modelos de interação espacial (que determinam os fluxos), com modelos de escala local (representados, por exemplo, por autômatos celulares). Esta combinação requer a capacidade de propor modelos matemáticos abstratos e de estabelecer relações causais entre fluxos e efeitos locais, problemas ainda não abordados na literatura.

4.4 Milton Santos e o Espaço como Sistemas de Objetos e Sistemas de Ações

Sem abandonar as definições anteriores, mas buscando uma visão mais geral sobre os conceitos de espaço, SANTOS (1996) afirma que "o espaço geográfico é um sistema de objetos e um sistema de ações". Esta caracterização objetiva contrapor os elementos de *composição* do espaço (os *objetos*

geográficos) aos condicionantes de *modificação* deste espaço (as *ações* humanas e dos processos físicos ao longo do tempo). Numa formulação sintética, Santos enfatiza a necessidade de libertar-nos de visões estáticas do espaço (tais como nos vem condicionando séculos de mapas), ao incluir a componente de *processos variantes no tempo* como parte essencial do espaço. Ele procura diferenciar o conceito de *espaço* do de *paisagem*, afirmando que *"a paisagem é o conjunto de formas que, num dado momento, exprimem as heranças que representam as sucessivas relações localizadas entre homens e natureza. O espaço são essas formas mais a vida que as anima".*

Do ponto de vista da geoinformação, a noção de "sistemas de objetos e sistemas de ações" coloca-se num nível de abstração ainda maior que as formulações anteriores de Santos. Daí surgem algumas questões cruciais: é possível realizar a transição destes conceitos abstratos para o âmbito de um sistema computacional? Quais as limitações da tradução das noções abstratas propostas para um SIG ?

Numa primeira análise, a tradução do conceito de "sistema de objetos e sistemas de ações" para o ambiente computacional esbarra em três questões: como modelar os "sistemas de objetos?" como representar os "sistemas de ações?" como expressar as interações entre os objetos e as ações ?

Para representar *os sistemas de objetos*, será preciso descrever cada um dos diferentes tipos de objetos componentes do espaço (ou da parcela do espaço em análise). Neste sentido, um dos avanços recentes na área de Geoprocessamento é o uso de Ontologias. Uma *ontologia* é uma teoria que especifica um vocabulário relativo a um certo domínio, que define entidades, classes, propriedades, predicados e funções e as relações entre estes componentes (FONSECA and EGENHOFER, 1999) (FONSECA, EGENHOFER et al., 2000). Na visão de SMITH e MARK (1998), uma ontologia do mundo geográfico pode ajudar a entender como diferentes comunidades compartilham informações e estabelecer correspondências e relações entre os diferentes domínios de entidades espaciais.

Numa perspectiva genérica, pode-se dizer que o uso de Ontologias em SIG é uma maneira de integrar técnicas de Representação do Conhecimento em

uma tecnologia com uma forte tradição geométrica e cartográfica. Deve-se lembrar que, apesar da sua atratividade enquanto conceito, o uso de Ontologias em SIG enfrenta essencialmente os mesmos problemas das técnicas de Representação do Conhecimento (SOWA, 2000). Estes problemas incluem a concepção de formalismos para armazenamento de informação e a tradução do conhecimento existente informalmente no domínio de aplicação para representações computacionais. Vale lembrar ainda que a maior parte dos paradigmas atuais de Representação do Conhecimento são essencialmente estáticos, sem modelar adequadamente a dimensão temporal e os relacionamentos dinâmicos e dependentes de contexto entre os objetos.

A representação dos "sistemas de ações" é ainda mais difícil num ambiente computacional. Sendo o computador uma ferramenta matemática e não analógica, a representação de processos depende fundamentalmente de modelagem numérica, usualmente realizada através de equações funcionais. Cabe aqui distinguir dois grandes grupos de processos espaciais: os modelos do meio físico e os de processos sócio-econômicos (que incluem os fenômenos urbanos). Estes grupos possuem variáveis e comportamentos diferenciados que exigem diferentes abordagens de implementação.

Fenômenos físicos tais como modelos hidrológicos e ecológicos são exemplos de fenômenos com alto índice de variação do estado da superfície ao longo do tempo. Sua representação acurada depende da capacidade de derivar equacionamentos matemático-formais que descrevam a variação espaço-temporal do fenômeno. No caso de fenômenos sócio-econômicos, os processos tem uma complexidade muito maior, por envolver, além de fenômenos físicos, componentes de construção da realidade social. Neste sentido, vale a pena destacar o exposto em SEARLE (1995): a realidade social envolve um componente físico (externo à nossa percepção) e um componente mental, que resulta de consenso estabelecido em procedimentos jurídicos e culturais de cada sociedade.

Deste modo, a aplicação do conceito de *sistemas de ações* à modelagem computacional de fenômenos socio-econômicos não pode ser reduzida à premissa funcionalista de que é possível derivar modelos matemáticos que

descrevam o comportamento dos agentes sociais. Apesar disto, os autores consideram ser útil e válido a proposição de modelos que, com crescente sofisticação e inevitável reducionismo, possam simular parte do comportamento dos diferentes processos socio-economicos-ambientais.

Como exemplo, o trabalho de ENGELEN *et al.* (1995) 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 macroescala, estão representadas as variáveis ecológicas e sócio-econômicas que afetam o sistema como um todo. A microescala 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. Ainda com respeito ao problema de modelagem computacional dos *sistemas de ações*, CÂMARA *et al.* (2000) apresentam uma proposta para modelar o processo de produção de informação em bases de dados georeferenciados, levando em conta o objetivo final a ser alcançado com os procedimentos de Análise Geográfica. Esta proposta visa capturar uma das dimensões do conceito de "sistemas de ações": a intenção do especialista ao modelar o espaço geográfico.

Em resumo, o conceito de Milton Santos de "espaço como sistemas de objetos e sistemas de ações" caracteriza um mundo em permanente transformação, com interações complexas entre seus componentes. Santos apresenta uma visão geral, que admite diferentes leituras e distintos processos de redução, necessários à captura desta definição abstrata num ambiente computacional. Não obstante, a riqueza inerente a este conceito está em deslocar a ênfase da análise do espaço, da *representação cartográfica* para a dimensão da *representação do conhecimento geográfico*. Afinal, como diz o próprio Milton Santos, "geometrias não são geografias".

5 Teoria Geográfica e Ciência da Geoinformação: Rumo a uma Nova Geração de SIG

Nesta seção, fazemos um resumo de nossa análise, na perspectiva de projetar uma nova geração de sistemas de informação geográfica. Na Tabela 1

apresentamos, para cada escola, o conceito chave em sua definição de espaço, a representação computacional que melhor aproxima este conceito, e algumas técnicas de Análise Geográfica típicas que estão associadas a esta escola geográfica. Fazemos uma distinção entre os conceitos da escola de Geografia Quantitativa que tem expressão na atual geração de SIG e aqueles que apontam para a futura evolução da tecnologia de Geoprocessamento.

Tabela 1

Teoria Geográfica e Geoprocessamento

Teoria	Tecnologia SIG associada	Conceito-Chave	Repres. Comput.	Técnicas Análise
Geografia Idiográfica	Anos 80 – meados dos anos 90	Unicidade da Região (unidade-área)	Polígono e atributos	Interseção conjuntos
Geografia Quantitativa-1	Final da década de 90	Distribuição Espacial	Superfícies (grades)	Geoestatística + lógica "fuzzy"
Geografia Quantitativa-2	Meados da década de 00	Modelos espaço-tempo	Funções	Modelos multi-escala
Geografia Crítica	Segunda década do século 21	Objetos e Ações Espaço de fluxos e espaço de lugares	Ontologias e Espaços não-cartográficos	Representação do Conhecimento

À guisa de resumo, apresentamos cada um dos componentes da Tabela 1:

- *Geografia Idiográfica (SIG dos anos 80)*: o conceito-chave é a unicidade da região, expresso através de abstrações como a "unidade-área" (HARTSHORNE, 1936), "unidade de paisagem" (NAVEH and LIEBERMAN, 1993) e "land-unit" (ZONNEVELD, 1989). A representação computacional associada é o polígono com seus atributos (usualmente expressos numa tabela de um banco de dados relacional) e as técnicas de análise comuns, está o uso da interseção de conjuntos (lógica booleana).
- *Geografia Quantitativa (SIG de hoje)*: o conceito-chave é a distribuição espacial do fenômeno de estudo, expressa através de um conjunto de eventos,

amostras pontuais, ou dados agregados por área. A representação computacional associada é a superfície (expressa como uma grade regular) e há uma grande ênfase no uso de técnicas de Estatística Espacial e Lógica Nebulosa ("fuzzy") para caracterizar com o uso (respectivamente) da teoria da probabilidade e da teoria da possibilidade as distribuições espaciais.

- *Geografia Quantitativa (SIG da próxima geração)*: o conceito-chave são os modelos preditivos com representação espaço-temporal, onde a evolução do fenômeno é expressa através de representação funcional. Para capturar as diferentes relações dinâmicas, as técnicas de Análise deverão incluir modelos multi-escala, que estabeleçam conexões entre fenômenos de macroescala (tipicamente relacionados com fatores econômicos) e fenômenos de microescala (tipicamente associados a transições no uso da terra).
- *Geografia Crítica (SIG do futuro)*: aqui, os conceitos-chave incluem o espaço como "sistema de objetos e sistemas de ações" e a oposição entre "espaço de fluxos" e "espaço de lugares". Podemos apenas especular sobre as representações computacionais que serão utilizadas neste contexto, que possivelmente incluam técnicas de Representação de Conhecimento. Nossa hipótese de trabalho é que os SIG do futuro contemplarão representações não-cartográficas do espaço, com uma ênfase no estabelecimento de relações entre os diferentes atores sociais que atuam no espaço.

6 Conclusões Preliminares: O Alcance e as Limitações do Geoprocessamento

Neste trabalho, examinamos diferentes conceitos de espaço de escolas da Geografia e buscamos estabelecer que representações computacionais permitiam a expressão destes conceitos no ambiente de SIG. Embora saibamos que a visão apresentada é reducionista e limitada, consideramos que é muito útil apresentar uma perspectiva genérica como a exposta acima, pois esta nos ajuda a compreender as diferenças entre os conceitos de espaço e melhor compreender os desafios ainda não resolvidos pela Ciência da Geoinformação. O que podemos concluir, ainda que de forma preliminar?

Em primeiro lugar, cumpre indicar que, apesar dos significativos avanços das duas últimas décadas, a tecnologia de sistemas de informação geográfica ainda está longe de dar suporte adequado às diferentes concepções de *espaço geográfico*. Atualmente, os SIG oferecem ferramentas que permitem a expressão de procedimentos lógicos e matemáticos sobre as variáveis georreferenciadas com uma economia de expressão e uma repetibilidade impossíveis de alcançar em análises tradicionais. No entanto, a tecnologia de SIG resolveu apenas os problemas simples de representação computacional do espaço. Os atuais sistemas são fortemente baseados numa lógica "cartográfica" do espaço, exigindo sempre a construção de "mapas computacionais", tarefa sempre custosa e nem sempre adequada ao entendimento do problema em estudo. Adicionalmente, mostramos que a Geografia Crítica tem uma importante contribuição para a Ciência da Geoinformação, sendo um de seus principais méritos o de apontar para uma visão muito rica do espaço geográfico, enfatizando a noção do processo em contraposição à natureza estática dos SIG de hoje.

Neste sentido, é fundamental distinguir entre as capacidades da atual geração de SIG e as limitações inerentes a qualquer representação computacional do espaço geográfica. Assim, apesar de ser essencialmente infactível capturar, num ambiente de geoinformação, todas as dimensões do conceitos como "sistemas de objetos e sistemas de ações", é importante buscar técnicas que permitam aproximar dimensões parciais desta visão. Para tanto, será necessário utilizar abordagens quantitativas, baseadas em técnicas como Sistemas Dinâmicos, Ontologias e Representação de Conhecimento, sem perder de vista que estes modelos serão sempre aproximações reducionistas da realidade geográfica.

Referências

1. ANSELIN, L. **Spatial econometrics: methods and models**. Dordrecht, Kluwer, 1988.

2. BAILEY, T. and A. GATTREL. **Spatial Data Analysis by Example**. London, Longman, 1995.

3. BURROUGH, P. **Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment**. Oxford, England, Oxford University Press, 1986.

4. BURROUGH, P. Dynamic Modelling and Geocomputation. In: P. Longley, S. Brooks, R. McDonnell and B. Macmillan (ed). **Geocomputation: A Primer**. New York, John Wiley, 1998. v.

5. BURROUGH, P. and A. FRANK (ed.). **Geographic Objects with Indeterminate Boundaries**. London, Taylor & Francis, 1996.

6. CÂMARA, G. M., A.M.V.; PAIVA, J.A.C; SOUZA, R.C.M. Action-Driven Ontologies of the Geographical Space. In: **GIScience 2000**, Proceedings. Savanah, GA, AAG, 2000. <http://www.giscience.org>.

7. CASTELLS, M. **A Sociedade em Rede**. São Paulo, Paz e Terra, 1999.

8. CHORLEY, R. J. and P. HAGGETT (ed.). **Models in Geography**. London, Methuen, 1967.

9. CHRISTOFOLETTI, A. As Perspectivas dos Estudos Geográficos. In: A. Christofoletti (ed). **Perspectivas da Geografia**. São Paulo, Difel, 1985. v.

10. CORRÊA, R. L. Espaço: um conceito chave na geografia. In: I. E. Castro, P. C. Gomes and R. L. Corrêa (ed). **Geografia: Conceitos e Temas**. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 1995. v.

11. COUCLELIS, H. From Cellular Automata to Urban Models: New Principles for Model Development and Implementation. **Environment and Planning B: Planning and Design** v.24, p.165-174, 1997.

12. ENGELEN, G. Using Cellular Automata for Integrated Modelling of Socio-environmental Systems. **Environmental Monitoring and Assessment** v.34, p.203-214, 1995.

13. FONSECA, F. and M. EGENHOFER. Ontology-Driven Geographic Information Systems. In: **7th ACM Symposium on Advances in Geographic Information Systems**, Proceedings. Kansas City, MO, ACM Press, N.Y., 1999. p.14-19.

14. FONSECA, F., M. EGENHOFER and K. BORGES. Ontologias e Interoperabilidade Semântica entre SIGs. In: **II Workshop Brasileiro em Geoinformática - GeoInfo2000**, Proceedings. São Paulo, 2000. <http://www.tecgraf.puc-rio.br/geoinfo2000>.

15. GETIS, A. and J. K. ORD. Local spatial statistics: an overview. In: P. Longley and M. Batty (ed). **Spatial Analysis: Modelling in a GIS Environment**. New York, John Wiley, 1996. v., p.261-277.

16. GOODCHILD, M. A spatial analytic perspective on geographical information systems. **International Journal of Geographical Information Systems** v.1, p.327-334, 1988.

17. GOOVAERTS, P. **Geostatistics for Natural Resources Evaluation**. New York, Oxford Univ. Press, 1997.

18. HARTSHORNE, R. **Propósitos e Natureza da Geografia**. São Paulo, Hucitec (trad. 1966), 1936.

19. HARVEY, D. **Explanation in Geography**. New York, St. Martin's Press, 1969.

20. HARVEY, D. **Social Justice and the City**. Oxford, Blackwell, 1988.

21. HARVEY, D. **The Condition of Postmodernity**. London, Basil Blackwell, 1989.

22. HEUVELINK, G. **Error Propagation in Environmental Modelling with GIS**. London, Taylor and Francis, 1998.

23. MORAES, A. C. R. **Geografia: Pequena História Crítica**. São Paulo, Hucitec, 1995.

24. NATIONAL RESEARCH COUNCIL. **Rediscovering Geography: New Relevance for Science and Society**. Washington, National Academy Press, 1997.

25. NAVEH, Z. and A. LIEBERMAN. **Landscape Ecology: Theory and Applications**. New York, Springer-Verlag, 1993.

26. OPENSHAW, S. and C. OPENSHAW. **Artificial Intelligence in Geography**. Chichester, John Wiley, 1997.

27. PENROSE, R. **The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds, and the Laws of Physics**. Oxford, Oxford Univ. Press, 1989.

28. POPPER, K. **A Lógica da Pesquisa Científica**. São Paulo, EDUSP, 1975.

29. SANTOS, M. **Por uma Geografia Nova**. São Paulo, Hucitec, 1978.

30. SANTOS, M. **Espaço e Método**. São Paulo, Nobel, 1985.

31. SANTOS, M. **A Natureza do Espaço (*The Nature of Space*)**. São Paulo, Hucitec, 1996.

32. SEARLE, J. R. **Minds, Brains, and Science**. Cambridge, MA, Harvard University Press, 1984.

33. SEARLE, J. R. **The Construction of Social Reality**. New York, The Free Press, 1995.

34. SMITH, B. and D. MARK. Ontology and Geographic Kinds. In: **International Symposium on Spatial Data Handling**, Proceedings. Vancouver, Canada, 1998. p.308-320. <http://www.geog.buffalo.edu/ncgia/i21/SDH98.html>.

35. SOWA, J. F. **Knowledge Representation: Logical, Philosophical, and Computational Foundations**. Pacific Grove, CA, Brooks Cole, 2000.

36. TOBLER, W. Cellular geography. In: S. Gale and O. G. (ed). **Philosophy in Geography**. Dordrecht, Reidel, 1979. v., p.379-386.

37. WESSELING, C. G., D. KARSSENBERG, W. P. A. VAN DEURSEN and P. A. BURROUGH. Integrating dynamic environmental models in GIS: the

development of a Dynamic Modelling language. **Transactions in GIS** v.1, p.40-48, 1996.

38. WHITE, R. and G. ENGELEN. Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modelling. **Environment and Planning B: Planning and Design** v.24, p.235-246, 1997.

39. ZONNEVELD, I. S. The Land Unit: A Fundamental Concept in Landscape Ecology, and Its Applications. **Landscape Ecology** v.3, p.67-86, 1989.