



Este livro foi impresso com papel certificado FSC®

Emilio F. Moran

# MEIO AMBIENTE E CIÊNCIAS SOCIAIS

## INTERAÇÕES HOMEM-AMBIENTE E SUSTENTABILIDADE

TRADUÇÃO: CARLOS SLAK

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
(Câmara Brasileira do Livro, S.P., Brasil)

Moran, Emilio F.

Meio ambiente e ciências sociais : interações homem-ambiente e sustentabilidade / Emilio F. Moran ; tradução Carlos Slak. – São Paulo : Editora Senac São Paulo, 2011.

Título original: *Environmental Social Science - Human-Environment Interactions and Sustainability*.

Bibliografia.

ISBN 978-85-396-0090-8

1. Degradação ambiental 2. Ecologia humana 3. Ecosistemas 4. Homem – Influência sobre a natureza 5. Vida sustentável I. Título

11-00954

CDD-304.2

Índice para catálogo sistemático:

1. Interação homem-ambiente : Geografia humana : Sociologia 304.2



## ■ **Análise multiescalar e multitemporal**

As questões de escala no estudo do fenômeno ecológico são de importância fundamental. As ciências naturais entenderam a importância da escala há muito tempo, ainda que nem sempre tenham lidado adequadamente com suas implicações. Em compensação, a pesquisa a respeito da escala nas ciências sociais foi menos explícita e menos precisa (Gibson, Ostrom, Ahn, 2000). As pesquisas referentes às interações homem-ambiente exigem que abordemos o trabalho interdisciplinar relativo à escala por meio da barreira ciências naturais/sociais. Recentemente, foram propostas noções polêmicas repensando as questões de escala (Manson, 2008). De acordo com Manson, a escala permeia as pesquisas interdisciplinares dos sistemas homem-ambiente; no entanto, ele pergunta: “A escala existe?” De modo mais preciso, uma definição de escala pode atender as necessidades múltiplas das pesquisas dos sistemas homem-ambiente? O desafio vem da natureza multidisciplinar das pesquisas homem-ambiente, com cada disciplina trazendo conceitos de escala diferentes e muitas vezes conflitantes (ver em Marston, 2000, o corpo crescente de acadêmicos que veem a escala como “socialmente construída”).

Nas ciências sociais, a literatura associada à geografia é particularmente rica em discutir a importância da escala (Marceau, 1999; Sheppard & McMaster, 2004). A escala é reconhecida como um conceito

fundamental na descrição da organização hierárquica do mundo – em particular, com relação à escala espacial. Observemos que a escala pode se referir ao tamanho da unidade de análise e à escala espacial, com “células grade” de tamanhos diferentes integradas umas às outras para representar diferentes escalas espaciais. Esses dois usos do termo, por sua vez, não “mapeiam” instituições e outros fenômenos sociais com facilidade. Os problemas ambientais, como o impacto das mudanças climáticas sobre os ecossistemas, requerem um entendimento de como os processos operam em diversas escalas e como podem se relacionar por meio das escalas. Embora persistam as diferenças disciplinares, houve progresso constante e convergência rumo a lidar com as questões escalares por meio das ciências sociais e nas pesquisas homem-ambiente (para ter uma excelente visão geral a respeito do conceito de escala por meio das ciências sociais e da ecologia, ver Gibson, Ostrom, Ahn, 1998 e 2000).

No centro do desafio proposto pela análise multiescalar está a diferença entre a análise microscópica (foco em indivíduos, grupos pequenos, interações intracomunitárias, local) e a análise macroscópica, que tende a enfatizar mais condições estruturais, como instituições, organização social, ecossistemas e biomas (Alexander *et al.*, 1987). Encontramos essa distinção entre as ciências naturais e sociais (macroeconomia *versus* microeconomia; análise do lote em biologia *versus* análise do ecossistema e da biologia global, etc.). Nas análises, foi mais fácil deixar essas duas escalas serem tratadas como amplamente distintas, ignorando a conectividade entre os processos em nível local e escalas maiores e mais inclusivas. Uma escala é separável de outras escalas como uma conveniência analítica, ainda que sua separabilidade não seja um reflexo da realidade, nem da interconectividade dos eventos no tempo e no espaço.

Particularmente na área de recursos de acesso comum, por várias décadas enfocaram-se os estudos de caso do manejo de recursos baseado na comunidade, que foram usados para desenvolver e promover a teoria. Isso facilitou a observação dos processos de autogovernança, dada a relativa simplicidade da dinâmica de escala local. No entanto, isso também suscitou imediatamente questões de escala: Até que ponto os resultados das interações de pequena escala, baseadas na comunidade, extrapolam

para bens comuns regionais ou globais? Embora possamos extrapolar, alguns pesquisadores concluíram que provavelmente existem novos e diferentes princípios operativos em escalas superiores (Berkes, 2006).

Essa separação entre as análises local e global começou a mudar depois que um número crescente de acadêmicos passou a enfatizar interações homem-ambiente em diversas escalas e sobre interações interestelares. Se examinarmos as instituições ou as interações interestelares entre grupos interessados, poluição do ar ou emissões de carbono, logo enfrentaremos as implicações dessas interações: agências regulatórias governamentais de nível superior, por exemplo, podem acessar e mobilizar informações e recursos que fortaleçam seu poder e, com isso, enfraquecer a confiança e a cooperação de grupos interessados de nível inferior, cujos papéis são diminuídos. Portanto, o modo pelo qual as instituições de nível superior utilizam seu poder em relação às instituições de nível inferior pode determinar a efetividade dessas interações interestelares e seu sucesso na gestão de algum recurso ambiental (Adger, Brown, Tompkins, 2005). Até o presente momento, não há tipologia aceita para a ligação interestelar das instituições. O termo *cogestão* é utilizado para capturar esses arranjos múltiplos, mas Berkes (2002) acha que ele oculta a complexidade da dinâmica interestelar das mudanças institucionais. Talvez seja preferível uma abordagem mais bem descrita como “gestão adaptativa.” O desenvolvimento da gestão adaptativa enfoca como grupos locais se auto-organizam, aprendem, adaptam e moldam ativamente mudanças com redes sociais que conectam instituições e organizações por meio de níveis e escalas, e que facilitam os fluxos de informações (Olsson, Folke, Berkes, 2004).

Esse desafio da análise interestelar e multiescalar é explicado pelo exame dos poluentes do ar, como mercúrio, ozônio e orgânicos persistentes. Esses poluentes podem ser transportados em escalas de cerca de cem a muitos milhares de quilômetros e, assim, ultrapassar limites estaduais, nacionais e até continentais. A regulamentação e o manejo desses poluentes requerem que se lide com diferenças políticas, econômicas e culturais, locais, estaduais, nacionais e internacionais, por meio de escalas geográficas (Bergin *et al.*, 2005). Um desafio central para o entendimento das in-

terações interescalares é a complexidade inerente aos sistemas ecológicos e sistemas humanos (Liu *et al.*, 2007a e 2007b). A origem dessa complexidade resulta da própria diversidade dos organismos nesses sistemas e dos comportamentos de não equilíbrio, não lineares, historicamente contingentes e de auto-organização que eles exibem (Cadotte, Drake, Fukami, 2005). A captura do comportamento desses sistemas homem-ambiente é difícil mesmo quando podemos coletar grandes quantidades de dados por causa da diversidade de condições, muitas das quais são difíceis de reproduzir. Para enfrentar esse desafio, temos de combinar abordagens de laboratório, simulações e modelagens computadorizadas, estudos históricos e de campo por equipes de cientistas de diversas disciplinas, a fim de superar a persistente armadilha de pensar que esse estudo, nessa escala, representa as interações homem-ambiente por meio das escalas.

Em diversas disciplinas, nas quais a atenção ao local reina suprema, como na antropologia, e entre muitos cientistas sociais e biológicos bem intencionados, existe o que se denominou “armadilha do local” – nela se assume que a organização, a política e a ação em escala local são inerentemente mais propensas a ter os resultados sociais e ecológicos desejados do que as atividades organizadas em escalas superiores. No entanto, não há nada inerente a respeito de nenhuma escala, e até mesmo a escala local é profundamente influenciada e dependente de escalas superiores. É preciso ver cada escala, mesmo a local, interagindo com outras escalas, pois os resultados desejáveis ou indesejáveis são produzidos nos processos interescalares (Brown & Purcell, 2005). Um caminho proposto para seguir adiante é o dos “sistemas de avaliação distribuída”, caracterizado por avaliações multiescalares que envolvem grupos interessados locais, regionais e nacionais na coprodução de avaliações, enfocando assim essa sensibilidade necessária da natureza multinível dos problemas ambientais (Cash, 2000). A convergência da erudição abordando “coprodução de conhecimento, mediação, interpretação e negociação através de limites relacionados à escala pode facilitar a criação de respostas para os problemas complexos que os tomadores de decisão foram historicamente incapazes de solucionar (Cash *et al.*, 2006). Entre os desafios enfrentados pelos grupos interessados e tomadores de decisão no processo

de avaliações interescalares, podemos observar particularmente aquele que envolve compatibilizar escalas de sistemas biogeofísicos com escalas de sistemas de manejo, evitando a discordância escalar (compatibilidade de escala de avaliação com a escala de manejo) e explicando a dinâmica interescalar (Cash & Moser, 2000).

Essa visão das ciências sociais é compatível com a das ciências naturais. Constanza *et al.* (2001) assinalam que ecossistemas de grande escala não são simplesmente versões maiores de sistemas menores, e que os ecossistemas em microescala não são meros microcosmos de sistemas de grande escala, mas operam em níveis diferentes e exibem padrões distintos. Portanto, não devemos esperar que as práticas tradicionais de manejo bem-sucedidas em nível local também o sejam no manejo das atividades organizadas em escala continental ou global. Da mesma forma, os esforços para aplicar uma lógica nacional ou global a sistemas locais tendem a resultar na destruição do ecossistema local. “O desafio é correlacionar ecossistemas e sistemas de governança para maximizar a compatibilidade desses sistemas” (Constanza *et al.*, 2001). Eles defendem o uso de uma combinação de um amplo banco de dados global, um grande consórcio de estudos de caso locais e uma modelagem de simulação para testar hipóteses, descobrir propriedades emergentes de sistemas diferentemente dimensionados e localizar correspondências entre sistemas de governança e ecossistemas em diversas escalas.

Uma solução para esse desafio foi oferecida pelos modelos integrados de avaliação (IAMs), permitindo que diversos componentes dos problemas de mudanças climáticas globais sejam investigados em um único arcabouço. A principal vantagem dos IAMs em relação a arcabouços de modelagem menos completos é que as consequências socioeconômicas e ambientais das escolhas políticas podem ser avaliadas em sua totalidade. No entanto, as formas funcionais altamente agregadas que os IAMs utilizam carecem de detalhes regionais e locais suficientes para ser totalmente críveis. Easterling (1997) sustenta que precisamos de estudos regionais para obter IAMs confiáveis e de um exercício interescalar que envolva modelagem integrativa regional e global. Essa é uma conclusão a que uma parte considerável da comunidade de ciência social ambiental che-

gou, e a comunidade, com sucesso, empurrou tanto as ciências naturais como as sociais na direção da modelagem regional, como um mesonível que leva em conta os fenômenos locais e globais.

Geist e Lambin (2002) utilizaram uma abordagem diferente, mas que expõe a complexidade das escalas de correlação. Eles analisaram as causas próximas e os condicionantes subjacentes do desmatamento, incluindo as interações tal como foram relatadas em 152 estudos de caso subnacionais. Os autores mostram que o desmatamento tropical era impulsionado por padrões regionais identificáveis e que os estudos anteriores tinham dado muita ênfase ao crescimento populacional e à agricultura itinerante como causas primárias do desmatamento. A análise desses estudos revela que o declínio da floresta tropical é determinado por combinações diferentes de diversas causas próximas e condicionantes subjacentes, dependendo dos contextos geográficos e culturais. Algumas dessas combinações são sólidas nas regiões do globo (como o papel das economias de mercado e a expansão da terra permanentemente cultivada), enquanto a maioria delas é específica da região. Essas conclusões desafiam as explicações de fator único, que atribuem a maior parte da responsabilidade pelo desflorestamento à agricultura itinerante e ao crescimento populacional. Em vez disso, a análise revela que, em nível subjacente, até certo ponto as decisões públicas e individuais respondem a políticas econômicas de escalas nacional e global, e que, em um nível próximo, os modos regionalmente distintos de expansão agrícola, exploração de madeira e expansão de infraestrutura (principalmente a construção de estradas) prevalecem como causas do desmatamento. O estudo mostra exatamente como as causas próximas e os condicionantes subjacentes afetam as mudanças de desflorestamento em determinadas localidades e como os instrumentos políticos terão de ser sensíveis a essa complexidade se desejarem alcançar o objetivo da conservação florestal em determinada área. Digno de nota também é o uso da análise comparativa qualitativa (QCA [Ragin, 1987]) por Rudel (2005) como modo de ampliar o caráter generalizável do seu estudo das florestas. A QCA é uma técnica analítica que utiliza a álgebra booleana para implantar princípios de comparação utilizados por acadêmicos envolvidos no estudo

qualitativo dos fenômenos macrosociais. Em geral, acadêmicos orientados qualitativamente investigam poucos casos por vez, mas suas análises são tanto intensivas – enfocando muitos aspectos dos casos – como integrativas – examinando como partes diferentes de um caso se encaixam contextual e historicamente. Ao formalizar a lógica da análise qualitativa, a QCA possibilita trazer a intensidade lógica e empírica das abordagens qualitativas aos estudos que abarcam mais do que um número limitado de casos – situações de pesquisa que normalmente requerem o uso de métodos quantitativos orientados por variáveis.

### Uma abordagem para as pesquisas multidisciplinar e multiescalar

A abordagem proposta aqui não é apresentada como a solução definitiva para os desafios representados pela pesquisa multiescalar. Em vez disso, é apresentada como uma abordagem realística utilizada com sucesso por diversos grupos de pesquisa em diferentes lugares, países e continentes que leva em conta a análise comparativa multiescalar por meio das ciências naturais e sociais. Esse trabalho foi facilitado pelo financiamento em nível central pela Fundação Nacional de Ciências (National Science Foundation), de 1996 a 2006, e pela Universidade de Indiana, e baseado no Centro para o Estudo de Instituições, Populações e Mudanças Ambientais (Center for the Study of Institutions, Population, and Environmental Change – CIPEC; ver em Moran & Ostrom, 2005, uma síntese ou acessar o *site* do Centro: <http://www.indiana.edu/~cipec/>). Além disso, a abordagem foi ensinada durante sete anos em um curso de verão intensivo, que a compartilhou com 132 membros de faculdades e estudantes de pós-graduação de 34 países, os quais começaram a aplicá-la em seus trabalhos desde então. Evidentemente, eles adaptaram a abordagem geral para satisfazer seus objetivos específicos, mas houve uma consistência que se provou sólida. Embora a abordagem enfoque ecossistemas florestais e as mudanças de uso e cobertura da terra, possui uma aplicabilidade mais ampla.

A atenção atual da comunidade de pesquisa e dos círculos políticos para as “dimensões humanas das mudanças ambientais globais”

oferece uma rara oportunidade para os estudos integrativos. Os elaboradores de políticas e a comunidade de ciências físicas reconhecem o lugar central do homem nas modificações ambientais (Vitousek *et al.*, 1997; Peck, 1990) e, portanto, aceitam implicitamente o que as ciências sociais podem ter a dizer a respeito. As soluções para os problemas ambientais contemporâneos requerem a integração de abordagens experimentais e teóricas em diversos níveis de análise, do local ao global (Levin, 1998).

A ciência social ambiental atual baseia-se na experiência passada dos acadêmicos que trabalham nas interações homem-ambiente, mas deve obrigatoriamente ir além dessas abordagens. Geralmente, a concórdância quanto aos modos de selecionar comunidades ou locais de amostra e a que dados devem ser coletados em locais altamente variáveis deve ser assegurada, não obstante as diferenças significativas de ambiente, cultura, economia e história (Moran & Brondizio, 2001). As abordagens do passado que enfatizam o equilíbrio e a previsibilidade necessários para testar hipóteses sem validade não atendem bem a essa agenda de pesquisa, pois ocultam os processos dinâmicos dos ecossistemas e das manchas dentro deles. Os modelos dinâmicos e estocásticos de ecossistemas são necessários para abordar as questões das mudanças ambientais globais (Xu & Li, 2002; Walker, Perez-Barberia, Marion, 2006). Os cientistas sociais ambientais têm de usar essas abordagens para envolver, por exemplo, questões de restauração de ecossistemas (Pietsch & Hasenauer, 2002; Mitsch & Day, 2004); biodiversidade (Tilman, 1999; Nagendra, 2001; Wätzold *et al.*, 2006); agroecologia (Vandermeer, 2003; Wojtkowski, 2004); e desmatamento (Skole & Tucker, 1993; Kaimowitz & Angelson, 1998; Moran & Ostrom, 2005; Lambin & Geist, 2006).

Um dos primeiros passos para desenvolver uma abordagem por meio das disciplinas das ciências sociais e naturais, a fim de facilitar a pesquisa multiescalar e multidisciplinar, é ter uma língua franca, isto é, um conjunto de ferramentas que facilitem a comunicação e sejam basicamente multiescalares, ou permitam a agregação e a desagregação sem uma perda substancial de informações. Esse conjunto de ferramentas é fornecido pelos sistemas de informação geográfica (SIG) e pelas técnicas de sensoriamento remoto por satélite (ver discussão mais aprofundada

no Capítulo 4). O sensoriamento remoto a partir de plataformas orbitais, como o sensor AVHRR da NOAA, o sensor Thematic Mapper (TM) do satélite Landsat da Nasa e o satélite francês Spot, fornece informações de considerável riqueza ambiental para análise local, regional e global (Conant, 1978 e 1990; Liverman *et al.*, 1998; Moran & Brondizio, 1998; Brondizio, 2008). Para a análise dos processos globais de grandes áreas continentais, como a bacia amazônica, o AVHRR da NOAA é o sensor orbital mais apropriado, por causa de sua cobertura diária, apesar de sua resolução menos refinada. Mais recentemente, o Modis, sensor de resolução média (com resolução espacial de 250 m) que fornece cobertura diária, foi utilizado e conectado a satélites de resolução mais fina. Embora projetado inicialmente para monitoramento meteorológico, foi usado proveitosamente para monitorar padrões de vegetação sobre áreas muito grandes. A Tabela 2 mostra uma lista dos diversos satélites disponíveis relevantes para o estudo das mudanças de uso e cobertura da terra, e as diferentes resoluções que fornecem.

**TABELA 2.** Comparação das resoluções espacial, espectral e temporal das principais plataformas de sensoriamento remoto disponíveis.

Satélite	Sensor	Resolução espacial	Resolução espectral	Resolução temporal
AQUA	MODIS	■	■	■
	AIRS	■	■	■
	CERES	■	■	■
CBERS 1	CCD CAMERA	■	■	■
	IRMSS	■	■	■
	WFI	■	■	■
CBERS 2	CCD CAMERA	■	■	■
	IRMSS	■	■	■
	WFI	■	■	■
EROS A1	CCD CAMERA	■	■	■
EROS B1	CCD-TDI CAMERA	■	■	■



escalas mais inclusivas (Green, Schweik, Randolph, 2005a). Os pontos de articulação entre diferentes escalas de análise desafiam nossas estreitas abordagens disciplinares e requerem novas estratégias para coletar e interpretar dados (Walsh *et al.*, 1999; Wessman, 1992, p. 175).

A precisão da análise regional depende da qualidade da amostragem em nível local. A amostragem detalhada em nível local é muito distante da comum no sensoriamento remoto tradicional. Muito do que se procura conseguir como “verdade terrestre” é a observação visual de classes, como a floresta densa ou a terra cultivada, sem investigação detalhada da história de uso da terra, estrutura vegetal e composição. Quando combinado com o uso de ferramentas analíticas capazes de ampliar ou reduzir as escalas, o viés antropológico consagrado de entendimento dos processos em nível local torna-se uma contribuição importante para o avanço da pesquisa de mudanças de uso e cobertura da terra, assim como para as questões de articulação entre processos escalares diferentes. Historicamente, a pesquisa de ecossistemas apresentou desafios para as análises multiescalares, pois eles podem ser conceitualizados em diversas escalas.

A pesquisa integrativa homem-ambiente é capaz de contribuir com essas análises multiescalares, com seu ponto forte permanecendo nas escalas local e regional. Wessman (1992, p. 180) recomendou estudos que ligam a observação terrestre às escalas regional e global para tirar todo o proveito dos dados detalhados disponíveis em escalas diferentes. Atualmente, várias dessas iniciativas de pesquisa se mantêm, mas muitas delas não prestaram muita atenção às dimensões humanas desses processos. A extrapolação da pesquisa de ecossistemas para as escalas regional e global foi retardada no passado pelas dificuldades de observação da heterogeneidade espacial de grande escala. O sensoriamento remoto ligado a estudos terrestres fornece as ferramentas mais promissoras para o entendimento da estrutura, função e mudança do ecossistema. A capacidade de detectar a mudança de longo prazo em ecossistemas pode ser aprimorada pela análise da textura da imagem, combinada com estatísticas espaciais que permitam a análise da estrutura do povoamento com base em dados de satélite (Wessman, 1992, p. 189). Um resumo das pesquisas

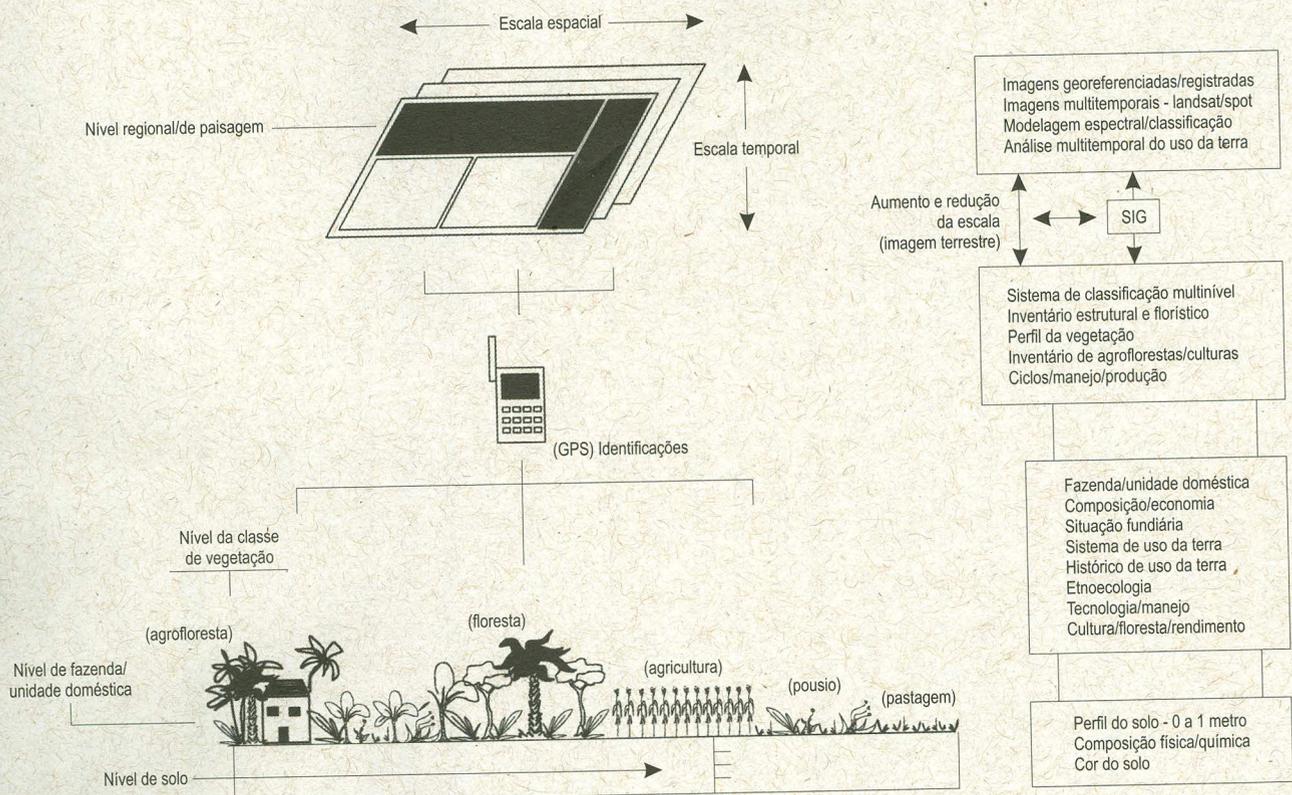
nas ciências sociais a respeito de questões de escala pode ser encontrado em Gibson, Ostrom e Ahn (1998 e 2000).

A pesquisa multinível pode começar em qualquer escala de análise; portanto, a amostragem em um nível precisa ser agregada em um nível superior ou, quando necessário, desagregada em níveis inferiores. Para isso, é importante prestar atenção aos níveis de análise sem a subordinação de escalas. A análise da cobertura e uso da terra fornece-nos uma configuração para o estudo dos níveis de análise que conectam o comportamento humano às forças econômicas e às estratégias de manejo com aspectos ecológicos da cobertura da terra. Provavelmente, os leitores vão querer consultar a recém-criada revista *Journal of Land Use Science* (ver <http://www.informaworld.com>).

Podemos conceitualizar a análise multinível das mudanças de uso e cobertura da terra como baseada em uma estrutura de quatro níveis integrados de pesquisa: regional/de paisagem; de classe de vegetação; de fazenda/unidade doméstica; e de solo. O modelo conceitual recorre a um procedimento de amostragens aninhadas, o qual produz dados que podem ser ampliados ou reduzidos em escala, de modo independente ou integrado. A integração de dados de satélite multitemporais e de alta resolução com dados de economia, manejo, história de uso da terra e inventários de vegetação/solo específicos ao local tem como objetivo possibilitar o entendimento das dimensões ecológicas e sociais do uso da terra em escala local, ligando-as às escalas regional e global de uso da terra. A Figura 12 ilustra essa abordagem multiescalar e multitemporal aninhada usada pelo nosso grupo de pesquisa.

### **Nível local de análise**

A coleta de dados em nível de fazenda/unidade doméstica inclui diversos aspectos internos e externos dessa unidade de análise (Moran, 1995; Netting, Stone, Stone, 1995). É importante coletar dados locais para que eles possam ser agregados àqueles de populações maiores, dentro das quais as unidades domésticas estão aninhadas. Por exemplo, os dados demográficos na composição da unidade doméstica (incluindo



**FIGURA 12.** Método de análise multinível das mudanças de uso e cobertura da terra.

Fonte: ACTI, cortesia de Eduardo Brondzio.

gênero e faixa etária) podem ser agregados em nível de população para construir seu perfil demográfico, mas isso só poderá ocorrer se os dados forem coletados com o uso de intervalos-padrão de cinco anos, que é o modo como os dados demográficos tendem a ser registrados em níveis mais agregados (Moran, 1995). Outro importante conjunto de dados que são coletados nesse nível e podem ser agregados em níveis superiores está relacionado à economia de subsistência. Nesse nível, é importante abordar as dimensões básicas da organização social, como padrão de colonização, distribuição da mão de obra, uso dos recursos e parentesco (ver em Netting, Stone, Stone, 1995, uma abordagem em três níveis de coleta de dados de organização social relevantes ao uso da terra).

Uma das tarefas mais difíceis na análise de uso da terra é entender as decisões que devemos tomar a respeito dos limites de uma população. Em geral, os limites geográficos são associados a diversos fatores, como posse da terra, feições da paisagem, história étnica, fronteiras administrativas e herança. Uma análise baseada nas informações locais e em mapas, imagens e fotografias aéreas pode fornecer informações mais confiáveis que esta ou aquela isoladamente. Esses limites mudam de forma drástica ao longo do tempo, podendo afetar o comportamento das populações (Ellen, 1990).

Uma preocupação com as mudanças globais leva à coleta de dados em nível local capaz de agregação em níveis superiores de análise, em formatos geográficos e de banco de dados. O georeferenciamento de unidades domésticas, limites de fazendas e campos de agricultura e pousio pode ser obtido mediante o uso dos aparelhos de GPS. Atualmente, esses aparelhos são pequenos dispositivos que permitem a localização exata de qualquer ponto do planeta com precisão de poucos metros. O nível de precisão variará de acordo com diversos fatores, como a qualidade do aparelho de GPS, a visão desimpedida dos satélites ou se as leituras são realizadas dentro da cobertura florestada. Em geral, as precisões atuais obtidas com um aparelho de GPS são aceitáveis para a maioria dos tipos de análises de uso da terra, e raramente são necessárias precisões submétricas. Os dados coletados nesse nível podem informar a próxima fase da pesquisa. Por exemplo, as informações a respeito da distribuição de ativi-

dades durante o ano, o calendário agrícola e a produção podem revelar qual é a melhor época para o futuro trabalho de campo.

O mapeamento da vegetação tem implicações para o entendimento do impacto das práticas de uso da terra sobre a cobertura da terra. Os parâmetros básicos da vegetação precisam ser incluídos para que possam informar o mapeamento em nível de paisagem. Em geral, a estrutura da vegetação, incluindo altura, abrigo no chão, área basal, densidade de indivíduos, diâmetro na altura do peito (DBH) e composição florística, é um dado importante a ser coletado. Ele informa a interpretação dos dados digitais de satélites, fornece indícios das características da vegetação após tipos específicos de perturbação e leva em conta o arranjo espacial da cobertura vegetal. O sensoriamento remoto tem potencial considerável na análise da vegetação, porque permite a aquisição de dados em tempo real, não destrutivos e em uma grande área (Inoue, 2003; Lorits & Damiano, 2006). As aplicações também são importantes na avaliação dos estoques de carbono acima da superfície, relevante para relatórios eficientes a respeito dos requisitos do protocolo de Kyoto (Parenaude, Milne, Dawson, 2005), para a redução das emissões induzidas pelo homem de dióxido de carbono para no mínimo 5% abaixo dos níveis de 1990 em 2012. Para isso, os países devem avaliar os estoques de carbono em 1990 e todas as mudanças a partir desse ano, quer mediante arborização, reflorestamento ou desflorestamento (*ibidem*). As aplicações para monitoramento e previsão de secas severas também se desenvolveram em sofisticação (Boken, Cracknell, Heathcoate, 2005).

Do ponto de vista da interpretação de dados de satélite, a definição de parâmetros estruturais para diferenciar tipos de vegetação e características ambientais, como a temperatura e a umidade, é particularmente importante. As diferenças estruturais fornecem informações que podem ser ligadas aos dados espectrais de imagem. Embora importante, a composição florística é menos útil na interpretação das respostas espectrais, mas pode precisar ser considerada, dependendo das questões da pesquisa. Os fatores ambientais, como umidade do solo, cor do solo e características topográficas, também estão associados com as respostas espectrais da cobertura de vegetação. Por exemplo, em nível de fazenda, a estrutura

da vegetação é o principal parâmetro utilizado para avaliar o impacto das práticas de manejo humano. Algumas espécies de planta são excelentes indicadores do tipo de solo, que, por sua vez, está associado a determinadas práticas de manejo. Geralmente, os agricultores baseiam-se na presença de certa espécie para escolher um local para determinada cultura. A presença da *Imperata brasiliensis*, por exemplo, pode ser um sinal de pH baixo no solo em áreas do estuário amazônico (Bronzizio, Mausell, Wee, 1994). Esse tipo de conhecimento etnoecológico é muito específico do local, e esse conhecimento não extrapola bem para a análise regional ou global da paisagem.

Para determinar locais representativos de amostragem referente a um estudo de cobertura da terra da área, precisamos agregar quatro tipos de informação: classificação da vegetação, informação etnoecológica do uso do recurso, imagens compostas de satélites, mapas de uso e cobertura da terra e de imagens classificadas da área. Com base na análise desses dados, podemos decidir como a amostragem pode ser mais bem distribuída na área para informar tanto a classificação de imagem (mapa de uso e cobertura da terra) como a variabilidade estrutural/florística das classes de vegetação. Ao selecionar um local como amostra representativa de um tipo ou classe de vegetação, devemos considerar o tamanho da área e sua localização espacial na imagem. Também precisamos levar em conta a distribuição espacial da classe de vegetação para evitar o agrupamento das amostras e a informação tendenciosa a respeito da estrutura da vegetação e da composição florística. Com o uso do aparelho de GPS, as coordenadas geográficas da área de amostra são obtidas como parte do inventário. Se possível, a área deve ser localizada sobre uma cópia impressa da imagem georeferenciada ainda no local, para evitar confusão e assegurar a precisão da informação do GPS. No entanto, é no laboratório, por meio de métodos de georeferenciamento mais precisos, que o local será definitivamente incorporado ao arquivo de imagem. Um conjunto de dados aninhado a respeito da história do uso da terra e do inventário da vegetação pode ser relacionado a uma imagem multitemporal mediante as coordenadas derivadas do GPS, possibilitando a análise complexa das trajetórias desse uso e da história de recuperação em níveis de local e de paisagem.

As informações a respeito da história do uso da terra são importantes não só para definir as áreas de amostragem de vegetação antropogênica (pousios e floresta manejada), mas também para verificar que no passado a vegetação natural não foi afetada ou usada. É importante saber, por exemplo, se uma savana foi queimada, e, em caso afirmativo, com que frequência; ou se uma parcela florestal específica foi explorada para fins madeireiros, que espécies foram extraídas ou cortadas, quando o desmatamento ocorreu. O uso da terra e a história do manejo são mais detalhados em áreas diretamente sujeitas ao manejo (agrofloresta), pois o manejo e a tecnologia determinam a estrutura e a composição do local. Nessas áreas, estimativas e mensurações reais da produção são críticas a fim de analisar a importância da atividade em um contexto mais amplo de uso da terra e econômico. Maior importância deve ser dada aos arranjos espaciais das espécies plantadas e a seus ciclos de vida como parte do inventário. Essa tem sido uma área negligenciada na pesquisa antropológica ambiental passada e precisa ser urgentemente abordada em um trabalho estreito com cientistas orientados espacialmente, como geógrafos ambientais e ecólogos.

A análise da recuperação da vegetação e da produção agrícola sem informações a respeito das características do solo tem utilidade limitada. A análise do solo deve estar sempre associada com a análise da cobertura de vegetação; os solos devem ser coletados em locais inventariados de vegetação, agrofloresta e cultura agrícola, com história de uso da terra e manejo conhecidos e georeferenciados em imagem por meio de aparelho de GPS (Moran, Brondizio, McCracken, 2002). Entrevistas etnoecológicas podem elucidar várias características de solo. Em geral, a classificação taxonômica dos tipos de solo, baseada em cor, granulometria e fertilidade, ajuda a identificar os tipos principais de solo e sua distribuição com relativa confiabilidade. Então, a classificação popular pode ser checada e comparada com as análises sistemáticas do solo. As análises de solo devem incluir tanto a análise química (pH, P, K, Ca, etc.) como a análise textural (areia, argila, limo), permitindo a agregação de dados em níveis regionais (Nicholaides & Moran, 1995).

## Nível regional de análise

O nível regional/de paisagem fornece uma visão mais agregada das práticas de manejo e condicionantes que moldam uma cobertura e uso da terra específicos. Nesse nível, os problemas ambientais de longo prazo podem ser mais facilmente identificados e previstos do que nas escalas da fazenda ou da unidade doméstica (Booth, 1989; Skole & Tucker, 1993). Esse nível integra informações da classe de vegetação, do solo e dos níveis de fazenda/unidade doméstica (Adams & Gillespie, 2006). No entanto, os dados do nível da paisagem também informam características importantes dos fenômenos em nível local que não são mensuráveis em escala específica. Por exemplo, as informações a respeito de heterogeneidade e grau de manchas de vegetação são parâmetros importantes a incluir na análise específica ao local, mas só podem ser observadas em nível de paisagem.

Podemos identificar quatro etapas importantes na pesquisa em nível de paisagem:

1. Entender a natureza ecológica e socioeconômica das características de interesse na análise de uso e cobertura da terra.
2. Identificar a extensão e a frequência das características de interesse que podem informar as escalas espaciais e temporais apropriadas de análise.
3. Aumentar a amostragem progressivamente, dependendo da emergência de variáveis importantes; um processo que os ecólogos da paisagem invocam usando uma "abordagem adaptativa" (Turner *et al.*, 1989) e que apresenta alguma semelhança com o que Vayda denomina "contextualização progressiva" (1983).
4. Considerar os métodos empíricos necessários para verificar a exatidão do mapa, mudar a detecção e projeções/predições, em particular quando associadas ao planejamento do uso da terra.

Atualmente, os dados de satélite são as fontes de dados mais importantes para a análise em nível regional/de paisagem. No entanto, estão sempre associados a outras fontes, como imagens de radar, fotografias aéreas, mapas temáticos e topográficos. No passado, os cientistas sociais

deixavam esse tipo de trabalho para outros estudiosos, mas hoje um número cada vez maior deles está desenvolvendo essas habilidades e dando contribuições úteis para a análise das imagens de satélite (Behrens, 1990 e 1994; Brondizio, 2008; Brondizio *et al.*, 1994 e 1996; Moran *et al.*, 1994; Moran, McCracken, Brondizio, 2001; Moran, Brondizio, McCracken, 2002; Nyerges & Green, 2000; Tucker *et al.*, 2005; Tucker & Southworth, 2005). Cientistas políticos, geógrafos, economistas e ecólogos também se tornaram usuários entusiasmados de dados de satélite para aumentar a cobertura espacial de observações e análises. A análise digital das imagens de satélite pode ser dividida em quatro partes: pré-processamento, análise espectral, classificação e pós-processamento. No pré-processamento, devemos definir um subconjunto de imagens, georeferenciá-lo em mapas disponíveis e sistemas de coordenadas, e registrá-lo em outras imagens disponíveis e sistemas de coordenadas durante o trabalho de campo e do procedimento estatístico usado no georeferenciamento (Jensen, 2005). Uma imagem georeferenciada é uma imagem com uma grade de coordenadas geográficas, sendo fundamental para relacionar os dados da paisagem aos dados específicos do local. Se uma análise multitemporal for desejada, as imagens de diferentes datas precisarão ser registradas pixel a pixel, criando uma imagem composta que forneça uma dimensão de mudança temporal em nível de pixel, permitindo assim a análise das trajetórias espectrais referentes à mudança de uso da terra. Por exemplo, em uma imagem com duas datas (por exemplo, duas imagens separadas por cinco anos), podemos quantificar a mudança durante a recuperação da vegetação secundária ou uma mudança de culturas nesse período com considerável exatidão, incluindo estatísticas para a mudança na área para cada tipo ou classe de vegetação.

A análise digital garante flexibilidade para o uso de diversas escalas para investigar parâmetros e definir procedimentos de amostragem, dependendo do padrão de uso e cobertura da terra, e da extensão da área de estudo. Em geral, podemos trabalhar em escala regional ou da paisagem (por exemplo, a imagem total do Landsat ou Spot, isto é, áreas de

185 km × 185 km), porém permanecendo em associação estreita com processos em escala local (por exemplo, subconjuntos de imagem de uma bacia hidrográfica) para ajudar na seleção de áreas de amostragem que informarão a imagem a respeito de características espectrais e espaciais específicas de classes de uso e cobertura da terra. Ver, na Prancha 4, uma análise em nível de propriedade (local) integrada a uma análise regional ou da paisagem.

Ao adotar uma abordagem híbrida na classificação e no processamento da imagem, podemos integrar procedimentos de classificação com e sem supervisão. Uma abordagem híbrida permite o desenvolvimento da análise de padrões espectrais presentes na imagem, em conjunto com informações terrestres, e a obtenção de padrões de assinaturas espectrais responsáveis pela diferenciação detalhada das feições de uso e cobertura da terra. Dessa maneira, pode ser desenvolvido um modelo conceitual espectral ao qual as feições de interesse possam ser incorporadas. O modelo considera as características de reflexão e absorção dos componentes físicos que englobam cada feição. Por exemplo, na imagem do Landsat com sensor TM, tenta-se explicar a absorção de clorofila nas bandas visíveis do espectro, a refletância de mesofilo na banda do infravermelho próximo e a absorção de água, tanto da planta como do solo, nas bandas do infravermelho médio (Mausel *et al.*, 1993; Brondizio, Mausel, Wu, 1996). A integração dessas feições espectrais com os dados de campo a respeito da altura da vegetação, área basal, densidade e dominância de espécies pode ser utilizada para diferenciar estágios de recuperação secundária (Moran *et al.*, 1994). A análise de estatísticas espectrais obtidas de agrupamentos sem supervisão, de áreas de feições e história de uso da terra conhecidas permite o desenvolvimento de estatísticas representativas para a classificação com supervisão de uso e cobertura da terra (ver as diversas publicações de Liu *et al.*, *downloads* em <http://www.indiana.edu/~act>, que discutem abordagens metodológicas para classificação com supervisão usando abordagens híbridas).

A análise da precisão da classificação requer grande quantidade de trabalho de campo. A precisão pode diminuir à medida que a variabilidade aumenta. Portanto, a amostragem da verdade terrestre precisa au-

mentar na mesma proporção. Nesse caso, o uso de um aparelho de GPS é necessário para fornecer informações confiáveis de verdade terrestre, ao passo que em áreas com baixa heterogeneidade espacial, a verificação visual do ponto pode ser suficiente. A verificação da precisão de uma série temporal de imagens de satélite para determinada área requer a análise das características da vegetação e entrevistas acerca da história de um local específico com a população local; assim, pode-se relacionar com exatidão eventos do passado com aspectos presentes da cobertura da terra (Mausel *et al.*, 1993; Brondizio, 2005 e 2008).

Nessas escalas, a integração dos dados é um processo interativo durante a análise laboratorial das imagens e dados do campo e também durante o trabalho de campo (Meyer & Turner, 1994; Moran & Brondizio, 1998). A integração e a análise de dados avançados são obtidas por meio de procedimentos associados ao SIG, que integram camadas de informações espaciais a bancos de dados georeferenciados de informações socioeconômicas e ecológicas. O georeferenciamento do banco de dados para mapas e imagens deve ser considerado desde o início da pesquisa para que a integração apropriada e a identificação específica ao local sejam compatíveis. Dados sobre inventários de fazenda/unidade doméstica e vegetação/solo devem ser associados a números de identificação específicos, que sejam georeferenciados a imagens e mapas, de modo que associações integradas possam ser obtidas. Por exemplo, os limites de uma propriedade rural podem compor uma camada de posse de terra que se sobreponha a um mapa de uso e cobertura da terra. Essas duas camadas podem ser sobrepostas a outra camada que contenha a distribuição espacial das unidades domésticas. Cada unidade doméstica é dotada de uma identificação específica que a relaciona a um banco de dados com informações socioeconômicas, demográficas e de outros tipos. Em outra camada, todos os locais usados para o inventário de vegetação e solo podem ser associados com um banco de dados contendo informações a respeito de composição florística, características estruturais e fertilidade do solo, que também se relacionarão com a história de uso da terra.

### Nível global de análise

A década de 1990 assistiu ao desenvolvimento muito rápido de abordagens denominadas variadamente como “modelagem de avaliação integrada”, modelos de circulação global (MCGs), etc., em um nível de biosfera de análise. Algumas delas têm até conseguido enfatizar os impactos humanos sobre o sistema terrestre (ver Weyant *et al.*, 1996). Os MCGs, particularmente, foram desenvolvidos em primeiro lugar e careciam muito de uma dimensão humana. Até certo ponto, preocupavam-se com processos climáticos e atmosféricos, usando uma escala muito agregada de análise, que tornava até as grandes unidades escalares – como as fronteiras nacionais – pouco relevantes para o entendimento das diferenças de taxas de consumo de energia, por exemplo. No entanto, nos últimos anos emergiu uma nova geração de modelos que passou a ter relevância para os cientistas sociais ambientais. Esses modelos são um grande aperfeiçoamento do trabalho pioneiro dos modelos do Clube de Roma, que surgiram no início dos anos 1970 em *Limits to Growth* (Meadows *et al.*, 1972). Não obstante os diversos problemas com essa iniciativa de primeira geração, ela introduziu conceitos importantes, como “retroalimentação”, “excesso” e “limites de recursos” no discurso cotidiano e no debate científico. A intrépida iniciativa seguinte veio do Instituto Internacional de Análise Aplicada de Sistemas (International Institute of Applied Systems Analysis – IIASA), na Áustria, com seu modelo de Mundo Finito investigando os fluxos globais de energia (Häfele, 1980). As críticas a ela na comunidade científica foram muito grandes, e pouca coisa aconteceu até o primeiro Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) publicar sua primeira avaliação, em 1990.

Os modelos de nova geração se beneficiaram do progresso feito pelos MCGs, da evidência crescente a respeito da natureza global dos problemas ambientais e da democratização da tecnologia informática por meio de sua ampla disponibilidade (Alcamo, Leemans, Kreijlman, 1998, p. 262). A etapa seguinte era clara: os aspectos sociais e físicos do sistema global tinham de ser acoplados nos chamados “modelos inte-

grados de avaliação.” Atualmente, a maioria dos grupos de modelagem global reconhece que, para progredir na exatidão e na previsibilidade dos esforços de modelagem nessa escala, deve haver um esforço simultâneo de ligá-los aos modelos escalares regionais, que podem melhorar a qualidade da resolução espacial e o papel dos condicionantes humanos nas mudanças globais.

Um dos modelos mais sofisticados atuais é conhecido como IMAGE 2 (Alcamo, Leemans, Kreileman, 1998). Ele foi o primeiro modelo integrado global com resolução geográfica, recurso importante que permite a representação aprimorada dos processos dinâmicos globais, incluindo retroalimentações, rapidez e eficiência de testes de novos dados. Compõe-se de três sistemas de modelos totalmente interligados: o sistema energia-indústria, o sistema ambiental terrestre e o sistema de atmosfera-oceano. O primeiro computa a emissão dos gases responsáveis pelo efeito estufa e outras emissões importantes em treze regiões do mundo; o segundo simula mudanças na cobertura global da terra em uma escala em grade baseada em fatores climáticos e econômicos; o último computa o acúmulo de gases responsáveis pelo efeito estufa e aerossóis, assim como o impacto dele resultante sobre as temperaturas e precipitações médias. Fatores como a mudança populacional, a mudança econômica e a mudança técnica são particularmente importantes no modelo terrestre – e aqueles mais necessários em relação aos dados regionais de boa qualidade para informar o modelo baseado em grade. Até hoje, poucos cientistas sociais ambientais se juntaram a essa comunidade de esforços de modeladores globais, forçando-os a fazer estimativas baseadas em estatísticas bastante grosseiras de escala nacional, em vez de estudos regionais mais refinados. Essa é uma direção nova e importante para os cientistas sociais ambientais e ecólogos, dada a importância dos modelos de simulação global sobre as políticas, como comércio de carbono, definição de tetos de emissão de dióxido de carbono no início do século XXI e trocas de dívida por natureza. Os principais participantes dessas práticas foram os economistas, que se basearam no uso de funções de utilidade otimizadas, em vez do comportamento de soluções satisfatórias

mais realista e menos que ótimo das populações humanas, quer no Primeiro ou no Terceiro Mundo.

A relevância das abordagens regionalmente informadas para os modelos globais torna-se evidente quando começamos a projetar um sistema de classificação de tipos de vegetação e de classe de uso da terra como um primeiro passo para que ela seja boa. Talvez os leitores queiram verificar uma publicação recente, a revista *Global Change Biology*, criada para promover o entendimento da interface entre todos os aspectos das mudanças ambientais atuais e os sistemas biológicos, incluindo o aumento das concentrações de  $O_3$  e  $CO_2$  troposférico, mudanças climáticas, perda de biodiversidade e eutroficação. Avanços podem ser obtidos mediante associação da bibliografia e dos bancos de dados da área de estudo, análise de imagens de satélite, observação de trabalho de campo e entrevistas etnológicas com moradores locais. Diferentes níveis de organização são requeridos para definir a cobertura de vegetação de uma região. Em geral, eles são organizados para ajustar uma escala específica de análise ao arranjo fitogeográfico e aos tipos de uso da terra presentes na área. Em outras palavras, começamos com um nível mais agregado de classes principais dominantes (primeiro), adequadas a uma escala regional, e prosseguimos com maiores detalhes no próximo subnível (segundo) para informar escalas mais detalhadas. Por exemplo, o primeiro nível pode incluir coberturas de vegetação importantes, como floresta, savana secundária e savana. No segundo nível, mais detalhado, a floresta é subdividida em aberta e fechada; a sucessão secundária subdivide-se em secundária antiga e secundária jovem; e a savana, nos tipos de gramíneas e arborizada. No terceiro nível desse sistema de classificação devem ser incluídas informações ainda mais detalhadas para explicar a variabilidade da vegetação requerida nessa escala local. Assim, uma nova subdivisão da classe florestal pode incluir uma terceira variação estrutural relativa às duas anteriores e/ou a uma variação florística delas, como uma floresta com uma espécie arbórea dominante. A importância do desenvolvimento de uma chave de classificação detalhada é fundamental para informar a análise de uso e cobertura da terra em nível da paisagem, assim como a distribuição amostral no nível específico ao local.

## Direções futuras

Atualmente, a análise multiescalar das interações homem-ambiente constitui um dos focos da atenção teórica e metodológica da comunidade de pesquisa, pois a solução dos desafios da análise intercalar é um modo de assegurar que nosso trabalho é realista e útil. Na década passada, nós nos acostumamos a dar atenção às questões escalares – particularmente às escalas temporais e espaciais – no entendimento das interações homem-ambiente. Embora tenham sido feitos avanços consideráveis (Gibson, Ostrom, Ahn, 1998 e 2000), muito ainda precisa ser feito. Por exemplo, ainda não entendemos claramente por que o processo que explica a maior parte da variância em uma escala desaparece amplamente como um fator explanatório em outra escala (Moran & Brondizio, 1998). É porque essa variável não é importante na outra escala, ou esse é um resultado cujos dados para essa variável não estão disponíveis na outra escala? Temos uma diferença de explicação ou uma diferença na qualidade/disponibilidade dos dados?

O problema de escala é particularmente desafiador nas ciências sociais, visto que, como observado anteriormente, a qualidade das observações diminui à medida que atravessamos escalas: da local para a nacional, da nacional para a global. O grau de manchas das interações homem-ambiente representa desafios consideráveis para questões de escala. As pessoas tendem a se concentrar em povoadamentos, embora seu impacto possa ser sentido muito além. Como quantificamos o impacto da população humana de uma cidade japonesa sobre a floresta nas Filipinas ou no Brasil, da qual a população japonesa obtém uma quantidade considerável de produtos feitos de madeira? A tradição da pesquisa baseada em lugar, tanto na ecologia como nas ciências sociais, particularmente em lugares locais, tem nos dado *insights* valiosos a respeito das interações entre espécies e entre elas e seu ambiente imediato – e os processos de retroalimentação que ajudam a explicar seu comportamento adaptativo em relação às oportunidades e restrições enfrentadas. No entanto, a prática tradicional é desafiada pelo sempre crescente reconhecimento de que muitas espécies, incluindo a humana, ficam de olho não só nos recursos

de seu ambiente local, mas também nos dos ambientes longínquos. Geralmente, entende-se que a retroalimentação negativa é o modo primário pelo qual ajustamos as mudanças normais. Nos casos em que nossos recursos são extraídos de locais distantes, e não do nosso ambiente imediato, os mecanismos de retroalimentação são diferentes ou ausentes, devido à desconexão do consumo com lugares em que não podemos fazer muito a respeito? É um caso de divergência espacial entre variáveis dependentes e independentes? Como as características dessas retroalimentações afetam as decisões tomadas referentes ao uso desses recursos no ano ou na década seguinte? Quais são os tempos de defasagem nos processos de retroalimentação, em distâncias espaciais diferentes, entre as pessoas e os recursos que elas usam?

O foco contínuo em como podemos prestar atenção às escalas espaciais e temporais, solucionando as incertezas que enfrentamos no entendimento dos processos em escalas diferentes de análise, continuará a moldar a ciência nos próximos anos. E é assim que deveria ser, visto que esse desafio afeta todas as ciências e nossa capacidade de tomar decisões que são informadas em escala, em vez de mal-informadas e destrutivas desses ecossistemas.

## ■ **Biocomplexidade nos sistemas ecológicos**

AO INGRESSAR NO SÉCULO XXI, ENFRENTAMOS DESAFIOS E OPORTUNIDADES CIENTÍFICOS E DE ENGENHARIA RESULTANTES DE MUDANÇAS AMBIENTAIS ACELERADAS... NOVAS PESQUISAS E INOVAÇÕES CIENTÍFICAS E DE ENGENHARIA SÃO NECESSÁRIAS PARA ENTENDER AS MUDANÇAS E OS IMPACTOS A RESPEITO DE DIVERSOS ESTRESSES SOBRE OS SISTEMAS AMBIENTAIS E TAMBÉM PARA DAR RESPOSTAS AOS RISCOS NATURAIS. AGORA, MAIS DO QUE NUNCA, OS CIENTISTAS E OS ENGENHEIROS DEVEM LIDAR COM COMBINAÇÕES DE FATORES, COMO AS INTERAÇÕES ENTRE ATIVIDADES HUMANAS E CICLOS NATURAIS, EM DIFERENTES ESCALAS ESPACIAIS E TEMPORAIS.

Pfirman e Nádhera Education (2005)

### **Introdução**

O termo *biocomplexidade* foi introduzido por Rita Coldwell, ao assumir a diretoria da Fundação Nacional de Ciências (National Science Foundation – NSF). Na ocasião, poucas pessoas entenderam o que ela quis dizer, mas ao longo dos anos o termo tornou-se emblemático no estudo da complexidade dos sistemas ecológicos e hoje é um programa

regularmente financiado em diversos diretórios da NSF, incluindo o Diretório de Ciências Sociais e Comportamentais (Social and Behavioral Sciences Directorate), onde é conhecido como Programa de Sistemas Acoplados Homem-Natureza (Coupled Natural Human Systems Program).

Entender a biocomplexidade requer uma abordagem holística, que pode ser obtida pelo desenvolvimento da capacidade de identificar, recuperar e sintetizar diversos dados de um conjunto de fontes interdisciplinares e interestaduais. Esse esforço é conhecido como Rede de Conhecimento da Biocomplexidade (Knowledge Network for Biocomplexity) e está sendo usado pelo Centro Nacional de Análise e Síntese Ecológica (National Center for Ecological Analysis and Synthesis), na Universidade da Califórnia, em Santa Barbara, para instruir novos pesquisadores em abordagens que enfatizam a integração e síntese multiescalar (Andelman *et al.*, 2004).

Cadenasso, Pickett e Grove (2006) propuseram uma definição de biocomplexidade que incorpora a heterogeneidade espacialmente explícita, a conectividade organizacional e a história como elementos essenciais na compreensão do funcionamento de sistemas acoplados homem-natureza. As vantagens oferecidas por essa abordagem são muitas. Sua ênfase na *heterogeneidade* espacialmente explícita leva em conta a análise multiescalar desde uma mancha de vegetação até ecossistemas de grande escala. A *conectividade* abrange a complexidade organizacional e integra abordagens clássicas da ecologia, como o estudo de fluxos de energia, matéria e informação (H. Odum, 1971), com uma nova ênfase no acoplamento do sistema. A *história* introduz um novo elemento à ecologia, que facilita a interação com os componentes humanos desses sistemas complexos – estruturas do sistema, interações e resultados são um produto de eventos historicamente contingentes e estão sujeitos a surpresas, comportamentos não lineares e legados, e requerem atenção a especificidades de tempo e lugar (Cadenasso, Pickett, Grove, 2006).

Há cerca de quinze anos, a biocomplexidade e a teoria da complexidade receberam atenção considerável de diversas disciplinas. Tornaram-se formas abreviadas de descrever os ricos padrões de interação

e comportamento nos sistemas acoplados homem-natureza. Alguns acadêmicos parecem sugerir que essa abordagem levará a um entendimento unificado de sistemas complexos, enquanto outros a consideram uma continuação de esforços de síntese passados, como a teoria da hierarquia (Allen & Starr, 1982), o holismo (Moran, 2000) e a análise de sistemas no início da era cibernética (Buckley, 1968). De fato, pode-se remontar às origens e à continuidade da biocomplexidade essas primeiras iniciativas de pensamento e análise de sistemas (Bolte *et al.*, 2006). Uma grande mudança é que a biocomplexidade representa um enquadramento centrado na biologia (se comparado ao enquadramento centrado na cibernética, nas ciências sociais e na engenharia, como foi o caso das primeiras iniciativas associadas a sistemas), que é mais apropriado no que alguns denominaram o “século da biologia” (Lubchenco, 1998; Wilson, 1998). Atualmente, parte do seu valor único vem do fato de que se torna mais receptivo formular perguntas particularmente oportunas a respeito de sustentabilidade, resiliência, eventos limiares e previsibilidade (Bennett & McGinnis, 2008). Uma consideração especialmente valiosa é a mudança de foco de elementos de sistema para a natureza *acoplada* desses sistemas, facilitando assim a pesquisa a respeito de interações homem-ambiente (Berkes, Colding, Folke, 2003).

Facilitar não significa necessariamente tornar esse trabalho mais simples. Ao contrário. A modelagem desses sistemas acoplados representa novos desafios, pois envolve decisões humanas em escalas multiespaciais e multitemporais, dinâmica da paisagem, processos ecológicos e o modo como todos interagem simultaneamente. Esses modelos tratam de questões importantes a respeito de vulnerabilidades do sistema, adaptação, resiliência, retroalimentação, não linearidades e propriedades emergentes observadas com dificuldade de outra forma (Bolte *et al.*, 2006). Um desafio específico é proposto pelas não linearidades. Embora os fenômenos ecológicos geralmente variem dentro de faixas delimitadas, mudanças não lineares muito rápidas podem ocorrer em sistemas complexos, nos quais até mesmos valores limiares pequenos são excedidos. Assim, entender os valores limiares intrínsecos e extrínsecos pode resultar em recomposições do equilíbrio do sistema (quando um sistema é

redefinido em um ponto de equilíbrio diferente), colapso do sistema e extinções de espécies. Sob condições de mudanças climáticas, em que a importância dos valores limiares para diferentes espécies em sistemas maiores é desconhecida, em que os graus de tolerância e as interações necessárias para manter o sistema são desconhecidos, o perigo de cruzar esses limiares é especialmente alto, e a modelagem dessas dinâmicas é um desafio particular (Burkett *et al.*, 2005). A não linearidade em sistemas complexos leva a dependências históricas e efeitos múltiplos e à necessidade de determinar que condições ambientais ou decisões humanas são os resultados da auto-organização. O papel da evolução em moldar as propriedades do ecossistema está oculto dentro dessas possíveis trajetórias, quer os sistemas tornem-se mais resilientes ao longo do tempo, quer tendam a um comportamento caótico e se reestruturam como um mecanismo de transformação (Levin, 1998 e 2000).

Essa transformação é mais bem explicada por conceitos que consideram os ecossistemas e nosso ambiente global sistemas adaptativos complexos (Levin, 2005), em que padrões emergem das ações dos agentes individuais e interação com elas, e em que a cooperação possa se desenvolver e proporcionar a regulação dos ambientes locais, e, de fato, impor regularidade em níveis superiores (auto-organização) (Levin, 2005). Assim, a história dos ecossistemas terrestres é a história da coevolução de organismos através do espaço, do tempo e das escalas de complexidade.

Pickett, Cadenasso e Grove (2005) assinalam que a biocomplexidade resulta de uma “multiplicidade de níveis e relacionamentos interconectados”, mas que ainda não existe nenhum arcabouço integrativo para facilitar a aplicação desse conceito aos sistemas acoplados homem-natureza. Os autores apresentam um arcabouço que enfoca as ligações entre disciplinas diferentes, que estão empenhadas nos estudos de sistemas acoplados homem-natureza, incluindo as ciências ecológica, física e socioeconômica. Ele inclui três dimensões de complexidade: espacial, organizacional e temporal. A complexidade espacial aumenta à medida que o foco muda do tipo e da quantidade de elementos da heterogeneidade espacial para uma configuração explícita dos elementos. Da mesma forma, a complexidade organizacional aumenta à medida que o foco muda das unidades

des desconectadas para a conectividade entre as unidades funcionais. Por fim, a complexidade temporal aumenta à medida que o estado atual do sistema passa a se basear cada vez mais nos estados passados, refletindo ecos, legados e efeitos evolutivos indiretos desses estados. Essa noção conceitual tridimensional da biocomplexidade permite conexões entre modelos resultantes de diferentes disciplinas, a serem formulados em um nível adequado de complexidade para integração (Pickett, Cadenasso, Grove, 2005).

Recentemente, o estudo de sistemas adaptativos complexos tornou-se o foco principal da pesquisa interdisciplinar nas ciências sociais e naturais. Os sistemas não lineares são ubíquos. As fases iniciais da pesquisa de sistemas não lineares enfocaram o caos determinístico, mas estudos mais recentes investigaram as propriedades dos sistemas auto-organizados ou antigos. Para os matemáticos e físicos, a maior surpresa é que a complexidade esconde-se dentro de sistemas extremamente simples. Para os biólogos, é a ideia de que a seleção natural não é a única fonte de ordem no mundo biológico. Para os cientistas sociais, são ideias como fenômenos emergentes – a ideia de que os padrões globais complexos com novas propriedades podem emergir das interações locais – que podem ter um impacto comparável (Lansing, 2003).

### **Processos espacialmente explícitos em sistemas ecológicos e sociais**

Na ecologia, nos últimos vinte anos, o desenvolvimento da teoria espacialmente explícita levou ao reconhecimento geral de que a heterogeneidade espacial no ambiente biofísico, juntamente com a dispersão espacial das populações dos seres vivos, é um elemento fundamental na dinâmica populacional (Tilman & Kareiva, 1997; Bascompre & Sole, 1998). No mais abstrato dos modelos populacionais “espacialmente explícitos” da ecologia, o espaço é incluído pela definição do ambiente como constituído de diversas localidades e pelo reconhecimento de que os organismos podem se deslocar entre as localidades. Essas extensões relativamente óbvias de modelos de dinâmica populacional foram suficientes para indicar que o espaço desempenha um papel fundamental na sobrevivência das espécies individuais, na sobrevivência comum de

diversas espécies que competem pelos mesmos recursos, na estabilidade das populações de predadores e presas e de hospedeiros e parasitas, assim como na coevolução das espécies, incluindo a evolução da cooperação (Axelrod, 1984). Os modelos espacialmente explícitos abrangem diversas questões de teoria ecológica, mas essa discussão enfocará os modelos que podem aprimorar o entendimento dos efeitos da destruição e da fragmentação de habitats na biocomplexidade.

Muitos dos resultados mais importantes da ecologia espacial foram obtidos com base em um arcabouço metapopulacional, isto é, uma abordagem geral que atualmente está estabelecida na ecologia (Hanski & Gilpin, 1997). Os modelos de metapopulação tratam as populações de organismos como conjuntos de populações locais distintas, com cada população local ocupando uma mancha distinta do habitat. As manchas formam uma rede de "habitats adequados", que são localmente distintos entre si, e formam manchas intervenientes de território, inadequadas como habitats. Os membros das populações locais podem se dispersar entre essas manchas e colonizar outras que estejam desocupadas. Os modelos metapopulacionais substituem as simplificações extremas dos modelos populacionais não espaciais (em que todos os pares de indivíduos são igualmente propensos a interagir entre si e todos os indivíduos são igualmente propensos a interagir com qualquer elemento do ambiente) por um arcabouço que leva a modelos razoavelmente manejáveis matemática e informaticamente, mas que ainda podem produzir resultados valiosos a respeito do crescimento e da extinção de populações em ambientes complexos. Resultados importantes acerca dos processos envolvidos na extinção de espécies foram obtidos, por exemplo, com base em modelos em que cada mancha em uma rede pode ser caracterizada simplesmente como ocupada ou desocupada, e em que o crescimento e a sobrevivência de uma população dependem de um equilíbrio entre as taxas de extinções locais (particularmente manchas) e a taxa pela qual as manchas desocupadas são colonizadas por populações que se dispersam das manchas atualmente ocupadas.

Os modelos de metapopulação e outros em ecologia espacial produziram resultados teóricos importantes a respeito de como a destruição

e a fragmentação do habitat tendem a afetar a biodiversidade, provocando a extinção de populações, globalmente ou em áreas locais (Hanski, 1998). A maioria desses resultados é genérico e abstrato, tendo resultado do raciocínio matemático genérico ou da análise informática de ambientes relativamente simples, mas aponta para direções fundamentais referentes à pesquisa sobre biodiversidade. Por exemplo, esses resultados indicam que as relações entre sobrevivência populacional e biodiversidade, de um lado, e destruição e fragmentação de habitats, de outro, tendem a ser fortemente não lineares, isto é, a quantidade e a fragmentação do habitat podem variar amplamente com pouco efeito sobre as perspectivas para a sobrevivência populacional, mas essas perspectivas de sobrevivência podem se deteriorar muito repentinamente quando algum limiar crítico no tamanho da fragmentação do habitat é alcançado. Além disso, esses limites críticos tendem a depender muito das capacidades dos organismos específicos de se dispersar entre as manchas dos habitats, característica extremamente difícil de observar e de mensurar para a maioria das espécies. Um segundo resultado bastante genérico obtido do raciocínio matemático e da informática é a ideia de uma "dívida de extinção", a qual indica que a população pode sobreviver por um tempo considerável mesmo em um ambiente que mudou de modo a condenar a população à extinção. O terceiro é que os modelos de metapopulação indicam que a destruição e a fragmentação dos habitats podem alterar as condições da biodiversidade, mudando as relações competitivas entre as espécies. Por exemplo, a fragmentação dos habitats pode favorecer espécies cuja capacidade de dispersão e colonização de novas áreas supere a de espécies conflitantes, mais competitivas em outros aspectos.

As contribuições mais importantes dos modelos ecológicos espacialmente explícitos para questões a respeito dos efeitos de destruição e fragmentação de habitats sobre a biodiversidade e a extinção de espécies foram *insights* teóricos a respeito das maneiras que os ecossistemas podem responder ao estresse da destruição do habitat. Esses *insights*, um tanto genérico e abstratos, foram obtidos mediante raciocínio matemático e análise informática de situações genéricas e abstratas. A pesquisa experimental e a observação de histórias de sistemas específicos não

foram desimportantes na ecologia espacial, e as observações de campo de casos particulares produziram alguns *insights* importantes (Hanski & Gilpin, 1997). No entanto, a avaliação empírica e a verificação de *insights* da teoria espacialmente explícita apresentaram um conjunto de problemas bastante desafiador. Experimentos para testar as implicações de modelos teóricos podem requerer quantidades extremamente grandes de replicações, que envolvem observações por períodos de tempo muito longos. Modelos empíricos de sistemas espaciais também tendem a exigir estimativas de parâmetros difíceis de estimar (principalmente parâmetros de dispersão de espécies), e a estrutura dos modelos torna provável o fato de que pequenos erros nas estimativas desses parâmetros produzirão erros muito grandes nos resultados do modelo (Steinberg & Kareiva, 1997; Hartway, Ruckelshaus, Kareiva, 1998; Harrison & Bruna, 1999). Os mesmos problemas dificultarão muito o desenvolvimento de modelos que tenham a capacidade de prever os efeitos de mudanças ambientais específicas sobre a sobrevivência de populações e a manutenção da biodiversidade. Portanto, as principais contribuições dos modelos ecológicos espacialmente explícitos para o manejo da biodiversidade tendem a consistir de informações gerais a respeito da natureza dos processos populacionais em ambientes espaciais e a forma como esses processos respondem a mudanças nos habitats.

Grande parte da pesquisa das ciências sociais a respeito dessas questões também está sendo realizada dentro de arcabouços explicitamente espaciais, mas os cientistas sociais têm sido muito menos ativos no desenvolvimento da teoria explicitamente espacial (NRC, 1999a). Em vez disso, os arcabouços espaciais são fundamentais para organizar as informações utilizadas na pesquisa empírica. Os cientistas sociais ambientais têm desenvolvido importantes métodos de coleta de informações a respeito das mudanças de uso e cobertura da terra, com base em diversas fontes e na organização dessas informações, possibilitando a realização de inúmeras análises explicitamente espaciais de como o habitat é perdido e fragmentado à medida que o uso e a cobertura da terra passam pela modificação humana (Moran *et al.*, 1994, 1999 e 2000; Liverman *et al.*, 1998; Walsh *et al.*, 1999). A tecnologia de sensoriamento remoto, especialmen-

te o realizado por satélite, foi decisiva na coleta dessas informações, e o desenvolvimento contínuo dos sistemas de informação geográfica foi um fator fundamental na organização e análise dessas informações.

A capacidade de organizar informações detalhadas a respeito de mudanças de uso da terra em regiões de tamanho considerável possibilitou a realização de diversas análises sobre o modo como as variáveis demográficas, sociais e econômicas estão relacionadas às mudanças no uso da terra, especialmente em ambientes onde o habitat florestal está sendo destruído pela atividade humana (Lambin, 1994; Entwistle *et al.*, 1998; Moran *et al.*, 1999). Essas análises se preocuparam sobretudo com a investigação de hipóteses a respeito dos determinantes sociais e econômicos próximos em relação às mudanças de uso e cobertura da terra (desmatamento, intensificação da agricultura, urbanização, crescimento populacional). A destruição e a fragmentação de habitats não foram tema central da pesquisa, embora a conexão com as mudanças de uso e cobertura da terra permita que avanços ocorram naturalmente tomando-se por base trabalhos existentes (Moran *et al.*, 1994, 1996 e 2000; Moran, Brondizio, Mause, 1994). Até hoje, contudo, esses trabalhos não incorporaram os avanços obtidos das abordagens matemáticas não lineares, ainda que os cientistas sociais sublinhassem regularmente que os processos de ecossistemas humanos não podem ser tratados como se eles se comportassem de forma linear.

Para fazer avançar a situação da modelagem espacialmente explícita da biodiversidade, temos de ingressar completamente no âmbito dos processos da biocomplexidade, em que as propriedades dos sistemas não podem ser explicadas plenamente pelo entendimento das partes componentes. Esses sistemas caracterizam-se por não linearidades, propriedades emergentes e retroalimentações positivas. As pesquisas a respeito de dinâmicas populacionais estão sendo gradualmente informadas pelos *insights* de dinâmicas não lineares; no entanto, esses *insights* foram integrados menos completamente dentro de um arcabouço espacial, e raramente levaram em conta o importante papel que as ações e instituições humanas desempenham na dinâmica das populações em diversos níveis de análise. Um passo decisivo na integração de processos sociais e ecológicos é iden-

tificar escalas espaciais e temporais comuns no funcionamento de dois tipos de processos, isto é, “para extrair conhecimento físico de um sistema complexo, devemos focar o nível correto de descrição” (Goldenfeld & Kadanoff, 1999). Podemos começar, por exemplo, com uma unidade flexível – como uma paisagem – que possa incluir comunidades humanas e também comunidades de outros organismos em interação, mas cujas escalas possam aumentar ou diminuir de acordo com o que for mais conveniente. Geralmente, as paisagens podem ser definidas por bacias hidrográficas ou algum sistema biofísico integrado similar, em que as instituições humanas também funcionam e afetam todos os organismos em certo grau. Nessa paisagem, podemos formular um modelo dinâmico preliminar caracterizado por dinâmica não linear, mas que inclui o papel das populações humanas à medida que seu comportamento afeta as demais espécies. Então, podemos procurar acoplar as experiências e a teoria nas simulações informáticas.

Nesse aspecto, um avanço importante vem da pesquisa produzida por cientistas financiados pelo programa de sistemas acoplados homem-natureza da NSF. Esses estudos (Liu, Diez, Carpenter, 2007a e 2007b) revelam padrões e processos complexos não evidentes quando estudados por cientistas sociais ou naturais separadamente. O acoplamento de sistemas homem-natureza varia através do espaço, tempo e unidades organizacionais. Também exibe dinâmicas não lineares com limiares, ciclos de retroalimentação, retardos, heterogeneidade e surpresas. Talvez de maneira ainda mais relevante, o acoplamento passado parece ter efeitos de legado nas possibilidades presentes e futuras para as interações acopladas, levando à necessidade de prestar muita atenção nas trajetórias passadas (história ambiental), no modo como as pessoas transformaram o ambiente (ecologia histórica), como os limiares foram cruzados e por quê.

Walsh e McGinnis (2008) investigam a natureza dos sistemas acoplados homem-natureza, enfatizando a biocomplexidade, isto é, o estudo interdisciplinar e integrado dos sistemas acoplados homem-natureza para abordar as causas e consequências da dinâmica da paisagem. Muitas vezes, a biocomplexidade vê as paisagens como sistemas complexos que consistem de interações de processos homem-natureza nas quais os padrões da

paisagem são importantes propriedades emergentes de dinâmicas complexas. Além disso, essas dinâmicas abrangem as interações complexas dentro e entre os sistemas ecológicos, os sistemas físicos das quais dependem e os sistemas humanos com as quais interagem (Michener *et al.*, 2003; Walsh & McGinnis, 2008). Nos mesmos termos dessa abordagem, Walsh *et al.* (2008) examinam sistemas acoplados homem-natureza no norte da Amazônia equatoriana, com base na teoria da complexidade ligada ao trabalho com autômatos celulares, em que os padrões de mudanças de uso e cobertura da terra foram espacialmente simulados para investigar a extensificação do desmatamento e da agricultura das unidades domésticas rurais. A intenção básica era entender as relações entre pessoas e ambiente considerando explicitamente os relacionamentos do processo-padrão e a natureza dos mecanismos de retroalimentação. A abordagem de modelo de autômatos celulares enfatiza as dimensões humanas das mudanças de uso e cobertura da terra, incluindo características socioeconômicas e demográficas em nível de unidade doméstica, juntamente com dados biofísicos que descrevem as dotações de recursos de fazendas, a acessibilidade geográfica das fazendas a estradas e comunidades, e a evolução da natureza das interações homem-ambiente ao longo do tempo e no espaço em resposta aos fatores exógenos e endógenos.

Da mesma forma, o trabalho no distrito de Nang Rong, no norte da Tailândia, utiliza o modelo de autômatos celulares para investigar as consequências sobre a cobertura da terra em relação a padrões alternativos de povoamento, em um cenário onde as pessoas estabelecem unidades domésticas em povoados nucleados e trabalham em porções agrícolas longe dos povoados (Entwistle *et al.*, 2008). A terra florestada em torno dos povoados é transformada em terra agrícola, em uma relação inversa à distância do centro do povoado, mas frequentemente sujeita à modificação como resultado das características biofísicas da terra. A terra no povoado pode ser reforestada na forma de árvores de sombra e frutíferas, após o estabelecimento do povoado. O modelo de autômatos celulares constata que a variabilidade nas mudanças de cobertura da terra é mais sensível ao alcance espacial das unidades domésticas do povoado do que ao seu alcance temporal, sugerindo um papel inesperadamente

importante para as ações dos moradores de caminhar ou usar veículos motorizados para ir e voltar dos campos (Entwistle *et al.*, 2008).

Avanços também ocorreram quando foram levados em conta os impactos diretos e indiretos das atividades humanas nas paisagens. Linderman *et al.* (2006) consideram os padrões espaço-temporais dos impactos humanos, as florestas e a morte episódica dos bambus e o modo como afetaram o hábitat dos pandas no sudoeste da China. O modelo leva em consideração as consequências diretas da coleta de lenha local e da criação de unidades domésticas em áreas do hábitat básico dos pandas, além dos impactos indiretos quando acoplados a dinâmicas da vegetação. Os autores descobriram, por meio de simulações de modelo, que nos próximos trinta anos os impactos das unidades domésticas resultariam na perda de até 30% do hábitat dos pandas durante as últimas mortes de bambu. Também seria afetada a distribuição espacial do bambu do sub-bosque (ver mais discussões a respeito dos efeitos indiretos em sistemas complexos em Wootton, 2002).

Os sistemas de uso da terra são caracterizados por interações complexas entre tomadores de decisão humanos e seu ambiente biofísico (ver também discussões no Capítulo 7). As divergências entre a escala dos condicionantes humanos e os impactos das decisões humanas ameaçam potencialmente a sustentabilidade ecológica desses sistemas. Parker *et al.* (2008) e Parker, Hessl e Davis (2008) analisam fontes de complexidade em sistemas de uso da terra, passando do nível de decisão humana para interações humanas com efeitos sobre o espaço, o tempo e a escala. Desafios selecionados na modelação desses sistemas e possíveis resoluções são discutidos por eles, incluindo estratégias que dão conteúdo empírico a modelos complexos, métodos para ligação de modelos por meio de sistemas homem-ambiente, os desafios para a modelagem indireta e ligações interescalares, e a utilidade potencial de modelos complexos de sistemas de terra (Parker *et al.*, 2008; Parker, Hessl, Davis, 2008). Nesses termos, um desenvolvimento importante foi a proliferação de modelos baseados em agentes.

### Modelagem baseada em agentes de sistemas complexos

O objetivo da maioria dos modelos baseados em agentes é entender como as microdecisões e as regras comportamentais interagem com as variáveis ambientais para *provocar* a emergência de macropadrões que não são redutíveis a essas regras. Interações entre agentes e o ambiente produzem macropadrões que não são necessariamente previsíveis, dadas as características de um ou outro isoladamente. Quando essas relações são analiticamente refratárias (como frequentemente o são quando se lida com agentes adaptativos em vez de agentes estritamente racionais ou com um ambiente/situação de complexidade marginal), a modelagem baseada em agentes oferece uma metodologia para investigar rigorosamente as relações e os padrões. Isso é especialmente útil para cientistas sociais e naturais (ecólogos, biólogos, geneticistas), cujo trabalho é inerentemente histórico. Ao dotar os agentes de características e regras para interações e criar um mundo bioecológico que muda devido a suas ações, pode-se “ver” como essas regras e interações produzem padrões de forma controlada.

Os cientistas utilizaram modelos baseados em agentes para abordar diversos assuntos nas ciências sociais e naturais. Aplicações em economia, ciência política e sociologia foram especialmente predominantes, com modelos de mercado de ações, votação, formação de alianças, transmissão cultural, cooperação e conflito gerando *insights* profundos na sociedade humana (Arthur, 1994; Holland, 1995; Cederman, 1997; Kollman, Miller, Page, 1997; Tesfatsion, 1997). Na biologia e na ecologia, os modelos de evolução de ecossistemas e de interação/comportamento de espécies também têm feito progressos (Stein, 1989; Nadel & Stein, 1991, 1992 e 1995; Belew & Mitchell, 1996). Deadman e Gimblett (1994) ilustraram a utilidade da modelagem baseada em agentes ao investigar as interações homem-ambiente em terras florestadas.

A comunidade dedicada ao estudo das mudanças de uso e cobertura da terra utilizou diversas técnicas para modelar sistemas socioecológicos complexos. Entre os exemplos, incluem-se modelos de interação espacial, autómatos celulares (Clarke & Gaydos, 1998; Messina & Walsh,

2001) e modelos de sistemas dinâmicos (Evans *et al.*, 2001). As abordagens de modelagem baseadas em agentes acostumaram-se a investigar os processos de tomada de decisão dos gestores de terra no contexto das interações espaciais e sociais. Análises de aplicações dos modelos baseados em agentes (ABMs) para cenários de mudanças de cobertura da terra demonstraram a utilidade de uma representação em nível local da tomada de decisão de uso da terra (Berger & Parker, 2002; Parker, Hessel, Davis, 2008; Parker *et al.*, 2003, 2008). Os primeiros ABMs eram representações comparativamente abstratas que investigavam aspectos fundamentais dos sistemas espacialmente explícitos, mas não eram necessariamente relacionados a aplicações específicas do mundo real (Epstein & Axtell, 1996). Recentes aplicações de ABMs produziram representações comparativamente complexas de sistemas socioecológicos (Berger & Ringler, 2002; Hoffmann, Kelley, Evans, 2002; An *et al.*, 2005; Brown *et al.*, 2005). Berger e Parker (2002) caracterizam esses modelos em termos de se os componentes ambientais e dos modelos baseados em agentes são empiricamente fundamentados ou projetados, porém não evidenciados.

Dois razões fundamentais de as abordagens baseadas em agentes serem ferramentas eficientes para investigar as complexidades de processos biocomplexos homem-ambiente são o padrão espacial e a natureza heterogênea dos atores e da paisagem. Em diversos casos, os padrões da paisagem estão muito correlacionados com a distribuição topográfica. No entanto, além dessas heterogeneidades de adequabilidade da terra, inclui-se a variedade de características, histórias e experiências dos proprietários de terras, que contribuem para a complexidade geral da dinâmica das mudanças de uso e cobertura da terra. Após um estudo realizado em 1997, em nível de unidade doméstica, Koontz (2001) constatou que, apesar de a maioria dos proprietários de terras registrar razões não monetárias em suas tomadas de decisão de uso da terra, a importância relativa dos fatores não monetários variava de acordo com o tamanho da propriedade, a renda da unidade doméstica e o nível educacional.

Um desafio específico relativo à modelagem das mudanças históricas de cobertura da terra é desenvolver um entendimento de como a dependência do caminho e as condições iniciais determinam trajetórias

específicas das mudanças futuras de cobertura da terra. Uma pesquisa prévia investigou os papéis das condições iniciais e da dependência do caminho na modelagem de uso da terra (Atkinson & Oleson, 1996; Wilson, 2000; Balmann, 2001; Brown *et al.*, 2005). Nos ABMs, há sensibilidades particulares nas condições iniciais para cenários de uso da terra (Brown *et al.*, 2005). A análise de sensibilidade mostrou-se uma ferramenta valiosa para investigar o impacto dessas incertezas históricas no desenvolvimento dos modelos baseados em agentes e outros espacialmente explícitos referentes às mudanças de cobertura da terra.

Na modelagem baseada em agentes, um desafio importante é o desenvolvimento de conjuntos explícitos de dados para validar as interações dos agentes e as heterogeneidades em modelos (Manson, 2002; Walker, 2003; Pontius, Huffaker, Denman, 2004). Diversas disciplinas apresentam fortes tradições de métodos experimentais baseados em laboratório e campo que se provaram úteis no projeto e no desenvolvimento de modelos comportamentais. A combinação de ABMs com abordagens experimentais é uma forma de começar a validar e modificar o modelo. Particularmente a psicologia e a economia possuem literatura considerável inspirada em cenários experimentais controlados para investigar aspectos básicos dos processos de tomada de decisão, como risco, cognição, negociação e confiança. Em menor grau, as abordagens experimentais têm sido aplicadas em antropologia (Henrich *et al.*, 2001; Bernard, 2002), ciência política (Ostrom, Gardner, Walker, 1994) e sociologia (Kanazawa, 1999). Sem dúvida, houve alguma relutância na adoção de métodos experimentais em disciplinas como antropologia (Chibnik, 2005), mas em cada uma dessas disciplinas há uma aceitação tácita das metodologias experimentais dentro dos campos subdisciplinares. Dois projetos experimentais clássicos são o Dilema do Prisioneiro (Ostrom, Gardner, Walker, 1994; Wedekind & Milinski, 1996; Milinski & Wedekind, 1998) e o Jogo do Últimato (Henrich *et al.*, 2001; Oosterbeek, Sloof, Van De Kullen, 2004), os quais foram realizados e reproduzidos com populações variadas de sujeitos e resultaram em diversos experimentos.

Há exemplos limitados de representação espacial na pesquisa experimental. A pesquisa de cognição espacial adotou o uso de sujeitos

humanos para experimentos, integrando princípios de psicologia e geografia, e há pesquisa considerável nessa área (Golledge, 1999; Klatzky *et al.*, 2002). No entanto, o objetivo enfocou aspectos de cognição e percepção, em vez da dinâmica dos contextos econômicos. Um dos exemplos mais citados de pesquisa experimental espacialmente explícita é o modelo de segregação de Schelling (1971 e 1978). Não obstante a prevalência de métodos espaciais, como sistemas de informação geográfica (SIG), autômatos celulares e modelagem baseada em agentes, na pesquisa das mudanças de uso e cobertura da terra, e das contribuições da economia para a teoria de uso da terra, há poucos exemplos de aplicações experimentais ao manejo de uso da terra na literatura recente (são exceções os trabalhos de Bousquet *et al.*, 2002; Wilke, Hutchinson, Todd, 2004; e Golstone & Janssen, 2005). Nos contextos de manejo, as decisões de uso da terra têm um resultado explicitamente espacial. Assim, verificamos que o uso de experimentos espacialmente explícitos é um método valioso para investigar a dinâmica da tomada de decisão nas questões de manejo de recursos naturais.

Existe ainda uma forma relativamente nova de modelagem, e os acadêmicos expressaram preocupações com a abordagem do modelo baseado em agentes. Uma das objeções é de que essa modelagem é um tanto inacessível a acadêmicos que não são informaticamente orientados (Axelrod, 1997). A outra é de que nem sempre os modelos são prontamente aplicáveis na investigação empírica, deixando os acadêmicos com profundos *insights* genéricos, que podem ou não aumentar o conhecimento dos eventos e padrões reais (Alker, 1999). Enfim, esses modelos podem ser muito simples para captar *insights* sociais interessantes. Alguns acadêmicos se queixam de que eles ignoram a própria complexidade da vida social que estão tentando captar.

Um modo de lidar com a primeira objeção é disponibilizar os programas documentados para os outros (aumentar a transparência) e utilizar as simulações nas atividades de campo com servidores públicos e proprietários de terras. As outras duas preocupações são mais sérias, mas trabalhos recentes sobre a modelagem baseada em agentes começaram a lidar com elas (Kohler & Carr, 1996; Cederman, 1997; Cohen, Riolo,

Axelrod, 1999; Lustick, 2000). Além disso, à medida que mais acadêmicos com tendências empíricas e desejo de investigar questões diferentes começaram a utilizar essas ferramentas, a aplicabilidade, diversidade e complexidade dos modelos aumentarão (Becu *et al.*, 2003; Bousquet & LePage, 2004; Bolte *et al.*, 2006; Bennett & McGinnis, 2008; Brown *et al.*, 2008; Evans & Kelley, 2008). Até hoje, as lacunas observadas não são tão inerentes à abordagem como nos objetivos limitados dos modeladores.

Parker *et al.* (2003) apresentam uma visão geral de modelos de sistema multiagente das mudanças de uso e cobertura da terra (modelos de MAS/LUCC). Eles combinam um modelo de paisagem celular com representações baseadas em agentes de tomada de decisão, integrando os dois componentes por meio da especificação de interdependências e retroalimentações entre agentes e seu ambiente. Os autores analisam técnicas alternativas de modelagem de LUCC e discutem como os modelos de MAS/LUCC podem superar algumas limitações importantes de outras técnicas. Examinam iniciativas em andamento de modelagem de MAS/LUCC e constatarem que eles são apropriados para representar interações espaciais complexas sob condições heterogêneas e modelar tomadas de decisão descentralizadas e autônomas. Entre os desafios a serem abordados de forma geral por esses modelos, incluem-se a validação e a verificação, a aplicação de análise política e a construção de cenários (ver abordagens de validação sugeridas propostas por Pontius, Huffaker, Denman, 2004, e Walker, 2003). Não obstante, os ABMs parecem ser uma abordagem produtiva para criar modelos de escala fina enfocando interações homem-ambiente (Parker *et al.*, 2003). Parker *et al.* (2008) e Parker, Hessel e Davis (2008) fornecem uma comparação estruturada de diversos ABMs através de locais enfocando processos de mudança da terra em regiões de fronteira. Isso permite que os autores indiquem pontos comuns entre os modelos na definição de processos de fronteira, embora também descubram em que ponto os modelos diferem em relação às fontes de variação esperadas (por exemplo, se os proprietários são donos de um ou diversos lotes; diferenças de tamanho e heterogeneidade da qualidade do lote; diferenças no capital e no trabalho inicial; diferenças de exposição às forças de mercado).

## Modelagem hierárquica

Wu e David (2002) adotam uma abordagem diferente advinda da teoria da hierarquia. Os sistemas ecológicos são caracterizados por diversos componentes, interações não lineares, multiplicidade escalar e heterogeneidade espacial. A teoria da hierarquia (Warren, 2005) e também a evidência empírica sugerem que, muitas vezes, a complexidade assume a forma de modularidade na estrutura e funcionalidade. Portanto, a perspectiva da hierarquia pode ser útil para entender sistemas ecológicos complexos. Mas como o pensamento hierárquico pode ajudar na modelagem de sistemas dinâmicos espacialmente heterogêneos e não lineares, como paisagens, sejam eles naturais, sejam dominados pelo homem? Wu e David (2002) apresentam uma abordagem de modelagem hierárquica espacialmente explícita para o estudo de padrões e processos de paisagens heterogêneas. Eles discutem a base teórica para a abordagem de modelagem – o paradigma da dinâmica da hierarquia de manchas e a estratégia de escada escalar – e então descrevem a estrutura geral de um modelo hierárquico de paisagem urbana, que é desenvolvido com base nessa abordagem de modelagem. Além disso, apresentam uma plataforma de modelagem dinâmica da hierarquia de manchas para facilitar o desenvolvimento de modelos hierárquicos espaciais e ilustrar sua utilidade por meio de dois exemplos: um modelo de autômato celular hierárquico das mudanças de uso da terra e um modelo espacial de dinâmica populacional multiespécies. Um livro recente (Banerjee, Carlin, Gelfand, 2004) apresenta uma discussão abrangente sobre a modelagem hierárquica para dados complexos espaço-temporais. Avanços recentes na computação do método Markov Chain Monte Carlo permitem a análise bayesiana de modelos multinível para dados complexos geograficamente referenciados e até para correção de dados geográficos desalinados em um SIG.

## Conclusões

Quatro focos de pesquisa principais foram identificados no entendimento dos sistemas acoplados homem-natureza: terra, recursos e

ambiente construído; saúde humana e ambiente; recursos de água doce, estuários e ambientes costeiros; serviços ambientais e avaliação. Os sistemas acoplados homem-natureza procuram compreender a complexa rede de retroalimentações ambientais em diversas escalas temporais e espaciais. Esses sistemas abordam o modo como o ambiente funciona, como as pessoas usam esse ambiente, como isso o muda e como tais mudanças afetam as pessoas (Pfirman & AC-ERE, 2003). Nessas decisões, um elemento-chave é o papel mediador das instituições ou organizações usadas para manejar os recursos. Os direitos à água, o acesso às florestas e o *status* de áreas de proteção são cuidados por instituições e organizações sociais capazes ou não de proteger o ambiente.

O manejo integrado de recursos ambientais é uma atividade proposta, cujo objetivo é manter e melhorar o estado de um recurso ambiental afetado pelas atividades humanas. Para alcançar seus objetivos, considerou-se cada vez mais útil adotar um pensamento complexo a respeito dos sistemas. Em diversos casos, objetivos diferentes estão em conflito, e o conceito de “integrado” indica claramente que o manejo dos recursos deve ser abordado em uma perspectiva ampla, que leve em conta todos os possíveis dilemas e as diferentes escalas espaciais e temporais. A tradição de manejo de recursos e de tratamento de problemas ambientais caracteriza-se por uma abordagem de comando e controle. A crescente consciência da complexidade dos problemas ambientais e dos sistemas homem-tecnologia-ambiente acionou o desenvolvimento de novas abordagens de manejo. São necessários novos paradigmas de manejo baseados no *insight* de que os sistemas a serem gerenciados são sistemas adaptativos complexos, abordagens que enfatizam o papel dos processos de aprendizagem social e a necessidade de desenvolver métodos combinando abordagens de análises de sistemas *hard* e *soft*. A análise de sistemas *soft* enfoca a importância das percepções subjetivas e da realidade socialmente construída. Os métodos dos sistemas *soft* e as técnicas de construção de modelos de grupo são muito comuns na ciência da administração, em que o principal alvo da gestão sempre foi o sistema social. O manejo de recursos ainda é bastante lento para adotar essas

inovações, que devem ser uma consequência lógica da adoção de uma abordagem de manejo integrado (Pahl-Wostl, 2007).

Uma abordagem integrativa de sistemas é essencial para a tomada de decisão efetiva (ver o Capítulo 7) com respeito à sustentabilidade global (ver o Capítulo 8), em virtude de quão estreitamente conectados estão os sistemas industrial, social e ecológico. No entanto, essa tarefa é hercúlea, dados os seus requisitos informáticos e de modelagem. Um conjunto completo de abordagens deve ser explorado, entre elas abordagens de biocomplexidade e ABM, modelagem dinâmica de sistemas, análise termodinâmica, modelagem hierárquica, abordagens adaptacionistas e resilientes, para investigar os impactos dos sistemas ecológicos e humanos e das mudanças principais que estão ocorrendo, quer das mudanças climáticas ou das mudanças antropogênicas (Fiksel, 2006).

## CAPÍTULO 7

# Tomada de decisão ambiental<sup>1</sup>

Nas decisões ambientais, precisamos do conhecimento das ciências naturais e sociais. As ciências naturais estão bem integradas como fontes de informação para decisões em políticas acerca do ambiente. As ciências sociais são recém-chegadas a esses processos, ainda que ofereçam uma quantidade crescente de abordagens que podem melhorar a tomada de decisão ambiental em diversos níveis (NRC, 2005b). A tomada de decisão ambiental requer a combinação da boa ciência ambiental com o entendimento melhorado das interações homem-ambiente, e o desenvolvimento de abordagens que integrem a ciência sólida com a consideração dos valores e instituições humanos, para que as decisões sejam responsáveis, competentes e socialmente aceitáveis. Para obter isso, precisamos desenvolver critérios para a qualidade aprimorada das decisões e ferramentas melhores para estruturar processos de decisão e criar processos analíticos-deliberativos efetivos (NRC, 2005b, pp. 2-3).

Os indivíduos, as organizações e as sociedades humanas têm efeitos significativos sobre o ambiente natural, geralmente como um produto de suas decisões. As decisões, tanto as pequenas como as grandes, podem ter efeitos cumulativos e alterar as condições de localidades, comunidades,

<sup>1</sup> Agradeço as diversas sugestões importantes dadas por Maria Claudia Lopes Perez neste capítulo. Todos os erros, contudo, são de minha inteira responsabilidade.

nações e o planeta. Decisões que afetam o ambiente são especialmente difíceis de entender, pois são caracterizadas por complexidade estrutural; valores múltiplos e muitas vezes conflitantes; horizontes de tempo muito longos; esquemas diferentes de direitos de propriedade; conhecimento incompleto e incerto; grandes interesses; e, às vezes, as decisões devem ser tomadas premidas pelo tempo por causa da deterioração das condições do nosso planeta (NRC, 2005b, p. 24). São estruturalmente complexas, devido à natureza multiescalar das decisões e às decisões frequentemente incompatíveis diagnosticadas em uma escala, mas direcionadas a uma escala diferente pelos elaboradores de políticas. Os valores ambientais estão profundamente ligados a valores culturais, econômicos, espirituais e outros, como a obrigação de serem “bons guardiões” do nosso planeta, que levam à disposição variável de comprometimento a respeito das prioridades e à luta a favor ou contra opções diferentes de política ambiental.

Embora grande parte da ciência da tomada de decisão tenha raízes na psicologia, é a economia que é geralmente considerada para abordagens úteis em relação ao entendimento das decisões. Observou-se que a economia trabalha em horizontes de tempo muito curtos, embora as decisões ambientais tenham consequências de longo prazo, tomando as abordagens tradicionais de estimação inapropriadas ou inaceitáveis pelos indivíduos por causa dos valores ressaltados, que são inerentemente de longo prazo. Talvez ainda mais críticos sejam os problemas resultantes do cálculo de determinada taxa de desconto para custos e benefícios ambientais e sociais. Ao contrário de muitos outros objetos de decisão, o ambiente tem muito “acesso aberto”, sendo difícil impedir as pessoas de usá-lo ou poluí-lo, pondo o recurso em risco de uso exagerado (ver o artigo clássico de Hardin, 1968, sobre a “tragédia dos bens comuns”). Métodos para atuar sob condições de conhecimento incompleto e incerto são necessários, porque a condição de deterioração dos recursos ambientais não permite o luxo de postergar a ação. No entanto, os métodos requerem flexibilidade no ajuste das decisões tomadas em um estado de conhecimento em mudança (Funtowicz & Ravetz, 1992; NRC, 1996; Dietz & Stern, 1998; Renn, 2003; Tversky & Kahneman, 1981; Slovic, 1995; Kingdon, 1987).

Para lidar com essas difíceis dimensões de tomada de decisão ambiental, os cientistas desenvolveram diversas ferramentas analíticas, entre elas modelos matemáticos, técnicas analíticas espaciais, técnicas de análise de risco e abordagens de custo-benefício. Os modelos matemáticos de sistemas complexos tentam captar as múltiplas camadas e ligações envolvidas nos sistemas ambientais e o modo como elas estão conectadas a estruturas de elaboração de políticas (ver discussão no capítulo seguinte). As ciências espaciais desenvolveram ferramentas sofisticadas combinando sensoramento remoto com SIG para representar mudanças espacialmente explícitas nas condições do ambiente (ver o Capítulo 4). As técnicas de análise de risco, em compensação, enfocam a caracterização de resultados indesejados, as incertezas que os cercam e as probabilidades de sua ocorrência (Bolling, 2006; McCabe, 2004). Neste livro, o foco recai sobre as abordagens analíticas espaciais, e não sobre modelos matemáticos, análise de risco ou análise de custo-benefício, mas esta última é tão usada que é necessário um comentário. A economia usa, há muito tempo, a análise de custo-benefício como uma ferramenta que compara os resultados em diferentes momentos do futuro e avalia no resultado social líquido agregado (Layard & Glaister, 2004).

Uma análise de custo-benefício encontra, quantifica e adiciona todos os fatores positivos. Esses são os benefícios. Em seguida, identifica, quantifica e subtrai todos os negativos, isto é, os custos. A diferença entre os dois indica se a ação planejada é conveniente ou não. A habilidade real de fazer uma boa análise de custo-benefício requer certificar-se de que todos custos e benefícios estão incluídos e quantificá-los devidamente. Fazer isso não é fácil, pois atribuir unidades iguais de valor aos custos e benefícios pode ser complicado, e é essencial que haja um modo de avaliar os dois igualmente. Em termos de questões ambientais, precisamos atribuir valor a coisas na natureza, que foi “livre” por muito tempo. Nessa época, qual seria o valor justo? E, em termos humanos, estimar os benefícios de bens e serviços oferecidos pelo ambiente às pessoas é ainda mais difícil. Muito progresso foi feito desde o vazamento de petróleo do Exxon Valdez, evento econômica e ambientalmente de tamanha magnitude que foram necessários avanços consideráveis para calcular os custos

para a sociedade e o ambiente em relação a diversas dimensões espaciais e temporais. A questão é tão controversa que os economistas estão profundamente divididos enquanto disciplina entre aqueles que têm uma abordagem em relação à avaliação e os que adotaram uma abordagem mais ecológica, recorrendo à economia política em vez de à análise de custo-benefício para propor uma avaliação da economia a respeito dos problemas de política ecológica.

A análise de custo-benefício procura converter todas considerações relevantes em termos monetários. Os economistas “monetizam” tanto os custos de regulação, como o dinheiro gasto com a instalação de um purificador em uma central termelétrica para reduzir a poluição do ar, e ainda os benefícios da regulação, como salvar vidas humanas e evitar doenças. Em relação aos benefícios da regulação no futuro, os economistas primeiro quantificam esses benefícios em termos monetários. Então, eles “descontam” seu valor para refletir sobre quanto teríamos de investir hoje para ter esse dinheiro quando o benefício é gerado. O primeiro passo numa análise de custo-benefício é calcular os custos de uma política pública. Os custos de proteger a saúde humana e o ambiente mediante o uso de dispositivos de controle da poluição e outras abordagens são, por sua própria natureza, medidos em dólares ou qualquer outra moeda relevante. Portanto, pelo menos na teoria, o lado do custo na análise de custo-benefício deveria ser relativamente direto, mas raramente o é. Temos de considerar os custos de incluir ou não os custos ambientais e de implementar ou não diferentes opções políticas. Na análise, o segundo passo é mais problemático: monetizar os benefícios obtidos com a regulação. Como não há preços naturais para um ambiente saudável, a análise de custo-benefício requer a criação de preços artificiais. Os economistas criam preços artificiais para benefícios associados à saúde e ao ambiente estudando o quanto as pessoas estariam dispostas a pagar por eles ou que preço elas poderiam estar dispostas a aceitar. Um método bastante difundido, denominado “avaliação contingente”, é essencialmente uma forma de pesquisa de opinião (Carson *et al.*, 2003; Davis, 1963). Os pesquisadores perguntam a uma amostra representativa da população afetada (e, de fato, isso representa um problema espinhoso a respeito do método que

poderia ser utilizado para a escolha de determinada população afetada) o quanto ela estaria disposta a pagar para preservar ou proteger algo que não pode ser adquirido em uma loja (Ackerman & Heinzerling, 2002). Entre outras técnicas, incluem-se as preferências recriadas baseadas em preço como modo de obter esses valores (Hanemann, 1994; Portney, 1994).

As abordagens apresentadas são parte importante de um conjunto de ferramentas utilizadas, mas não incluem algumas das dimensões mais difíceis de lidar, especialmente como tratar dos conflitos de valor e da incerteza. Frequentemente, muitas das técnicas incorporam suposições de valor que nem sempre são declaradas explicitamente e que mais tarde podem impedir a tomada de decisões. Um número crescente de estudos recomenda que os processos integrem análises baseadas amplamente em processos deliberativos que envolvam as diversas partes interessadas ou afetadas pelas decisões (NRC, 1996). Hoje, muitas vezes isso é designado como envolvimento dos grupos interessados no processo deliberativo analítico e já foi visto na Agência de Proteção Ambiental (Environmental Protection Agency – EPA) e no Programa Norte-Americano de Mudanças Climáticas (US Climate Change Science Program, 2003) e em outras instituições. Significa mover-se rumo a uma abordagem de ciência de tomada de decisão ambiental (Raiffa, 1968; Morgan & Henrion, 1990; Keeney & Raiffa, 1993; Clemen, 1996), em que consideramos objetivos, formas de avaliar decisões e processos de decisão em relação a esses objetivos, que identifiquem as questões e os tipos de informações necessárias, desenvolvendo conhecimento a respeito dos processos de decisão propostos a produzir os resultados desejados (NRC, 2005b).

As boas decisões ambientais precisam considerar os fenômenos físicos e sociais e os valores humanos. Isso requer a obtenção de formas competentes e socialmente aceitáveis de integrar informações científicas e valores (Hammond, Keeney, Raiffa, 1999; Slovic & Gregory, 1999). Além disso, a tomada de decisão ambiental envolve valores diversos e conflitantes, incerteza científica considerável e, muitas vezes, a presença de problemas de coordenação entre os grupos interessados, que podem resultar em desconfiança, por exemplo. Isso resulta em posições bastante

contestadas, independentemente da evidência científica, porque os resultados (ou objetivos) aceitáveis podem ser contestados. As abordagens da ciência de tomada de decisão podem ajudar nessas resoluções, tornando os conflitos mais explícitos e estruturando formas de os grupos interessados reconsiderarem suas posições a fim de alcançar com sucesso objetivos atingíveis (Morgan & Henrion, 1990; Clemen, 1996; Surer, 1993; Rodricks, 1992; Travis, 1988; NRC, 1996).

A pesquisa comportamental da tomada de decisão, proveniente da psicologia, mostrou que os indivíduos, em geral, omitem elementos fundamentais dos processos decisórios e que suas decisões sofrem em consequência dessas omissões (Slovic, Fischhoff, Lichtenstein, 1977; ver também Bowles, 2004; Fehr & Gächter, 2000 e 2002). Eles podem deixar de lado emoções, preferências, rotinas passadas e outros elementos que afetem as decisões. Os indivíduos reagem a tarefas complexas simplificando-as de forma aparentemente adequada, mas incluem tendências previsíveis que distorcem as informações subjacentes (Kahneman, Slovic, Tversky, 1982), que mostram dificuldade em esclarecer os objetivos (March, 1978) e manifestam dificuldade em perceber todas alternativas viáveis (Keeney, 1992). Em comparação, os grupos de tomada de decisão podem identificar mais elementos de qualquer decisão do que os indivíduos, corrigindo os erros dos indivíduos – no entanto, os grupos enfrentam outros tipos de problemas, como a desconfiança entre os membros com base nas diferenças de *status* social (Hastie, Pennington, 1983; David & Turner, 1996); normas do grupo com respeito ao consenso ou à regra da maioria (Moscovici, 1985); falta de participação de alguns membros do grupo, resultando em tendenciosidade; e diferença na tática usada para propor as ideias (Turner, 1991). Assim, dependendo da natureza do problema, abordagens individuais ou grupais em relação à decisão podem ser necessárias ou devem ser usadas em combinação com outras.

Uma tarefa importante é esclarecer valores e preferências, ajudando as pessoas a formularem suas preferências, em vez de simplesmente revelá-las. Talvez a abordagem mais conhecida em relação a isso seja a análise multirrituário com tratamento da incerteza (Keeney, 1992), que

produz um enunciado matemático incluindo uma função de utilidade ou valor, a qual pode ser utilizada para avaliar cada alternativa dentro da gama de consequências previstas pelo tomador de decisão. Essa abordagem e outras semelhantes oferecem muitas vantagens, mas também numerosas desvantagens, como a falta de pessoas instruídas para conduzir as entrevistas, a dificuldade em avaliar as funções de utilidade individual e em expressar valores subjacentes. Surgiram abordagens que tentam simplificar cognitivamente a tarefa, torná-la mais transparente ou mais particular para tipos específicos de decisões, entre eles: processo de hierarquia analítica (Saaty, 1980 e 1991); estratégias que enfocam a escolha entre alternativas em determinado recurso (McDaniels & Thomas, 1999); métodos que esclarecem preferências com base em julgamentos do que podem ser “trocas justas” (Hammond, Keeney, Raiffa, 1999); pensamento focado em valor (Keeney, 1992); e abordagens de “soluções satisfatórias” (Payne, Bettman, Johnson, 1993), que procuram menos que soluções ótimas. O trabalho a respeito de preferências por preço revelado e de preços hedônicos também é relevante; e seu uso tem crescido (Bowles, 2004; Camerer & Fehr, 2004; Baland & Platteau, 2000).

Resultados da teoria de organização comportamental, da teoria de decisão comportamental, do inquérito estatístico e da economia experimental não deixam dúvidas a respeito da incapacidade da escolha racional como um modelo descritivo do comportamento humano (Jones, 1999). Mas isso não significa que as pessoas e suas ações políticas são irracionais. Portanto, precisamos de abordagens para pensar a respeito da teoria racional, entre elas a “racionalidade limitada”. A racionalidade limitada afirma que os tomadores de decisão são deliberadamente racionais; isto é, são adaptativos e orientados pelo objetivo, mas, por causa da arquitetura emocional e cognitiva humana, às vezes falham – mesmo quando estão tomando decisões importantes. Os limites da adaptação racional são de dois tipos: limites processuais, que restringem o modo como empreendemos a tomada de decisões; e limites substanciais, que afetam as escolhas particulares de modo direto. A análise racional em contextos institucionais pode servir de padrão para o comportamento humano adaptativo e orientado pelo objetivo. Em ambientes de tarefa

relativamente fixa, como mercados de capitais ou eleições, devemos ser capazes de dividir o comportamento em um comportamento adaptativo e orientado pelo objetivo (ação racional) e outro que é consequência de limites processuais, e, então, medir o desvio. O grau do desvio é uma questão empírica. Essas classes são mutuamente excludentes e completas, e podem ser examinadas empiricamente, em situações em que os atos façam escolhas semelhantes repetidamente. Outro desafio é proposto pela incerteza diante das decisões que devem ser tomadas. Afirmou-se que as pessoas agem sob condições de risco, em vez de incerteza, pois esta tende a imobilizar o tomador de decisão (White, 1974).

Caracterizar as incertezas é outra maneira de aprimorar o processo de tomada de decisão, e isso, muitas vezes, envolve métodos que dão margem a julgamentos probabilísticos e outras fontes de informação (Morgan & Henrion, 1990; Cullen & Frey, 1999). Outros métodos, envolvendo julgamentos menos exigentes, também foram propostos: a teoria dos conjuntos difusos (Zadeh, 1965), segundo a qual não é necessária a obtenção de probabilidades altamente precisas; a construção de cenários é cada vez mais usada para caracterizar incertezas e alternativas (Wack, 1985a e 1985b); os diagramas de influência, que ajudam a revelar os modelos mentais dos tomadores de decisão e das fontes de seus desacordos (Howard, 1989; Clemen, 1996); ou aqueles com diferentes interesses (Morgan *et al.*, 2002).

Uma das decisões ambientais mais difíceis refere-se a como chegar a uma preferência social em um contexto de ação coletiva por causa das dificuldades inerentes em obter uma coordenação entre os grupos interessados. Não há uma regra única para agregar as preferências dos indivíduos com valores diferentes por meio de diversas alternativas. Isso é particularmente complicado para problemas ambientais de grande escala que envolvem horizontes de tempo longos, mudanças não marginais nas variáveis humanas ou ambientais, valores profundamente arraigados e quando surgem questões de equidade (NRC, 1996). Uma forma eficaz de lidar com problemas de ação coletiva é mediante análise institucional.

### Análise institucional

As instituições humanas – definidas como formas de organizar atividades – afetam a resiliência do ambiente (Dietz, Ostrom, Stern, 2003). Arranjos institucionais localmente desenvolvidos, governados por comunidades estáveis e protegidos de forças externas, sustentaram os recursos com êxito durante séculos (Ostrom, 1990; Baland & Platteau, 2000 [1996]), embora possam entrar em colapso diante de mudanças rápidas após séculos de funcionamento bem-sucedido. As condições ideais de governança estão cada vez mais raras. Os problemas críticos, como a poluição transnacional, o desflorestamento tropical e as mudanças climáticas, são de escala maior do que aqueles com os quais as comunidades locais já tinham lidado, envolvendo influências não locais além de seu controle. Parte da questão é que, para que os problemas ambientais sejam tratados de forma efetiva pelas instituições, é necessário que eles tenham “limites bem definidos”, e isso é muito difícil em vários dos casos mencionados. Entre as estratégias promissoras para tratar de problemas de ação coletiva, incluem-se o diálogo entre as partes interessadas, servidores públicos e cientistas; instituições complexas, redundantes e multicaudadas; uma mistura de tipos institucionais; e projetos institucionais que facilitam a experimentação, a aprendizagem e as mudanças.

De acordo com Acheson (2006), muitos dos recursos do mundo natural estão em estado de crise. Sua solução envolve desenvolver instituições de gestão efetiva, mas não há consenso a respeito dessas instituições. Alguns defendem a solução dos problemas de gestão dos recursos por meio da instituição da propriedade privada; outros advogam o controle do governo central; outros, ainda, consideram a gestão em nível local uma solução. Acheson sugere que todas essas estruturas de governança falham sob certas condições e que devemos aprender a compatibilizar os problemas de recursos com as instituições de governança e as técnicas específicas de gestão se quisermos gerir os recursos de maneira eficiente. É um problema de escala que constitui um desafio persistente para a gestão e a tomada de decisão ambiental.

Entre os recursos ambientais mais difíceis de gerir, incluem-se os recursos de acesso comum. Podemos definir esse conceito com base em dois atributos: a dificuldade de excluir os beneficiários e a subtrahibilidade do uso do recurso. Becker e Ostrom (1995) apresentam semelhanças e diferenças ente os recursos de acesso comum em relação a sua importância ecológica e institucional. Os recursos biológicos mais complexos são um desafio maior para o projeto de instituições sustentáveis, mas os mesmos princípios gerais parecem se transferir para sistemas mais simples. A evidência empírica extensiva e os desenvolvimentos teóricos em diversas disciplinas estimulam a necessidade de expandir a gama de modelos de escolha racional a serem usados como base para o estudo de dilemas sociais e ação coletiva. Ostrom (1998) sustenta que os indivíduos podem obter resultados que sejam “melhores que racionais” ao construir preferências nas quais a reciprocidade, a reputação e a confiança podem ajudar a superar as poderosas tentações do interesse próprio de curto prazo. Isso constitui um modelo de racionalidade de segunda geração e condiz mais com o comportamento otimizado dos indivíduos como membros de comunidades que devem adotar ações coletivas (ver Ostrom, 2006). Isso não elimina a tentação do surgimento do aproveitador (*free rider*), mas provavelmente reduz sua incidência.

De acordo com Ostrom (1999), a análise da atual política de governança dos recursos de acesso comum baseia-se em três hipóteses principais:

- Os usuários de recursos são maximizadores sem regras de ganhos imediatos que não cooperarão para superar os dilemas comuns que enfrentam.
- O projeto de regras para mudar os incentivos dos participantes é uma tarefa analítica relativamente simples.
- A gestão dos recursos de acesso comum requer direção central ou de cima para baixo.

Ostrom constata, com base em experiências de laboratório, que precisamos utilizar hipóteses diferentes – por exemplo, uma que afirmem os homens falíveis, limitadamente racionais e usuários de normas – e que isso está mais próximo da realidade de como as pessoas lidam

com problemas de recursos de acesso comum. Sua pesquisa a respeito de sistemas adaptativos complexos indica a necessidade de uma forma mais realista de entender como as regras mudam à medida que os processos se transformam e o valor de estimular a evolução de sistemas de governança policêntricos. Com respeito ao projeto de regras, o desafio reside em como monitorar e assegurar a conformidade com as regras – e as evidências são de que muitas comunidades não conseguem cumprir suas próprias regras. A suposição apontada por muitos estudos (ver Hardin 1968) de que a forma de cima para baixo é a única maneira de assegurar a gestão dos recursos de acesso comum foi amplamente refutada (ver Dietz, Rosa, York, 2007).

Sekher (2001) investiga como diferentes organizações locais afetam a gestão participativa dos recursos de acesso comum na Índia. Baseando-se nas ideias da “interdependência” e do “novo institucionalismo”, nos termos dos “princípios de projeto” e do “arcbouço institucional de análise e desenvolvimento” de Elinor Ostrom, o estudo atribui a escolha individual às estratégias de ação coletiva para a gestão dos recursos de acesso comum em relação aos incentivos que enfrentam. O arcbouço sugere que as estratégias participativas são condicionadas por três fatores: os atributos do recurso, os do grupo de usuários e os dos arranjos institucionais. Com base na perspectiva do usuário, Sekher faz uma análise comparativa de três categorias amplas de organizações locais atuando em três povoados: uma organização não governamental, uma organização articulada pelo governo e uma estratégia participativa nativa (regime tradicional de gestão). Sekher (2001) sustenta que, dependendo do processo pelo qual as regras são elaboradas e os interesses internalizados, esses diferentes sistemas participativos organizados geram restrições, criam oportunidades e conferem legitimidade de modo diferente. Atualmente, está disponível uma meta-análise recente de um grande corpo de trabalho usando os princípios de projeto de Ostrom, constatando que os princípios funcionam em grande medida, mas há diversas condições que podem afetar o grau pelo qual eles falham e por quê (Cox, Arnold, Villamayor Tomas, no prelo). A lista a seguir apresenta os princípios de projeto como Ostrom (1990, p. 90) os formulou originalmente:

1. LIMITES CLARAMENTE DEFINIDOS: indivíduos ou unidades domésticas que têm o direito de retirar unidades de recurso dos recursos de acesso comum devem ser claramente definidos, assim como devem ser os próprios limites dos recursos de acesso comum.
  2. CONGRUÊNCIA ENTRE REGRAS DE APROPRIAÇÃO E PROVISÃO E CONDIÇÕES LOCAIS: regras de apropriação que restringem tempo, lugar, tecnologia e/ou quantidade de unidades de recurso são relacionadas a condições locais e regras de provisão que requerem mão de obra, materiais e/ou dinheiro.
  3. ARRANJOS DE ESCOLHA COLETIVA: a maioria dos indivíduos afetados pelas regras operacionais pode participar da modificação das regras operacionais.
  4. MONITORAMENTO: monitores, que audítram ativamente as condições dos recursos de acesso comum e o comportamento do apropriador, são responsáveis pelos apropriadores ou são os apropriadores.
  5. SANÇÕES GRADUADAS: apropriadores que violam as regras operacionais são propensos a sofrer sanções graduadas (dependendo da seriedade e do contexto da falta) por outros apropriadores, por autoridades responsáveis por esses apropriadores ou ambos.
  6. MECANISMOS DE SOLUÇÃO DE CONFLITOS: apropriadores e suas autoridades têm acesso rápido a arenas locais de baixo custo para solucionar conflitos entre apropriadores ou entre apropriadores e autoridades.
  7. RECONHECIMENTO MÍNIMO DOS DIREITOS DE ORGANIZAÇÃO: os direitos dos apropriadores de criar suas próprias instituições não são desafiados por autoridades governamentais externas.
  8. INICIATIVA ANINHADA: apropriação, provisão, monitoramento, cumprimento, solução de conflitos e atividades de governança são organizados em multicamadas de iniciativas aninhadas.
- O principal papel dos princípios de projeto era explicar sob que condições a confiança e a reciprocidade podem ser forjadas e mantidas, a fim de sustentar a ação coletiva diante de dilemas sociais representados pelos recursos de acesso comum.

Folke *et al.* (2005) investigam as dimensões sociais que permitem o funcionamento da gestão baseada no ecossistema adaptativo. Os autores se concentram nas experiências da governança adaptativa de sistemas socioecológicos durante períodos de mudança abrupta (crise) e examinam as fontes sociais de renovação e reorganização. Essa governança conecta indivíduos, organizações, agências e instituições em múltiplos organizacionais. As pessoas fundamentais proporcionam liderança, confiança e significado, ajudando a transformar organizações de gestão rumo a um ambiente de aprendizagem. Frequentemente, os sistemas adaptativos de governança se auto-organizam como redes sociais com equipes e grupos de atores que se inspiram em diversos sistemas de conhecimento e experiências para o desenvolvimento de um entendimento e políticas comuns. O surgimento de organizações de ligação parece reduzir os custos de colaboração e solução de conflitos; ao possibilitar legislação e políticas governamentais, pode dar suporte à auto-organização e, ao mesmo tempo, moldar a criatividade para esforços adaptativos de cogestão. Um sistema socioecológico resiliente pode fazer uso da crise como uma oportunidade para se transformar em um estado mais desejado (Folke *et al.*, 2005).

### **Comportamento individual e decisões ambientais**

As atividades dos indivíduos e das unidades domésticas têm um impacto profundo sobre o ambiente (por exemplo, gastos de consumo são responsáveis por dois terços do PIB; NRC, 2005b, p. 69). Nos Estados Unidos, as unidades domésticas são responsáveis por cerca de metade das emissões de carbono e de grandes porcentagens de outros efluentes nocivos (Stern & Gardner, 1981; Cutter *et al.*, 2002; Van den Burgh, 2004; Stern, 2007). Os comportamentos individuais causam impacto significativo e direto no agregado em áreas como transporte, habitação, consumo de energia, resíduos sólidos, água e alimentos. Como cidadãos, os indivíduos desempenham um papel importante em influenciar decisões ambientais das comunidades locais, regiões e estados. No entanto, seu comportamento não é totalmente livre; eles são limitados por uma gama de sistemas sociais, econômicos, institucionais e tecnológicos em que se

encontram (Lutzenhiser, Harris, Olsen, 2001). Por exemplo, o desejo de reciclar pode ser limitado pela ausência de coleta seletiva local, exigindo, assim, que se percorra de carro uma distância considerável até um centro de reciclagem.

As informações ambientais podem ser eficazes para influenciar o comportamento, mas nesse caso as informações devem ser apropriadas, oportunas e fornecidas de modo a facilitar a implantação. Essas informações são cognitivamente processadas e ponderadas em relação a valores, atitudes e processos afetivos do indivíduo, a normas sociais e recursos econômicos disponíveis, e a uma tecnologia acessível ao nível de renda do indivíduo. Não obstante a pesquisa realizada durante décadas, estamos apenas começando a entender como os valores e as preferências dos indivíduos, as limitações e outros fatores moldam o comportamento ambientalmente significativo.

Desde a década de 1970, há evidências de um nível consistentemente alto de apoio à proteção ambiental e de suporte a regulamentações que vão além para assegurar a conservação dos recursos naturais (Dunlap & Scarce, 1991; Dunlap, 2002). Esse suporte também é evidente nas preferências individuais por políticas de “crescimento inteligente”, jardins comunitários, reservas ecológicas e naturais, feiras de produtos orgânicos e outros produtos verdes. No entanto, essa forte preocupação e suporte ambiental são contraditos pelo comportamento dos indivíduos, que adquirem veículos utilitários esportivos (SUVs) enormes e casas imensas, e que mantêm níveis de consumo incompatíveis com suas crenças declaradas. Parte do problema reside na dificuldade dos indivíduos em avaliar o impacto ambiental de suas escolhas. Estudos revelaram que as unidades domésticas sustentam crenças equivocadas a respeito do consumo relativo de energia das utilidades domésticas (Kempson *et al.*, 1985). As informações, tais como os indicadores de uso de energia nas utilidades domésticas, provaram ser formas de comunicação deficientes para os consumidores (DuPont, 2000; Shorey & Eckman, 2000). Nos Estados Unidos, os selos verdes ainda não foram usados amplamente, mas na Europa eles têm tido grande influência sobre o comportamento individual (Thøgerson, 2002). Na Suécia, nos anos 1980, os selos verdes em

produtos químicos para unidades domésticas resultaram numa queda de 15% nas vendas de produtos químicos de limpeza e uso pessoal, e na substituição de 60% dos produtos químicos sob a forma de xampus, sabões, detergentes e limpadores por substâncias menos nocivas.

Sem dúvida, uma das tarefas mais importantes da pesquisa é descobrir a melhor forma de transmitir informações aos indivíduos, facilitando a compreensão e proporcionando alternativas de ação. Em certos casos, iniciativas recentes de trabalho conjunto entre ONGs ambientais e empresas que visavam propor ações que essas empresas pudessem emprender para obter resultados mais verdes foram eficazes. Nem mesmo incentivos econômicos para adquirir veículos mais verdes são bem aproveitados, porque os indivíduos não entendem sua utilidade ou seus benefícios (por exemplo, incentivos fiscais para a aquisição de carros híbridos, que reduzem o valor total pago por um carro a um valor próximo ao dos carros não híbridos). Muitas pessoas continuam a considerar os veículos híbridos “mais caros”, quando na realidade isso não acontece caso sejam levados em conta os benefícios fiscais e a economia de combustível devido à maior eficiência.

A melhor compreensão de como as informações, os incentivos e outros instrumentos combinados com valores individuais e contextos sociais moldam as escolhas do consumidor serve para aprimorar as escolhas individuais.

Abordagens que utilizam a participação comunitária para promover mudanças no conhecimento ambiental podem ser eficientes. Quais são os fatores contextuais mais importantes, os incentivos a que as pessoas reagem e os efeitos das políticas sobre a escolha individual ainda são ricas áreas de investigação (NRC, 2005b, p. 78). Estudos começaram a lançar luzes sobre essas questões. Alguns enfocaram escalas agregadas de comportamento pró-ambiental (Kaiser, 1998; Cortrell, 2003); outros enfocaram comportamentos específicos de consumidores, como o uso de energia (Black, Stern, Elworth, 1985), comportamentos em deslocamentos (Brown, Werner, Kim, 2003) e de reciclagem (Do Valle *et al.*, 2004). Outros compararam diferentes classes de comportamento em diversos países (Thøgerson, 2004; Stern *et al.*, 1999).

Dois dos impedimentos mais sérios para promover avanços nesse campo são a persistência das abordagens disciplinares e a falta de interdisciplinaridade substantiva (NRC, 2005b, p.80). Acadêmicos continuam a analisar apenas parcialmente por meio das disciplinas, e muitas vezes ficam alheios a outros campos que podem informar seus trabalhos. Para chegar a um modelo unificado de escolha situada no mundo real, precisamos de investimento constante em investigações interdisciplinares que superem os pontos cegos encontrados no desenvolvimento da tomada de decisão individual. Dados a economia global sempre em crescimento e o modo como os produtos são comercializados e disponibilizados em países do mundo todo, precisamos de mais estudos comparativos sobre como os indivíduos em sociedades diferentes reagem às informações, aos preços e aos contextos variáveis que moldam suas escolhas ambientalmente importantes.

### **Decisões e contexto social**

Nas últimas décadas, os sociólogos investigaram a crescente preocupação do público a respeito do ambiente, mas têm tido pouco sucesso em explicar as atitudes em relação ao meio ou à adoção de comportamentos pró-ambientais, como a reciclagem. Dertsen e Garrrell (1993) investigam o papel do contexto social na relação entre as atitudes individuais a respeito do ambiente e o comportamento associado à reciclagem por comunidades comparáveis que variam seu acesso a programas desse tipo. Os resultados mostram que as pessoas que têm acesso a um programa de reciclagem estruturado apresentam níveis muito mais elevados da atividade do que aquelas que carecem desse acesso. Além disso, as atitudes individuais em relação ao ambiente afetam o comportamento associado à reciclagem apenas na comunidade com acesso fácil a um programa estruturado de reciclagem. A preocupação individual com o ambiente aprimora o efeito do programa de reciclagem, mas não supera as barreiras representadas pela falta de acesso.

O que constitui uma boa decisão a respeito do ambiente? Algumas tradições de pesquisa oferecem conceitos, teorias e métodos concebidos

para melhorar a tomada de decisão individual e coletiva em relação a ações que afetarão o ambiente. Mas há pouca discussão explícita sobre quais seriam os critérios apropriados para qualificar uma decisão ambiental como uma boa escolha. Dietz (2003) sugere cinco critérios para avaliar decisões ambientais: bem-estar humano e ambiental; competência a respeito de fatos e valores; justiça no processo e no resultado; confiança nas forças humanas, e não nas fraquezas; oportunidade de aprender e agir com maior eficiência.

Há muito tempo, o expediente humano (o papel do tomador de decisão individual) tem sido um importante tópico da teoria sociológica e é fundamental para diversas teorias na antropologia (por exemplo, ecologia histórica, ecologia política). Os sociólogos dedicaram atenção a novos modelos de evolução cultural extraídos de diversas disciplinas. Dietz e Burns (1992) examinam o papel do expediente humano na teoria evolucionária, fazendo uma distinção entre a teoria evolucionária e as teorias de desenvolvimento, geralmente identificadas com a evolução nas discussões a respeito da teoria social. Eles apresentam uma abordagem para o expediente humano e o poder fundado na teoria dos sistemas de regra social. Essas discussões fornecem um contexto para a definição de um expediente humano com ação efêvera, intencional, ilimitada e reflexiva por atores individuais ou coletivos (Dietz & Burns, 1992).

Até que ponto nossa tomada de decisão e nossos processos de aprendizagem são influenciados indiretamente pelos outros? Até que ponto as opiniões que defendemos são simplesmente um reflexo das opiniões daqueles que associamos a elas? Em geral, as explicações a respeito de influência social enfocam o modo como as pessoas são persuadidas pelas opiniões dos outros ou se adaptam a elas. Embora importante, essa pesquisa negligenciou o papel da coleta de informações na formação da crença e como as crenças tendenciosas e também as influências sociais podem emergir de processos de pesquisa tendenciosos (Denrell, 2008).

Dietz e Stern (1995) oferecem um modelo de escolha limitada-mente racional, que abre espaço para valores individuais e influências sociais num processo de construção de preferências. Extrai do modelo de utilidade esperada a noção de que as pessoas avaliam suas opções em

termos de resultados esperados, referenciados a valores pessoais, mas pressupõe que os indivíduos avaliam listas bastante truncadas de opções, resultados e valores relevantes e aplicam uma lógica de classificação, em vez de uma lógica calculada. Esse modelo condiz com a natureza das habilidades cognitivas humanas evoluídas. O modelo trata da heurística cognitiva e das diversas formas de influência social como determinantes de seleção das listas truncadas e lida com normas morais como regras de classificação ativadas quando certas ações e resultados se salientam.

As tradições da pesquisa nas ciências sociais investigaram os condicionantes do comportamento individual e propuseram modelos diferentes de tomada de decisão. Wilson e Dowlatabadi (2007) analisaram diversas perspectivas: economia convencional e comportamento; teoria de adoção de tecnologia e tomada de decisão baseada em atitude; psicologia social e ambiental; e sociologia. Nessas tradições, os modelos de decisão individual diferem como um axioma. Alguns se baseiam em racionalidade informada ou variáveis psicológicas, ao passo que outros enfatizam fatores físicos ou contextuais desde a escala individual até a escala social. Cada perspectiva sugere lições particulares para projetar intervenções de mudança no comportamento. Ao longo da sua análise, essas lições são aplicadas a decisões que afetam o uso de energia residencial. Os autores enfocam exemplos tirados de tipos de decisão baseados tanto na intuição como no raciocínio, assim como de uma variedade de contextos de decisão que incluem investimentos de capital em climatização de edifícios e comportamentos repetitivos, como o uso de utilidades domésticas.

Lambin *et al.* (2001) sugerem que o entendimento comum das causas das mudanças de uso e cobertura da terra é dominado por simplificações que, por sua vez, fundamentam diversas políticas de desenvolvimento ambiental. Os casos analisados dão suporte a conclusões de que nem a população nem a pobreza isoladamente constituem a única e principal causa subjacente das mudanças da cobertura da terra no mundo inteiro. Em vez disso, são as respostas das pessoas a oportunidades econômicas, mediadas por fatores institucionais, que condicionam as mudanças de cobertura da terra. Oportunidades e restrições para novos

usos das terras são criadas por mercados e políticas locais e nacionais; no entanto, são as forças globais que se tornam os principais determinantes das mudanças de uso da terra, pois amplificam ou atenuam os fatores locais.

Liu *et al.* (2008) recomendam integração mais eficiente da ciência e da tomada de decisão na gestão ambiental. Embora os cientistas muitas vezes reclamem de que seus insumos são ignorados pelos tomadores de decisão, estes também expressaram insatisfação com relação ao fato de que informações críticas para sua tomada de decisão frequentemente não estão prontamente disponíveis ou acessíveis, ou não são apresentadas de forma utilizável. Os cientistas precisam produzir informações mais “utilizáveis”, que aprimorem a credibilidade, a legitimidade e a saliência para assegurar a adoção de resultados de pesquisa. Um exemplo disso é a gestão em escala de bacias hidrográficas de sistemas acoplados homem-água, em que os gestores dos recursos hídricos, como outros tomadores de decisão, são frequentemente confrontados com a necessidade de tomar decisões importantes diante da alta complexidade e da incerteza do sistema. A integração de informações científicas úteis e relevantes é necessária e fundamental para possibilitar a tomada de decisão informada. Liu *et al.* (2008) descrevem os principais aspectos do que foi aprendido no processo de suporte do planejamento e da gestão sustentável de recursos hídricos no sudoeste semiárido dos Estados Unidos por meio da modelagem integrada. A experiência dos autores indica que deve ser dada atenção particular ao foco das questões; à modelagem conceitual explícita e participativa; à estratégia adequada de modelagem, que é transparente para analistas e grupos interessados; e à abordagem formal de análise de cenário, a fim de facilitar o desenvolvimento de informações científicas “utilizáveis” para elaboradores de política e grupos interessados.

No período de 2004 a 2006, a seca no sudeste da Inglaterra gerou *insights* importantes para os debates interdisciplinares atuais a respeito do que significa construir resiliência na gestão hídrica (Medd & Chappels, 2007). Primeiro, há um conjunto de questões a respeito da avaliação e da definição da seca em diversos níveis de organização – local, regional e nacional – e, conseqüentemente, da interação entre as escalas nas quais a re-

silência construída deve ser estabelecida. Com base em entrevistas com gerentes regionais da companhia de água, no sudeste da Inglaterra, e em uma seleção de unidades domésticas dentro de suas jurisdições, Medd e Chappels (2007) investigam os enquadramentos contestados do risco de seca e da necessidade de gerir a demanda. Eles sustentam que, primeiramente, as definições de seca são mediadas pelo contexto institucional de gestão hídrica em diferentes escalas e por diversos enquadramentos disciplinares (da economia, geografia, sociologia e ciência ambiental). Segundo, as estratégias de gestão da seca escolhidas revelam diversas abordagens disciplinares em termos de escala. Particularmente o debate a respeito da construção de resiliência para assegurar “segurança de fornecimento” é enquadrado ou dominado em grande parte por um modo de pensar associado à engenharia, em que paliativos tecnológicos desde o nível da unidade doméstica até a reconfiguração em grande escala de redes de infraestrutura são propostos como a melhor maneira de lidar com o problema. Em compensação, as abordagens sociológicas sugerem a necessidade de investigar a resiliência por meio de uma reconceitualização da oferta e demandam um processo contínuo de cogestão. Essas diferenças de enquadramento constituem obstáculos para lidar com a crise da água, e as soluções exigirão abordagens mais interativas e sensíveis à escala, que utilizam as ferramentas certas na escala certa. Outros casos relevantes podem ser encontrados nas nossas florestas, em rápido desaparecimento, e no modo como vamos proteger a biodiversidade.

O desenvolvimento de sistemas de suporte de decisão ambiental (environmental decision support systems – EDSS) está progredindo rapidamente (Mathies, Giupponi, Ostendorf, 2007). A gestão sustentável dos recursos naturais cresceu em consequência da complexidade das interações entre os componentes socioculturais, econômicos e do sistema biofísico. A medida que melhores dados e métodos tornam-se disponíveis, a complexidade da representação do sistema é reconhecida. Ao mesmo tempo, o realismo e a relevância estão aumentando e permitindo o suporte direto ao desenvolvimento de gestão e política. Avanços recentes mostram uma sequência contínua entre modelagem de avaliação integrada e EDSS, com níveis variáveis de participação dos grupos interes-

sados no desenvolvimento e na aplicação do EDSS. Há uma tendência geral à melhor utilização dos dados interdisciplinares, da integração e da visualização dos resultados temporais e espaciais. Os desenvolvimentos futuros parecem voltados à melhor representação da realidade em modelos, melhorando a amizade com o usuário e seu uso em um contexto de discussão de grupo mediante abordagens participativas.

A complexidade dos problemas ambientais requer o desenvolvimento e a aplicação de novas ferramentas capazes de processar não só aspectos numéricos, mas também a experiência de especialistas e do público em geral, que são todos necessários nos processos de tomada de decisão (Poch *et al.*, 2004). O EDSS está entre as abordagens mais promissoras para encarar essa complexidade. O fato de diferentes ferramentas (técnicas de inteligência artificial, métodos estatísticos/numéricos, SIG e ontologias ambientais) poderem ser integradas sob diversas arquiteturas confere ao EDSS a habilidade de encarar problemas complexos e a capacidade de dar suporte aos processos de aprendizagem e à tomada de decisão. O fluxograma seguido para a criação do EDSS é apresentado por Poch *et al.* (2004) para cada um dos sistemas, juntamente com a discussão das tarefas envolvidas em cada etapa (análise do problema, coleta de dados e aquisição de conhecimento, seleção do modelo, implantação do modelo e validação do EDSS). Além disso, a arquitetura usada é apresentada, mostrando como os cinco níveis em que é baseada (coleta de dados, diagnóstico, suporte de decisão, planos e ações) foram implantados. Para promover ainda mais a capacidade do EDSS de lidar com a complexidade dos problemas ambientais, precisamos de maior integração de dados e conhecimento, melhoria dos métodos de aquisição de conhecimento, novos protocolos para compartilhar e reutilizar o conhecimento, desenvolvimento de marcos de desempenho e envolvimento dos usuários finais.

### Conclusões

Para tomar decisões melhores, precisamos começar assegurando que elas sejam tomadas em nível apropriado (na escala apropriada).

Muitas vezes, as decisões são tomadas longe dos recursos e das pessoas mais afetadas pelo uso deles (ver discussão a respeito do trabalho de Rappaport, 1979). Em outras palavras, elas são tomadas por entidades governamentais ou empresas, sem os insumos dos cidadãos e das comunidades afetadas. Em alguns casos, seria melhor deixar as comunidades decidirem o que é melhor para elas. Mas em muitos casos isso pode não ser prático, e há um importante papel desempenhado pelas entidades governamentais e pelos atores de alto nível, por exemplo, em assegurar que padrões superiores sejam aplicados quando determinada comunidade local estiver pronta para aceitá-los sem conflito. De modo geral, o nível apropriado de tomada de decisão deveria ser determinado pela escala do sistema de recursos a ser gerido. Quanto mais localizados estiverem os recursos, mais a decisão deverá caber à população local; quanto maior a área e quanto mais propensa a ter efeitos sobre outras bacias hidrográficas, mais a decisão deverá envolver um número maior de tomadores de decisão. Problemas como a chuva ácida, que envolvem o movimento de poluentes do ar pelas bacias hidrográficas e até mesmo de fronteiras nacionais, devem necessariamente abranger a tomada de decisão entre países, tratados internacionais e outros tomadores de decisão externos ao local. Kyoto, REED e outros tratados ambientais são iniciativas para fornecer esse tipo de coordenação de nível superior, mas sua implantação e seu cumprimento ficaram limitados a poucos países que tiveram êxito em colocar suas metas em prática (Cole, 2009). Um importante elemento de boa governança ambiental é a garantia aos cidadãos do acesso a informações e oportunidades de participar do processo de tomada de decisão munidos dessas informações. A Declaração do Rio, da conferência global de 1992 sobre ambiente e desenvolvimento, que foi adotada por 178 países, definiu que o acesso tem três componentes: acesso à informação, acesso à tomada de decisão e oportunidade de recorrer a recursos legais. Sem a presença desses três elementos, há ausência de participação pública e, provavelmente, de governança eficiente dos recursos. As informações necessárias envolvem o acesso a dados importantes, como a qualidade do ar e da água na comunidade local (pois isso implica se os cidadãos bebem a água ou não); a informação acerca de tendências ambientais ao

longo do tempo (para ver se as coisas estão degradando ou melhorando); a informação a respeito da poluição de instalações industriais (para dar aos cidadãos e às ONGs poder para pressionar as empresas em termos de comportamento responsável); e a informação a respeito de como lidar com emergências e riscos presentes em seu ambiente (por exemplo, se per e inundá-la). Esses deveriam ser os padrões de informação mínimos de que os cidadãos precisariam para agir de maneira responsável em uma sociedade democrática. O acesso à tomada de decisão requer que os cidadãos e outros grupos sejam capazes de influenciar as políticas e os planos nacionais, regionais e locais, e de participar em projetos ambientalmente significativos, como o licenciamento de centrais termoelétricas ou fábricas de produtos químicos. O acesso aos recursos legais permite que os cidadãos e as organizações da sociedade civil recorram a recursos legais em relação ao comportamento empresarial irresponsável, à ineficácia no cumprimento dos padrões de poluição e a outras falhas no processo de tomada de decisão que ameacem a saúde pública.

Um importante e crescente elemento de participação dos cidadãos é a proliferação de organizações não governamentais (ONGs), como as ambientais, que dobraram desde 1985 – hoje há mais de 40 mil oficialmente registradas. Essas organizações ajudaram a pressionar governos e empresas na abertura ao escrutínio público, permitindo maior participação dos cidadãos nas decisões. De outro lado, as próprias ONGs são capturadas na economia política mais ampla, que não questiona as bases do desenvolvimento irregular, a pobreza e a desigualdade (para uma análise crítica dessas questões, ver Bebbington, 2004). A globalização econômica também cresceu muito rapidamente, pois uma quantidade cada vez maior de empresas opera no mercado global (mais de 60 mil), com poucas restrições ambientais e pouca transparência. Algumas delas, como as de exploração de madeira na Ásia, extraem árvores ilegalmente e trabalham com servidores públicos corruptos, que permitem a violação das leis.

Uma das soluções propostas para a melhor governança ambiental foi a descentralização, ou seja, a transferência da tomada de decisão

os governos locais, mas em muitos casos ela não é viável, nem é uma panaceia para os problemas mencionados. Mais de sessenta países em desenvolvimento afirmam estar transferindo o poder para suas unidades locais. Entretanto, poucos casos de descentralização verdadeira foram registrados, e raramente recursos financeiros adequados são transferidos para as entidades locais, de modo a lhes permitir atuar efetivamente no monitoramento do ambiente e dando-lhes poder para processar aqueles que violam as normas locais. Na maioria dos casos, as entidades locais são encarregadas de implementar as decisões tomadas em outros lugares, sem responsabilidade local. Quando aplicada plenamente, a descentralização pode funcionar (Andersson, 2003 e 2004; ver em Andersson, Anda, Van Larhoven, 2008, os diversos obstáculos encontrados e sob que condições isso parece não funcionar). No capítulo seguinte, discutiremos a emergência de um novo campo, denominado ciência da sustentabilidade e sistemas acoplados homem-natureza.

## CAPÍTULO 8

# ■ Rumo a uma ciência da sustentabilidade

A CORRELAÇÃO ENTRE RENDA E FELICIDADE É SURPREENDENTEMENTE FRACA, OBSERVOU RONALD INGLEHART, PESQUISADOR DA UNIVERSIDADE DE MICHIGAN, EM UM ESTUDO ABRANGENDO DEZESSEIS PAÍSES E 170 MIL PESSOAS. UMA VEZ GOZANDO DE BEM-ESTAR, MAIS DINHEIRO PROPORCIONA RETORNOS DECRESCENTES. OS GANHADORES DE LOTERIA E OS CEM NORTE-AMERICANOS MAIS RICOS RELACIONADOS PELA REVISTA FORBES EXPRESSAM SOMENTE UMA FELICIDADE UM POUCO MAIOR DO QUE OS NORTE-AMERICANOS MÉDIOS. EMBORA, EM 1957, O NORTE-AMERICANO MÉDIO GANHASSE SOMENTE 8,7 MIL DÓLARES POR ANO EM VALORES DE HOJE E, ATUALMENTE, GANHE 20 MIL DÓLARES, DURANTE ESSE PERÍODO A QUANTIDADE DE NORTE-AMERICANOS QUE DISSE QUE SE SENTIA MUITO FELIZ DECLINOU DE 35% PARA 32%. ENQUANTO ISSO, A TAXA DE DIVÓRCIOS DOBROU, A TAXA DE SUICÍDIO DE ADOLESCENTES TRIPLICOU, OS CRIMES VIOLENTOS QUADRUPLICARAM E MAIS PESSOAS SOFREM DE DEPRESSÃO. ATUALMENTE, MAIS DO QUE EM TODOS OS TEMPOS, TEMOS CASAS ENORMES E LARES DESFEITOS, RENDAS ALTAS E MORAL BAIXA, DIREITOS GARANTIDOS E CIVILIDADE DECRESCENTE. CELEBRAMOS NOSSA PROSPERIDADE, MAS ANSIAMOS POR UM SENSO DE PROÓSITO. EM UMA ÉPOCA DE ABUNDÂNCIA, ESTAMOS FAMINTOS POR AQUILO QUE O DINHEIRO NÃO PODE COMPRAR. TENDO ASSEGURADO OS DIREITOS HUMANOS E A AFLUÊNCIA, PROCURAMOS UM SENTIDO. NOSSO PRIMEIRO PASSO É TER MENOS E MUDAR O MUNDO PARA UM MUNDO SUSTENTÁVEL.