

Fundação Universidade Federal do Rio Grande

Revista Eletrônica do Mestrado em Educação Ambiental

Rev. eletrônica Mestr. Educ. Ambient.

ISSN 1517-1256

Programa de Pós-Graduação em Educação Ambiental

Volume 17, julho a dezembro de 2006

MODELAGEM EM RACIOCÍNIO QUALITATIVO SOBRE DEGRADAÇÃO DE VEGETAÇÃO RIPÁRIA EM MICROBACIAS SEMI- URBANIZADAS DO CERRADO

Bruno Versiani dos Anjos¹
Paulo Salles²

RESUMO

A gestão de recursos hídricos no Brasil, a partir da Lei 9.433/1997, deve ser descentralizada e participativa. Entretanto, faltam ferramentas que promovam a compreensão de fenômenos relacionados ao ciclo e ao uso da água para os envolvidos com Comitês de Bacia Hidrográfica. Este trabalho descreve a construção de um modelo baseado em Raciocínio Qualitativo, área da Inteligência Artificial dedicada a criar representações simbólicas em raciocínio automatizado sobre sistemas físicos utilizando conhecimentos incompletos, para dar suporte a tomadores de decisão na gestão de bacias hidrográficas. O modelo toma como referência a situação da microbacia do Riacho Fundo, no Distrito Federal, e representa conseqüências da pressão antrópica sobre ambientes naturais ribeirinhos e da tomada de consciência ambiental pela população, com a adoção de práticas de manejo. O modelo foi submetido à avaliação de três grupos de potenciais usuários que possuíam algum tipo de experiência com gestão de bacias hidrográficas. De maneira geral, o modelo foi considerado satisfatório para facilitar a compreensão dos fenômenos sócio-ambientais representados, com a recomendação de que modelos semelhantes devem ser construídos com a participação dos usuários. Esses resultados

¹ Aluno de Mestrado; Universidade de Brasília, Programa de Pós-graduação em Ecologia. Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte. CEP: 70.910-900; Brasília – DF, Brasil. Email: bversiani@gmail.com.

² PhD em Ecologia; Universidade de Brasília, Programa de Pós-graduação em Ecologia. Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte. CEP: 70.910-900 Brasília – DF, Brasil. Email: psalles@unb.br; URL: <http://staff.science.uva.nl/~psalles/>

confirmam o potencial do Raciocínio Qualitativo para a modelagem de conceitos relevantes para a gestão dos recursos hídricos.

Palavras-chave: modelos, Raciocínio Qualitativo, bacia hidrográfica, Riacho Fundo.

ABSTRACT

Management of water resources, after the Brazilian federal law 9.433/1997, has to be decentralized and to involve society. However, there are few tools to support those involved with Water Basin Committees in improving their understanding about the water cycle and uses of water. This paper describes a model based on Qualitative Reasoning, an area of Artificial Intelligence dedicated to create symbolical representations for automated reasoning about physical systems with incomplete knowledge, to provide support for decision makers in water basin management. The model use the situation in the Riacho Fundo basin, in the Federal District, as a reference, and represents the effects of human pressure on riparian natural environments and of environmental awareness and the use of management practices. The model was evaluated by three groups of potential users, with some experience on water management, and was approved as a tool to improve understanding, with the recommendation that the modelling effort in similar situations should include the users. The results confirm the potential of Qualitative Reasoning for modelling relevant concepts for water management.

Keywords: models, Qualitative Reasoning, water basin, Riacho Fundo

1. INTRODUÇÃO

A sociedade tem sido cada vez mais chamada a participar dos processos decisórios relativos à gestão dos recursos hídricos. Comitês de bacias hidrográficas, formados por representantes da sociedade civil, dos setores produtivos e do poder público, implementam a gestão descentralizada e participativa preconizada pela nova legislação de recursos hídricos, a Lei federal n.º 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Entretanto, devido à falta de formação técnica, a maioria dos envolvidos nos Comitês de Bacia Hidrográfica não conhece os fenômenos sobre os quais deve tomar decisões e existem poucas ferramentas para apoiá-los. Por essa razão, é relevante dispor de modelos formais que possam ser usados com propósitos educacionais e que consigam unir alguns requisitos, como coerência, simplicidade, vocabulário acessível e proximidade com a maneira humana de pensar.

Nesse contexto, modelos são ferramentas formais que podem ser usadas para dar suporte a membros de comitês de bacias hidrográficas e à sociedade, de modo geral, para a compreensão de fenômenos relacionados ao ciclo hidrológico e à gestão de recursos hídricos. Infelizmente, a maioria dos modelos tradicionalmente utilizados pela comunidade acadêmica e mesmo por técnicos que atuam no setor são baseados em equações matemáticas, se mostrando de difícil

compreensão para muitos setores da sociedade envolvidos nos Comitês e na gestão de recursos hídricos. Logo, é importante desenvolver ferramentas que, ao mesmo tempo em que formalizam o conhecimento (tanto o conhecimento científico como o conhecimento tradicional), sejam amplamente acessíveis. Raciocínio Qualitativo (daqui para frente abreviado como RQ), é uma área da Inteligência Artificial que se dedica a criar representações simbólicas sobre sistemas físicos, particularmente para aspectos quantitativos normalmente representados por equações matemáticas, para dar suporte ao raciocínio automatizado, em situações em que os conhecimentos disponíveis são incompletos ou representados qualitativamente (Weld & de Kleer, 1990). O potencial dessas técnicas tem sido explorado por diversos autores (por exemplo, Araújo, 2005; Salles *et al.*, 2006), e foi adotado para o esforço de modelagem aqui descrito.

Tomou-se como referência a microbacia do Riacho Fundo, parte da bacia do Lago Paranoá, localizada no Distrito Federal. A bacia do Riacho Fundo vem sendo objeto de ocupação desordenada, particularmente com a transformação de áreas cobertas por vegetação natural e ocupadas por atividades agrícolas em áreas urbanas. Entre os problemas mais relevantes para essa bacia (Fonseca, 2001), incluem-se os seguintes efeitos de ações antrópicas: a) o desmatamento da vegetação ripária; b) mudanças no fluxo de água de nascentes e lençóis freáticos; c) erosão; d) perda de biodiversidade aquática e terrestre; e) emissão de esgotos sem tratamento. Entretanto, observa-se nos últimos anos o aumento da consciência ambiental da população local e o interesse pela criação dos Comitês da Bacia Hidrográfica do Lago Paranoá e da microbacia do Riacho Fundo. Além disso, verifica-se que o governo do Distrito Federal, com o apoio dos moradores da bacia, vem adotando práticas de manejo que resultam no aumento do bem-estar das populações que vivem às margens do Riacho Fundo.

O modelo apresentado neste trabalho busca responder duas questões: a) que conceitos são relevantes para a compreensão das ações antrópicas sobre microbacias na região do Cerrado? b) como representar esses conceitos em modelos qualitativos? A primeira questão diz respeito à seleção e coleta dos dados, em busca daqueles que melhor explicitam os processos sociais que historicamente ocorrem na ocupação de uma bacia hidrográfica e suas conseqüências ecológicas. A segunda questão trata da representação formal desses conceitos em linguagem de modelagem, levando-se em conta a coerência, simplicidade e legibilidade do modelo pelos usuários.

O objetivo do trabalho é, portanto, a construção de um modelo qualitativo destinado a integrantes de Comitês de Bacia Hidrográfica, que sirva para aumentar a compreensão de fenômenos mencionados acima e, desse modo, dar suporte ao processo de tomada de decisões na gestão desses recursos. Acreditamos que, apesar do foco na microbacia do Riacho Fundo, a aplicabilidade do modelo pode ser estendida a outras bacias semi-urbanizadas do bioma Cerrado, que possuam as mesmas características ambientais e sociais.

Este artigo está organizado da seguinte forma: na seção 2 discutem-se conceitos relativos a bacias hidrográficas e é feita a caracterização da microbacia do Riacho Fundo; os fundamentos do Raciocínio Qualitativo e as ferramentas utilizadas neste trabalho são apresentados na seção 3; na seção 4 o modelo é descrito e na seção 5 são apresentadas as simulações produzidas pelo modelo; na seção 6 os resultados obtidos na avaliação do modelo são discutidos; finalmente, na seção 7 apresentam-se as conclusões e os encaminhamentos futuros.

2 . ASPECTOS CONCEITUAIS RELATIVOS A BACIAS HIDROGRÁFICAS E À BACIA DO RIACHO FUNDO

Segundo Carlos Tucci, a unidade fundamental para análise do ciclo hidrológico é a bacia hidrográfica, definida, segundo esse autor, como a área de captação natural da água da precipitação que faz convergir os escoamentos para um único ponto de saída, seu exutório. A bacia hidrográfica compõe-se, portanto, de superfícies vertentes e de redes de drenagem formadas por cursos de água que confluem, até resultar em um leito único. Pode ser ainda considerada como um sistema físico no qual a entrada é o volume de água precipitado e a saída é o volume de água escoado pelo exutório, descontadas as quantidades evaporada, transpirada e também a infiltrada profundamente no solo (Tucci, 2000).

Ao adotar-se a bacia hidrográfica como unidade básica de planejamento, reconheceu-se que o conhecimento dos processos e das relações complexas que ocorrem na totalidade de um território definido por uma bacia hidrográfica podem servir de base ao planejamento do uso e da ocupação desse mesmo território.

A vegetação ripária constitui-se em importante componente da integridade das bacias hidrográficas, por desempenhar importantes funções ecológicas e hidrológicas (Felfili, 1994), protegendo as margens dos rios, evitando o assoreamento, garantindo a manutenção da qualidade e quantidade de água dos seus leitos, provendo de alimento para a fauna nativa (Felfili *et al*, 2000). Nos rios da região do Cerrado, distinguem-se dois tipos de matas, chamadas mata ciliar e mata de galeria. Nesta, as copas das árvores das duas margens se juntam, formando um túnel sobre o leito do rio, enquanto na primeira isso não ocorre. Como resultado, a maior entrada de luz determina o estabelecimento de diferentes condições ecológicas. Neste trabalho essas diferenças não são consideradas, razão pela qual prefere-se o termo 'ripária' para descrever essa vegetação.

A ocupação de bacias hidrográficas do Distrito Federal reveste-se de especial significado, em função das características de sua rede hidrográfica. Situado no Planalto Central, o DF e seu entorno são o berço das principais bacias hidrográficas brasileiras. O rápido crescimento urbano experimentado desde a fundação de Brasília e a ocupação desordenada do solo (Anjos, 1991) têm produzido um quadro caótico de degradação dos recursos hídricos. Os cinturões de proteção dos mananciais têm sido desmatados, facilitando o aumento de assoreamento dos córregos e o aterramento de nascentes (Fonseca, 2001).

A micro-bacia do Riacho Fundo pertence à bacia do Lago Paranoá, que por sua vez pertence à bacia hidrográfica do Rio Paraná. De todos os segmentos do Lago Paranoá, o braço do Riacho Fundo tornou-se o mais estreito e raso. A cobertura vegetal, de maneira genérica, é parte do domínio do Cerrado, e cresce sobre um substrato que recebe indiretamente o efeito do clima, sendo mantido úmido pela espessura do lençol freático. A ocupação das margens do Riacho Fundo é heterogênea, indo de áreas nitidamente urbanas, áreas semi-urbanas, áreas de proteção ambiental (45% da área bacia está sob algum tipo de lei de proteção ambiental) e áreas rurais (Mello, 1997).

Observa-se nos últimos anos aumento expressivo da consciência da população da bacia do Riacho Fundo para os problemas ambientais determinados pela ação antrópica. Com o apoio da Universidade de Brasília, de organizações não-governamentais e de outras instituições, estão em curso diversas atividades de educação ambiental e é forte o movimento pela criação do Comitê de Bacia do Lago Paranoá e do sub-comitê do Riacho Fundo (Salles, 2001). Contatos diversos com

os envolvidos na criação do Comitê e com outras ações mostrou aos autores deste trabalho as dificuldades experimentadas por eles para compreender fenômenos relativos ao ciclo hidrológico e utilizar conhecimentos técnicos a gestão de recursos hídricos.

3 . MODELOS CIENTÍFICOS E RACIOCÍNIO QUALITATIVO

Modelos científicos podem ser definidos como representações abstratas de sistemas, isto é, de conjuntos de objetos inter- relacionados, que permitem fazer observações sobre o comportamento e previsões testáveis sobre os estados do sistema em situações diferentes daquelas em que o sistema foi representado (Bredeweg *et al.*, 2006). Modelos podem ser usados com três finalidades: previsão, monitoramento e compreensão (Haefner, 1996). De interesse para este trabalho são os modelos usados para compreensão, ou modelos conceituais, aqueles em que, conhecidos os dados de entrada e as respostas dadas pelo sistema, busca-se definir a estrutura do sistema.

Modelos constituem a principal maneira de organizar conhecimentos sobre domínios ecológicos, de maneira que possam ser processados computacionalmente. Entretanto, os modelos tradicionalmente usados em ecologia, baseados em abordagens numérico-matemáticas, requerem conjuntos de dados completos e de boa qualidade, pois buscam representações precisas da realidade. Argumenta-se, porém, que essas condições dificilmente são encontradas em ecologia. De fato, o conhecimento ecológico é vasto, disperso e heterogêneo. Assim, os dados, quando existem, são geralmente incompletos e imprecisos. Conseqüentemente, faltam ferramentas computacionais para organizar e raciocinar a partir da grande base de conhecimentos ecológicos que vêm sendo acumulada ao longo do tempo (Rykiel, 1989).

Maneiras de representar conhecimentos sobre os quais não se dispõe de fundamentos teóricos bem estabelecidos e de valores precisos para as variáveis são o objeto de pesquisa e desenvolvimento de uma área da Inteligência Artificial conhecida como Raciocínio Qualitativo (Weld & de Kleer, 1990). Pesquisas nessa área se iniciaram no final dos anos 70, a partir da constatação de que desde crianças somos capazes de raciocinar e tirar conclusões sobre sistemas físicos complexos sem usar números ou representações complexas como equações matemáticas.

De fato, mesmo engenheiros e técnicos primeiro fazem uma avaliação qualitativa do problema que querem abordar para então usar equações e números, e depois fazem nova avaliação qualitativa dos resultados. Além disso, a construção de robôs capazes de se deslocar sem restrições pelo ambiente e fazer tarefas cotidianas requer que essas máquinas sejam dotadas de formas de raciocínio qualitativo.

Nos últimos 20 anos, métodos e técnicas baseadas em RQ se aperfeiçoaram muito e aplicações em diferentes áreas são cada vez mais freqüentes (Bredeweg & Struss, 2003). O estado da arte dos trabalhos em RQ foi apresentado em número especial da revista *AI Magazine*, editado por Bredeweg & Struss e publicado no final de 2003. Reimpressões dos principais trabalhos que deram a fundamentação para a área podem ser encontrados em Weld & de Kleer (1990).

Modelos qualitativos têm sido aplicados a diversos aspectos relacionados aos recursos hídricos, e são de particular interesse para o desenvolvimento deste trabalho. Embora sem usar técnicas elaboradas em RQ, Camara *et al.* (1987) e Antunes *et al.* (1987) descrevem um sistema (SLIN) que dá suporte a simulações usando valores expressos em termos lingüísticos. Esses autores apresentam aplicações na gestão de recursos hídricos na análise de dispersão de poluentes e na avaliação de impactos ambientais causados por usinas hidroelétricas. Mais recentemente, outros trabalhos aplicaram técnicas baseadas em RQ para a construção de modelos qualitativos. Guerrin (1991) criou uma álgebra qualitativa, implementada em SIMAO, e aplicou-a em um sistema voltado para a produção de peixes. Guerrin & Dumas (2001 a; 2001 b) descrevem a construção de modelos qualitativos sobre a criação de salmão, tratando especificamente da mortalidade desses peixes na fase jovem. Araújo *et al.* (2004) e Araújo (2005) desenvolveram modelos capazes de prover cenários distintos para descrever alterações na qualidade da água em uma bacia hidrográfica a partir de dados sobre concentração de oxigênio dissolvido e o uso da bacia hidrográfica.

Do ponto de vista teórico, três grandes abordagens se consolidaram como as principais maneiras de construir modelos qualitativos: a abordagem centrada em componentes (de Kleer & Brown, 1984), a abordagem centrada em restrições (Kuipers, 1986) e abordagem centrada em

processos (Forbus, 1984). Neste trabalho serão descritos apenas detalhes desta última, pelo fato de ter sido escolhida para representar os fenômenos de interesse da microbacia do Riacho Fundo.

Na abordagem centrada em processos (Forbus, 1984), os sistemas físicos são modelados em termos de objetos (entidades) e de suas propriedades, quantidades e relações, que mudam pela ação de processos. A possibilidade de representar situações, descrever os mecanismos que causam as mudanças e representar explicitamente as relações de causalidade são características que justificam a escolha dessa abordagem para a representação de problemas ecológicos, como os tratados neste trabalho (*cf.* Salles, 1997). Essa abordagem é descrita pela Teoria Qualitativa dos Processos (TQP) (Forbus, 1984).

A Teoria Qualitativa dos Processos aborda duas questões fundamentais para a representação de sistemas hidrológicos: como descrever os mecanismos que desencadeiam as mudanças em um sistema e como modelar cadeias de causalidade que propagam mudanças provocadas por tais mecanismos. De acordo com a TQP, as mudanças são sempre iniciadas por processos e se propagam para todo o sistema por meio de relações de dependências entre as quantidades. Esses aspectos são detalhados abaixo.

Os principais primitivos de modelagem em TQP são: entidades, quantidades, espaços quantitativos, relações causais, *views* e *processos*. Durante o processo de modelagem, primeiramente são definidos os objetos e entidades, representados por meio de árvore hierárquica, de modo que as características dos objetos que estão acima são herdadas pelos objetos abaixo. As propriedades relevantes dos objetos são representadas como quantidades. Estas possuem sempre dois valores, o da magnitude e o da derivada. O primeiro dá idéia do tamanho da quantidade, e a segunda da direção de mudança. O conjunto de possíveis valores que quantidades podem assumir em um modelo qualitativo é chamado espaço quantitativo. Esses valores, em geral poucos, representam os estados qualitativos em que a variável pode ser encontrada. O espaço quantitativo pode conter pontos e intervalos. Por exemplo, {*zero, pequeno, médio, grande*}, que inclui os pontos *zero* e *médio* e os intervalos *pequeno* e *grande*. Importante pressuposto é o de que os valores assumidos pelas quantidades durante uma simulação não podem saltar os valores no espaço quantitativo. Desse modo, caso o conjunto de fatores que agem

sobre a quantidade assim o determinem, esta assumirá sempre, no estado seguinte, valor contíguo acima ou abaixo (*cf.* Salles, 1997).

As relações causais incluídas na TQP podem ser de dois tipos: influências diretas, colocadas por processos, e influências indiretas, que propagam os efeitos dos processos para outras quantidades (Forbus, 1984). Ambas podem ser positivas ou negativas. A dinâmica do sistema depende das influências diretas, e processos são sempre representados por influências diretas (I+ e I-). As influências diretas determinam o valor da derivada da quantidade influenciada. Desse modo, influências são modeladas por *taxas* que são somadas ou subtraídas das quantidades diretamente influenciadas. Com efeito, a noção de processo adotada na TQP pode ser vista como uma representação qualitativa de equações diferenciais ordinárias que têm o tempo como variável independente. Usando-se a notação das equações diferenciais, pode-se dizer que $I+(Q, T)$ corresponde a $dQ/dt = \dots + T \dots$

Os efeitos dos processos se propagam para as demais quantidades do sistema por meio de influências indiretas, também chamadas proporcionalidades qualitativas (P+ e P-). Estas mostram como a variação de uma quantidade determina a variação de outra quantidade. Por exemplo, se $P+(X, Q)$, quando Q estiver aumentando, Z também aumentará, e quando Q estiver diminuindo, Z diminuirá. De modo semelhante, se $P-(Z, Q)$, as variações de Q fazem com que Z varie na direção oposta. Segundo Forbus (1984), as proporcionalidades qualitativas representam funções monotônicas e permitem a representação qualitativa de equações matemáticas. Como se pode depreender do exposto, influências e proporcionalidades qualitativas expressam tanto funções matemáticas como relações de causalidade.

Views e *processos* são conjuntos de assertivas que descrevem, com detalhes, certos aspectos do sistema. Ambos possuem campos preenchidos com informações sobre objetos, condições externas e condições quantitativas para que as coisas aconteçam e relações entre quantidades. De maneira geral, os *views*, ou *visões*, descrevem aspectos estáticos do sistema, tais como características de objetos ou situações típicas em que o sistema pode ser encontrado, e relações causais do tipo proporcionalidades. Os *processos* descrevem os mecanismos de mudança

(isto é, processos)³. *Processos* trazem os mesmos tipos de informação que *visões*, exceto pelo fato que apenas *processos* trazem informações sobre as influências diretas.

Uma das abordagens mais utilizadas para a construção de modelos em RQ é conhecida como *modelagem composicional* (Falkenhainer & Forbus, 1991). Segundo essa abordagem, em lugar de construir um único modelo, capaz de representar todos os aspectos do sistema de interesse, a estrutura e o funcionamento do sistema são representados em pedaços relativamente autônomos, conhecidos como *fragmentos de modelo* (FM). Como o mesmo FM pode ser reutilizado diversas vezes, o simulador qualitativo deve possuir algoritmos capazes de selecionar e combinar diversos FM para compor diferentes modelos de simulação, a partir do mesmo conjunto (*biblioteca*) de FM. Essa maneira de construir modelos dá grande flexibilidade ao trabalho de modelagem, visto que pode-se usar a mesma biblioteca de fragmentos de modelo para construir diferentes modelos sobre problemas de complexidade crescente.

Para o esforço de modelagem aqui descrito, foram usadas três ferramentas, denominadas GARP, HOMER e VISIGARP. GARP, um acrônimo para *General Architecture for Reasoning in Physics* (Bredeweg, 1992), constitui um simulador qualitativo implementado na linguagem de programação Prolog. HOMER (Bessa Machado & Bredeweg, 2002) constitui um software que apresenta interfaces gráficas para construção de modelos utilizados em GARP. VISIGARP (Bouwer & Bredeweg, 2001) é um software que mostra diagramaticamente os resultados das simulações em GARP. Essas ferramentas implementam a Teoria Qualitativa dos Processos.

4 . O MODELO “RIACHO FUNDO”

Os dados utilizados para a construção do modelo foram obtidos a partir de literatura e de saídas de campo na microbacia do Riacho Fundo. Vários problemas foram levantados em entrevistas com moradores dos núcleos urbanos Vila Telebrasília, próxima do jardim Zoológico

³ A terminologia usada, infelizmente, pode parecer confusa. Entretanto, busca-se aqui fazer a tradução da TQP tal como descrita em Forbus (1984).

de Brasília, e na região conhecida por Sucupira, situada no Riacho Fundo I, cidade satélite de Brasília, ambos localizados na microbacia.

A estrutura do sistema é descrita no modelo por meio dos seguintes objetos: *ator humano*, *vegetação*, *nascente*, *lençol freático*, *margens*, *curso médio* e *clima*. Entre eles são estabelecidas as seguintes relações (expressas em itálico): ator humano *exerce influência sobre* as margens, nascentes e vegetação; o clima *influencia* os corpos de água e a vegetação; o lençol freático *alimenta* a nascente, que, por sua vez, *alimenta* o curso médio; a vegetação *protege* as margens e a nascente. Quantidades e fluxos se relacionam aos objetos como segue: ao *ator humano* estão associadas as quantidades *manejo*, *desmate*, *conscientização* e *aproveitamento da água*; ao objeto vegetação estão associadas as quantidades *densidade de vegetação* e *fluxo crescimento da vegetação* (ou rebrota e desmate); associados a *curso médio* estão as variáveis *quantidade de água* e a *diversidade da biota aquática*; ao objeto *nascente* estão associadas *quantidade de água evaporada* e *quantidade de esgoto*, bem como a taxa *fluxo de água*; associados a *margem* estão as quantidades que dizem respeito à *diversidade de biota terrestre* e *erodibilidade*; associada a *clima* está a quantidade *precipitação*; e associada a *lençol freático* está *quantidade de água*. Todas as quantidades possuem espaço quantitativo {muito, normal e baixo}; todos os fluxos possuem espaço quantitativo {positivo, zero, negativo}. As derivadas de todas as quantidades possuem espaço quantitativo {minus, zero, plus}, valores definidos *a priori* por GARP para indicar que os valores das quantidades são decrescentes, estáticos e crescentes, respectivamente.

A biblioteca de fragmentos de modelo consistem de vinte fragmentos estáticos (*visões*) e dois fragmentos dinâmicos (*processos*). O primeiro fragmento de modelo dinâmico diz respeito ao processo de ganho ou perda de vegetação devido a manejo ou desmate, respectivamente; o segundo diz respeito a como o fluxo de água das nascentes influencia diretamente a quantidade de água no curso médio. Não existe correspondência biunívoca entre cada fragmento de modelo desenvolvido e cada fenômeno representado, ou seja, um fragmento de modelo não diz respeito a apenas um fenômeno, e um fenômeno possui diversos fragmentos de modelo em sua construção. De maneira genérica, cada fragmento de modelo representa um ou alguns poucos elo(s) da cadeia de causalidade. Outro aspecto a ser destacado é o uso de desigualdades e correspondências. Há dois fragmentos de modelo que representam situações em que o desmate é maior do que o

5. UM EXEMPLO DE SIMULAÇÃO : CONSCIÊNCIA AMBIENTAL AUMENTANDO

A simulação do modelo a partir do cenário “Com consciência” gerou 44 estados, que representam diversas possibilidades de progressão de valores para as quantidades. Para descrever resultados representativos, foi escolhida a trajetória composta pelos estados [1, 7, 29, 31, 38, 41, 43, 42]. A figura 2 abaixo mostra diagrama com os estados obtidos na simulação.

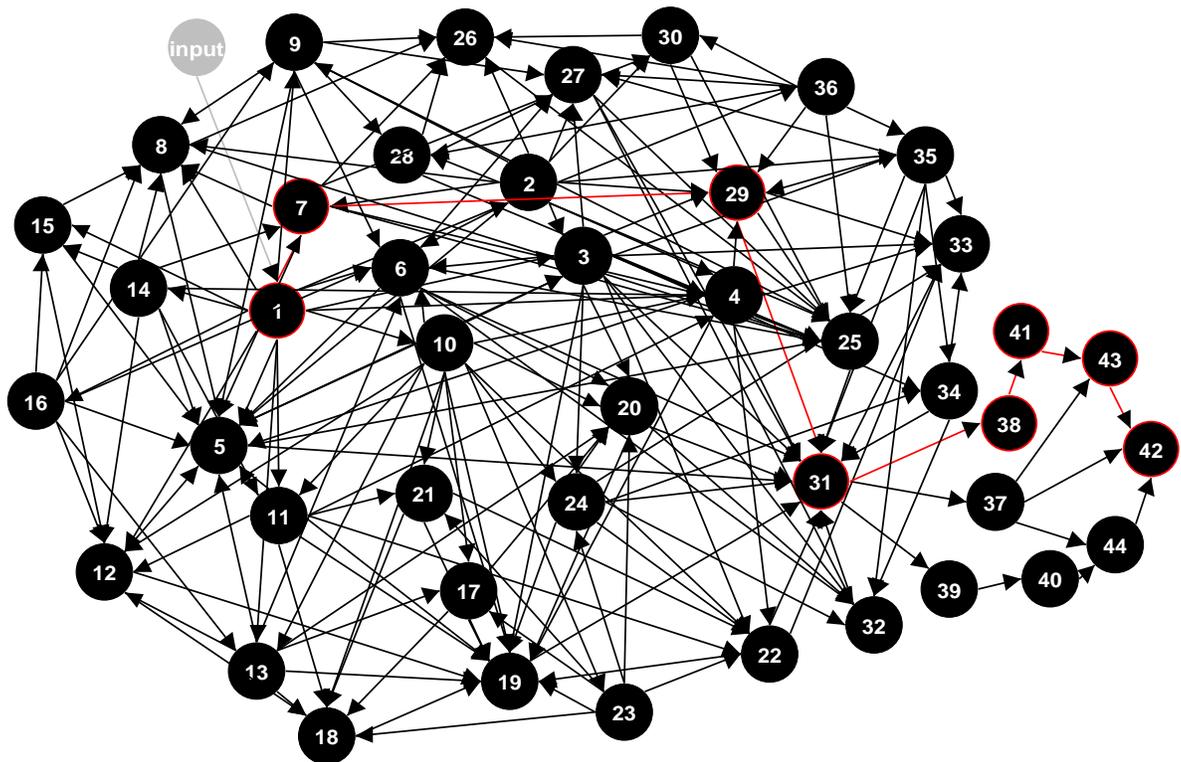


Figura 2: Grafo de estados obtidos com simulação do modelo “Riacho Fundo”, cenário inicial “Conscientização positiva”.

Como as cadeias causais são de suma importância para a compreensão dos conceitos expressos em modelos qualitativos, é feita a descrição das relações de causa e efeito estabelecidas entre quantidades, como mostra a Figura 1 e da evolução dos valores das quantidades durante a simulação mostrada na Figura 2. A evolução dos valores é mostrada nas Figuras 3 a 6.

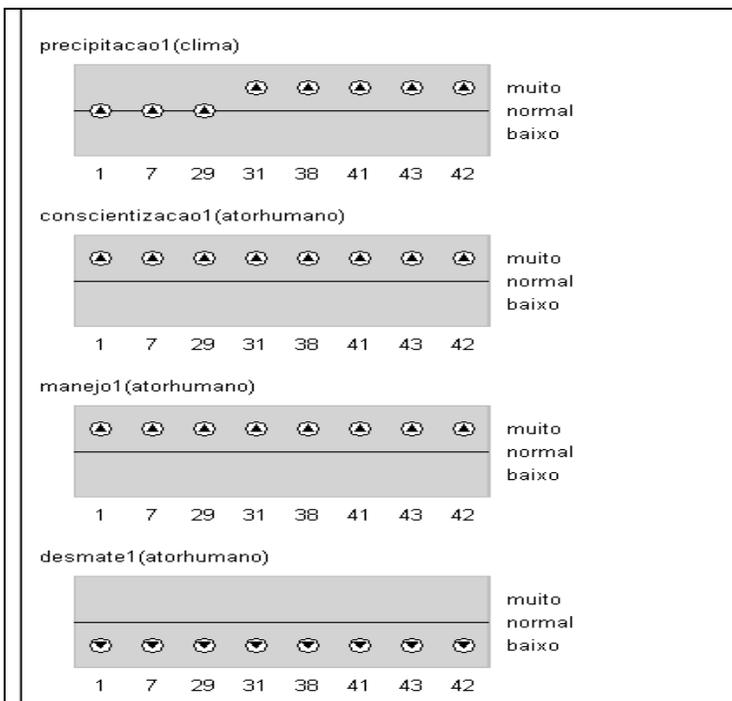


Figura 3 – Trajetória dos valores para as quantidades no modelo “Riacho Fundo” (Parte 1)

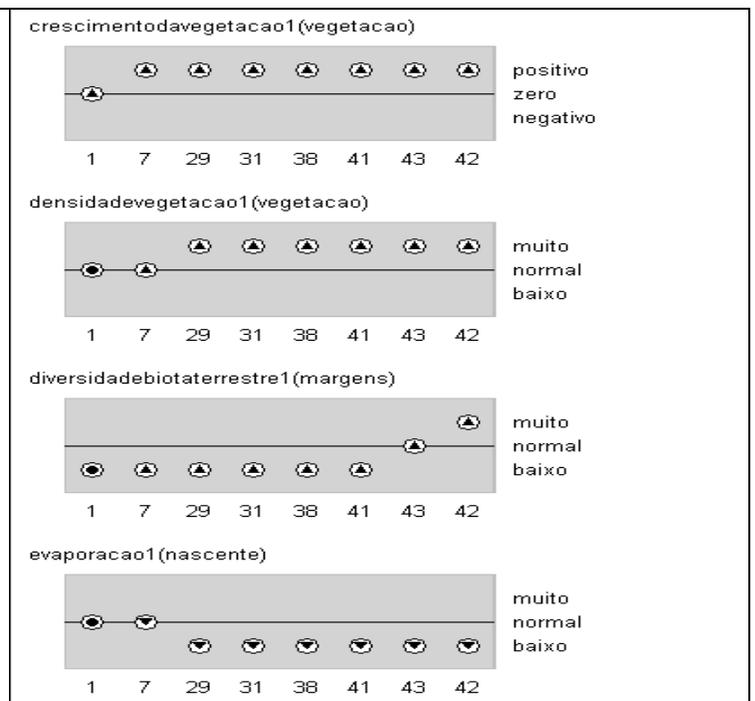


Figura 4 – Trajetória dos valores para as quantidades no modelo “Riacho Fundo” (Parte 2)

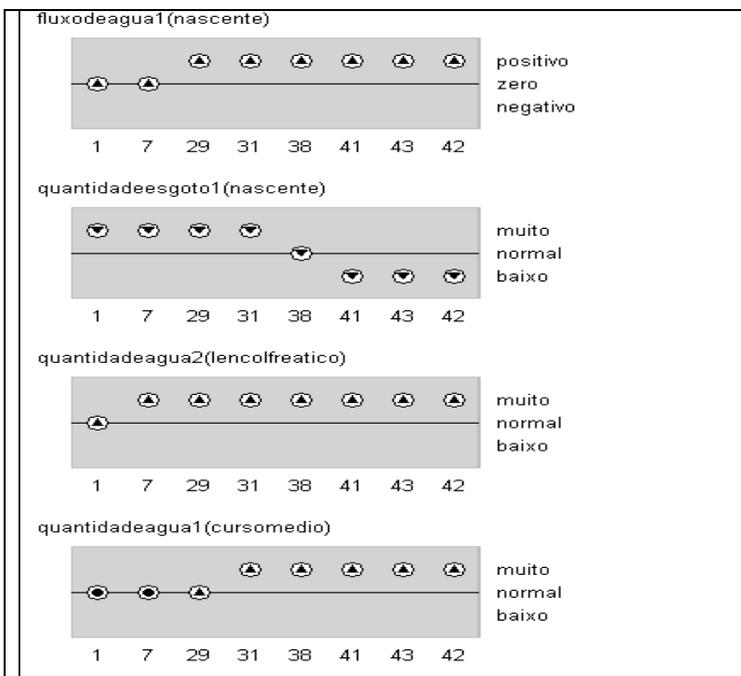


Figura 5 – Trajetória dos valores para as quantidades no modelo “Riacho Fundo” (Parte 3)

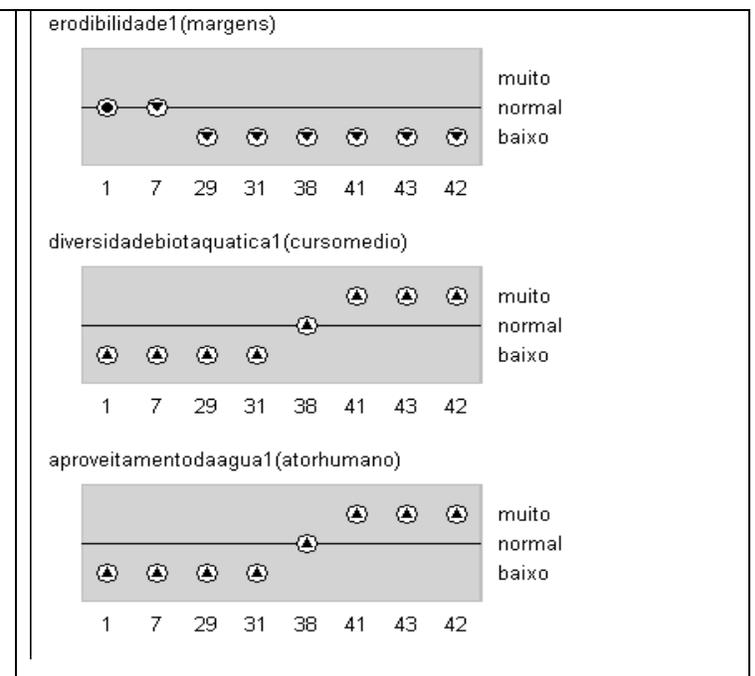


Figura 6 – Trajetória dos valores para as quantidades no modelo “Riacho Fundo” (Parte 4)

A simulação mostra diversos fenômenos de interesse para a compreensão do funcionamento do sistema Riacho Fundo. Merecem destaque a representação das conseqüências do aumento da conscientização sobre a densidade da vegetação, a quantidade de esgotos jogados nas nascentes, o aproveitamento dos recursos hídricos pelo ator humano, a biodiversidade terrestre e aquática e o fluxo de água nas nascentes, no lençol freático e no curso médio do rio.

Neste modelo, a aquisição de consciência ambiental não é representada por um processo. Por essa razão, foi usado o pressuposto “Conscientizacaoplus” para definir os valores da quantidade *conscientização* no cenário inicial: magnitude no intervalo *muito* e derivada positiva, isto é, a conscientização está crescendo. Esses valores são mantidos durante toda a simulação, dado que o pressuposto permanece válido. Essa condição se propaga para o resto do sistema, por meio de proporcionalidades qualitativas: a quantidade *conscientização* influencia indireta e positivamente a quantidade *manejo* e negativamente as quantidades *desmate* e *quantidade de esgoto*. Inicialmente serão descritos os efeitos de *conscientização* sobre *manejo*. Em seguida serão descritos os efeitos do manejo sobre a densidade da vegetação e as conseqüências da variação desta quantidade. Finalmente serão demonstrados os efeitos da conscientização sobre a quantidade de esgotos presentes na nascente e suas conseqüências.

Como foi implantada no modelo uma correspondência entre *conscientização* e *manejo*, ambas apresentam o mesmo valor, *muito* e crescendo. A quantidade *desmate* apresenta valor *baixo* e derivada negativa, pois, além da influência negativa de *conscientização*, o pressuposto “Naodesmatando” foi declarado no cenário inicial. Como *manejo* é maior do que *desmate*, o fluxo *crescimento da vegetação* é positivo e influencia positiva diretamente (I+) a *densidade da vegetação*, fazendo-a crescer, até que esta atinja o valor *muito* no estado 29.

A quantidade *densidade da vegetação*, por sua vez, influencia indiretamente quatro quantidades: *diversidade do biota terrestre*, *erodibilidade*, *evaporação* e *quantidade de água* do lençol freático. A influência sobre *diversidade do biota terrestre* é indireta e positiva (P+). Logo, apesar de inicialmente ter valor *baixo*, esta quantidade cresce ao longo da simulação, atingindo valor *muito* no último estado.

A quantidade *densidade de vegetação* exerce influência indireta negativa sobre *erodibilidade* das margens (P-). Como a primeira quantidade está aumentando, *erodibilidade* diminui. A quantidade *evaporação* nas nascentes também é influenciada negativamente por *densidade de vegetação* e decresce, atingindo valor *baixo* no estado 29.

A *quantidade de água* dos lençóis freáticos, por sua vez, sofre influências indiretas positivas das quantidades *densidade de vegetação* e *precipitação*. Como ambas estão crescendo, essa quantidade de água também cresce. Estes resultados mostram, portanto, que o aumento da conscientização e de ações de manejo levam ao aumento da densidade da vegetação e, daí, ao aumento da biodiversidade terrestre e à diminuição da erosão nas margens e da evaporação das nascentes.

A quantidade *fluxo de água* das nascentes é influenciada positivamente pelas quantidades *precipitação* e *quantidade de água* do lençol freático e negativamente pela *evaporação*. Como os valores de *precipitação* são maiores ou iguais a *evaporação* e a *quantidade de água* do lençol freático está crescendo, as influências positivas prevalecem (a influência negativa não está representada), e o *fluxo de água* das nascentes cresce, atingindo valor *positivo* no estado 29.

O *fluxo de água* das nascentes coloca uma influência direta positiva (I+) sobre *quantidade de água* do curso médio, que começa a crescer a partir do estado 29, tão logo o fluxo nas nascentes se torna positivo. Desse modo, a quantidade de água do curso médio atinge valor *muito* no estado 31.

Outro aspecto relevante diz respeito aos efeitos da conscientização sobre o aproveitamento a água e a biodiversidade aquática. A quantidade *conscientização* coloca um influência indireta negativa sobre *quantidade de esgotos*. Como a primeira está crescendo, esta decresce, atingindo valor *baixo* no estado 41. A quantidade de esgotos, por sua vez, está ligada à quantidade *proveitabilidade da água* por uma proporcionalidade negativa. Como a quantidade de esgotos está diminuindo, a *proveitabilidade da água* cresce.

Além disso, a quantidade de esgotos também exerce influência indireta negativa sobre a quantidade diversidade da biota aquática. Como os esgotos estão diminuindo, a biodiversidade aquática, que tinha no início da simulação valor baixo, aumenta e atinge valor muito no estado 41.

Com os resultados mostrados acima, o modelo é capaz de explicar como o aumento da consciência e conseqüente adoção de práticas de manejo da bacia resultam no aumento da densidade da vegetação ripária, da biodiversidade terrestre e diminuição da erodibilidade das margens; na redução da evoporação e no aumento do fluxo de água das nascentes; no aumento do fluxo de água do curso médio do rio; na diminuição da quantidade de esgotos encontrados na nascente; no aumento do aproveitamento da água e da biodiversidade aquática. Foi implementado no modelo um outro cenário inicial “Sem consciência”, em que a falta de conscientização resulta em efeitos completamente opostos.

6 . AVALIAÇÃO DO MODELO “RIACHO FUNDO”

O modelo “Riacho Fundo” foi avaliado por um grupo de potenciais usuários quanto a aspectos relacionados com a capacidade de representar conceitos relevantes para a compreensão dos fenômenos modelados e, principalmente, quanto a adequação do modelo como ferramenta para auxílio para membros de Comitês de Bacia envolvidos com a gestão dos recursos hídricos na bacia do Riacho Fundo.

Os avaliadores foram divididos em três grupos: três estudantes de pós-graduação da Universidade de Brasília, que possuem experiência em comitês de bacias hidrográficas e educação ambiental; três funcionários do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), que trabalham com licenciamento ambiental em hidrelétricas e, portanto, possuem conhecimentos sobre a gestão de recursos naturais em bacias hidrográficas; duas pessoas que possuem experiência em modelagem com Raciocínio Qualitativo e com as ferramentas utilizadas.

Foram realizadas três sessões diferentes, uma para cada grupo de avaliadores. Durante essas sessões, foi feita uma breve apresentação sobre a bacia do Riacho Fundo, RQ e do modelo “Riacho Fundo”. As opiniões dos avaliadores foram coletadas por meio da aplicação de um questionário, que continha perguntas ou solicitava comentários sobre os seguintes temas: a) avaliação da possibilidade de expressar conceitos por meio de modelos qualitativos; b) grau de dificuldade encontrado para diversos elementos de modelos qualitativos; c) grau de dificuldade de compreensão dos modelos para diversos setores da sociedade; d) avaliação da possibilidade de sucesso na comunicação mediada por modelos qualitativos; e) avaliação do grau de dificuldade que teriam usuários com escolaridade correspondente a ensino médio em relação a vários elementos encontrados em modelos qualitativos; f) avaliação da utilidade dos modelos qualitativos para gestão dos recursos hídricos em relação aos uso de recursos naturais e à solução de conflitos em comitês de bacias hidrográficas; g) outros comentários.

Embora tenham sido registradas diferenças de pontos de vista entre os grupos de avaliadores, os resultados, de modo geral, destacam o fato de que o paradigma adotado (RQ) e o modelo “Riacho Fundo” foram considerados adequados aos propósitos de comunicação e expressão de conceitos relativos a problemas sócio-ambientais importantes para a gestão de recursos hídricos. A possibilidade de facilitar o entendimento das relações de causa e efeito foi apontada como uma grande vantagem do uso de modelos qualitativos pelos gestores. O modelo foi considerado difícil ou muito difícil para usuários como agricultores, donas-de-casa e estudantes do ensino fundamental. Para os demais grupos sociais, as respostas foram heterogêneas, mas a escolaridade correspondente ao ensino médio seria necessária para a compreensão mais fácil do modelo. Em relação ao potencial dos modelos qualitativos para facilitar a resolução de conflitos, a maioria dos avaliadores respondeu que depende de como os modelos são construídos e apresentados aos membros dos comitês de bacia. Os avaliadores enfatizaram que, dependendo da forma como são apresentados, os primitivos de modelagem adotados podem ser muito complexos para um público não-especialista e dificultar a compreensão do modelo. Além disso, sugeriram que os modelos sejam construídos com a participação dos usuários, sempre ouvindo suas demandas e representando situações reais vividas pela comunidade.

7. CONCLUSÕES E AMPLIAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho descreve um modelo destinado a aumentar a compreensão de membros de um Comitê de Bacia Hidrográfica sobre problemas relacionados com a gestão de recursos hídricos, construído a partir de dados coletados sobre a microbacia do Riacho Fundo. O modelo foi construído de acordo com o proposto pela Teoria Qualitativa dos processos, implementado no simulador GARP. Dois cenários iniciais demonstram os efeitos da consciência ambiental sobre diversos fatores, como a densidade da vegetação, a erosão, o lançamento de esgotos, a biodiversidade terrestre e aquática, e a quantidade de água no subsolo, na nascentes e no curso do rio. Três grupos de avaliadores consideraram que o modelo poderia ser usado por pessoas envolvidas na gestão dos recursos hídricos, embora requeira explicações cuidadosas sobre os primitivos de modelagem utilizados.

Durante a construção do modelo, buscou-se identificar os conceitos mais relevantes para a compreensão das ações antrópicas sobre microbacias localizadas na região do cerrado. O desmatamento foi considerado uma das forças motrizes mais atuantes na degradação ambiental, com conseqüências sobre nascentes, profundidade e a quantidade de em cursos d'água, diversidade biológica e aproveitamento dos recursos hídricos. Nesse sentido, o aumento da consciência ambiental, que se reflete em ações de manejo, foi considerado um fator fundamental para reverter esse quadro. Os resultados produzidos pelo modelo, previstos na literatura, são condizentes com o senso comum daqueles que conhecem esse tipo de problema, segundo a opinião dos avaliadores.

A maneira escolhida para representar conceitos no modelo, a Teoria Qualitativa dos Processos, permite a representação da dinâmica do sistema e a expressão inequívoca das relações de causalidade, mostrando como começam as mudanças e como elas se propagam para outras partes do sistema. A representação diagramática dos resultados das simulações, aliada a um vocabulário próximo do cotidiano, contribui para que se estabeleça um diálogo com os usuários a respeito das conseqüências de ações tomadas pelos gestores. Esse fator contribuiu para a avaliação positiva dos avaliadores.

Importante ressaltar que, uma vez familiarizados com a linguagem adotada, os usuários terão maior facilidade para compreender os conceitos representados em outros modelos desse tipo, e que poderão utilizar modelos causais como o mostrado na Figura 1 e até mesmo construir seus próprios modelos. Nesse sentido, é de grande interesse implantar a sugestão dos avaliadores a respeito de envolver os usuários na construção de modelos e buscar sempre referências na realidade vivida pela comunidade interessada.

Este trabalho reafirma o potencial do Raciocínio Qualitativo para a representação de outros conceitos relacionados à gestão de recursos hídricos. Ainda em relação à bacia do Riacho Fundo, os dados coletados permitem a modelagem de um número maior de fenômenos, como, por exemplo: o tratamento de esgotos, o problema de doenças e endemias relacionadas à falta de saneamento básico, o lazer relacionado ao curso de água principal, questões relativas a mudanças nos *habitats* e na composição das espécies (por exemplo, espécies oportunistas) e como isso pode levar a vetores de doenças. Entretanto, é fundamental que este e outros modelos sejam efetivamente usados nos Comitês de Bacia para que o potencial heurístico dos modelos qualitativos seja efetivamente explorado.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi conduzido durante o curso de Mestrado em Ecologia de um dos autores (BVA). Agradecemos aos alunos e professores do curso e à Universidade de Brasília pelo apoio e ao IBAMA por disponibilizar tempo para a realização dos trabalhos do curso. Agradecemos também à ecóloga e pesquisadora Ana Luiza Rios Caldas, pela ajuda na coleta dos dados e pelas discussões sobre os problemas do Riacho Fundo e aos avaliadores pelas valiosas sugestões. Finalmente, queremos agradecer aos moradores da bacia do Riacho Fundo com quem interagimos, em particular àqueles ligados à Prefeitura Comunitária de Sucupira, por dividir conosco seus conhecimentos e suas preocupações com os destinos da bacia hidrográfica onde vivem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anjos, R. S. A. **Expansão urbana do Distrito Federal e o entorno imediato : monitoramento por meio de dados de sensoriamento remoto.** Brasília. Dissertação de Mestrado em Planejamento Urbano. Instituto de Arquitetura e Urbanismo - Universidade de Brasília, 1991.

Antunes, M.P.; Seixas, M.J.; Câmara, A.S. & Pinheiro, M. A New Method for Qualitative Simulation for Water Resources Systems – 2. Applications. **Water Resources Research**, volume 23, nº 11, pp. 2019-2022, 1987.

Araújo, S.C.S. **Modelos de Simulação Baseados em Raciocínio Qualitativo para Avaliação da Qualidade da Água em Bacias Hidrográficas.** Tese de doutorado. Brasília: Departamento de Ecologia da Universidade de Brasília, 2005.

Araújo, S., C., S.; Salles P.S.B.A. & Saito, C.H. Modelos Qualitativos, Baseados na Dinâmica do Oxigênio Dissolvido, para Qualidade de Água em Bacia Hidrográfica. *In* Saito, C. (org.) **Desenvolvimento tecnológico e metodológico para mediação entre usuários e comitês de bacia hidrográfica.** Brasília: Departamento de Ecologia da Universidade de Brasília, pp. 9-24, 2004.

Bessa Machado, V. & Bredeweg, B. Investigating the Model Building Process with HOMER. *In* B. Bredeweg (ed.), **Proceedings of the International workshop on Model-based Systems and Qualitative Reasoning for Intelligent Tutoring Systems**, pages 1-13, San Sebastian, Spain, June 2nd, 2002.

Bouwer, A. & Bredeweg, B. VISIGARP: Graphical Representation of Qualitative Simulation Models. *In* J.D. Moore, G. Luckhardt Redfield, and J.L. Johnson (eds.), **Artificial Intelligence in Education: AI-ED in the Wired and Wireless Future**, pp. 294-305, IOS-Press/Ohmsha, Osaka, Japan, 2001.

Bredeweg, B. **Expertise in Qualitative Prediction of Behaviour.** PhD thesis, University of Amsterdam, Amsterdam, The Netherlands, 1992.

Bredeweg B. & Struss, P. Current Topics in Qualitative Reasoning. **AI Magazine**, volume 24, nº 4, pp. 13- 16, 2003.

Bredeweg, B.; Salles, P.; Bouwer, A. and Liem, J. Towards a Structured Approach to Qualitative Modelling. *In* Bailey-Kellog, C. and Kuipers, B. (eds.) **Proceedings of the 20th International Workshop on Qualitative Reasoning**, pp. 29-36 (conferência ocorrida entre 10-12 de Julho, 2006, em Hanover, NH, EUA), 2006.

Camara, A., S.; Pinheiro, M.; Antunes, M., P.; Seixas, M., J. A New Method for Qualitative Simulation of Water Resources Systems – 1. Theory. **Water Resources Research**, volume 23, nº 11, pp. 2015-2018, 1987.

de Kleer, J. & Brown, J.S. A Qualitative Physics Based on Confluences. **Artificial Intelligence**, volume 24, n^{os} 1-3, pp. 7-83, 1984.

Falkenhainer, B. & Forbus, K. Compositional modeling: Finding the right model for the job. **Artificial Intelligence**, volume 51, n^{os} 1-3, pp.95-143, 1991.

Felfili, J. M. Floristic composition and phytosociology of the gallery forest alongside the Gama stream in Brasília, DF, Brazil. **Revista Brasileira de Botânica**. volume 17, n^o 1, pp. 1-11, 1994.

Felfili, J. M.; Ribeiro, J. F.; Fagg, C. W.; Machado, J. W. B. Recuperação de Matas de Galeria. **Embrapa Cerrados Documentos**, número 21. Embrapa Cerrados: Planaltina, 2000. 45 p.

Fonseca, F., O. **Olhares sobre o lago Paranoá**. Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Primeira edição. Brasília, 2001.

Forbus, K. Qualitative Process Theory. **Artificial Intelligence**, volume 24, pp. 85-168, 1984.

Guerrin, F. Qualitative Reasoning about an Ecological Process: Interpretation in Hydroecology. **Ecological Modelling**, volume 59, pp. 165-201, 1991.

Guerrin, F.; Dumas, J. Knowledge representation and qualitative simulation of salmon reed functioning. Part I: qualitative modelling and simulation. **BioSystems**, volume 59, pp. 75-84, 2001a.

Guerrin, F.; Dumas, J. Knowledge representation and qualitative simulation of salmon reed functioning. Part II: qualitative modelling of redds. **BioSystems**, volume 59, pp. 85-108, 2001b.

Haefner, J.W. **Modeling Biological Systems: Principles and Applications**. New York, N.Y.: Chapman & Hall, 1996.

Kuipers, B. Qualitative simulation. **Artificial Intelligence**, volume 29, pp. 289-338, 1986.

Mello, A., N. **Urbanização pública do Distrito Federal e o comprometimento ambiental : O caso da sub-bacia do ribeirão Riacho Fundo**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, 1997.

Rykiel, E., J. Artificial Intelligence and Expert Systems in Ecology and Natural Resource Management. **Ecological Modelling**, volume 46, pp. 3-8, 1989.

Salles, P. **Qualitative models in ecology and their use in learning environments**. PhD thesis, University of Edinburgh, Edinburgh, Scotland, UK, 1997.

Salles, P. Comitê de Gestão da Bacia do Paranoá. In: Fonseca, F.O. (org.). **Olhares sobre o Lago Paranoá**. Brasília: Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos, pp. 296-307, 2001.

Salles, P.; Bredeweg, B. & Araújo, S. Qualitative Models About Stream Ecosystem Recovery: Exploratory Studies. **Ecological Modelling**, volume 194, n^{os} 1-3, pp. 80-89, 2006.

Tucci, E.M. **Hidrologia. Ciência e Aplicação**. Coleção ABRH de Recursos Hídricos, Porto Alegre: Ed. Universidade, 2000.

Weld, D. & de Kleer, J. (eds.) **Readings in Qualitative Reasoning about Physical Systems**. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann, 1990.