

## RECARGA DE AQUÍFEROS: EPISTEMOLOGIA E INTERDISCIPLINARIDADE<sup>1</sup>

Vitor Vieira Vasconcelos<sup>2</sup>  
Paulo Pereira Martins Junior<sup>3</sup>  
Renato Moreira Hadad<sup>4</sup>  
Sucharit Koontanakulvong<sup>5</sup>

### Resumo:

As questões ambientais envolvendo recarga e descarga de aquíferos apresentam-se como um desafio para a interdisciplinaridade. Empreende-se, neste artigo, um estudo epistemológico da contribuição de diversas áreas de conhecimento à pesquisa dos processos hidrogeológicos. Apresenta-se, como hipótese, que esse diálogo acena a desenvolvimentos imprescindíveis para a resolução dos problemas ambientais e de uso da água contemporâneos e vindouros. Destarte, propõe-se discutir perspectivas epistemológicas e de gestão de informações que possam contribuir para a melhor caracterização espacial, qualitativa e quantitativa da recarga de aquíferos. São elaboradas modelagens conceituais preliminares demonstrando as possibilidades de articulação interdisciplinar para resolução dos desafios ambientais apresentados. Por fim, são discutidas as possibilidades de incorporação do conhecimento sobre recarga de aquíferos nas políticas públicas de meio ambiente e recursos hídricos.

**Palavras Chave:** Aquíferos. Hidrogeologia. Epistemologia. Meio Ambiente. Interdisciplinaridade

<sup>1</sup> Agradecemos à FINEP, FAPEMIG, CNPq e CAPES pelo financiamento dos projetos de pesquisa que possibilitaram a elaboração deste artigo. Este artigo foi desenvolvido no âmbito do programa de doutoramento da Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais da Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP. Agradecemos ao Departamento de Geologia da UFOP pelo acolhimento desse projeto de pesquisa.

<sup>2</sup> Doutorando em Geologia na Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil. Consultor de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável da Assembleia Legislativa de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais. E-mail: [vitor.vasconcelos@almg.gov.br](mailto:vitor.vasconcelos@almg.gov.br)

<sup>3</sup> Doutorado em Géologie Dynamique. Université Pierre et Marie Curie, LISE / CNRS, França. Pesquisador Pleno da Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais - CETEC-MG. Professor do Departamento de Geologia da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil. E-mail: [paulo.martins@cetec.br](mailto:paulo.martins@cetec.br)

<sup>4</sup> Doutor em Ciências da Computação pela Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. Professor da Pós-Graduação em Tratamento da Informação Espacial / Geografia da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, PUC-Minas. Pró-Reitor da PUC-Minas, Campus Barreiro, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. E-mail: [rhadad@pucminas.br](mailto:rhadad@pucminas.br)

<sup>5</sup> Professor Associado da Faculdade de Engenharia e diretor da Unidade de Pesquisa em Sistemas Hídricos da Universidade de Chulalongkorn, Bangkok, Tailândia. Diretor da Technology Promotion (Thai-Japan) Association. E-mail: [sucharit.k@gmail.com](mailto:sucharit.k@gmail.com)



## INTRODUÇÃO

A infiltração da água no solo, a recarga e descarga de aquíferos e a relação entre precipitação e fluxo hídrico subterrâneo são temas que têm sido tratados por diversas redes e comunidades acadêmicas. A estrutura departamental da Academia geralmente leva a que os núcleos de pesquisa congreguem profissionais de mesma formação, especializando-se em um problema específico e fornecendo, logo, uma resposta especialista (ROCHA, 2003, p. 162-165). Dessa forma, por exemplo, temos grupos de pesquisa afetos ao tema, em áreas como Hidrogeologia (*stricto sensu*), mas também Geologia Estrutural, Geotecnia, Hidrologia, Agronomia, Engenharia Sanitária, Engenharia Ambiental, Geomorfologia Kárstica, Gestão Ambiental, Planejamento Urbano, entre outros.

Cada núcleo, em seus objetos de pesquisa, passa a desenvolver técnicas que enfocam distintas escalas de abordagem e metodologias de análise, envolvendo diferentes contextos de pesquisa no que se referem a tempo de projetos de pesquisa, recursos humanos e financeiros, entre outras características (MARTINS JUNIOR, 2000; SCANLON *et al.*, 2002). Essa relativa heterogeneidade dos grupos de pesquisa, ao longo do tempo, também leva a uma especialização do discurso conceitual e teórico (BAUER, 1990, p. 105-110) – gerando, por fim, formas diferenciadas de análise dos fenômenos hidrogeológicos.

Paralelamente ao progresso científico advindo da disciplinaridade da especialização do saber, a Academia também passa a reconhecer os possíveis benefícios que podem prover de um diálogo entre os diversos núcleos de pesquisa. Daí a valorização das iniciativas de pesquisas interdisciplinares. A interação das diversas áreas de pesquisa, em regra, permite uma análise mais ampliada dos problemas a serem abordados (ROCHA, 2003, p. 169-170; ROCHA, 2004, p. 9). Além disso, sob o aspecto do avanço do conhecimento científico, o intercâmbio entre as comunidades de pesquisa usualmente permite que se avance para além dos paradigmas de cada área específica, ao entrar em contato com novas formas de abordagem dos problemas envolvidos (FLORIANI, 2004, p. 36; OLIVEIRA, 2005; SIVALAPAN, 2005).

A resolução de problemas ambientais que emergem na atualidade, envolvendo em muitos casos a gestão de recursos naturais, é um exemplo patente da necessidade de articulação interdisciplinar. Martins Junior (1998) propõe, como

um caminho de integração interdisciplinar, que os campos de saber oriundos das geociências possam ser articulados no que denomina “Geociências Agrárias e Ambientais”, como forma de trazer soluções interdisciplinares para a uma gestão sustentável do território. Nessa abordagem, foram desenvolvidos diversos trabalhos de cunho ambiental e epistemológico (MARTINS JUNIOR, 2006; MARTINS JUNIOR *et al.*, 2006; 2008; 2009; 2010; 2012) mostrando como a gestão do uso do solo pode colher diversos subsídios a partir de uma análise conjugada entre os aspectos de recarga de aquíferos, aptidão agrícola e conectividade vegetacional, com reflexos em resultados econômicos e ecológicos.

Entretanto, o diálogo interdisciplinar não se apresenta como uma tarefa isenta de desafios. Em sua base, há a necessidade de uma análise minuciosa sobre os significados conceituais de cada um dos corpos teóricos envolvidos (BAUER, 1990, p. 113-115; FRANCELIN, 2011) incluindo, não raras vezes, elucidação de interpretações dessemelhantes para uma mesma palavra ou expressão (MARI, 2005). Para mais além dos conceitos, as possibilidades de conexões entre as estruturas teóricas e paradigmas de abordagem merecem um trabalho epistemológico aprofundado (MARTINS JUNIOR, 2000; OLIVEIRA, 2005). Esses esforços de pesquisa nem sempre encontram facilidades nos meios acadêmico e profissional, pois demandam mudanças na postura de valorização exclusiva da figura do especialista e de uma certa inviolabilidade de seu campo de atuação (ROCHA, 2003, p. 172-178).

Nesse contexto, este artigo tem como objetivo discorrer sobre os aspectos epistemológicos atinentes às possibilidades de diálogo interdisciplinar dos processos de circulação hídrica subterrânea, com enfoque especial na recarga de aquíferos. Inicialmente, é realizada uma discussão sobre os conceitos e metodologias existentes para os diversos objetos e escalas de abordagem do processo em questão. Em seguida, é apresentada uma proposta de modelagem interdisciplinar desses conhecimentos, em modelos diagramático-textuais baseados em tecnologias de gestão informacional. Por fim, é discutido sobre como os conhecimentos de recarga de aquíferos podem servir de subsídio para a execução dos instrumentos das políticas de Meio Ambiente e de Recursos Hídricos.

# QUESTÕES EPISTEMOLÓGICAS SOBRE OBJETOS, CONCEITOS E METODOLOGIAS MULTIESCALARES

## *Campos Epistemológicos e Domínios Conceituais*

Como primeira aproximação para investigar a temática interdisciplinar envolvida no estudo de recarga de aquíferos, importa detalhar como as comunidades acadêmicas desenvolveram abordagens distintas de interpretação, de forma a solucionar questões de importância para a sociedade. O Quadro 1 apresenta uma visão geral, sem pretender esgotar as áreas de conhecimento e os estudos envolvidos, mas atendo-se aos principais eixos que conduziram a avanços estruturais dessas pesquisas científicas.

A deriva semântica de conceitos utilizados no intercâmbio entre as áreas de conhecimento pode mascarar vieses que, quando não são divergentes, ao menos focam aspectos distintos. Como exemplo, toma-se o conceito de *formação superficial*, importante por delimitar, em vários corpos teóricos, o objeto de estudo dos fenômenos de recarga e descarga de aquíferos. Quando empregado na Agronomia e na Geomorfologia, o conceito de *formação superficial* enfoca a camada “constituída de material decomposto ou edafizado que recobre a rocha sã – enfoca, por conseguinte, as noções de solo e parte do subsolo” (GUERRA; GUERRA, 2006, p. 284). Todavia, na Geologia, o termo é bastante empregado no ramo da Geologia Superficial, em que incorpora a interpretação de formação como categoria escalar estratigráfica. Dessa forma, acaba por focar com maior ênfase a correlação entre rochas, estruturas, depósitos sedimentares, manto de alteração e outros entes geológicos aflorantes em superfície (JACKSON, 1997).

**Quadro 1 – Determinação dos campos epistemológicos de conhecimentos, objetos de pesquisa e questões clássicas por profissões e/ou especializações disciplinares.**

<b>Área de Pesquisa</b>	<b>Escala do Objeto de Pesquisa</b>	<b>Questões Clássicas</b>
Agronomia	Perfil de Solo	Relação entre estrutura de solo e água, com fins de disponibilidade para plantas e irrigação.
Geotecnia	Manto de alteração	Relação entre água e estrutura de solos com fins de estabilidade ou risco para ocupação
Hidrologia	Bacia Hidrográfica	Balanço Hídrico para cálculos

	Isotrópica (homogeneizada espacialmente)	de disponibilidade hídrica e controle de cheias em projetos de abastecimento humano e construção de reservatórios
Engenharia de Minas	Formações Geológicas de Superfície	Rebaixamento de lençóis para mineração
Geoquímica	Fluxo hídrico subterrâneo	Características de origem da água e contaminações.
Geomorfologia Kárstica	Trajetos entre dolinas, sumidouros, cavidades e ressurgências	Papel da circulação hídrica na formação do exo e endo-carste
Hidrogeologia	Aquífero	Delineação estrutural de sistemas de rochas portadoras de aquíferos, como subsídio para perfuração e exploração de poços

A incorporação, na Hidrogeologia, de modelos de representação oriundos de outros campos de saber também demanda uma série de adequações epistemológicas.

Como exemplo, a cartografia de lineamentos, proveniente da Geologia Estrutural, desenvolveu-se primeiramente com fins de análise das direções e extensões dos esforços tectônicos. Diversos trabalhos têm procurado correlacionar a densidade, direção e conectividade dos lineamentos com características dos aquíferos, sob a hipótese de que o avanço dos esforços tectônicos, remetidos ao aumento dos falhamentos, também incrementaria a recarga em meios anisotrópicos (FERRIL *et al.*, 2004).

Todavia, Martins Junior *et al.* (2006) acautelam que, para um trabalho minimamente consistente, seria preciso diferenciar os lineamentos correspondentes a estruturas dúcteis e rúpteis, diferenciando os seus papéis no fluxo hidrogeológico do aquífero em estudo. Ademais, CETEC (1981) ressalta que estudos que levem em conta apenas a densidade bidimensional de fraturas podem mascarar efeitos bem mais significativos relacionados à heterogeneidade espacial da profundidade e da largura das aberturas.

Os movimentos tectônicos normais, inversos e transcorrentes referentes às falhas podem inclusive ocasionar discontinuidades que bloqueiem o fluxo hidrogeológico de acamamentos porosos, conforme constatado por Gleenson e Novakowski (2009). Caso análogo foi observado no aquífero Guarani, quando as análises estruturais das Formações Santa Maria e Piramboia por Rosa Filho *et al.*

(2003) e Soares (2008) mostraram que os movimentos associados a falhamentos demandavam revisões nos modelos e cálculos preliminares de recarga, fluxo e descarga (ROCHA, 1997), visto que haveriam sido realizados, originalmente, sob o pressuposto teórico de meios porosos contínuos.

### ***Escalas de Abordagem dos Fenômenos de Circulação Hídrica Subterrânea***

As diferentes metodologias de estudo hidrogeológico também podem ser agrupadas por suas escalas espaciais e temporais. Quanto ao aspecto de tempo, Balek (1988, p. 4-6) define as abordagens em três categorias – curto prazo, sazonal e histórica, cada qual com ênfase em instrumentos diferenciados: (1) nas abordagens de curto prazo, a análise do fluxo hídrico no perfil de solo assume proeminência (2) na análise sazonal, a variação no balanço hídrico ganha foco e (3) ao passo que no período histórico (até milhares de anos), o tempo de residência da água nos aquíferos é compreendido principalmente por meio de análise de isótopos.

As variações na escala espacial dos objetos de pesquisa refletem implicações epistemológicas relevantes. Metodologias desempenhadas para pequenas áreas experimentais, quando expandidas para áreas maiores, correm o risco de não levar em conta heterogeneidades espaciais, propriedades emergentes e inter-relações de processos mais amplos.

Por exemplo, ao trazer um constructo teórico de uma estrutura homogênea de perfil de solo, visando aplicá-lo em uma grande extensão tridimensional de um ambiente concreto, corre-se o risco de não se atentar para essas variantes. Reggiani *et al.* (2000) propõem que as equações tradicionais de fluxo hidrogeológico, ao serem aplicadas para bacias hidrográficas, necessitam incorporar uma perspectiva de sistema que incluam a retroalimentação dos processos envolvidos no balanço hídrico e as variações de pressão do gradiente hidráulico. Para tanto, demonstram que as características emergentes podem ser aferidas por uma abordagem termodinâmica, incluindo avaliação da entropia sistêmica.

Ainda nesse aspecto, Sivalapan (2005) propõe, como alternativa para transitar do forte enfoque reducionista das pesquisas de recursos hídricos (tanto na escala espacial quanto na especialidade disciplinar) em rumo a uma teoria mais abrangente, que seja utilizado o enfoque de procurar por padrões, processos e

funções na escala de bacias maiores, abarcando os diferentes dados e modelos existentes para pequenas bacias.

### ***Diferenciações Interescalares em Bacias Hidrográficas***

Na escala de análise de bacias hidrográficas, a área das subbacias e suas posições no perfil de equilíbrio topográfico demandam cuidados quanto a processos hidrológicos e hidrogeológicos que se diferenciam de montante para jusante.

Subbacias de menor área, próximas às nascentes e aos divisores de águas, geralmente possuem maior declividade e são mais afetadas por precipitação orográfica (TUCCI, 2009, p. 601). São bacias com resposta rápida entre a precipitação e o escoamento superficial concentrado – e sua vazão é afetada fortemente por precipitações convectivas de curta duração (TUCCI, 2009, p. 393). Por isso, muitos de seus picos de cheia não são captados pelos postos fluviométricos que medem a vazão apenas duas vezes ao dia (NAGHETTINI; PINTO, 2007, p. 8). Quanto aos processos hidrogeológicos nessas subbacias, o gradiente hidráulico condicionado pela altitude leva à predominância espacial de áreas com mais expressividade do fenômeno de recarga, embora haja relevância da tipologia de descarga nas surgências (MARTINS JUNIOR *et al.*, 2009).

Conforme se transita do topo para jusante na bacia hidrográfica, os processos de recarga e descarga tendem a se equilibrar, dando origem ao que Souza e Fernandes (2000) denominam áreas de transmissividade (ou transiência<sup>6</sup>). Continuando a jusante, a acumulação da descarga dos fluxos hidrogeológicos locais e regionais proporcionam uma participação cada vez mais estável do escoamento de base na vazão total do leito. Quanto maior a extensão do aquífero subterrâneo, mais importante e complexa é a função dos estudos de Geologia Estrutural e Litoestratigráfica, para delimitar com confiança o contorno tridimensional e a anisotropia dos meios porosos, fraturados e cársticos, bem como distinção de fluxos

---

<sup>6</sup> Souza e Fernandes (2000) empregam a classificação de Área de Transmissividade, situada entre as áreas de Recarga e Descarga. Entretanto, o conceito de transmissividade já é utilizado convencionalmente em um contexto mais estrito, como parâmetro hidráulico em testes de aquífero. Ao passo que Souza e Fernandes (2000) empregam o conceito de Zona de Transmissividade em referência a uma interpretação bem mais generalista do funcionamento dos sistemas aquíferos. De forma a evitar imprecisões de interpretação, consideramos mais adequado utilizar o termo Área de Transiência, em lugar de Área de Transmissividade.

hidrogeológicos locais e regionais.

Nas bacias de maior porte, as precipitações frontais são as que mais afetam a recarga e a vazão, com sua influência dependendo ainda se a frente de instabilidade caminha de jusante para montante ou no caminho inverso (TUCCI, 2009, p. 393). Ademais, o aumento da ocorrência e extensão de planícies de inundação e o efeito acumulado do atrito no curso hidráulico do leito do rio afetam as análises de vazão e recarga (TUCCI, 2009, p. 601), tanto pela variação sazonal de assoreamento x rebaixamento do leito (CHEVALLIER, 2009, p. 512-513), quanto pelo amortecimento das ondas de cheia (SILVEIRA, 2009, p. 44), levando posteriormente, ainda, à evapotranspiração e infiltração nas lagoas marginais e solos hidromórficos aluviais (TUCCI, 2009, p. 249).

Portanto, estudos realizados apenas sobre uma bacia isolada podem gerar incertezas quanto à sua aplicação em bacias nas outras escalas de abordagem. Sivalapan (2005) salienta que, para o progresso da ciência hidrológica e hidrogeológica, é necessária uma reorientação metodológica para que as pesquisas sobre bacias hidrográficas sejam conduzidas, sempre que possível, sobre um sistema de bacias aninhadas. Nesses termos, a avaliação de um processo hidrogeológico demandaria ser mensurada em diversos pontos no decorrer da bacia hidrográfica, subdividindo seus dados por subbacias, de modo a investigar sua variação conforme se amplia a escala da bacia hidrográfica.

### ***Drenabilidade de Solos como Objeto de Diálogo Interdisciplinar***

A questão da especialização e das possibilidades de diálogo interdisciplinar também pode ser abordada a partir das variáveis e atributos mensurados nos projetos de pesquisa. Na interpretação do fluxo hídrico em meios porosos, as variáveis utilizadas pelas diferentes comunidades acadêmicas põem a claro como um mesmo assunto pode ser abordado de formas distintas. A Pedologia (compreendida tanto em relação ao levantamento pedológico básico quanto para estudos de aptidão agrícola) e a análise de vertentes (empregada com enfoques diferenciados, mas complementares, pela Geotecnia e pela Análise Estrutural de Solos) são um exemplo, cujos conceitos são aproximados pelo Quadro 2. Nesse quadro, cada coluna corresponde a uma abordagem disciplinar (Levantamento

Pedológico, Aptidão Agrícola e Análise de Vertentes), ao passo que as setas mostram as interconexões entre as variáveis estudadas em cada uma dessas abordagens. Desse modo, o Quadro 2 aponta a possibilidade de diálogo interdisciplinar entre as matrizes teóricas, de forma a contribuir para um entendimento mais aprofundado de seus objetos de estudo.

Embora nem sempre relacionados diretamente à recarga de aquíferos pelos estudos acadêmicos, outros conceitos como *perfil de umidade e tensão de capilaridade*, bem como os atributos já descritos na coluna intermediária do Quadro 2, adquirem potencial interesse quando passa a se considerar a relação entre solos, cobertura vegetal e recarga de aquíferos. Na medida em que fenômenos como *interceptação, evapotranspiração, infiltração e escoamento superficial* são influenciados pelo *tipo de vegetação*, a faceta da *disponibilidade hídrica do solo* pode transferir conceitos, métodos e teorias advindos das áreas acadêmicas de estudo de aptidão agrícola e de ecologia de paisagens para a recarga de aquíferos (SCHRÖDER, 2006; MARTINS JUNIOR *et al.*, 2010).

**Quadro 2 – Comparação de variáveis da pedologia, aptidão agrícola e análise de vertentes, com base em Martins Junior *et al.* (2010, p. 91).**

Variáveis Pedológicas de Base (CETEC, 1989)		Variáveis Pedológicas de Interesse para Vegetação Plantada e Nativa (MARQUES, 2003)		Variáveis de Interesse para Análise de Vertentes*
Porosidade [ $100 \times (\text{densidade}_{\text{real(particulas)}} - \text{densidade}_{\text{aparente(solo)}}) / \text{densidade}_{\text{real}}$ ]			→	Porosidade ( $\eta = V_{\text{vazios}} / V_{\text{amostra}}$ ) – variação da fórmula antecedente
		Permeabilidade**		
				Limite de plasticidade
				Limite de liquidez
				Índice de plasticidade
				Índice de consistência
				$I_c = (LL - w) / (LL - LP)$
				Índice de vazios ( $e = V_{\text{vazios}} / V_{\text{sólidos}}$ )
				Massa específica natural ( $\gamma = M/V$ )
				Massa específica Natural para Sólidos ( $\gamma_{\text{sólido}} = M_{\text{sólido}} / V_{\text{sólido}}$ )
				Coesão
				Ângulo de atrito
Índice de Intemperismo $K_i = \text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$				
Índice de Intemperismo $K_r = \text{SiO}_2 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$				
Granulometria – areia	┌→	Textura		
Granulometria – silte				
Granulometria – argila				
Relação silte/argila = ( $\%_{\text{argila}} / \%_{\text{silte}}$ )				
Grau de flocculação = $[(\text{argila}_{\text{total}} - \text{argila}_{\text{dispersa em água}}) \times 100] / \text{argila}_{\text{total}}$				
		Estrutura (inferido a partir do tipo de solo)		
		Tipo de Argila (ibidem acima)		
pH (H <sub>2</sub> O)	┌→	pH		
pH (HCl)				
		Pedregosidade (inferida a partir do tipo de solo)	→	Pedregosidade
		Rochosidade (inferida a partir do tipo de solo)	→	Rochosidade
Horizonte (profundidade)	→	Profundidade total (Horizontes A+B+C)	→	Profundidade da Rocha Alterada
Tipo pedológico	→	Tipo pedológico	→	Tipo de Rocha
		Aptidão agrícola (Variável Conclusiva)		Conveniências Geotécnicas (Variável Conclusiva)

Quadro 2 – Continuação

Variáveis Pedológicas de Base (CETEC, 1989)		Variáveis Pedológicas de Interesse para Vegetação Plantada e Nativa (MARQUES, 2003)		Variáveis de Interesse para Análise de Vertentes*
Ca <sup>+++</sup>				
Mg <sup>++</sup>				
K <sup>+</sup>				
Na <sup>+</sup>				
Soma de bases trocáveis $S=[Ca^{++}]+[Mg^{++}]+[K^{+}]+[Na^{+}]$	⇒	Soma de bases trocáveis (S)		
Al <sup>+++</sup>				
H <sup>+</sup>				
Capacidade de permuta de cátions $T=S+[H^{+}]+[Al^{+++}]$	⇒	Capacidade de troca de cátions (T)		
Saturação de bases $V=(S \times 100)/T$	⇒	Grau de saturação de bases (V)		
Saturação com alumínio trocável $(100 \times Al^{+++}) / ([Al^{+++}] + S)$	⇒	Saturação com alumínio		
		Salinidade		
		Alcalinidade		
Carbono orgânico	⇒	Matéria orgânica = $C_{orgânico} \times 1,724$		
Nitrogênio total				
Relação Carbono/Nitrogênio	⇒	Relação Carbono/Nitrogênio		
Fósforo assimilável	⇒	Fósforo assimilável		
Equivalente de umidade	⇒	Capacidade de retenção de água = $\text{Água}_{1/3atm}$ ( ou Equivalente de umidade)	⇒	Capacidade de Campo
Água a 1/3 atm				
Água a 15 atm (Ponto de murcha permanente)				
Água disponível = $(\text{Água}_{1/3atm} - \text{Água}_{15atm})$	⇒	Água disponível		
		Condições de drenagem (inferido através da permeabilidade interna e condições topográficas)		Teor de umidade atual ( $w = M_{H_2O} / M_{sólida}$ )
				Grau de saturação ( $S_r = V_{\text{água}} / V_{\text{vazios}}$ )
		Risco de inundação		

Observações sobre o Quadro 2:

\* aplicáveis a solos (*Análise Estrutural de Solos e Geotecnia*) e a rochas portadoras de reservatórios de aquíferos.

\*\* o terreno impermeável apresenta problema à agricultura e é inferido por características internas ao perfil (impermeos subterrâneos, ou argilas 2:1 em topografia plana ou depressão), e características externas, como topografia de depressões em geral. Devem ser observados os terrenos de lagoas marginais, as planícies fluviais sujeitas à inundação, as depressões rasas e os solos hidromórficos em geral.

Queiroz Neto (2000), Santos (2000) e Juhász *et al.* (2006), ao resgatarem os princípios da *Análise Estrutural de Solos*, denotam a limitação dos estudos pedológicos tradicionais que estudam o perfil de solo apenas em sua variação vertical, sem ênfase nos processos horizontais e sub-horizontais como vertentes, fluxo subsuperficial lateral de soluções e o escoamento do aquífero livre na zona saturada do solo. Ainda nesse tópico, ao se interpretar o solo em seu contexto de vertente e de bacia hidrográfica, Reggiani *et al.* (2000, p. 1861) ressaltam a necessidade de novas pesquisas que envolvam a circulação de água *como vapor das zonas saturadas e insaturadas* para a superfície (consideradas como evaporação proveniente do solo), levando em conta inclusive a heterogeneidade vertical dos horizontes de solo. Também indica a necessidade de correlações, em escalas espaciais mais amplas, entre *atributos de declividade, gradiente hidráulico e evaporação proveniente do solo* (REGGIANI *et al.* 2000, p. 1856).

A *drenagem* (ou *redistribuição interna*) é um atributo utilizado em levantamentos pedológicos e que apresenta interesse relevante para o fluxo hídrico em solos. O conceito de drenagem refere-se à *dinâmica de espalhamento da água no perfil do solo*, em resposta aos gradientes gravitacional e de pressão, cessado o fenômeno de infiltração (SILVEIRA *et al.*, 2009, p. 356). Trata-se de uma variável inicialmente formulada com o interesse de caracterizar se os solos, após eventos de precipitação (incluindo irrigação), teriam capacidade de reaeração (por *escoamento hídrico e dessaturação*) de forma a não prejudicar o crescimento de culturas agrícolas.

Por ter sido adotada como atributo de mapeamento pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SANTOS *et al.*, 2005), a informação cartográfica de drenagem de solos pode ir além da aptidão agrícola e indicar a potencialidade de recarga de aquíferos subjacentes. A drenagem de solos também foi incorporada nos



mapeamentos pedológicos da Inglaterra, por meio da metodologia HOST – *Hydrology of Soil Types* – (BOORMAN *et al.*, 1995), assim como nos EUA, por meio dos grupos hidrológicos de solos – *soil hydrologic groups* (USDA, 2001). Por se tratar de uma característica generalista, com ênfase no resultado da circulação hídrica, o conceito de drenagem consegue englobar os processos realizados por parâmetros como *permeabilidade, estrutura e condutividade* – porém em uma escala de análise mais ampla que incorpora a capacidade de armazenamento do perfil de solo, a variação do lençol freático e os processos de fluxo na bacia hidrogeológica.

### ***Especialização e Diálogo Transdisciplinar no Estudo da Recarga de Aquíferos***

Retomando a análise do Quadro 1 e as considerações até aqui tecidas, também não se pode deixar de reconhecer que a Hidrogeologia e a Hidrologia atuaram, em muitos departamentos de pesquisa, como áreas de convergência dos conhecimentos gerados nas demais comunidades acadêmicas. Nesse aspecto, tais áreas de convergência tiveram oportunidade de amadurecer uma reflexão interdisciplinar valiosa. Todavia, frisa-se que a via inversa é necessária para que os desenvolvimentos científicos sobre recarga de aquíferos elaborados na hidrogeologia e na hidrologia possam ser utilizados pelos demais campos de conhecimento que lidam com problemas ambientais, agrícolas, entre outros. Esse mote será abordado nas seções posteriores deste artigo.

Cabe ressaltar também como a necessidade de especialização interna nas equipes de pesquisa de hidrogeologia (incluindo a hidrologia) tem levado ao desenvolvimento de domínios de conhecimento técnico-científicos especializados. No caso, é destacada a especialidade do modelador matemático-estatístico, contraposto ao profissional que interpreta dados de campo e os sistematiza em sistemas de informação geográfica.

Em projetos de pesquisa de grande porte é comum que essas funções sejam desempenhadas por profissionais ou, até mesmo, equipes separadas (HOLTSCHLAG, 1997, p. 3; FLYNN; TASKER 2004, p. 24). Nesses quadros, a equipe de campo/geoprocessamento entrega as variáveis ambientais prontas para os modeladores matemático-estatísticos, os quais construirão os modelos contrapondo essas variáveis de entrada às variáveis das medições hídricas e hidrogeológicas.

Sui e Maggio (1999) e Rosa (2002, p. 44) mostram como essa mesma especialização se dá na elaboração de programas, em que os blocos de programação de Hidrologia e de Sistemas de Informações Cartográficas (mesmo que dentro de um mesmo programa) são designados a profissionais especialistas diferentes. É demonstrado que, nesses projetos, cada uma das duas equipes programam segundo abordagens epistemológicas e ontológicas bastante distintas.

### ***Modelos Hidrogeológicos Conceituais e Empíricos***

Para além das diferenças de abordagem departamentais, também se pode analisar os constructos teórico a partir de modelos epistemológicos mais gerais. Novaes (2005, p. 9-15) diferencia os modelos hidrogeológicos e hidrológicos nas categorias de *conceituais e empíricos*.

Os *modelos conceituais* apresentam suas funções construídas com base em considerações concatenadas dos processos físicos descritos na literatura para o ciclo hidrogeológico (NOVAES, 2005, p. 11-12). A questão metodológica enfrentada por esses modelos é que, ao necessitar de um número realmente alto de variáveis e de medições no espaço, torna-se difícil sua aplicação para dimensões espaciais mais amplas. Essa dificuldade é ainda maior nos países em desenvolvimento, que não apresentam uma base de dados hidrológica e ambiental suficientemente detalhada (SIMMERS, 1988, p. 7). Em virtude da difícil obtenção dos parâmetros requeridos para esses modelos, recorre-se usualmente a estimacões, que diminuem o grau de certeza associado aos modelos (NOVAES, 2005, p. 12).

Outra crítica recorrente aos modelos conceituais é que grande parte deles são formulados e calibrados para o contexto dos processos ambientais dos países temperados do Hemisfério Norte, apresentando erros significativos quando aplicados em áreas tropicais do Hemisfério Sul (ANDRADE *et al.*, 2006, p. 24). A calibração forçada desses modelos para o contexto das bacias tropicais pode distorcer os modelos originais além dos limites admissíveis. Ao mesmo tempo, tal costume obsta o aprendizado proveniente dos padrões que possivelmente poderiam emergir dessas novas observações (SIVALAPAN, 2005).

Os modelos empíricos, por sua vez, são modelos em que se parte das relações de causa e efeito entre as variáveis de entrada e de saída, calibrando funções que simulam indiretamente os processos físicos envolvidos (TUCCI, 2002) –

tal como uma caixa-preta. Os modelos envolvem tipicamente análises multivariadas, tais como Redes Neurais e Análise de Componentes Principais, aplicados a dados estocásticos hidrológicos.

Em referência aos modelos empíricos, cabe o acatamento levantado por Collischonn e Tucci (2001), uma vez que, ao propor-se que a integração de todos os processos hidrogeológicos de uma bacia seja representada como dado de saída pela vazão (*vazão superficial, subterrânea* ou *escoamento de base*), o processo de calibração colige a infinitas combinações de variáveis plausíveis da bacia hidrogeológica, o que induz a incertezas na definição real dos parâmetros. Tais incertezas são ainda mais potencializadas pela comum correlação espacial entre os atributos ambientais, em virtude da história de formação bio-pedo-morfo-lito-climática conjunta dos ambientes (RETALLACK, 2008).

De forma a diminuir as incertezas nos modelos empíricos, Clarke (2009, p. 667-668) recomenda a parcimônia na inclusão de parâmetros. Para isso torna-se importante o uso de métodos quantitativos estatísticos que avaliem a conveniência ou não da inclusão de cada nova variável. Essa economia de constructos pode ser feita recorrendo-se a variáveis que representem correlação com variações espaciais sistêmicas, tais como *área da bacia hidrográfica, posição de altitude no perfil de equilíbrio, evapotranspiração*, entre outros. Todavia, o uso de menos variáveis, além de homogeneizar espacialmente o resultado, dificulta inferências quanto ao papel dos distintos atributos ambientais sobre o processo hidrogeológico envolvido.

## **MODELAGEM INTERDISCIPLINAR EM RECARGA E DESCARGA DE AQUÍFEROS**

Apresenta-se neste tópico uma proposta de modelagem, de tipo textual e diagramático, abordando as diversas informações oriundas dos domínios de conhecimentos envolvidos na análise ambiental da recarga e descarga de aquíferos. Pretende-se, com isso, proporcionar assim uma visão articulada e epistemologicamente consistente dos conhecimentos abarcados. A formalização computacional de conhecimentos sobre recarga de aquíferos a seguir apresentada consiste no trabalho da equipe de pesquisa articulada entre o CETEC-MG e UFOP, no âmbito da qual se insere esse artigo. Seus trabalhos encontram-se documentados em Martins Junior (2006; 2007) e Martins Junior *et al.* (2009),

sintetizadas nas publicações Vasconcelos *et al.* (2005; 2011), Martins Junior *et al.* (2006; 2008; 2010).

Trata-se de um primeiro passo para aferir informações que poderão ser estruturadas na forma de bancos de dados, cartografia, sistemas de informação geográfica, algoritmos lógicos, modelos matemáticos e estatísticos, esquemas tridimensionais, bem como as que necessitem recorrer a conteúdos textuais explícitos, ou mesmo ao conhecimento tácito de pesquisadores. A formalização das modalidades de conhecimento e de sua tipologia lógica são essenciais para definir a possibilidade de utilização de modelos e ferramentas informacionais que procurem resolver os problemas compreendidos no âmbito da circulação hídrica subterrânea.

As etapas de modelagem foram realizadas com base em metodologias oriundas da Ciência de Informação, tais como Mapas Conceituais (SOWA; MOULIN; MINEAU, 1993), SisORCI/SisARCQ (MARTINS JUNIOR *et al.*, 2006; 2007), CommonKADS (SCHREIBER *et al.*, 1999), Unified Modeling Language - UML (BOOCH *et al.*, 1999) e Knowledge Representation (SOWA, 2000). Os modelos conceituais apresentados foram elaborados a partir da consulta a pesquisadores especialistas e de bibliografia técnica – sem pretensão de cobrir totalmente os campos de saberes, mas sim de representar conexões expressas como mais relevantes.

O Quadro 3 apresenta uma integração preliminar sobre como as diferentes áreas de conhecimento podem contribuir no estudo de áreas de recarga de aquíferos. O Quadro usa a definição de “Zonas de Recarga de Aquífero” – ZRAs – e de “Áreas Precisas de Recarga” – APRs – conforme definidas por Martins Junior *et al.* (2006, p. 652). A ZRA equivale a áreas onde a infiltração apresenta papel proeminente no ciclo hidrogeológico, agregadas geograficamente por estudos de pedologia, geomorfologia e litoestratigrafia, reconhecidas em escala regional. As APRs são reconhecíveis em escala de detalhe, dentro do contexto de uma ZRA, sendo, por conseguinte, necessários estudos mais detalhados que incluam a delimitação dos aquíferos e dos fluxos hídricos subterrâneos.

O Quadro 3, ao utilizar a metodologia de Matrizes Interdisciplinares (MARTINS JUNIOR, 2006) permite figurar como a articulação entre distintas abordagens disciplinares podem interagir, ampliando as noções sobre um dado ambiente e mostrando correlações antes implícitas ou mesmo não percebidas. Essa metodologia consiste em trazer, nas linhas e colunas, as diferentes áreas de saber e

formas de abordagem, ao passo que os conceitos, objetos e relações com potencial interdisciplinar e transdisciplinar são destacados nas células cruzamentos entre linhas e colunas (VASCONCELOS *et al.*, 2005). Utilizando essa mesma metodologia, foi desenvolvido o Quadro 4, com o objetivo de se aprofundar mais nas possibilidades de integração interdisciplinar nas questões ambientais envolvendo recarga e descarga de aquíferos.

Com o Quadro 4, a seu passo, procura-se agrupar os temas interdisciplinares relacionados à hidrogeologia, estudos ambientais e ocupação do território, por meio da definição de eixos de integração interdisciplinar. Tais eixos de integração são propiciados, segundo Martins Junior *et al.* (2008), muito em conta das conexões espaciais topográficas, mas também das conexões topológicas dos sistemas ambientais e dos campos de conhecimento envolvidos. O Quadro 4 apresenta caminhos potenciais para que as variáveis paramétricas e de processos mensuráveis sejam empregados com fins de modelar as condições ideais de ocupação do território pelo viés “permissão x impedimentos x precauções específicas”.

**Quadro 3 – Temas em relação com as ciências especialistas e com as questões centrais em relação ao uso de terras em ZRAs e APRs. Adaptado de Martins Junior *et al.* (2010).**

<b>Ciências e temas ⇒</b>	<b>Hidro-estratigrafia</b>	<b>Geologia estrutural e Geomorfologia</b>	<b>Pedologia</b>	<b>Aptidão de Solos</b>	<b>Geotecnia</b>	<b>Climatologia</b>	<b>Modelagens hidrodinâmicas</b>	<b>Hidrogeoquímica</b>
<b>Questões centrais ↓</b>								
<b>Localização das ZRAs</b>	estratigrafia; delimitação de aquíferos fraturados, cársticos e porosos	geoformas; topografia	tipos de solos por classe de drenagem	tipos de aptidão	formações superficiais	precipitação; temperatura; evapotranspiração; cartas agroclimatológicas	separação de escoamento superficial e fluxo de base	fontes de contaminação; áreas de risco; pontos de uso de água
<b>Localização das APRs</b>	estratigrafia de detalhe; delimitação de aquíferos, aquípermes (aquítardos e aquícludes)	declividade; posições em vertentes; densidade de lineamentos; estruturas rúpteis e dúcteis	tipos de solos pela classificação de primeiro nível	correlação entre solos e vegetação; uso optimal X ocupação efetiva	riscos geotécnicos, erodibilidade; saturação do solo	inundações; fotoperiodicidade; exposição de vertentes; balanço hídrico	modelagem de infiltração; escoamento sub-superficial	famílias de águas subterrâneas com potencial de serem poluídas
<b>Caracterização geoambiental por tipos de ZRA e de APR</b>	petrografia; intemperismo; sedimentologia.	geoformas; geoestruturas; coberturas eluviais, coluviais e aluviais; abertura e profundidade de estruturas rúpteis	tipos de solos em níveis detalhados; atributos físicos	implicações tecnológicas para conservação do solo e da água; estudos de viabilidade; espécies indicadoras	Fluxo hidrogeoquímico de vertente; atributos físicos de solos; erosão laminar ou profunda; movimentos de massa	intensidade e distribuição de chuvas; temperatura do solo	modelos conceituais e/ou empíricos integrando os processos hidrogeológicos	estudo de poluição e de autodepuração; porosidade; limite de liquidez; permeabilidade

Obs: A localização das APRs leva em conta os atributos já listados para as ZRAs, mais os descritos em sua linha específica no Quadro 3. De forma análoga, a Caracterização Geoambiental por tipos de ZRA e APR incorpora as variáveis já citadas, e acrescenta detalhamentos propostos na respectiva linha.



**Quadro 4 – Grupos de variáveis próprias para articulação de conceitos interdisciplinares aplicados às relações *processos hidrogeológicos x tipos de uso do solo x conservação ambiental*. Adaptado de Martins Junior et al. (2008).**

<i>Grupos de variáveis</i>	<i>Hidrologia / Hidrogeologia</i>	<i>Geologia</i>	<i>Geomorfologia</i>	<i>Pedologia</i>	<i>Botânica</i>	<i>Agronomia</i>	<i>Geotecnia</i>
<i>G 1 – Ambientes Fluviais</i>	vazões específicas superficiais	depósitos detrítico-aluviais quaternários	leito menor, maior e de inundação.	solos hidromórficos; neossolos flúvicos	matas ciliares	irrigação	
<i>G 2 – Correlações topológicas e topográficas para recarga e descarga de aquíferos</i>	rede de drenagem; escoamento superficial pós-chuvas; infiltração; escoamento superficial de base; evapotranspiração.	formações porosas; estruturas rúpteis permeáveis	cartografia dos vários tipos de geofomas	cartografia dos vários tipos de solos	formações vegetais; ecossistemas; fitogeografia; fitosociologia	áreas de iso-aptidão de solos; drenagem de solos	riscos geotécnicos; porosidade; índice de vazios; teor de umidade, massa específica natural; grau de saturação,
<i>G 3 – qualidade da água</i>	zonas de recarga; gradiente hidráulico	litoestratigrafia; modelagem estrutural; assinatura geoquímica			zonas tampão	infiltração de insumos agrícolas	
<i>G 4 – tipologia de surgências</i>	vazões em fontes	atitudes de rochas; surgências de fraturas	modelos de vertente para surgência		vegetação hidrófila e higrófila	ocupação irregular de APP	assoreamento
<i>G 5 – análises sazonais</i>	tempo de circulação superficial e subterrâneo; ciclos climáticos		ciclos hidrogeológicos cársticos		ciclos e sazonalidade das plantas em geral	ciclos e sazonalidade das plantas domésticas	riscos geotécnicos em eventos climáticos extremos
<i>G 6 – uso da água</i>	manutenção de vazões; coeficiente de recessão; Q7,10	prospecção para poços			dependência da vazão ecológica	otimização entre consumo e recarga na irrigação	
<i>G 7 – degradação dos solos</i>			erosão laminar ou profunda	perda universal de solos	vegetação fixadora	técnicas de conservação do solo agrícola	ângulo de atrito, limite de plasticidade e de liquidez, coesão

A Figura 1 apresenta um diagrama ontológico para questões ambientais envolvendo recarga de aquíferos, em estrutura SHRIMP (STOREY *et al.*, 2002) elaborada por meio do programa Protégé. Como ontologia, entende-se a rede de entidades e processos por meio da qual os sujeitos e comunidades estruturam teorias e pressuposições, estendendo-se desde a cultura *lato sensu* até o conhecimento acadêmico. De forma geral, estudar ontologias é definir categorias para as coisas que existem em um mesmo domínio (ALMEIDA; BAX, 2003). Portanto, é uma especificação explícita de uma conceptualização (CORAZZON, 2002).

O diagrama ontológico SHRIMP apresenta uma visão eficiente para se detalhar por classes e subclasses das entidades. A visada de sistemas de classificação apresenta-se como um passo importante para subsequentes trabalhos de modelagem mais próximos ao programador, como a linguagem UML (BOOCH *et al.*, 1999). Além disso, o Protégé apresenta a funcionalidade prática de suporte para exportação direta em Ontology Web Language – OWL (SMITH; WELTY; McGUINNESS, 2004).

Como limitação, os diagramas ontológicos não visualizam com eficácia as temáticas conceituais, nem representam as relações entre as entidades. Por essa razão, lança-se mão do método de mapas conceituais como instrumento complementar. Os mapas conceituais podem ser entendidos como estruturas, esquemas ou gráficos utilizados para representar a forma de um sujeito entender e conhecer sobre um determinado assunto (LIMA, 2004). Embora estes não representem explicitamente o conteúdo semântico de um termo, podem ser muito ricos em transmitir um esquema semiótico que consiga com maior eficácia recuperar as informações e a construir o conhecimento.

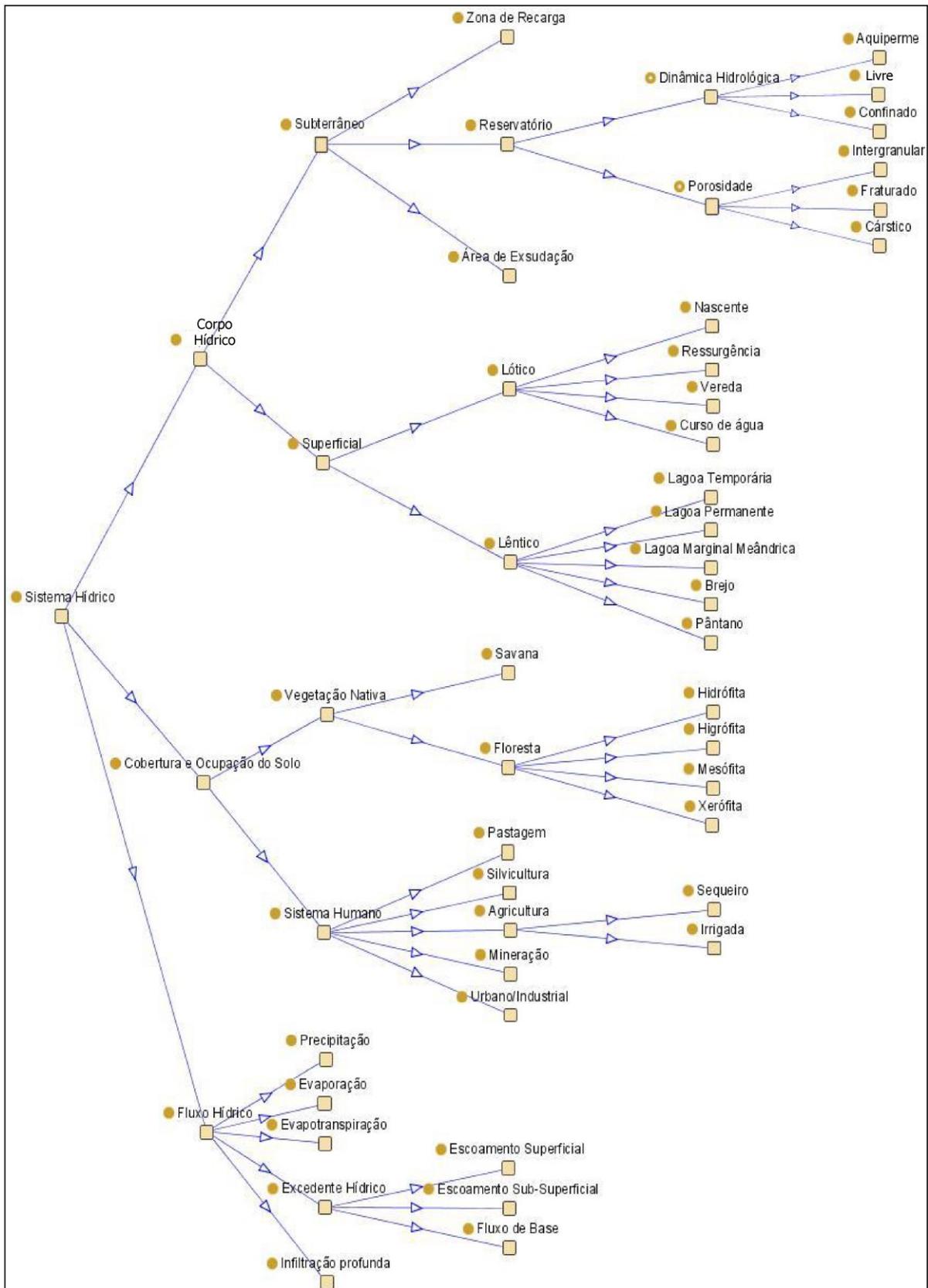
Os mapas conceituais também procuram facilitar o processo de aprendizagem (LIMA, 2004), mostrando a inter-relação de conceitos e a visão interdisciplinar. A partir de um universo de informações, o mapa conceitual ajuda a concatenar as ideias e produzir uma visão ampla e sistêmica. Dessa forma, permite adquirir e transmitir o conhecimento propiciando mais facilidade de verificar contradições, paradoxos e falhas no conteúdo organizado.

Todavia, os progressos da última década na programação de sistemas para rede (*web*) oferecem novas possibilidades para ir-se além de uma mera apresentação gráfica bidimensional estática dos mapas conceituais. Os atuais recursos de manipulação gráfica,

integração de linguagens, hiperlinks e bancos de dados, permitem que os mapas conceituais possam se transformar em verdadeiros sistemas de conhecimentos, em que o usuário navega pelas ligações e acessa conteúdos específicos de seu interesse.

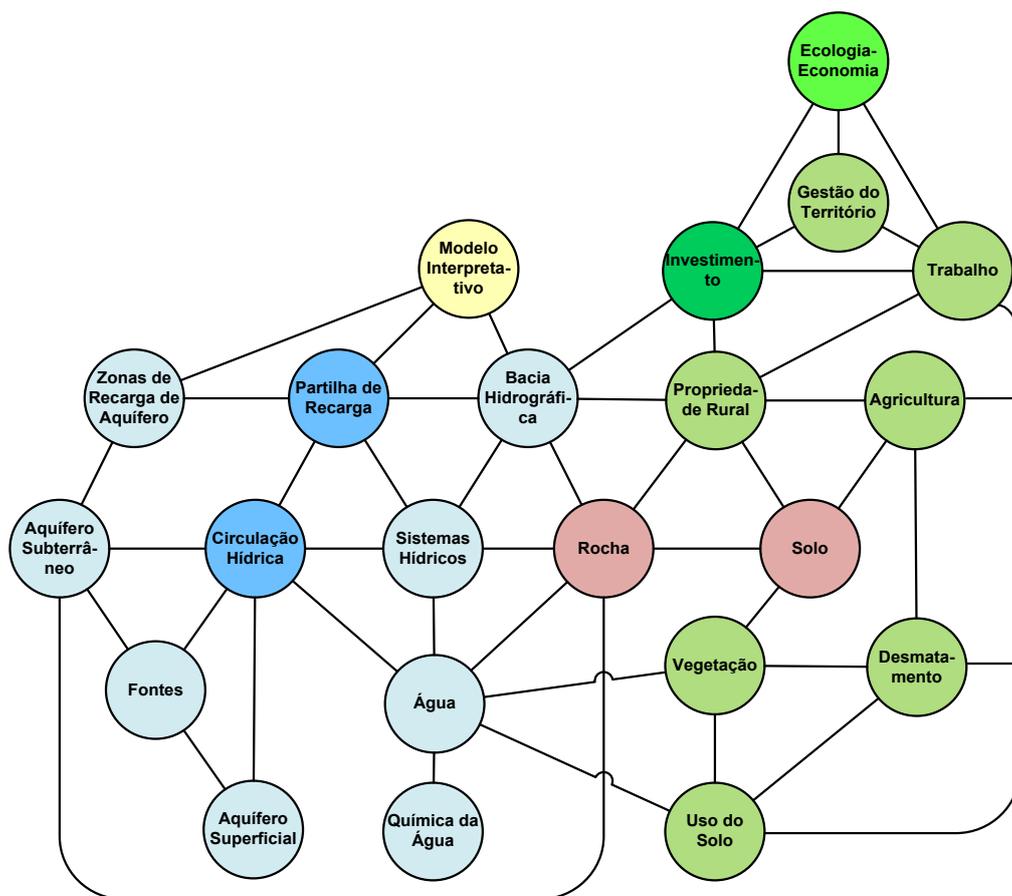
De forma a aproveitar essa capacidade técnica, Martins Junior (2007) propôs o desenvolvimento de uma nova metodologia, denominada 'Organograma de Rodas de Correlação e Impactos' – ORCI –, integrada a sistema web, então denominado SisORCI e, posteriormente, renomeado para SisARQC. A metodologia dos organogramas ORCI para arquitetura de conhecimentos pode, pois, ser entendida como uma inovação diante da metodologia de mapas conceituais. A Figura 2 apresenta a interface ORCI elaborada para o tema de recarga de aquíferos.

A etapa seguinte na formalização lógica do conhecimento consiste na modelagem em UML, sob a metodologia CommonKADS (SCHREIBER *et al.*, 1999). Conteúdos mais detalhados sobre a linha de trabalho de engenharia de conhecimentos e CommonKADS em recarga de aquíferos podem ser encontrados em Martins Junior *et al.* (2009) e Martins Junior *et al.* (2006; 2010). Dentre os produtos desenvolvidos, de forma a focar a possibilidade de estruturação de bancos de dados, apresentam-se os diagramas de classe expondo as principais entidades e relacionamentos do domínio de recarga de aquíferos (Figuras 3 e 4). Para a gestão de aquíferos, como conhecimento de caráter mais procedimental, apresenta-se o diagrama de atividades (Figura



5).

Figura 1 – Grafo ontológico da estrutura do sistema e dos subsistemas para gestão de aquíferos, pela visualização em referência SHRIMP, da plataforma de manipulação Jambalaya (Storey et al. 2001), construída via programa Protégé. O termo *Aquífero* abarca os aquíferos e aquíferos. Fonte: Vasconcelos et al. (2011).



Relações entre as tonalidades das rodas de conteúdo e os fenômenos abordados para o organograma ORCI de Zonas de Recarga de Aquíferos

Tonalidade		Fenômenos Relacionados
	Azul Claro	Sistemas Hídricos
	Azul Escuro	Processos hídricos dinâmicos
	Rosa	Rochas e Manto de Intemperismo
	Verde Claro	Processos relacionados à cobertura e uso da terra
	Outros verdes	Sistemas econômicos e financeiros

Figura 2 – Representação de um organograma ORCI para Zonas de Recarga de Aquíferos. No organograma ORCI não existe hierarquia, mas relações sequenciais, em paralelo e/ou em simultaneidade. São relações conceituais, sistêmicas, de sensibilidade e outros tipos.

Fonte: Martins Junior *et al.*, (2009); Vasconcelos *et al.*, (2011).

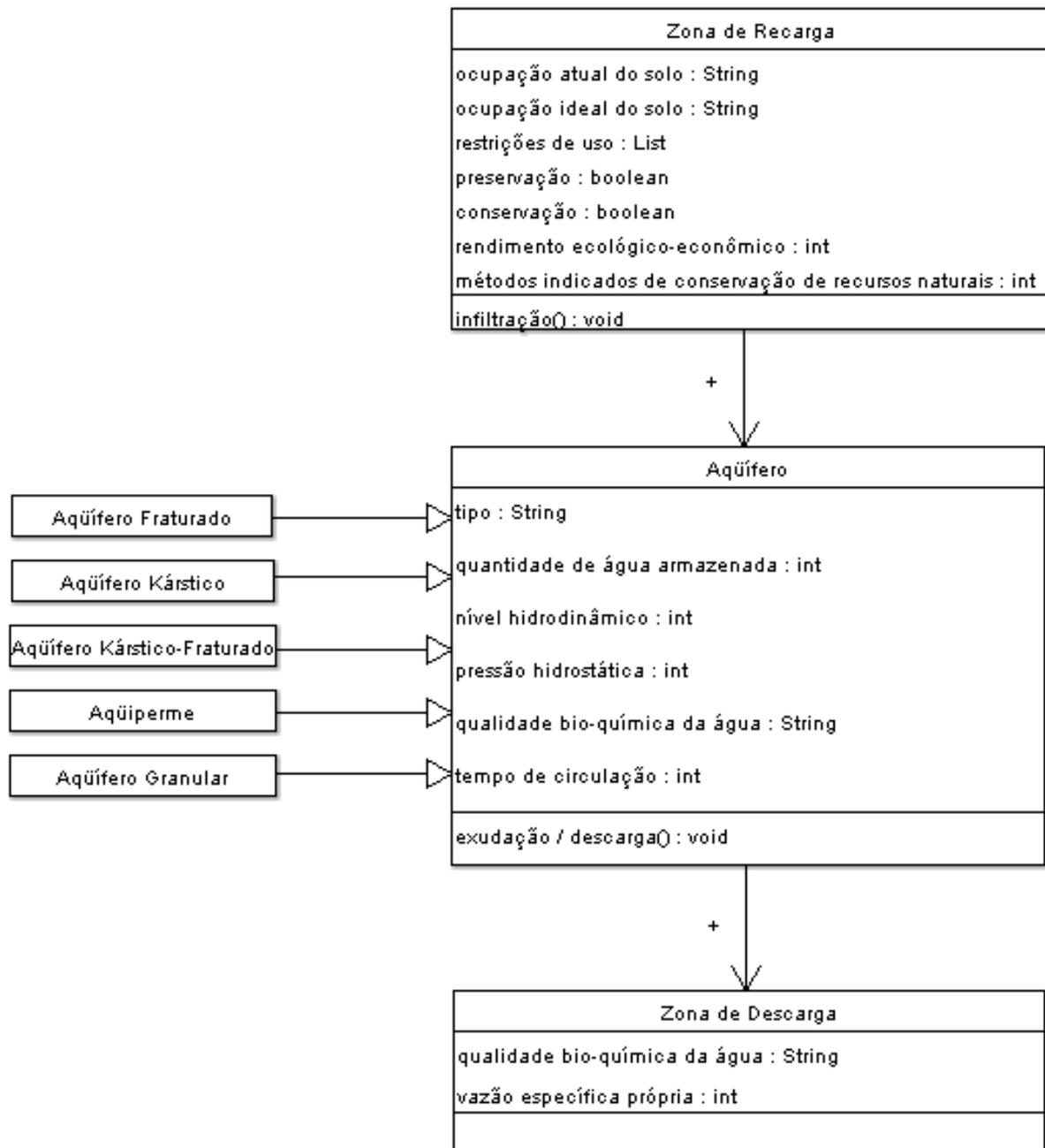


Figura 3 – Diagrama de classes em nível de contexto em UML; são indicados os objetos geológicos (ZRAs, reservatórios de aquíferos e zonas de descarga). Processos naturais e/ou induzidos podem alterar as taxas de trocas de energia e massa. Os métodos de segurança (conservação, ocupação ideal, restrições de uso, rendimentos, métodos de conservação) são programáveis. Símbolos: int – informação numérica; string – informação textual; boolean - informação lógica; void – funções com valor a ser preenchido de acordo com as instâncias determinadas; list – lista de variáveis.

Fonte: Martins Junior *et al.* (2010)

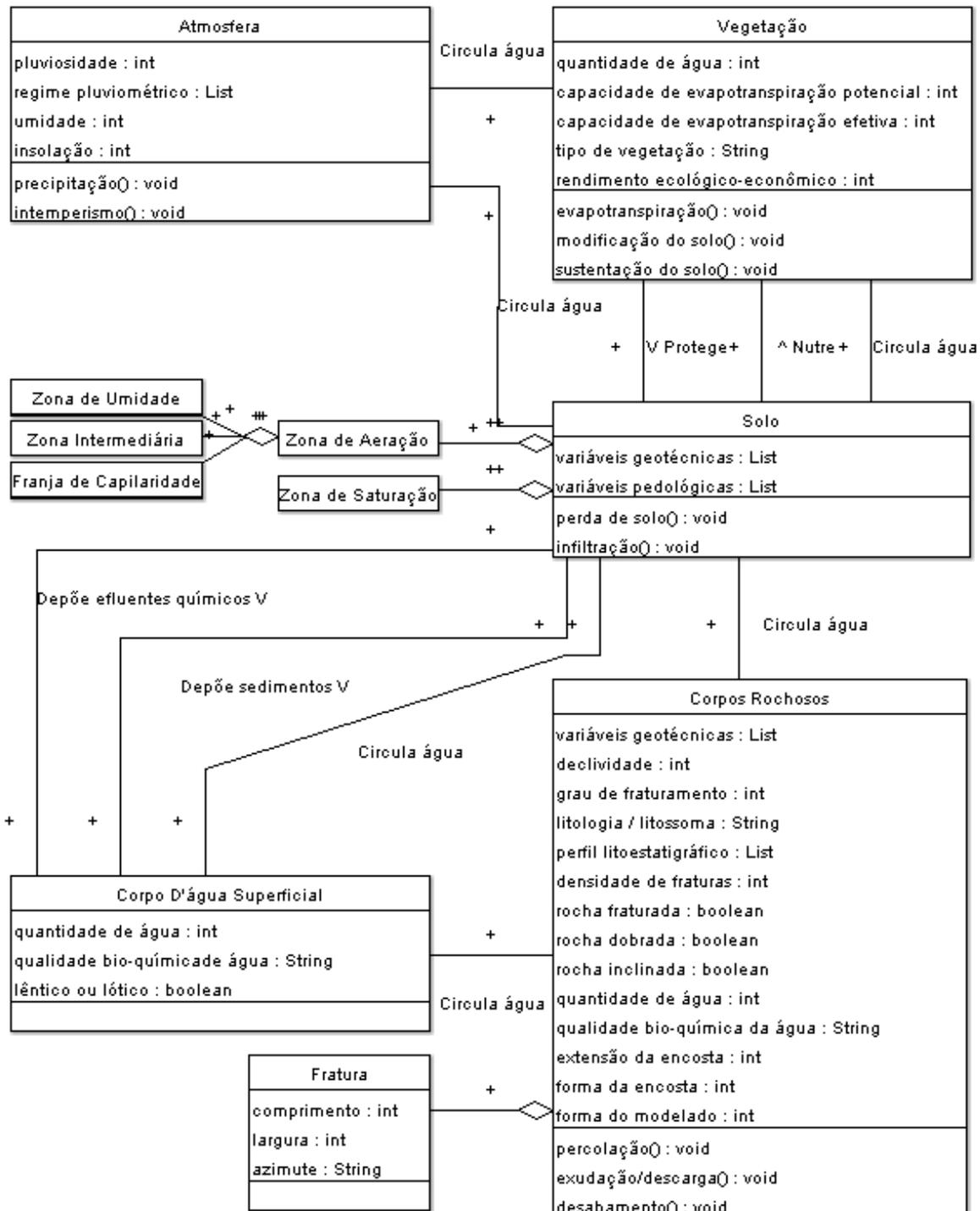


Figura 4 - Diagrama de Classes UML em nível de contexto, em que os objetos e processos são representados segundo visão delineada a partir dos sistemas ambientais delimitados. O organograma ORCI (Figura 2) apresenta-se como fase preliminar para a formalização deste diagrama.

Fonte: Martins Junior *et al.* (2006).

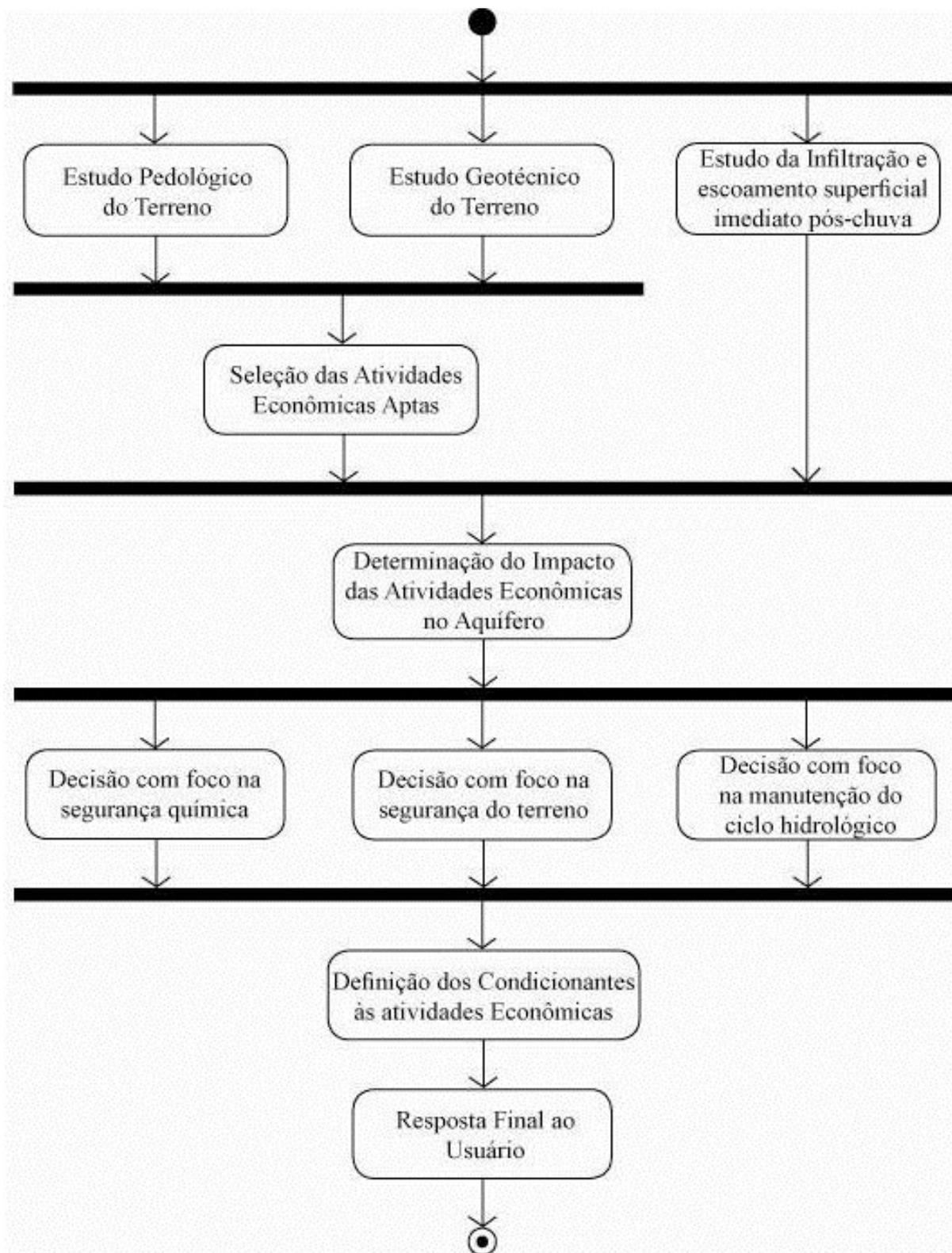


Figura 5 – Diagrama de Atividades em nível de contexto para gestão ambiental de recarga de aquíferos. Consideram-se, para auxílio à decisão, as condições limites (área de preservação, área de conservação, segurança química, métodos obrigatórios de segurança geotécnica, compatibilidades recíprocas e incompatibilidades entre os vários parâmetros).

Fonte: Martins Junior *et al.* (2010)

# INCORPORAÇÃO DA HIDROGEOLOGIA NAS POLÍTICAS PÚBLICAS DE MEIO AMBIENTE E DE RECURSOS HÍDRICOS

## *Aspectos Legais*

A avaliação sobre as possibilidades de uso do conhecimento sobre os processos de recarga e descarga de aquíferos nas análises ambientais das políticas públicas demanda a caracterização de seu contexto normativo. Uma vez que os instrumentos das Políticas de Meio Ambiente e de Recursos Hídricos estão delimitados em um corpo de normas legais e infralegais, torna-se essencial um diálogo entre a Hidrogeologia e o Direito Ambiental.

O atual ordenamento jurídico brasileiro faz escassas referências à proteção dos processos hidrogeológicos. Caso as normas delimitassem a necessidade de um conhecimento mínimo sobre a recarga e descarga de aquíferos das áreas com intervenção antrópica, o poder público e o setor privado seriam instados a incorporar essa temática em seus trabalhos técnicos.

As Áreas de Preservação Permanente – APPs –, previstas pela Lei de Proteção da Vegetação Nativa (Lei Federal nº 12.651, de 2012), protegem parcialmente algumas áreas chave para o ciclo hidrogeológico, embora de maneira inespecífica e, por isso mesmo, pouco adaptáveis aos diferentes contextos hidrogeológicos. A Resolução Conama nº 369, de 2006, (ao descrever os estudos para intervenção ambiental em áreas de preservação permanente – APP – urbana), e também alguns termos de referência para EIAs com intervenção em áreas cársticas, já demandam consideração específica sobre os processos hidrogeológicos. Contudo, a incorporação de tal previsão jurídica deve ser cercada de legitimidade social e praticidade, sob o risco de se não garantir a eficácia de sua aplicação e coerção. Para tanto, uma estratégia interessante é procurar transitar entre a simples restrição de uso (não-fazer) para as condições sustentáveis de uso do território (como fazer).

Cotejando ao direito comparado internacional, a principal ferramenta de proteção ambiental da água subterrânea tem sido o estabelecimento de áreas de proteção de poços. As diferentes metodologias variam entre a adoção de um perímetro circular fixo, ou

do cálculo da velocidade do fluxo hídrico subterrâneo. (COELHO; DUARTE, 2003, p. 81-82).

A delimitação circular fixa, embora seja de fácil aplicação, apresenta as debilidades de não diferenciar uma distância de maior proteção em direção da zona de fluxo subterrâneo, nem prever diferenciações pela velocidade de fluxo hidrológico subterrâneo (USEPA, 1986, p. 9-12; CARVALHO; HIRATA, 2012). Inferências úteis para a delimitação da área de proteção podem ser tomadas no teste de bombeamento do aquífero, pela modelagem numérica/analítica tridimensional de simulação do cone de rebaixamento referente à captação (COELHO; DUARTE, 2003; CARVALHO; HIRATA, 2012). Entretanto, em áreas com intensa perfuração de poços, os cones de rebaixamento podem se interconectar, exigindo estudos regionais mais complexos e em escalas mais amplas (CETESB, 2004).

No Brasil, as fontes de águas minerais (ou seja, poços ou nascentes de valor econômico estrito, na forma de instâncias hidrominerais ou para engarrafamento) necessitam de estudos para a proteção de sua área de recarga, detalhados pela Portaria DNPM nº 231, de 1998. De modo análogo aos perímetros de proteção de poços dos países europeus, a portaria estabelece a seguinte classificação:

**Zona de influência ZI** - área referente ao cone de depressão (rebaixamento da superfície potenciométrica). Associada ao perímetro imediato do poço ou fonte onde só são permitidas atividades inerentes à referida captação. Sua dimensão é função de suas características hidrogeológicas e grau de vulnerabilidade ou risco de contaminação de curto prazo;

**Zona de transporte ZT** - área localizada entre a área de recarga e o ponto de captação. É a zona que determina o tempo de trânsito que um contaminante leva para atingir o ponto de captação desde a área de recarga. Visa à proteção contra contaminantes mais persistentes.

**Zona de contribuição ZC** - área de recarga associada ao ponto de captação, delimitadas pelas linhas de fluxo que convergem a este ponto (equivalente à bacia hidrogeológica efetiva).

A Portaria DNPM nº 231, de 1998, detalha os estudos mínimos, mas não chega a abordar uma metodologia única para delimitação das áreas de proteção, e nem detalha quais seriam as restrições cabíveis para a proteção dessas fontes. Coelho e Duarte

(2003) atentam que, embora as áreas de proteção dos poços possa se embasar em metodologias convencionais internacionalmente utilizadas, a proteção das surgências (nascentes) ainda não apresenta uma metodologia consolidada que delimite e caracterize sua área de proteção de forma segura. Coelho e Duarte (2003) propõem, para as surgências, que sejam delimitadas áreas de proteção com distância estimada em função da condutividade hidráulica do solo, a partir de análises de textura granulométrica.

No que tange aos perímetros de proteção, USEPA (1986, p. 13) ressalva que os critérios legais para áreas de proteção de poços se orientam especificamente para a qualidade da água dos poços, sem considerações importantes sobre impactos ecológicos, relações de descarga de aquíferos nas nascentes a jusante, e uso múltiplo das águas e do território.

Ainda no que toca ao direito internacional, a Comissão de Direito Internacional das Nações Unidas tem discutido na última década sobre o aprimoramento de acordos internacionais atinentes aos aquíferos subterrâneos (NAÇÕES UNIDAS, 2008), entre os quais afeta especialmente ao Brasil o aquífero Guarani (distribuído entre Brasil, Argentina, Uruguai e Paraguai). Analogamente às dificuldades de gerir aquíferos transfronteiriços internacionais, dentro do Brasil existe a dificuldade da gestão de aquíferos transfronteiriços entre os Estados, haja vista ainda que a Constituição Federal atribuiu aos Estados a dominialidade das águas subterrâneas (art. 26, inciso I). Este é um caso de como discussões em uma escala de abordagem (internacional) podem ser aproveitadas para a gestão em outra escala (interestadual). Em ambas as abordagens, o impacto do uso do solo sobre área de recarga no território de um ente político pode comprometer o uso do aquífero pelos demais entes.

No Brasil, a legislação federal não prevê regramentos específicos para a gestão da água subterrânea. As Resoluções nºs 15/2001, 22/2002, 76/2007 e 92/2008 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos estendem-se sobre a necessidade de incorporar as águas subterrâneas nos instrumentos da Política de Recursos Hídricos, mas, além de serem bastante gerais, não especificam instrumentos específicos para sua gestão. Não obstante, as águas subterrâneas são abrangidas por instrumentos gerais referentes aos recursos hídricos: planos diretores de bacia hidrográfica, sistemas de informações sobre recursos hídricos, outorga de uso da água e cobrança pelo uso da água.

O instrumento de enquadramento dos corpos de água (metas e critérios de qualidade) foi estendido para as águas subterrâneas pela Resolução nº 91 de 2008. Porém, a resolução não aclara como adaptar esse instrumento às diversas particularidades hidrogeológicas, tais como autodepuração subterrânea; delimitação de aquíferos, aquíferos e aquíferos; influência hidrogeoquímica e outros; tanto no que se refere ao seu conhecimento científico e à sua caracterização local, quanto às demandas de uso e gestão. De forma análoga, os critérios para concessão e gestão das outorgas de uso da água subterrâneas continuam distantes de uma compreensão do volume e da recarga sazonal das reservas dos aquíferos subterrâneos e, muito mais, da compreensão do efeito das captações subterrâneas nos sistemas hídricos superficiais.

Desde a atualização do Safe Drink Water Act, em 1986, o poder público dos EUA pode delimitar áreas críticas de proteção de aquíferos, a partir de estudos técnicos específicos (USEPA, 1986). Não há essa previsão na Política Nacional de Recursos Hídricos brasileira. Para suprir essa lacuna da legislação federal, os Estados de Minas Gerais, São Paulo, Pernambuco, Pará, Goiás, Rio Grande do Sul, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Distrito Federal, Acre, Paraná, Rio de Janeiro, Piauí, Amazonas, Rondônia, Tocantins e Roraima editaram seus instrumentos normativos para a proteção das águas subterrâneas, todos bastante semelhantes uns às outras, conforme levantamento de Toscano *et al.* (2008).

No que se refere à recarga dos aquíferos para abastecimento público (por poços ou surgências), as legislações estaduais supracitadas preveem a possibilidade de demarcação de três modalidades de áreas:

**Área de Proteção Máxima** - compreendendo, no todo ou em parte, zonas de recarga de aquíferos altamente vulneráveis à poluição e que se constituam em depósitos de águas essenciais para abastecimento público;

**Área de Restrição e Controle** - caracterizada pela necessidade de disciplina das extrações, controle máximo das fontes poluidoras já implantadas e restrição a novas atividades potencialmente poluidoras;

**Área de Proteção de Poços e Outras Captações** - incluindo a distância mínima entre poços e outras captações e o respectivo perímetro de proteção.

Dutra (2005, p. 30) critica o termo *Área de Proteção Máxima*, pelo fato que o adjetivo *máxima*, inicialmente retirado da legislação internacional com o significado de *área de maior abrangência* (ou seja: *área máxima*), passou a ter a conotação de *proteção máxima*. Ademais, as *Áreas de Proteção de Poços e Outras Captações*, e as *Áreas de Restrição e Controle*, por estarem mais próximas dos pontos de uso da água, em geral mereceriam restrições maiores do que as *Áreas de Proteção Máxima*, de forma análoga ao sistema europeu (COELHO; DUARTE, 2003; UNITED KINGDOM ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2008, p. 80). O significado que o termo *Área de Proteção Máxima* desperta na população dificultaria ainda mais a sua aplicação, em virtude de não dar a entender ser possível conciliar os usos do solo de maneira sustentável com a proteção da recarga dos aquíferos.

Apesar de grande parte desses instrumentos normativos estaduais de proteção de águas subterrâneas haver sido sancionada no Brasil a partir da década de 1990, até o presente momento eles têm sido pouco utilizados. No Estado de São Paulo, há registro formal do uso em duas áreas, classificadas como de Restrição e Controle: Ribeirão Preto (Portaria DAEE nº 1.594, de 05 de Outubro de 2005; Deliberação CRH n.º 82, de 18 de junho de 2008) e Jurubatuba (SÃO PAULO, 2009).

Em ambos os casos, a medida se deu após emergirem conflitos sociais graves relacionados à escassez de água subterrânea nos critérios de qualidade e quantidade. Pressupõe-se, portanto, que com o aumento da demanda de água subterrânea para diversos fins (rural, industrial ou urbano), associado à expansão das potenciais fontes de poluição, há uma forte perspectiva de que os instrumentos de proteção das políticas estaduais de recursos hídricos passem a ser aplicados em mais regiões brasileiras.

### ***Unidades de Conservação em Zonas de Recarga de Aquíferos***

Para além dos instrumentos da Política de Recursos Hídricos e de Águas Subterrâneas, o Poder Público frequentemente tem procurado proteger a recarga de fontes de abastecimento público por outros instrumentos, tais como unidades de conservação. Em Minas Gerais e São Paulo, estabeleceu-se um modelo de unidade de conservação típica: a *Área de Proteção de Mananciais*. Adicionalmente, Minas Gerais apresenta a Lei Estadual nº 10.793, de 1992, a qual prevê regramentos adicionais para o

licenciamento de empreendimentos em áreas que contribuem para mananciais de abastecimento público – inclusive as que não estejam protegidas como unidades de conservação.

A atuação governamental na proteção das fontes de abastecimento público (incluindo legislação e execução de políticas públicas) necessita ser avaliada de forma conjugada às demais políticas de planejamento urbano. Stela Goldenstein (BRASIL, 2001, p. 147) analisa que os zoneamentos e restrições ambientais nas áreas de expansão urbana costumam referir-se a um mundo formal, e nem sempre o Poder Público possui meios de exigir o cumprimento dessas normas pela sociedade. Uma eficácia maior na implementação de tais instrumentos depende de uma visão estratégica que inclua também as relações de política, poder, conflitos e processos sociais (BRASIL, 2001, p. 152).

Sob esse aspecto, tem sido interessante a busca de inserir os segmentos da sociedade nas fases de elaboração, implementação e revisão da delimitação de áreas com restrição de uso, lançando mão de conselhos deliberativos de participação popular, audiências públicas, e de outros meios de democracia participativa direta e indireta. Em regiões de uso mais homogêneo do solo, como as áreas de ocupação agropecuária, a coadunação de esforços frente a interesses comuns é mais simples, e funciona como uma forte alavanca para valorização do capital social. Ao passo que, em áreas com diversidade maior de representações sociais, o trabalho tornar-se-á mais complexo, devido aos interesses mais fragmentados e difusos (BRASIL, 2001, p.153).

### ***Recursos Humanos***

Apesar da consideração cada vez mais patente, por parte do meio técnico, da imprescindibilidade da análise hidrogeológica nos contextos de gestão hídrica e ambiental, sua aplicação raramente se concretiza. Dentre os óbices para incorporação dos processos hidrogeológicos, encontram-se as limitações de recursos humanos capacitados, de recursos financeiros e de tempo disponível. Constata-se, de modo geral, nos órgãos ambientais e de recursos hídricos, relatar a baixa disponibilidade de geólogos em suas equipes, o que se apresenta como barreira limitante para incorporação do conhecimento geológico na execução dos instrumentos de suas respectivas políticas.

A oferta insuficiente de profissionais das áreas de Geologia e Engenharia de Minas no mercado de trabalho de mineração e de prospecção mineral (inclusive em um horizonte futuro de médio prazo – conforme BRASIL, 2011), pode ser um dos motivos parciais para tal cenário. Além disso, a falta de capacitação básica em hidrogeologia para os demais profissionais que atuam nas equipes de estudos ambientais traz dificuldades mesmo para atitudes iniciais de diálogo nesse sentido.

No que toca aos estudos demandados pelas políticas estaduais de recursos hídricos subterrâneos, a reserva profissional legal de certos trabalhos a profissionais de hidrogeologia (i.e., Geólogos e Engenheiros de Minas) merece certa atenção. Os trabalhos de outorga de uso da água para poços são um exemplo, e a extensão de novas atribuições a esses profissionais apresenta-se como potencial para assegurar um mínimo de qualidade a assuntos em que tais conhecimentos sejam cruciais.

Todavia, em um contexto de valorização das abordagens interdisciplinares, restrições de execução profissional podem inclusive obstar as possibilidades de diálogos e interpretações mais ampliadas dos problemas ambientais envolvendo a recarga de descarga de aquíferos. O assunto das competências profissionais torna-se ainda mais complexo com a crescente criação de novos cursos de nível superior e de pós-graduação que possuem interface com recursos hídricos e geociências.

Uma alternativa viável pode ser a de empregar uma grade mínima de disciplinas (matriz de conhecimentos) em vez de exigir uma formação específica de nível superior, conforme proposto pela Resolução CONFEA nº 1.010, de 2005, com início de vigor previsto para 2012. Todavia, em 25 de maio de 2012, o plenário do CONFEA votou pela suspensão temporária da referida resolução, sob a prerrogativa de que ainda seriam necessários novos estudos e detalhamentos sobre sua operacionalização.

### ***Considerações Metodológicas sobre Técnicas de Estudo de Recarga de Aquíferos***

Em que pesem as questões relativas à disponibilidade de profissionais capacitados para lidar com os aspectos hidrogeológicos nas políticas públicas de meio ambiente e recursos hídricos, tais observações não afastam a suposição de que as metodologias existentes para estudos hidrogeológicos não se mostrem adequadas para execução nos contextos em que são demandadas para resolução das questões

ambientais e de uso da água. Tal inadequação pode se dar em diversos aspectos, tais como [1] dados iniciais disponíveis, [2] escala(s) de extensão espacial e de detalhe, [3] profissionais disponíveis, [4] tempo e recursos financeiros, [5] resposta demandada e [6] nível de certeza demandado.

Sem dúvida, o contexto de desenvolvimento e de aplicação em que foram formadas as diversas abordagens e metodologias de estudo hidrogeológico existentes partem do meio acadêmico ou de institutos de pesquisa, em que se apresentam projetos financiados, com equipe de bolsistas na área de especialidade departamental e um histórico de anos de desenvolvimento. Não se deixa de reconhecer as aplicações práticas da hidrogeologia e da hidrologia na construção de poços, rebaixamento de lençóis em mineração e construção de reservatórios.

Contudo, tal separação entre desenvolvimento teórico e prático levaram Dooge (1988) a reconhecer a vinculação, na área de Recursos Hídricos, entre uma Ciência Teórica (que procura avançar academicamente sobre os conhecimentos); e uma Ciência Aplicada, a qual se voltaria ao emprego de certos conjuntos de técnicas já consolidadas para a resolução de problemas práticos. O objetivo de pesquisas acadêmicas, embora constantemente foque problemas relevantes para a sociedade, sempre volta esforços consideráveis para o avanço do conhecimento científico e para maior adequação entre modelos e a realidade.

Com base nas considerações até aqui tecidas, depreende-se a necessidade do desenvolvimento de metodologias de diagnóstico de recarga e descarga de aquíferos com aplicação viável no contexto dos instrumentos das políticas públicas de meio ambiente e de recursos hídricos. Tais metodologias podem trazer subsídios de informação para a tomada de decisão em instrumentos de atuação local (autorizações de uso de recursos hídricos, licenciamento ambiental, alocação de reserva legal, autorizações de desmate, entre outros) e de planejamento regional (planos diretores de recursos hídricos, planos diretores municipais, zoneamentos ecológico-econômicos, entre outros).

Muitas das técnicas de diagnóstico e mapeamento atuais utilizadas nas políticas ambientais e de meio ambiente apresentam visões compartimentadas e estáticas de um ambiente. A circulação hídrica subterrânea, pela recarga e descarga de aquíferos, pode, pois, demonstrar relações topológicas espaço-temporais entre os elementos do ambiente, integrando ecossistemas, geossistemas, bem como o uso do solo e da água. Tais

desenvolvimentos metodológicos devem ser bem fundamentados epistemologicamente, sob um enfoque interdisciplinar e orientado para a gestão hídrica e ambiental.

### ***Estratégias para incorporação da Informação Hidrogeológica nas Políticas Públicas***

De fato, a falta de um conhecimento detalhado prévio sobre o comportamento hidrogeológico do território dificulta que sejam tomadas medidas de prevenção. Por esse motivo, os técnicos dos órgãos de gestão de recursos hídricos têm insegurança ao avaliar o custo-benefício econômico e social de medidas de restrição de uso da terra, uso da água e de fontes de poluição nas áreas de recarga relevantes para o abastecimento humano. Somam-se a isso as limitações de pessoal e infraestrutura do poder público para garantir a efetividade dessas restrições. Entretanto, é consensual que as possibilidades técnicas de remediação de solos e aquíferos contaminados são muito mais onerosas do que as medidas restritivas de prevenção (SOUZA, 2010).

Outra estratégia, de gestão preventiva, consiste em identificar as áreas com maior potencial de conflitos, bem como as áreas em que a população dependa mais exclusivamente do acesso às águas subterrâneas. Nos Estados Unidos, o poder público realiza como política pública institucionalizada a identificação prioritária de regiões onde a população tenha mais de 50% de dependência de acesso à água subterrânea (USEPA, 2005). Nessas regiões são executados procedimentos especiais de gestão, incluindo estudos mais detalhados sobre as alternativas de acesso às fontes superficiais. No Estado do Texas, as áreas identificadas pelas comunidades como aquíferos importantes passam a ser geridas por conselhos de aquíferos (FLORES, 2008), semelhantes aos comitês de bacia hidrográfica da legislação brasileira de recursos hídricos.

No Reino Unido, foram identificadas, em toda a extensão do território, a localização das fontes atuais e potenciais de abastecimento para a população (UNITED KINGDOM ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2008). Para proteger esses perímetros, foram demarcadas áreas de proteção de fontes, na forma conceitual. Além disso, para análises locais (caso-a-caso), utilizam planilhas de checagem ponderadas para decisão quanto à necessidade de estudos mais detalhados para aplicação de instrumentos específicos de gestão sobre áreas de recarga (UNITED KINGDOM ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2008).

Em virtude do alto custo de estudos hidrogeológicos, métodos exploratórios que caracterizem, mesmo que preliminarmente, os processos de recarga de aquíferos em uma dada região podem servir de informação inicial para a gestão pelos órgãos ambientais e de recursos hídricos, especialmente em países em desenvolvimento. Por exemplo, a cartografia da altitude relativa às nascentes (RENNÓ; SOARES, 2003), complementada pela cartografia da altitude relativa aos cursos de água (RENNÓ *et al.*, 2008; NOBRE *et al.*, 2011) pode indicar as regiões onde há predomínio das funções de recarga e descarga de aquíferos.

No caso de instrumentos que envolvam planejamento regional, é possível avaliar, pela cartografia existente (solos, declividade, rochas e pluviosidade), quais são os geossistemas com características mais favoráveis à infiltração das águas (BALACHANDAR *et al.*, 2010; VASCONCELOS *et al.*, 2012a). Além disso, pela análise dos hidrogramas das estações fluviométricas, é possível separar os componentes de escoamento superficiais, subsuperficial e subterrâneo, fornecendo informação indireta sobre o comportamento da dinâmica hidrogeológica distinta das bacias associadas a cada estação (VASCONCELOS *et al.*, 2013).

Para os instrumentos de ação local, cabe notar que o instrumento de Avaliação de Impacto Ambiental – AIA – da Política Nacional de Meio Ambiente abarca métodos de diagnóstico expedito (LOHANI *et al.*, 1997). Os métodos de diagnóstico expedito, bastante usados para avaliação do impacto ambiental em ecossistemas ripários (BARBOUR *et al.*, 1999; CALLISTO *et al.*, 2002; RODRIGUES, 2008), consistem em um conjunto de procedimentos de campo e de preenchimento de planilhas estruturadas que permitem fácil e rápida aplicação. A adaptação dessa metodologia para avaliação de recarga de aquíferos apresenta-se como uma ferramenta interessante, tanto para aprendizado como para aplicação de campo pelos profissionais de meio ambiente e de recursos hídricos (VASCONCELOS *et al.*, 2012b).

Com a gradual implantação de bancos de dados e sistemas de auxílio à decisão nos órgãos de gestão de recursos hídricos, no Brasil, as informações relacionadas às outorgas de águas subterrâneas passam a constituir um importante acervo de informações quanto aos aquíferos e seu uso. Um exemplo é o Sistema SIAGAS (Sistema de Informações de Águas Subterrânea), o qual possui as informações acerca dos perfis

litológicos, dados hidrogeoquímicos e testes de bombeamento dos poços outorgados em todo o Brasil (NASCIMENTO *et al.*, 2008).

Mesmo apesar do inegável potencial do SIAGAS para gestão do uso das águas subterrâneas, ainda cabe a constatação de Gomes (2008) de que o uso desses dados é extremamente limitado para a modelagem dos aquíferos em que se situam. Afinal, esses poços são locados para sua maior eficiência, conforme o conhecimento do perfurador com base em informações de campo que escapam à escala de detalhe regional dos mapeamentos cartográficos (logo, os poços não são aleatórios espacialmente). Além disso, os poços não apresentam características homogêneas quanto à profundidade e outros aspectos construtivos, dificultando comparações e interpolações espaciais.

Por fim, o aumento na malha de estações telemétricas de informações sobre o ciclo hidrológico, por meio da implantação e manutenção de piezômetros, lisímetros, estações fluviométricas e estações climatológicas, traria um conhecimento de base essencial para entender o funcionamento da recarga dos aquíferos. Sem a densidade de estações suficientes, estudos integrados entre essas modalidades de mensuração, tais como realizados nos EUA por Ruhl *et al.* (2002) e Risser *et al.* (2005) tornam-se um sonho distante para os países em desenvolvimento, como o Brasil.

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

As análises ambientais envolvendo recarga e descarga de aquíferos mostraram poder ser um campo interdisciplinar bastante profícuo, tanto para o desenvolvimento científico quanto para a gestão sustentável do uso da água e do solo. O diálogo transdisciplinar apresenta diversos desafios, mas traz a promessa de maior compreensão e maturidade por parte das diversas comunidades acadêmicas envolvidas. Neste artigo procurou-se aclarar as relações entre os saberes disciplinares existentes e a demonstrar a potencialidade de novos rumos para essas pesquisas interdisciplinares. Reconhece-se, sem embargo, que ainda nos encontramos distantes de uma base teórica concisa e articulada que abarque com efetividade as demandas do saber e do fazer em relação aos aquíferos subterrâneos.

A aplicação de modelagem computacional apresentada neste artigo coloca-se como uma propícia possibilidade para o desenvolvimento de modelos computacionais e de sistemas especialistas de diagnóstico e de auxílio à decisão em gestão de aquíferos.

Para estudos futuros, um caminho promissor de modelagem envolve o detalhamento dos diagramas, visando à articulação de Sistemas de Auxílio à Decisão com Sistemas de Informação Geográfica – SIG. Para tanto, podem ser úteis as proposições teóricas sobre geo-ontologias (FONSECA *et al.*, 2000; FONSECA *et al.*, 2006; WANG *et al.*, 2008; entre outras obras), de forma a vincular-se aos debates já existentes sobre representação, estruturação, tratamento e gestão sobre informações espacializadas em geociências. Complementarmente, estudos futuros poderiam analisar, nos diagramas das figuras 3 e 4, quais classes e atributos merecem um tratamento que vincule dinâmicas temporais e espaciais (DIAS *et al.*, 2005).

Evidenciou-se, neste artigo, que a incorporação dos processos hidrogeológicos aos instrumentos das Políticas Meio Ambiente e Recursos Hídricos demanda, antes de tudo, que essa área do saber (Hidrogeologia) esteja apta a demonstrar que apresenta métodos úteis e práticos para resolver os problemas ambientais demandados. Essa demonstração inclui tanto o desenvolvimento de metodologias adaptadas aos contextos de aplicação, quanto também à capacidade de se transmitir e ensinar seus saberes para os profissionais das outras áreas de conhecimento.

Ademais, como base propositiva, podemos concluir que a necessária, mas cauta, adaptação das políticas públicas para lidar de forma eficaz com os fenômenos de recarga e descarga de aquíferos exige um caminho de bom senso, que parta da disponibilidade de recursos humanos capacitados e que concilie os recursos financeiros e a agilidade necessária para resolução dos problemas enfrentados. Portanto, o desenvolvimento de metodologias factíveis aos instrumentos de gestão ambiental e de recursos hídricos deve ter em conta essas limitações de tempo, recursos humanos, fontes de informação e possibilidades legais inerentes a seus respectivos contexto de aplicação.

Como demanda futura de aprimoramento da gestão ambiental, os textos normativos das distintas esferas (federal, estadual e municipal) podem prever diferentes graus de proteção ou conservação, a serem definidos na medida em que se aprimora o conhecimento sobre hidrogeologia de um sítio de intervenção, e que demonstrando de modo cientificamente confiável as melhores alternativas para o uso sustentável dos recursos naturais. De acordo com a proposta de Johnson *et al.* (1999) e Dillon (2005), o objetivo final de uma política que integre ordenamento sustentável do uso do solo e da água seria quantificar hidrogeologicamente e economicamente a viabilidade de aumentar

a infiltração em áreas de maior recarga potencial, durante o período de chuvas, com fins de garantir uma vazão mínima adequada para os períodos de estiagem, inclusive com melhora na qualidade das águas.

## **AQUIFER RECHARGE: EPISTEMOLOGY AND INTERDISCIPLINARY**

### **Abstract:**

The environmental issues concerning aquifers recharge and discharge are an interdisciplinary challenge. The contribution of the many expertise areas of knowledge on hydrogeological processes are studied in this paper, by an epistemological approach. This dialogue may lead to useful developments to solve actual and future water use and environmental problems. Therefore, epistemological and information management approaches are discussed, with the goal of a better spatial characterization, qualitatively and quantitatively, for aquifer recharge. Some preliminary conceptual modeling is proposed, demonstrating the interdisciplinary articulation possibilities for solving the environmental challenges presented. Finally, it is discussed on how the knowledge about aquifers recharge can be incorporated into the public policies regarding environment and water resources.

Keywords: Aquifers. Hydrogeology, Epistemology, Environment, Interdisciplinary.

## **RECARGA DE ACUÍFEROS: EPISTEMOLOGÍA E INTERDISCIPLINARIEDAD**

### **Resumen:**

Las cuestiones ambientales relacionadas con la recarga y descarga de acuíferos se presentan como un desafío interdisciplinario. En este estudio, se propone una investigación epistemológica acerca de la contribución de las diversas áreas de conocimiento aplicadas a la investigación de los procesos hidrogeológicos. Se presenta como hipótesis, que este diálogo señala desarrollos imprescindibles para la resolución de problemas ambientales y del uso del agua en el presente y en el futuro. Por lo tanto, se propone discutir perspectivas epistemológicas y de gestión ambiental que contribuyan para una mejor caracterización espacial, cualitativa y cuantitativa, de la recarga de los acuíferos. Son elaborados modelos conceptuales preliminares demostrando las posibilidades de articulación interdisciplinaria para la resolución de los problemas ambientales presentados. Por último, se discute la posibilidad de que las políticas públicas de medio ambiente y recursos hídricos incorporen este conocimiento acerca de la recarga de los acuíferos.

Palabras-clave: Acuíferos. Hidrogeología. Epistemología. Medio Ambiente. Interdisciplinarietà.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M.B.; BAX, M.P. Uma visão geral sobre ontologias: pesquisa sobre definições, tipos, aplicações, métodos de avaliação e de construção. **Ciência da Informação**, Brasília, v. 32, n. 3, p.7-20, set./dez. 2003.
- ANDRADE, H.; ALVES, H. M. R.; FERREIRA, E.; MACHADO, R. V.. **Geoprocessamento Aplicado a Solos e Meio Ambiente**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2006. 58p.
- ARRAES, T. M. **Proposição de Critérios e Métodos para Delimitação de Bacias Hidrogeológicas**. Dissertação de Mestrado. 2008. 125f. Instituto de Geociências – UNB. Brasília, DF. 2008.
- BALACHANDAR, D.; ALAGURAJA, P.; SUNDARAJ, P.; RUTHARVELMURTHY, K. Application of Remote Sensing and GIS for Artificial Recharge Zone in Sivaganga District, Tamilnadu, India. **International Journal of Geomatics and Geosciences**, v. 1, n. 1, p. 84-97, 2010.
- BARBOUR, M.T.; GERRISTSEN, J.; SNYDER B. D.; STRIBLING, J.B. **Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Wadeable Rivers**: Periphyton, Benthic Macroinvertebrates and Fish. Second Edition. Washington, EPA 841-B-99-002. 1999. 339p.
- BAUER, H. H. Barriers Against Interdisciplinarity Implications for Studies of Science, Technology, and Society (STS). **Science, Technology & Human Values**, v.15, n.1, p. 105-119, Winter, 1990.
- BALEK, J. Groundwater Recharge Concepts. In: SIMMERS, I. (org.). **Estimation of Natural Groundwater Recharge**. Holland: Nato Asi, s. 222. Springer, 1988. 510p.
- BOORMAN, D.B., HOLLIS, J.M., LILLY, A. **Hydrology of soil types**: a hydrologically-based classification of the soils of the United Kingdom. England: Institute of Hydrology, Report no. 126. 1995.
- BOOCH, G.; RUMBAUGH, J.; JACOBSON, I. **The unified modeling language user guide, UML**. 6th printing. Boston: Addison Wesley Publishing Company. 1999.
- BRASIL. MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Metodologia de Zoneamento Ecológico-Econômico para a Região Sudeste**: Transcrição de debates. Brasília. 450p. 2001.
- BRASIL. MME. Ministério das Minas e Energia. **Plano Nacional de Mineração 2030**. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Fevereiro, 2011. 178p.
- CALLISTO, M.; FERREIRA, W.; MORENO, P.; GOULART, M.D.C.; PETRUCCIO, M. Aplicação de um protocolo de avaliação rápida da diversidade de habitats em atividades de ensino e pesquisa (MG-RJ). **Acta Limnol. Bras.**, v.14, n. 1, p. 91-98, 2002
- CARVALHO, A.M.; HIRATA, R. Evaluation of methods for wellhead protection areas for the State of São Paulo. **Geologia USP**, Sér. cient., São Paulo, v. 12, n. 1, p. 53-70, Apr. 2012.
- CETESB – COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Sistema de informação para o gerenciamento ambiental dos recursos hídricos subterrâneos na área de afloramento do Aquífero Guarani no Estado de São Paulo**. Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo (Brasil) Secretaria de Meio Ambiente, Saúde Pública e Proteção ao Consumidor do Estado da Baviera (Alemanha). São Paulo, Abril, 2004. 81p.

- CHEVALLIER, P. Aquisição e Processamento de Dados. In: TUCCI, C.E.M. (org.), **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Terceira Edição. ABRH. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Editora da Universidade. 2009.
- CLARKE, R.T. Hidrologia Estatística. In: TUCCI, C.E.M. (org.), **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Terceira Edição. ABRH. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Editora da Universidade. 2009.
- COELHO, V.M.T.; DUARTE, U. Perímetros de Proteção para Fontes Naturais de Águas Minerais. **Rev. Águas Subterrâneas**, n. 17, p. 77-91, maio, 2003.
- COLLISCHONN, W e TUCCI, C. E. M. Simulação hidrológica de grandes bacias. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.6, n. 1, p. 95-118, 2001.
- CORAZZON, R. **What is ontology?** [S. l.: s. n.], Disponível em: <[http://www.formalontology.it/section\\_4.htm](http://www.formalontology.it/section_4.htm)>. Acesso em: 20 jul. 2002.
- DILLON, P. Future management of aquifer recharge. **Hydrogeol J**, n. 13, p. 313–316, February, 2005. DOI 10.1007/s10040-004-0413-6
- DOOGE, J. C. Hydrology in perspective. **Hydrological Sciences Journal**. Oxford, v.33, n.1, p. 61-85. feb. 1988.
- DUTRA, D.A. **Plano de Proteção de Aquíferos a partir de Variáveis Ambientais**. Dissertação de Mestrado. 2005, 101f. UFSM. Santa Maria, 2005.
- FERRILL, D.A.;SIMS, D.W.; WAITING, D.J.; MORRIS, A.P.; FRANKLIN, N.M.; SCHULTZ, A.L. Structural framework of the Edwards Aquifer recharge zone in south-central Texas. Geological Society of America. **Bulletin**; v. 116, n. 3-4, p. 407-418, March 2004; DOI: 10.1130/B25174.
- FLORES, R.R. **Fundamentals of Groundwater Law**. State Bar of Texas. Water Rights Boot Camp. May 7, 2008. 16p.
- FLYNN R.H.; TASKER, G.D. **Generalized Estimates from Streamflow Data of Annual and Seasonal Ground-Water-Recharge Rates for Drainage Basins in New Hampshire**. USGS Scientific Investigations Report 2004-5019. New Hampshire. 2004. 72p.
- FLORIANI, D. Disciplinaridade e construção interdisciplinar do saber ambiental. **Revista Desenvolvimento e Meio Ambiente**, n. 10, p. 33-37, jul./dez. 2004.
- FRANCELIN, M. Conceitos, domínios do saber e fronteiras epistemológicas. **Revista Digital de Biblioteconomia e Ciência da Informação**, Brasília, DF, n. 8, v. 2, p. 152-155, 2011.
- CETEC-MG – Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. **II Plano de Desenvolvimento Integrado do Noroeste Mineiro: Recursos Naturais**. Belo Horizonte: Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. 1981.
- GOMES, F.E.M. Geoprocessamento em Ambiente SIG aplicado à Hidrogeologia. In: FEITOSA, A.C. (org.) **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3 ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: CPRM: LABHID. 2008.
- GUERRA, A. T.; GUERRA, A. J. T. **Novo Dicionário Geológico-Geomorfológico**. 5º ed. Revisada e ampliada. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2006. 652p.

HOLTSCHLAG, D. J. **A generalized estimate of ground-water-recharge rates in the Lower Peninsula of Michigan**. U.S. Geological Survey water-supply paper 2437. 1997. 44p.

JACKSON, J.A. **Glossary of Geology**. Fourth Edition. American Geological Institute. 1997. 754p.

JOHNSON, G.S.; SULLIVAN, W.H.; COSGROVE, D.M.; SCHIMIDT; R.D. Recharge of the Snake River Plain Aquifer: Transitioning from Incidental to Managed. **Journal of the American Water Resources**. Paper n. 98010, 1999.

JUHASZ, C. E. P.; CURSI, P.R.; COOPER, M.; OLIVEIRA, T.C.; RODRIGUES, R.R. Dinâmica físico-hídrica de uma toposseqüência de solos sob Savana Florestada (Cerradão) em Assis, SP. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 30, n. 3, p. 401-412, June 2006.

LIMA, G.Â.B. Mapa Conceitual como ferramenta para organização do conhecimento em sistemas de hipertextos e seus aspectos cognitivos. **Revista Perspectiva em Ciência da Informação**, v.9 n.2, p. 134-145, jul/dez, 2004.

MARI, H. Metáfora, Metonímia, Denotação e Conotação: a propósito da migração de conceitos. In: DOMINGUES, I. (org.) **Conhecimento e Transdisciplinaridade II**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005. p. 101-136.

MARQUES, F.S.M. Manual para Levantamento Utilitário do Meio Físico e Classificação da Terra no Sistema de Capacidade de Uso. In: MARTINS JUNIOR, P. P. (coord.). **Projeto CRHA - Conservação de Recursos Hídricos no âmbito de Gestão Agrícola de Bacias Hidrográficas**. NT-07/2003. Disponível em: [www.crha.cetec.br](http://www.crha.cetec.br). Acesso em 01/05/2013.

MARTINS JUNIOR, P.P. Fundamentos Conceituais para o Desenvolvimento e a Prática das Geociências Agrárias e Ambientais. *A Terra em Revista*. No. 4, p.10-15, outubro, 1998.

MARTINS JUNIOR, P.P. **Epistemologia Fundamental**: um estudo introdutório sobre a estrutura do conhecimento e a aplicação prática da Epistemologia na pesquisa científica. Belo Horizonte: Fundação CETEC. 2000. 169 p.

MARTINS JUNIOR, P. P. (coord.). **Projeto CRHA - Conservação de Recursos Hídricos no âmbito de Gestão Agrícola de Bacias Hidrográficas**. 2006. Disponível em: [www.crha.cetec.br](http://www.crha.cetec.br). Acesso em 01/05/2013.

MARTINS JUNIOR P.P., ENDO, I., VASCONCELOS, V.V, NOVAES. L. A. d'A, SEQUETTO, M. A. Modelo de Integração de Conhecimentos Geológicos para Auxílio à Decisão sobre uso da Terra em Zonas de Recarga de Aquífero. **Revista Brasileira de Geociências (RBG)**, v. 36, n. 4, p. 651-662, 2006.

MARTINS JUNIOR, P.P.; CARNEIRO, J. A.; NOVAES, L.A.A.; VASCONCELOS, V.V.; GOMES, L.A.M.; PAIVA, D.A. Modelagem Geo-Ambiental e Interdisciplinar para Ordenamento do Território com Corredores Florestais Ecológico-Econômicos. **Revista de Geologia**, UFC, v. 21, n. 1, p. 79-97, 2008.

MARTINS JUNIOR, P.P.; CARNEIRO, J.A.; RIBEIRO, S.T.M.; DINIZ, C.P.L.; ABREU JÚNIOR, J.C.; PEREIRA, J.S.; PAIVA, D.A.; BUENO de OLIVEIRA, P.H. **Arquitetura de Conhecimentos em Ecologia-economia para Gestão Ambiental de Bacia Hidrográfica**. Belo Horizonte: Fundação CETEC. Projeto ACEE. 2007. 237p.

MARTINS JUNIOR, P.P.; CARNEIRO, J.A.; KNUPP, V.F.; DINIZ, C.P.L.; ANDRADE, L.M.G.; SCHERRER, L.R.; COUTINHO, V.S.C.; VASCONCELOS, V.V.; NOVAES, L.A.d'A.; OLIVEIRA, L.C.de; FERNANDES, M.M.; SARAIVA, C.C.S.; BAETA, A.M.; BOLIVAR, F.deC.; SANTOS, B.R.V. **Instrumentos de Gestão de Recursos Hídricos Subterrâneos entre Bacias que Partilhem Zonas de Recarga de Aquíferos**. Belo Horizonte e Ouro Preto: Projeto GZRP. Relatório Final. 1 Vol. 2009. 572 p.

MARTINS, JR, P.P., CARNEIRO J.A., ENDO I, MARQUES A.F.S.M., VASCONCELOS V. V., Novaes L.A.A., Gomes, L.A.M., Jano, D.R. Lógica para Modelos de Integração de Conhecimentos para Auxílio à Decisão: Plantios Ecológico-Econômicos em Zonas de Recarga de Aquíferos. **Revista Brasileira de Geociências (RBG)**, v.40, n. 1, p. 80-98, março, 2010.

MARTINS JUNIOR, P.P.; COUTINHO, C.S.; VASCONCELOS, V.V.; CARNEIRO, J.A.; HADAD, R.M.; JANO, D.R.; MELO, J.W.; ALVARENGA, L.J.; FERNANDES, M.M.; BRITTO, L.O.O.; CLAUS, R.P.; MACHADO, J.L.; HORTA, M.M.X.; CORREA, T.DE O.; ENDO, I. **Projeto SADC** - Sistemas de Arquitetura de Conhecimentos e de Auxílio à Decisão na Gestão Geo-Ambiental e Econômica de Bacias Hidrográficas e Propriedades Rurais. Ouro Preto e Belo Horizonte: Univ.Fed.OP-EM-DEGEO / Fundação CETEC. Relatório Final, Vol. I. 435p., Vol II. 266p. 2012.

NAÇÕES UNIDAS. **Draft articles on the Law of Transboundary Aquifers**. Official Records of the General Assembly, Sixty-third Session, Supplement n. 10 (A/63/10). 2008. 10p

NASCIMENTO, F.M.F.; CARVALHO, J.E.; PEIXINHO; F.C. Sistema de Informações de Água Subterrânea – SIAGAS: histórico, desafios e perspectivas. In: XV CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 11-14 de novembro, 2008. Natal, RN. **Anais.....**, 2008. 18p.

NOVAES, L.F. **Modelo para a Quantificação da Disponibilidade Hídrica na Bacia do Paracatu**. Tese de Doutorado. 2005. 104f. Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. Viçosa, 2005.

NAGUETTI, M.; PINTO, E.J.A. **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 2007. 552p.

NOBRE, A. D., CUARTAS, L. A., HODNETT, M., RENNÓ, C. D., RODRIGUES, G., SILVEIRA, A., WATERLOO, M.; SALESKA, S. Height Above the Nearest Drainage – a hydrologically relevant new terrain model. **Journal of Hydrology**, v. 404, n. 1, p. 13-29, 2011.

OLIVEIRA, A. G. Propriedades Emergentes nas Ciências Exatas. Em: DOMINGUES, I. (org.) **Conhecimento e Transdisciplinaridade II**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2005. p. 101 a 136.

QUEIROZ NETO, J.P. Análise Estrutural da Cobertura Pedológica: uma experiência de ensino e pesquisa. **Revista do Departamento de Geografia**, v.15, p. 77-90, 2002.

REGGIANI, P.; SIVALAPAN, M.; HASSANIZADEH, S.M. Conservation equations governing hillslope responses: Exploring the physical basis of water balance. **Water Resources Research**, v. 36, n. 7, p. 1845–1863, July 2000. American Geophysical Union. Paper number 2000WR900066.

RENNÓ, C. D. e SOARES, J. V. Uso do Índice Topográfico como Estimador da Profundidade do Lençol Freático. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11, 2003, Belo Horizonte. **Anais...**: 2579-2588. INPE, São José dos Campos, 2003.

RENNÓ, C. D., NOBRE, A. D., CUARTAS, L. A., SOARES, J. V., HODNETT, M. G., TOMASELLA, J., e WATERLOO, M. J. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 9, p. 3469-3481, 2008.

RESTALLACK, G.J. **Soils of the past**: An introduction to paleopedology. USA: Wiley-Blackwell, 2008. 404p.

RISSER, D.W.; GBUREK, W.J.; FOLMAR, G.J. **Comparison of methods for estimating ground-water recharge and base flow at a small watershed underlain by fractured bedrock in the eastern United States**. US Department of the Interior, US Geological Survey. 2005. 31p.

ROCHA, G. A.. O grande manancial do Cone Sul. **Estudos Avançados**, v.11 n. 30, p. 191-212, May/Aug, 1997.

ROCHA, P. E. D. Trajetórias e Perspectivas da Interdisciplinaridade Ambiental na Pós-Graduação Brasileira. **Ambiente & Sociedade**, V. 6, n. 2, p.155-182, jul./dez. 2003.

ROCHA, P. E. D. Interdisciplinaridade & ciências ambientais: a articulação disciplinar e o potencial sócio-participativo da universidade. In: ENCONTRO DA ANPPAS (Associação Nacional de Pesquisa e Pós Graduação em Ambiente e Sociedade), 2, 2004, **Anais...**, Indaiatuba (SP):ANPPAS, 2004. Disponível em: <<http://www.anppas.org.br/>>. Acesso em: jul. 2007.

RODRIGUES, A.S.L. **Adequação de um protocolo de avaliação rápida para o monitoramento e avaliação ambiental de cursos d'água inseridos em campos rupestres**. Dissertação de Mestrado. 2008, 118f. UFOP – DEGEO. Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais. Ouro Preto, Minas Gerais. 2008.

ROSA, E. U. **Desenvolvimento de Procedimentos Computacionais para Integração de Sistemas de Informação Geográfica com Modelos Hidrológico Chuva-Vazão em Bacias Urbanas**. Dissertação de Mestrado. 2002, 134f. [Rio de Janeiro], M.Sc.. Engenharia da Computação – Área de Concentração Geomática. UERJ. 2002.

ROSA FILHO, E.F.; HINDI, E.C.; ROSTIROLLA, S.P.; FERREIRA, F.J.F.; BITTENCOURT, A.V.L. Sistema Aquífero Guarani – considerações preliminares sobre a influência do Arco de Ponta Grossa no fluxo das águas subterrâneas. **Rev. Águas Subterrâneas**, n. 17, p. 91-112, maio, 2003.

RUHL, J.F.; KANIVETSKY, R.; SHMAGIN, B. **Estimates of recharge to unconfined aquifers and leakage to confined aquifers in the seven-county metropolitan area of Minneapolis-St. Paul, Minnesota**. Water Resources Investigations Report. United States Geological Survey, (4092), 2002.

SANTOS, L.J.C. Contribuição da Análise Estrutural da Cobertura Pedológica ao Desenvolvimento da Ciência do Solo. **Revista Raega**, Curitiba, n. 4, p. 131-138, 2000.

SANTOS, R.D.; LEMOS, R.C.; SANTOS, H.G.; KER, J.C.; ANJOS, L.H.C. **Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo** - 5a. ed. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS). SBCS-27. Viçosa: SBCS, 2005. 92p.

SCANLON, B.R.; HEALY, R.W.; COOK, P.G. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. **Hydrogeology Journal**, v. 10, p. 18-39, January, 2002. DOI 10.1007/s10040-0010176-2

SCHREIBER, G.; AKKERMANS, H.; ANJEWIERDEN, A.; HOOG, R.; SHADBOLT, N.; VELDE, W.V.; WIELINGA, B. **Knowledge engineering and management: the CommonKADS methodology**. Boston: Bradford Book, The MIT Press, Massachusetts Institute of Technology/Cambridge, London. 1999.

SCHRÖDER, B. Pattern, process, and function in landscape ecology and catchment hydrology – how can quantitative landscape ecology support predictions in ungauged basins (PUB)? **Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.**, v. 3, p. 1185–1214, 2006.

SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE. SECRETARIA DE ESTADO DE SANEAMENTO E ENERGIA. São Paulo. **Projeto Jurubatuba: restrição e controle de uso de água subterrânea**. Cadernos do Projeto Estratégico Aquíferos; n. 01. São Paulo: DAEE/IG. 2009. 109 p.

SILVA, M.L.N. **Conservação do Solo e da Água**. Universidade Federal de Lavras, Faepe, 2002. 59p.

SILVEIRA, A.L.L. Ciclo Hidrológico e Bacia Hidrográfica. In: TUCCI, C.E.M. (org.), **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Terceira Edição. ABRH. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Editora da Universidade. 2009.

SILVEIRA, A.L.; LOUZADA, J.A.; BELTRAME, L.F. Infiltração e Armazenamento no Solo. In: TUCCI, C.E.M. (org.), **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Terceira Edição. ABRH. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Editora da Universidade. 2009.

SIMMERS, I. **Estimation of Natural Groundwater Recharge**. Holland: Nato Asi, s. 222. Springer, 1988. 510p.

SIVALAPAN, M. Pattern, Process and Function: elements of a unified theory of hydrology at the catchment scale. In: ANDERSON, M.G (Editor). **Encyclopedia of Hydrological Sciences**. Ed. John Wiley & Sons Ltda. p. 193-219, 2005

SMITH, M.K.; WELTY, C.; MCGUINNESS, D.L. **OWL Web Ontology Language Guide**. W3C Recommendation 10 February. Disponível em <http://www.w3.org/TR/2004/REC-owl-guide-20040210/>. Copyright © 2004 W3C® (MIT, Ercim, Keio).

SOARES, A.P. **Variabilidade espacial no Sistema Aquífero Guarani : controles estratigráficos e estruturais**. Tese de Doutorado. 2008. 196f. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geociências. 2008.

SOUZA, L.C. A Efetividade da Proteção das Águas Subterrâneas no Brasil. In: 8º CONGRESSO BRASILEIRO DO MAGISTÉRIO SUPERIOR DA ASSOCIAÇÃO DOS PROFESSORES DE DIREITO AMBIENTAL DO BRASIL – APRODAB e 1º CONGRESSO DE DIREITO AMBIENTAL DA PUC-RIO. Rio de Janeiro, 2010. **Anais...** Rio de Janeiro: PUC-RIO, 2010, 20p.

SOUZA, E.R.; FERNANDES, M.R. Sub-bacias hidrográficas: unidades básicas para o planejamento e a gestão sustentáveis das atividades rurais. **Informe Agropecuário**. Manejo de Microbacias. v. 21, n. 207, p. 15-20, nov/dez, 2000.

SOWA, J.F.; MOULIN, B.; MINEAU, G.W. **Conceptual Graphs for Knowledge**

**Representation**, Lecture Notes in AI 699. Berlin: Springer-Verlag. 1993.

SOWA, J.F. **Knowledge Representation: Logical, Philosophical, and Computational Foundations**. Pacific Grove: Brooks Cole Publishing Co., CA. 2000. 594p.

STOREY, M.A.; MUSEN, M.; SILVA, J.; BEST, C.; ERNST, N.; FERGERSON, R.; NOY, N. Jambalaya: Interactive visualization to enhance ontology authoring and knowledge acquisition in Protege. In: *WORKSHOP ON INTERACTIVE TOOLS FOR KNOWLEDGE CAPTURE*, Victoria, B.C. Canada, October, 2001, **Anals...**, Victoria: University of Southern California, 2001.

STOREY, M.A.; BEST, C.; MICHAUD, J.; RAYSIDE, D.; LITOIU, M.; MUSEN, M. SHRIMP views: an interactive environment for information visualization and navigation. In: *PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON HUMAN FACTORS IN COMPUTER SYSTEMS (CHI 2002)*, Minneapolis, Minnesota, USA, April 20-25, **Anals...**, Minneapolis: SIGCHI, pp. 520-521, 2002.

SUI, D. Z.; MAGGIO, R. C., Integrating Gis With Hydrological Modeling Practices, Problems, And Prospects, **International Journal of Computers, Environment, and Urban Systems**, Elsevier Science Publishers, Texas, v. 23, n. 1, p. 35-51, 1999.

TOSCANO, G.L.G.; SANTOS, K.M.; ALMEIDA, C.N.; SILVA, T.C. 2008. Uma análise sintética sobre a legislação de proteção das águas subterrâneas no Brasil. In: *SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE*, 9, Salvador, Bahia, 2008.. **Anais...** Salvador: ABRH. 2008

TUCCI, C. E. M. **Regionalização de Vazões**. Porto Alegre: Ed. Universidade: UFRGS, 2002. 256 p.

TUCCI, C.E.M. (org.) **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Terceira Edição. ABRH. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: Editora da Universidade. 2009.

UNITED KINGDOM ENVIRONMENT AGENCY. **Groundwater Protection: Policy and practice**. Edition 1. Part 4 – Legislation and Policies. England. 2008. 96p. Disponível em <http://publications.environment-agency.gov.uk/PDF/GEHO0708BOGU-E-E.pdf>, acesso em dezembro de 2012.

USDA – UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **National Soil Survey Handbook**. Title 430-VI. Natural Resources Conservation Service, Washington, DC. 2001. Disponível <http://soils.usda.gov/technical/handbook/>, acesso em março de 2006.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Guidelines for Ground-Water Classification under de EPA Ground Water Protection Strategy**. EUA/EPA. Office of Ground Water Protection. 1986. 385p.

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Sole Source Aquifer Protection Program**. National Summary of Sole Source Aquifer Designations. 2005.

VASCONCELOS, V.V. MARTINS JUNIOR, P.P., NOVAES, L. A. d'A. 2005. Sistema Inteligente de Apoio à Decisão em Gestão de Recursos Hídricos e Projetos Agrícolas, In: *SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS*, 16, João Pessoa, Paraíba, 2005, **Anais...**, João Pessoa: ABRH, 2005. 20 p.

VASCONCELOS, V.V.; MARTINS JUNIOR, P.P.; JANO, D.R. Arquitetura de Conhecimentos sobre Sistemas Aquíferos. **Revista Digital de Biblioteconomia e**

**Ciência da Informação.** Campinas, v.9, n.1, p.184-208, jul./dez. 2011.

VASCONCELOS, V.V.; MARTINS JUNIOR, P.P. e HADAD, R. M. Metodologia Cartográfica para Favorabilidade de Recarga de Aquíferos. 12p. In: MARTINS JUNIOR, P.P. (coord.) **Projeto SACD** - Sistemas de Arquitetura de Conhecimentos e de Auxílio à Decisão na Gestão Geo-Ambiental e Econômica de Bacias Hidrográficas e Propriedades Rurais. Ouro Preto e Belo Horizonte: Univ.Fed.OP-EM-DEGEO / Fundação CETEC-MG. 266p. 2012a.

VASCONCELOS, V.V.; MARTINS JUNIOR, P.P. e HADAD, R. M. Metodologia para Diagnóstico Expedido de Áreas de Recarga de Aquíferos. 28p. In: MARTINS JUNIOR, P.P. (coord.) **Projeto SACD** - Sistemas de Arquitetura de Conhecimentos e de Auxílio à Decisão na Gestão Geo-Ambiental e Econômica de Bacias Hidrográficas e Propriedades Rurais. Ouro Preto e Belo Horizonte: Univ.Fed.OP-EM-DEGEO / Fundação CETEC-MG. 266p. 2012b.

VASCONCELOS, V.V.; MARTINS JUNIOR, P.P. e HADAD, R. M. Estimation of flow components by recursive filters: case study of Paracatu River Basin (SF-7), Brazil. **Geologia USP, Série Científica** [online]. v.13, n.1, p. 3-24, 2013. Disponível em: [http://ppegeo.igc.usp.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1519-874X2013000100001&lng=pt&nrm=iso&tlng=en](http://ppegeo.igc.usp.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1519-874X2013000100001&lng=pt&nrm=iso&tlng=en), acesso em 1/5/2013.

**Artigo:**

Recebido em Novembro de 2012  
Aceito em Setembro de 2013