



INCORPORAÇÃO DE INCERTEZAS ASSOCIADAS À PREDIÇÕES DE MODELOS HIDROLÓGICOS AOS INSTRUMENTOS DE GESTÃO EM RECURSOS HÍDRICOS

INCORPORATION OF THE UNCERTAINTY ASSOCIATED TO HYDROLOGICAL MODELLING PREDICTIONS INTO WATER MANAGEMENT TOOLS

INCORPORACIÓN DE INCERTIDUBRE ASOCIADA CON PREDICCIONES DE MODELOS HIDROLOGICOS A LAS HERRAMIENTAS DE GESTIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Rodrigo Lilla Manzione

Professor Assistente Doutor, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Campus de Ourinhos.

Avenida Vitalina Marcusso, 1500, CEP: 19910-206, Ourinhos, SP, Brasil.

E-mail: rlmanzione@gmail.com

Resumo: A gestão de recursos hídricos tem nos planos de bacia um instrumento fundamental para o planejamento do território e ajuste das atividades desenvolvidas à disponibilidade de recursos naturais. A incorporação de análises de incertezas associadas as previsões de modelos hidrológicos é uma forma de simular cenários e trabalhar com chances e possibilidades de que certos eventos aconteçam dentro desses planos. Utilizando métodos estocásticos é possível considerar essa incerteza nas estimativas e até mesmo modelá-la. Modelos estocásticos desenvolveram-se consideravelmente nos últimos 30 anos, entretanto suas aplicações em problemas reais tem sido limitadas e não tornaram-se ferramentas rotineiras em hidrologia. O presente artigo faz um resgate sobre a opinião de eminentes hidrólogos sobre a questão e discute a situação brasileira e paulista quanto ao monitoramento de águas subterrâneas. A comunicação de resultados de experimentos probabilísticos através de mapas é um caminho para se exercitar o entendimento das incertezas associadas aos modelos dentro do espaço geográfico.

Palavras chave: Modelagem Estocástica, Análise de Risco, Águas Subterrâneas.

Abstract: Water management has in the watershed plans an important tool to plan the territory and adjust the activities develop over it to the natural resources availability. The incorporation of uncertainty analysis associated with hydrological modelling predictions is a manner to simulate scenarios and work with chances and probabilities that certain events happens inside these plans. Using stochastic methods is possible to consider uncertainty from estimations and even model it. Stochastic methods developed considerably during the last 30 years, but its applications to real-world problems have been limited, and did not turn into routine in hydrology. This paper brings an overview from eminent hydrologists about this subject and discuss the Brazilian and Paulista situation in the scope of groundwater monitoring.

Communication of uncertainty using the results of probabilistic experiments in maps is a patch to exercise the understanding of uncertainty associated to model inside the geographical space.

Keywords: Stochastic Modelling, Risk Analysis, Groundwater.

Resumen: La gestión de los recursos hídricos tiene en los planes de cuencas una herramienta para la planificación del territorio y el ajuste de las actividades a la disponibilidad de recursos naturales. La incorporación del análisis de la incertidumbre asociada a las predicciones de los modelos hidrológicos es una forma de simular escenarios y trabajar con probabilidades y posibilidades de que ciertos eventos ocurren dentro de esos planes. Con el uso de métodos estocásticos es posible considerar esta incertidumbre en las estimaciones e incluso modelarlo. Modelos estocásticos tiene si desarrollado considerablemente en los últimos 30 años, sin embargo sus aplicaciones en problemas reales han sido limitadas y no se convierten en herramientas habituales en la hidrología. En este trabajo se hace una encuesta sobre la opinión de eminentes hidrólogos en el tema y discute la situación en Brasil y Sao Paulo, relativa a la vigilancia de las aguas subterráneas. La comunicación de resultados de experimentos probabilísticos utilizando mapas es una forma de llegar a un entendimiento de las incertidumbres asociadas a los modelos en el espacio geográfico.

Palabras-clave: Modelación Estocástica, Analice de Riesgo, Aguas Subterráneas.

Introdução

Vivemos em uma era de incertezas. Incertezas ambientais sobre o futuro do clima no planeta, incertezas políticas, econômicas e sociais sobre governos, regimes, sistemas monetários. Ao mesmo tempo vivemos um período sem precedentes, onde a informação disponível sobre os mais diversos assuntos permite com que se conheçam temas até outrora restritos apenas a academia e a um público erudito. A qualidade da informação disponível muitas vezes é duvidosa, incerta, o que torna seu uso uma tarefa criteriosa, que exige do analista não só experiência sobre o assunto abordado como também perspicácia para reconhecer falhas, erros e inconsistência nos dados.

Possuir ou obter informação sobre determinado assunto é fundamental para uma boa análise. No caso da gestão de recursos hídricos a informação disponível muitas vezes não se encontra organizada. Cabe ao analista visitar diferentes sites, contatar diferentes agência e realizar trabalhos de campo para que esteja suficientemente municiado para fazer seu trabalho. Não bastasse isso, ainda lhe cabe escolher um arcabouço metodológico que dê suporte a suas análises, ajustando-se aos seus dados e gerando novas informações. Essas novas informações contêm, em maior ou menor grau, certos níveis de incerteza, seja nos próprios dados, pelo modelo escolhido, pelas hipóteses levantadas ou mesmo por uma conjunção de tudo isso.

O caráter dinâmico do ciclo hidrológico, com mudanças instantâneas na qualidade e na quantidade disponível dos recursos hídricos faz com que incertezas sejam inerentes. Considerar as incertezas contidas em seus dados e em seus modelos é uma questão ética cujos cientistas tem que lidar. Modelar incertezas pode fazer com que elas sejam compreendidas e reduzidas. Negligenciar sua existência pode propagar erros e gerar predições irreais.

O presente artigo apresenta conceitos e opiniões sobre modelos hidrológicos, discutindo como uma abordagem estocástica pode colaborar na inclusão de incertezas nos diagnósticos sobre bacias hidrográficas e fomentar os planos de bacia com uma perspectiva estatística. A comunicação de incerteza é discutida utilizando mapas e cenários, com ênfase no monitoramento hidrogeológico. São apresentados elementos sobre a atual situação do monitoramento de águas subterrâneas no Brasil e no Estado de São Paulo e exemplos sobre como dados de monitoramento são utilizados por metodologias estocásticas para planejamento e desenvolvimento sustentável em bacias hidrográficas.

Modelagem hidrológica

Um modelo é uma abstração da realidade. Caso se conheça completamente o que acontece em determinado fenômeno, não se precisa de um modelo. O uso de um modelo é justificado quando se pretende representar um sistema e a forma com que ocorrem as modificações no mesmo (TUCCI, 2005).

A utilização de modelos é útil para realização de prognósticos e projeções futuras de determinadas situações, através do uso de simulações por exemplo. De maneira genérica, os modelos podem ser divididos em duas classes: modelos determinísticos e modelos estocásticos. Os modelos determinísticos seguem equações e leis da física que envolve o processo em estudo para assim descrevê-lo. Esses modelos são baseados no formalismo matemático e seus resultados são soluções exatas. Já os modelos estocásticos são aqueles regidos pelas leis da probabilidade, seguindo uma abordagem estatística. Seus resultados se baseiam na esperança de que certo valor seja alcançado, considerando a aleatoriedade do processo em análise e as chances de que certo evento aconteça. Os modelos determinísticos são mecanísticos, também chamados de caixa branca pois todos os parâmetros de entrada do modelo, estruturas e condições de contorno são conhecidos e controlados pelo modelador, que se baseia no conhecimento físico do processo para

assim determiná-los. Os modelos estocásticos são empíricos, baseados somente nos dados de entrada do modelo e cujas variáveis seguem as leis estatísticas ali descritas, sendo considerados caixas pretas pois os parâmetros não são determinados pelo modelador e sim pela sua formulação. Existem também abordagens que procuram integrar ambos os casos anteriormente descritos, buscando utilizar leis físicas dentro de uma ótica estatísticas, misturando os modelos caixa branca com os modelos caixa preta, os chamados modelos caixa cinza (Figura 1).

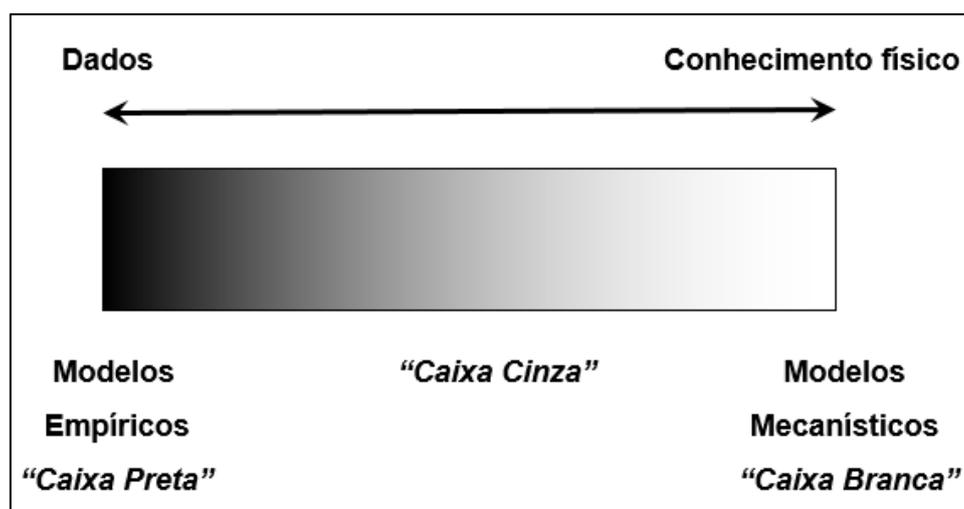


Figura 1- Representação esquemática das classes de modelos abordadas.

Os modelos podem ser uma ferramenta interessante na prática da gestão de recursos hídricos, gerando informações sobre a situação atual de uma bacia hidrográfica, projetando a condição que desejamos para a bacia, e também verificando a possibilidade de se chegar a essa condição. A Lei 9.433/97 (BRASIL, 1997) instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos. Em seu artigo 5º define o plano de bacias como um dos instrumentos de gestão. Esses planos podem ser mais ou menos elaborados, dependendo da região, das informações disponíveis, mas na própria lei constam no artigo 7º alguns itens considerados como conteúdo mínimo para elaboração de um plano de bacia. São eles:

- Diagnóstico da situação atual dos recursos hídricos;
- Análise de alternativas de crescimento demográfico, de evolução de atividades produtivas e de modificações dos padrões de ocupação do solo;
- Balanço entre disponibilidades e demandas futuras dos recursos hídricos, em quantidade e qualidade, com identificação de conflitos potenciais;

- Metas de racionalização de uso, aumento da quantidade e melhoria da qualidade dos recursos hídricos disponíveis;
- Medidas a serem tomadas, programas a serem desenvolvidos e projetos a serem implantados, para o atendimento das metas previstas;
- Prioridades para outorga de direitos de uso de recursos hídricos;
- Diretrizes e critérios para a cobrança pelo uso dos recursos hídricos; e
- Propostas para a criação de áreas sujeitas a restrição de uso, com vistas à proteção dos recursos hídricos.

Assim, para analisar alternativas, verificar e entender disponibilidades e demandas futuras, relações entre quantidade e qualidade, identificar conflitos potenciais e gerar metas exequíveis, o uso de modelos se faz uma ferramenta útil e interessante para auxiliar na elaboração desse instrumento complexo que é o plano de bacias.

Aplicação de modelos estocásticos em hidrologia

Teorias e abordagens hidrológicas estocásticas desenvolveram-se consideravelmente nos últimos 30 anos, entretanto suas aplicações em problemas reais tem sido limitadas e não tornaram-se ferramentas rotineiras em modelagem hidrológica (DAGAN 2002; ZHANG & ZHANG 2004; RUBIN 2004; RENARD 2007).

As razões pelas quais a modelagem estocástica não se tornou uma rotina nas análises do dia-dia foi centro de um fórum promovido pela revista *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* (ZHANG & ZHANG 2004) baseado no postulado de Dagan (2002) de que técnicas estocásticas não são utilizadas na prática. Métodos estocásticos não tem sido muito utilizados como rotina, apesar de outras técnicas terem obtido imenso sucesso em outras disciplinas como modelagem atmosférica, previsão meteorológica, monitoramento oceânico e avaliação ecossistêmica (CHRISTAKOS, 2004). Uma das razões seria que esses métodos falham ao tentar representar complexidades inerentes ao processo, que não podem ser modeladas sem regras rigorosas e alguma acurácia quantitativa em aplicações de engenharia envolvendo o meio subterrâneo (GINN, 2004). Neuman (2004) acredita que o nível de conhecimento matemático necessário para se entender teorias estocásticas está muito além daquele que maioria dos hidrólogos tem, tanto na academia como no mercado. Sudicky (2004) concorda, e completa que regulações feitas com simples números e a incerteza associada a eles (como probabilidades de

exceder certos limites) não é algo com o que os reguladores realmente podem lidar.

Renard (2007) questiona o que os profissionais da área de hidrologia realmente precisam ao analisar dados relativos a essa disciplina. O autor realizou uma revisão bibliográfica nos principais periódicos da área de hidrogeologia, modelagem hidrogeológica e técnicas estocásticas, e verificou que apesar do número de artigos sobre hidrogeologia e modelagem terem aumentado consideravelmente entre 1992 e 2004, os artigos sobre modelagem estocástica permaneceram estáveis, com 5% do total de artigos.

Nourani et al. (2011) comentam que problemas na interpretação de dados originados pela falta de ferramentas preditivas robustas, ou falta de experiência dos usuários com essas ferramentas, contribuem para o fracasso em se alcançar um consenso sobre a carência por ações estratégicas na gestão dos recursos hídricos.

Pappenberger e Beven (2006) fazem uma clara provocação para que profissionais deem atenção a métodos de incerteza em suas pesquisas, questionando se ignorância é felicidade ou sete razões para não utilizar análises de incertezas em pesquisas hidrológicas. Por análise de incertezas os autores entendem medidas de erro, probabilidades, intervalos de confiança, métodos estatísticos em geral. As sete razões que são apontadas perfazem os seguintes tópicos, comentados a seguir:

1) Análises de incertezas não são necessárias havendo modelos físicos realísticos: essa questão perpassa pelas diferentes filosofias encontradas entre os chamados modeladores. Existem modeladores que se baseiam em modelos físicos para descrever processos hidrológicos e creem que esses modelos estão corretos e podem ser aplicados sob uma visão determinística, implicando que nenhum parâmetro ou condição do modelo necessite de ajustes. Outros modeladores têm posições menos rígidas, acreditando que os parâmetros do modelo devam ser calibrados dentro de certos limites. Também existem modeladores que não crêem tão firmemente na aplicação de equações e leis físicas para descrever processos e adotam valores efetivos para os parâmetros do modelo mesmo fora dos limites normalmente aceitos. Por fim, há modeladores que acreditam somente nos dados observados, ajustando os modelos aos dados. Assim, havendo um modelo que descreve o processo, não há dúvida ou incerteza quanto aos seus resultados, e isso nem sempre é aceito por todos.

2) Análises de incertezas não são úteis para o entendimento de processos hidráulicos e hidrológicos: esses processos muitas vezes são complexos e de difícil entendimento, havendo quem considere que há uma necessidade latente em se

avançar no conhecimento de certos fenômenos, para que os mesmos sejam menos incertos, testando novas hipóteses por exemplo.

3) Distribuições de incertezas (probabilidades) não podem ser compreendidas pelos formuladores de políticas e pelo público em geral: transmitir conhecimento de uma maneira acessível e útil a tomadores de decisão e às partes interessadas é um desafio, uma vez que conceitos como “incertezas” e “riscos” são entendidos das mais diversas formas. Um exemplo claro é a previsão do tempo, tão criticada pelo público geral.

4) Análises de incertezas não podem ser incorporadas no processo de tomada de decisão: isso acontece muito porque as decisões são binárias, sim ou não, o talvez não é suficiente para os tomadores de decisão. Outro ponto a se considerar é que intervalos de incertezas são muito amplos para serem úteis no processo de tomada de decisão.

5) Análises de incerteza são muito subjetivas: essa visão vem da crença que modelos que não consideram incerteza são mais objetivos, mas não consideram que mesmo modelos determinísticos requerem premissas baseada na escolha do analista, de certa forma subjetivas.

6) Análises de incertezas são muito difíceis de se realizar: essa é uma atitude comum entre os praticantes, já que analisar incerteza envolve tempo, custo e conhecimento. A falta de uma orientação prática sobre qual métodos utilizar contribui para isso. Apesar de na prática esse tipo de análise não ser difícil de se realizar, a notação matemática que cerca certos métodos os tornam mais opacos.

7) Incerteza não importa realmente na formulação da decisão final: se considerarmos que a humanidade evoluiu simplesmente se adaptando, considerar incerteza seria somente um detalhe no processo.

Apesar de todas essas questões levantadas, Pappenberger e Beven (2006) sugerem a necessidade de um código de conduta para adoção de métodos que considerem incertezas às análises corriqueiras, buscando:

- Considerar o contexto do modelo;
- Considerar a incerteza na escolha do modelo;
- Considerar a incerteza nos parâmetros do modelo;
- Considerar escalas e resolução do modelo;
- Considerar a dependência nos fatores do modelo;
- Escolha por métodos de estimativa de incertezas;

- Considerar a incerteza nas observações usadas na calibração;
- Considerar a incerteza ao prever o futuro; e
- Comunicar os resultados aos usuários.

Pensar em boas práticas para melhora nas aplicações de modelos em hidrologia pode ser uma solução para que o não se faça um mau uso de técnicas estatísticas. Clarke (2010) discute quatro aspectos sobre métodos estatísticos sendo mal empregados. Na opinião do autor os principais erros são usar o mesmo conjunto de dados para propor uma hipótese e depois testá-la, não usar de um nível de significância apropriado em testes onde várias hipóteses são testadas, não considerar a correlação entre variáveis sejam elas variáveis explicativas ou resposta, e dar uma importância exagerada a testes estatísticos, particularmente no uso de níveis de significância de 5% e 1%. Não se trata de aplicar métodos estatísticos sem o rigor necessário, mas sim de se compreender as limitações dos métodos, dos dados e aí adaptá-los a modelos capazes de prover resultados aplicáveis.

Comunicando incertezas em águas subterrâneas

O monitoramento hidrológico é fundamental para que se compreendam as relações quantidade/qualidade intrínsecas a disponibilidade hídrica, aspectos sazonais e impactos antrópicos. Os dados de monitoramento em águas subterrâneas são a principal fonte de dados para os modelos, seja o monitoramento quantitativo, que compreende o nível do aquífero, seja ele estático, dinâmico, livre ou confinado, ou o monitoramento qualitativo realizado através da amostragem da água subterrânea em poços e análises físico-químicas subsequentes.

A modelagem de dados relativos a águas subterrâneas possui diversas fontes de incerteza. Primeiramente, existem diferentes interações entre águas superficiais e águas subterrâneas, envolvendo processos de física complexa e de múltiplas interferências, como uso da terra, vegetação, variabilidade espacial dos solos e dos domínios geológicos, abstrações de água. Outro ponto a se considerar é o fato dos aquíferos não respeitarem os limites da bacia hidrográfica, e sim das bacias sedimentares ou domínios cristalinos. A Lei 9.433/97 instituiu a bacia hidrográfica como unidade de gestão em seu artigo 1º como uma dos seis fundamentos da política de recursos hídricos brasileira, tornando a gestão de águas subterrâneas mais complexa pois pode envolver diversas bacias, em diferentes escalas. Os próprios

dados possuem incertezas, sejam nas suas medições, na acurácia de sensores, nas bases climáticas, aproximações e estimativas em geral. Por fim, existem as incertezas associadas a calibração dos modelos e pela descrição do fenômeno em questão pelo modelo proposto.

No caso do monitoramento das águas subterrâneas os dados são escassos, com uma distribuição espacial pobre e muitas vezes com falhas nas séries de dados, sejam por parte dos sensores ou mesmo por falta de pessoal de campo, recursos para manutenção da rede. Diversos esforços tem sido feitos a nível federal por parte do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) ou mesmo a nível estadual no caso de São Paulo pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) e pela Agencia Ambiental Paulista (CETESB).

A RIMAS (Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas) realiza o monitoramento em 26 aquíferos em 18 estados do Brasil, sendo 275 postos de medição em 2013. A RIMAS foi constituída em 2008 continua em expansão com recursos do PAC (Plano de Aceleração do Crescimento) do Governo Federal. O monitoramento do nível d'água é feito através de medições horárias. No caso do monitoramento da qualidade, os parâmetros analisados não são sempre os mesmos. Parâmetros físico-químicos como Sólidos Dissolvidos, nitrato, pH, turbidez e condutividade elétrica são medidos com uma frequência semestral ou anual, seguindo o mínimo estabelecido pela Resolução CONAMA 396 (BRASIL, 2008). Análises físico-químicas completas são realizadas com uma frequência quinquenal ou em caso de variações significativas nos parâmetros semestrais. Seu principal desafio é aumentar a cobertura, em mais estados e aquíferos e manter e aumentar as equipes de campo que realizam as medições e a manutenção da rede em um país de dimensões continentais.

A Rede Hidrológica Básica do Estado de São Paulo foi iniciada por volta de 1880 e é operada pelo DAEE desde 1951. É a maior fonte de dados hidrológicos básicos quantitativos de São Paulo, contando com dados de chuvas, vazões de rios, níveis de água subterrâneas e sedimentos. Já a Rede Piezométrica Básica criada em 2007 conta com apoio do DAEE, CETESB, ANA (Agencia Nacional de águas) e CPRM, operando com 42 poços em 2013, principalmente nos aquíferos Bauru e Guarani. Os desafio para essa rede são definir objetivos da Rede Integrada Básica de monitoramento, definir as características desejadas e definir os objetivos e as metodologia sobre interação entre águas superficiais e águas subterrâneas.

Apesar das iniciativas louváveis de se melhorar a distribuição espacial dos

pontos de monitoramento e aumenta-los gradativamente, as bases de dados ainda possuem elevado grau de incerteza. Além disso, quando se tem dados disponíveis, a modelagem encontra limitações quanto a escala dos levantamentos geológicos e pedológicos disponíveis, e em outras situações pela própria seleção de modelos inapropriados para determinado conjunto de dados. Uma solução para essa questão seria a realização de levantamentos na escala de detalhes, que envolveria além de custos elevados custos, tempo e equipe treinada para sua realização. Outra possibilidade é a utilização de informações auxiliares, disponíveis em produtos de sensoriamento remoto orbital por exemplo, que fornecem dados sobre extensas porções do território que, quando analisadas com técnicas de análise espacial de dados geográficos podem revelar padrões correlacionados ao uso e ocupação da terra, vulnerabilidade de aquíferos ou mesmo questões de dinâmica de níveis freáticos (BOMFIM e MOLINA, 2009; MANZIONE et al., 2014).

O uso de métodos estocásticos permite a simulação de cenários e a análises de incertezas. A comunicação da incerteza associada à predição trata-se de uma quebra de paradigma, onde as técnicas de mapeamento e visualização podem auxiliar no processo. A visualização dos resultados de experimentos probabilísticos na forma de mapas possibilita ao usuário final ou ao tomador de decisões verificar diferentes possibilidades no domínio da bacia hidrográfica, por exemplo, facilitando o entendimento já que tabelas com números e intervalos de confiança ou mesmo gráficos estatísticos não são familiares ao público em geral. Já um mapa permite ao usuário ter a percepção do espaço e pela sua familiaridade com o local capturar as variações indicadas na pesquisa.

Um exemplo aplicado a gestão sustentável de recursos hídricos subterrâneos em bacias hidrográficas pode ser encontrado em Manzione et al. (2010). Utilizando técnicas estocásticas como a análise de séries temporais e geoestatística, os autores analisam séries de monitoramento de nível freático em uma bacia hidrográfica em área de Cerrado na região de Planaltina-DF. A bacia do Rio Jardim é uma bacia exclusivamente rural, com presença de agricultura intensiva e afetada por um regime sazonal de chuvas com cerca de 5 meses de seca durante o ano. Nesse período a água subterrânea se torna a única alternativa para suprimento das atividades agrícolas (incluindo irrigação), ecossistemas e da população da bacia. Como resultado da integração desses métodos, foram simuladas alturas de lençol freático críticas para datas específicas selecionadas no calendário agrícola da região, como início da estação das chuvas (que caracteriza os primeiros plantios da safra) e início

da estação seca (onde são realizadas as colheitas). Essas alturas exibidas através de mapas de risco revelam aos produtores e técnicos que atuam na bacia onde é possível que os níveis estejam muito profundos, podendo interferir na oferta de água, ou muito superficiais, podendo interferir em operações de mecanização. Conhecendo essas áreas e a probabilidade de que esses eventos aconteçam, é possível ajustar as atividades agrícolas à disponibilidade de recursos hídricos, aumentando a resiliência dos sistemas produtivos e diminuindo o risco de insucesso em uma atividade onde a margem de lucro não é elevada como a agricultura. A mesma metodologia foi aplicada por Manzione et al. (2012) na Bacia do Ribeirão da Onça, em Brotas-SP. Essa bacia apresenta uma vulnerabilidade natural por estar localizada em área de afloramento do Sistema Aquífero Guarani (SAG), sendo considerada uma área representativa de recarga do aquífero (WENDLAND et al., 2004). Em regiões onde a disponibilidade hídrica é afetada por variações sazonais, o estudo das relações entre a oferta e a demanda por recursos hídricos é fundamental para promover uma gestão sustentável das águas subterrâneas e o monitoramento das reservas sua ferramenta básica.

Considerações finais

A modelagem de incertezas muitas vezes é considerada como falta de acurácia nas análises. Como procurou-se expor nesse artigo, considerar a incerteza nas predições de modelos hidrológicos pode ser muito útil como ferramenta de suporte ao gerenciamento de recursos hídricos. As aplicações de metodologias que envolvam métodos estocásticos podem gerar informações úteis para aplicações no mundo real, do dia-dia, e auxiliar o processo de tomada de decisão na gestão de recursos hídricos superficiais e subterrâneos, e na formulação de políticas hídricas de longo prazo. Para isso é necessário estimular o uso dessas técnicas, fortalecer o ensino de estatística tanto em nível de graduação como de pós-graduação e tornar público os resultados das pesquisas para que uma cultura sobre o tema seja criada. Não basta que diferentes cenários sejam incluídos nos planos de bacia e nos relatórios correlatos para projetarmos como queremos nossa bacia no futuro. É preciso que o público geral compreenda os conceitos que sustentam essas análises e interpretem os resultados como possíveis realizações de um evento, que pode ocorrer ou não, com maior ou menor chance de ocorrência.

Também foi mostrado nesse artigo o quanto os dados de monitoramento podem ser incertos, uma vez que possuem uma baixa distribuição no território

brasileiro. Para análise em áreas onde a disponibilidade de dados é escassa é possível explorar e agregar diferentes fontes de informação na modelagem de dados de monitoramento, além de considerar a incerteza no processo de tomada de decisão e gestão das águas subterrâneas e estimativas quantitativas.

A visualização dos resultados finais de experimentos probabilísticos na forma de mapas pode aumentar e melhorar a compreensão de métodos estocásticos, assim como sua inserção como rotina no planejamento territorial e avaliação de bacias hidrográficas. Com o poder de análise que os estudos geográficos possuem graças ao desenvolvimento e popularização dos sensoriamento remoto e dos sistemas de informação geográficas é possível avançar e contribuir mais efetivamente nos planos de recursos hídricos em diversas escalas.

Referências Bibliográficas

BRASIL. Lei Federal nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. **Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos**, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Diário Oficial da União, Poder Executivo, Brasília, 9 jan. 1997. Seção 1, p. 470-474. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.HTM>. Acesso em: 12 dez. 2013.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 396 de 3 de Abril 2008. **Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas** e dá outras providências. Diário Oficial da União, Poder Executivo, Brasília, 7 abr. 2008. Seção 1, p. 64-68. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=562>>. Acesso em: 12 dez. 2013.

BOMFIM, E. P.; MOLINA, E. C. Análise da variação dos elementos do campo de gravidade na região do Aquífero Guarani a partir dos dados GRACE. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 27, n. 1, p. 17-34, 2009.

CHRISTAKOS, G. A sociological approach to the state of stochastic hydrogeology. **Stochastic Environment Research and Risk Assessment**, v. 18, n. 4, p. 274-277, 2004.

CLARKE, R. T. On the (mis)use of statistical methods in hydro-climatological research. **Hydrological Science Journal**, v. 55, n. 2, p. 139-144, 2010.

DAGAN, G. An overview of stochastic modeling of groundwater flow and transport: from theory to application. **EOS (Transactions American Geophysical Union)**, v. 83, n. 53, p. 621-625, 2002.

GINN, T. R. On the application of stochastic approaches in hydrogeology. **Stochastic Environment Research and Risk Assessment**, v. 18, n. 4, p. 282-284, 2004.

MANZIONE, R. L.; KNOTTERS, M.; HEUVELINK, G. B. M.; VON ASMUTH, J. R.; CÂMARA, G. Transfer function-noise modeling and spatial interpolation to evaluate the risk of extreme (shallow) water-table levels in the Brazilian Cerrados. **Hydrogeology Journal**, v. 18, n. 8, p. 1927-1937, 2010.

MANZIONE, R. L., WENDLAND, E.; TANIKAWA, D. H. Stochastic simulation of time-series models combined with geostatistics to predict water-table scenarios in a Guarani Aquifer System outcrop area, Brazil. **Hydrogeology Journal**, v. 20, n. 7, p. 1927-1937, 2012.

MANZIONE, R. L.; TANIKAWA, D. H.; SOLDERA, B. C. Relação entre a resposta espectral da vegetação em diferentes cultivos agrícolas e níveis freáticos em área de recarga do Sistema Aquífero Guarani. **Águas Subterrâneas**, v. 28, n. 1, p. 1-13, 2014.

NEUMAN, S. P. Stochastic groundwater models in practice. **Stochastic Environment Research and Risk Assessment**, v. 18, n. 4, p. 268-270, 2004.

NOURANI, V.; EJLALI, R. G.; ALAMI, M. T. Spatiotemporal groundwater level forecasting in coastal aquifers by hybrid neural network geostatistics model: a case study. **Environmental Engineering Science**, v.28, n. 3, p.217-228, 2011.

PAPPENBERGER, F.; BEVEN, K. J. Ignorance is bliss: or seven reasons not to use uncertainty analysis. **Water Resources Research**, v. 42, W05302, 2006.

RENARD, P. Stochastic Hydrogeology: What Professionals Really Need? **Ground water**, v. 45, n. 5, p. 531-541, 2007.

RUBIN, Y. Stochastic hydrogeology: challenges and misconceptions. **Stochastic Environment Research and Risk Assessment**, v. 18, n. 4, p. 280-281, 2004.

SUDICKI, E. On certain stochastic hydrology issues. **Stochastic Environment Research and Risk Assessment**, v. 18, n. 4, p. 285, 2004.

TUCCI, C.E.M. Modelos hidrológicos. Porto Alegre, Ed. Universidade UFRGS, 2005. 678p.

WENDLAND, E., BARRETO, C. E. A. G., GOMES, L. H. Water balance in the Guarani Aquifer outcrop zone based on hydrogeologic monitoring. **Journal of Hydrology**, v. 342, n. 3-4, p. 261-269, 2007.

WINTER, C. L. Stochastic hydrogeology: practical alternatives exist. **Stochastic Environment Research and Risk Assessment**, v. 18, p. 271-273, 2004.

ZHANG, Y. K.; ZHANG, D. Forum: The state of stochastic hydrology. **Stochastic Environment Research and Risk Assessment**, v. 18, n. 4, p. 265, 2004.

Recebido em: 11/12/2013

Aceito para publicação em: 05/02/2014