
DINÂMICA DE SISTEMAS E MODELAGEM DOS RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA DO RIO PRETO COM O USO DO PROGRAMA STELLA

Maurício Novaes Souza¹, Everardo Chartuni Mantovani², Aziz Galvão da Silva Júnior³, James Jackson Griffith⁴,
Rafael Coll Delgado⁵

RESUMO

A ausência de avaliação das questões relativas à predição ambiental na implantação de projetos tem sido uma regra. Neste estudo se buscou representar as inter-relações existentes das mudanças das classes de uso do solo e suas influências sobre os fatores climáticos e os ecossistemas aquáticos, na bacia hidrográfica do rio Preto, afluente do rio Paracatu. Neste local, onde a vazão média anual retirada pela “irrigação” na bacia teve crescimento de 62 vezes no período 1970-1996, gerando uma série de conflitos regionais, tem ocorrido a substituição da vegetação nativa “Cerrado” por “Cultivo”. A situação é preocupante quando se verifica, pela análise da oferta de água no período 1985-2000, que a “Precipitação” na bacia e as vazões médias e mínimas sofreram significativas reduções. A proposta deste trabalho foi desenvolver um modelo de oferta e demanda do uso da água, baseado em princípios de “Dinâmica de Sistemas” com o auxílio do *software* STELLA. Por intermédio da modelagem foi possível expressar graficamente a complexidade dinâmica das relações deste sistema. A calibração do modelo foi realizada por meio de dados da estação fluviométrica Porto dos Poções, coletados no período 1985-2000. Com a simulação do modelo, para o período 1995-2060, verificou-se a tendência de redução de 23,08% na “Precipitação” no Cenário “Agronegócio Atual”.

Palavras-chave: Dinâmica de Sistemas, modelagem, programa STELLA, planejamento ambiental.

ABSTRACT

THE DYNAMIC OF SYSTEMS AND THE MODELLING OF THE HYDROLOGIC RESOURCES OF THE RIO PRETO BASIN WITH THE USE OF THE STELLA PROGRAM

The absence of evaluation of the questions about prediction in the implantation of projects has been a rule. In this study searches the existent interrelations of the changes of the kinds of use of the soil and his influences over climatic factors and the aquatic ecosystems, in the hydrographic basin of the Preto river, affluent of Paracatu river. In this place, where the medium annual retired emptying by “Irrigation” in the basin have had an increase of 62 times in the period 1970-1996, producing a regional series of conflicts, it has happened the replacement of the native vegetation “Cerrado” for “Cultivation”. The situation is worry when it is verified by analysis of the water offering in the period of 1985-2000, that the “Precipitation”, in the basin and the medium and minimum emptyings have had significant reductions. The proposal of this search was develop a model of offering and request use of water, based in the origins of “Dynamic of the Systems” with the aid of the SOFTWARE STELLA. By intermediate of the modeling was possible express by graphic the dynamic complexity of the relations of this system. The calibration of the model was realized by the facts of the river station, “Porto dos Poções”, they were collected in the period 1985-2000. With the model simulation for the period 1995-2060, it was verified the tendency of decrease of -23,08% in the “Precipitation” in the agronomic trade scenery at the moment.

Keywords: Dynamic of Systems, modeling, STELLA PROGRAM, environment planning.

Recebido para publicação em 16/11/2008. Aprovado em 30/06/2009

¹ Eng. Agrônomo, DSc., Prof. Titular IFET SE campus Rio Pomba. E-mail: mauriciosnovaes@yahoo.com.br.

² Eng. Agrícola, Ph. D., Prof. Titular, DEA-UFV, Viçosa/MG. E-mail: everardo@ufv.br

³ Eng. Agrônomo, Ph. D., Prof. Adjunto, DER-UFV, Viçosa/MG. E-mail: aziz@ufv.br

⁴ Filósofo, Ph. D., Prof. Titular, DEF-UFV, Viçosa/MG. E-mail: griffith@ufv.br

⁵ Meteorologista, Doutorando DEA-UFV, Viçosa/MG. E-mail: rcdelgado@hotmail.com

1. INTRODUÇÃO

A implementação de um projeto ou programa implica em uma cadeia de eventos que modificam o meio ambiente e a sua qualidade. Isto porque todos os fatores existentes em um ecossistema estão interligados, sendo difícil prever seus resultados e externalidades com exatidão. A substituição da cobertura vegetal decorrente da mudança de uso do solo, por exemplo, pode alterar o balanço hídrico e, conseqüentemente, o regime hidrológico de uma determinada bacia (TUCCI *et al.*, 2001; SOUZA, 2004).

Dessa forma, dentre as ações humanas que podem comprometer o balanço hídrico, destacam-se, em escala local e regional, o desmatamento, a mudança do uso do solo, os projetos de irrigação e a construção de barragens. Vale

ressaltar que formas desordenadas de uso do solo acabam por agravar os efeitos das secas ou enchentes que atingem a sociedade e suas atividades econômicas (REBOUÇAS *et al.*, 1999).

Nas últimas décadas, na bacia do rio Paracatu, o principal agente consumidor de água foi a irrigação. Teve sua participação elevada de 78% para 93% do total da vazão consumida no período 1970-2000, gerando um complexo quadro de conflitos pelo uso da água nessa região (Figura 1). Ao mesmo tempo, o crescimento na demanda desse recurso, resultado do crescimento das atividades econômicas, vem acelerando o crescimento populacional, que estimula a implantação de outras atividades, como o reflorestamento utilizando espécies exóticas (LATUF, 2007).

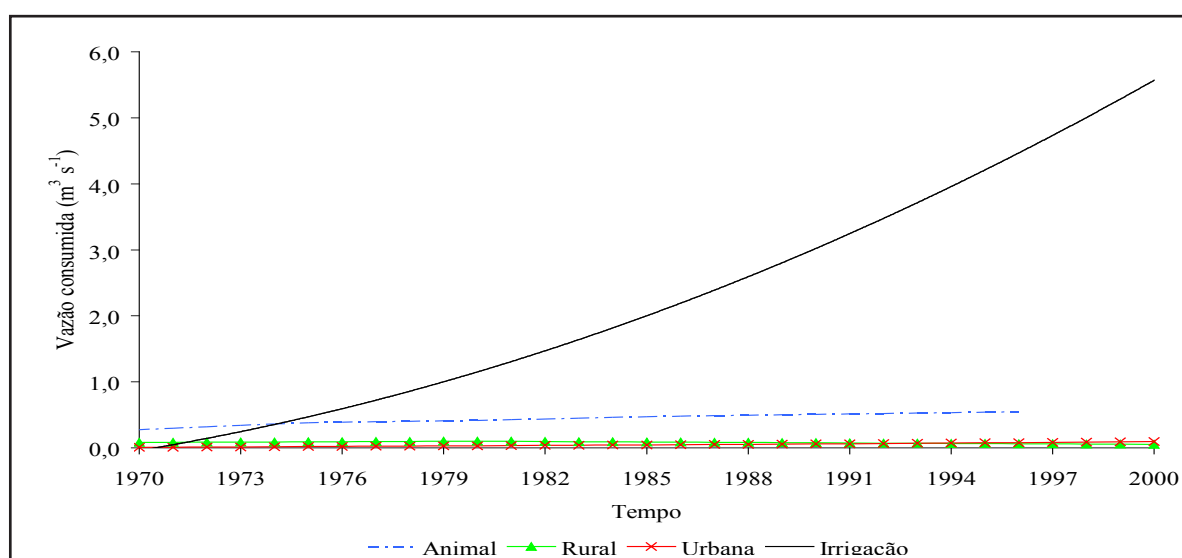


Figura 1. Usos da água na bacia do Paracatu (RODRIGUEZ, 2004).

Quadro 1. Variação das precipitações na bacia do rio Preto no período 1985-2000 (LATUF, 2007)

Bacia Monitorada Rio Preto	Média de redução e aumento* (mm ano ⁻¹)		
	Pa	Pmc	Pms*
	3.84	5.75	0.83*

No Quadro 1 apresentam-se os resultados referentes às médias de reduções para as precipitações média diária anual (Pa) e as do mês mais chuvoso (Pmc), bem como as médias de crescimento da precipitação do mês mais seco (Pms), na área de drenagem da seção fluviométrica monitorada localizada na bacia do rio Preto, afluente do rio Paracatu, no período de 1985 a 2000.

Na análise do Quadro 1, mesmo a precipitação do mês mais seco (Pms) apresentando uma tendência de

comportamento de elevação, esta não foi suficiente para que houvesse alterações para aumento das vazões mínimas Q_7 , Q_{90} e Q_{95} . Esse fato comprova que o uso consuntivo de água pelo aumento da agricultura e o consumo para abastecimento humano na área de estudo, associados às mudanças de uso do solo na bacia, têm influenciado nas reduções destas vazões.

De acordo com LATUF (2007), para o gerenciamento adequado dos recursos hídricos, é fundamental conhecer

o comportamento hidrológico de bacias hidrográficas bem como seus regimes de variação de vazões e, principalmente, suas relações com os agentes econômicos e sócio-ambientais presentes ao longo de toda a área de contribuição da bacia. Por essas questões, dentro de um contexto geral de planejamento e gestão de recursos hídricos, apresentam-se situações em que se torna necessário compatibilizarem os volumes de águas disponíveis com as necessidades específicas em um determinado momento.

Assim, o padrão quantitativo dos recursos hídricos deve ser objeto de consideração e de adequação das disponibilidades com as necessidades. No entanto, uma das grandes dificuldades existentes é identificar os vários componentes das mudanças ambientais, provenientes da interação homem-natureza. Atualmente, surgem ferramentas baseadas no “Pensamento Sistêmico” que facilitam o entendimento dessas inter-relações. Nesse estudo, será utilizado um modelo baseado em “Dinâmica de Sistemas” para analisar a sustentabilidade dos recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Preto.

No caso da agricultura irrigada, o modelo de estoque e fluxo da água proposto nesse estudo para a bacia do rio Preto, será uma ferramenta para prevenir os destinos dos eventuais setores irrigáveis que possam ser implantados nessa e em outras bacias hidrográficas. Para Capra (1996), quanto mais são pesquisadas as questões ambientais, maior a consciência que se passa a ter de que elas não podem ser compreendidas isoladamente, posto serem sistêmicas, interconectadas e interdependentes.

Assim, a “ciência” Dinâmica de Sistemas é antes de tudo uma nova linguagem que permite expressar mais adequadamente as cadeias de eventos circulares existentes na natureza. Por intermédio da modelagem, utilizando-se de diversos tipos de diagramas (causais, estoque e fluxo), é possível expressar graficamente um sistema, possibilitando perceber mais claramente a complexidade dinâmica das suas relações (VILLELA, 2007).

A base dessa nova ciência se assenta nos conceitos do pensamento sistêmico, onde o princípio da interdependência demanda que mudanças em qualquer um dos componentes de um determinado sistema, direta ou indiretamente, estão associadas ou afetarão os demais componentes. Dessa forma, o modelo se converterá em um valioso instrumento computacional de auxílio aos formuladores de políticas públicas para o planejamento, gestão e monitoramento dos recursos hídricos do local

de estudo.

Entre os diversos “softwares” existentes no mercado para transformar diagramas causais em modelos computacionais, tem-se o STELLA, acrônimo de “Structural Thinking Experimental Learning Laboratory with Animation” (“Laboratório de Aprendizagem Experimental com Animação Baseado no Pensamento Sistêmico”). Esse software constitui uma ferramenta computacional que possibilita a construção e a transformação de modelos mentais em diagramas computadorizados, simulando situações reais de sistemas ecológicos dinâmicos, ao mesmo tempo em que possibilita a compreensão de diversas funções matemáticas e a leitura das saídas gráficas correspondentes (RICHMOND, 1987; FERRACIOLI e CAMILETTI, 1998; DUVOISIN, 2000).

Por essas questões, a proposta desse trabalho foi desenvolver um modelo de oferta e demanda hídrica, baseado na Dinâmica de Sistemas, com o auxílio do *software* STELLA. Seu objetivo foi analisar o cenário “Agronegócio”, identificando as mudanças das classes de uso do solo para se verificar sua influência sobre o comportamento da evapotranspiração e da precipitação, e suas influências sobre a redução/aumento na oferta do recurso “Água”. Busca visualizar políticas públicas e a adoção de medidas de manejo que garantam a sustentabilidade dos recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Preto.

2. MATERIAL E MÉTODO

O estudo foi realizado na bacia do rio Paracatu, que nasce no município de Lagamar, próximo ao povoado de Almas e tem uma extensão total de 485 km. Deságua no rio São Francisco, na localidade de Cachoeira da Manteiga, município de São Romão, MG. É dividido em Alto, Médio e Baixo Paracatu. A sua bacia hidrográfica está situada no Médio São Francisco, inserida na mesorregião Noroeste de Minas, onde se encontram municípios como Paracatu e Unai (IGAM, 2007).

Abrangendo 13 sedes municipais e apresentando uma área de drenagem de 41.512 km² no estado de Minas Gerais (45.600 km², de área total, segundo BRASIL, 1996; DINO, 2002), a bacia possui uma população estimada de 259.717 habitantes, sendo a segunda maior sub-bacia do São Francisco. O clima é considerado semi-úmido, com período seco que varia entre quatro a cinco

meses por ano. A disponibilidade hídrica se situa entre 2 e 10 L s⁻¹ km², com exceção das nascentes dos rios Preto, Prata e Sono, onde a disponibilidade hídrica se situa entre 10 e 20 L s⁻¹ km² (*ibidem*).

A bacia do rio Preto (400 km de extensão) está localizada a noroeste da bacia do rio Paracatu e engloba nove (9) municípios: Formosa/GO, Cabeceiras/GO, Cabeceira Grande/MG, Distrito Federal/DF, Unaí/MG, Natalândia/MG, Dom Bosco/MG, Bonfinópolis de Minas/MG e Paracatu/MG (IGAM, 2005). A vazão média observada no rio Preto que aflui ao rio Paracatu é da ordem de 114,26 m³ s⁻¹ e a vazão específica de 12,08 L s⁻¹ km², no posto fluviométrico de Porto dos Poções (42600000), situado a montante da seção de deságüe do rio Preto no rio Paracatu (LATUF, 2007).

O “software” STELLA utilizado nesse estudo foi a versão 9.0, para “Windows”. A sua escolha se deu pelo fato deste ser frequentemente usado por pesquisadores que trabalham com o enfoque de Dinâmica de Sistemas na modelagem de problemas complexos que integram variáveis diversas. Também, foi o primeiro *software* desenhado para trabalhar com variáveis físicas, bem como econômicas e sociais. Sabe-se que um modelo de recursos hídricos deve considerar todos estes tipos de variáveis. O programa STELLA, constitui-se em uma ferramenta computacional que possibilita a construção dos modelos mais variados; ou seja, é um laboratório, sobre processos reais, a fim de apoiar a tomada de decisões (STELLA, 2001).

Ao executar-se o Ambiente STELLA é apresentada ao usuário a tela ao Nível Construção de Modelos, que permite a construção e simulação de modelos dinâmicos em nível quantitativo com uma representação gráfica baseada em ícones. Fundamentado na metáfora do tanque e da torneira, o ambiente STELLA possibilita a construção de modelos por meio da conexão dos elementos básicos no formato de ícones: nível, fluxo (taxa), conversor e conectores (*ibidem*).

No entanto, a construção de um modelo implica em uma ampla investigação, além de um trabalho eminentemente criativo, que neste estudo foi estruturado por meio das seguintes etapas (ORELLANA GONZÁLEZ, 2006): a) conceitualização; b) formalização; e c) simulação - esta etapa inclui a avaliação e exploração. As etapas de conceitualização e de formalização serão agora

apresentadas; e a etapa de simulação, apesar de ser uma metodologia, será apresentada nos resultados e discussão.

Na etapa de conceitualização, a estrutura foi representada no diagrama causal, que servirá como base para a elaboração do diagrama de estoques e fluxos, por meio do qual se estabelecerá o modelo matemático que permitirá efetivar a simulação numérica. Foram aplicados testes de validação do modelo e, com os resultados obtidos, permitiu-se constatar que o modelo está estruturado e se comporta de forma coerente aos dados existentes na realidade.

O sistema hídrico que compõe a bacia hidrográfica do rio Preto está conformado por um conjunto de elementos e componentes que cumprem diferentes funções. O resultado final, quando se deseja uma condição de homeostasia, é a obtenção de que se atinjam as adequações e distribuições da água para possibilitar a vida e a produção da vegetação nativa e das culturas, dos animais e da população.

Foi escolhido como horizonte de planejamento um período de sessenta e cinco (65) anos, que se enquadra acima do tempo mínimo de 25-30 anos, que é normalmente empregado para a implantação da maioria dos planos de desenvolvimento sócio-econômico (ORELLANA GONZÁLEZ, 2006). Foram examinados oito (8) cenários que compreenderão futuros aumentos de demanda de água, e restrições da oferta deste recurso, a fim de avaliar a sua sustentabilidade. As tendências atuais do sistema de recursos hídricos dessa região consideram no seu primeiro cenário o “Agronegócio Atual”, tendo sido criado um índice para determinar a sua sustentabilidade.

Para o desenho do diagrama causal, que representa as relações principais e relevantes para o estudo da estrutura de oferta e demanda hídrica da bacia do presente estudo, se tomou como base o fluxograma (Figura 2) que contém os componentes principais da estrutura do modelo de recursos hídricos que analisa o balanço entre oferta e demanda de água (XU *et al.*, 2002; ORELLANA GONZÁLEZ, 2006). Conforma-se pelos agregados principais: o primeiro representa a oferta de água disponível; e o segundo que engloba a demanda do referido recurso. Destes grandes agregados se derivam o balanço hídrico do modelo.

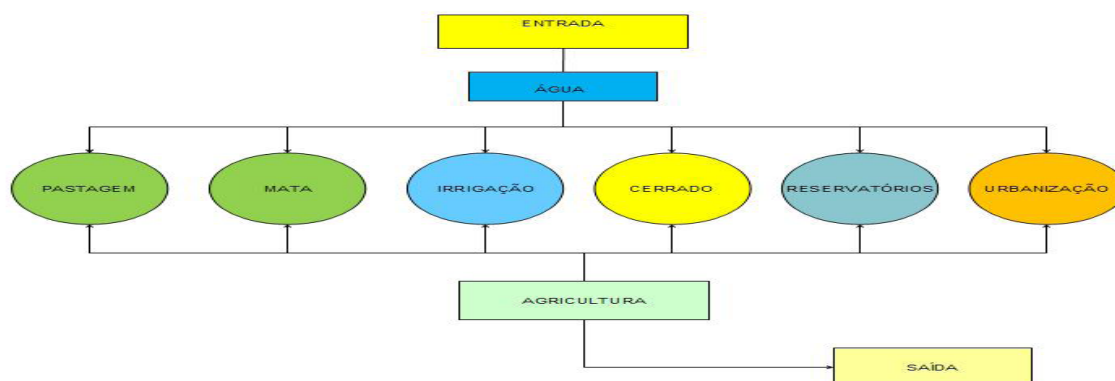


Figura 2. Fluxograma representativo da estrutura do modelo da bacia do rio Preto.

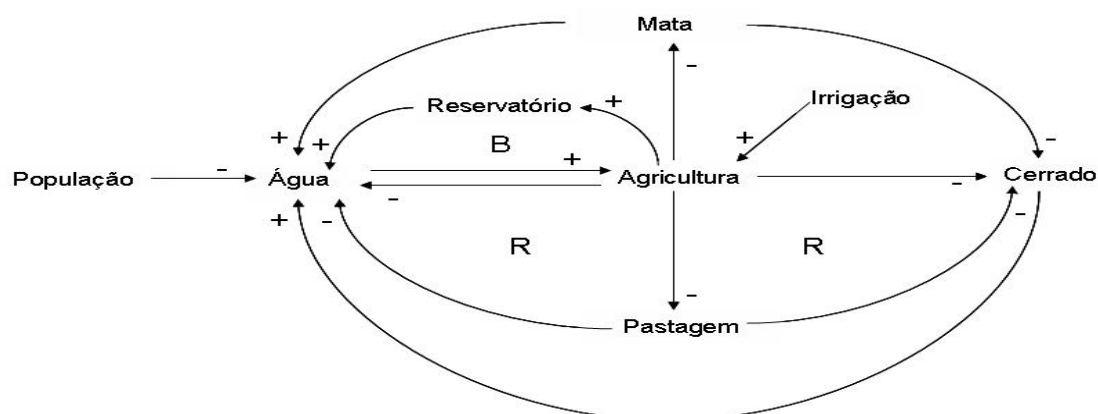


Figura 3. Diagrama causal do modelo da bacia hidrográfica do rio Preto.

O modelo foi desenhado para representar a estrutura da demanda de água da produção agrícola e da demanda ambiental requerida para manter a vida dos ecossistemas da região. Compreende também a oferta de recursos hídricos disponíveis regionalmente, a qual foi estimada com base na vazão média (Q_{med}) do rio Preto. A elaboração e o entendimento desse fluxograma (Figura 2) permitiram estabelecer os principais componentes do modelo da bacia hidrográfica do rio Preto, e identificar as relações de causalidade mais importantes que existem entre eles. Como resultado destas análises, se elaborou o diagrama causal específico (Figura 3).

Na Figura 3 estão identificados os componentes básicos do sistema, bem como a interação que se dá entre eles, sendo esta última a que proporciona as características estruturais do sistema que nos ocupa. Apresenta-se “Água”, como a oferta de água disponível; “População”, que indica a demanda de água para consumo doméstico; “Cerrado”, que é o Bioma regional, representa produção e estoque de água; “Mata”, incluem-se as florestas de galerias ou as ripárias, representam produção e estoque de água; “Agricultura”

ou “Cultivo”, engloba seus requerimentos hídricos e dos plantios florestais; e “Pastagem”, evidenciando a demanda de água requerida por este setor.

A variável “Reservatórios” significa estoque de água (Balanceamento), em face da retenção do excesso de água que se perderia por escoamento superficial; e “Irrigação” - considerada a variável que está dinamizando e incrementando as atividades do setor produtivo e de serviços, o fator de injeção de recursos financeiros nas atividades agrícolas, além de ser a maior responsável pela demanda de água da bacia.

Com respeito aos laços de realimentação existentes entre os componentes do sistema, destacam-se os seguintes pontos: a injeção de recursos financeiros provenientes da irrigação gera um impacto positivo sobre as atividades do setor agrícola, e se manifesta os efeitos de uma variável sobre outra que caminham na mesma direção, sendo representadas com um sinal (+) ao final da seta (Figura 3). Por exemplo, se a atividade de irrigação aumenta, ela repercute em um aumento das atividades agrícolas, e vice-versa.

Ao contrário, um aumento do consumo de água do setor agrícola, pecuário e da população, gera um impacto negativo sobre a oferta de água disponível; assegura que o crescimento destas variáveis ocasiona diminuição da oferta de água limpa, aumento da contaminação (não considerado nesse estudo), e vice-versa. Pode-se então afirmar que os efeitos caminham em direções contrárias, representadas com um sinal (-).

Produto dos efeitos das relações entre as variáveis, o modelo está caracterizado, em síntese, por um laço de realimentação positivo (R). Significa que a variação de um elemento se propaga em toda a sua extensão reforçando a variação inicial, gerando um crescimento exponencial do sistema a partir de onde toda a variação é amplificada, provocando mais movimento na mesma direção. No caso da sustentabilidade dos recursos hídricos nessa bacia em estudo, torna-se um ciclo vicioso, que provoca uma piora do sistema quando se exerce pressão sobre a oferta do recurso água. Por outro lado, medidas que estimulem o estoque de água, que representa uma condição de aumento da sua oferta, cria uma situação de balanceamento do sistema (B), como é o caso dos “Reservatórios”.

Na etapa seguinte, se efetuou a formalização do diagrama causal do modelo (Figura 3) empregando para isto uma linguagem matemática. O ponto de partida foi a elaboração do diagrama de estoque e fluxo, que de forma mais detalhada descreve o funcionamento do sistema (Figura 4), a partir do qual se escreveu as equações do modelo, tendo por base os dados da estação fluviométrica Porto dos Poções.

A conversão se deu da seguinte forma: uma vez

representados no diagrama causal, os componentes principais do modelo de oferta e demanda de recursos hídricos das bacias (água, pastagem, mata, irrigação, cerrado, reservatórios, urbanização/população e agricultura/cultivo), assim como suas relações principais, que de forma abstrata é a base do enfoque do pensamento sistêmico, construiu-se e procedeu-se a sua formalização em linguagem de Dinâmica de Sistemas, auxiliados pelas ferramentas empregadas na construção de modelos que se elaboram a base deste enfoque. As estruturas básicas para o desenho do diagrama são os estoques e os fluxos (Figura 3).

Os estoques representam no modelo as acumulações de recursos e também as restrições destes. Representam as condições, informando como está a situação; e suas variáveis que acumulam trocas influenciadas pelos fluxos. Neste caso, os estoques constituem por um lado, a água limpa que se denominará “água” e representa a oferta hídrica do modelo; e por outro, nesse trabalho, será considerado, principalmente, as áreas de “Cultivo”, que determina a demanda de água requerida na bacia.

Os fluxos se representam com válvulas – identificam as ações que acumulam e, ou, esvaziam os estoques, e dizem como os fatos estão se desenrolando – são variáveis dependentes do tempo. Como se pode observar no modelo da Figura 4, tem-se os fluxos nomeados com taxas que são controladas pela (s) taxa (s) da (s) variável (is) em conexão, que usualmente é uma variável auxiliar ou uma constante, e que estão alimentando a oferta hídrica. Esta oferta está constituída pelas águas superficiais (rio Preto) e seus respectivos escoamentos.

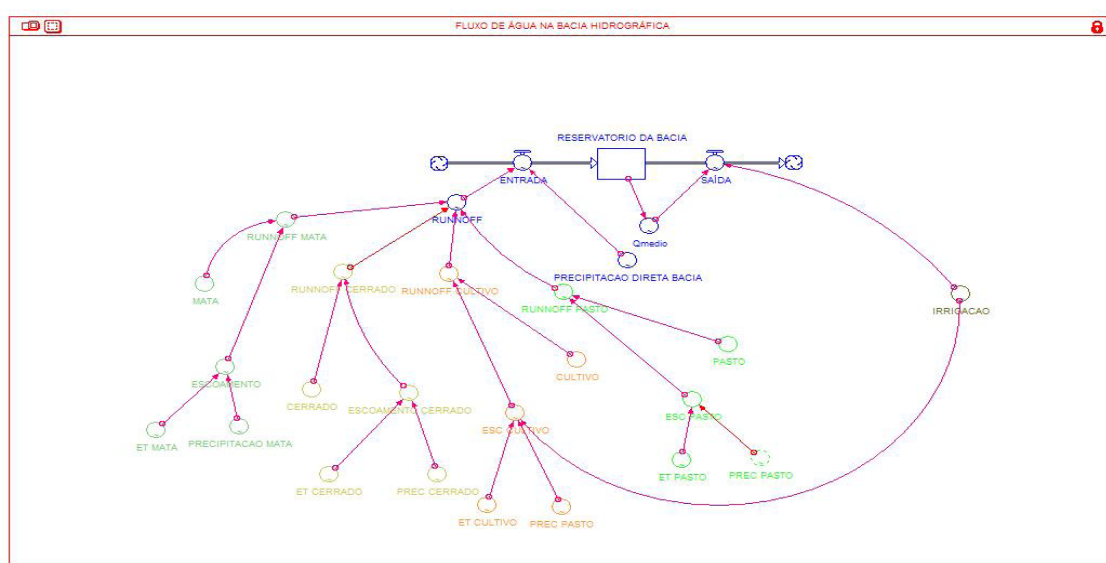


Figura 4. Diagrama de estoque e fluxo da bacia hidrográfica do rio Preto.

Por outra parte se têm os fluxos que representam a demanda hídrica do modelo. Estes estão compostos pelos requerimentos de água dos setores agrícola, pecuário, população urbana e rural, e pela demanda ambiental, constituída esta última, pela vazão mínima que o rio deve ter para manter a vida de seus ecossistemas correspondentes. Neste estudo, foi considerada a vazão mínima. Estas demandas têm um fluxo de saída que alimenta o estoque de água residual.

Os outros elementos do modelo evidenciados no diagrama causal, e que determinam os fluxos, se convertem em variáveis auxiliares ou constantes, tal como o consumo de água do setor agrícola, pecuário, populacional, entre outros. As relações entre as variáveis, que no diagrama causal se estabelecem por intermédio de flechas, neste diagrama se indicam da mesma forma, sendo chamados de conectores. Estes vinculam os estoques e as variáveis auxiliares ou as constantes; os estoques aos reguladores de fluxos; e as auxiliares ou as constantes a outras auxiliares ou constantes.

Os modelos de dinâmica de sistemas são construídos por meio de um conjunto de equações diferenciais, que são matematicamente resultantes ao longo de um período por um algoritmo que gera comportamentos dependentes do tempo para as variáveis contidas no modelo. Parte das equações está embutida no programa e não estão aqui relacionadas (equações “time”, expressas como equação diferencial). A seguir, as demais equações utilizadas na composição do modelo (ORELLANA GONZÁLEZ, 2006).

$$D = DPOPULACIONAL + DAGP + DAMB \quad (1)$$

Em que

D = quantidade total de água demandada;

DPOPULACIONAL = engloba por uma parte, a demanda urbana de água para consumo doméstico, e por outro, a demanda rural de água usada para os mesmos fins;

DAGP = demanda agrícola e pecuária de água;

DAMB = demanda ambiental de água.

A demanda de água para a proteção do meio ambiente e dos ecossistemas será assumida como um valor constante. Para este estudo, se considerou igual a um volume mínimo registrado na estação pluviométrica sobre a bacia hidrográfica do rio Preto, denominada com o código 152 da rede existente no Estado de Minas Gerais que engloba uma

série de cinquenta 50 anos (TEIXEIRA SOUZA, 1993). De fato, tomou-se por base a vazão mínima registrada no estudo de LATUF (2007).

$$S = SSUP + SRET \quad (2)$$

Em que

S = oferta total de água disponível;

SSUP = oferta disponível de água superficial;

SRET = oferta disponível de águas de retorno.

É um dos critérios para avaliar se o funcionamento do sistema de recursos hídricos se encontra com vulnerabilidade e capacidade de recuperação (XU *et al.*, 2002). Nesse estudo, o índice de sustentabilidade (IS) foi definido como a relação entre um possível déficit de água com respeito à oferta correspondente na mesma região, com os seguintes critérios:

$$IS = \{ (S - D) / S \} \text{ se } S > D \text{ e se } S \leq D \quad (3)$$

Em que

D = demanda de água;

S = oferta disponível de água.

Caso o valor de IS seja maior que 0,2, indica um baixo ou nenhum estresse na oferta de água, o que implica que a demanda de água é menor ou igual a 80% da oferta potencial de água. Valores menores a 0,2 refletirão condições de vulnerabilidade, o que supõe que a demanda de água é maior que 80% da oferta potencial de água. Valores iguais a zero indicam que a oferta de água é insustentável, o que sugere que a demanda de água é igual ou excede a toda a disponibilidade de recursos hídricos locais.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse estudo, a calibração do modelo foi realizada por intermédio do parâmetro “Irrigação”, para o qual existiam dados registrados no período 1970-1996. Nesta simulação, o crescimento da área irrigada na bacia do rio Paracatu (Figura 5) e o uso da água na bacia do rio Preto (Figura 6), refletem a comparação com respeito aos dados históricos da bacia e a simulação do modelo do presente estudo, respectivamente.

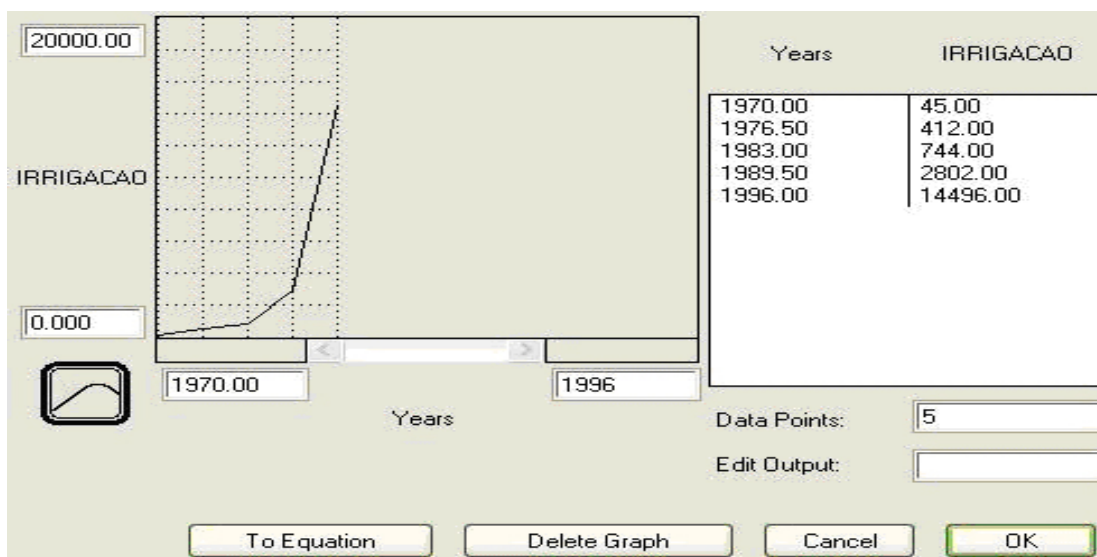


Figura 5. Resultados consistidos do crescimento da área irrigada na bacia hidrográfica do rio Paracatu no período 1970-1996. Fonte: Censos Agropecuários do IBGE de 1970, 1975, 1980, 1985 e 1996.

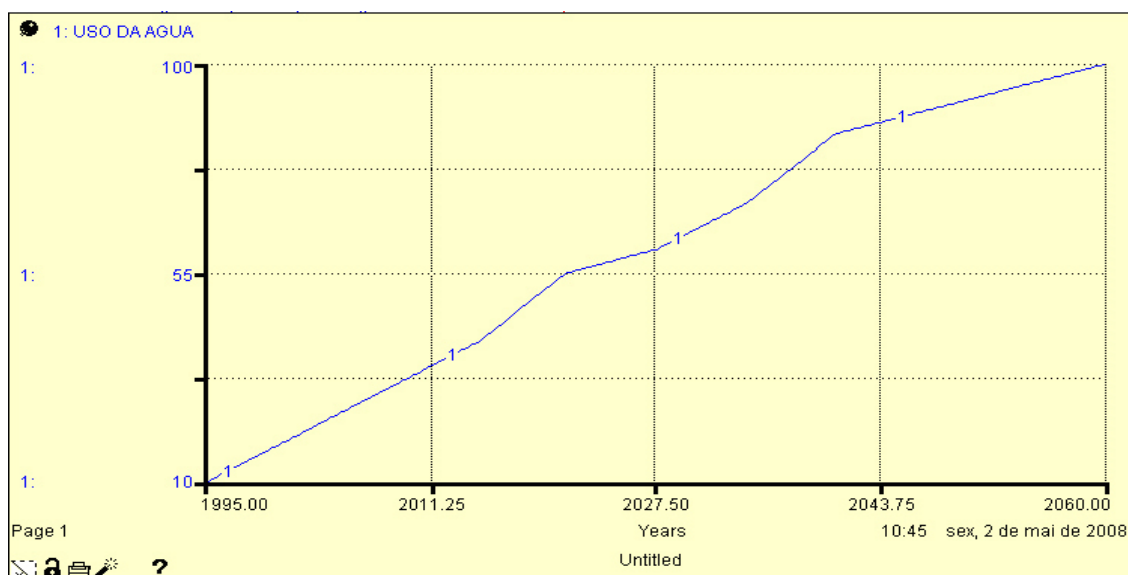


Figura 6. Simulação do uso da água (em porcentual) no período 1995-2060 na bacia do rio Preto.

Na validação do modelo, considerou-se que a dinâmica do sistema é determinada pela demanda dos recursos hídricos, para satisfazer às necessidades da população e do setor agropecuário. O processo de simulação do modelo compreende diferentes cenários de oferta e demanda de água, de acordo com as seguintes especificações:

- Horizonte temporal: se propõe a um horizonte de 65 simulações. Cada simulação é caracterizada por unidade/ano que determina um horizonte de tempo de 65 anos;
- Passagem do tempo ou etapa: a passagem do tempo é de uma unidade;
- Método da integração: se usam equações diferenciais para descrever as relações complexas na dinâmica do sistema, aquelas que são resolvidas por

intermédio do método de Euler (mais usado); e este caracterizou pela adaptação de um fluxo constante durante o passar do tempo ou etapa (STELLA, 2001).

Esta demanda compreende as necessidades de água na citada bacia e repercute de forma direta a sustentabilidade do sistema. Durante todo o processo de simulação se conhece a quantidade exata de água requerida por cada setor frente à oferta de água disponível, embora só a “Irrigação” tenha merecido destaque e análise particularizada.

Analisando a tendência da curva da Figura 6, observa-se que as demandas hídricas estão aumentando na medida em que a população cresce - o município de Paracatu apresentava uma população de 6.304 habitantes em 1970, passou para 75.216 habitantes em 2000 (IBGE, Censos de 1970 e 2000),

e que se aumentam as áreas cultivadas. Verifica-se, assim, que o comportamento do modelo corresponde de forma satisfatória aos dados disponíveis. Contudo, é importante assinalar, que nenhum modelo pode ser 100% validado. Isso porque as variáveis incluídas não podem ser precisamente quantificadas, e também, devido às suposições feitas sobre o comportamento esperado dos parâmetros avaliados.

Dessa forma, caso nenhuma medida regulatória, estruturadora ou indutora de comportamento seja adotado, observa-se na Figura 6 que no ano de 2011, 35% da água disponível já estará sendo consumida; em 2027, aproximadamente 60%; ou seja, a tendência apontada pela simulação do modelo indica o consumo excessivo do recurso água. Há de se considerar como agravante, que o crescimento populacional, que tem estimulado o aumento das áreas de “Cultivo”, vem provocando drástica redução das áreas de “Cerrado”.

Dessa forma, cabem algumas importantes considerações sobre a bacia hidrográfica, levantadas no estudo de LATUF (2007), principalmente com relação às classes de uso do solo “Mata”, “Cerrado” e “Cultivo”. Com relação à classe de uso do solo “Mata”, apresentou tendência de crescimento (+31,54%) no período 1985-2000, pode-se associá-la às áreas que não foram utilizadas para a expansão agrícola na bacia.

Por outro lado, segundo esse mesmo autor, a classe de uso do solo “Cerrado” obteve um comportamento de redução (-74,16%), sendo na maior parte dos casos substituídos pelo uso do solo “Cultivo” (64,30%); “Mata” (21,00%) e “Pasto” (13,87%). De acordo com Costa (2003), com a substituição de “Cerrado” ou “Mata” por “Pasto”, diminui a interceptação da água da chuva, o que aumenta o escoamento superficial e a diminui a infiltração de água nestas áreas, causando uma redução das vazões média

e mínimas e provocando o aumento da vazão máxima. Considere-se, ainda, que “Pasto” não consegue manter a mesma taxa evapotranspirométrica que “Mata”.

O mesmo pode ser esperado com relação ao uso do solo “Cultivo”: devido a este estar relacionado com uma menor proteção da superfície do solo, principalmente em cenários de mudanças climáticas com elevação de temperatura, possibilitará o aumento do encrostamento superficial e consequente aumentos de escoamento e da vazão máxima. Ao contrário, para as vazões média e mínimas, esperam-se suas reduções.

A validação em Dinâmica de Sistemas é uma prática realizada em cada etapa da modelagem, com o propósito de se detectarem falhas nos sistemas construídos. De acordo com Forrester e Senge (1980); e Barlas (1996), entre os procedimentos formais está a aplicação de testes orientados de comportamento estrutural, entre os quais se tem os testes de condições extremas, de sensibilidade e de relacionamento.

A partir desse levantamento, foram elaborados e examinados oito (8) cenários que compreendem aumentos de demanda de água, bem como restrições ou aumento da oferta deste recurso, a fim de se avaliar a sustentabilidade do uso do recurso “Água” nessa bacia. Nesse artigo, será apresentado o cenário “Agronegócio Atual”. Nele foram mantidas todas as tendências atuais de crescimento, de consumo e de oferta de água.

Nesse cenário se considerou um incremento médio das áreas irrigadas em 10% ao ano. Tal taxa de crescimento foi estimada baseada em uma média aproximada dos aumentos verificados nas áreas irrigadas pelos Censos Agropecuários do IBGE, que ocorreram nos municípios que compõem a bacia do rio Paracatu (Quadro 2).

Quadro 2. Áreas irrigadas por município das bacias do rio Paracatu

Municípios	Área irrigada (ha)				
	1970	1975	1980	1985	1996
Formosa	39	787	4.169	4.110	1.874
Cabeceiras	0	229	47	15	805
Cabeceira Grande	-	-	-	-	-
Distrito Federal	1.151	2.086	3.812	5.538	12.591
Unai	111	116	624	6.073	16.851
Natalândia	-	-	-	-	-
Dom Bosco	-	-	-	-	-
Bonfinópolis de Minas	0	2	0	217	1.937
Paracatu	45	412	744	2.802	14.496
TOTAL	1.346	3.632	9.396	18.755	48.554
Crescimento (%)		269%	258%	99.60%	258.90%

Fonte: Censos agropecuários 1970, 1975, 1980, 1985 e 1996.

O efeito do aumento da irrigação tem sido a maior preocupação regional, em face ao aumento da demanda de recursos hídricos desta bacia. Esse cálculo passa a ter significativa importância dada à influência dessa atividade no acréscimo da produção, via aumento de produtividade, que podem ser visivelmente notado nos dados das produtividades regionais. Há de se considerar, se bem manejada, que a prática da irrigação poderia reduzir a pressão sobre as áreas da classe de uso do solo “Cerrado”, fator que mais influenciou na redução das vazões médias e mínimas, de acordo com LATUF (2007).

Neste estudo, os setores industriais e agroindustriais não foram avaliados. Isso porque atualmente são pouco significativos na região em estudo, além de não se terem dados precisos sobre os seus volumes de produção.

Todavia, caso haja crescimento desses setores, conhecendo a dinâmica que ocorre no modelo e as interferências que estes setores podem provocar, bastaria incorporar a este os seus dados. Na Figura 7 observam-se as relações existentes atualmente no cenário “Agronegócio Atual”.

Apesar dos dados acima serem relativos à estação fluviométrica Porto dos Poções, os parâmetros avaliados no cenário “Agronegócio” refletem as tendências de crescimento econômico de longo prazo de toda a bacia hidrográfica do rio Preto. Isto pode ser percebido porque esta estação reflete o mesmo comportamento do uso do solo dos principais parâmetros avaliados, no período 1985-2000, que as demais estações fluviométricas monitoradas nessa bacia (LATUF, 2007), como se pode observar no Quadro 3.

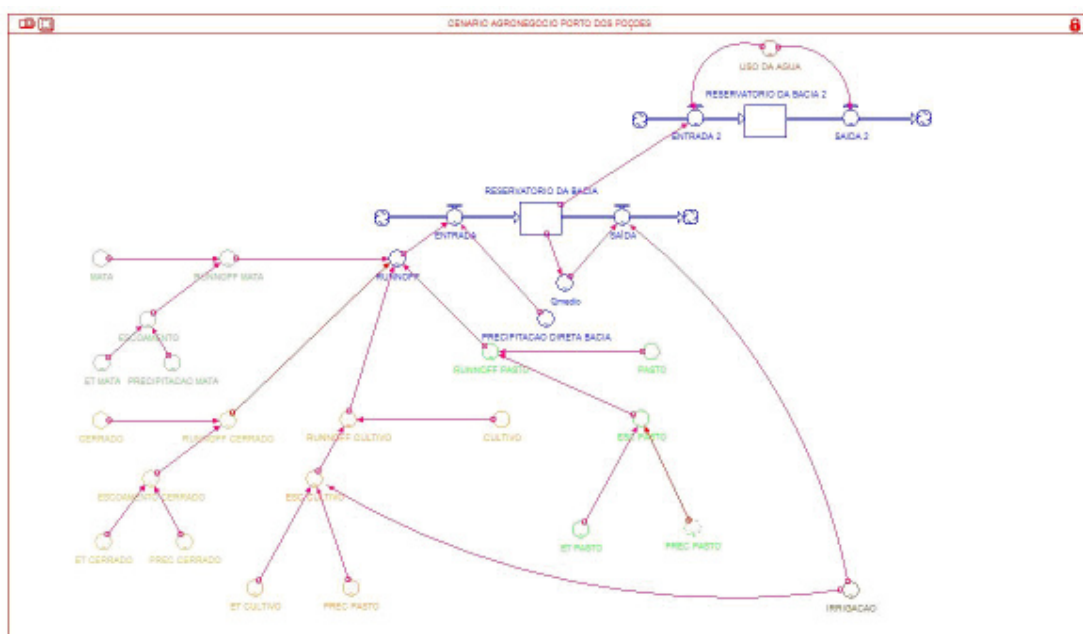


Figura 7. Modelo de estoque e fluxo da água na área de abrangência da estação fluviométrica Porto dos Poções.

Quadro 3. Significâncias e tendências observadas para o comportamento do uso do solo dos principais parâmetros avaliados, no período 1985-2000, para as estações fluviométricas monitoradas no rio Preto

Estações fluviométricas	Significâncias (%) e Tendências (↑↓) ao longo do tempo para as classes de uso do solo					
	Mata	Cerrado	Pasto	Cultivo	Urbano	Reser. *
Fazenda Limeira	58,5↓	99,3↓	58,4↓	99,9↑	99,9↑	61,4↑
Unaí	84,1 ↑	99,0↓	66,1↓	99,9↑	99,9↑	60,3↑
S. Antônio do Boqueirão	93,5 ↑	98,9↓	74,1↓	99,9↑	99,9↑	54,0↑
Fazenda Resfriado	99,8 ↑	90,3↓	94,7↓	97,9↑	-	64,3↑
Fazenda Santa Cruz	98,7↑	90,3↓	71,5↓	83,9↓	-	30,7↑
Porto dos Poções	99,9↑	99,9↓	69,5↑	99,9↑	99,9↑	64,6↑

*Classe de uso do solo reservatório; - Sem ocorrência; ↑: Crescimento; ↓: Diminuição.
 Fonte: LATUF, 2007.

Uma das vantagens do programa STELLA, é que lança os resultados obtidos na forma de tabelas, gráficos ou simulação (Figura 8), que indica o comportamento das demandas de água pela irrigação no período 1995-2060.

Analisando o cenário “Agronegócio Atual” do rio Preto, quando se considera a demanda de água apenas para o setor “Irrigação” (Figura 8), no ano de 1995, essa atividade demandaria 400 mm ano⁻¹; em 2021, 600 mm ano⁻¹; em 2034, 600 mm; em 2047, 850 mm ano⁻¹; e em 2060, 981 mm ano⁻¹. No parâmetro “Precipitação direta”, Considerando que a precipitação é a principal entrada de água em uma bacia hidrográfica, nesse mesmo período, ter-se-iam os seguintes valores precipitados, respectivamente: 1.230 mm ano⁻¹; 1.110 mm ano⁻¹; 1.050 mm ano⁻¹; 800

mm ano⁻¹ e 1.000 mm ano⁻¹. Ao se determinar o índice de sustentabilidade (IS), onde será considerado apenas o setor “Irrigação”, têm-se os seguintes resultados, conforme apresentados no Quadro 4.

Verifica-se assim, que nesta condição, o sistema seria insustentável. Observa-se no ano de 2021, o IS de 0,46 aponta que se estaria utilizando 54% de toda a água disponível da bacia. No ano de 2047, o IS é igual a zero; ou seja, a demanda excede a toda a disponibilidade de recursos hídricos locais, o que significa que está ocorrendo a sua depleção por sobre-exploração. Para justificar essa tendência, podem-se observar os dados relativos às alterações das taxas de evapotranspiração, apresentados na Figura 9.

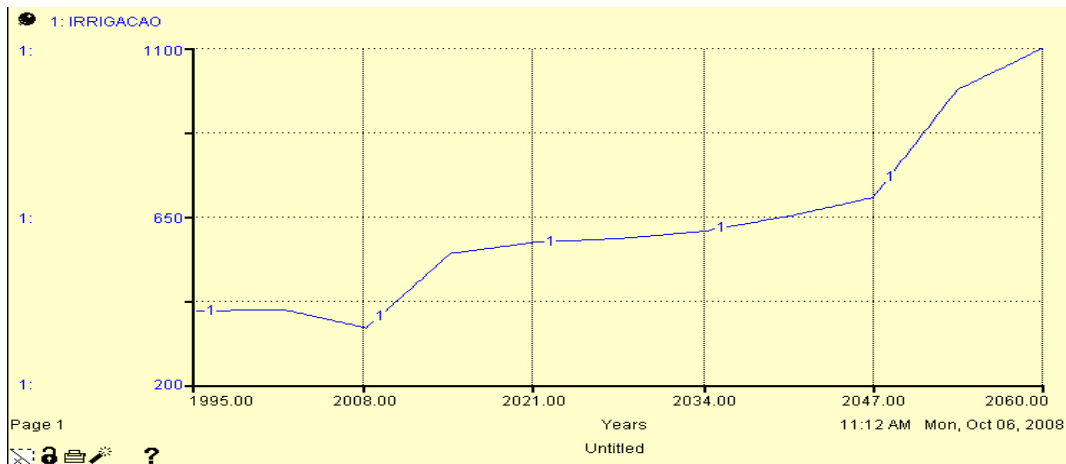


Figura 8. Simulação da demanda de água na bacia hidrográfica do rio Preto para a atividade irrigação (mm ano⁻¹) no período 1995-2060.

Quadro 4. Índice de sustentabilidade (IS) considerando apenas os parâmetros “Irrigação” e “Precipitação direta” na bacia do CENÁRIO “Agronegócio Atual” do rio Preto

ANO	DEMANDA (mm ano ⁻¹)	OFERTA (mm ano ⁻¹)	IS
1995	400	1.230	0,67
2021	600	1.110	0,46
2034	600	1.050	0,43
2047	850	800	0
2060	981	1.000	0,02

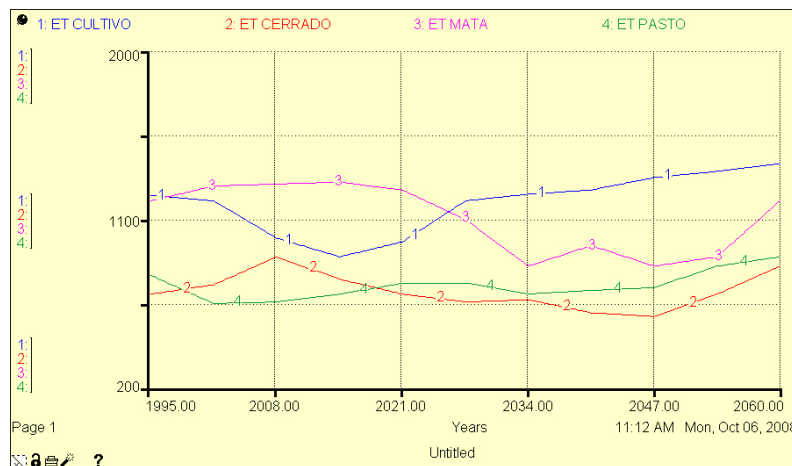


Figura 9. Simulação da evapotranspiração em função das alterações das classes de uso do solo para o período 1995-2060.

Verifica-se na Figura 9, que a maior contribuição para a evapotranspiração era “Mata”, no período 1997-2026. Com o incremento das áreas destinadas ao “Cultivo”, esse passa a ser o principal contribuinte para a evapotranspiração na área da bacia. As áreas de “Cerrado” apontam oscilações, apresentando ao final valores superiores que no início do período analisado (1995, com 700 mm ano⁻¹). É bom observar que o Programa STELLA considera as inter-relações existentes entre os diversos parâmetros analisados de uma determinada área. Dessa forma, quando o modelo aponta para o aumento da contribuição da evapotranspiração do “Cerrado”, significa que esta classe de uso do solo poderá estar sendo substituída por “Mata” e, ou, “Cultivo” irrigado, que apresentam maiores taxas de evapotranspiração. Observa-se que a classe “Mata”, a partir do ano de 2047 apresenta tendência de elevação na contribuição da taxa de evapotranspiração até o final do período analisado (2060).

Cabe lembrar que na área de abrangência da estação fluviométrica Porto dos Poções, apenas a classe de uso do solo “Cerrado” apresentou tendência de redução no período 1985-2000 (LATUF, 2007). Chama atenção o crescimento da importância da categoria “Pasto”, de 700 mm ano⁻¹, em

1995; para 900 mm ano⁻¹ em 2060, confirmando a tendência observada por esse mesmo autor, no período mencionado (+33,07%). Há de se considerar que a categoria “Mata” sofre variações ao longo de todo o período analisado, mas termina com a mesma contribuição inicial (1.200 mm ano⁻¹), provavelmente, em função do seu crescimento em áreas de “Pasto”. Na avaliação da evapotranspiração do CENÁRIO “Agronegócio Atual” do rio Preto (Figura 9), observaram-se as seguintes variações das categorias de classes de uso do solo em estudo (Quadro 5).

A Figura 10 representa a precipitação na área de drenagem do rio Preto. Observa-se tendência de redução da precipitação direta na bacia no período analisado deste trabalho, mas com constantes oscilações. Observa-se que o volume precipitado no ano de 1995 correspondia a 1.300 mm ano⁻¹; em 2008, 1.360 mm ano⁻¹; em 2047, 900 mm ano⁻¹; em 2053, 1400 mm ano⁻¹; e no ano de 2060, 1.000 mm ano⁻¹; ou seja, uma tendência de redução de -23,08%. Essa redução foi observada no trabalho de LATUF (2007), onde os comportamentos das variáveis hidrológicas vazões máxima, média e mínimas, assim como a precipitação anual e a do mês mais chuvoso tiveram tendências gerais de redução ao longo do período analisado (1985-2000), aumentando os períodos de seca.

Quadro 5. Variação da evapotranspiração no período 1995-2060 para categorias selecionadas de classe de uso do solo

Categoria (%)	Pasto	Cultivo	Cerrado	Mata
Cenário Agronegócio	+ 12,50	+ 13,82	+ 21,43	0,0

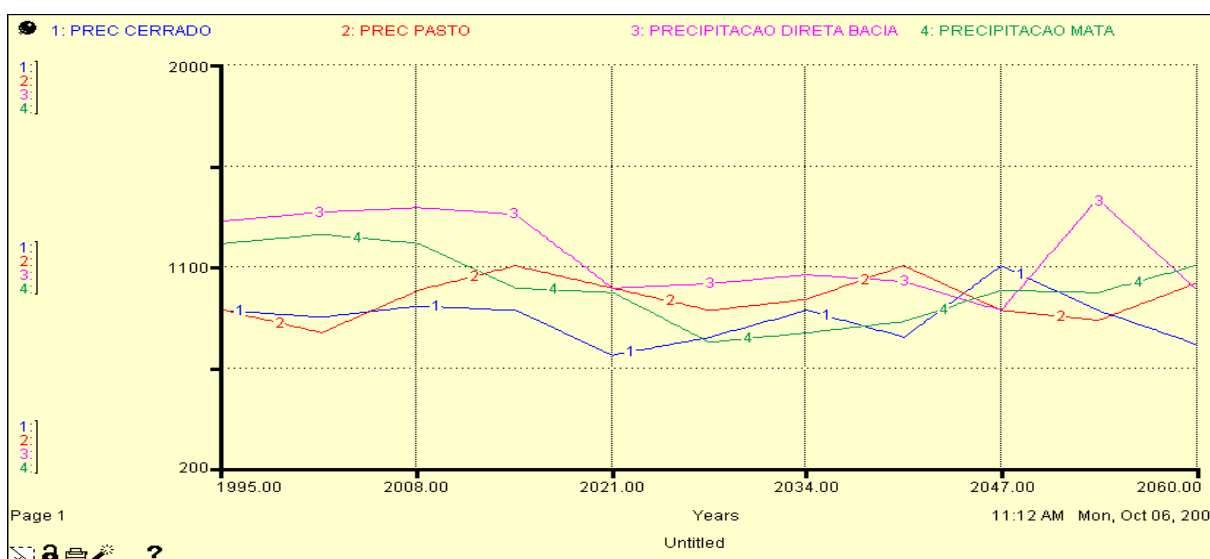


Figura 10. Simulação para “Precipitação” (mm ano⁻¹) em função das alterações do uso do solo no período 1995-2060 na bacia do rio Preto.

Analisando a Figura 10, observa-se que a precipitação direta na área da bacia representa a média da precipitação de cada uma das coberturas vegetacionais existente. Dessa forma, caso toda a bacia fosse coberta por “Mata”, em função de sua maior capacidade de retenção de água no solo, sua taxa de evapotranspiração seria mais elevada, e provavelmente ter-se-ia um maior volume de chuva na região em estudo, *ceteribus paribus*. O mesmo pode ser dito, em parte, para “Cerrado”, que por ser o Bioma da região, a sua adaptação favoreceria a condição de homeostasia. Dessa forma, a elevação da precipitação direta no ano de

2053 pode ser reflexo do aumento da classe de uso do solo “Mata”. No Quadro 6 podem-se observar o comportamento da precipitação direta na bacia.

Há de se considerar, também, a possibilidade do crescimento das classes de uso do solo “Reservatório”, estimulando a atividade de “Irrigação”. Dessa forma, “Cultivo” continuaria a sofrer aumentos de suas áreas irrigadas, onde as taxas de evapotranspiração seriam elevadas, apresentando contribuições semelhantes à “Mata”. Para tanto, ter-se-ia de haver disponibilidade de água para irrigação, como foi verificado na Figura 9, não há.

Quadro 6. Comportamento da “Precipitação direta” na bacia do rio Preto no período 1995-2060 para o CENÁRIO “Agronegócio”

Ano CENÁRIO	1995 (mm ano ⁻¹)	2060 (mm ano ⁻¹)	Variação (%)
Agronegócio	1.300	1.000	- 23,08

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

- O modelo matemático de oferta e demanda hídrica apresentou confiabilidade em sua simulação, ao apresentar tendências semelhantes aos dados consolidados;
- A simulação apontou para uma tendência de redução de -23,08% na precipitação direta na bacia;
- A tendência apontada pelo modelo, quando calculado o “Índice de Sustentabilidade”, sugere que o sistema em estudo tende a exaustão ou depleção de seus recursos hídricos, caso sejam mantidos o mesmo manejo da área em estudo;
- Relacionado ao uso do solo, percebe-se que a substituição de “Cerrado” por outras classes de uso do solo tem sido a principal responsável pela redução das vazões média e mínimas, principalmente quando substituído por “Cultivo” e, ou, “Pasto”;
- Considerando a importância da irrigação para o aumento de produtividade e geração de emprego e renda estáveis, a ampliação das áreas de “Reservatórios” deve ser priorizada;
- O Programa STELLA é uma ferramenta possível de ser utilizada para incorporar variáveis sociais, econômicas e ecológicas, tendo se mostrado eficiente em sua proposta de apoio para a tomada de decisões nas fases de planejamento e monitoramento;
- O modelo desenvolvido neste trabalho é um valioso instrumento computacional de auxílio aos formuladores de políticas públicas para o planejamento, gestão e monitoramento dos recursos hídricos: para a

bacia do rio Preto, como também para outras bacias hidrográficas.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARLAS, Y. Formal aspects of model validity and validation in system dynamics. **System Dynamics Review**, n.12, p.183-210, 1996.
- BRASIL – Governo Federal. MINAS GERAIS; Governo do Estado. DISTRITO FEDERAL. **Plano diretor de recursos hídricos da bacia do rio Paracatu – PLANPAR**. [S. l.]: 1996. Vol. 1, T. 1. (CD-ROM).
- CAPRA, F. **As conexões ocultas**. IDESA: São Paulo, 2003. 12p. (Palestra)
- COSTA, M. H. Large-scale hydrological impacts of tropical forest conversion. In: BONELL, M.; BRUIJNZEEL, L. A. (Eds.). **Forest–Water–People in the humid tropics**. Cambridge University Press, Cambridge. 2003.
- DINO, K. J. **A Bacia do Rio Paracatu, Minas Gerais – 2001**. PROJETO MARCA D’ÁGUA RELATÓRIOS PRELIMINARES 2001. Brasília: IBGE, 2002. 47p.
- DUVOISIN, I. A. **Uma proposta metodológica para o ensino de equações diferenciais utilizando STELLA**. Porto Alegre: Fundação Universidade Federal do Rio Grande/Revista eletrônica do Mestrado em Educação Ambiental. 2000.
- FERRACIOLI, L.; CAMILETTI, G. G. **Introdução ao ambiente de modelagem computacional STELLA**. Série Modelos, 01/98, Vitória. Publicação Interna do Model@b/UFES. 1988.

- FORRESTER, J. W.; SENGE, P. M. Tests for building confidence in system dynamics models. In: **System dynamics**. Amsterdam, North-Holland: Legast, Forrester & Lyneis, 1980.
- IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo agropecuário, 2000. 1 CD-ROM.
- IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censos Agropecuários**. Brasília: IBGE, 1970, 1975, 1980, 1985 e 1996.
- IGAM - INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS & TC/BR – Tecnologia e Consultoria Brasileira S/A **Relatório Técnico – RT3: Análise de Cenários**. Primeira etapa do Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: IGAM, 2007. 111p.
- IGAM - INSTITUTO MINEIRO DE GESTÃO DAS ÁGUAS **Estudo técnico de apoio ao plano diretor de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Paracatu**. Belo Horizonte: Instituto Mineiro de Gestão das Águas – IGAM, 2005. 37p.
- LATUF, M. O. **Impacto das mudanças do uso do solo nas vazões observadas nas bacias do rio Preto e ribeirão Entre Ribeiros, MG. Viçosa, MG: UFV, 2007. 103p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 2007.**
- ORELLANA GONZÁLEZ, A. M. G. **Sustentabilidade de los recursos hídricos en São Miguel do Anta, Minas Gerais: un enfoque de dinámica de sistemas**. Viçosa, MG: UFV, 2006. 104p. Dissertação (Mestrado em Economia Aplicada) - Universidade Federal de Viçosa, 2006.
- REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. Água na Agricultura e Pecuária. In: **Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. São Paulo: Ed. Escrituras, 1999. p.305-337.
- RICHMOND, B. **An academic user's guide to STELLA**. High Performance System, Inc. Lime. 1987.
- RODRIGUEZ, R. D. G. **Metodologia para a estimativa das demandas e disponibilidades hídricas: estudo de caso da bacia do Paracatu**. Viçosa, MG: UFV/DEA, 2004, 111 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, 2004.
- SOUZA, M. N. **Degradação e Recuperação Ambiental e Desenvolvimento Sustentável**. Viçosa, MG: UFV, 2004. 371p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, 2004.
- STELLA. **Introduction to systems thinking**. NH: High Performance Systems, 2001. 165 p.
- TEIXEIRA SOUZA, S. M. (Coord.). **Deflúvios superficiais no estado de Minas Gerais**. Belo Horizonte: Hidrossistemas, 1993. 325 p.
- TUCCI, C. E. M.; HESPANHOL, I.; CORDEIRO NETTO, O. M. **Gestão de água no Brasil**. Brasília: UNESCO, 2001. 156p.
- VILLELA, P. R. C. **Introdução à dinâmica de sistemas**. II SEMANA ACADÊMICA DA GESTÃO DO AGRONEGÓCIO. Viçosa: DER/UFV, 2007. 66p.
- XU, Z. X.; JINNO, K.; KAWAMURA, A.; TAKESAKI, S.; ITO, K. Sustainability analysis for yellow river water resources using the system dynamics approach. **Water Resources Management**, Netherlands, n.16, p.239-261, 2002.