



**Encontro da Sociedade  
Brasileira de Economia  
Ecológica**

Brasília, 4 a 8 de Outubro de 2011

**Políticas Públicas e a Perspectiva da Economia Ecológica**

**IX ENCONTRO NACIONAL DA ECOECO**  
Outubro de 2011  
Brasília - DF - Brasil

---

**ESTUDO DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA DAS BACIAS PCJ UTILIZANDO DINÂMICA DE SISTEMAS**

**Rogério Goulart Júnior** (IE - UNICAMP) - rogerio.econ@ibest.com.br  
*Doutorando do Instituto de Economia - UNICAMP*

**Jaenes Miranda Alves** (UESC) - jaenesmiranda@yahoo.com.br  
*Prof. Dr. da UESC e Pós-Doutorando do Instituto de Economia - UNICAMP*

**Ranulfo Paiva Sobrinho** (IE - UNICAMP) - ranulfo17@gmail.com  
*Doutorando do Instituto de Economia - UNICAMP*

**Ademar Ribeiro Romeiro** (IE - UNICAMP) - ademar@eco.unicamp.br  
*Prof. Dr. do Instituto de Economia - UNICAMP*

Sessão Temática: B) Cidades sustentáveis – O manejo urbano de recursos hídricos

## **ESTUDO DA DISPONIBILIDADE HÍDRICA DAS BACIAS PCJ UTILIZANDO DINÂMICA DE SISTEMAS**

### **RESUMO**

Com dados e informações retirados de documentos do Comitê das Bacias do PCJ aplicados para modelagem da dinâmica do sistema hídrico no programa computacional Vensim PLE<sup>®</sup> foram elaborados cenários para o período entre 2003 e 2050, considerando a possibilidade de conflitos referentes a quantidade de água disponível aos usos múltiplos na bacias. O objetivo geral desse artigo foi o de analisar o sistema das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá - PCJ em cenários futuros de oferta e de demanda hídricas: determinando se poderia haver ocorrência de colapso no sistema de captação hídrica por déficit de oferta; e elaborando três cenários do sistema sobre a captação para abastecimento urbano de água com base no aumento populacional e metas de consumo urbano *per capita* (mínimo, médio e máximo) definidas no plano de bacia. No sistema analisado o resultado do cenário de consumo *per capita* médio para as bacias hidrográficas do PCJ, em termos de saldo do balanço hídrico, apresenta um colapso a partir do ano 2034, considerando apenas variações na captação hídrica urbana e mantendo-se fixos os demais usos (industrial, rural e outros).

**PALAVRAS CHAVE:** Gestão de Recursos Hídricos - Dinâmica de Sistemas - Bacias do PCJ.

### **ABSTRACT**

*With data and information drawn from documents of the PCJ Committee Basins applied to modeling of water systems in the computer program Vensim<sup>®</sup> PLE were elaborated the scenarios for the period between 2003 and 2050, considering the possibility of conflict regarding the amount of water available to multiple uses in the watershed. The general objective of this paper was to analyze the system of Piracicaba, Capivari and Jundiá Rivers Water Basins (BH-PCJ) in future scenarios of water supply and demand: determining if there might be occurrence of collapse in fundraising by deficit water supply; and developing three scenarios on the capture system for urban water supply based on population growth and consumption targets urban per capita (minimum, average and maximum) be defined in the basin plan. In the system dynamics the scenario of average per capita consumption for BH-PCJ, in terms of water balance showed a collapse from the year 2034, considering only variations in the uptake of urban water and keeping fixed the others uses (industrial, rural and other).*

**KEY WORDS:** *Water Resources Management - System Dynamics – PCJ Rivers Basins.*

## **1 INTRODUÇÃO**

A água é fundamental na vida sobre a terra em diferentes aspectos, fisiológico, morfológico e nas ações e formações da vida. O problema da escassez da água levanta a questão da sobrevivência da vida sobre o planeta. Especificamente pode trazer impacto imediato sobre a economia, ameaçando sua estabilidade e até mesmo a sua manutenção. Certamente a questão da escassez da água tem importância nos vários âmbitos, mundial, nacional, regional e local.

Como cita Sanchez-Román *et al.* (2009), a população rural tem dificuldade de obtenção de água em volume e em qualidade, enquanto a urbana tem problema com a água tratada pelas empresas de saneamento. Outras dimensões da problemática da água é que o nível de renda das pessoas influencia na oportunidade de uso desse recurso e também interfere na escala de consumo, assim como as atividades econômicas, seja pelo seu grande uso como bem de consumo, insumo ou como meio utilizado para diluição de efluentes.

Em particular, no Estado de São Paulo, seja pelo elevado número de habitantes, ou pelos fins econômicos de atividades como a indústria e agropecuária, os impactos sobre as fontes água tem sido um dos mais expressivos. Nessa unidade federativa as Bacias Hidrográficas do Piracicaba, Capivari e Jundiaí (Bacias do PCJ) se localiza na região com a segunda maior população estadual (RODRIGUES & BONONI, 2008), sendo esta na maior parte urbana. Nessas Bacias, os diversos usos múltiplos de água necessitam de uma grande quantidade e de qualidade hídrica considerável, onde já apresenta conflitos quanto a escassez de água, além de lançamento de efluentes com carga orgânica que exige tratamento posterior para outros usos a jusante do rio.

A gestão da água mostra-se fundamental diante de toda problemática que traz a sua escassez. Portanto, estudos que possam trazer informações sobre essa problemática e sobre as perspectivas futuras diante fatos e cenários de uso da água poderão subsidiar tomadas de decisão em termos de formação de políticas de intervenção e de gestão desse bem.

Segundo Sanchez-Román *et al.* (2010), Souza *et al.* (2010), Sanchez-Román *et al.* (2009), Vieira (2008), a metodologia de dinâmica de sistemas pode auxiliar problemas de gestão de recursos hídricos entre outros de forma consistente.

Nesse estudo, com análise dos dados e informações retirados de documentos do Comitê das Bacias do PCJ aplicados para modelagem do sistema hídrico no programa computacional Vensim PLE® (Vensim, 2010) este trabalho apresenta cenários futuros para o período entre 2003 e 2050, considerando a possibilidade de conflitos referentes a quantidade de água (vazão) disponível aos usos múltiplos na bacias.

Ou seja, a importância deste estudo está na modelagem e discussão de problemas de escassez que possam ocorrer no futuro próximo comprometendo a gestão das águas, e ainda piorando o problema da qualidade ao diminuir o volume natural para diluição dos efluentes lançados nos recursos hídricos das bacias analisadas.

Com isso, o objetivo geral desse artigo é analisar o sistema das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí - PCJ em cenários futuros de oferta e de demanda hídricas: determinando se poderia haver ocorrência de colapso no sistema de captação hídrica por déficit de oferta; e elaborando três cenários do sistema sobre a captação para abastecimento urbano de água com base no aumento populacional e metas de consumo urbano *per capita* (mínimo, médio e máximo) definidas no plano de bacia.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Método

O método utilizado para a análise da disponibilidade hídrica das Bacias do PCJ, em termos de oferta e de demanda, foi o da dinâmica de sistema por meio do programa computacional Vensim PLE ® (*software* da *Ventana Systems Inc.*).

Assim, já que nenhuma abordagem pode atender todas as motivações de pesquisa, é necessário incorporar diferentes forças metodológicas em uma estrutura personalizada para se adaptar aos objetivos da pesquisa em particular, ou seja, simulação por meio de dinâmica de sistemas.

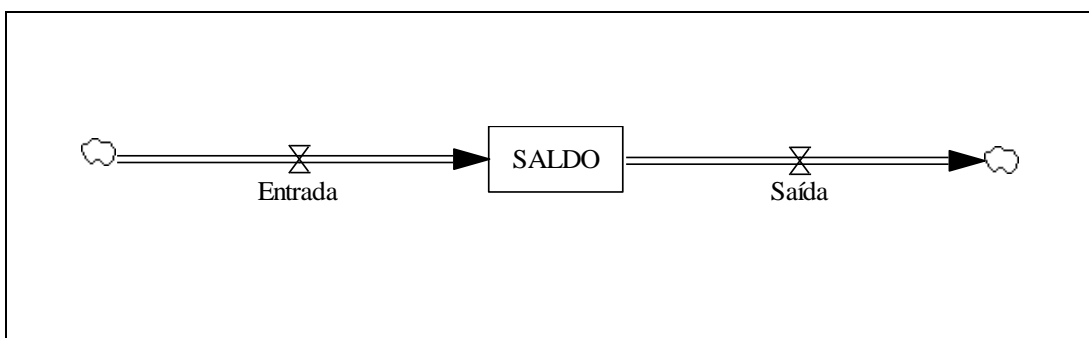
A dinâmica de sistemas, originalmente concebida por Jay W. Forrester, em 1958, foi desenvolvida para simular sistemas complexos com uma rede interativa de informações técnicas e de relações não-lineares. Com foco na resolução de problemas, a dinâmica de sistemas foi desenvolvida para compreender as interações entre processos físicos, os fluxos de informação e política intervenções para proporcionar uma plataforma sólida de teste das várias utilidades das alternativas políticas em questão (FORRESTER, 1971; STERMAN, 2000).

A dinâmica de sistemas desenvolveu-se quase junto com o Pensamento Sistêmico, que aponta para uma visão de mundo onde os inter-relacionamentos e

suas estruturas condicionam o comportamento dos sistemas que nos rodeiam. A Dinâmica de Sistemas permite fazer modelos da maioria dos sistemas conhecidos e, com o apoio de alguns softwares para uso em computadores pessoais, podem simular o comportamento desses sistemas ao longo do tempo (COSTA, 2004).

Como o estudo dos sistemas a construção de modelos com o apoio da dinâmica de sistemas implica em processos de ensino-aprendizagem inter e transdisciplinares. Desde o desenvolvimento de alguns softwares de dinâmica de sistemas (como o Vensim), esta abordagem tornou-se mais “amigável” e a sua aplicação ganhou popularidade em vários domínios de investigação. Em especial, com a capacidade de realizar interações entre os complexos econômicos e ambientais, a dinâmica de sistemas tem sido aplicada na construção de modelos de desenvolvimento sustentável, sistemas ambientais, planejamento energético e modelagem ecológica entre outros (JIN, XU & YANG, 2009).

Conforme Costa (2004), os resultados em um modelo genérico de dinâmica de sistema são apresentados no saldo (estoque), que representa o acúmulo no sistema resultante da diferença entre variáveis (fluxos) de entrada e saída retratando o estado do sistema em dado ponto no tempo, como pode ser observado na Figura 1. Já os fluxos resultam de decisões dos agentes e políticas sobre um sistema afetando o estoque.



**Figura 1 – Modelo genérico de análise em dinâmica de sistema.**

Fonte: Adaptado de Costa (2004).

Segundo Vieira (2008), o modelo matemático utilizado na dinâmica de sistemas para representar a forma agregada de estoque e fluxo tem a seguinte expressão:

$$\text{Estoque} (t) = \int_{t_0}^t [\text{Fluxo de Entrada} (s) - \text{Fluxo de Saída} (s)] ds + \text{Estoque} (t_0)$$

Onde, o Fluxo de Entrada (s) representa o valor do fluxo de entrada em qualquer tempo s, entre o tempo inicial  $t_0$  e o tempo corrente t. Já, a taxa líquida de mudança de qualquer estoque, sua derivada, é o fluxo de entrada menos o fluxo de saída, definido pela seguinte equação diferencial:

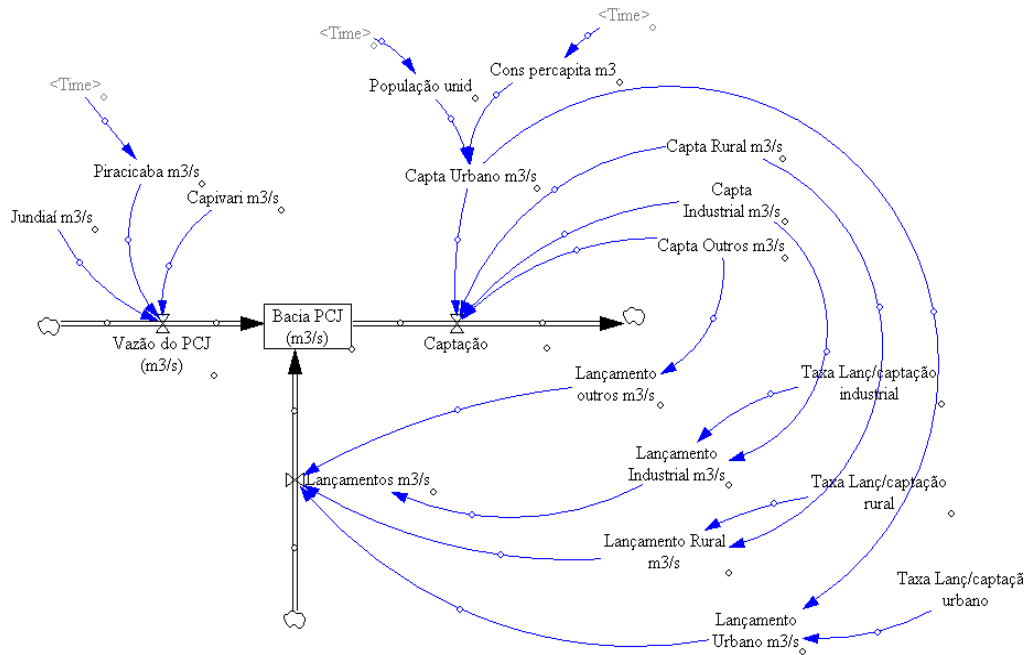
$$d(\text{Estoque}) / dt = \text{Fluxo de Entrada} (t) - \text{Fluxo de saída} (t)$$

Neste artigo a aplicação da dinâmica de sistema foi utilizada para a simulação e análise do complexo de bacias hidrográficas, por meio das vazões, captações de água e lançamento de efluentes; e suas interações com o complexo sócio-econômico com o consumo de água urbano, rural, industrial e as taxas de crescimento da população e variações do consumo per capita, para o período de 2003 a 2050.

Para a simulação e análise foram estudadas as bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (PCJ) considerando três cenários cuja variável de consumo urbano per capita apresentou valores diferentes (mínimo, médio e máximo) conforme metas definidas nos prognósticos do Plano das Bacias PCJ de 2004-2007.

Neste trabalho a qualidade dos recursos hídricos (volume de carga orgânica) não foi considerada na captação de água e no lançamento de efluentes, pois o estudo se limitou à quantidade (vazão) necessária para as demandas dos setores usuários de água nas bacias PCJ.

Assim, no modelo operacional utilizado neste trabalho, apresentado na Figura 2, foram incluídas a variável de saldo que é denominada de Bacia PCJ (em  $m^3/s$ ), as variáveis de entrada que são representadas pelas vazões e lançamentos, e ainda, a variável de saída representada pelas captações hídricas dos setores de usuários da água.



**Figura 2 – Modelo operacional da dinâmica de sistema aplicada a Bacia do PCJ para a análise do balanço hídrico em três cenários de demanda urbana.**

Fonte: Elaboração dos autores utilizando o Vensim PLE (Vensim, 2010).

Nas variáveis de entrada, as vazões (em  $\text{m}^3/\text{s}$ ) são decorrentes das bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá; e os lançamentos de efluentes (em  $\text{m}^3/\text{s}$ ) são os realizados pelos setores usuários de água urbana, rural, industrial e outros usos.

Já a variável de saída é dada pela captação hídrica (em  $\text{m}^3/\text{s}$ ) dos principais setores usuários de água como o urbano, rural, industrial e outros usos, este último de menor expressão em termos de captação.

Na análise do sistema das bacias hidrográficas do PCJ, os três cenários estabelecidos, em termos de saldo do balanço de entrada e saída, tiveram como diferenciação apenas a alteração no padrão de consumo hídrico urbano *per capita* com aumento populacional no período mantendo os demais fatores constantes (*ceteris paribus*). Os cenários foram os seguintes:

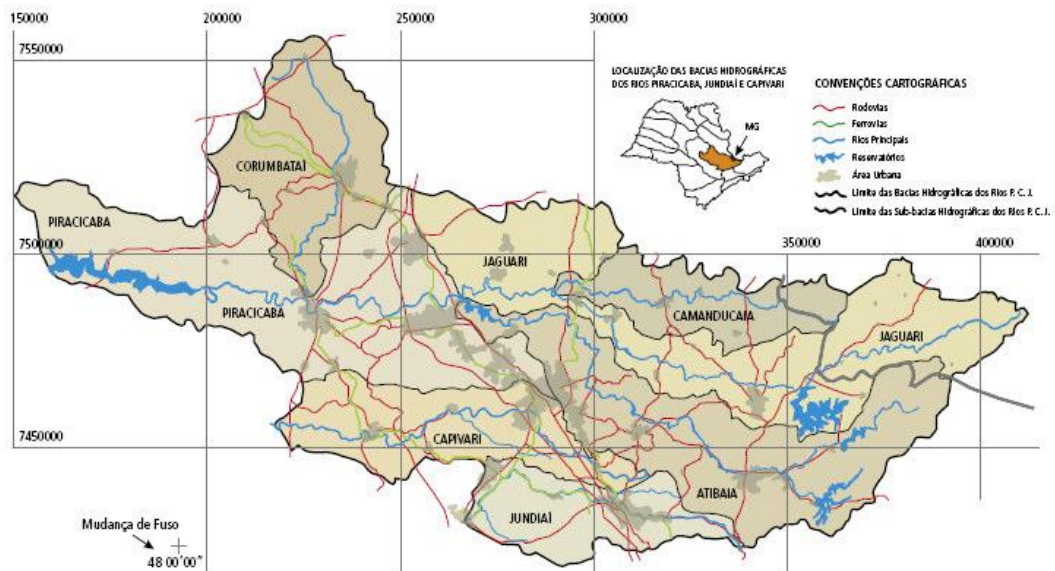
**1) Cenário de consumo urbano *per capita* mínimo** – utilizou-se os valores meta dos consumos mínimos *per capita* para o período de 2003 a 2025 do Plano das Bacias Hidrográficas 2004-2007 dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (CBH-PCJ, 2006) e projetou-se valores até 2050;

2) **Cenário de consumo urbano *per capita* médio** – utilizou-se os valores meta dos consumos médios *per capita* para o período de 2003 a 2025 obtidos pelo cálculo de média aritmética simples dos valores de consumo máximo e mínimo dos respectivos anos e projetados até 2050.

3) **Cenário de consumo urbano *per capita* máximo** – utilizou-se os valores meta dos consumos máximos *per capita* dados para o período de 2003 a 2025 no Plano das Bacias Hidrográficas 2004-2007 dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (CBH-PCJ, 2006) com projeção até 2050;

## 2.2 Fonte de dados

As bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (Figura 3) localizam-se entre as coordenadas geográficas 45° 50' e 48° 30' de longitude oeste e 22° 00' e 23° 20' de latitude sul, e abrangem uma área de 15.303,67 km<sup>2</sup>, o que equivale ao território integral de 58 municípios paulistas e 4 mineiros, assim como parte do território de outros 14 municípios (13 em SP e 1 em MG).



**Figura 3 - Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá.**

Fonte: Plano de Bacias Hidrográficas 2004-2007 dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá: síntese do relatório final (CBH-PCJ, 2006).

São três os rios principais das bacias PCJ: o rio Piracicaba que forma sua bacia (de mesmo nome) com as águas dos rios Jaguari, Atibaia, Camanducaia,

Corumbataí e Piracicaba; o rio Capivari (com bacia de mesmo nome); e o rio Jundiaí (também com bacia de mesmo nome).

Os municípios com maior população das bacias são: Campinas, Piracicaba, Jundiaí, Limeira, Sumaré, Americana, Santa Bárbara D'oeste, Rio Claro Hortolândia e Indaiatuba, que juntos representam 65% da população das bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí.

Essas bacias PCJ têm 92,6% de sua extensão localizada no Estado de São Paulo e 7,4% no Estado de Minas Gerais; e apresentam extensão aproximada de 300 km no sentido leste-oeste e 100 km no sentido norte-sul (CBH-PCJ, 2006).

Para as Bacias do PCJ foram estimadas as vazões da média plurianual ( $Q_m$ ), da mínima com 95% de permanência ( $Q_{95}$ ) e da mínima com sete dias de duração e tempo de retorno de 10 anos ( $Q_{7,10}$ ). Assim os valores utilizados, calculados a partir do Método da Regionalização Hidrológica, foram retirados do Relatório de Relatório de Situação da Gestão das Bacias do PCJ (THESIS, 2008).

Os dados de vazão (Tabela 1) das cinco sub-bacias (Camanducaia, Jaguari, Atibaia, Corumbataí e Piracicaba) que formam o total da bacia do Piracicaba, o total da bacia do Capivari e o total da bacia do Jundiaí foram obtidos do Relatório de Situação da Gestão das Bacias do PCJ (THESIS, 2008) e Plano das Bacias Hidrográficas 2004-2007 dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (CBH-PCJ, 2006).

**Tabela 1 – Disponibilidade hídrica nas bacias e sub-bacias do PCJ, no período de 2002 a 2008.**

Sub-bacia (SB) e Bacia	Disponibilidade hídrica (m <sup>3</sup> /s)			
	2002 a 2003	2004 a 2006	2007	2008
SB Camanducaia	3,50	3,50	3,50	3,50
SB Jaguari	6,52	8,65	7,97	8,40
SB Atibaia	8,40	9,97	9,48	10,47
SB Corumbataí	4,70	4,70	4,70	4,70
SB Piracicaba	8,16	8,16	8,16	8,16
<b>Total Bacia Piracicaba</b>	<b>31,28</b>	<b>34,98</b>	<b>34,01</b>	<b>35,23</b>
<b>Total Bacia Capivari</b>	<b>2,38</b>	<b>2,38</b>	<b>2,38</b>	<b>2,38</b>
<b>Total Bacia Jundiaí</b>	<b>3,30</b>	<b>3,30</b>	<b>3,50</b>	<b>3,30</b>
<b>TOTAL BACIAS PCJ</b>	<b>36,96</b>	<b>40,66</b>	<b>39,69</b>	<b>40,91</b>

Fonte: adaptado de Thesis (2008).

As informações sobre captação de água para abastecimento do setor urbano foram obtidas com dados da população (Tabela 2) e do consumo *per capita* (Tabela 3) do Plano das Bacias Hidrográficas 2004-2007 dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (CBH-PCJ, 2006).

**Tabela 2 – Prospecção e população total e urbana das Bacias do PCJ, período de 2000 a 2025.**

<b>Ano</b>	<b>População Total - PCJ (unid.)</b>	<b>População Urbana - PCJ (unid.)</b>
<b>2000</b>	4.220.000	3.970.000
<b>2003</b>	4.667.000	4.386.980
<b>2007</b>	5.018.000	4.716.920
<b>2012</b>	5.423.000	5.097.620
<b>2014</b>	5.572.000	5.237.680
<b>2025</b>	6.219.000	5.845.860

Fonte: Adaptado do Plano das bacias hidrográficas 2004-2007 dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (CBH-PCJ, 2006), considerando um percentual fixo para a população urbana de 94% da população total.

Para estimar a evolução populacional urbana no ano 2050 foi elaborada uma regressão logarítmica ( $y = 146914537,68 \ln(x) - 1112550932,61$ , com  $R^2 = 0,97$ ) com base nos dados obtidos da Tabela 2. Esta regressão projetou uma população urbana nas Bacias PCJ de 7.759.837 habitantes no ano de 2050.

**Tabela 3 - As metas de distribuição de água e de redução do consumo e de perdas nos sistemas de abastecimento de água adotados no Plano de Bacias visando à projeção da demanda futura de água nas bacias PCJ, período de 2007 a 2025.**

<b>Meta</b>	<b>2007</b>	<b>2012</b>	<b>2014</b>	<b>2025</b>
<b>Atendimento do sistema (mínimo admitido)</b>	99,00%	99,50%	99,50%	100,00%
<b>Perda máxima no sistema</b>	35,00%	30,00%	27,50%	25,00%
<b>Consumo máximo <i>per capita</i> (L/hab.dia)</b>	450	400	375	300
<b>Consumo mínimo <i>per capita</i> (L/hab.dia)</b>	100	125	125	150
<b>Consumo médio <i>per capita</i> (L/hab.dia)<sup>(1)</sup></b>	275	263	250	225

Fonte: adaptado do Plano das bacias hidrográficas 2004-2007 dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (CBH-PCJ, 2006).

Nota: <sup>1</sup> Estimativas calculadas pelos autores com base nos consumos máximos e mínimos.

As captações de água (Tabela 4) pelos setores rurais, industriais e outros usos juntamente com os lançamentos de efluentes (Tabela 5) de todos os setores foram obtidas também Plano das Bacias Hidrográficas 2004-2007 dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (CBH-PCJ, 2006).

Tabela 4 – Vazões captadas nas Bacias do PCJ pelos principais setores.

Sub-bacia (SB) e Bacia	Captação (m <sup>3</sup> /s)					
	Uso Urbano	Uso Industrial	Uso Rural	Outros	Total	Total (%)
SB Piracicaba	2,694	4,355	1,673	0,057	8,779	28,2
SB Atibaia	2,506	0,696	0,733	0,061	3,996	12,8
SB Jaguari	2,602	3,359	1,258	0,012	7,231	23,2
SB Camanducaia	0,293	0,110	0,602	0,007	1,012	3,2
SB Corumbataí	5,512	3,009	1,590	0,011	10,122	32,5
<b>Total Bacia Piracicaba</b>	<b>13,607</b>	<b>11,529</b>	<b>5,856</b>	<b>0,148</b>	<b>31,140</b>	<b>75,3</b>
<b>Total Bacia Capivari</b>	<b>1,512</b>	<b>2,379</b>	<b>2,329</b>	<b>0,113</b>	<b>6,333</b>	<b>15,3</b>
<b>Total Bacia Jundiaí</b>	<b>2,248</b>	<b>0,651</b>	<b>0,933</b>	<b>0,027</b>	<b>3,859</b>	<b>9,3</b>
<b>TOTAL BACIAS PCJ</b>	<b>17,367</b>	<b>14,559</b>	<b>9,118</b>	<b>0,288</b>	<b>41,332</b>	<b>100,0</b>
<i>Bacias PCJ (%)</i>	<i>42,0</i>	<i>35,2</i>	<i>22,1</i>	<i>0,7</i>	<i>100,0</i>	

Fonte: adaptado do Plano das bacias hidrográficas 2004-2007 dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí (CBH-PCJ, 2006).

Para o cálculo de lançamento de efluentes foram obtidas taxas de lançamento em relação ao total captado por setores usuário de água.

No lançamento industrial a taxa utilizada foi de 0,769, ou 76,9% do total fixo captado pela indústria; no lançamento rural a taxa foi de 0,104 ou 10,4% da captação fixa do setor rural; o lançamento urbano utilizou taxa de 0,717 ou 71,7% do total da captação urbana. Já para o lançamento de outros usos foi utilizada a taxa de 1,0 ou 100%, apesar dos dados mostrarem uma taxa maior, pois, entendeu-se ter pouca participação no total lançado (1,9%), além de se supor, a partir dos dados verificados, um lançamento acima (65,6%) do valor captado outorgável para outros usos.

Tabela 5 – Lançamentos de efluentes nas Bacias do PCJ pelos principais setores.

Sub-bacia (SB) e Bacia	Lançamento (m <sup>3</sup> /s)					
	Uso Urbano	Uso Industrial	Uso Rural	Outros	Total	Total (%)
SB Piracicaba	4,059	3,775	0,121	0,040	7,995	43,8
SB Atibaia	3,327	2,937	0,278	0,006	6,548	35,9
SB Jaguari	0,917	1,290	0,128	0,017	2,352	12,9
SB Camanducaia	0,086	0,129	0,109	0,008	0,332	1,8
SB Corumbataí	0,274	0,593	0,105	0,055	1,027	5,6
<b>Total Bacia Piracicaba</b>	<b>8,663</b>	<b>8,724</b>	<b>0,741</b>	<b>0,127</b>	<b>18,255</b>	<b>72,8</b>
<b>Total Bacia Capivari</b>	<b>2,040</b>	<b>2,083</b>	<b>0,109</b>	<b>0,291</b>	<b>4,523</b>	<b>16,0</b>
<b>Total Bacia Jundiaí</b>	<b>2,242</b>	<b>0,387</b>	<b>0,096</b>	<b>0,059</b>	<b>2,784</b>	<b>11,1</b>

<b>TOTAL BACIAS PCJ</b>	<b>12,445</b>	<b>11,194</b>	<b>0,946</b>	<b>0,477</b>	<b>25,062</b>	<b>100,0</b>
<i>Bacias PCJ (%)</i>	49,7	44,7	3,8	1,9	100,0	
<i>Lançamento/Captação (%)</i>	71,7	76,9	10,4	165,6	60,6	

Fonte: adaptado do Plano das bacias hidrográficas 2004-2007 dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (CBH-PCJ, 2006).

### 3 RESULTADOS

Os resultados da análise do sistema das Bacias Hidrográficas do PCJ serão apresentados conforme os cenários propostos. Nos cenários propostos são alteradas apenas as quantidades de consumo hídrico urbano *per capita* para o exercício de dinâmica do sistema. Essas quantidades foram determinadas conforme as metas de consumo urbano mínimo e máximo do Plano das Bacias do PCJ (CBH-PCJ, 2006).

#### 3.1 Cenário de consumo urbano *per capita* mínimo

O sistema apresentado mostra o resultado do cenário de consumo *per capita* mínimo para as bacias hidrográficas do PCJ em termos de saldo do balanço hídrico de entrada e saída. Este sistema considera um crescimento do consumo hídrico urbano mínimo *per capita* entre 2003 e 2050 de 100 l/hab/dia para 150 l/hab/dia, respectivamente.

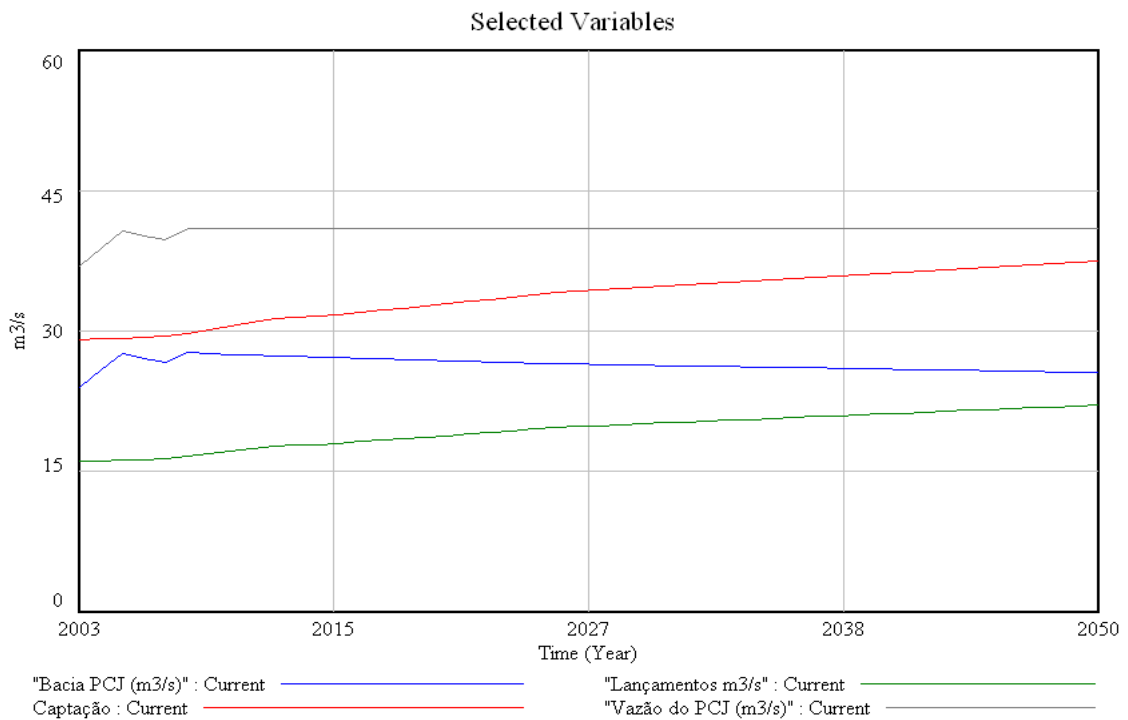
Na Figura 4 observa-se que o saldo do balanço hídrico (Bacias PCJ) que em 2003 era de 24,0 m<sup>3</sup>/s tende a apresentar um aumento para 27,3 m<sup>3</sup>/s em 2015; mas a previsão do período analisado é de diminuição em 2027 para 26,4 m<sup>3</sup>/s; chegando em 2050 com 25,6 m<sup>3</sup>/s. A disponibilidade hídrica (Vazão do PCJ) que em 2003 era de 37,0 m<sup>3</sup>/s a partir de 2008 tende a permanecer constante em 40,9 m<sup>3</sup>/s até 2050.

No ano de 2003, a disponibilidade hídrica inicial foi de 37,0 m<sup>3</sup>/s, após captação hídrica dos usuários da Bacia PCJ de 29,0 m<sup>3</sup>/s e lançamento de efluentes de 16,1 m<sup>3</sup>/s; o saldo do balanço hídrico da Bacia PCJ foi de 24,0 m<sup>3</sup>/s determinando uma diminuição na vazão final em 35%.

Em 2015, a disponibilidade hídrica inicial estimada será de 40,9 m<sup>3</sup>/s, após captação hídrica dos usuários da Bacia PCJ de 31,0 m<sup>3</sup>/s e lançamento de efluentes de 18,0 m<sup>3</sup>/s; o saldo do balanço hídrico da Bacia PCJ é estimado em

27,2 m<sup>3</sup>/s determinando uma diminuição na vazão final em 34% menor que a de 2003.

Em 2050, a disponibilidade hídrica inicial estimada será de 40,9 m<sup>3</sup>/s, após captação hídrica dos usuários da Bacia PCJ de 37,4 m<sup>3</sup>/s e lançamento de efluentes de 22,0 m<sup>3</sup>/s; o saldo do balanço hídrico da Bacia PCJ é estimado em 25,6 m<sup>3</sup>/s determinando uma diminuição na vazão final em 38%, mas com aumento em relação aos anos anteriores.



**Figura 4 – Vazão, captação, lançamento de efluentes e saldo da bacia hidrográfica do PCJ para um consumo urbano *per capita* mínimo, no período de 2003 a 2050.**

Fonte: Elaboração dos autores utilizando o Vensim PLE (Vensim, 2010).

Na análise da vazão remanescente nas Bacias PCJ o consumo urbano mínimo tende a diminuir no período analisado com 27,5 m<sup>3</sup>/s em 2010; 26,3 m<sup>3</sup>/s em 2030; e 25,6 m<sup>3</sup>/s em 2050 para uma vazão inicial no sistema PCJ de 40,91 m<sup>3</sup>/s.

As projeções das captações totais dos usos (nas Bacias PCJ) tendem ao aumento de 30,5 m<sup>3</sup>/s em 2010; para 34,8 m<sup>3</sup>/s em 2030; e para 37,4 m<sup>3</sup>/s em 2050. Já os lançamentos de efluentes totais nos recursos hídricos das Bacias PCJ acompanham o aumento de 18,8 m<sup>3</sup>/s em 2020; para 20,2 m<sup>3</sup>/s em 2030; e 21,1 m<sup>3</sup>/s em 2040.

### 3.2 Cenário de consumo urbano *per capita* médio

No sistema analisado o resultado do cenário de consumo *per capita* médio para as bacias hidrográficas do PCJ, em termos de saldo do balanço hídrico, apresenta um colapso a partir do ano 2034, considerando apenas variações na captação hídrica urbana (população e consumo urbano *per capita* conforme a média das metas propostas no plano de bacia) e mantendo-se fixos os demais usos (industrial, rural e outros). Este sistema considera um decréscimo do consumo hídrico urbano médio *per capita* de 2007 a 2050 de 274 l/hab/dia para 225 l/hab/dia.

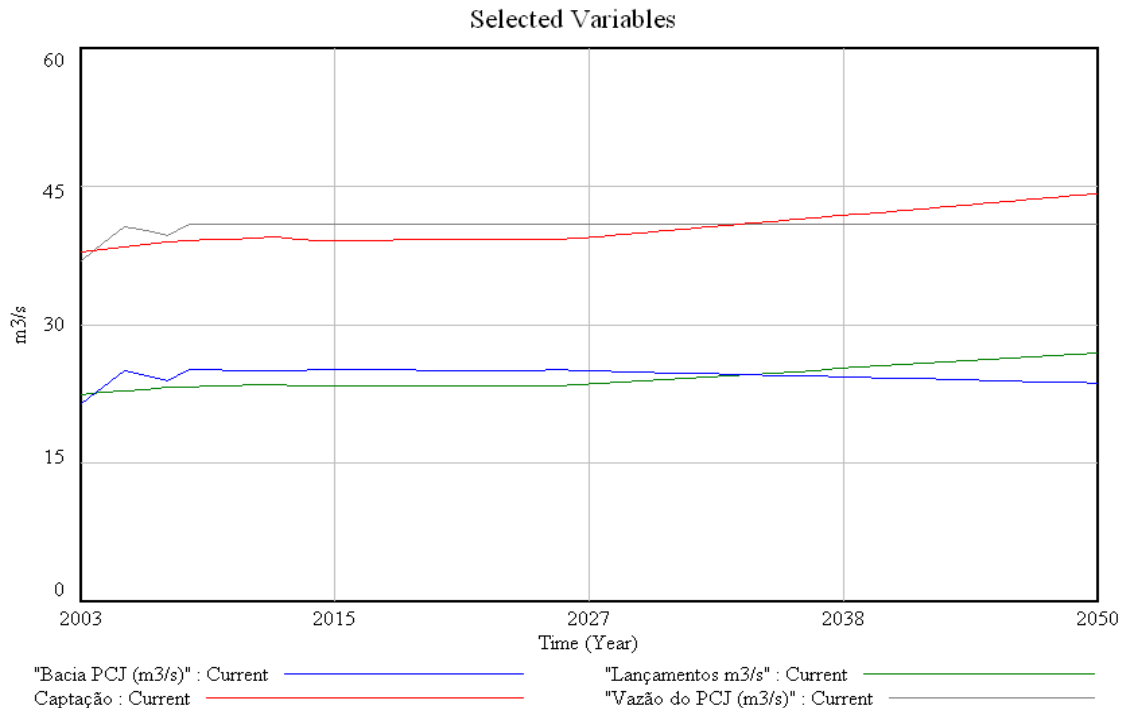
Na Figura 5 observa-se que o saldo do balanço hídrico (Bacias PCJ) que em 2003 era de 21,5 m<sup>3</sup>/s tende a apresentar um aumento para 25,1 m<sup>3</sup>/s em 2015; mas a previsão do período analisado é de diminuição em 2027 para 24,9 m<sup>3</sup>/s; passando para 24,6 m<sup>3</sup>/s em 2034; chegando em 2050 com 23,6 m<sup>3</sup>/s. A disponibilidade hídrica (Vazão do PCJ) que em 2003 era de 37,0 m<sup>3</sup>/s a partir de 2008 tende a permanecer constante em 40,9 m<sup>3</sup>/s até 2050.

No ano de 2003, a disponibilidade hídrica inicial que era de 37,0 m<sup>3</sup>/s, após captação hídrica, foi de 37,9 m<sup>3</sup>/s (maior que o valor outorgável) com lançamento de efluentes de 22,4 m<sup>3</sup>/s; com saldo do balanço hídrico da Bacia PCJ de 21,5 m<sup>3</sup>/s determinando uma diminuição na vazão final em 58%. E assim, resultando em uma relação de possível escassez de água na bacia em determinado período do ano em que ocorram captações acima da média.

Em 2034, a disponibilidade hídrica inicial estimada será de 40,9 m<sup>3</sup>/s; e após captação hídrica já tende a ultrapassar a vazão outorgável com 41,0 m<sup>3</sup>/s e lançamento de efluentes de 24,6 m<sup>3</sup>/s; o saldo do balanço hídrico da Bacia PCJ estimado fica em 24,6 m<sup>3</sup>/s determinando uma diminuição na vazão final em 60% e o início de colapso no sistema analisado.

A partir de 2035 com disponibilidade hídrica inicial estimada em 40,9 m<sup>3</sup>/s; a captação hídrica na Bacia PCJ fica acima da vazão outorgável em 41,2 m<sup>3</sup>/s e com lançamento de efluentes de 24,7 m<sup>3</sup>/s; determinando, assim, um saldo do balanço hídrico da Bacia PCJ estimado em 24,5 m<sup>3</sup>/s com diminuição na vazão final em torno de 60%.

Com isso, em 2050 a captação ainda será maior (44,2 m<sup>3</sup>/s) que a vazão outorgável (40,9 m<sup>3</sup>/s), ou seja, há uma tendência de escassez de água a partir de 2035 com conflitos entre os usos múltiplos de água caso mantenham-se as metas de aumento do consumo hídrico urbano *per capita* sem incentivo de racionamento e/ou reuso de água pelos usuários das Bacias PCJ.



**Figura 5 – Vazão, captação, lançamento de efluentes e saldo da bacia hidrográfica do PCJ para um consumo urbano *per capita* médio, no período de 2003 a 2050.**

Fonte: Elaboração dos autores utilizando o Vensim PLE (Vensim, 2010).

Na análise da vazão remanescente nas Bacias PCJ com o consumo urbano médio tende a diminuir no período analisado com 25,0 m<sup>3</sup>/s em 2010; 24,8 m<sup>3</sup>/s em 2030; e 23,7 m<sup>3</sup>/s em 2050 para uma vazão inicial no sistema PCJ de 40,91 m<sup>3</sup>/s.

As projeções das captações totais dos usos (nas Bacias PCJ) tendem ao aumento de 39,3 m<sup>3</sup>/s em 2010; para 40,2 m<sup>3</sup>/s em 2030 ultrapassando nos anos seguintes a vazão outorgável (colapso) do sistema das Bacias do PCJ; com projeção de 44,2 m<sup>3</sup>/s em 2050. Já os lançamentos de efluentes totais nos recursos hídricos das Bacias PCJ acompanham o aumento de 23,3 m<sup>3</sup>/s em 2020; para 24,0 m<sup>3</sup>/s em 2030; e 25,5 m<sup>3</sup>/s em 2040.

### 3.3 Cenário de consumo urbano *per capita* máximo

O sistema apresentado mostra o resultado do cenário de consumo *per capita* máximo para as bacias hidrográficas do PCJ em termos de saldo do balanço hídrico com colapso do sistema em todos os períodos analisados, pois a captação está acima da vazão outorgável das Bacias PCJ comprometendo os usos múltiplos de água com cenários de escassez futura.

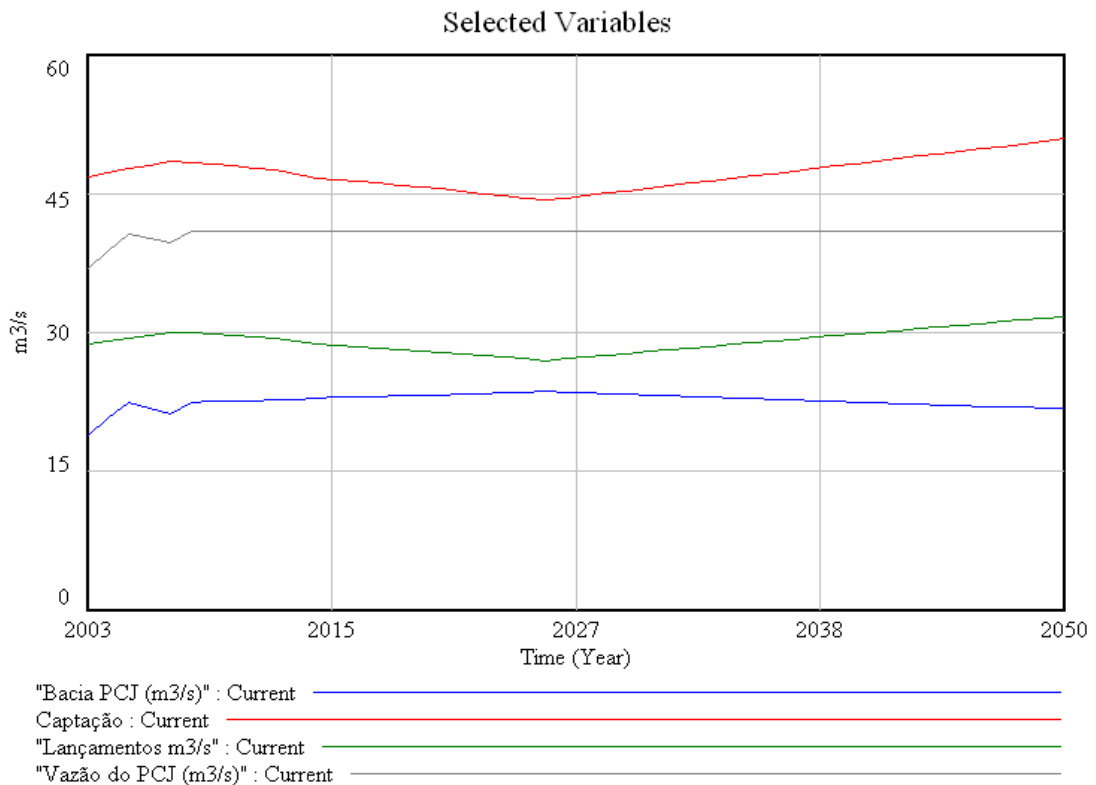
Este sistema considera um decréscimo do consumo hídrico urbano máximo *per capita* de 2007 a 2050 de 450 l/hab/dia para 300 l/hab/dia, mas ambos muito acima do suportável pelo sistema hídrico local sem novas transposições oriundas de outras bacias hidrográficas vizinhas.

Na Figura 6 observa-se que o saldo do balanço hídrico (Bacias PCJ) que em 2003 já era de apenas 19,0 m<sup>3</sup>/s que tende a apresentar um aumento para 23,5 m<sup>3</sup>/s em 2027; mas a previsão do período analisado é de diminuição a partir de 2038 para 22,6 m<sup>3</sup>/s; chegando em 2050 com 21,7 m<sup>3</sup>/s, valores bem abaixo dos outros cenários com consumo urbano menor. A disponibilidade hídrica (Vazão do PCJ) que em 2003 era de 37,0 m<sup>3</sup>/s a partir de 2008 tende a permanecer constante a média anual em 40,9 m<sup>3</sup>/s até 2050.

No ano de 2003, a disponibilidade hídrica inicial foi de 37,0 m<sup>3</sup>/s, mas após captação hídrica dos usuários da Bacia PCJ de 46,8 m<sup>3</sup>/s e lançamento de efluentes de 28,8 m<sup>3</sup>/s; o saldo do balanço hídrico da Bacia PCJ ficou em apenas 19,0 m<sup>3</sup>/s determinando uma diminuição na vazão final em 51,3%.

Em 2027, a disponibilidade hídrica inicial estimada para 40,9 m<sup>3</sup>/s, após captação hídrica dos usuários da Bacia PCJ de 44,8 m<sup>3</sup>/s e lançamento de efluentes de 27,4 m<sup>3</sup>/s (com aumento proporcional ao volume captado); resulta em um saldo do balanço hídrico da Bacia PCJ estimado de 23,5 m<sup>3</sup>/s determinando uma diminuição na vazão final em 57,0%.

Em 2050, a disponibilidade hídrica inicial estimada é de 40,9 m<sup>3</sup>/s, após captação hídrica dos usuários da Bacia PCJ de 50,9 m<sup>3</sup>/s (acima 25% da vazão outorgável) e lançamento de efluentes de 31,7 m<sup>3</sup>/s; o saldo do balanço hídrico da Bacia PCJ fica estimado em apenas 22,7 m<sup>3</sup>/s determinando uma diminuição na vazão final em 55,0% em pleno colapso do sistema hídrico das bacias PCJ.



**Figura 6 – Vazão, captação, lançamento de efluentes e saldo da bacia hidrográfica do PCJ para um consumo urbano *per capita* máximo, no período de 2003 a 2050.**

Fonte: Elaboração dos autores utilizando o Vensim (2010).

Na análise da vazão remanescente nas Bacias PCJ com o consumo urbano máximo tende a aumentar no período de 2010 a 2030, com 27,5 m<sup>3</sup>/s em 2010 e 26,3 m<sup>3</sup>/s em 2030; mas diminui para 25,6 m<sup>3</sup>/s em 2050 considerando a vazão inicial no sistema PCJ de 40,91 m<sup>3</sup>/s nestes anos.

As projeções das captações totais dos usos (nas Bacias PCJ) tendem ao aumento de 48,0 m<sup>3</sup>/s em 2010; para 45,6 m<sup>3</sup>/s em 2030; e para 50,9 m<sup>3</sup>/s em 2050, todas bem acima da média anual de 40,9 para a vazão inicial. Já os lançamentos de efluentes totais nos recursos hídricos das Bacias PCJ tendem para um aumento de 27,9 m<sup>3</sup>/s em 2020 e 2030; para 29,8 m<sup>3</sup>/s em 2040, contribuindo pouco para diminuir o déficit hídrico nas Bacias do PCJ.

#### 4 CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que o sistema das Bacias Hidrográficas do PCJ entraria em colapso, por déficit na disponibilidade hídrica,

considerando as metas de consumo urbano *per capita* médio a partir de 2034 ou consumo urbano *per capita* máximo que já inicia em déficit e permanece por todo o período.

Quanto ao método de previsão de dinâmica de sistema, considerando os dados e informações utilizados, resultou em um instrumento computacional importante para a compreensão dos modelos estudados e discussão de projeções para possíveis ações na gestão das águas em bacias hidrográficas com problemas de escassez de água em determinados períodos do ano. O programa computacional *Vensim PLE*®, após o exercício, pode ser considerado de fácil configuração de modelos e análise gráfica das informações obtidas para o tema de bacias hidrográficas.

Por fim, na análise do sistema das Bacias Hidrográfica do PCJ podem-se ampliar as análises considerando políticas de redução de consumo e de aumento na disponibilidade hídrica da bacia, como políticas de incentivo a tecnologias que economizem água em processos e produtos; reuso de água em processos industriais e de abastecimento com tratamento dos efluentes que possam ser aproveitados em usos que exijam menor qualidade; programas de pagamentos por serviços ambientais que propiciam a manutenção e recuperação de matas ciliares e de nascentes com a possibilidade de aumentar a disponibilidade hídrica das bacias entre outras.

#### BIBLIOGRAFIA

CBH-PCJ - **Plano de bacias hidrográficas 2004-2007 dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá: síntese do relatório final**. SHS Consultoria e Projetos de Engenharia S/S Ltda. São Carlos: Suprema Gráfica e Editora, 2006. 48 p. Disponível em: <<http://www.comitepcj.sp.gov.br>> Acesso em: 21 nov. 2010.

COSTA, H. L. da. **Manual de Dinâmica de Sistemas – Vensim PLE (*Personal Learning Edition*)**, 2004. Disponível em: <<http://www.vensim.com>> Acessado em 01 de dez. 2010.

FORRESTER, J.W.. *World dynamics*. Cambridge: Wright-Allen Press, 1971.

JIN, W.; XU, L. & YANG, Z. *Modeling a policy making framework for urban sustainability: Incorporating system dynamics into the Ecological Footprint*. *Ecological Economics*, v. 68, p. 2938–2949, 2009.

RODRIGUES, R. R. & BONONI, V. L. R. (org.). **Diretrizes para conservação e restauração da biodiversidade no Estado de São Paulo**. São Paulo: Instituto de Botânica, 2008.

SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M.; FOLEGATTI, M. V.; ORELLANA-GONZÁLEZ, A. M. G. Situação dos recursos hídricos nas bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá utilizando modelo desenvolvido em dinâmica de sistemas. Jaboticabal, SP. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, v.29, n.4, p.578-590, out/dez. 2009.

SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M.; FOLEGATTI, M. V.; ORELLANA-GONZÁLEZ, A. M. G. *Water resources assessment at Piracicaba, Capivari and Jundiá river basins: a dynamic systems approach*. **Water Resources Management**, v.4, p.761-773. 2010.

SOUZA, M. N.; MANTOVANI, E. C.; ORELLANA-GONZÁLEZ, A. M. G.; SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M.; SILVA, M. A. A. Dinâmica de sistemas e a modelagem com o uso do programa *stella* dos recursos hídricos da bacia do Rio Preto, afluente do Rio Paracatu. Aracaju, **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v.1, n.1, dez. 2010.

STERMAN, J.D. **Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world**. New York: Irwin McGraw-Hill, 2000.

THESIS Engenharia e Construções Ltda. **Relatório de Situação da Gestão das Bacias PCJ 2008 - R2**. Disponível em: <<http://www.agenciadeaguapcj.org.br>> Acessado em 01 de dez. 2010.

**VENSIM – Ventana Environment Simulation**. *Vensim PLE for Windows Version 5.9e*. Copyright 1988-2010. Ventana Systems, Inc. Disponível em: <[www.vensim.com](http://www.vensim.com)> Acessado em 01 de ago. 2010.

VIEIRA, W.C. Dinâmica de sistemas aplicada à gestão de recursos hídricos em bacia hidrográfica. **Revista de Economia e Agronegócio**, v.6, n.3, 2008.