

XIX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE DE SISTEMAS INTEGRADOS URBANOS DE RECURSOS HÍDRICOS POR MEIO DE ABORDAGEM SISTÊMICA COMPLEXA ADAPTATIVA

Márcio H. Giacomoni¹ & Emily M. Zechman²

Resumo – A sustentabilidade dos recursos hídricos em ambientes urbanos é propriedade emergente das interações entre diversos sub-componentes, consumidores e estratégias de gestão. A disponibilidade e a qualidade dos recursos hídricos estão ameaçados por diversos processos, incluindo o aumento de demanda causada por crescimento populacional e alterações hidrológicas dadas à mudanças no uso do solo e mudanças climáticas. Como estes processos envolvem interações entre infra-estrutura, componentes humanos e naturais, uma nova técnica de modelagem é aqui desenvolvida para capturar as interações entre os diversos sub-sistemas e seus impactos na sustentabilidade dos recursos hídricos. Esta pesquisa apresenta uma abordagem por Sistemas Complexos Adaptativos (SCA), o qual simula interações entre crescimento populacional, mudança de uso do solo, processos hidrológicos, consumo residencial de água e práticas conservacionistas. A estrutura de modelagem proposta integra um conjunto de técnicas, incluindo modelagem baseada em agentes, autômatos celulares e modelagem hidrológica. Um índice de sustentabilidade é calculado como produto da confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade do sistema e é usado para avaliar diferentes cenários de gestão e estratégias adaptativas. A abordagem proposta é aplicada para avaliar o desempenho de estratégias adaptativas de uso de recursos hídricos e uso do solo na busca de uma gestão mais sustentável dos recursos hídricos.

Abstract – The sustainability of urban water resources is the emergent property of a set of interactions across diverse water sectors, consumers, and management strategies. The availability and quality of water resources are threatened by processes including increasing water consumption caused by population growth and hydrologic alterations due to land use change and climate change. As these processes involve interactions among the built, human, and natural environments, a novel modeling technique is developed here to capture the interactions among diverse systems and their impacts on the emergent sustainability of water resources. This research presents a Complex Adaptive Systems (CAS) approach, which simulates the interactions among population growth, land use change, hydrologic processes, residential water use, and conservation practices. A modeling framework is developed to integrate a set of modeling paradigms, including agent-based models, cellular automata, and hydrologic models. A sustainability index is computed as the product of reliability, resilience and vulnerability of the system and is used to assess different management scenarios and adaptive strategies. The CAS framework is demonstrated for assessing the performance of adaptive land and water use strategies in the development of more sustainable management of water resources.

Palavras-Chave – Sistemas Complexos Adaptativos, Sustentabilidade de Recursos Hídricos, Modelagem baseada em agentes.

¹ Aluno de Doutorado, Departamento de Engenharia Civil, Texas A&M University, Endereço: 212-E Wisenbaker Engineering Research Center, 3136 TAMU, College Station, Texas, USA. CEP 77843-3136; Tel. 01 (979) 845-0443; Fax: 01 (979) 862-1542; email: ghmarcio@tamu.edu.

² Professora Assistente, Departamento de Engenharia Civil, Texas A&M University, Endereço: 205-M Wisenbaker Engineering Research Center, 3136 TAMU, College Station, Texas, USA. CEP 77843-3136; Tel. 01 (979) 845-2875; Fax: 01 (979) 862-1542; email: ezechman@tamu.edu.

INTRODUÇÃO

A qualidade e disponibilidade dos recursos hídricos é função de diversas interações espaço-temporais entre sistemas naturais, sociais, econômicos e regulatórios. Por exemplo, clima, hábitos de consumo, estruturas tarifárias e zoneamento de uso do solo impactam o estado dos recursos hídricos e são afetados por este estado; estas interações podem resultar em comportamentos não-lineares e complexos do sistema. Paradigmas convencionais de modelagem do tipo “entrada-e-saída” que normalmente são utilizados para abordar questões como disponibilidade hídrica, controle de inundações, rede de distribuição de água e alocação de recursos hídricos podem negligenciar as interações de múltiplos componentes de um sistema hídrico urbano. De forma a permitir um manejo mais sustentável dos recursos hídricos, um novo paradigma de modelagem, descrito em Giacomoni e Zechman (2010), utiliza uma abordagem por Sistemas Complexos Adaptativos (SCA) (Holland, 1995), o qual é caracterizado pela interação de componentes que geram as propriedades do sistema emergente através de *feedback* dinâmico. A abordagem proposta por SCA em sistemas hídricos urbanos simula as interações do crescimento populacional, mudança de uso do solo, processos hidrológicos, consumo residencial de água e operação de reservatórios através da integração de simulação hidrológica com outras técnicas de simulação como a modelagem baseada em agentes (Axelrod, 1997) e autômatos celulares (Wolfram, 1983). A metodologia por SCA proposta também permite a avaliação de estratégias de manejo adaptativas, as quais podem ajudar a melhorar a sustentabilidade dos recursos hídricos quando comparadas com manejos pré-existentes, pois tornam os sistemas e seus componentes mais robustos em situações de estresse.

Assim como o crescimento populacional, as mudanças climáticas e a redução de fontes confiáveis de recursos hídricos aumentam os riscos, as vulnerabilidades e os custos dos sistemas hídricos urbanos, práticas de gestão mais eficientes, como as estratégias adaptativas, podem ter impacto significativo sobre a sustentabilidade. A seleção de estratégias alternativas, no entanto, exige a definição de métricas de sustentabilidade claras e concisas. O manejo dos recursos hídricos é feito normalmente por meio de métricas convencionais de engenharia, como volumes d’água, porcentagem de atendimento de demandas ou taxas constantes de vazão ecológicas. O manejo sustentável dos recursos hídricos, no entanto, é um objetivo de longo prazo e é de difícil quantificação. Métricas comuns de engenharia de recursos hídricos podem não capturar algumas vantagens que outras estratégias de gestão possuem na busca por um abastecimento de água mais sustentável. O presente trabalho expande a abordagem por SCA para sistemas hídricos urbanos e quantifica a sustentabilidade de estratégias de manejo utilizando uma métrica específica. Além disso, a modelagem computacional é utilizada para avaliar a efetividade de estratégias adaptativas de conservação do uso de água e de uso do solo. A metodologia é testada em um estudo de caso

ilustrativo do sistema de recursos hídricos da cidade de Arlington, Texas, Estados Unidos da América.

ESTRUTURA COMPUTACIONAL

Uma estrutura computacional foi desenvolvida para modelar as interações entre os processos de crescimento populacional, mudança de uso do solo, operação de reservatório e consumo doméstico de água. A estrutura é composta por seis componentes, como ilustrado na Figura 1. O processo mudança de uso do solo é simulado através da técnica autômatos celulares, a qual representa o crescimento urbano através da relação de vizinhança entre células. A cada incremento temporal, a cobertura do solo é atualizada e utilizada como dado de entrada para o modelo hidrológico *Soil and Water Assessment Tool (SWAT)* (Arnold *et al.*, 1998), o qual calcula o processo de escoamento superficial e vazão em rios. O modelo de mudança de uso do solo está conectado ao modelo de crescimento populacional por meio da variável área ocupada. Um modelo residencial de usos finais de água baseado em agentes desenvolvido por Kanta e Zechman (2010) foi incluído na estrutura para simular o uso interno e externo de água em nível residencial. Este modelo requer uma série de parâmetros usados para descrever cada uso final, como parâmetros físicos de cada uso (e.g. volumes unitários de vazão de descarga, área do jardim), hábitos dos residentes (e.g. frequência de uso do chuveiro, pia, descarga, irrigação de jardim) e dados climatológicos (e.g. precipitação e evaporação). Um modelo de simulação de reservatório representa o armazenamento, a área alagada e a elevação do nível d'água em escala temporal mensal, calculado em função das variáveis de entrada (vazão, precipitação e bombeamento) e saída (evaporação, retirada para atendimento de demanda residencial e industrial e vertimento). O último componente da estrutura é um modelo que representa um agente regulador que implementa regras de operação como bombeamento, conservação do uso doméstico de água e mudança de uso do solo em função do nível de armazenamento de água no reservatório. A cada incremento de tempo, os componentes da estrutura se comunicam visando simular interações dinâmicas. A estrutura computacional foi implementada no pacote computacional Anylogic 6.5 (XJ Technologies, 2010). A descrição dos componentes e interações podem ser encontrada em detalhe em Giacomoni e Zechman (2010).

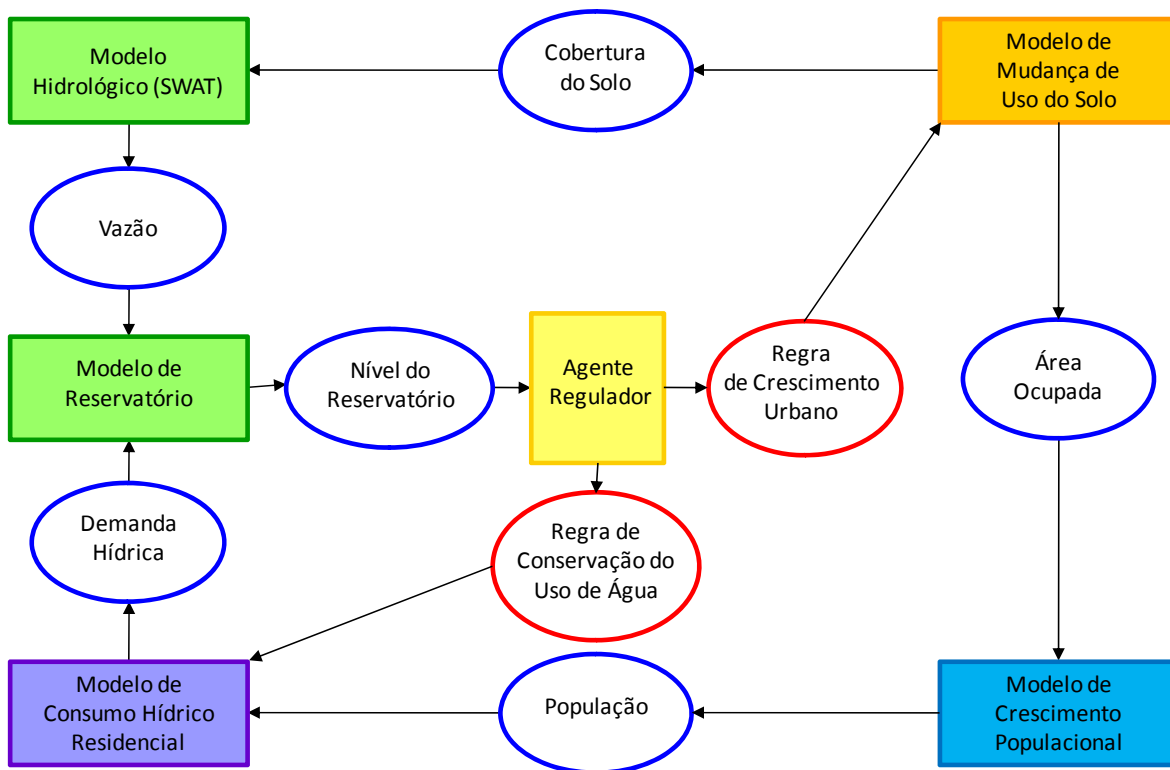


Figura 1 – A estrutura computacional é composta por seis componentes: um modelo autômato celular de mudança de uso do solo (caixa laranja), um modelo de crescimento populacional (caixa azul), um modelo hidrológico e de reservatório (caixas verdes), um modelo residencial de consumo de água baseado em agentes (caixa roxa) e um modelo agente regulador (caixa amarela). Variáveis (elipses azuis) são transferidas entre os componentes e o agente regulador implementa estratégias adaptativas (elipses vermelhas).

ÍNDICE DE SUSTENTABILIDADE

O índice usado para representar sustentabilidade (Loucks, 1997; Loucks *et al.*, 1999) é uma métrica que incorpora os conceitos de confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade do sistema, calculado a partir de um indicador de desempenho, podendo representar aspectos econômicos, sociais, ambientais e ecológicos. Dada uma série histórica de indicador de desempenho S , valores de confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade são computados a partir de uma banda de valores aceitáveis, definida por limites inferior e superior. Confiabilidade é a probabilidade que qualquer valor de S se encontra dentro da banda de valores aceitáveis. Resiliência representa quão rápido o sistema se recupera em uma eventual falha e é medida como número total de valores aceitáveis de S que seguem uma falha dividido pelo número total de falhas. Duas métricas que medem vulnerabilidade do sistema podem ser definidas, referindo-se a extensão e duração de falhas. O cálculo dessas métricas e adicionais passos estão ilustrados em um exemplo na Tabela 1. O índice de sustentabilidade do sistema é definido como o produto da confiabilidade, resiliência e vulnerabilidades normalizadas. Por exemplo, a Figura 2 ilustra uma série temporal de um indicador de desempenho de um sistema hipotético e a Tabela 1 demonstra os cálculos da confiabilidade, resiliência, vulnerabilidades e sustentabilidade. A confiabilidade é calculada pelo quociente do

número total de sucessos (22) pelo número total de valores na série temporal. A resiliência do sistema neste exemplo é 0,38, computado como o quociente de três recuperações dividido por um total de oito falhas. Em média a extensão das falhas é 12,5 unidades de S e a falha dura em média 2,7 unidades de tempo. Os valores de vulnerabilidade são normalizados para variar entre 0 e 1 e subtraídos por 1, pois o sistema mais sustentável é o menos vulnerável possível. O produto de todos os índices gera um valor de sustentabilidade igual a 0,09.

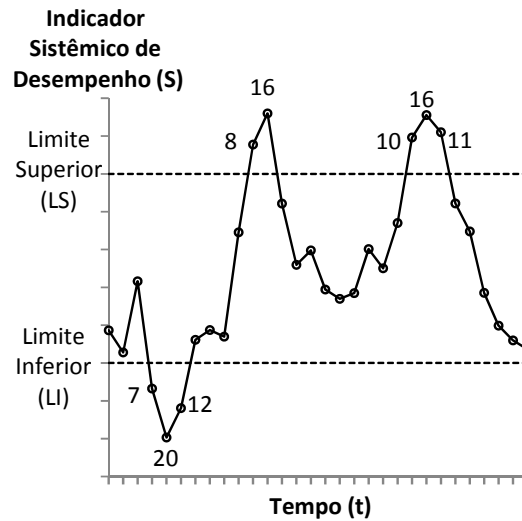


Figura 2 – Exemplo de uma série temporal de indicador sistêmico de desempenho (linha escura), limites inferior e superior (linha tracejada) e extensão das falhas (números).

Tabela 1 – Passos e equações para o cálculo da confiabilidade, resiliência, vulnerabilidades e sustentabilidade.

Passo	Equação
1	$Confiabilidade = \frac{\# Sucessos}{\# Total de Valores} = \frac{22}{30} = 0,73$
2	$Resiliência = \frac{\# de vezes um Sucesso procede uma Falha}{\# de Falhas} = \frac{3}{8} = 0,38$
3	$Vulnerabilidade de Extensão = \frac{\sum Devios}{\# de Falhas} = \frac{(7 + 20 + 12 + 8 + 16 + 10 + 16 + 11)}{8} = \frac{100}{8} = 12,5$
4	$Vulnerabilidade de Duração = \frac{\# de Falhas}{\# Eventos Contínuos de Falhas} = \frac{(3 + 2 + 3)}{3} = \frac{8}{3} = 2,7$
5	$Vulnerabilidade Relativa de Extensão = \frac{Vul. de Extensão}{Máxima Vul. de Extensão} = \frac{12,5}{20} = 0,63$
6	$Vulnerabilidade Relativa de Duração = \frac{Vul. de Duração}{Máxima Vul. de Duração} = \frac{2,7}{30} = 0,09$
7	$\hat{Índice de Sustentabilidade} = Confiabilidade \times Resiliência \times (1 - Vulnerabilidade Relativa de Extensão) \times (1 - Vulnerabilidade Relativa de Duração) = 0,73 \times 0,38 \times (1 - 0,63) \times (1 - 0,09) = 0,09$

ESTUDO DE CASO ILUSTRATIVO

A metodologia proposta e a avaliação da sustentabilidade foram aplicadas para o sistema hídrico da cidade de Arlington, Texas, localizada na porção sul da região metropolitana de Dallas/Fort Worth (Figura 3). A cidade de Arlington ocupa uma área de 254 quilômetros quadrados e possui uma população aproximada atual e projetada para 2060 de 390.000 e 472.000 habitantes (Freese & Nichols *et al.*, 2010).

As demandas da cidade de Arlington são supridas pelo Distrito Hídrico Regional de Tarrant (TRWD), o qual opera um sistema de reservatórios, bombeando água do reservatório Cedar Creek para o reservatório de Arlington. O reservatório de Arlington tem um volume útil ou volume de operação de 49,6 milhões de metros cúbicos, que inundam uma área de 7,79 quilômetros quadrados (167,64 metros acima do nível médio do mar) (TWDB, 2008). O principal tributário do reservatório de Arlington é o Córrego Village, que drena uma área de 307,4 quilômetros quadrados. O reservatório de Arlington recebe bombeamentos do reservatório Cedar Creek em taxas superiores às demandas requeridas durante os meses de menor demanda, acumulando água para ser posteriormente utilizada nos períodos de maior demanda. O presente trabalho adotou uma regra de taxas constantes de bombeamento mensal, calculados a partir dos volumes médios bombeados no período de 1999-2009 (Figura 4).

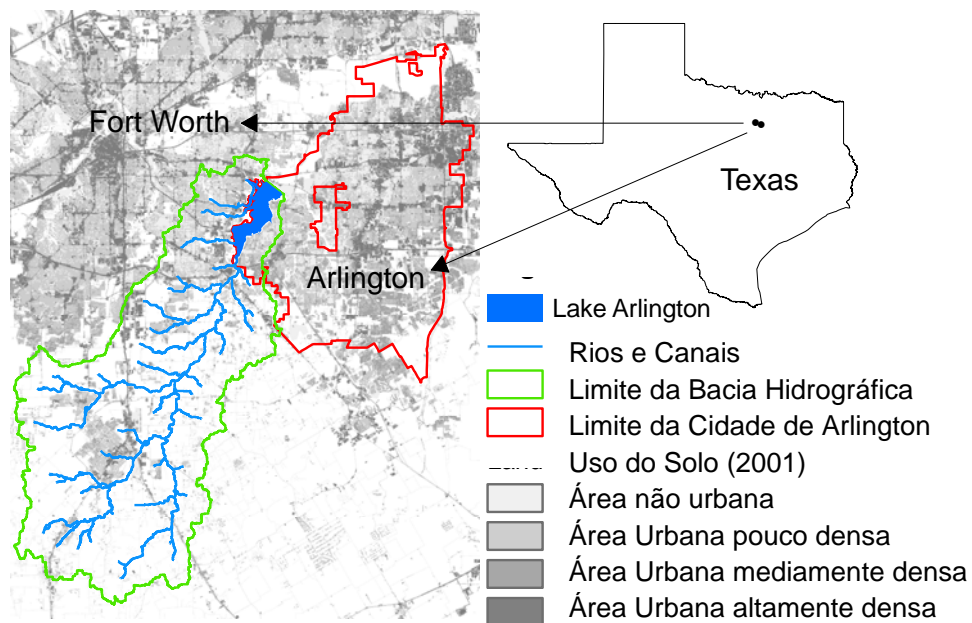


Figure 3 – Localização dos limites da cidade de Arlington (vermelho), bacia hidrográfica do córrego Village (verde) e uso do solo (cinza) no ano de 2001.

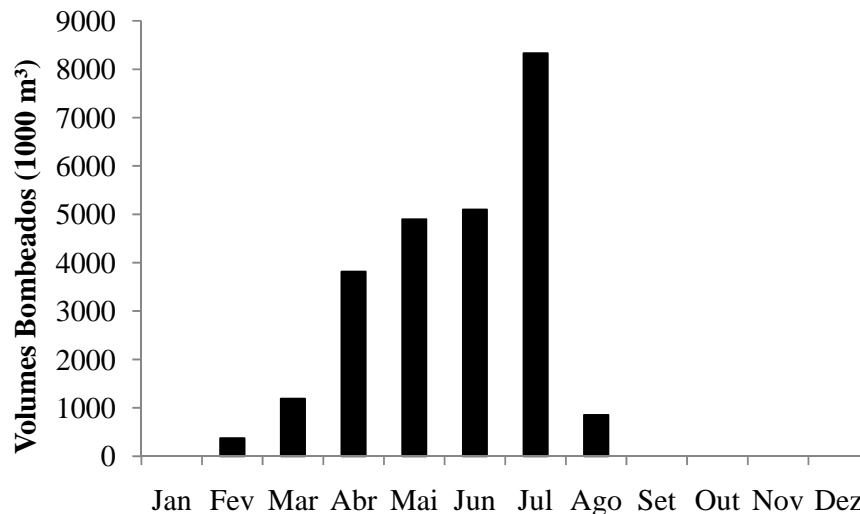


Figura 4 – Volumes mensais de bombeamento no reservatório de Arlington.

AVALIAÇÃO DA SUSTENTABILIDADE PARA CENÁRIOS DE GESTÃO

Quatro cenários de gestão foram simulados incluindo um cenário referência e duas estratégias adaptativas de gestão. Cada cenário foi simulado para um período de 60 anos (1973 – 2033). Séries históricas de precipitação e temperatura diária foram usadas como dados de entrada para o período de 1973 a 2008, e dados históricos anteriores a este período (1948 – 1972) foram utilizados no período projetado (2009 – 2033), o qual inclui o período de estiagem mais severo registrado na região (1948 – 1957).

Cenário 1 – Cenário Base

O cenário base representa o sistema simulado a partir das interações dinâmicas de mudança de uso do solo, crescimento populacional, consumo residencial de água, ciclo hidrológico superficial e operação do reservatório. O agente regulador não implementa nenhuma medida adaptativa de gestão.

Cenário 2 – Estratégia Adaptativa de Conservação Hídrica

O segundo cenário simula o sistema sob uma estratégia adaptativa de conservação hídrica. O agente regulador impõe às residências uma redução na frequência semanal da irrigação dos jardins, número definido em função da disponibilidade hídrica atual do sistema, representada pela elevação do nível do reservatório. A Figura 5 ilustra a regra implementada, que relaciona níveis críticos do reservatório e o número semanal de eventos de irrigação. As elevações utilizadas são 163,1, 164,0, 164,9 e 165,8 metros acima do nível do mar, as quais representam os níveis de 40%, 50%, 60% e 75% do volume útil ou volume máximo de operação.

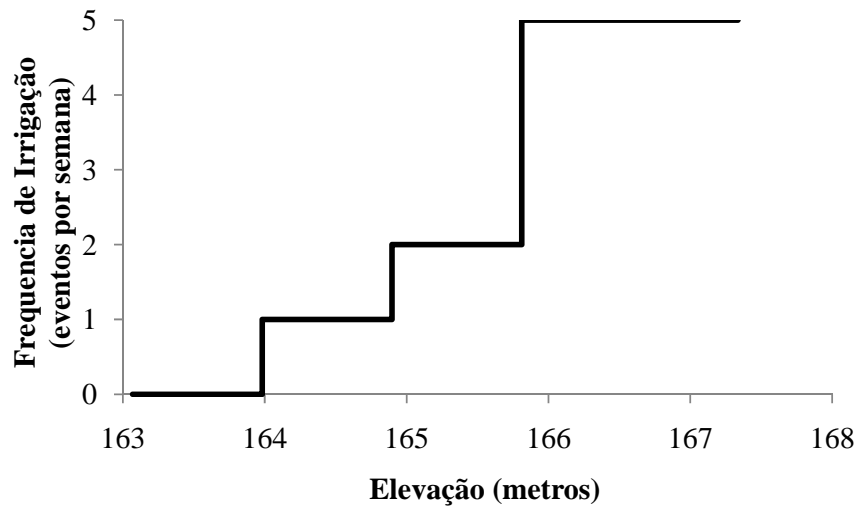


Figura 5 – Estratégia adaptativa de conservação hídrica. As elevações 163,1, 164,0, 164,9 e 165,8 metros acima do nível do mar representam 40%, 50%, 60% e 75% do volume útil ou volume máximo de operação.

Cenário 3 – Estratégia Adaptativa de Mudança de Uso do Solo

O terceiro cenário simula uma estratégia adaptativa de mudança de uso do solo, a qual permite que diferentes níveis de crescimento urbano estejam relacionados à disponibilidade hídrica. Em períodos normais de disponibilidade hídrica o crescimento urbano ocorre em níveis normais, definidos pelo modelo de mudança de uso do solo. Durante períodos de estresse hídrico, o agente regulador aplica restrições ao crescimento urbano. A probabilidade de uma célula no modelo de uso do solo mudar estado de natural para urbano é função de um parâmetro θ . Valores maiores de θ diminuem a probabilidade de mudança de uso do solo. A regra adaptativa implementada relaciona aumentos incrementais em θ em função de quedas dos níveis do reservatório (Figura 6). Os níveis escolhidos para gatilhos de implementação da regra são 20%, 40%, 60% e 75% do volume útil do reservatório.

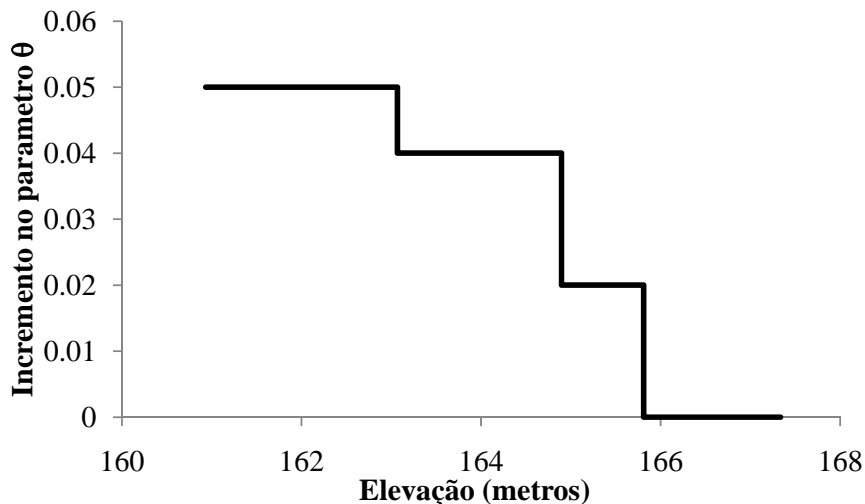


Figure 6 – Estratégia adaptativa de mudança de uso do solo. As elevações 160,9, 163,1, 164,9 e 165,8 metros acima do nível do mar representam 20%, 40%, 60% e 75% do volume útil ou volume máximo de operação.

Cenário 4 – Estratégias Adaptativas de Conservação Hídrica e Mudança de Uso do Solo Combinadas

O último cenário combina as estratégias adaptativas de conservação hídrica e mudança de uso do solo, como descritas anteriormente.

RESULTADOS

Indicadores de Componentes do Sistema

Foram escolhidos os indicadores área urbana, demanda de água residencial, vazões afluentes e armazenamento de água no reservatório como indicadores iniciais para análise dos cenários de gestão. A Figura 7 mostra o crescimento da área urbana na bacia hidrográfica do córrego Village. No cenário base, a área urbana cresce de 79 a 247 quilômetros quadrados, a taxa de crescimento médio de 1,92% ao ano. Os resultados de área urbana para o cenário de Conservação Hídrica é o mesmo do cenário base, pois não existe nenhum mecanismo influenciando a mudança de uso do solo. Nos cenários de Mudança de Uso do Solo e estratégias combinadas, as áreas urbanas finais são 230 e 233 quilômetros quadrados, respectivamente. Nestes cenários, as taxas de crescimento variam em diferente níveis, dado que o agente regulador aplica ajustes ao modelo de uso do solo em função da disponibilidade hídrica do sistema.

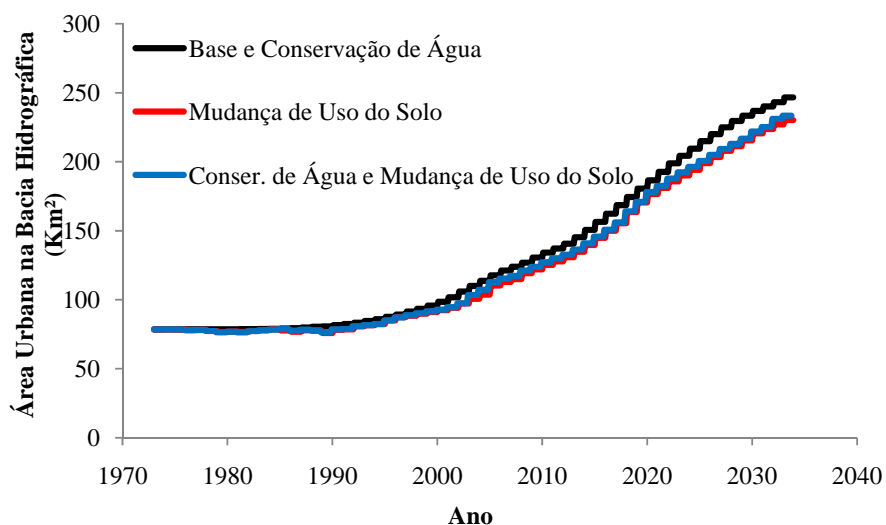


Figura 7 – Crescimento da área urbana na bacia hidrográfica do córrego Village para os quatro cenários.

As mudanças nas taxas de crescimento urbano influenciam os níveis de impermeabilização na bacia provocando a redução do escoamento superficial gerado durante eventos de precipitação e diminuição das vazões afluentes ao reservatório. A Figura 8 mostra as vazões mensais médias afluentes para o período simulado de 60 anos em milhares de metros cúbicos por mês. Os cenários base e conservação hídrica geram uma vazão média afluente mensal de 6,1 milhões de metros cúbicos, enquanto os cenários de mudança adaptativa de uso do solo e regras adaptativas combinadas geram uma vazão média mensal de 5,5 milhões de metros cúbicos.

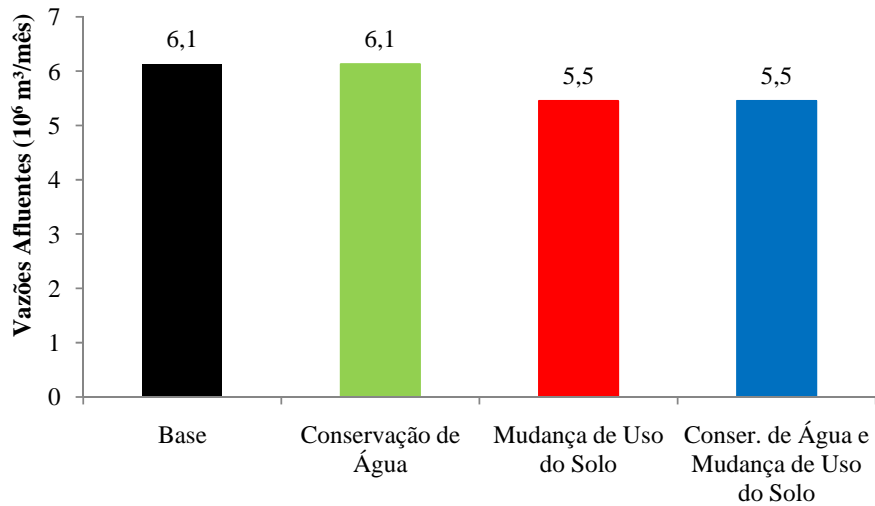


Figura 8 – Vazões médias afluentes ao reservatório para os quatro cenários de gestão.

A Figura 9 apresenta o crescimento populacional simulado da cidade de Arlington. No cenário base, Arlington possui uma população aproximada de 112 mil habitantes em 1973, a qual aumenta até 465 mil habitantes em 2033. A população no ano final de simulação é aproximadamente a mesma em todos os cenários. As taxas de crescimento populacional, no entanto, variam em função do crescimento da área urbana, causado por restrições ao crescimento urbano que desaceleram o crescimento da população nos períodos de restrição hídrica. Uma vez que o sistema se recupera dos períodos de estiagem, as taxas de crescimento urbano e populacional retornam às taxas normais.

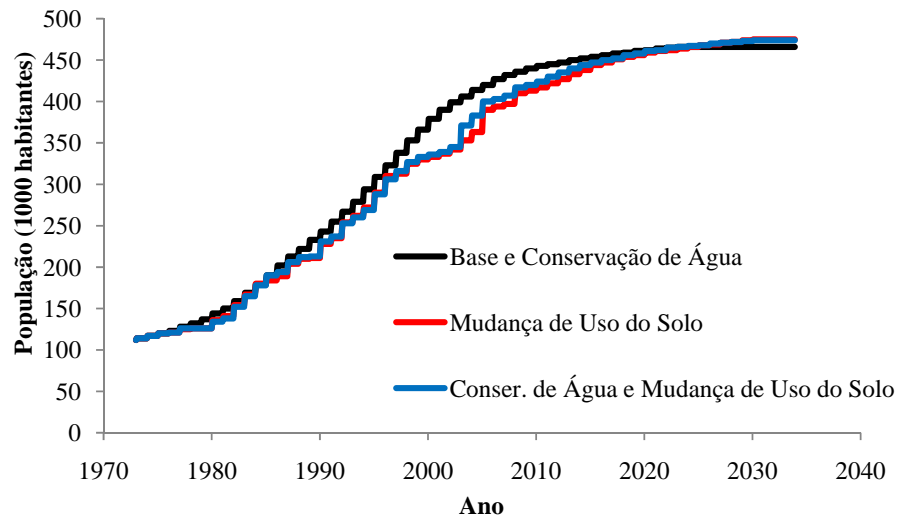


Figura 9 – Crescimento populacional de Arlington.

A demanda hídrica média também é impactada pelas interações entre diferentes mecanismos de crescimento urbano e de regras de gestão. Por exemplo, para o cenário base no período simulado, a demanda hídrica média é de 148 milhões de litros por dia e a estratégia adaptativa de conservação reduz este valor para 126 milhões de litros por dia, o que representa um decréscimo de 14,9%. A

estratégia adaptativa de mudança de uso do solo reduz a demanda média para 143 milhões de milhões de litros por dia devido diminuição do crescimento urbano e, conseqüentemente, da população. A estratégia combinada reduz a demanda média para 117 milhões de litros por dia.

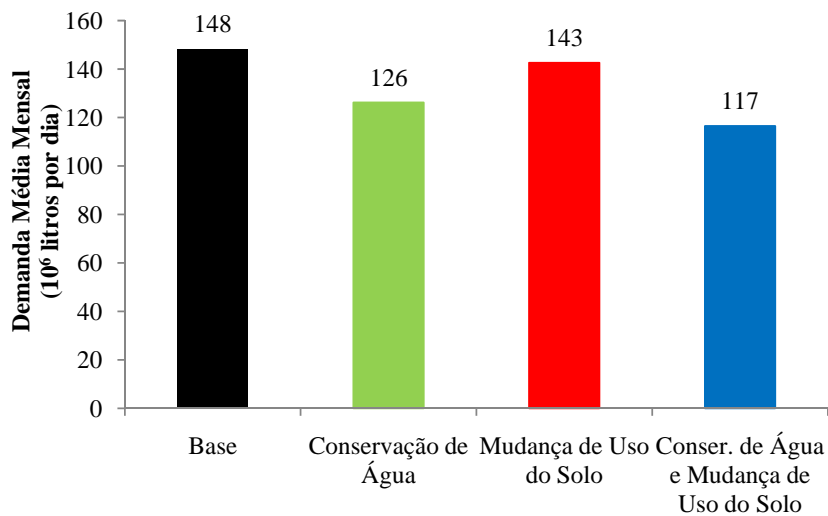


Figura 10 – Demanda média total da cidade de Arlington para os quatro cenários de gestão.

O armazenamento de água no reservatório também se altera em função das diferentes regras de gestão (Figura 11). A estratégia adaptativa de conservação permite um aumento do nível médio mensal do reservatório de 35 para 37 milhões de metros cúbicos. O aumento se dá em razão das diminuições das demandas residenciais e conseqüentes menores retiradas do reservatório. A estratégia adaptativa de mudança de uso do solo, no entanto, mostra um efeito contrário, dado pela diminuição das áreas urbanas que geram menores valores de escoamento superficial e vazões afluentes, o que reduz os níveis médios de armazenamento.

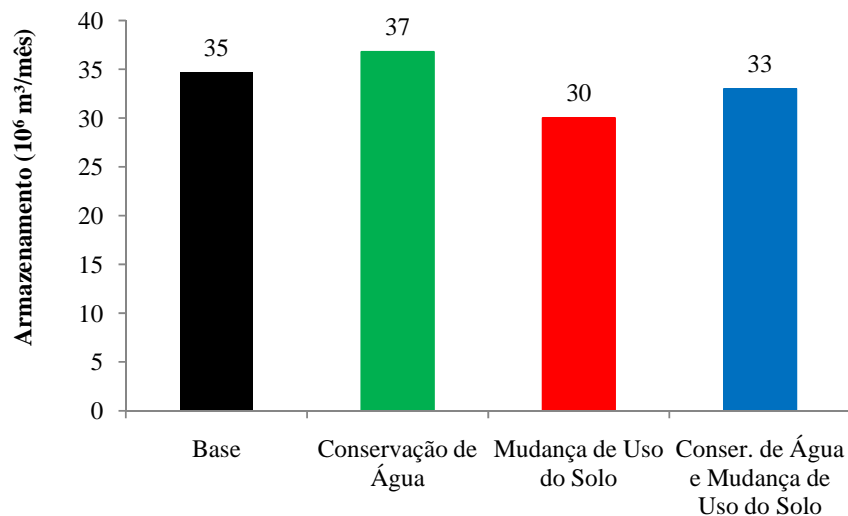


Figura 11 – Armazenamento mensal médio para os quatro cenários de gestão.

Indicadores de Sustentabilidade

A sustentabilidade do sistema hídrico da cidade de Arlington foi avaliada com base nos níveis de armazenamento do reservatório que representam a disponibilidade hídrica utilizada para suprir as demandas residenciais. Os valores de confiabilidade, resiliência, vulnerabilidades e sustentabilidade para cada um dos quatro cenários de gestão são sensíveis aos limites de armazenamento inferior e superior. Uma análise de sensibilidade foi realizada aqui para o limite inferior. O limite superior foi definido como infinito, e os valores de confiabilidade, resiliência, vulnerabilidade de extensão e sustentabilidade foram gerados a partir da variação do limite inferior de 0% a 120% do volume útil. A vulnerabilidade de duração não foi incluída no cálculo de sustentabilidade a fim de tornar a análise mais simples. Esta análise foi conduzida a fim de se avaliar o sistema sob a ótica de condições de estiagem, não sendo considerada condições de excessos hídricos.

As Figuras 12, 13 e 14 mostram a variação da confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade de extensão para diferentes níveis de limite inferior, respectivamente. Para um limite inferior de 0%, o sistema possui uma confiabilidade de 100% para todos os cenários. Com o crescimento do limite testado, a confiabilidade decresce de forma não linear. Entre todos os cenários testados, o cenário adaptativo de mudança de uso do solo possui os menores valores de confiabilidade. Neste cenário são gerados os menores valores de escoamento superficial e vazões afluentes ao reservatório, decorrente da regra de crescimento urbano implementada que reduz taxas de urbanização. De forma semelhante, os valores de resiliência são menores para o cenário de mudança de uso do solo. Este cenário resulta em um número maior de violações dos limites em comparação com o cenário base. O cenário de conservação hídrica aumenta a confiabilidade e resiliência do sistema, e reduz a vulnerabilidade em relação ao cenário base. A implantação da regra de restrições de uso de água para usos externos como irrigação em períodos de escassez eleva o nível médio do reservatório, tornando o sistema mais resiliente e capaz de recuperar-se de falhas de forma mais veloz.

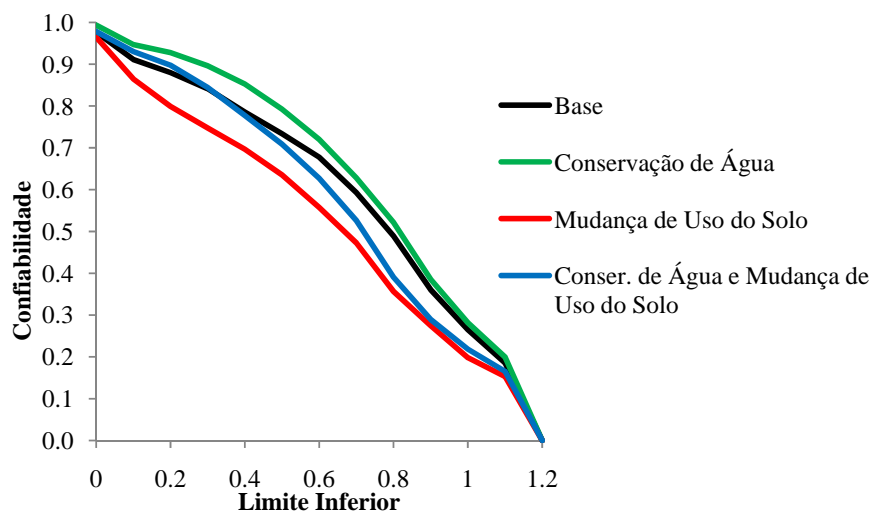


Figure 12 – Análise de sensibilidade para confiabilidade do reservatório de Arlington (Limite Superior = infinito).

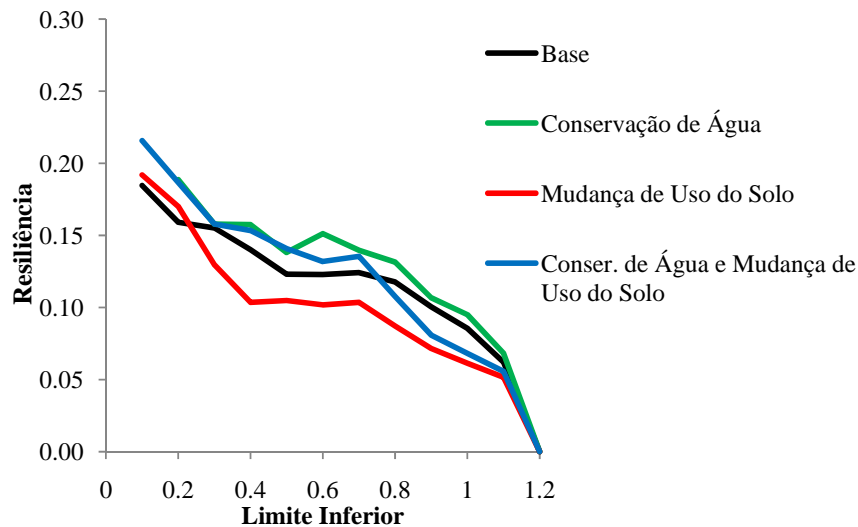


Figure 13 – Análise de sensibilidade para resiliência do reservatório de Arlington (Limite Superior = infinito).

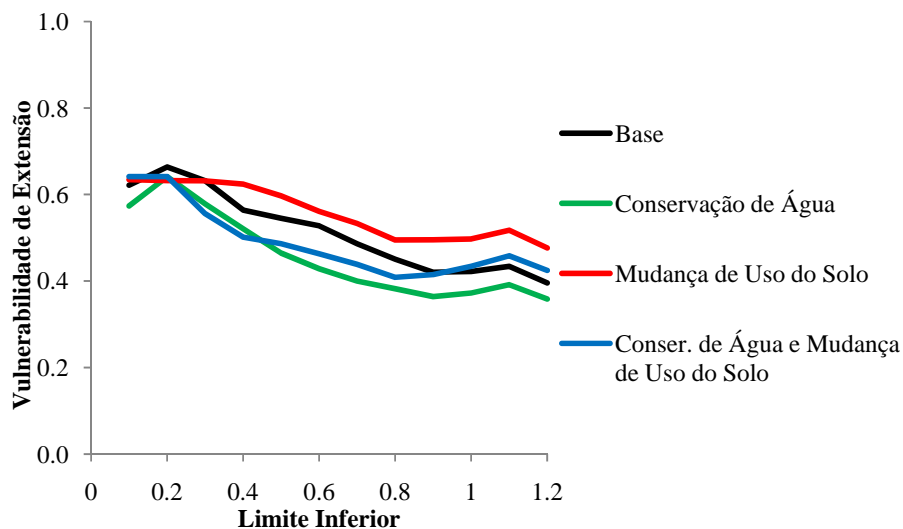


Figure 14 – Análise de sensibilidade para vulnerabilidade de extensão do reservatório de Arlington (Limite Superior = infinito).

O índice de sustentabilidade é calculado como a multiplicação da confiabilidade, resiliência e um menos a vulnerabilidade de extensão (Figura 15). Enquanto a regra de mudança de uso do solo diminui o índice de sustentabilidade e a estratégia de conservação residencial hídrica o aumenta, o cenário combinado indica um desempenho intermediário. Com o crescimento do limite inferior, os efeitos da estratégia de uso do solo são superiores e a sustentabilidade da estratégia combinada são inferiores aos valores do cenário base.

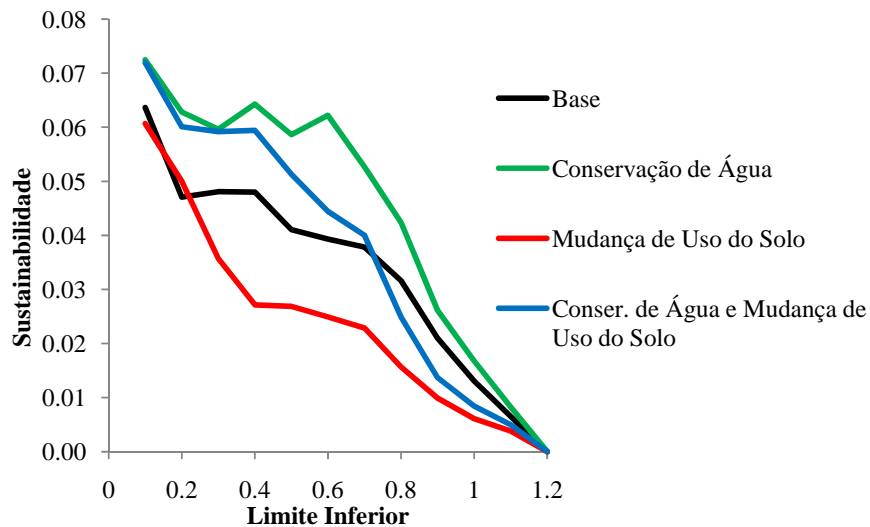


Figure 15 – Análise de sensibilidade para o índice de sustentabilidade do reservatório de Arlington (Limite Superior = infinito).

DISCUSSÃO/CONCLUSÕES

O presente trabalho demonstra uma metodologia de avaliação da sustentabilidade dos recursos hídricos por meio de uma estrutura computacional que utiliza uma abordagem sistêmica complexa adaptativa com uma análise de sensibilidade de um conjunto de métricas de desempenho. A estrutura computacional inclui a simulação dos processos mudança de uso do solo, crescimento populacional, consumo hídrico residencial, ciclo hidrológico e operação de reservatório. A abordagem foi utilizada para se testar uma estratégia adaptativa de conservação do uso de água e de mudança de uso do solo, tendo sido comparado os resultados com um cenário base em que não existe estratégia de gestão alguma implementada. Quatro cenários foram gerados: estratégia adaptativa de conservação hídrica, estratégia adaptativa de mudança de uso do solo, um cenário que combina as duas gestões e um cenário base. Um estudo de caso hipotético baseado no sistema hídrico da cidade de Arlington foi utilizado para testar a metodologia.

Um conjunto de indicadores sistêmicos foram gerados para um período de simulação de 60 anos. Crescimento populacional, crescimento da área urbana na bacia hidrográfica do reservatório de Arlington, demandas residenciais médias, vazões afluentes mensais médias e níveis médios de armazenamento no reservatório foram analisados. Da análise destes indicadores, verifica-se que os cenário combinado apresenta as economias máximas de demandas, o que indicaria a gestão mais sustentável sob a ótica das demandas.

A série temporal de armazenamento mensal do reservatório foi utilizada para a geração de uma análise de sensibilidade das métricas de desempenho do sistema confiabilidade, resiliência e vulnerabilidade. Estas métricas foram agregadas para gerar um índice de sustentabilidade. Os resultados encontrados indicam que a estratégia adaptativa de conservação hídrica aumenta a sustentabilidade do sistema em relação ao cenário base, decorrente da diminuição das demandas

residenciais hídricas durante períodos de escassez. A estratégia adaptativa de mudança de uso do solo, no entanto, diminuiu o índice de sustentabilidade, decorrência da diminuição das vazões afluentes ao reservatório. O aumento dos níveis de impermeabilidade em bacias hidrográficas causam o aumento dos processos de escoamento superficial, mas também causam outras alterações hidrológicas que não estão explicitamente incluídas na modelagem, como a redução das taxas de infiltração e recarga de aquíferos, que potencialmente podem reduzir o escoamento de base. Além disso, o índice de sustentabilidade foi utilizado somente para a avaliação de situações de escassez hídrica. Não foram avaliados outros processos como a perda de reservas hídricas devido a vertimentos e processo de cheias e inundações. Por exemplo, este tipo de análise pode ser feita executando-se semelhante metodologia de análise de sensibilidade para o limite superior, o que indicaria os reais benefícios da aplicação de estratégias de conservação do uso da água e do solo.

A estrutura computacional proposta possui a flexibilidade da inclusão de componentes e processos adicionais, como por exemplo, qualidade da água, e poderá ser utilizado no futuro para a avaliação de diferentes estratégias adaptativas. Futuro trabalho deverá incorporar estudos de otimização a fim de se identificar estratégias ótimas para o uso da água e do solo a fim de se maximizar a sustentabilidade de sistemas hídricos urbanos.

REFERÊNCIAS

- Arnold, J.; Srinivasan, R.; Muttiah, R.; Williams, J. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment - Part 1: Model development. **Journal of the American Water Resources Association** 34(1), pp. 73-89.
- Axelrod, R. M. (1997). **The complexity of cooperation: agent-based models of competition and collaboration**. Princeton: Princeton University Press, N.J.
- Freese & Nichols, Inc.; Alan Plummer Associates, Inc.; CP&Y, Inc.; Cooksey Communications, Inc. (2010). **2011 Region C Water Plan**. Region C Water Planning Group.
- Freese & Nichols, I. (1999). **Investigation of Lake Arlington Operation Policies**. Tarrant Regional Water District, Fort Worth, TX.
- Giacomini, M. H.; Zechman, E. M. (2010). A complex adaptive systems approach to simulate urban water resources sustainability. **World Environmental and Water Resources Congress 2010: Challenges of Change**, Providence, Rhode Island.
- Holland, J. H. (1995). **Hidden order: how adaptation builds complexity**. Addison-Wesley, Reading, Mass.
- Kanta, L., and Zechman, E. M. (2010). An Agent-Based Modeling Approach to Evaluate the Impact of Conservation Practices on Water Resources Sustainability". **World Environmental and Water Resources Congress 2010: Challenges of Change**, Providence, Rhode Island, 432.
- Loucks, D. (1997). Quantifying trends in system sustainability". **Hydrological Sciences Journal-Journal Des Sciences Hydrologiques**, 42(4), 513-530.
- Loucks, D. P.; Gladwell, J. S; International Hydrological Programme; and Unesco. (1999). **Sustainability criteria for water resource systems**. Cambridge: Cambridge University Press;UNESCO.
- TWDB (2008). **Volumetric Survey of Lake Arlington**. Texas Water Development Board.
- Wolfram, S. (1983). Statistical Mechanics of Cellular Automata. **Reviews of Modern Physics**, 55(3), 601-644.
- XJ Technologies (2010). **AnyLogic 6.5 User's Guide**. Disponível em <<http://www.xjtek.com>> Acesso em 8 jan 2011.