

Modelagem Baseada em Agentes para Análise de Recursos Hídricos

Giovani P. Farias¹, Bruna S. Leitzke¹, Míriam B. Born²,
Marilton S. de Aguiar², Diana F. Adamatti¹

¹Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional (PPGMC)
Universidade Federal do Rio Grande (FURG) – Rio Grande/RS – Brasil

²Programa de Pós-Graduação em Computação (PPGC)
Universidade Federal de Pelotas (UFPel) – Pelotas/RS – Brasil

brunaleitzke@hotmail.com

{dianaada, giovanifarias}@gmail.com

{marilton, mbborn}@inf.ufpel.edu.br

Abstract. *The paper aims to present a river basin modelling using GAMA platform for water resources analysis. Currently, several models based on multiagent systems (MAS) are used for natural resources management and they present satisfactory results for this type of scenario. GAMA is agents based and widely used in this context with several studies already published. In this study, the São Gonçalo and Lagoa Mirim basins were considered from georeferenced data. In the modelling, regions and rivers are agents on the system where rivers water can flow among neighbours regions.*

Resumo. *O artigo tem por objetivo apresentar a modelagem de uma bacia hidrográfica para a análise do uso dos recursos hídricos utilizando a plataforma GAMA. Na atualidade, diversos modelos baseados em sistemas multiagente (SMA) são utilizados para a gestão de recursos naturais e apresentam resultado satisfatório neste tipo de cenário. A ferramenta GAMA é baseada em agentes e amplamente utilizada neste contexto, com diversos estudos já publicados. Neste estudo, considerou-se a bacia hidrográfica São Gonçalo e Lagoa Mirim a partir de dados georreferenciados. Na modelagem, regiões e rios são agentes no sistema, sendo que a água dos rios pode fluir entre regiões vizinhas.*

1. Introdução

Os recursos naturais compreendem os elementos da natureza aos quais os seres humanos utilizam para a sua sobrevivência, sendo estes renováveis ou não renováveis. Com a crescente demanda da população mundial, estes recursos tornam-se escassos em algumas regiões, além disso, o mau uso, a falta de gerenciamento e, às vezes, o compartilhamento dos mesmos acarretam graves conflitos. Os modelos baseados em agentes são ferramentas que surgiram da necessidade de capturar melhor as características de sistemas complexos, em particular, os sistemas ecológicos e sociais, pois abrangem várias áreas de estudo. Deste modo, a partir da simulação multiagente, é possível projetar políticas adequadas para resolver os problemas mencionados [Filatova et al. 2013]. A modelagem multiagente simula sistemas com base na tomada de decisões e ações de atores individuais ou grupos de atores, nas interações entre si e com o ambiente em que estão inseridos.

A gestão de recursos renováveis em sistemas complexos, principalmente o recurso hídrico no contexto da bacia hidrográfica, é um importante meio na busca de possíveis soluções aos problemas enfrentados pelos interessados em um determinado ecossistema [Adamatti 2007]. Neste trabalho, propõe-se como estudo de caso a bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo, localizada no sudeste do Rio Grande do Sul/RS, a qual possui abrangência nas províncias da planície costeira Uruguaio-Sul Riograndense. Os municípios que englobam a bacia são: Arroio Grande, Candiota, Canguçu, Capão do Leão, Chuí, Jaguarão, Pelotas, Rio Grande e Santa Vitória do Palmar, com uma área total de 25.961,04 km² [SEMA 2019].

A modelagem da bacia foi realizada na plataforma de código aberto GAMA (*GIS Agent-based Modeling Architecture*), sendo considerado os dados geográficos da região de estudo, onde cada região hidrográfica e seus rios foram considerados agentes no modelo. A simulação possibilita diversas análises do ambiente, tais como: o consumo de água e taxa de produção por região, o volume de água dos rios em cada região e o fluxo de água entre rios de regiões vizinhas.

O artigo encontra-se organizado da seguinte forma. Na Seção 2 são apresentados conceitos básicos sobre Sistemas Multiagente. Na Seção 3 é introduzida a plataforma GAMA com suas características e funcionalidades. Na Seção 4, é apresentado o estudo de caso, bem como, a modelagem de uma bacia hidrográfica com a utilização da plataforma GAMA. As análises das simulações, realizadas no modelo de bacia hidrográfica, estão na Seção 5. Finalmente, a Seção 6, apresenta as conclusões e trabalhos futuros.

2. Sistemas Multiagente

O uso de Sistemas Multiagente (SMA) atualmente abrange pesquisas direcionadas a diversos temas sobre o gerenciamento de ecossistemas. Com essa técnica é possível reproduzir o conhecimento e raciocínio de vários agentes heterogêneos que, juntos, precisam resolver problemas comuns de planejamento [Bousquet and Le Page 2004].

Segundo [Coppin 2010], os agentes de um sistema devem cooperar, aprender e agir de forma autônoma. Desta maneira, os classifica em: i) *agentes reativos*, os quais reagem a eventos no ambiente em que estão inseridos de acordo com regras/normas especificadas previamente; ii) *agentes de interface* que têm o intuito de auxiliar o usuário nas diversas aplicações; iii) *agentes de informação* que auxiliam o usuário a encontrar, classificar e filtrar informações provenientes de inúmeras fontes da internet; e, iv) *agentes colaborativos*, os quais cooperam entre si para alcançar objetivos/metast.

Os sistemas multiagente constituem-se de diversos agentes interagindo em um ambiente. Os SMA foram introduzidos na Computação na década de 80, entretanto, somente nos anos 90 tornaram-se populares [Wooldridge 2002]. Cada agente de um sistema possui comportamento individual, porém os mesmos devem ser capazes de interagir com os demais de forma organizada, desta maneira são relevantes características como [Bordini et al. 2001]: cooperação, coordenação, competição e negociação.

Tais características tornam-se importantes pois a maioria dos problemas a serem resolvidos buscam uma maneira distribuída de resolução. Além disso, muitos destes possuem elevada complexidade, tornando impossível encontrar a solução apenas com um agente. Em um SMA, os agentes podem cooperar em busca da solução de um objetivo

geral, sendo que, cada um destes possui seu próprio objetivo, mas que juntos, alcançam uma meta maior [Alvares and Sichman 1997, Bordini et al. 2001].

Os benefícios da utilização de um sistema multiagente são diversos, como: i) rapidez na resolução de problemas visto a inerência do processamento concorrente; ii) aumento da flexibilidade e escalabilidade através da conexão de vários sistemas; iii) aumento da capacidade de resposta a um determinado problema pelo fato de todos os recursos estarem localizados no mesmo ambiente.

No desenvolvimento de SMA, a arquitetura comumente utilizada é a BDI (*beliefs, desires e intentions*), baseadas em um modelo cognitivo que representam crenças, desejos e intenções [Hübner et al. 2004]. De acordo com [Wooldridge 2002], BDI é estruturada em: i) crenças, representando o que o agente sabe sobre si mesmo, sobre os demais agentes e sobre o ambiente ao qual está inserido; ii) desejos, representando os estados que o agente almeja atingir, geralmente são objetivos; e, iii) intenções, que são representadas pela sequência de ações que um determinado agente executa para alcançar um objetivo.

Para simular sistemas complexos é necessário compreender a dinâmica e o funcionamento característico deste tipo de sistema. Eles podem ser representados por uma grande variedade de interação entre os agentes envolvidos. Algumas ferramentas são específicas para a simulação de SMA. Para simular o estudo deste artigo, voltado para a bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo, foi escolhida a plataforma GAMA [Taillandier et al. 2018].

Outras ferramentas vêm sendo utilizadas para a simulação em diversas aplicações de SMA, os autores [Dos Santos et al. 2016] utilizaram a estrutura JaCaMo [Boissier et al. 2011] (Jason [Bordini et al. 2007], CArTAgo [Ricci et al. 2009] e MOISE [Hübner et al. 2007]), que cobre alguns dos níveis de abstrações necessários para o desenvolvimento de SMA, para analisar um experimento de ecossistema urbano. Utilizando o modelo de simulação do consumo urbano no Netlogo, [Li et al. 2017] analisaram os sistemas de alocação e fluxo de água, energia e alimento. Com o intuito de desenvolver um RPG (*Role-Playing Game*) chamado ReHab, [Page et al. 2016] propuseram uma modelagem baseada em multiagente para harmonização entre regeneração de biomassa e habitat de reprodução de aves migratórias protegidas, onde a implementação foi realizada na plataforma CORMAS [Page et al. 2000].

3. Plataforma GAMA

A plataforma GAMA¹ (*GIS Agent-based Modeling Architecture*) é um ambiente de desenvolvimento integrado completo, que permite alternar de forma rápida e prática entre perspectivas de modelagem e simulação. GAMA é baseada na consolidada IDE (*Integrated Development Environment*) do Eclipse, utilizando os diversos recursos presentes neste ambiente de desenvolvimento, e é desenvolvida por várias equipes da unidade internacional de pesquisa UMMISCO (*Unité de Modélisation Mathématique et Informatique des Systèmes Complexes*) no IRD (*Institut de Recherche pour le Développement*) da UPMC (*Université Pierre et Marie Curie*) como um projeto *open source* desde o ano de 2007.

A plataforma apresenta um editor que visa facilitar o trabalho de modelagem e desenvolvimento do usuário (Figura 1), contendo ferramentas usuais de IDEs, tais como:

¹<https://gama-platform.github.io/>

coloração da sintaxe, compilação e preenchimento automáticos e a possibilidade de formatar ou comentar linhas de código específicas. Além disso, a IDE está conectada a uma extensa documentação online, permitindo aos usuários obterem informações sobre as diversas palavras-chave, operadores e declarações disponíveis.

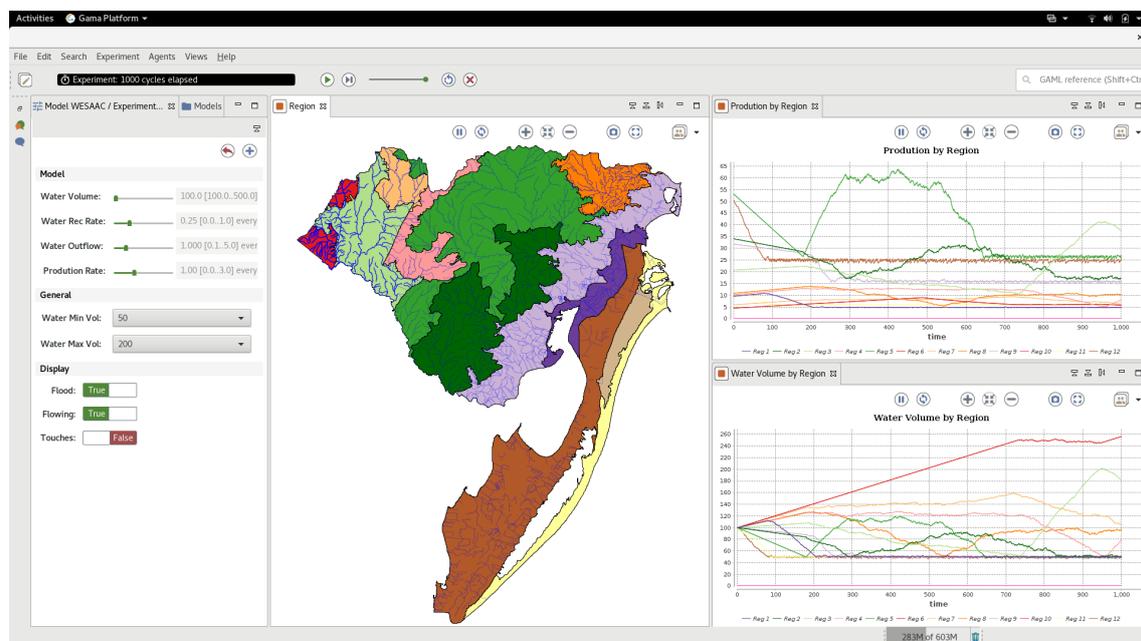


Figura 1. Interface da bacia Mirim-São Gonçalo na plataforma GAMA

O ambiente de desenvolvimento integrado permite formular e construir modelos baseados em agentes, a partir de diferentes conjuntos de dados, possuindo integração com sistemas de informações geográficas (*GIS - Geographic Information System*). Além disso, a flexibilidade de sua interface permite organizar os painéis de visualização com comandos simples de arrastar e soltar ou através de *layouts* predefinidos, apresentando uma ferramenta de inspeção/verificação de agentes, a qual permite obter informações sobre um ou vários agentes (visão tabular), e também possui um mecanismo de busca desenvolvido para a obtenção de informações e exemplos de uso dos diversos operadores presentes na plataforma.

GAMA fornece uma linguagem de modelagem completa GAML (*GAMA Modeling Language*) e um ambiente de desenvolvimento integrado que permite formular e construir modelos de forma tão rápida e fácil quanto no NetLogo [Tisue and Wilensky 2004], indo além do que Repast (*Recursive Porous Agent Simulation Toolkit*) [North et al. 2006] ou que Mason (*Multi-Agent Simulator Of Neighborhoods*) [Luke et al. 2005]. Atualmente, GAMA é utilizada em vários modelos, como [Nguyen Vu et al. 2009, Taillandier and Buard 2009] e também em projetos, como sistemas de apoio a decisões ambientais [Chu et al. 2009], projetos urbanos [Amouroux et al. 2009], gerenciamento de recursos hídricos [Thérond et al. 2014], invasões biológicas [Amouroux et al. 2008] e adaptação às mudanças climáticas ou mitigação de desastres [Gaudou et al. 2014].

4. Modelagem do Problema

Uma bacia hidrográfica pode ser considerada como uma parte territorial importante para a hidrologia urbana, pois ela relaciona a geografia natural da região, a água, a civilização e a população. Dessa forma, existe a necessidade de gerir as bacias hidrográficas a partir de questões sociais, econômicas e ambientais. Neste trabalho, apresenta-se a modelagem de uma bacia hidrográfica com a utilização da ferramenta GAMA, que permite lidar facilmente com dados geoespaciais e vetoriais de sistemas de informação geográfica.

O modelo de dados GIS utilizado neste trabalho, representa uma base de dados com informações geográficas, que encontra-se em dois arquivos no formato shapefile, contendo informações geoespaciais da bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo. Esses arquivos, descrevem espacialmente qualidades de vetores (pontos, linhas e polígonos) para representar as regiões e os rios presentes na bacia, sendo que, cada um desses itens possui ainda atributos que o descreve, como nome, código, área ou comprimento.

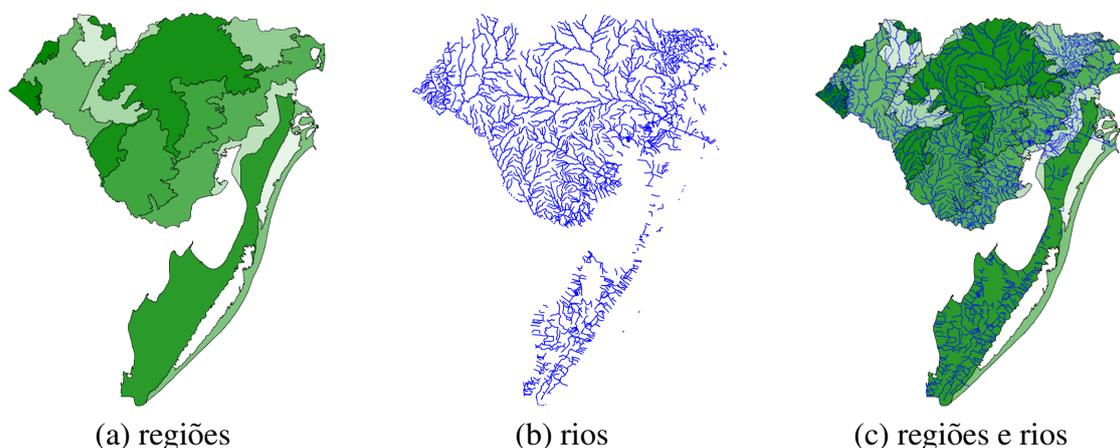


Figura 2. Representação gráfica da bacia hidrográfica Mirim-São Gonçalo

A plataforma GAMA consegue separar esses itens em diferentes camadas temáticas e representá-los de forma independente, permitindo trabalhar com eles de modo rápido e simples. Deste modo, cada região ou rio pode ser considerado um agente específico com suas próprias características e atributos. Na Figura 2a, por exemplo, conseguimos visualizar o formato e localização de cada região, bem como acrescentar o atributo cor a cada uma delas com tonalidade própria. GAMA permite ao usuário relacionar as informações existentes através da posição e topologia dos objetos, gerando assim novas informações. Neste caso, considerando a junção das informações na Figura 2a (regiões) e na Figura 2b (rios), obtemos a representação presente na Figura 2c (regiões e rios), da qual, a plataforma consegue extrair novas informações e atributos para cada objeto, como, por exemplo, associar um rio a uma determinada região de acordo com sua localização.

O modelo hidrográfico, neste caso, é composto por 12 regiões (Figura 3a), com características distintas, conforme apresentado na Tabela 1. Cada região possui valores específicos para taxa de produção (*prd*) de bens/serviços e consumo de água (*cons*), os quais, estão relacionados com o tamanho da sua área (*area*), ou seja, regiões com uma área maior apresentam uma taxa de produção e consumo de água maiores. O ambiente também é composto por 2294 rios que estão distribuídos entre as diversas regiões de

acordo com sua posição geoespacial. Todos os rios apresentam os mesmos valores para o volume de água (*vol*) inicial, a taxa de recuperação de água (*rec*) e o fluxo de água (*fluxo*).

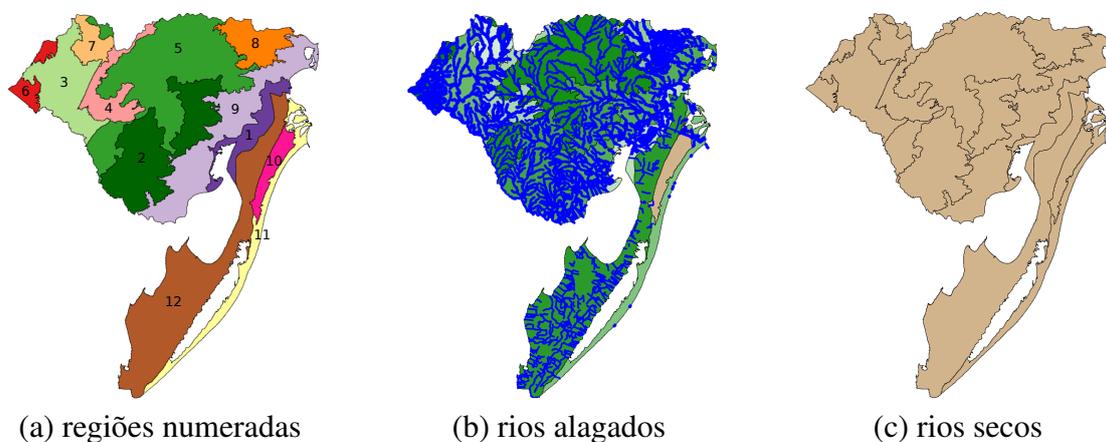


Figura 3. Representação das regiões, cenário de alagamento e seca extrema

Tabela 1. Atributos básicos de cada região.

região	area km ²	cons	prd	nº rios	vizinhos
1	956,55	0.09	9.5	161	[9, 12]
2	3.402,83	0.34	34.0	358	[5, 9]
3	2.069,33	0.20	20.6	255	[4, 5, 6, 7]
4	1.016,72	0.10	10.1	24	[3, 5, 7]
5	5.306,11	0.53	53.0	216	[2, 3, 4, 7, 8, 9]
6	448,17	0.04	4.4	66	[3]
7	590,02	0.05	5.9	22	[3, 4, 5]
8	1.081,65	0.10	10.8	213	[5, 9]
9	3.178,26	0.31	31.7	503	[1, 2, 5, 8]
10	564,70	0.05	0.0	0	[11, 12]
11	1.199,01	0.11	11.9	24	[10, 12]
12	5.047,57	0.50	50.4	452	[1, 10, 11]

O volume de água dos rios diminui com o passar do tempo de acordo com a taxa de consumo de água da região na qual o rio está inserido. Os rios recuperam parte do seu volume de água de acordo com a taxa de recuperação de água, que é um valor global do ambiente igual para todos os rios. Cada rio pertence a uma única região e todos os rios de uma mesma região possuem o mesmo volume de água. Se o consumo de água da região é menor que a taxa de recuperação de água, a tendência é que o volume dos rios cresçam no decorrer do tempo e a região fique alagada (Figura 3b), caso contrário, quando o consumo de água da região é maior que a taxa de recuperação de água, a tendência é que o volume dos rios cheguem a zero, isto é, os rios secam (Figura 3c), tornando a região totalmente improdutiva até o final da simulação. Regiões vizinhas podem compartilhar água de seus rios quando o valor do fluxo de água for maior que zero. É importante observar que uma região só pode obter água quando atingir um volume mínimo (*min_vol*) estabelecido no ambiente, da mesma forma, uma região só pode “ceder” água a um vizinho quando seu volume de água for maior que este volume mínimo. O ambiente também estabelece um valor de volume máximo de água (*max_vol*), neste caso, quanto mais o volume de água da região ultrapassar este valor (alagamento), menor será sua taxa de produção.

5. Simulações e Análises

A interface de simulação do modelo hidrográfico da bacia Mirim-São Gonçalo (Figura 1), desenvolvido na plataforma GAMA, possibilita a representação gráfica (mapa), da variação dos volumes dos rios e alteração das cores das regiões que secam, bem como, a visualização em gráfico de linhas da variação da taxa de produção e do volume de água em cada região. Além disso, permite atribuir diferentes valores aos diversos parâmetros de configuração do ambiente.

Neste trabalho, são apresentados resultados e análises de duas simulações com os seguintes valores globais: volume de água inicial $vol = 100$; taxa de recuperação da água $rec = 0.15$; volume mínimo de água $min_vol = 25$; volume máximo de água $max_vol = 200$. A única diferença entre as duas simulações é que na primeira simulação (Seção 5.1) o valor do fluxo de água é 1.5 ($fluxo > 0$), ou seja, é permitido o compartilhamento de água entre regiões vizinhas. Ao contrário, na segunda simulação (Seção 5.2) o valor do fluxo de água é zero ($fluxo = 0$), ou seja, não há compartilhamento de água entre as regiões. Os demais valores específicos para cada região estão representados na Tabela 1.

5.1. Simulação com partilha de água entre regiões vizinhas

Na simulação com partilha de água entre regiões, podemos observar que regiões com áreas maiores, quando atingem o volume mínimo de água, passam a “consumir” água dos vizinhos (Figura 5a), pois podemos observar que regiões com áreas menores têm volume de água crescente no começo da simulação, o qual começa diminuir a medida que regiões maiores atingem o volume mínimo de água ($min_vol = 25$). Neste caso, regiões com consumo de água maiores que 0.15 ($cons > 0.15$) tendem a secar de forma gradual no decorrer do tempo (visualmente, ficam na cor cinza), conforme apresentado na Figura 4.

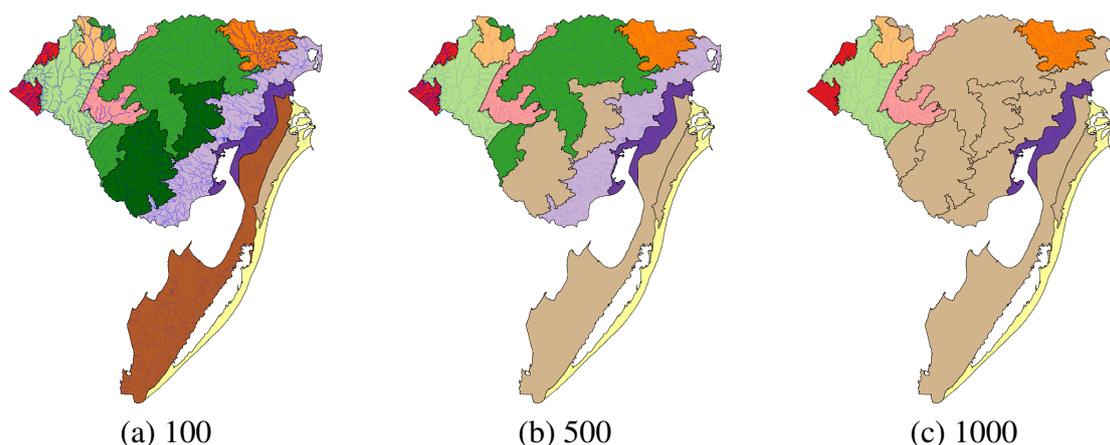
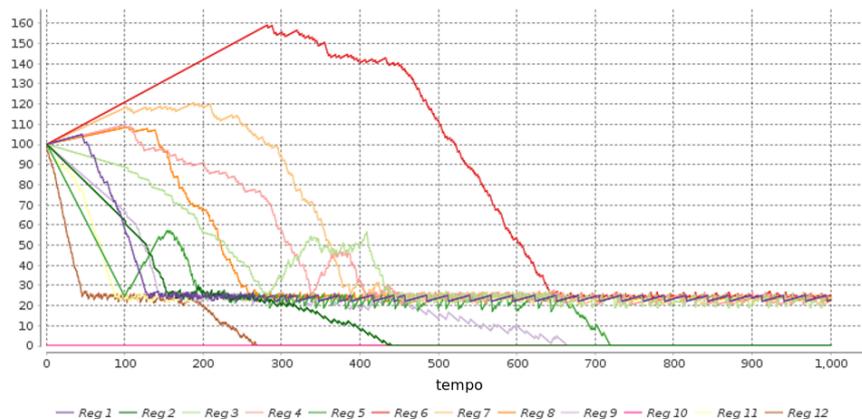
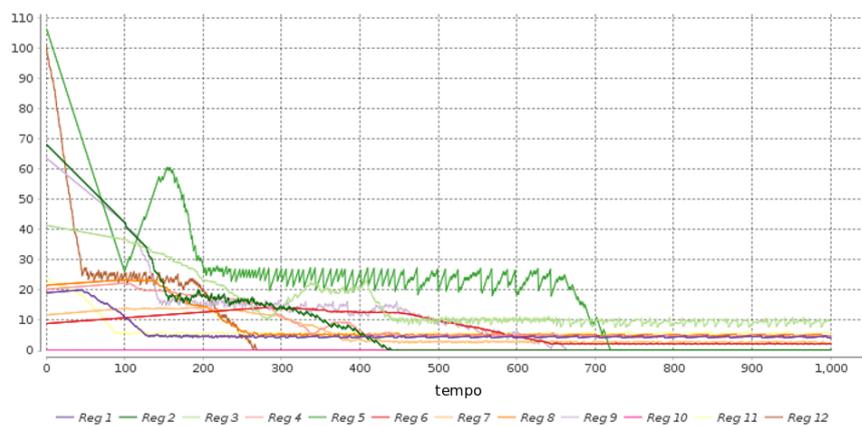


Figura 4. Alterações no ambiente no decorrer do tempo (com partilha de água)

Nesta simulação também podemos observar que: i) a região 10, mesmo possuindo $cons < 0.15$, acaba secando, pois ela não possui nenhum rio; ii) a região 3, apesar de possuir $cons > 0.15$, não seca, pois está cercada de vizinhos aptos a partilhar água; iii) após o passo 700, tanto o consumo de água (Figura 5a) quanto a produção (Figura 5b) por região, se estabilizam.



(a) volume de água por região



(b) produção por região

Figura 5. Variação do volume de água e produção (com partilha de água)

5.2. Simulação sem partilha de água entre regiões vizinhas

Na simulação sem partilha de água, podemos observar que regiões com áreas maiores, quando atingem o volume mínimo de água, não “consomem” água dos vizinhos, permanecendo o comportamento de queda linear do volume de água (Figura 7a) das regiões com consumo de água maiores que 0.15 ($cons > 0.15$), as quais, tendem a secar de forma mais abrupta no decorrer do tempo, conforme apresentado na Figura 6. Regiões com consumo de água menor que 0.15 ($cons < 0.15$) apresentam um crescimento linear do volume de água durante toda simulação, porém este crescimento linear não se reflete em um crescimento contínuo da produção (Figura 7b).

Podemos observar que a produção das regiões com maiores áreas diminui conforme a queda no volume de água, até atingir o valor zero, caso este, onde os rios secaram e a região tornou-se totalmente improdutiva. As regiões com menores áreas apresentam um crescimento linear do volume de água e de produção até atingirem o volume máximo de água $max_vol = 200$, a partir deste ponto a produtividade diminui porque a região começa a sofrer com alagamento cada vez maior no decorrer do tempo, conforme podemos observar nas Figuras 6b e 6c.

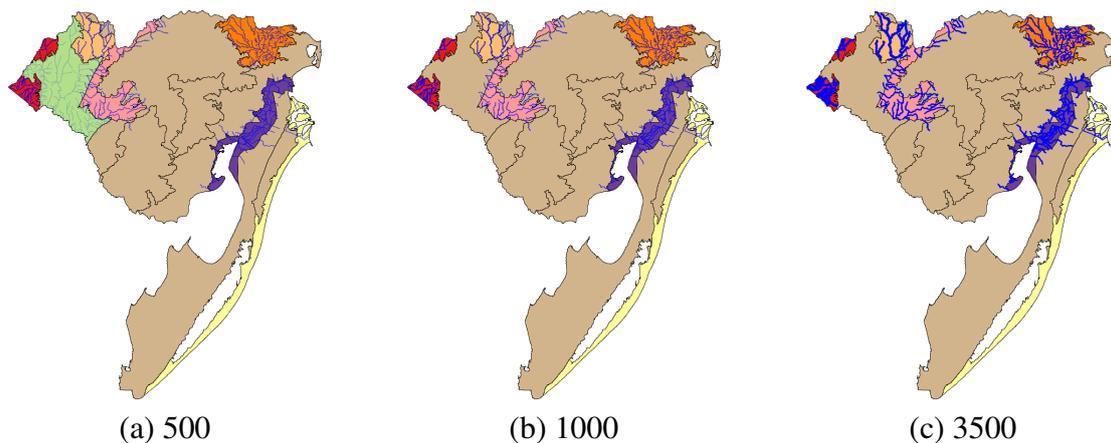
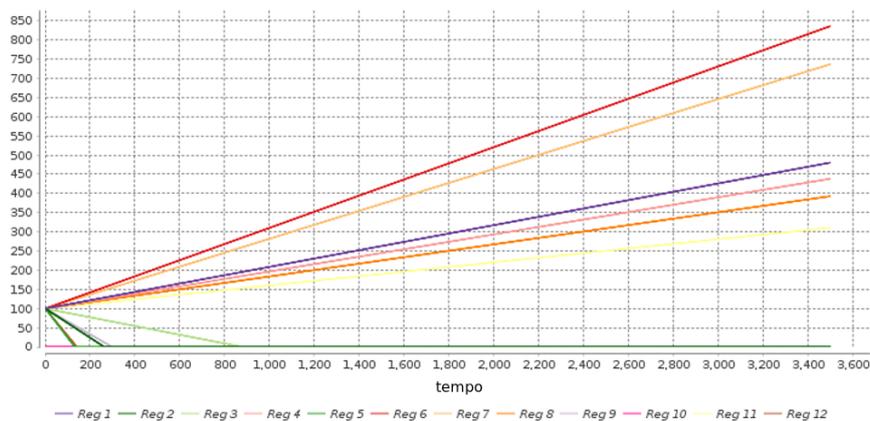
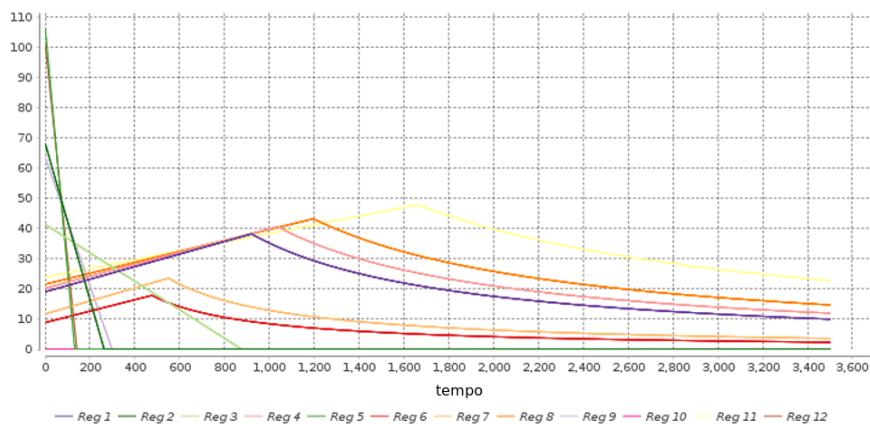


Figura 6. Alterações no ambiente no decorrer do tempo (sem partilha de água)

Nesta simulação também podemos observar que: i) todas as regiões com $cons < 0.15$ acabam sofrendo com alagamento, exceto a região 10, que acaba secando por não possuir rios; ii) a região 3, apesar de possuir vizinhos aptos a partilhar água, ao contrário do que ocorre na simulação com partilha de água, acaba secando e se tornando improdutivo; iii) a produtividade das regiões está diretamente relacionada com o volume de água, que não deve ser muito alto (alagamento) nem muito baixo (seca).



(a) volume de água por região



(b) produção por região

Figura 7. Variação do volume de água e produção (sem partilha de água)

6. Conclusões e Trabalhos Futuros

Com o uso da ferramenta GAMA, a gestão participativa pode ser simulada sem gerar consequências efetivas. Dessa forma, para a modelagem deste trabalho, foi possível simular algumas situações entre as regiões hidrográficas determinadas. Assim, pode-se concluir que cada agente interfere de forma significativa no ambiente dos demais. Quando a tomada de decisão é realizada de forma participativa, as partes envolvidas tendem a melhorar suas condições ou pelo menos permanecer estáveis diante de possíveis problemas. Já a situação inversa apresenta situações preocupantes, pois neste caso, quando os agentes não compartilhavam seus recursos, a maioria deles obteve grande perda ou perda total da sua produção.

Neste trabalho foi apresentada uma abordagem inicial da simulação de uma bacia hidrográfica, mas desconsiderando seu real comportamento com relação ao fluxo de rios entre as regiões. Para trabalhos futuros, um dos objetivos principais será acrescentar uma modelagem matemática de transporte de água nessa bacia. Sendo assim, podem ser abordados, por exemplo, assuntos como qualidade de água, distribuição real de água entre as regiões de estudo e análise da poluição e seu impacto ambiental, como tratado em [Yu et al. 2016].

Agradecimentos

Os autores deste artigo agradecem ao Programa de apoio ao Ensino e à Pesquisa Científica e Tecnológica em Regulação e Gestão de Recursos Hídricos – Pró-Recursos Hídricos Chamada N° 16/2017, pelo auxílio financeiro no desenvolvimento desta pesquisa.

Referências

- Adamatti, D. F. (2007). *Inserção de jogadores virtuais em jogos de papéis para uso em sistemas de apoio à decisão em grupo: um experimento no domínio da gestão de recursos naturais*. PhD thesis, Escola Politécnica – Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil. doi:10.11606/T.3.2007.tde-07012008-154915.
- Alvares, L. O. and Sichman, J. S. (1997). Introdução aos sistemas multiagentes. In *XVII Congresso da SBC-Anais JAI'97*.
- Amouroux, E., Chu, T.-Q., Boucher, A., and Drogoul, A. (2009). GAMA: An environment for implementing and running spatially explicit multi-agent simulations. In Ghose, A., Governatori, G., and Sadananda, R., editors, *Agent Computing and Multi-Agent Systems*, pages 359–371, Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg.
- Amouroux, E., Desvaux, S., and Drogoul, A. (2008). Towards virtual epidemiology: An agent-based approach to the modeling of h5n1 propagation and persistence in north-vietnam. In Bui, T. D., Ho, T. V., and Ha, Q. T., editors, *Intelligent Agents and Multi-Agent Systems*, pages 26–33, Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg.
- Boissier, O., Bordini, R. H., Hübner, J. F., Ricci, A., and Santi, A. (2011). Multi-agent oriented programming with JaCaMo. *Science of Computer Programming*.
- Bordini, R. H., Hübner, J. F., and Wooldridge, M. (2007). *Programming Multi-Agent Systems in AgentSpeak using Jason*. John Wiley & Sons.

- Bordini, R. H., Vieira, R., and Moreira, A. F. (2001). Fundamentos de sistemas multiagentes. In *Anais do XXI Congresso da Sociedade Brasileira de Computação (SBC2001)*, volume 2, pages 3–41.
- Bousquet, F. and Le Page, C. (2004). Multi-agent simulations and ecosystem management: a review. *Ecological modelling*, 176(3-4):313–332.
- Chu, T.-Q., Drogoul, A., Boucher, A., and Zucker, J.-D. (2009). Interactive learning of independent experts' criteria for rescue simulations. *J. UCS*, 15:2701–2725.
- Coppin, B. (2010). *Inteligência Artificial*. Rio de Janeiro: LTC, 3a edition.
- Dos Santos, F. P., Adamatti, D., Rodrigues, H., Dimuro, G., Jerez, E. D. M., Dimuro, G., et al. (2016). A multiagent-based tool for the simulation of social production and management of urban ecosystems: a case study on san jerónimo vegetable garden-seville, spain. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 19(3):1–12.
- Filatova, T., Verburg, P. H., Parker, D. C., and Stannard, C. A. (2013). Spatial agent-based models for socio-ecological systems: Challenges and prospects. *Environmental modelling & software*, 45:1–7.
- Gaudou, B., Sibertin-Blanc, C., Therond, O., Amblard, F., Auda, Y., Arcangeli, J.-P., Balestrat, M., Charron-Moirez, M.-H., Gondet, E., Hong, Y., Lardy, R., Louail, T., Mayor, E., Panzoli, D., Sauvage, S., Sánchez-Pérez, J.-M., Taillandier, P., Van Bai, N., Vavasseur, M., and Mazzega, P. (2014). The MAELIA multi-agent platform for integrated analysis of interactions between agricultural land-use and low-water management strategies. In Alam, S. J. and Parunak, H. V. D., editors, *Multi-Agent-Based Simulation XIV*, pages 85–100, Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg.
- Hübner, J. F., Bordini, R. H., and Vieira, R. (2004). Introdução ao desenvolvimento de sistemas multiagentes com jason. *XII Escola de Informática da SBC*, 2:51–89.
- Hübner, J. F., Sichman, J. S., and Boissier, O. (2007). Developing organised multiagent systems using the MOISE+ model: programming issues at the system and agent levels. *Int. J. Agent-Oriented Software Engineering*, 1(3/4):370–395.
- Li, G., Wang, Y., Huang, D., and Yang, H. (2017). Water-energy-food nexus in urban sustainable development: an agent-based model. *International Journal of Crowd Science*, 1(2):121–132.
- Luke, S., Cioffi-Revilla, C., Panait, L., Sullivan, K., and Balan, G. (2005). Mason: A multiagent simulation environment. *SIMULATION*, 81(7):517–527.
- Nguyen Vu, Q. A., Gaudou, B., Canal, R., and Hassas, S. (2009). Coherence and robustness in a disturbed mas. In *2009 IEEE-RIVF International Conference on Computing and Communication Technologies*, pages 1–4.
- North, M. J., Collier, N. T., and Vos, J. R. (2006). Experiences creating three implementations of the repast agent modeling toolkit. *ACM Trans. Model. Comput. Simul.*, 16(1):1–25.
- Page, C. L., Bousquet, F., Bakam, I., Bah, A., and Baron, C. (2000). CORMAS : A multiagent simulation toolkit to model natural and social dynamics at multiple scales. In *Wageningen : Resource Modeling Association*.

- Page, C. L., Dray, A., Perez, P., and Garcia, C. (2016). Exploring how knowledge and communication influence natural resources management with rehab. *Simulation & Gaming*, 47(2):257–284.
- Ricci, A., Piunti, M., Viroli, M., and Omicini, A. (2009). Environment programming in CArtAgO. In *Multi-Agent Programming: Languages, Tools and Applications*, Multiagent Systems, Artificial Societies, and Simulated Organizations, chapter 8, pages 259–288. Springer.
- SEMA (2019). Secretaria do Meio Ambiente e Infraestrutura - L040 - Bacia Hidrográfica da Lagoa Mirim e do Canal São Gonçalo. <https://www.sema.rs.gov.br/l040-bacia-hidrografica-da-lagoa-mirim-e-do-canal-sao-goncalo> [Online; accessed 31 mar. 2019].
- Taillandier, P. and Buard, E. (2009). Designing agent behaviour in agent-based simulation through participatory method. In Yang, J.-J., Yokoo, M., Ito, T., Jin, Z., and Scerri, P., editors, *Principles of Practice in Multi-Agent Systems*, pages 571–578, Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg.
- Taillandier, P., Gaudou, B., Grignard, A., Huynh, Q.-N., Marilleau, N., Caillou, P., Philippon, D., and Drogoul, A. (2018). Building, composing and experimenting complex spatial models with the GAMA platform. *GeoInformatica*.
- Thérond, O., Sibertin-Blanc, C., Lardy, R., Gaudou, B., Balestrat, M., Hong, Y., Louail, T., Nguyen, V. B., Panzoli, D., Sanchez-Perez, J.-M., Sauvage, S., Taillandier, P., Vavasseur, M., and Mazzega, P. (2014). Integrated modelling of social-ecological systems: The MAELIA high-resolution multi-agent platform to deal with water scarcity problems. In *7th International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs 2014)*, page pp. 1, San Diego, California, United States.
- Tisue, S. and Wilensky, U. (2004). Netlogo: A simple environment for modeling complexity. In *International Conference on Complex Systems*, volume 21, pages 16–21, Boston, MA.
- Wooldridge, M. (2002). An introduction to multi agent systems, department of computer science, university of liverpool, uk.
- Yu, S., He, L., and Lu, H. (2016). An environmental fairness based optimisation model for the decision-support of joint control over the water quantity and quality of a river basin. *Journal of Hydrology*, 535.