



AquaME: codificação de um modelo de simulação hidrológica para planícies de inundação na plataforma TerraME

Fernando Rodrigues Teixeira Dias⁽¹⁾, Pedro R. Andrade⁽²⁾ e Carlos Roberto Padovani⁽¹⁾

⁽¹⁾ Pesquisadores, Embrapa Pantanal, Corumbá, MS. ⁽²⁾ Pesquisador, Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais, São José dos Campos, SP.

Resumo – Os recursos hídricos têm um importante papel como serviço ambiental e o entendimento dos processos hidrológicos é fundamental no gerenciamento social, ecológico e econômico das planícies de inundação. Portanto, a modelagem hidrológica é uma ferramenta essencial nesse processo. Porém, as planícies de inundação têm particularidades que desafiam os modelos hidrológicos, necessitando novas abordagens. Esse trabalho apresenta uma nova implementação de modelagem e simulação hidrológica para planícies de inundação em TerraME, denominada de AquaME. É o primeiro esforço experimental de implementação de modelagem hidrológica para planícies de inundação, totalmente codificada na linguagem de programação Lua na plataforma de modelagem ambiental TerraME. Uma superfície de fluxo ideal foi usada como experimento para a comparação de performance entre os modelos. Os resultados foram animadores e muito próximos aos obtidos pelos modelos de referência AQUA e HEC-HMS, revelando um grande potencial para o seu aperfeiçoamento futuro e aplicação no mundo real, como o Pantanal.

Termos para indexação: recursos hídricos, processos hidrológicos, modelagem ambiental, linguagem de programação Lua.

AquaME: Coding a hydrological simulation model for floodplains on the TerraME platform

Abstract – Water resources play a key role as an environmental service and the understanding of hydrological processes is fundamental in the social, ecological and economic management of floodplains. Therefore, hydrological modeling is an essential tool in this process. However, the floodplains have particularities that challenge hydrological models, requiring new approaches. This work presents a new implementation of hydrological modeling and simulation for floodplains in TerraME, named AquaME. It is the first experimental effort to implement hydrological modeling for floodplains, fully coded in the Lua programming language on the TerraME, environmental modeling platform. An ideal flow surface was used as an experiment to compare the performance between the models. The results were encouraging and very close to those obtained by the AQUA and HEC-HMS reference models, revealing great potential for their future improvement and application in the real world, such as the Pantanal.

Embrapa Pantanal

Rua 21 de Setembro, 1880
<https://www.embrapa.br/pantanal>
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações

Presidente

Viviane de Oliveira Solano

Secretário-executivo

Márcia Divina de Oliveira

Membros

Adriana Mello de Araujo
 Agostinho Carlos Catella,
 Ana Helena B. Marozzi Fernandes,
 José Aníbal Comastri Filho,
 Márcia Divina de Oliveira e
 Viviane de Oliveira Solano

Edição executiva

Adriana Mello de Araujo

Normalização bibliográfica

Viviane de Oliveira Solano
 (CRB-1/2210)

Projeto gráfico

Leandro Sousa Fazio

Diagramação

Viviane de Oliveira Solano

Publicação digital: PDF

Todos os direitos
 reservados à Embrapa.

Index terms: water resources, hydrological processes, environmental modeling, programming language Lua.

Introdução

Os recursos hídricos têm um importante papel como serviço ambiental e o entendimento dos processos hidrológicos são fundamentais no gerenciamento dos aspectos social, ecológico e econômico das planícies de inundação. A modelagem hidrológica é uma ferramenta essencial nesse gerenciamento, mas as planícies de inundação têm particularidades que desafiam os modelos hidrológicos, necessitando novas abordagens.

Para os sistemas hidrológicos com relevo acentuado e bem drenados, existem muitos modelos de simulação unidirecionais (1D) desenvolvidos, p. ex., o modelo MGB-IPH proposto por Collischonn et al. (2001) e que vem sendo aprimorado (Fleischmann et al., 2017). Porém, para as planícies de inundação, onde o relevo favorece o acúmulo de água em detrimento do fluxo, a modelagem para simulação ainda é um desafio. Nesse caso, os modelos hidrológicos que oferecem melhores resultados são os bidirecionais (2D). Um exemplo é o modelo SIRIPLAN, desenvolvido por Paz (2010); Paz et al. (2011; 2014) para o Pantanal. O SIRIPLAN usa a estratégia de acoplar o módulo 2D ao modelo (1D) do MGB-IPH, possibilitando as trocas de vazão entre o canal dos rios e a sua várzea (planície inundada pelo rio). Ainda um outro módulo, representa o balanço hídrico vertical na planície (precipitação, evaporação e infiltração).

Embora muito esforço tenha sido investido no desenvolvimento de modelos hidrológicos adequados para diversas paisagens, ainda é necessário calibrar estes modelos para cada paisagem e estudo (Rinaldi et al., 2007). Planícies inundáveis como o Pantanal apresentam desafios especiais que os modelos hidrológicos usuais têm dificuldades em atender. Rinaldi et al. (2007) resumem os desafios que grandes planícies inundadas representam para a modelagem hidrológica:

- (1) Ser espacialmente distribuído, pois os fluxos lineares não são bem definidos.
- (2) Incorporar uma boa descrição espacial das depressões do terreno.

Baseados nestes desafios, Rinaldi et al. (2007) propuseram o algoritmo AQUA aplicado à bacia do Riacho Santa Catarina (158 km², no centro da Província de Buenos Aires na Argentina) que, segundo os autores, apresentou excelente desempenho na reprodução do efeito de vários cenários de chuva. Este modelo foi baseado na ferramenta matemática conhecida como autômatos celulares, em que células de uma grade quadrada definem o seu estado a cada intervalo de tempo a partir da informação que obtêm de células vizinhas por meio de um algoritmo que é o mesmo distribuído para todas as células. Mesmo quando algoritmos simples são usados de modo a manter o custo de processamento computacional dentro do razoável, as médias estatísticas dos resultados do modelo tendem a soluções mais complexas conhecidas. Por exemplo, em fluxos, modelos simples se aproximam das equações diferenciais parciais de Navier-Stokes (Wolfram, 1986, citado por Rinaldi et al., 2007, p. 316). A área a ser modelada é dividida em células e após a infiltração de parte da precipitação, o escoamento da água de superfície ("runoff") é simulado. A resistência ao escoamento é representada pelo parâmetro α , que assume valores diferentes para cursos d'água e terreno.

Embora o modelo AQUA possa ser aplicado diretamente em outras planícies inundáveis, a sua implementação na plataforma de modelagem TerraME (Carneiro et al., 2013) possibilita a customização da modelagem, o controle e os ajustes necessários a casos específicos, como no Pantanal. O TerraME é um ambiente de programação para modelagem dinâmica espacial que suporta autômatos celulares, modelos baseados em agentes e modelos de rede executados em espaços celulares 2D. O TerraME fornece uma interface para bancos de dados geográficos usando a TerraLib, o que permite o acesso direto das simulações a dados geoespaciais. Sua linguagem de modelagem possui funções que facilitam o desenvolvimento de modelos multiescala e multiparadigma para aplicações ambientais, usando como base a linguagem de programação Lua.

Este estudo teve como objetivo codificar no plataforma TerraME um modelo que reproduz o algoritmo AQUA, denominado "AquaME" e comparar a performance e resultados dos modelos, AquaME e AQUA a partir da modelagem e simulação de uma superfície de fluxo ideal (plano inclinado com calha) sob dois cenários diferentes de chuva.

Este trabalho está com o ODS 13 “Ação contra a mudança global do clima”, através da meta ODS 13.1 “Melhorar a educação, aumentar a conscientização e a capacidade humana e institucional sobre mudança do clima, seus riscos, mitigação, adaptação, impactos, e alerta precoce”.

Material e métodos

O algoritmo AQUA

Embora baseado na divisão do processamento da área analisada em células quadradas, o algoritmo AQUA executa a etapa de cálculo do escoamento (“run off”) em conjuntos de nove células de uma vez, uma grade (“grid”) de 3 x 3 células, avaliando e potencialmente modificando o estado de todas as 9 células num mesmo passo do algoritmo, como se a grade fosse ela toda o autômato. Além disso, o estado das células não é discreto, mas composto por um conjunto de variáveis contínuas (altura do terreno, altura da água e outros) e cada célula é processada nove vezes a cada passo de tempo da simulação, uma para cada posição que ela ocupa em cada uma das 9 grades que podem ser definidas em volta dela (Figura 1).

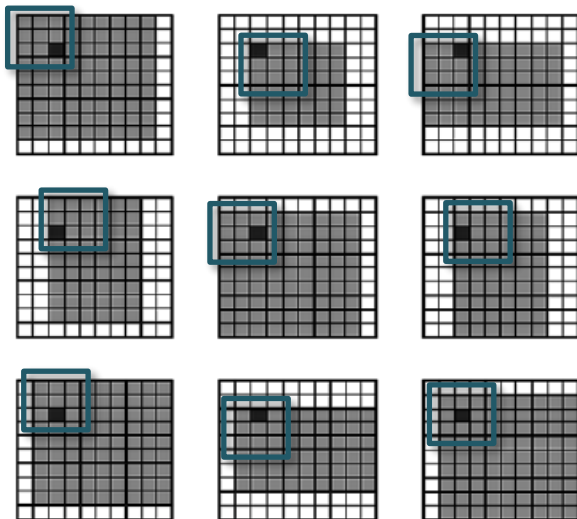


Figura 1: As nove partições usadas no algoritmo AQUA (em cinza). Em cada partição é destacada (em azul) um exemplo de grade da partição.

Fonte: Adaptado de Rinaldi et al. (2007).

Na Figura 1 percebe-se que a célula de exemplo (em preto) ocupa cada uma das nove posições de uma grade em cada partição. As células brancas em cada partição não participam de nenhuma grade daquela partição, embora possam participar em outras. Estas células constituem uma borda de duas células em nível mais baixo, que os autores do algoritmo AQUA

recomendam acrescentar à área em estudo e escoar toda a água desta borda para fora do modelo, garantindo o balanço de água. Esta adição da borda também garante que todas as grades que cobrem a área de estudo tenham nove células e sejam percorridas nove vezes.

O algoritmo AQUA processa o escoamento de água em cada grade primeiramente calculando o nível de equilíbrio que a água teria nesta grade se pudesse escoar completamente para as células mais baixas (Figura 2). O algoritmo para o cálculo da situação de equilíbrio é descrito em detalhes em Rinaldi et al. (2007).

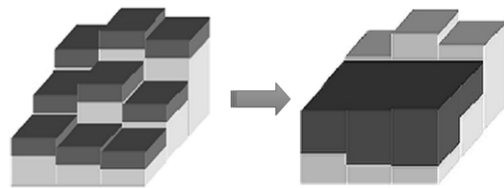


Figura 2: Exemplo da situação inicial da água em uma grade de 9 células (esquerda) e da situação de equilíbrio final (direita), se toda a água escoasse para as células mais baixas.

Fonte: Adaptado de Rinaldi et al. (2007).

A quantidade de água em cada célula da grade, no entanto, não é a situação de equilíbrio, pois a água leva tempo para escoar. A quantidade de água no passo de tempo seguinte em cada célula é estimada por uma combinação linear que considera um fator α de resistência ao escoamento definido pelo terreno sendo obtida pela equação adaptada de Rinaldi et al. (2007):

$$w_i^{\text{new}} = \alpha w_i^{\text{old}} + (1 - \alpha) w_i^{\text{drain}}$$

em que a altura da água no passo de tempo seguinte (w_i^{new}) como uma combinação linear entre a altura da água no passo de tempo atual (w_i^{old}) e a situação de equilíbrio (w_i^{drain}).

O parâmetro α usado no cálculo de cada grade é dado pela célula central da grade. O parâmetro α pode variar de célula para célula, mas, nos casos estudados no artigo, α foi considerado constante e o mesmo para todo o terreno, com exceção das células que representam canais e rios e das variações de altitude do terreno ao longo das rampas que estão permanentemente ou frequentemente inundados ou que inundam rapidamente quando há precipitação. Para estas últimas, o α é determinado pelo nível de água na célula central da grade que contém o rio ou canal conforme apresentado na fórmula para o cálculo do coeficiente de resistência ao escoamento usado no cálculo de grades que contém rios ou canais inundados por Rinaldi et al. (2007):

$$\alpha_{\text{river}} = 1 - \alpha_0 \left(\frac{w}{w_0} \right)^n$$

em que além da fórmula, a constante α_0 e o expoente n também são constantes. A constante w_0 equivale a uma altura de água (acima do solo) de 1 m, apenas para tornar a fração com w adimensional para alturas em metros.

Em cada passo de tempo, as nove partições da área são calculadas numa sequência definida (Figura 1) de modo que cada célula terá participado do cálculo de escoamento da água nove vezes, e o cálculo do nível de água nas células em uma partição, modifica o nível de água das células calculado para a partição anterior, ou seja, o cálculo de cada partição deve ser feito em série. No entanto, dentro de cada uma das nove partições, o cálculo do nível da água para cada uma das grades 3 x 3 pode ser feito em qualquer ordem, ou mesmo em paralelo, já que não há intersecção entre grades 3 x 3 em cada partição. Isto possibilitaria a paralelização de parte importante do algoritmo, embora este recurso não tenha sido usado neste trabalho, nem mencionado no artigo original.

Precipitação e Infiltração

No algoritmo AQUA, o escoamento da água de ou para uma célula é calculado após a soma da precipitação e a subtração da infiltração naquela célula no mesmo passo de tempo. A precipitação é um dado externo para a simulação. A infiltração, porém, depende da saturação do solo. No algoritmo AQUA esta saturação é calculada em Rinaldi et al. (2007) a partir da infiltração e altura da água no passo de tempo anterior:

$$I_n(x, y) = \begin{cases} 0 & \text{if } w(x, y) = 0 \\ w(x, y) & \text{if } 0 < w(x, y) < \beta I_{n-1}(x, y) + I_0(x, y) \\ \beta I_{n-1}(x, y) + I_0(x, y) & \text{if } w(x, y) \geq \beta I_{n-1}(x, y) + I_0(x, y) \end{cases}$$

em que $I_n(x, y)$ é a a infiltração de água no solo na célula (x, y) no passo de tempo n . As constantes β e I_0 e a infiltração inicial I_i (para $n = 1$) podem ser medidas ou estimadas.

A avaliação do AQUA em Rinaldi et al. (2007) usou um caso sintético que consiste de um plano inclinado em direção a um canal, para comparação do resultado da simulação com o modelo de referência HEC-HMS¹. Esse mesmo caso sintético foi usado pelos autores deste trabalho para avaliar o modelo AquaME construído em TerraME (Figura 3).

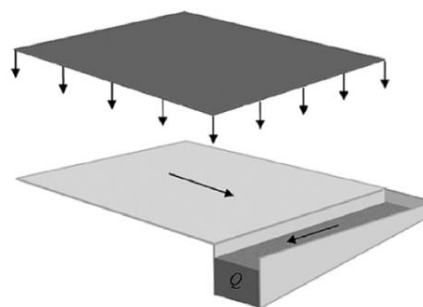


Figura 3: Ilustração esquemática da superfície de fluxo ideal, usado para avaliação do AQUA com o modelo HEC-HMS. As setas verticais representam a entrada de água no sistema (chuva), e as setas diagonais ilustram a direção de fluxo de água no plano inclinado e a vazão no canal.

Fonte: Adaptado de Rinaldi et al. (2007).

O caso sintético é um plano de 8.800 m x 11.000 m de inclinação de 8,5 m por km na extensão menor, oferecendo resistência uniforme ao escoamento. A borda mais baixa deste plano conecta-se a um canal com 5 metros de largura e com inclinação de 2,5 m por km na direção ortogonal à inclinação do plano. Este caso sintético é simulado em dois cenários: chuva de 5 mm/hora por 5 horas e chuva de 15 mm/hora por 10 horas. Os outros parâmetros necessários para o modelo AQUA estão na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros para a superfície de fluxo ideal.

Variável	Descrição	Valores	Unidades
α_{terrain}	Ângulo de inclinação do terreno	0,9880	Graus ou radiano
α_0	Ângulo de orientação	0,0120	Graus ou radiano
n	Expoente	3,0000	Adimensional
I_0	Intensidade de chuva inicial	0,0000	mm/h
I_i	Intensidade de chuva infiltrada	0,0000	mm/h
β	Coeficiente	0,9999	Adimensional

O modelo AquaME

Separação entre Modelo, Caso e Cenário.

Optou-se por construir o modelo AQUA em TerraME como um objeto “Model” de uso geral, o AquaME, não particularizado para nenhuma área de estudo, caso ou cenário. O caso sintético de plano inclinado e canal foi modelado como uma instância do modelo “AquaME”, denominada “SimplePlain”, estruturada de tal forma que os dois cenários de chuva pudessem ser simulados pelo ajuste de parâmetros representando a taxa e duração da chuva.

Para permitir que SimplePlain e qualquer instância de AquaME tivesse suas próprias funções

¹Modelo hidrológico desenvolvido pelo U.S. Army Corps of Engineers, disponível em:

<https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/downloads.aspx>.

para carregamento das características do terreno (altura das células, α , água inicial, etc.) e cenários de precipitação, foram incluídas três funções no modelo geral AquaME que são vazias no modelo geral, mas que, quando sobrescritas em uma dada instância, permitem carregar os dados específicos do caso e cenário. São elas:

- `loadTerrain(model, cell)`: atualiza uma célula com a sua altura do solo, altura inicial da água, α , indicação se a célula é rio e parâmetros de infiltração.
- `loadPrecipitation(model, cell, timeStep)`: retorna a precipitação sobre uma célula em cada passo de tempo.
- `otherParms(model)`: retorna o valor de parâmetros específicos do caso, i.e., da instância do modelo que não constam do modelo AquaME e que são usados pelas duas funções acima.

Assim, o modelo AquaME contém o algoritmo AQUA e será o mesmo para qualquer caso e cenário. As instâncias deste modelo representarão o que neste trabalho denominamos “casos” (p.ex., “caso superfície de fluxo ideal”, o plano inclinado com calha. Os cenários de um caso serão representados por diferentes conjuntos de valores atribuídos aos parâmetros da instância que representa o caso. No exemplo apresentado, os dois cenários de chuva do caso plano inclinado com calha.

Objetos e Funções do TerraME

TerraME oferece diversos objetos (“types”) e funções (“functions”) que podem ser usados na construção de modelos baseados em autômatos celulares, ou, de modo mais geral, que usem o conceito de processamento de atributos de células retangulares que dividem uma área de interesse.

Partições

Dos objetos TerraME, o AquaME usou os objetos Model, Cell, CellularSpace, Chart e Trajectory. Os quatro primeiros tiveram seus usos típicos do TerraME, mas Trajectory foi usada para representar cada uma das partições do modelo AQUA, isto é, os nove modos diferentes de dividir a área sob análise (o CellularSpace) em grades. Cada Trajectory contém a lista de células que são centros de grades da partição. A tabela `model.partition` armazena a lista de Trajectory, i.e., de partições, e é indexada e ordenada pela sequência de cálculo da partição, sequência recomendada por Rinaldi et al. (2007).

Grades

A tabela `model.grid` armazena a lista geral de grades de células possíveis, de todas as partições, e é indexada pela célula que é centro da grade. Cada elemento de `model.grid` é uma lista das células da tabela `model.grid` armazena a lista geral de grades de células possíveis, de todas as partições, e é indexada pela célula que é centro da grade. Cada elemento de `model.grid` é uma lista das células da grade, isto é, a própria célula central e seus vizinhos, ordenada por altura do solo na célula. Quando a grade está num canto (grade de 4 células) ou na borda (grade de seis células), a célula tomada como centro da grade é a célula no canto ou no centro da borda da grade (Figura 4).

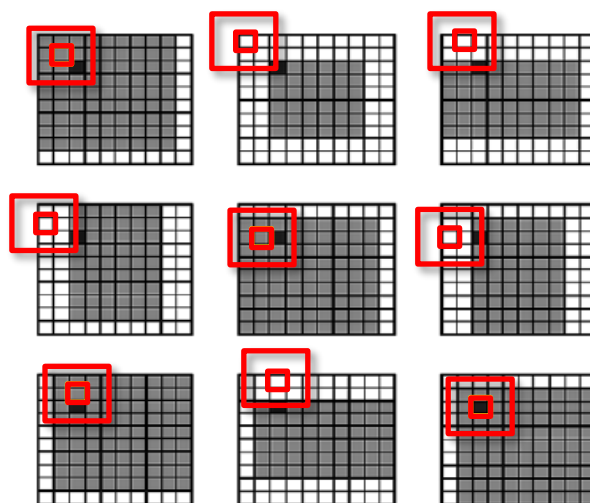


Figura 4: Em vermelho com células centrais brancas, cinco exemplos de grades de canto e de bordas.
Fonte: Adaptado de Rinaldi et al. (2007).

Resultados

Para cada um dos dois cenários de chuva, a avaliação no artigo consistiu em simular a vazão da água na extremidade mais baixa do canal ao longo do tempo, comparando-a com os resultados dos modelos AQUA e HEC-HMS. Esse trabalho produziu simulações destes mesmos cenários e nas mesmas condições, usando o algoritmo AQUA construído em TerraME. Os resultados foram muito próximos aos obtidos pelo artigo que, por sua vez, são muito próximos do modelo HEC-1² (Figuras 5 e 6).

² HEC-1 é a implementação no modelo HEC-HMS de plano inclinado com calha usado como referência pelo modelo AQUA e

pelo modelo AquaME, em dois cenários de precipitação

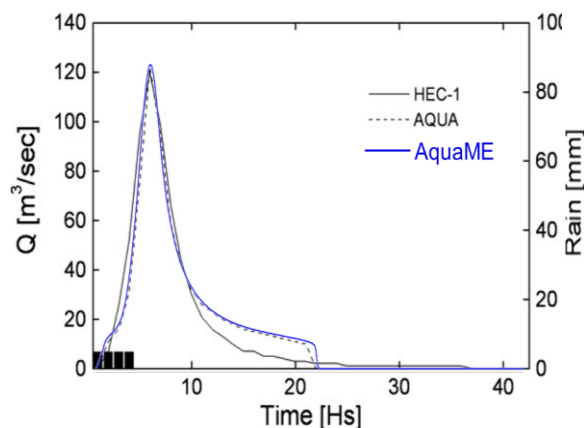


Figura 5: Chuva de 5 mm por 5 horas. Resultados de Rinaldi et al. 2007 (AQUA e HEC-1, respectivamente em linha preta tracejada e contínua) e do AquaME (azul contínua) para o caso de superfície de fluxo ideal sob o cenário de chuva de 5 mm por 5 horas. Fonte: Adaptado de Rinaldi et al. (2007).

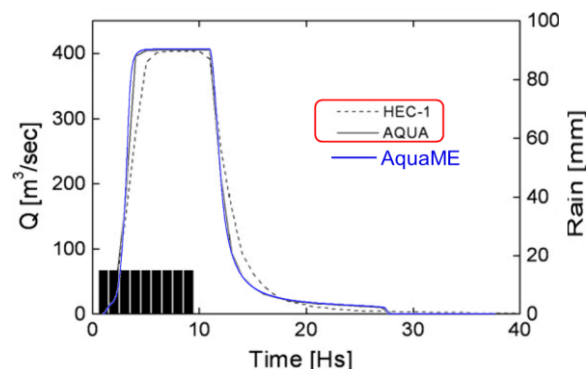


Figura 6: Chuva de 15 mm por 10 horas. Resultados Rinaldi et al., 2007 (AQUA e HEC-1, respectivamente em linha preta tracejada e contínua) e do AquaME (azul contínua) para o caso de superfície de fluxo ideal sob o cenário de chuva de 15 mm por 10 horas. Fonte: Adaptado de Rinaldi et al. (2007).

Das Figuras 5 e 6 percebe-se que os resultados encontrados são muito próximos aos obtidos pelo AQUA, apresentando, portanto, a mesma proximidade e desvios do modelo HEC-1.

Dificuldades encontradas

Premissas ocultas

Para a construção de um modelo que reproduzisse os resultados do AQUA foi preciso obter ou corrigir diversas premissas não declaradas em Rinaldi et al.(2007) com ajuda de dois dos autores do artigo:

- Os parâmetros α , α_0 , etc. para o caso de superfície de fluxo ideal, foram definidos supondo células de 80 m x 80 m e duração de um passo de tempo de 1/1000 de hora;
- O plano e o canal estão secos no início da simulação;
- O canal possui uma profundidade inicial de

2,5 metros onde a borda mais alta do canal encontra a borda mais baixa do plano;

- Mesmo tendo apenas cinco metros de largura, o canal é modelado na última linha de células do plano, com 80 metros;
- Não chove sobre o canal, ou seja, não chove sobre a linha de células de 80 metros que contém o canal;
- A fórmula de cálculo de α para o canal é a usada para rios, mesmo quando o canal ainda está seco. Considerando os parâmetros α de terreno, α_0 e n informados, isto implica que o canal tem uma resistência ao escoamento superior à do terreno do plano enquanto a água não atingir 1 metro de altura no canal;
- A borda do plano e do canal é fechada, como que por um muro alto o bastante para não permitir nenhuma vazão para fora do plano além daquela estimada na simulação, na extremidade mais baixa do canal;
- A sequência de cálculo assumida em cada passo de tempo foi: precipitação, infiltração, α , escoamento (nas 9 partições) e vazão;
- A sequência de cálculo das partições é a definida na Figura 4.

Além das premissas acima, pequenas correções nas fórmulas e ilustrações do artigo foram esclarecidas com os autores de Rinaldi et al.(2007).

Tempo de processamento

Outro desafio foi o tempo de processamento que foi possível conseguir com computadores de uso pessoal dos autores ("laptops") levando em conta as quantidades envolvidas:

- A área do plano inclinado tem $(8.800 \times 11.000)/(80 \times 80) = 15.125$ células;
- O gráfico de resultado demanda 40 horas com 1.000 passos por hora = 40.000 passos;
- Em cada passo de tempo, cada célula é percorrida 29 vezes:
 - 1 vez para o cálculo de chuva, infiltração e α ;
 - 3 vezes no cálculo do nível da água em cada uma das 9 partições, $3 \times 9 = 27$;
 - 1 vez para o cálculo da vazão.

Ou seja, foram necessários $15.125 \times 40.000 \times 29 = 17,5$ bilhões de células x passos de tempo a cada simulação, não incluídos aí o processamento para

montagem e preparação do modelo e carga dos dados, que percorrem as células mais algumas vezes;

Nos computadores pessoais dos autores, isto se traduziu nos seguintes tempos de processamento:

- 5.800 s (1h36) em um Intel(R) Core(TM) i7-7500U CPU @ 2.70GHz, 2.90 GHz, RAM 16 GB, Windows 10 Pro 64 bits.
- 17.200 s (4h46) em um Intel(R) Core(TM) i7-4500U CPU @ 1.80GHz, 2.40 GHz, RAM 8 GB, Windows 10 Pro 64 bits.

Facilidades encontradas

As análises foram facilitadas pela disponibilidade de algoritmo simples e bem descrito e de resultados para comparação, bem como a rapidez e solicitude com que autores do artigo responderam a dúvidas por e-mail para esclarecimento de premissas não declaradas e a correção de pequenos erros no artigo.

Oportunidades

Melhorias no AquaME

Os resultados suscitaram diversas oportunidades além das que inicialmente justificaram a escolha do artigo. Dentre elas, algumas são de curto prazo, para melhoria do desempenho a partir de melhor uso de recursos do TerraME e da linguagem de programação Lua, que não foram consideradas, mas que merecem avaliação:

- Otimizar (reduzir) o uso de laços (“loops”);
- Guardar resultados e atualizar gráfico (objeto Chart no TerraME) no fim do processamento;
- Substituir a tabela model.partition por índice na tabela model.grid;
- Inserir processos no Cellular Space;
- Ajustes no garbage collector usado pelo interpretador Lua;
- Trocar memória por processamento;
- Paralelização de trechos do algoritmo (como em Carneiro, 2006);
- Usar a vizinhança de von Neumann, reduzindo o processamento para cinco células, cinco processamentos por célula, e avaliar se os resultados seriam similares.

Há também ideias para acrescentar mais facilidades de uso ao modelo desenvolvido, mas cujo impacto no tempo de processamento precisa ser avaliado:

- Opção para exibição de trecho do gráfico entre dois passos de tempo escolhidos;
- Mapa com a simulação do escoamento da água sobre a área simulada;
- Recursos de calibração dos parâmetros (α , β , infiltração inicial, etc.) a partir da comparação com medições de campo ou resultados de outros modelos;
- Uso de modelo “multi-escala”, em que cada partição é modelada como Cellular Space cujas células são as grades, que por sua vez são Cellular Space das células propriamente ditas;
- Novos “types” e “functions” na biblioteca TerraME, representando objetos e funções de interesse do AquaME (por exemplo, as partições e grades).

Outros desafios

O modelo AQUA construído em TerraME pode vir a ser empregado em desafios maiores. Por exemplo, implementando evoluções do algoritmo, como o Graph AQUA descrito por Rinaldi et al. (2012) e a paralelização com o auxílio de Graphical Processing Units (GPU) descrita por Rinaldi et al. (2008).

O desafio mais interessante para os autores deste trabalho com certeza é o uso do AquaME na modelagem hidrológica do Pantanal. No entanto, para isso as oportunidades de melhoria de desempenho do modelo precisam ser exploradas antes, pois são aproximadamente 150 mil km² de área inundável entre Brasil, Bolívia e Paraguai, ou seja, milhares de vezes a área do plano inclinado usado para representar a superfície de fluxo ideal usada como exercício este trabalho.

Lições aprendidas

Foco no objetivo da modelagem

Para este trabalho, o objetivo foi reproduzir o modelo AQUA para o caso de uma superfície de fluxo ideal em dois cenários de chuva e comparar os resultados. A possibilidade de melhorar o próprio modelo foi adiada para que a reprodução fosse possível e servisse de base para futuras melhorias. Por exemplo, é discutível se o α no canal pode ser maior do que o encontrado no plano, enquanto o

canal está seco, mas mudar esta premissa faria o resultado se desviar do obtido. Usar uma linha de células de 80 m de largura para modelar um canal de 5 m também pode parecer estranho, mas assim foi feito, porque esta era uma premissa do artigo original (Rinaldi et al., 2007).

No entanto, uma diferença entre o AquaME e o AQUA foi mantida, porque não afetou os resultados: No AquaME, não são necessárias as células adicionais de bordas recomendadas pelos autores do AQUA, pois a inexistência de parte das células nas grades nos cantos e nas bordas da área estudada já têm comportamento de “muro alto o bastante”, que é a mais adequada para o caso modelado. Além disso, foi adicionada ao AquaME a possibilidade de parametrizar quais células devem ser consideradas abertas, i.e., que permitem o escoamento da água para fora do modelo. Esta estratégia foi usada para o cálculo do fluxo de saída na extremidade do canal.

Outras duas premissas foram supostas, embora sem confirmação dos autores do artigo original (Rinaldi et al., 2007), mas que não afetaram os resultados: ordem de cálculo das partições (Figura 1) e (re)cálculo do α após precipitação e infiltração, em vez de antes da precipitação e infiltração. A ordem de cálculo do α afetaria talvez o primeiro passo de tempo, mas não faria diferença nos passos seguintes, calcular no final ou no começo, pois sempre se vai calcular o α antes de duas execuções. Como são muitos passos de tempo (40.000), qualquer efeito teria se diluído. Talvez o mesmo possa se afirmar sobre a ordem de cálculo das partições, embora isto não tenha sido testado.

Confirmação de premissas

Um aprendizado prático importante foi a necessidade de contatar os autores para a confirmação de premissas não declaradas. Assumir premissas que parecem óbvias fizeram os autores deste trabalho perderem alguns dias valiosos procurando erros que não estavam no código, mas nas premissas assumidas. O principal deles foi a escala suposta, que na falta de declaração explícita no artigo, pareceu ser “obviamente”, de 1 hora para cada passo de tempo (afinal, o gráfico e dados de precipitação e unidades de medida estão em horas) e de 5 metros para a largura da célula (pois esta é menor dimensão da largura do canal, a menor no texto), quando na verdade são 1/1000 hora e 80 m, respectivamente. a menor dimensão da largura do canal, a menor no texto).

A escala afeta o resultado

Outro aprendizado é que escalas espaciais e temporais, para os mesmos parâmetros, alteram substancialmente os resultados, e não só em escala. Explicando: cada célula é esvaziada em uma quantidade de água que depende de sua dimensão, sendo esvaziada em uma velocidade dada pelo passo de tempo escolhido, de modo que mudanças na escala de espaço e tempo afetam sensivelmente o perfil da vazão no tempo, e os valores do parâmetro α e outros são dependentes destas escalas.

Conclusões

Os resultados da codificação do modelo AquaME (algoritmo AQUA em TerraME) obtidos no caso de superfície de fluxo ideal foram muito próximos aos obtidos sob as mesmas condições pelos modelos de referência AQUA e HEC-1 implementado em HEC-HMS, em dois cenários de chuva diferentes, revelando um grande potencial para o seu aperfeiçoamento e aplicação no mundo real, em regiões de planícies inundáveis como o Pantanal. O código fonte do modelo AquaME está disponível “online”.

Referências

- CARNEIRO, T. G. C. **NESTED-CA**: a foundation for multiscale modelling of land use and land cover change. 2006. 109 f. Tese (Doutorado) – INPE, São José do Campos. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/gilberto/teses/nested_ca.pdf. Acesso em: 02 maio 2024.
- CARNEIRO, T. G. S.; ANDRADE, P. R.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V.; PEREIRA, R. R. An extensible toolbox for modeling nature–society interactions. **Environmental Modelling & Software**, v. 46, p. 104-117, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.03.002>.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. Further evidence of changes in the hydrological regime of the River Paraguay: part of a wider phenomenon of climate change. **Journal of Hydrology**, n. 245, v. 1, p. 218-238, 2001.
- FLEISCHMANN, A.; SIQUEIRA, V.; PARIS, A.; COLLISCHONN, W.; PAIVA, R.; GOSSETT, M.; PONTES, PAULO; CALMANT, STEPHANE; BIANCAMARIA, SYLVAIN; CRÉTAUX, JEAN-FRANÇOIS; TANIMOUNE, B. Coupled hydrologic and hydraulic modeling of Upper Niger River Basin. **General Assembly Conference Abstracts**, v.

19, p. 884, 2017. EGU. Disponível em: <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2017/EGU2017-884.pdf>. Acesso em: 02 maio 2024.

PAZ, A. R. **Simulação hidrológica de rios com grandes planícies de inundação**. 2010. 234 f. (Tese) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

PAZ, A. R. D.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E.; PADOVANI, C. R. Large-scale modeling of channel flow and floodplain inundation dynamics and its application to the Pantanal (Brazil). **Hydrological processes**, v. 25, n. 9, p. 1498-1516, 2011. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/32461>. Acesso em: 02 maio 2024.

PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W.; BRAVO, J. M.; BATES, P. D.; BAUGH, C. The influence of vertical water balance on modeling Pantanal (Brazil) spatio-temporal inundation dynamics. **Hydrological processes**, v. 28, n. 10, p.3539- 3553, 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.9897>

RINALDI, P. R.; BAUZA, C. G.; VÉNERE, M.; CLAUSSE, A. Paralelización de autómatas celulares de aguas superficiales sobre placas gráficas. **Mecánica Computacional**, v. 27, p. 2943-2957, 2008. Asociación Argentina de Mecánica Computacional. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/267389011_PARALELIZACION_DE_AUTOMATAS_CELULARES_DE_AGUAS_SUPERFICIALES SOBRE PLACAS GRAFICAS. Acesso em: 02 maio 2024.

RINALDI, P. R.; DALPONTE, D. D.; VÉNERE, M. J.; CLAUSSE, A. Cellular automata algorithm for simulation of surface flows in large plains. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v.15, n. 3, p. 315-327, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2006.11.003>

RINALDI, P. R.; DALPONTE, D. D.; VÉNERE, M. J.; CLAUSSE, A. Graph-based cellular automata for simulation of surface flows in large plains. **Asian Journal of Applied Sciences**, v. 5, n. 4, p. 224-231, 2012. DOI: 10.3923/ajaps.2012.224.231.