

Simulação da compartimentação em reservatório no semiárido brasileiro – uso da modelagem hidrodinâmica como ferramenta de gestão

Compartmentation simulation of a brazilian semi-arid reservoir - use of hydrodynamic modeling as a management tool

- **Data de entrada:**
17/07/2019
- **Data de aprovação:**
30/01/2020

Josefa Marciana Barbosa de França^{1,2} | José Capelo Neto^{*2} | Iran Eduardo Lima Neto² | Walt Disney Paulino¹ | Francisco de Assis de Souza Filho²

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2021.045>

ORCID ID

França JMB  <https://orcid.org/0000-0001-6167-0655>
Capelo Neto J  <https://orcid.org/0000-0002-7669-7153>

Lima Neto IE  <https://orcid.org/0000-0001-8612-5848>
Paulino WD  <https://orcid.org/0000-0002-9371-8577>
Souza Filho FA  <https://orcid.org/0000-0001-5989-1731>

Resumo

A simulação hidrodinâmica do reservatório Acarape do Meio, localizado na região semiárida tropical Brasileira, foi realizada com uso do modelo matemático SisBaHiA, tendo como base a batimetria do reservatório, fluxos afluentes e dados climatológicos. O reservatório, construído em 1924, tem importância estratégica para a gestão dos recursos hídricos na região metropolitana de Fortaleza, atendendo a parte dessa população em seus diversos usos. O modelo estimou a circulação hidrodinâmica, o tempo de residência e as taxas de renovação, fundamentais para compreender a compartimentação do ambiente aquático. Apesar de a chuva ser a principal forçante de alteração nas taxas de renovação, como esperado, a renovação total da massa de água só foi observada nas áreas de reentrâncias. Usando o módulo de transporte Lagrangeano, estimou-se um tempo de residência superior a 100 dias na maioria dos compartimentos, principalmente nas áreas de transição e lacustre. Por outro lado, nas áreas dendríticas, valores superiores a 365 dias foram estimados, o que pode intensificar a recirculação de nutrientes e a eutrofização do reservatório.

Palavras-chave: Modelo SisBaHiA. Tempo de residência. Gestão de reservatórios.

Abstract

The hydrodynamic simulation of the Acarape do Meio reservoir, located in the Brazilian tropical semi-arid region, was performed using SisBaHiA mathematical model, based on reservoir bathymetry, affluent flows and climatological data. The reservoir, built in 1924, has strategic importance for the management of water resources of Fortaleza metropolitan region, serving part of the population in its various uses. The model estimated the hydrodynamic circulation, the residence time and the renewal rates, fundamental for understanding the compartmentalization of the aquatic environment. Although rainfall is the main cause of change in renewal rates, as expected, total water body renewal was only observed in the recess areas. Using Lagrangian transport module, a residence time of more

¹ Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH) - Fortaleza - Ceará - Brasil.

² Universidade Federal do Ceará (UFC) - Fortaleza - Ceará - Brasil.

* **Autor correspondente:** zecapelo@hotmail.com.

than 100 days was estimated in most of the compartments, mainly in the transition and lacustrine areas. On the other hand, in dendritic areas, values greater than 365 days were estimated, which could intensify nutrient recirculation and the eutrophication of the reservoir.

Keywords: *SisBaHiA Model. Residence time. Reservoir management.*

1 INTRODUÇÃO

A gestão eficiente dos recursos hídricos é uma das principais estratégias para o desenvolvimento sustentável nas áreas com escassez hídrica. O gerenciamento integrado contribui para evitar o desperdício e reduzir a incidência de conflitos do uso da água. Deve-se buscar, portanto, um cenário do uso racional deste recurso, procurando um equilíbrio entre as demandas da sociedade e as disponibilidades efetivas das águas superficiais e subterrâneas (MEDEIROS et. al., 2011).

Os modelos preditivos são ferramentas disponíveis para a gestão dos recursos hídricos, os quais auxiliam na identificação e avaliação de medidas destinadas à melhoria da quantidade e da qualidade da água (SHOJAEI, 2014). A partir dessas ferramentas é possível desenvolver uma visão da dinâmica dos sistemas ambientais complexos, subsidiando a gestão dos corpos aquáticos, permitindo integrar informações espacialmente e temporalmente dispersas e extrapolar essas informações para regiões nas quais não há o monitoramento necessário. O entendimento da dinâmica de processos possibilita, também, simulações de cenários futuros (ROSMAN, 2001). Os modelos matemáticos são ferramentas eficientes na simulação de mudanças físicas, químicas e biológicas em sistemas aquáticos. Contudo, é necessário que as informações de saída sejam corretamente interpretadas para que ações corretivas possam ter impactos positivos (SONG; KIM, 2009).

O primeiro estudo com modelos matemáticos aplicado à qualidade da água ocorreu em 1925 no rio Ohio, onde, com uso do modelo Streeter

e Phelps (CHAPRA, 1997), modelou-se o decaimento da matéria orgânica presente na água. Com o avanço das ferramentas computacionais, foi possível o desenvolvimento de modelos mais complexos. O comportamento físico dos corpos hídricos também foi objeto de estudo de outros pesquisadores. Collischonn et al. (2011) realizaram estudos no rio Quaraí-IPH, localizado em bacia hidrográfica com diversos reservatórios e com presença de práticas agrícolas, utilizando o modelo MGB. Posteriormente, Harari et al. (2013) aplicaram o modelo tridimensional Princeton Ocean Model (POM) para estimar o comportamento hidrodinâmico da dispersão de esgoto na Baía de Santos. Cunha et al. (2013), modelou a hidrodinâmica dos fluxos e de dispersão dos agentes passivos do rio Araguari-AP a partir do programa R-ε padrão.

Pesquisas recentes, com base em modelagem matemática, foram realizadas para comparar os modelos 1D (MTCR-1) e 3D (Delft3D) de transporte de calor, no reservatório Voçoroca - Curitiba, onde se constatou que o modelo tridimensional reproduziu a temperatura da coluna d'água com maior acurácia (POLLI & BLENIGER, 2019). Com base no modelo unidimensional GLM aplicado no reservatório Serra Azul (MG), durante o período de 2009 a 2016, foi possível identificar alterações no fluxo de oxigênio dissolvido e de nutrientes (SOARES et al., 2017). Ressalta-se, entretanto, que estudos abordando a hidrodinâmica em reservatórios no semiárido tropical ainda são escassos, o que dificulta o desenvolvimento de práticas de gestão voltadas à conservação da qualidade dos mananciais.

Os reservatórios artificiais podem ser subdivididos em compartimentos ou zonas longitudinais, que se diferenciam por apresentar processos físicos, químicos e produtividade biológica distintos: 1) zona de rio: considerada a zona mais eutrofizada, mais estreita, rasa, fluxo alto, alta concentração de nutrientes e matéria orgânica alóctone; 2) zona de transição: menos eutrófica, longa, profunda, fluxo reduzido, concentração de nutrientes e matéria orgânica intermediários; 3) zona lacustre: mais oligotrófica, mais larga, mais profunda, fluxo reduzido, concentração de nutrientes e matéria orgânica relativamente reduzida (STRACKRABA & TUNDISI, 2000 apud TUNDISI & TUNDISI, 2008).

Neste contexto, o conhecimento da compartimentação hidrodinâmica do reservatório Acarape do Meio, localizado em região tropical e semiárida do município de Redenção - CE (Brasil), é relevante para a gestão dos recursos hídricos da região, já que o mesmo é considerado estratégico, atendendo às demandas dos diversos municípios, incluindo a região Metropolitana de Fortaleza. Assim, no presente estudo, desenvolveu-se uma simulação da hidrodinâmica do referido reservatório utilizando-se o Sistema Base de Hidrodinâmica Ambiental-SisBaHiA, de forma a estimar a velocidade média do fluxo das correntes, o tempo de residência e as taxas de renovação da coluna de água nos diversos compartimentos, visando a contribuir para um melhor entendimento da relação entre hidrodinâmica e qualidade da água.

2 METODOLOGIA

2.1 Área de Estudo

O reservatório Acarape do Meio foi concluído no ano de 1924 pela Secretaria de Recursos Hídricos. Está localizado em região de serras na zona rural do município de Redenção, Ceará, região hidrográfica das Bacias Metropolitanas, com coordenada de localização 9.536.421 N, 522.254 E, Datum SAD 69, Zona 24S. Tem capacidade de armazenamento de $31,5 \times 10^6$ m³ e área de drenagem que abrange 210 km² (Fig. 1). Seu principal afluente é o rio Pacoti, cuja nascente está inserida no município de Guaramiranga-CE. Além desse afluente, a rede de drenagem compõe-se do rio Canabrava, riachos Brenha e Calção. A região apresenta índices pluviométricos médios de 1.062 mm.ano⁻¹ concentrados nos meses de janeiro a abril e a temperatura varia de 26 a 28 °C. A bacia hidrográfica apresenta relevo de Maciços Residuais e Depressões Sertanejas, sendo a cobertura vegetal predominante de caatinga arbustiva densa e Floresta Subcaducifólia Tropical Pluvial (IPECE, 2006). A área da bacia hidrográfica compõe-se de Luvissolos, que ocupam terrenos de relevo variado desde plano até montanhoso e originados a partir de materiais distintos; e Planossolo Solódico, que ocorrem predominantemente em relevo plano a suavemente ondulado, ou na região da serra do Baturité, em relevo forte ondulado a montanhoso, que são solos profundos e geralmente bem drenados (IPECE, 2006).

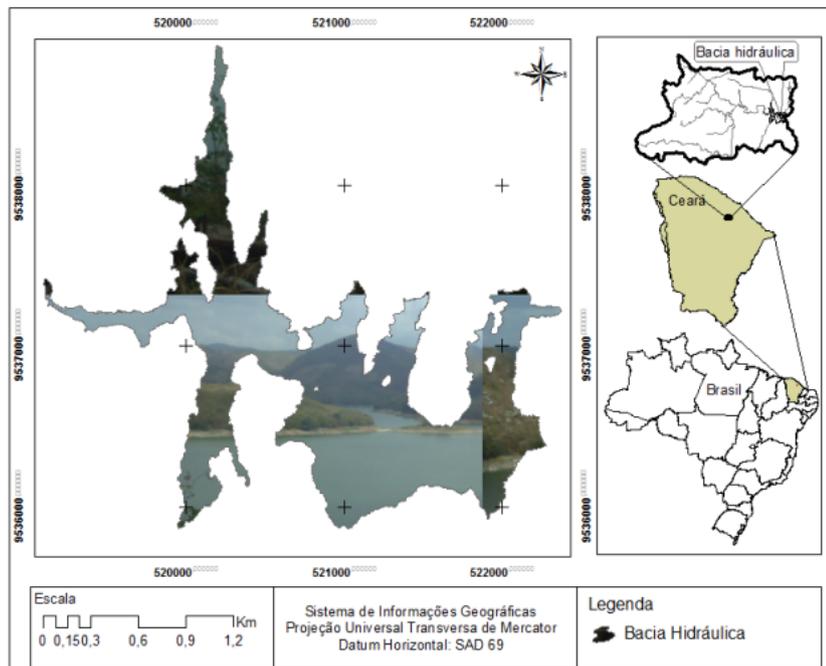


Figura 1 - Localização do reservatório Acarape do Meio - CE

2.2 Modelagem Hidrodinâmica

O modelo hidrodinâmico (MH) proposto possibilita a simulação da circulação hidrodinâmica para corpos de água naturais. Os resultados do modelo podem ser apresentados tanto em 3D como em 2DH, dependendo dos dados de entrada. O MH-3D é capaz de calcular campos de velocidades tridimensionais, obtendo os perfis de velocidade ao longo da profundidade, enquanto o MH-2DH (modelo bidimensional promediado na vertical) apresenta as variações das grandezas médias na coluna d'água (ROSMAN, 2012). O processo de calibração foi minimizado adotando-se as seguintes estratégias: discretização espacial via elementos finitos quadráticos e transformação, o que permite um bom mapeamento de corpos de água com linhas de costa e batimetrias complexas; adoção de campos de vento e de atrito do fundo podendo variar dinamicamente no tempo e no espaço, e modelagem de turbulência multiescala utilizando Simulação 122 de Grandes Vórtices (LES) (ROSMAN, 2012).

Os passos de implementação do modelo hidrodinâmico foram: malha numérica – elaborada manualmente utilizando-se o programa Argus One®: geração e edição de malhas de elementos finitos, que posteriormente foram importadas no SisBAHIA; interpolação dos dados batimétricos – utilizou-se o ArcGis e o Excel para processar as variáveis: x (latitude), y (longitude), z (profundidade), rugosidade do fundo nos pontos da malha numérica, modelagem geométrica, com geração do mapa base; a definição das condições iniciais e condições de contorno. Também foram utilizados os programas Grapher® para geração de resultados em forma de gráficos e o Surfer® para geração de resultados em forma de mapas. Destaca-se que as cores em branco que aparecem nas figuras dos resultados das simulações são áreas secas, pois o reservatório estava com pouca capacidade de armazenamento de água, devido ao período de estiagem.

Conforme Rosman (2012), as Eq. 1, 2 e 3 representam as principais equações governantes do

modelo hidrodinâmico 2DH promediado na vertical (ζ, U, V) para escalares resolvíveis, que são representadas pelas equações do movimento

“Navier Stokes” na direção x (1) e y (2), e pela equação da continuidade em condição de incompressibilidade.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = -g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{gH}{2\rho\sigma} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{1}{\rho\sigma H} \left(\frac{\partial(H\tau'_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(H\tau'_{xy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho\sigma H} (\tau_x^S - \tau_x^B) + 2\phi \text{sen}\theta V - \frac{U}{H} \sum q \quad (1)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} - g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{gH}{2\rho\sigma} + \frac{1}{\rho\sigma H} \left(\frac{\partial(H\tau'_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(H\tau'_{yy})}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho\sigma H} (\tau_y^S - \tau_y^B) + 2\phi \text{sen}\theta U - \frac{U}{H} \sum q \quad (2)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = \sum q \quad (3)$$

Onde:

$\frac{\partial U}{\partial t}$ - aceleração local do escoamento;

$U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y}$ - aceleração advectiva do escoamento;

$-g \frac{\partial \zeta}{\partial x}$ - variação da pressão hidrostática na direção X;

$\frac{gH}{2\rho\sigma} \frac{\partial \rho}{\partial x}$ - variação da pressão hidrostática na direção X;

$\frac{1}{\rho\sigma H} \left(\frac{\partial(H\tau'_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(H\tau'_{xy})}{\partial y} \right)$ - resultante das tensões dinâmicas turbulentas;

$\frac{1}{\rho\sigma H} (\tau_x^S)$ - tensão do vento na superfície livre por unidade de massa;

$2\phi \text{sen}\theta V$ - aceleração de Coriolis decorrente do referencial estar se movendo com a rotação da terra;

$\frac{U}{H} \frac{(q_P - q_E - q_I)}{\sum q}$ - efeitos na quantidade de movimento devidos a variações de massa em função dos fluxos, por unidade de área, de precipitação q_p , evaporação q_e e infiltração q_i .

2.3 Dados de Entrada do Modelo Matemático

As variáveis climatológicas de direção e velocidade do vento, radiação e precipitação foram obtidas da estação automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2013), localizado no município de Guaramiranga, coordenada 9529009 mN, 507668 mE, Datum SAD 69, Zona 24S. Isso corresponde a uma distância de aproximadamente 16 km do reservatório.

Apesar de as precipitações terem começado em janeiro (Fig. 2A), as medições das vazões iniciaram em fevereiro e terminaram em abril de 2012. As campanhas foram realizadas semanalmente com uso do medidor de vazão ADV “Acoustic Doppler Velocimeter” nas quatro seções dos rios e riachos afluentes. Nos demais dias foi registrada a cota da leitura das régua linimétricas instaladas nas respectivas seções do leito dos rios e riachos. A prin-

principal contribuição foi proveniente da sub-bacia do rio Pacoti (154,26 km²), e os demais aportes foram

das sub-bacias: rio Canabrava (21,31 km²), riacho Brenha (16,15 km²) e riacho Calção (6,69 km²).

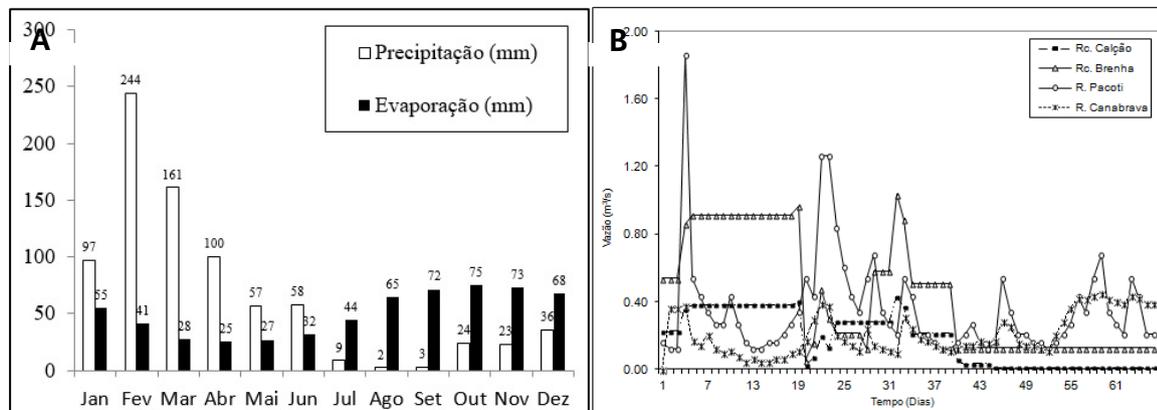


Figura 2 - Dados de precipitação evaporação (A) e dados das vazões (B) dos rios e riachos afluentes do ano de 2012

Na Fig. 3, identificou-se que a velocidade dos ventos para o intervalo de 4,1 a 4,9 m.s⁻¹ predominou na área de estudo, com frequência de 40,67%, seguido do intervalo de velocidade de 2,1 a 2,9 m.s⁻¹, com frequência de 28,11%. As demais velocidades foram menos frequentes. No entanto, no dia 14 de fevereiro ocorreu um even-

to extremo e atingiu o valor 12 m.s⁻¹, o que pode ter ocasionado diversas alterações na hidrodinâmica do reservatório. De forma geral, constata-se que as maiores variações ocorreram principalmente no faixa de 2 a 5 m.s⁻¹, representadas pela direção predominante nas zonas Nordeste a Leste (Fig. 3).

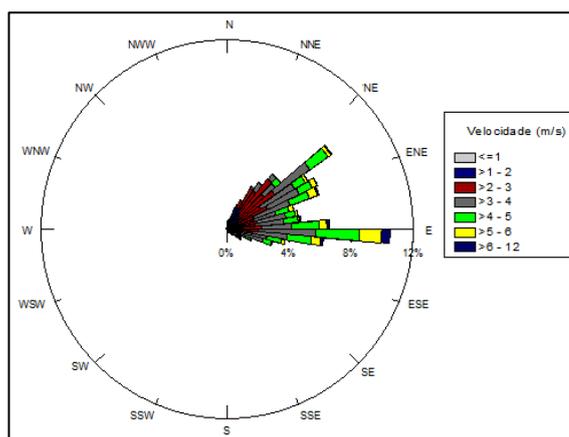


Figura 3 - Frequência da velocidade dos ventos no período de estudo

A malha de elementos finitos foi elaborada manualmente no programa Argus One, com 326 elementos. No processo de implementação da malha de elementos finitos quadrangulares, procurou-se preservar os contornos natu-

rais do reservatório, evitando assim elementos com grandes distorções geométricas. Além disso, a discretização foi mais refinada nas áreas mais estreitas, como entrada e saída de fluxo (Fig. 4A). A formulação numérica do modelo hi-

hidrodinâmico empregou o Método dos Elementos Finitos com elementos sub-paramétricos Lagrangeanos biquadráticos, para a discretização espacial horizontal. A discretização temporal foi feita por meio de esquema numérico implícito de diferenças finitas (ROSMAN, 2012). Os dados

de batimetria do reservatório e as informações fluviométricas foram cedidos pela COGERH. Em referência a batimetria foram coletados 16.028 pontos (X, Y, Z), a partir do uso de ecobatímetro com feixe único (single beam), onde se constatou a profundidade máxima (Z) de 28 m (Fig. 4B).

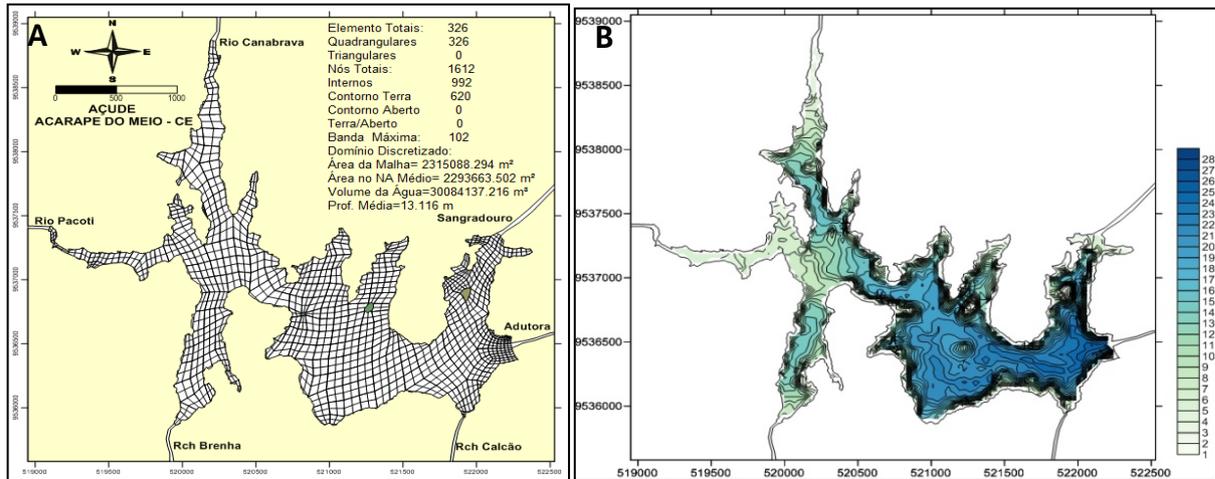


Figura 4 – (A) Representação da malha de elementos finitos e (B) Visualização da cota dos níveis da batimetria do reservatório Acarape do Meio

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Modelagem Hidrodinâmica

Os baixos índices de armazenamento, no segundo semestre, após longos períodos operação do reservatório, são comuns, o que ocasionou a redução da capacidade de volumétrica para 34% em dezembro de 2012 (Fig. 5) devido ao atendimento da demanda para usos diversos, que inclui parte demanda dos distritos industriais de Maracanaú e Pecém. Adicionalmente, a evapotranspiração contribuiu de maneira significativa para o consumo de água do corpo hídrico em análise, sendo os índices, em média, cerca de 2.000 mm/ano. Em algumas regiões a evapotranspiração pode atingir cerca de 7 mm/dia (SUASUMA, 2002). Pode-se verificar na Fig. 6 que a simulação da evolução volumétrica do reservatório, a partir de modelagem matemática, apresentou elevada relação ($R^2 > 0,93$) quando comparada às cotas de níveis coletadas em campo. Estudo similar da caracterização da hidrodinâmica

foi realizado no reservatório Daecheong, com uso do modelo CE-QUAL-W2. Os resultados de simulação das cotas de níveis neste trabalho também foram representativos dos dados observados em campo, sendo observada, neste caso, a estratificação da coluna de água (HA & LEE, 2008).

O reservatório Acarape do Meio tem profundidade máxima de 28 m e média de 13 m, sendo considerado raso (profundidade média < 20 m). Conforme Bernhardt (1995), reservatórios rasos são mais propícios à eutrofização que reservatórios profundos já que a biomassa produzida no epilímnio não é completamente degradada sobre condições aeróbias, sendo então degradada no hipolímnio, provocando a desoxigenação. Nessas condições, o fósforo sedimentado é solubilizado e, em lagos rasos, a energia resultante da ação dos ventos provoca a mistura da coluna d'água, disponibilizando esse nutriente nas camadas superiores e aumentando a produção da biomassa aquática (BERNHARDT, 1995).

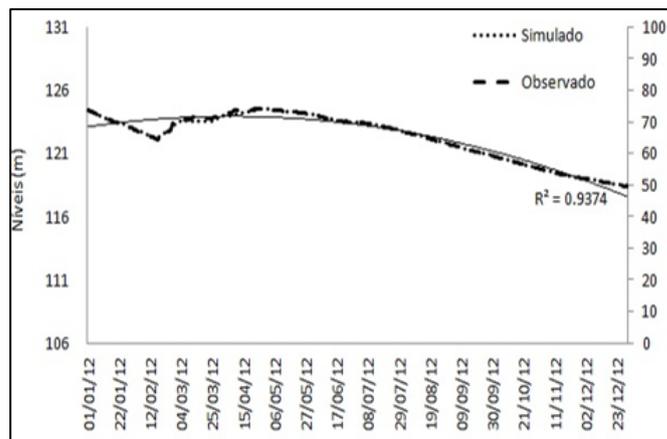


Figura 5 - Representação das cotas de níveis simuladas x observadas para o ano 2012 do Acarape do Meio - CE

Os resultados apresentados na Tabela 1 referem-se aos valores médios dos fluxos das correntes estimadas pelo módulo MH-3D, para velocidades dos ventos registradas de 2 a 5 m.s⁻¹, nas camadas: superficial, meio e fundo. O intervalo de velocidade dos ventos foi predominante na maioria do tempo na região em análise, com direção nas zonas: Nordeste a Leste. Pode-se identificar que, a partir do aumento da velocidade do vento (Tabela 1), ocorreu o aumento do valor médio nos campos de correntes tridimensionais para cada camada. Os resultados são representativos do segundo semestre, e consequentemente, não têm influência de fluxo afluente ao reservatório, ou seja, os fatores que afetaram a estimativa de simulação da hidrodinâmica foram ocasionados principalmente pelo vento e pela gestão operacional de liberação de vazão para o rio, a jusante do reservatório.

Observa-se nesses resultados que a camada superficial apresenta maior valor nos campos de correntes advectivas, quando comparada às demais

profundidades. Nesta primeira zona, a diferença nos resultados é o dobro dos valores médios nas demais camadas, exceto no dia oito de agosto de 2012. O fato de estar localizado em região de serras e ter profundidade média de 13 metros contribuiu para as baixas velocidades nos campos de correntes, quando comparadas com outras pesquisas com uso do modelo matemático utilizado no presente estudo. Santos (2012), com uso do modelo SisBaHia no reservatório de Vargem das Flores (profundidade média de 5,8 m e máxima de 20,6 m), verificou que a velocidade das correntes não ultrapassava 0,11 m.s⁻¹ para ventos de 2,6 m.s⁻¹, exceto nos deltas de alguns tributários, como o do Córrego Água Suja, onde a velocidade das correntes foi intensificada e alcançou valores de 0,24 m.s⁻¹. Franz (2010) aplicou o SisBaHia no reservatório do Iraí - PR com capacidade de armazenamento de 58.000.000 m³ e profundidade média de 4,73 m, e constatou que ventos de 9,5 m.s⁻¹ provocavam fluxos de correntes com velocidade de 0,232 m.s⁻¹ nos locais mais rasos, enquanto no instante sem vento, mas com aporte afluente, esse valor foi de apenas 0,0493 m.s⁻¹.

Tabela 1 - Simulação do Módulo MH-3D para campos de velocidade dos ventos do Acarape do Meio - CE

Velocidade do vento (m.s ⁻¹)	Ângulo (°)	Dia da simulação (Ano: 2012)	Subdivisão em camadas		
			Superfície (m.s ⁻¹)	Meio (m.s ⁻¹)	Fundo (m.s ⁻¹)
2	18	8 de agosto	0,0048	0,0030	0,0034
3	101	10 de agosto	0,0108	0,0037	0,0039
4	91	28 de setembro	0,0119	0,0057	0,0055
5	90	21 de outubro	0,0180	0,0070	0,0068

Neste estudo, destacou-se a representação da simulação hidrodinâmica da velocidade do vento de quatro $m.s^{-1}$, em decorrência da predominância do intervalo de 4,1 a 4,9 $m.s^{-1}$ na área de estudo, cuja frequência foi de 40,67% para o ano de 2012. Pode-se visualizar na Fig. 6 (A, B e C) que a simulação da hidrodinâmica do reservatório pelo módulo MH-3D, difere nas três camadas, com relação à velocidade e direção dos campos de correntes. Os resultados apresentados têm o mesmo ângulo de 91° para a velocidade de vento de 4 $m.s^{-1}$. Neste período, constatou-se que a direção dos vetores das correntes nas duas camadas de maiores profundidades segue direção contrária aos vetores da camada superficial. Por abordar um reservatório de profundidade pe-

quena, a ação do vento pode ter influência em toda a hidrodinâmica da coluna de água.

Com base no módulo MH-2DH, simulou-se a maior velocidade do vento de 12 $m.s^{-1}$ para a coluna d'água, registrada no dia 14 de fevereiro de 2012, a uma hora da manhã, na direção 99° . Esse foi o maior valor registrado em 2012 (Fig. 7). Salienta-se que neste período houve a influência de fluxo de vazão proveniente do período de chuvas na bacia hidrográfica do reservatório em estudo. O valor médio do campo de corrente na coluna d'água foi de 0,058 $m.s^{-1}$. Nas regiões mais rasas, os campos de correntes alcançaram valores de 0,062 $m.s^{-1}$. Nessas áreas, o vento pode provocar uma mistura na coluna d'água e influenciar alterações físico-químicas da água (PADISAK et al., 1988).

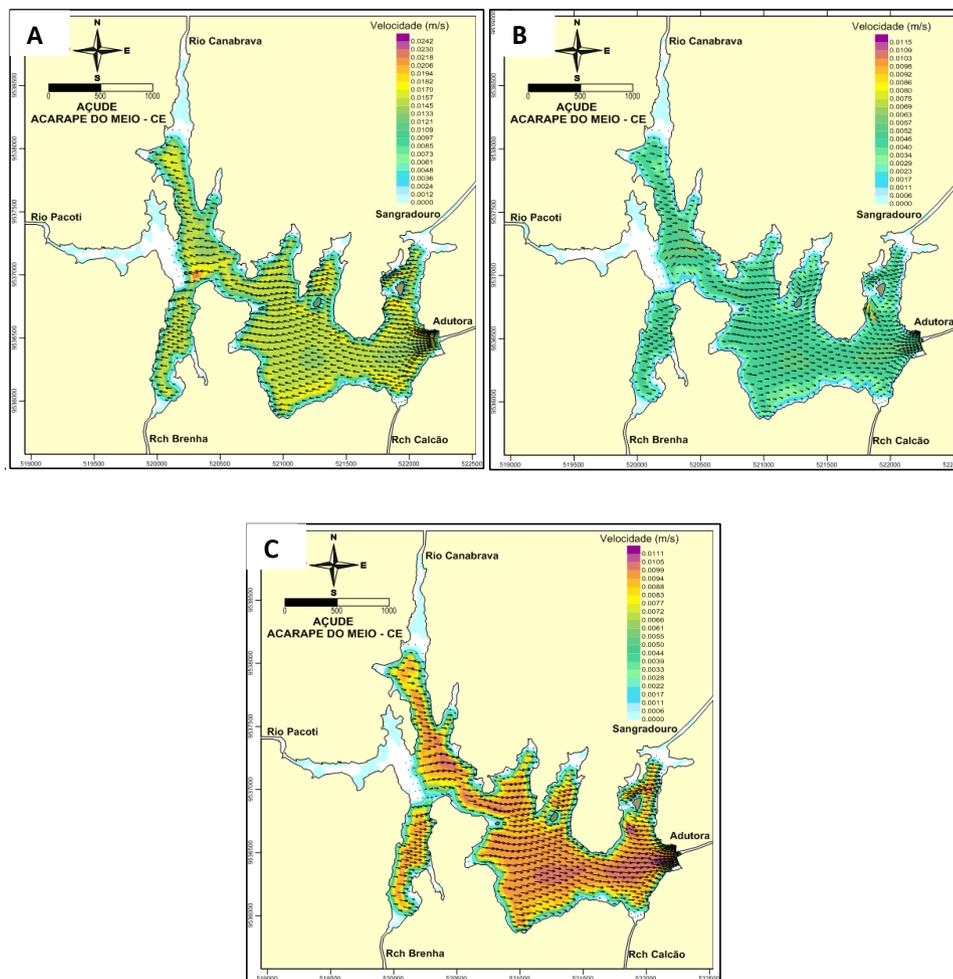


Figura 6 - Simulação MH-3D utilizando velocidade média de 4 $m.s^{-1}$ na (A) camada da superfície, (B) na camada do meio e (C) na camada do fundo.

É possível visualizar, também na Fig. 7, a influência das vazões na hidrodinâmica nas áreas de reentrâncias. Essa forçante altera a direção dos vetores de maneira irregular e sobrepõe-se em relação à atuação da forçante vento sobre a circulação nas áreas rasas e próximo às entradas dos quatro afluentes (Fig. 8). Segundo Thornton (1990), apesar de na maioria dos lagos e reservatórios o vento ser a principal fonte de energia cinética e de mistura, os fluxos de entrada de rios podem eventualmente gerar escoamento em diferentes profundidades, dependendo da temperatura e densidade da água.

3.2 Tempo de Residência e Taxa de Renovação

Entende-se por tempo de residência (TR) o tempo médio de permanência de uma partícula fluida no compartimento. Usualmente, o TR é calculado

pela razão entre o volume (m^3) do compartimento e o fluxo residual (m^3/s) através do compartimento (CUCCO e UMGIESSER, 2005). Os tempos de residência do reservatório foram simulados a partir do modelo de transporte Lagrangeano MH-2DH, sendo levada em conta toda coluna d'água. A simulação foi feita para um período de 365 dias, a fim de determinar diferentes tempos de residência nos vários compartimentos do reservatório. O tempo de residência da água é uma das variáveis mais importantes que influenciam os processos químicos e biológicos do reservatório, podendo induzir condições favoráveis para a ciclagem dos nutrientes e para o desenvolvimento de fitoplâncton e macrófitas aquáticas. De forma geral, quanto maior o tempo de residência, maiores as alterações na qualidade da água do reservatório em relação à dos rios que o alimenta (LACTEC, 2009).

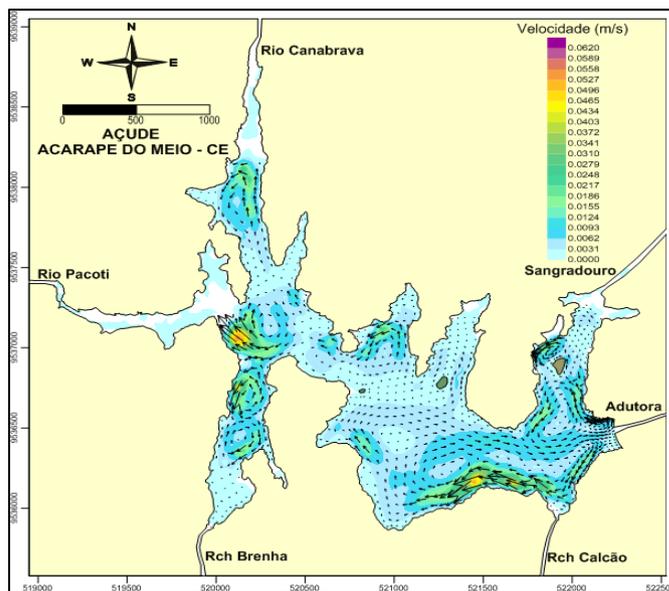


Figura 7 - Simulação MH-2DH da velocidade do vento de 12 m.s^{-1}

Na presente pesquisa, o tempo de residência dependeu essencialmente da gestão operacional (i.e. retirada pela adutora), aporte das vazões de montante e da morfometria do reservatório. Os resultados da simulação (Fig. 8A) identificaram que na

maioria dos compartimentos, o tempo de residência foi superior a 100 dias. Em relação às áreas das reentrâncias, os valores foram superiores ao período em análise de um ano. Segundo Sperling (1999), em lago com contorno irregular das margens, com

formato dendrítico, o tempo de residência da água é mais elevado e favorece o acúmulo de nutrientes e matéria orgânica nessas regiões. Esses ambientes são normalmente rasos, de pouca movimentação da água e com a coluna líquida intensamente exposta à radiação solar. Essas condições proporcionam a atividade de decomposição de matéria orgânica e o crescimento de microalgas. Em áreas rasas e com alto tempo de residência, é também esperada uma forte influência de ventos na circulação hidrodinâmica (FRANZ, 2010).

A taxa de renovação da água do reservatório é interpretada como a porcentagem de água

que adentrou na região de interesse, ou seja, é a quantificação da água “nova” nos diferentes compartimentos desde o início das chuvas e/ou proveniente de transposição, que neste caso não se aplica. As taxas de renovação, obtidas pelo módulo MH-2DH, foram associadas ao primeiro semestre do ano, devido ao período de chuvas na região, atingindo 100% apenas nas quatro áreas de reentrâncias, causadas pelas contribuições afluentes dos rios: Pacoti e Canabrava e dos riachos: Calção e Brenha. De maneira geral, os menores valores de renovação ocorreram na região central do reservatório (Fig. 8B).

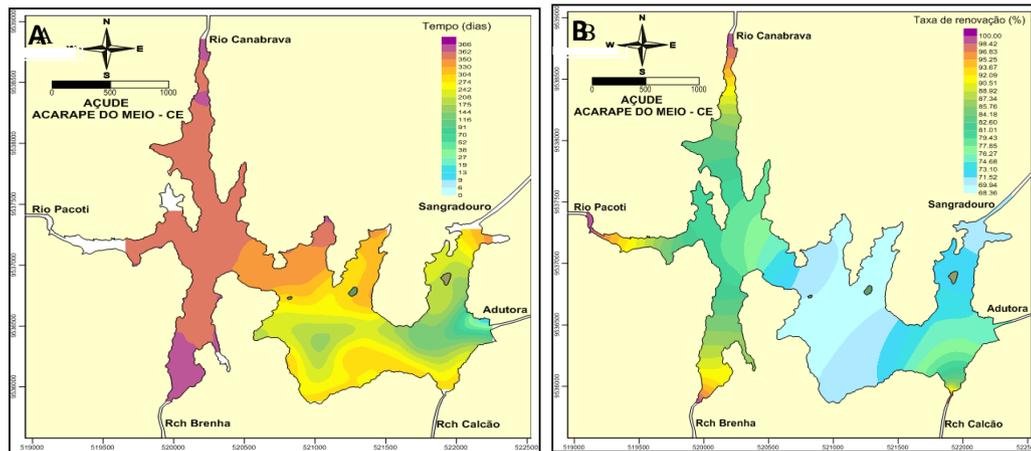


Figura 8 - Simulação MH-2DH do (A) tempo de residência e (B) taxa de renovação.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados estimados das cotas de níveis obtidos pela modelagem hidrodinâmica tiveram uma correlação próxima com os observados in loco, indicando uma simulação precisa do sistema físico. Identificou-se a partir dos módulos MH-3D e MH-2DH que a circulação hidrodinâmica de toda a massa d'água é influenciada principalmente pelos ventos e, em menor escala, pelos tributários no período de chuvas na área da bacia hidrográfica. A morfologia do reservatório foi outra característica importante, impactando na variação do tempo de residência da água. O

módulo Euleriano mostrou-se sensível ao período de precipitação, proporcionando identificar as alterações nas taxas de renovação a partir do aporte de vazões afluente e mantendo-se quase que constante após as vazões afluentes cessarem. A renovação total da massa de água só foi possível nas quatro áreas de reentrâncias, ou seja, nas áreas próximas à entrada das vazões afluentes dos rios. O módulo Lagrangeano identificou que o tempo de residência é alto, superior a 100 dias na maioria dos compartimentos em profundidades elevadas enquanto nas zonas rasas e dendríticas esse valor foi superior a um ano.

De maneira geral, os altos tempos de residência estão associados ao período de estiagem na região. Observou-se a necessidade de minimizar os erros do modelo, principalmente os seguintes: a longa distância (16 km) entre a estação do INMET e o reservatório Acarape do Meio; o entorno do reservatório apresenta contornos íngremes, que pode alterar a direção e a velocidades dos ventos. Além desses fatores, deve-se ter cuidado na confecção da malha de elementos finitos e no processo de coleta de dados da batimetria.

5 AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio do Professor Paulo Cesar Colonna Rosman, da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), e da Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH) pela liberação dos dados primários. Esta pesquisa teve apoio da Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP [01.14.0130.00-1107 / 13 MCTI / FINEP / CT-HIDRO-01/2013], da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES [Auxílio à Pesquisa PROEX], da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Ceará - FUNCAP [PNE-0112-00042.01.00/16] e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq PDJ [150429 / 2016-9] e Universal [403116 / 2016-3]

6 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Todos os autores contribuíram de forma igualitária.

7 REFERÊNCIAS

BERNHARDT, H. Reservoirs and drinking-water supply – a global perspective. *J. Water SRT-Aqua.*, v.44, n. 1, p. 2 – 17, 1995.

CHAPRA. S.C.. **Surface Water Quality Modeling**. McGraw-Hill. (1997)

COLLSCHONN, B., PAIVA, R. C. D., COLLSCHONN, W., MEIRELLES, F. S. C., SCHETTINI, E. B. C., FAN, F. M. Modelagem Hidrológica de

uma Bacia com Uso Intensivo de Água: Caso do Rio Quaraá – RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. V 16 n.4, 119-133. 2011. ISSN 2318-0331.

CUCCO, A.; UMGIESSER, G. **Modeling the Venice Lagoon Residence Time**. *Ecological Modelling*. v. 193, n.193, p. 34 – 51, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.07.043>

CUNHA, A. C., ALBUQUERQUE, H. F., PINHEIRO, L. A. R. Modelagem e Simulação do Escoamento e Dispersão Sazonais de Agentes Passivos no Rio Araguaí AP: Cenários para o AHE Ferreira Gomes – I – Amapá/Brasil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. V 18 n.1, 67-85. 2013. ISSN 2318-0331.

FERNANDES. D. P. **Avaliação Limnológica. Morfometria. Batimetria e Modelagem Hidrodinâmica em Reservatório: Serra Azul – MG**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais. 2012.

FRANZ. G. A. S. **Desenvolvimento. Aplicação e Análise Do Modelo de Qualidade da Água e Eutrofização do Sisbahia®**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental). Curitiba – PR. 158p.. 2010.

MEDEIROS, C. N.; GOMES, D M.; ALBUQUERQUE, E. L S, CRUZ, M. L. B. **Os Recursos Hídricos do Ceará: Integração, Gestão e Potencialidades**. IPECE. 2011.

HARARI, J., FERREIRA, F. R., DEGASPARI, F. A., SANTOS, S. M. Modelagem Numérica da Hidrodinâmica e da Dispersão de Esgoto na Baía de Santos, SP. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. V 18 n.1, 205-214. 2013. ISSN 2318-0331.

IPECE. **Perfil básico municipal de Guaramiranga**. Disponível em: http://www.ipece.ce.gov.br/publicacoes/perfil_basico/PBM_2004_PDF/Guaramiranga.pdf. Acesso em: 05 junho/2013.

IPECE. **Perfil Básico Municipal Redenção**. 2006. Disponível em: http://www.ipece.ce.gov.br/publicacoes/perfil_basico/PBM_2006/Redencao.pdf. Acesso em: 20 junho/2011.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomaticas>. Acesso em: jan. 2013

LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - **Modelagem Matemática da Qualidade da Água para UHE Mauá**. Relatório Final. Curitiba. 2009.

HÁ, S. R.; LEE, J. Y. **Application of CE-QUAL-W2 model to eutrophication simulation in Daacheong reservoir stratified by turbidity storms**. 2008.

POLLI, B. A.; BLENINGER, T. Comparison of 1D and 3D reservoir heat transport models and temperature effects on mass transport. **RBRH**, Porto Alegre, v. 24, e30, 2019.

ROSMAN. P. C. C. **Referência Técnica do SISBAHIA – SISTEMA BASE DE HIDRODINÂMICA AMBIENTAL**. Rio de Janeiro. Programa COPPE: Engenharia Oceânica. Área de Engenharia Costeira e Oceanográfica. 2012

ROSMAN, P.C.C. Um Sistema Computacional de Hidrodinâmica Ambiental. In: **Métodos Numéricos em Recursos Hídricos 5**, cap. 1. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, ABRH. 2001.

SANTOS, S. P. **Morfometria. Compartimentação e Hidrodinâmica de um Reservatório Periurbano Tropical: Prognósticos sobre o Tempo de Vida Útil do Reservatório de Vargem das Flores**. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas). Minas Gerais- Belo Horizonte – Brasil. 130p. 2012.

SHOJAEI, N. **Automatic Calibration of Water Quality and Hydrodynamic Model (CE-QUAL-W2)**. 2014.

SOARES, L. M. V.; SILVA, L. M. V.; VINÇON-LEITE, B.; ELEUTÉRIO, J. C. LIMA, L. C.; NASCIMENTO, N. O. Modelagem de reservatório metropolitano destinado à produção de água potável: Uma ferramenta para avaliar os impactos da escassez hídrica sobre a hidrodinâmica de ambientes lênticos. In: XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Florianópolis. 2017 **Anais...**

SPIEGELBERG, G. **Um Modelo Morfodinâmico: Desenvolvimento e Aplicação no Reservatório da Usina Hidroelétrica de Estreito**

no Rio Tocantins. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica). Rio de Janeiro. RJ – Brasil. 106p. Dezembro 2010.

SPERLING, E. V. **Morfologia de lagos e represas**. Desa/UFMG. 137 p. 1999.

SUASSUNA, J. **SEMI-ÁRIDO: proposta de convivência com a seca**. Fundação Joaquim Nabuco. Recife, 2002.

SONG, Tao; KIM, Kyehyun. Development of a water quality loading index based on water quality modeling. **Journal of Environmental Management**. v.90, n.3, p. 1534-1543, mar. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.11.008>

THORNTON, K.W. 1990. Perspectives on reservoir limnology. In: THORNTON, K.W.; KIMMEL, B.L. & PAYNE, F.E (Ed.). **Reservoir limnology: Ecological perspectives**. Somerset: John Wiley & Sons, Inc. 246p.

TUNDISI, J. G.; TUNDISI, M. T. M. **Limnologia: Ciência da Terra**. São Paulo: Oficina de Textos. 2008.