

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

SISTEMA DE CONTROLE DE BALANÇO HÍDRICO APLICADO À GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO

Jessé Dias Monteiro¹; Luiz Henrique Nobre Bof¹; Ana Luíza Grateki Barbosa¹; Cleyton Pastorini Ferreira¹; Deysilara Figueira Pani¹; Ivna Carla Herzog Mação Campos¹; Lucas Fuentes Silveira¹ & Fábio Ahnert¹

Abstract: The granting of water use rights is a critical management tool for the quantitative and qualitative control of water resources. For its effective implementation, it is necessary, among other actions, to define criteria and develop tools that enable a more integrated, efficient, and agile analysis of these aspects. In this context, the importance of Decision Support Systems (DSS) stands out, as they assist in decision-making by providing greater speed and accuracy in the analysis of water use permit applications. The objective of this study was to develop a system for analyzing water withdrawal permits, specifically applied to the State of Espírito Santo, Brazil. Initially, geographic, hydrological, and administrative databases were compiled and prepared. The system was developed using the PostgreSQL database management system, integrated with the QGIS Geographic Information System. The results indicate that the system consistently estimates the grantable water availability and identifies critical sections, providing technical support for the analysis of quantitative water use permits in Espírito Santo.

Resumo: A outorga do direito de uso dos recursos hídricos é um instrumento de gestão essencial para o controle quantitativo e qualitativo da água. Para sua efetiva implementação, é necessário, entre outras ações, definir critérios e desenvolver ferramentas que possibilitem uma análise integrada, eficiente e ágil desses aspectos. Nesse contexto, destaca-se a importância do desenvolvimento de Sistemas de Suporte à Decisão (SSD), que auxiliam a tomada de decisão, proporcionando maior rapidez e precisão na análise dos pedidos de outorga. O objetivo deste estudo foi desenvolver um sistema para análise de outorgas de captação de água, aplicado ao Estado do Espírito Santo. Inicialmente, foram realizados o levantamento e a preparação das bases de dados geográfica, hidrológica e administrativa. O sistema foi desenvolvido utilizando o gerenciador de banco de dados PostgreSQL, em conjunto com o Sistema de Informação Geográfica QGIS. Os resultados indicam que o sistema estima com consistência a disponibilidade hídrica outorgável e identifica trechos críticos, apoiando tecnicamente a análise de outorgas quantitativas no Espírito Santo.

Palavras-Chave – outorga, disponibilidade hídrica, sistema de suporte à decisão.

1. INTRODUÇÃO

A água desempenha papel fundamental nas dimensões ambiental, social e econômica, porém tem sofrido degradações em sua qualidade e quantidade devido às ações antrópicas. Em áreas de alta demanda por múltiplos usos, a gestão adequada dos recursos hídricos é essencial para garantir o acesso equitativo e mitigar conflitos de uso (Silva *et al.*, 2017). Neste contexto, a Política Nacional de Recursos Hídricos (Lei 9.433/1997) instituiu instrumentos como a outorga de direito de uso da

¹⁾ Agência Estadual de Recursos Hídricos do Espírito Santo – Agerh. Avenida Jerônimo Monteiro, 1000, Centro. CEP 29010-935, Vitória, ES, Brasil. (gmec@agerh.es.gov.br)

água, com foco no uso racional e sustentável e no enfrentamento da degradação das bacias hidrográficas (Vera *et al.*, 2017).

A outorga, segundo Almeida e Curi (2016), é um ato administrativo que regula o uso da água por tempo determinado e permite o controle quantitativo e qualitativo dos corpos hídricos, assegurando isonomia entre usuários e possibilitando a gestão territorial integrada. No Espírito Santo, a outorga segue a Resolução Normativa nº 005/2005 do Conselho Estadual de Recursos Hídricos (CERH, 2005), sendo competência da Agência Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Espírito Santo – Agerh conceder direitos de uso das águas superficiais e subterrâneas estaduais.

Para conceder outorga, o Estado utiliza como parâmetro a vazão de permanência Q90, que representa o valor de vazão excedido em 90% do tempo de uma série histórica. A Instrução Normativa nº 013/2009 do Iema estabelece que, em regra, apenas até 50% dessa vazão pode ser outorgada (ANA, 2011; Iema, 2009). Entretanto, o processo de análise ainda é predominantemente manual em muitos órgãos gestores, o que o torna demorado e suscetível a falhas. Assim, como trazido por Porto *et al.* (1997), é importante a adoção de Sistemas de Suporte à Decisão (SSD), que integram dados e modelos matemáticos em interfaces gráficas para qualificar a tomada de decisão.

Exemplos bem-sucedidos do uso de SSDs incluem o sistema desenvolvido por Pessoa *et al.* (2012), que integrou modelos hidrológicos ao SIG para analisar pedidos de outorga na bacia do rio dos Sinos (RS), e o sistema de Garcia *et al.* (2018), voltado à outorga de lançamento de efluentes na bacia do rio Atibaia (SP). Inspirada nesses modelos, a Agerh desenvolveu o Sistema de Controle de Balanço Hídrico do Espírito Santo (SCBH-ES), que considera a relação entre disponibilidade hídrica e demanda, aprimorando a análise técnica dos pedidos de outorga no Estado. Este artigo apresenta a modelagem do SCBH, suas variáveis, aplicações e contribuições à gestão dos recursos hídricos capixabas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Sistema de Controle de Balanço Hídrico do Espírito Santo (SCBH-ES)

O SCBH-ES foi desenvolvido a partir da modelagem das bacias hidrográficas situadas no território do Estado do Espírito Santo. Para isso, foram utilizadas informações geoespaciais provenientes do IBGE, como hidrografia e curvas de nível nas escalas 1:50.000 e 1:100.000, que possibilitaram a visualização dos resultados em ambiente SIG. Esses dados foram empregados na geração da rede hidrográfica codificada, contendo o sentido do fluxo de escoamento, bem como informações sobre área de drenagem, precipitação e vazões de referência, utilizadas para subsidiar a concessão de outorga de direito de uso dos recursos hídricos.

A rede hidrográfica modelada foi elaborada em formato compatível com o gerenciador de banco de dados do tipo objeto-relacional Postgresql, o que permite a utilização do SCBH-ES de forma coorporativa, através de gatilhos de funções que são executadas no banco de dados na medida em que as informações de demanda por recursos hídricos são submetidas ao sistema.

2.1.1. Interface do usuário

As funcionalidades do balanço hídrico no SCBH-ES foram implementadas diretamente no banco de dados PostgreSQL, com o suporte da extensão espacial PostGIS e da linguagem procedural PL/pgSQL, permitindo o processamento eficiente de dados geoespaciais e hidrológicos.

A interface do usuário está integrada ao ambiente do Sistema de Informação Geográfica QGIS, que atua como plataforma de visualização e interação com o modelo. As funcionalidades foram estruturadas por meio da organização de camadas vetoriais e raster vinculadas ao banco de dados geoespacial, além da incorporação de comandos e ferramentas personalizadas no próprio QGIS. Essa

abordagem proporciona uma operação direta e intuitiva do sistema, utilizando recursos nativos do SIG para consulta, edição, análise espacial e execução dos processos de balanço hídrico.

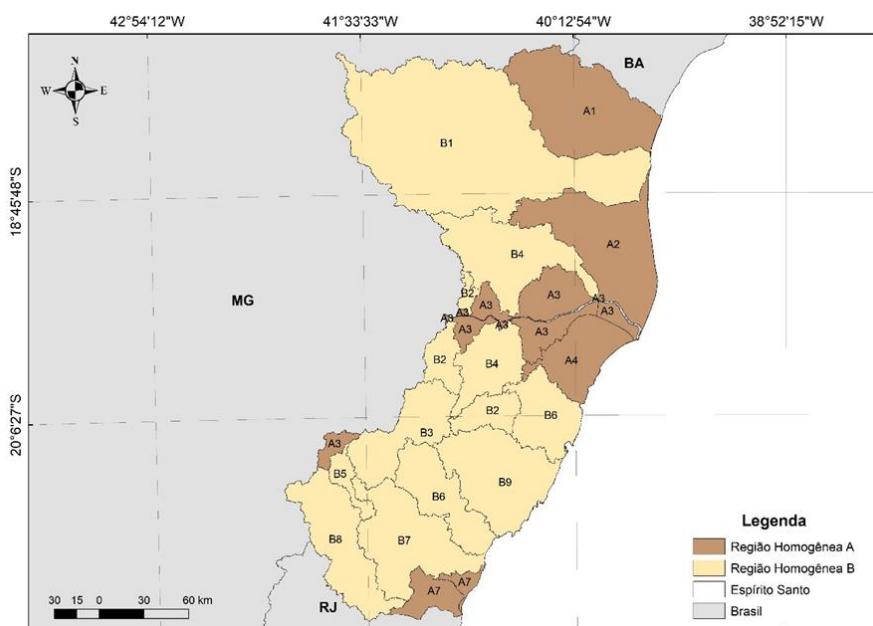
Dessa forma, é possível que os usuários alimentem o sistema com as seguintes informações:

- Captação direta: vazões instantâneas de captação em litros por segundo, para cada mês, quantidade de horas diárias de uso por dia e quantidade de dias por mês.
- Captação em barramento: vazões instantâneas de captação, quantidade de horas diárias, quantidade de dias por mês, volume útil do barramento em metros cúbicos e fluxo residual mínimo a ser garantido à jusante do barramento em litros por segundo.
- Variações dos tipos de interferências: como captação em barramento de terceiros, captação em barramentos sem capacidade de regularização de vazões, transposição de vazões, entre outras.

2.1.2. Informações de Disponibilidade Hídrica utilizadas pelo SCBH-ES

As informações de disponibilidade hídrica foram obtidas através de estudos hidrológicos de regionalização de vazões, contidos no Projeto “Águas Limpas” (Batista *et. al.*, 2009), além de correlações com dados de estações fluviométricas em bacias hidrográficas não contempladas no estudo mencionado. As vazões de referência utilizadas são a vazão média de longo termo (Q_m) e a vazão associada a 90% de permanência (Q_{90}). Com base nos estudos de regionalização de vazões, foram especificadas equações para a estimativa das vazões em litros por segundo, para cada região hidrológicamente homogênea conforme o mapa mostrado na figura 1.

Figura 1 – Mapa das regiões homogêneas do Espírito Santo.



2.1.3. Estimativa das curvas de regularização de vazão

A metodologia para estimar curvas de regularização de vazões baseia-se na análise de séries históricas, identificando o volume necessário para regularizar diferentes percentuais da vazão média, conforme o maior déficit hídrico registrado. Por meio da relação direta entre áreas de drenagem, a estimativa feita na seção da estação fluviométrica pode ser aplicada a barramentos localizados na sua área de influência.

Foram utilizadas 51 estações fluviométricas das bacias hidrográficas do Espírito Santo, selecionadas pela boa qualidade e continuidade dos dados das séries históricas, excluindo-se anos com falhas. As vazões regularizadas variaram de 5% a 100% da Qm, com os volumes correspondentes calculados. Ao dividir esses volumes pela área de drenagem de cada estação, foi definido o Fator de Capacidade de Regularização (FCR), expresso em m^3/km^2 .

2.1.4. Metodologia de Cálculo do Balanço Hídrico Utilizando o SCBH-ES

A estimativa do comprometimento hídrico é feita comparando-se o somatório dos impactos das interferências com a disponibilidade de vazão nos cursos d'água, representados por trechos (segmentos de linha, arcos ou polilinhas) conectados por nós de rede, que representam nascentes, fozes ou confluências. Os cursos d'água foram modelados com estrutura vetorial em topologia arco-nó, permitindo a construção de uma rede orientada com elementos interligados e associados a dados espaciais.

O impacto de uma interferência pode ter valor positivo, como em captações diretas, ou negativo, como em barramentos com vazão residual superior à de referência do trecho. Impactos positivos indicam redução na disponibilidade de água e maior comprometimento a jusante, enquanto impactos negativos indicam o oposto. O cálculo do impacto segue as equações apresentadas a seguir.

- Captação direta:

$$Imp = D_{int} = FA \times Q_{req} \quad (1)$$

em que,

Imp = impacto da interferência (l/s);

D_{int} = demanda da interferência (l/s);

FA = fator de atenuação (adimensional); e,

Q_{req} = vazão requerida (l/s).

O fator de atenuação é classificado em instantâneo, diário ou mensal, e é calculado com base nas horas por dia e dias por mês de captação. Desta forma, se o fator de atenuação for instantâneo, FA = 1; se o fator de atenuação for diário, FA = $\frac{hd}{24}$; e se o fator de atenuação for mensal, FA = $\frac{hd}{24} \times \frac{dm}{30}$; sendo hd = horas por dia e dm = dias por mês.

Para interferências do tipo captação direta, aplica-se o fator de atenuação instantânea, devido ao impacto direto no curso d'água. Já as captações em barramento utilizam fatores de atenuação diária ou mensal. Quando o barramento atende às demandas a montante e garante fluxo residual igual ou superior a 100% da Q90, aplica-se o fator mensal. Se o fluxo residual for igual ou menor que 50% da Q90 e inferior a 100% da Q90, utiliza-se o fator de atenuação diário.

Se o barramento não for capaz de atender às demandas a montante e garantir um fluxo residual de no mínimo 50% da Q90, será analisado com o mesmo efeito de uma captação direta.

- Captação em barramento:

$$Imp = Q_{ref} - Q_{res} - D_{int} - D_{mont} \quad (2)$$

em que,

Imp = impacto da interferência (l/s);

Q_{ref} = vazão de referência para concessão de outorga (l/s);

Q_{res} = vazão residual do barramento (l/s);

D_{int} = demanda da interferência (l/s); e,

D_{mont} = somatório das demandas localizadas a montante do barramento (l/s).

O impacto de um barramento, sendo calculado conforme a equação 2, permite realizar o corte da propagação das demandas de montante, sendo este corte computado a jusante do barramento, já que a vazão residual do barramento passa a ser a única influência imediatamente a jusante deste. A análise do barramento é fundamentada na capacidade de regularização do mesmo e avaliada por um índice denominado reserva hídrica (RH), que é expresso pela seguinte equação:

$$RH = Q_{reg} - Q_{res} - D_{int} - D_{mont} \quad (3)$$

em que,

RH = reserva hídrica do barramento (l/s);

Q_{reg} = capacidade de regularização do barramento (l/s);

Q_{res} = vazão residual do barramento (l/s);

D_{int} = demanda da interferência (l/s) e

D_{mont} = somatório das demandas localizadas a montante do barramento (l/s).

A condição para que o barramento seja capaz de atender as demandas de montante e nele próprio, além de garantir o fluxo residual a jusante, é de que a Reserva Hídrica (RH) seja positiva. Caso $RH < 0$, o barramento não estará apto a ser deferido no sistema de controle de balanço hídrico, necessitando de ajustes nas demandas pelo uso da água.

2.1.5. Índice de Comprometimento dos trechos

O Índice de Comprometimento (IC) dos trechos é calculado utilizando a seguinte equação:

$$IC = \frac{\sum Imp}{Q_{ref}} \times 100 \quad (4)$$

em que,

IC = índice de comprometimento do trecho (%);

$\sum Imp$ = somatório dos impactos a montante da foz do trecho (l/s); e,

Q_{ref} = vazão de referência para concessão de outorga (l/s).

O IC permite avaliar para cada trecho da hidrografia, a condição hídrica representada pelo confronto entre disponibilidade natural e demandas pelo uso da água. No SCBH-ES é possível utilizar como Q_{ref} a Q_{90} ou a Q_m , assim como definir percentuais destas vazões como critério para concessão de outorga. Entretanto será observado o critério de outorga vigente de acordo com a legislação, sendo que mudanças neste poderão ser inseridas no SCBH-ES devido à possibilidade de se mudar a Q_{ref} no próprio sistema.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O SCBH-ES foi desenvolvido para subsidiar a gestão dos recursos hídricos no Estado do Espírito Santo, caracterizado por bacias hidrográficas com múltiplos usos. Em operação desde 2013, o sistema é aplicado em todo o território estadual e permite que os técnicos da Agerh registrem interferências com dados hidrológicos, informações sobre os usos da água e dados do requerente.

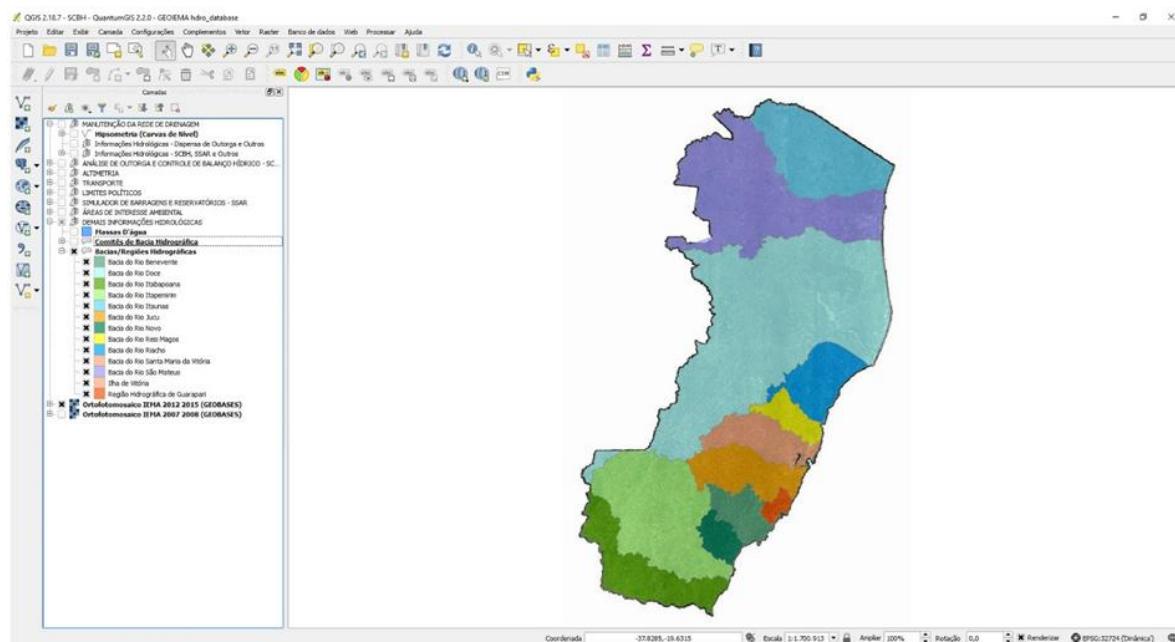
Integrado ao banco de dados PostgreSQL e ao software QGIS, o SCBH-ES possibilita a visualização espacial e a geração de relatórios analíticos, viabilizando a identificação dos impactos quantitativos das intervenções na disponibilidade hídrica.

Na submissão de interferências ao sistema, os comandos disponíveis incluem inserção, alteração e exclusão de dados. A cada modificação realizada, o sistema executa automaticamente algoritmos de cálculo que atualizam os resultados de comprometimento hídrico dos trechos impactados. O SCBH-ES calcula o Índice de Comprometimento (IC) da rede hidrográfica, com ênfase nas interferências do tipo captação direta e captação em barramento.

A figura 2 apresenta a interface do usuário do SCBH-ES, na qual estão organizadas as camadas utilizadas para o gerenciamento dos recursos hídricos no Estado do Espírito Santo. As camadas denominadas "MANUTENÇÃO DA REDE", "ALTIMETRIA", "TRANSPORTE", "LIMITES POLÍTICOS", "ÁREAS DE INTERESSE AMBIENTAL" e "DEMAIS INFORMAÇÕES HIDROLÓGICAS" compõem o conjunto de dados de apoio, que são de uso restrito e não podem ser alteradas pelos técnicos.

Por outro lado, as camadas "ANÁLISE DE OUTORGA E CONTROLE DE BALANÇO HÍDRICO" e "SIMULADOR DE BARRAGENS E RESERVATÓRIOS" são interativas e permitem a inserção, modificação e exclusão de interferências nos cursos d'água estaduais. Essas camadas operacionais constituem a base para a análise técnica e a gestão do uso da água por meio do sistema.

Figura 2 – Interface do usuário do SCBH-ES, no QGIS

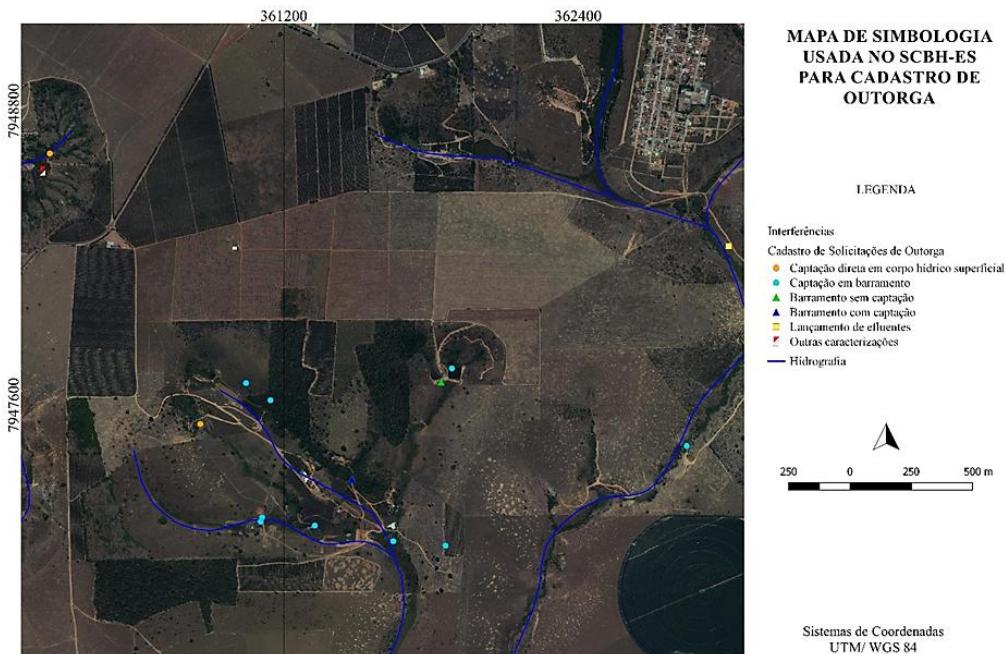


Na operacionalização do SSD para a análise das outorgas requeridas, essas interferências podem ser inseridas no sistema de acordo com o tipo de impacto gerado na rede hidrográfica. Cada forma de intervenção é representada por uma simbologia padronizada, conforme ilustrado na figura 3, que apresenta as convenções gráficas adotadas no SCBH-ES.

As interferências foram classificadas em seis categorias principais: captação direta em corpo hídrico superficial, captação em barramento, barramento sem captação, barramento com captação, lançamento de efluentes e outras caracterizações. Embora as informações relativas ao lançamento de efluentes ainda não estejam plenamente integradas ao SCBH-ES, os respectivos pontos de interferência são georreferenciados e representados no sistema. Esses dados servem como referência

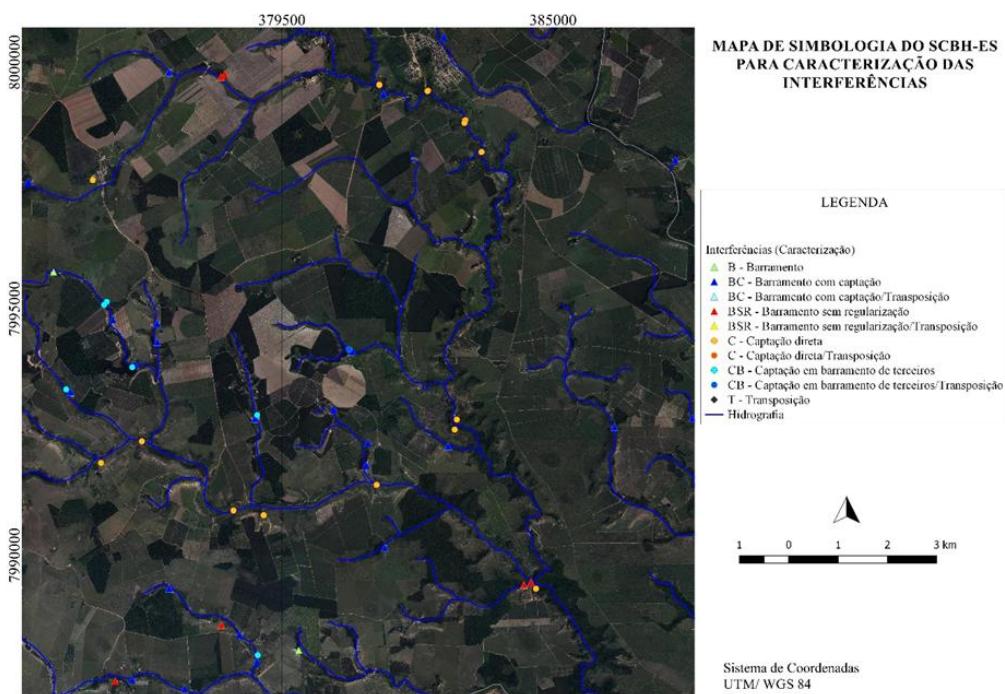
visual para os técnicos durante a análise, sendo avaliados em paralelo por meio de outras plataformas institucionais específicas, fora do ambiente do SSD.

Figura 3 – Mapa de simbologia usada para cadastro de outorga



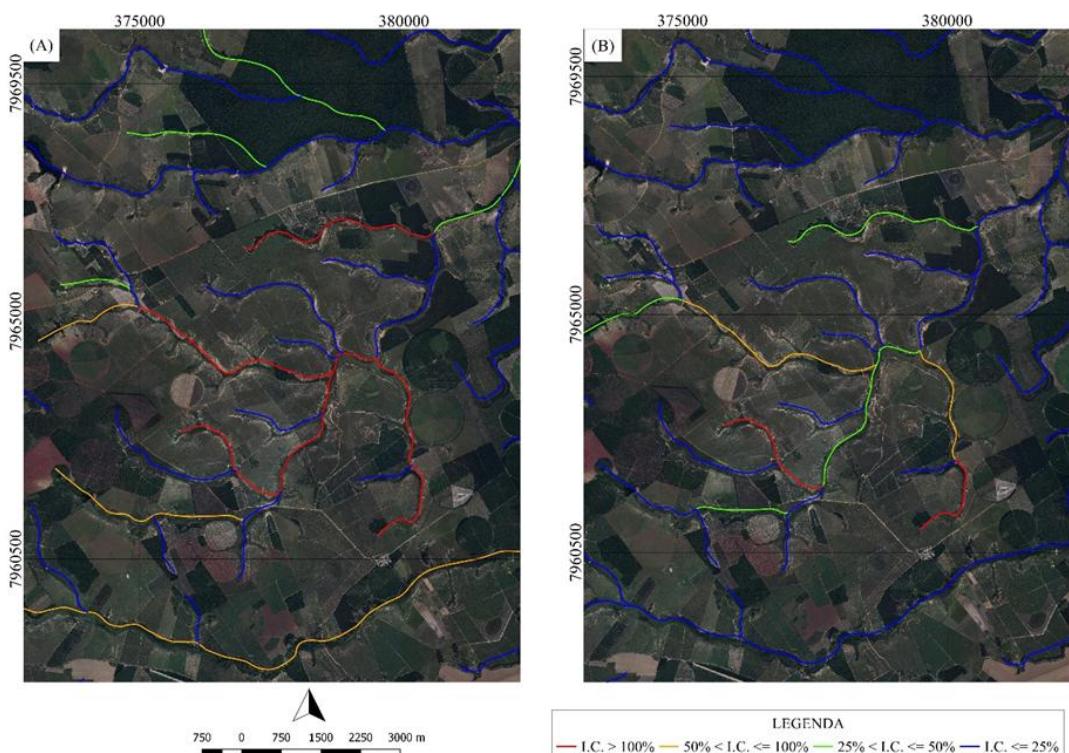
Após a inserção no sistema, os cadastros são complementados com as informações hidrológicas mensais específicas de cada empreendimento, sendo, em seguida, submetidos à análise técnica. A partir dessa caracterização, a simbologia associada à interferência é automaticamente atualizada no ambiente do SCBH-ES, conforme demonstrado na figura 4. Nessa etapa, também é possível a inclusão de corpos hídricos que, eventualmente, não estejam previamente registrados no banco de dados.

Figura 4 – Mapa de simbologia para caracterização de interferências



As interferências causam impacto aos cursos d'água, e, com base nas vazões captadas, o técnico avalia a possibilidade de concessão da outorga. Dessa forma, o SCBH-ES calcula o Índice de Comprometimento (IC), que relaciona a demanda com a vazão disponível e a que deve ser mantida em cada trecho. O IC é apresentado para o rio em questão conforme a vazão de referência (Qmed ou Q90). A figura 5 mostra os mapas com o IC dividido em quatro classes: >100%, 100–50%, 50–25% e <25%. Atualmente, o Espírito Santo utiliza a Q90 como referência, sendo a outorga permitida apenas quando o IC está abaixo de 50%, conforme legislação estadual.

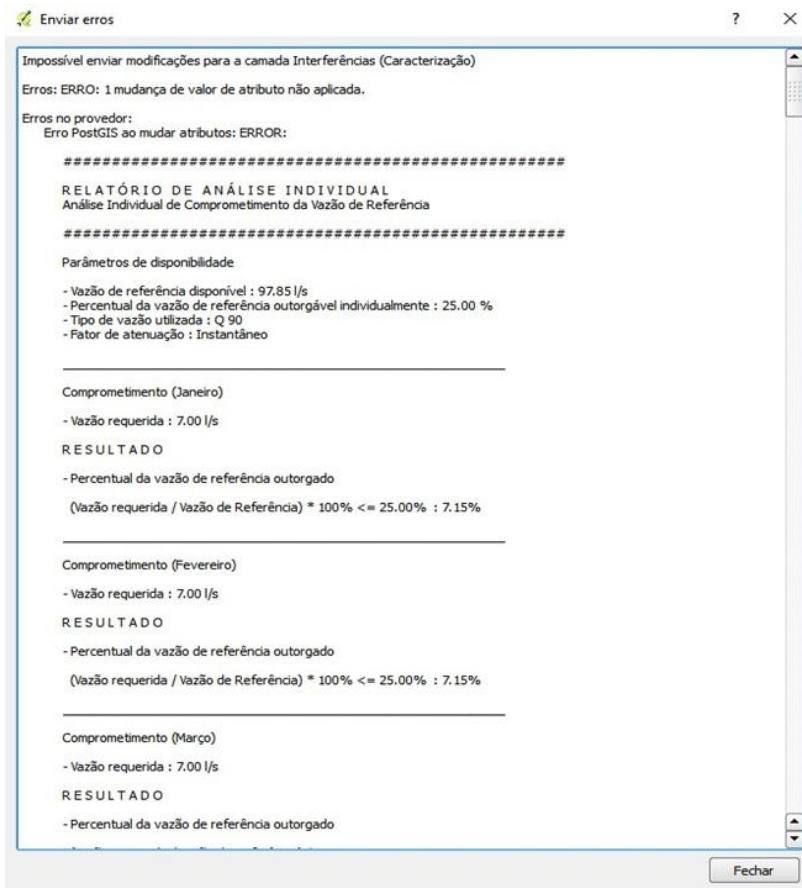
Figura 5 – Mapas de vazões de referência. (A)Q90 (B)Qmédia



Os resultados do IC são apresentados para o pior cenário, ou seja, para o mês cujo IC é o mais acentuado, já que as captações variam ao longo do tempo devido à sazonalidade e prazos de validade das outorgas. Essa abordagem também foi adotada por Lisboa *et al.* (2019), em estudo na bacia do rio Piracicaba-MG. A visualização da rede de drenagem facilita a identificação de áreas com conflitos de uso e permite a geração de relatórios de análise da inserção de novas interferências no Sistema (figura 6).

Esses relatórios detalham as características de cada interferência, como a vazão disponível, o percentual possível de outorga, o tipo de vazão de referência e o fator de atenuação utilizado. Além disso, informam o comprometimento ocasionado pela vazão requerida mês a mês e os efeitos da interferência em análise. Dessa forma, o relatório auxilia o técnico na identificação de pontos críticos e na definição de condicionantes, caso necessário. Com suas ferramentas, o SCBH-ES reforça a eficiência e continuidade da gestão hídrica no Espírito Santo.

Figura 6 - Relatório de análise



4. CONCLUSÃO

A análise dos resultados permite concluir que o SCBH-ES calcula o balanço hídrico, de forma consistente, utilizando as vazões mínimas de referência e os impactos das interferências a montante e a jusante de qualquer seção ao longo da hidrografia; identificando os trechos dos cursos d’água críticos quanto à disponibilidade hídrica e quais tipos de interferência ocorrem nos corpos d’água no Estado do Espírito Santo. Dessa forma, as metodologias aplicadas demonstram que os critérios utilizados para o equacionamento do balanço hídrico quantitativo representam um avanço significativo na gestão dos recursos hídricos no Estado do Espírito Santo.

Os resultados obtidos com o SCBH-ES representam uma contribuição relevante para os órgãos reguladores, ao oferecer maior agilidade e eficiência na análise de pedidos de outorga. A integração entre as ferramentas de modelagem e os sistemas de informação geográfica amplia a qualidade das análises técnicas, permitindo que os analistas e tomadores de decisão tenham uma visão mais abrangente e precisa das condições dos trechos analisados.

Para o aprimoramento contínuo do SCBH-ES, destaca-se a importância de investimentos em infraestrutura tecnológica e na ampliação da integração de bases de dados, com ênfase nas ações de fiscalização e monitoramento. Tais medidas são essenciais para assegurar que os resultados das simulações do balanço hídrico refletem, com maior precisão, as condições reais de uso dos recursos hídricos. Além disso, recomenda-se a plena incorporação das informações relativas ao lançamento de efluentes, de modo a ampliar ainda mais a abrangência e a robustez das avaliações realizadas no âmbito da gestão de recursos hídricos.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M.A.; CURI, W.F. (2016). “*Gestão do uso de água na bacia do Rio Paraíba, PB, Brasil com base em modelos de outorga e cobrança*”. Revista Ambiente & Água 11(4), pp. 989-1005.
- ANA – Agência Nacional de Águas. (2011). *Outorga de direito de uso de recursos hídricos*. Disponível em: <https://arquivos.ana.gov.br/institucional/sge/CEDOC/Catalogo/2012/OutorgaDeDireitoDeUsoDeRecursosHidricos.pdf>. Acesso em: 26 fev. 2021.
- BATISTA, A.L.; FREITAS JR., S.A.; DETZEL, D.H.M.; MINE, M.R.M.; FILL, H.D.O.A. (2009). “*Relatório nº 05-A*”, in: *Projeto de Gerenciamento da Poluição Costeira e de Águas do Estado do Espírito Santo – “Projeto Águas Limpas” – Projeto BIRD 7248 – BR*.
- CERH – Conselho Estadual de Recursos Hídricos. (2005). *Resolução CERH nº 005/2005 de 07 de julho de 2005*. Disponível em: <https://agerh.es.gov.br/Media/agerh/Legisla.pdf>. Acesso em: 25 fev. 2021.
- GARCIA, J.I.B.; SCHARDONG, A.; PORTO, R.L.L. (2018). “*Decision support system for optimization of permits for wastewater discharge*”. Revista Brasileira de Recursos Hídricos 23(43), pp. 1–14.
- Iema – Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. (2009). *Instrução Normativa nº 013, de 09 de dezembro de 2009*. Disponível em: <http://servicos.iema.es.gov.br/legislacao/FileHandler.ashx?id=237&type=2>. Acesso em: 26 fev. 2021.
- LISBOA, L.; SILVA, D.D.; MOREIRA, M.C.; SILVA, A.J.; ULIANA, E.M. (2019). “*Sistema para análise das outorgas de captação de água e diluição de efluentes na Bacia do Rio Piracicaba-MG*”. Engenharia Sanitária Ambiental 25(5), pp. 929–937.
- PESSOA, M.; KAYSER, R.; COLLISCHONN, W. (2012). “*Integração do Modelo Hidrológico para Grandes Bacias MGB IPH e Sistemas de Informação Geográfica para suporte à decisão de outorga de direito de uso da água*”. Revista de Gestão de Água da América Latina 9(2), pp. 21–33.
- PORTO, R.; LANNA, A.E.; BRAGA, B.P.; CIRILO, J.A.; ZAHED, K.; AZEVEDO, L.G.T.; CALVO, L.; DE BARROS, M.T.L.; BARBOSA, P.S.F. (1997). *Técnicas quantitativas para o gerenciamento de Recursos Hídricos*. ABRH Porto Alegre - RS, 420 p.
- SILVA, G.O.M.; MEDEIROS, Y.D.P.; FONTES, A.S.; MONTENEGRO, S.M.G.L. (2017). “*Water permit integration in the Paraguaçu River Watershed (Bahia)*”. Revista Brasileira de Recursos Hídricos 22(38), pp. 1–15.
- VERA, L.H.A.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; SILVA, S.R. (2017). “*Performance of water usage charge in the Nation’s domain as a water resource management tool in the São Francisco River basin*”. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 22(38).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Agência Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Espírito Santo (Agerh) e a todos que contribuíram para a realização deste projeto.