

## XXIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

### ALGORITMO DE CLASSIFICAÇÃO DE FLUXOS FRONTEIRIÇOS E TRANSFRONTEIRIÇOS

*Gabriel Matte Rios Fernandez<sup>1</sup>; Vinícius Alencar Siqueira<sup>2</sup>; Mino Viana Sorribas<sup>3</sup>; Anderson Luís Ruhoff<sup>4</sup>; Rodrigo Cauduro Dias de Paiva<sup>5</sup>; Adalberto Meller<sup>6</sup>; Alexandre Abdalla Araujo<sup>7</sup>; Alexandre de Amorim Teixeira<sup>8</sup> & Marcus Fuckner<sup>9</sup>*

#### RESUMO

Desde 2018 a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) publicam as Contas Econômicas Ambientais da Água (CEAA) (ANA, 2018) para o Brasil e, mais recentemente, suas regiões geográficas, baseadas nas metodologias desenvolvidas pela Divisão de Estatística das Nações Unidas (UNSD) (ONU, 2012). Os estudos referentes às CEAA visam subsidiar ações de planejamento e gestão econômica de recursos hídricos a partir do monitoramento dos estoques e usos da água pelos diversos setores da economia brasileira. Devido à natureza econômica desses estudos, a área de interesse normalmente não é definida por critérios hidrológicos, mas sim por critérios administrativos, como é o caso de regiões geográficas. Portanto, torna-se necessário adaptar as metodologias de estimativas hidrológicas para diferentes áreas de estudo, de forma a possibilitar as análises das CEAA em suas escalas adequadas. Nesse sentido, o presente trabalho apresenta um algoritmo de classificação automática dos fluxos nas regiões geográficas brasileiras utilizando dados do modelo MGB-AS (Siqueira et al. 2018) para ser incorporado no critério de fechamento do balanço hídrico do modelo, a fim de fornecer estimativas hidrológicas com os menores erros possíveis, dentro dos limites de um modelo hidrológico continental. O algoritmo foi aplicado para as cinco regiões geográficas do Brasil e avaliado através de comparações com a classificação manual, resultando em valores médios de coeficiente Kappa entre 0,872 e 0,959 e de Índice de Sucesso Crítico entre 0,802 e 0,964.

**Palavras-Chave** – CEAA, MGB-AS, balanço hídrico.

#### INTRODUÇÃO

Em 2018, a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) publicou o primeiro estudo de Contas Econômicas Ambientais da Água (CEAA) (ANA, 2018) do Brasil para o período entre 2013 e 2015 em parceria com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e com a Secretaria de Recursos Hídricos e Qualidade Ambiental do Ministério do Meio Ambiente (SRHQ/MMA), utilizando metodologias definidas pela Divisão de Estatística das Nações Unidas

---

1) Instituto de Pesquisas Hidráulicas, (IPH-UFRGS), Porto Alegre, Brasil, rios.matte@ufrgs.br  
2) Instituto de Pesquisas Hidráulicas, (IPH-UFRGS), Porto Alegre, Brasil, vinisiquera@gmail.com  
3) Instituto de Pesquisas Hidráulicas, (IPH-UFRGS), Porto Alegre, Brasil, mino.sorribas@gmail.com  
4) Instituto de Pesquisas Hidráulicas, (IPH-UFRGS), Porto Alegre, Brasil, andersonruhoff@gmail.com  
5) Instituto de Pesquisas Hidráulicas, (IPH-UFRGS), Porto Alegre, Brasil, rodrigocdpaiva@gmail.com  
6) Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), Brasília, Brasil, adalberto.meller@ana.gov.br;  
7) Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), Brasília, Brasil, alexandre.araujo@ana.gov.br;  
8) Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), Brasília, Brasil, alexandre.amorim@ana.gov.br;  
9) Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), Brasília, Brasil, marcus.fuckner@ana.gov.br.

(UNSD) (ONU, 2012). Em 2020 foi publicada uma atualização do estudo para o período de 2013 até 2017 (ANA, 2020), em continuidade da parceria estabelecida com o IBGE. As CEEA apresentam informações referentes ao balanço entre a disponibilidade de recursos hídricos e suas demandas nos setores da economia, utilizando diferentes bases de dados, estimativas diretas e indiretas em escala nacional. Em resumo, a disponibilidade de recursos hídricos se baseia em estimativas de estoques de água em diferentes compartimentos (e.g., subterrâneo, rios e riachos, solo, lagos artificiais, *etc.*) e também de fluxos hidrológicos, como precipitação, evapotranspiração, e vazões de entrada e saída da região de interesse.

Dentre as ferramentas para obtenção de informações referentes aos estoques e fluxos hidrológicos necessários para a elaboração das CEEA está a modelagem hidrológica. No contexto do projeto de “Cooperação em tecnologias para análises hidrológicas em escala nacional” (Ruhoff *et al.* 2020) foi avaliada a utilização do Modelo de Grandes Bacias da América do Sul (MGB-SA) (Siqueira *et al.* 2018) para a extração de estimativas de diversas fases do ciclo hidrológico simuladas pelo modelo.

As regiões de interesse utilizadas nas estimativas das CEEA são, normalmente, definidas por critérios político-administrativos e não hidrológicos, resultando em diversos fluxos de saída e entrada representados pela vazão dos rios que cruzam ou delimitam a fronteira das regiões, classificados como transfronteiriços e fronteiriços, respectivamente. A Figura 1 mostra uma comparação da análise dos fluxos horizontais do balanço hídrico entre uma região administrativa e uma bacia hidrográfica.

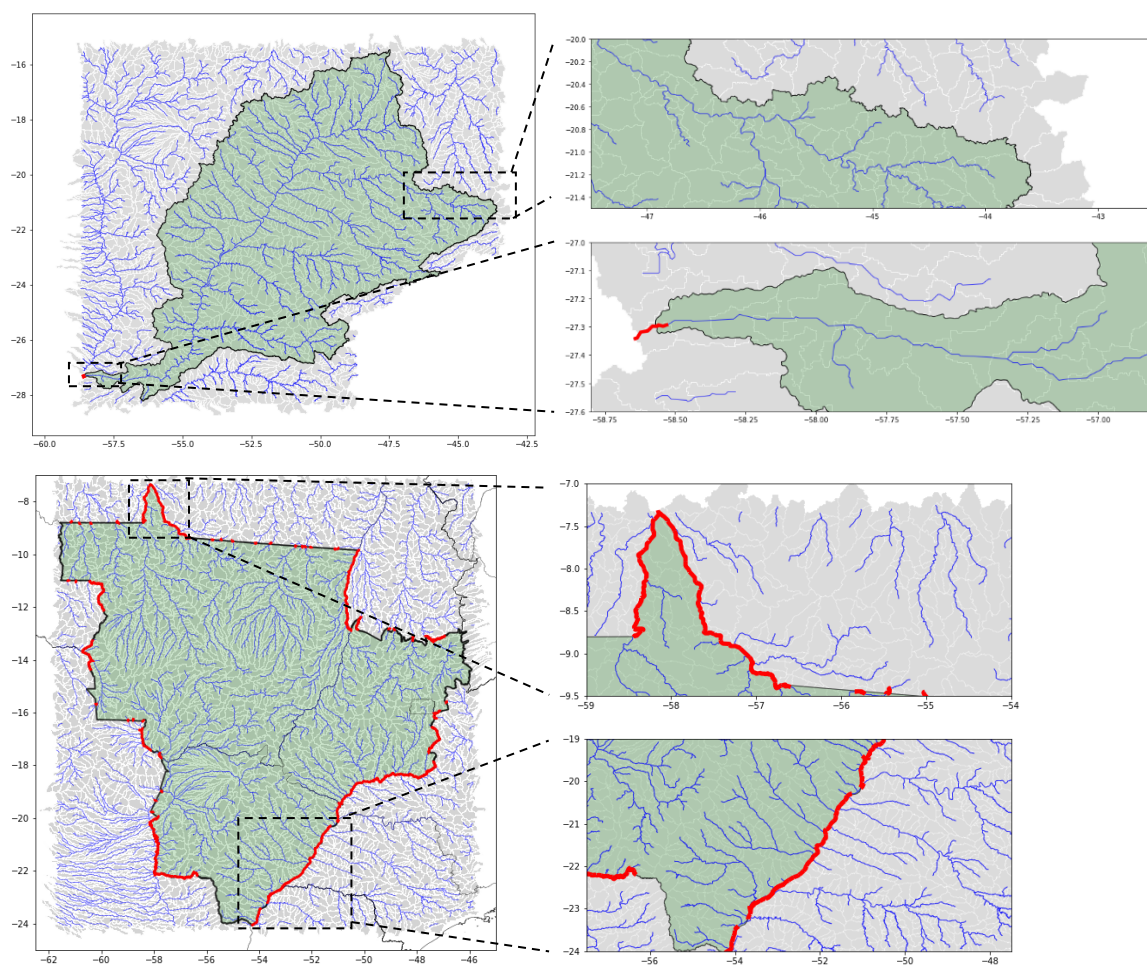


Figura 1 - Apresentação das diferenças que envolvem a análise de balanço hídrico entre uma região geográfica (Centro-Oeste) e uma bacia hidrográfica (Bacia do Rio Paraná). A rede de drenagem (azul) intersecciona apenas uma vez a bacia hidrográfica em seu exutório, enquanto que a região geográfica é interseccionada (vermelho) pela rede de drenagem múltiplas vezes.

São necessárias adaptações nas metodologias de estimativas hidrológicas para as CEAA, devido as diferenças entre região geográfica e bacia hidrográfica. Para aplicar a equação do balanço hídrico nessas condições é necessário que seja anteriormente feita esta classificação dos rios representados no modelo, de forma a identificar quais terão sua vazão inserida nos termos de saída e quais nos termos de entrada da equação. Esta seleção pode ser realizada manualmente com o auxílio de softwares de SIG para identificar as entradas e saídas da região de interesse, o que pode se tornar um processo complexo à medida em que se trabalha com muitas áreas (e.g., estados) ou com regiões maiores e com maior densidade de corpos hídricos como, por exemplo na região Norte do Brasil.

Assim, serão apresentados neste trabalho, o desenvolvimento e validação de um algoritmo de classificação automática dos trechos de entradas e saídas para aplicação nas estimativas das CEAA com o objetivo de tornar o processo de seleção mais ágil e eficiente, bem como versátil para aplicação em diferentes recortes espaciais, caso necessário.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O algoritmo foi desenvolvido em linguagem de programação Python e utiliza como dados de entrada um polígono definindo a região de interesse, dados vetoriais da rede de drenagem e o arquivo descritor da geometria e topologia do MGB-AS (mini.gtp). O resultado final é uma tabela em arquivo de extensão .xlsx contendo o código das minibacias selecionadas e suas respectivas classificações entre as classes descritas na tabela 1.

Tabela 1 - Códigos adotados para a classificação de cada fluxo considerado pelo algoritmo.

Código Numérico	Descrição
0	Não Classificado
1	Afluência Transfronteiriça
2	Defluência Transfronteiriça
3	Afluência Fronteiriça
4	Defluência Fronteiriça
5	Saídas para o oceano
6	Lagos
7	Fronteiriços

As regiões de interesse utilizadas para as estimativas e publicações das CEAA são as regiões geográficas brasileiras (Norte, Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e Sul). Sendo assim, o algoritmo foi testado para cada uma das cinco regiões do Brasil utilizando como entrada dados vetoriais do território brasileiro disponibilizados pelo IBGE.

A diferença entre as características de uma bacia hidrográfica e das áreas de interesse pode introduzir erros nas estimativas para as CEAA com o MGB-AS decorrentes da classificação dos fluxos de entrada e saída. Para conferir se a classificação foi realizada de forma adequada pode-se calcular o balanço hídrico para verificar o fechamento da equação. Nesse caso, para a aplicação da equação de balanço hídrico é necessário considerar no termo da vazão as vazões de saída e entrada como expresso na equação 1.

$$\frac{dS}{dt} = P - ET - (Q_{entra} - Q_{sai}) \quad (1)$$

Onde  $dS/dt$  é a taxa de variação do armazenamento de água da região (mm/d);  $P$  é a precipitação (mm/d),  $ET$  é a evapotranspiração (mm/d) e  $Q_{entra}$  e  $Q_{sai}$  são, respectivamente, o volume de água total

que escoam para dentro da região e o volume total que escoam para fora da região, expressos por unidade de área (mm/d).

O MGB-AS é um modelo hidrológico distribuído, aplicado para todo o domínio da América do Sul, discretizando a área do continente em 33.749 unidades de cálculo menores denominadas minibacias. As minibacias foram geradas de modo a apresentar trechos de rio com um comprimento máximo de 15 km. Os dados vetoriais da rede de drenagem do modelo são os principais dados de entrada do algoritmo. Neles são descritas, entre outras informações, a localização dos trechos de rio, a minibacia a qual pertencem e a minibacia de jusante. A partir destas informações e da distância dos trechos de rio em relação a fronteira da região de interesse, os trechos são classificados entre fluxos fronteirizos e transfronteirizos.

Os métodos e critérios para classificação dos trechos de rio da rede de drenagem do MGB-AS entre trechos fronteirizos e transfronteirizos são esquematizados no fluxograma da figura 2 e descritos abaixo.

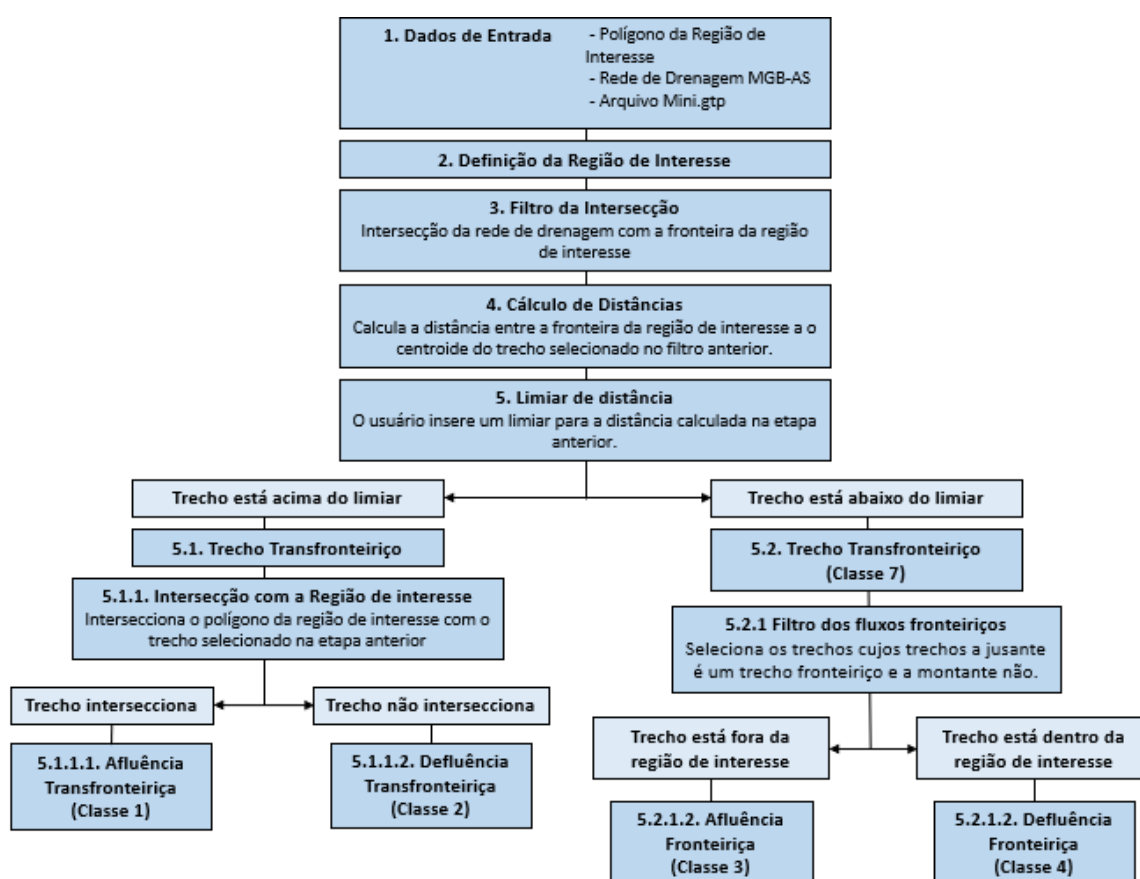


Figura 2 - Fluxograma do processamento realizado pelo algoritmo de classificação.

Os trechos de rio transfronteirizos são aqueles que representam saídas ou entradas de água definitivas na região de interesse, podendo ser classificadas como defluências ou afluências transfronteirizas. A classificação destes trechos é feita a partir da hipótese de que todos os trechos transfronteirizos devem interseccionar a fronteira da região e o trecho a jusante deve estar relativamente afastado da fronteira. Para isso aplica-se um filtro no arquivo da rede de drenagem, selecionando os trechos que interseccionam a fronteira e em seguida aplica-se outro filtro considerando a distância entre a fronteira e o centróide do trecho a jusante dos trechos selecionados

no filtro anterior. Caso a distância estiver acima de um limiar definido pelo usuário, significa que o fluxo é considerado definitivo e o trecho selecionado no filtro da intersecção é classificado como uma afluência transfronteiriça (caso o trecho a jusante estiver dentro da região de interesse) ou como uma defluência transfronteiriça (caso o trecho a jusante estiver fora da região de interesse).

Os trechos de rio fronteiriços são os rios que acompanham a fronteira da região de interesse. Estes são classificados a partir dos trechos de intersecção que são descartados no filtro da distância em relação a fronteira. Isto é, os trechos mais próximos da fronteira da região — e que não são aflúências ou defluências transfronteiriças — são analisados para a classificação dos trechos fronteiriços. Um filtro adicional é aplicado selecionando os segmentos de drenagem para os quais os trechos a montante e jusante são fronteiriços.

Também é possível classificar os afluentes e defluentes dos rios fronteiriços. Um segmento de drenagem cujo trecho a jusante é definido por um trecho fronteiriço e a montante não, é classificado como uma afluência fronteiriça (caso estiver fora da região de interesse) ou uma defluência fronteiriça (caso estiver dentro da região de interesse).

Para a seleção das defluências no oceano (ou saídas para o mar, conforme definição das CEAA), o algoritmo identifica o código -1 já existente no arquivo mini.gtp do MGB-SA, presente no atributo “Mini\_Jus” das minibacias nas regiões costeiras do continente. A figura 3 esquematiza e apresenta as classes consideradas no algoritmo, através do exemplo de aplicação na região Sul do Brasil.

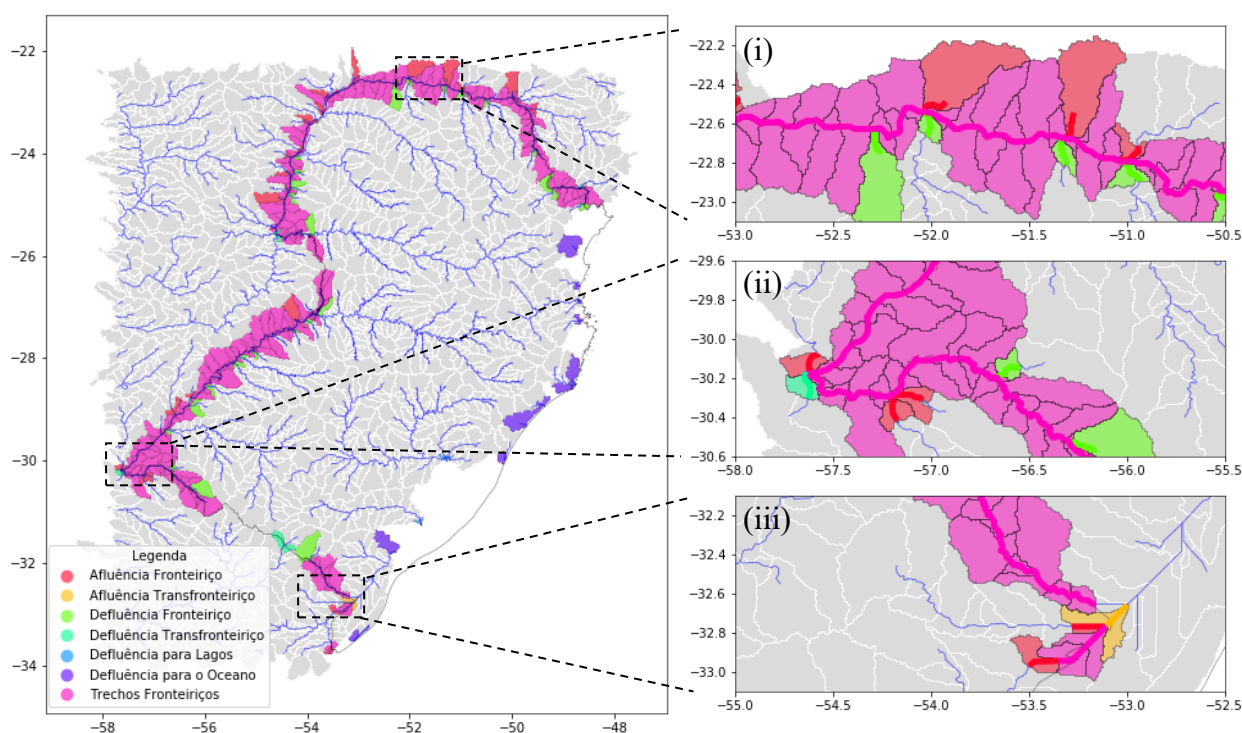


Figura 3 - Resultado da classificação realizada pelo algoritmo para a região Sul do Brasil, mostrando a classificação (i) dos trechos fronteiriços (rosa) e aflúências (vermelho) e defluências fronteiriças (verde), (ii) dos trechos de defluência transfronteiriça (azul) e (iii) dos trechos de afluência transfronteiriça (laranja).

Para a validação dos resultados obtidos pela classificação automática, foi feita uma classificação manual dos fluxos de entrada e saída nas mesmas classes consideradas pelo algoritmo nas cinco regiões geográficas. O desempenho do algoritmo na classificação de cada classe descrita

na tabela 1 foi avaliado através do coeficiente Kappa e do Índice de Sucesso Crítico (F), apresentados nas equações 2 e 3. Ambas as métricas variam de 0 a 1, sendo 1 o valor ótimo.

$$Kappa = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e} \quad (2)$$

$$F = \frac{A}{A+B+C} \quad (3)$$

Onde  $P_o$  é a probabilidade de concordância e  $P_e$  é a probabilidade de concordância ao acaso entre a classificação manual e automática, A é o número de trechos de rio de uma determinada classe classificados da mesma forma tanto pela classificação manual quanto a automática, B é o número de trechos de rio de uma determinada classe classificados apenas pela classificação automática e C é o número de trechos de rio de uma determinada classe classificados apenas pela classificação manual.

## RESULTADOS

O algoritmo foi aplicado para as cinco regiões geográficas brasileiras (Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e Norte) e comparado com a classificação manual através das métricas descritas acima. Os resultados da comparação para cada classe considerada são apresentados na Figuras 4.

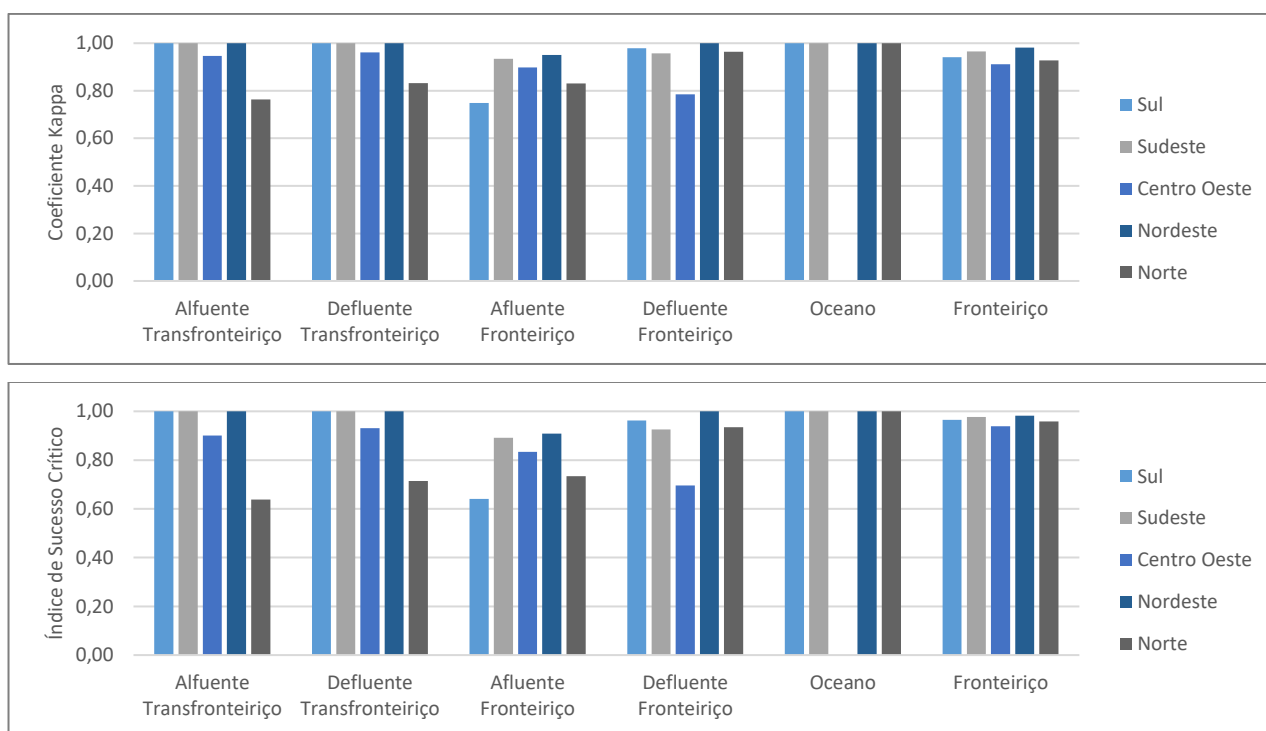


Figura 4 - Resultados da aplicação do coeficiente Kappa (i) e do Índice de Sucesso Crítico (ii) para região administrativa brasileira e cada uma das classes consideradas pelo algoritmo.

A classificação dos trechos transfronteiriços apresentou uma elevada concordância em todas as regiões, apresentando valores de coeficiente Kappa e de Índice de Sucesso Crítico entre 0,90 e 1,00, exceto na região Norte. Isto porque há maior facilidade em estabelecer o limiar de distâncias na etapa de classificação do código para trechos de rios que possuem uma tendência de encontrar a fronteira perpendicularmente. Na região Norte que possui a maior quantidade de rios e maior comprimento de fronteira dentre as regiões, a classificação dos trechos transfronteiriços apresentou valores de 0,64 a 0,83 para as métricas adotadas, evidenciando uma perda de acurácia do algoritmo em regiões com

maior densidade de corpos hídricos. Cabe ressaltar que, no caso das regiões Norte, Centro-Oeste e Sul, são consideradas tanto as fronteiras internacionais do Brasil quanto as divisas entre as regiões geográficas, na aplicação do método.

Os trechos de rio que representam defluências para o oceano e lagos apresentaram os valores ótimos para ambas as métricas. Isso ocorre devido ao código -1 presente nos dados da rede de drenagem do MGB-AS, facilitando a classificação destes trechos.

Os trechos fronteiraços apresentaram o maior desempenho dentre as classes, desconsiderando a classe que representa as saídas para o oceano e lagos. As métricas apresentaram valores entre 0,91 e 0,98 em todas as regiões, inclusive na região Norte.

As classificações de afluições e defluências fronteiraças variaram seu desempenho de maneira independente nas diferentes regiões de estudo, apesar de apresentarem mecanismos de classificação semelhantes. Por exemplo, na região Sul as métricas de desempenho da classificação das afluições fronteiraças apresentaram valores entre 0,64 e 0,75, enquanto que as defluências fronteiraças apresentaram valores entre 0,96 e 0,98. Comportamento semelhante é observado na região Norte, enquanto que o inverso é observado na região Centro-Oeste.

Também foram analisados os valores médios e o desvio padrão de cada métrica para cada uma das classes consideradas, apresentados na tabela 2. Verifica-se que na média ambos os índices apresentaram valores satisfatórios para todas as classes, estando todos acima de 0,80. Os trechos fronteiraços apresentaram as maiores médias com as menores variações, enquanto que os trechos de afluição transfronteiraça e fronteiraça apresentaram, respectivamente, as maiores variações e menores médias. Os trechos de saídas para oceanos e lagos foram desconsiderados da análise, pois todos apresentaram o valor ótimo devido a códigos presentes nos dados de entrada do algoritmo.

Tabela 2 – Valores médios e desvio padrão das métricas adotadas para a comparação dos resultados das classificações manual e automática.

CLASSE	Média do coeficiente Kappa	Desvio Padrão do coeficiente Kappa	Média do Índice de Sucesso Crítico	Desvio Padrão do Índice de Sucesso Crítico
Afluente Transfronteiraço	0,942	0,102	0,908	0,157
Defluente Transfronteiraço	0,959	0,073	0,929	0,124
Afluente Fronteiraço	0,872	0,083	0,802	0,113
Defluente Fronteiraço	0,937	0,086	0,904	0,120
Fronteiraço	0,945	0,028	0,964	0,017

## CONCLUSÃO

O algoritmo de classificação apresentou resultados satisfatórios quando comparado ao método manual de classificação de fluxos, com valores médios de coeficiente Kappa entre 0,872 e 0,959 e de Índice de Sucesso Crítico entre 0,802 e 0,964 de acordo com a classe analisada. Com o algoritmo de classificação automática, o processo de classificação de trechos de entrada e saída para as estimativas hidrológicas das CEAA se tornou mais rápido e ágil quando comparado ao processo manual, dependendo de apenas 1 parâmetro exigido do usuário. Também foi possível incorporar todos os trechos da drenagem e suas respectivas vazões ao processo, ao passo que o procedimento anterior manual, adotado para as CEAA, permitia a inclusão de trechos somente no casos em que havia disponibilidade de dados, em sua maioria advindos do monitoramento em estações de monitoramento fluviométrico em rios e de reservatórios.

A ferramenta foi desenvolvida com dados vetoriais do MGB-AS o que a torna aplicável em todo o continente América do Sul, podendo ser utilizada em escala nacional ou regional. O uso do algoritmo poderá trazer maior versatilidade em estudos como as CEAA ao possibilitar um rápido processamento de diferentes áreas e recortes de interesse, inclusive para os demais países do continente vizinhos do Brasil.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à ANA pelo financiamento através do projeto “Cooperação em tecnologias para análises hidrológicas em escala nacional”.

## REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Águas (2018). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano (SRHU/MMA). Contas Econômicas Ambientais da Água no Brasil 2013-2015. IBGE: Rio de Janeiro.

Agência Nacional de Águas (2020). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Contas Econômicas Ambientais da Água no Brasil 2013-2017. IBGE: Rio de Janeiro.

Organização das Nações Unidas. (2012). System of Environmental and Economic Accounting for Water. United Nations publications.

Ruhoff, A.; Paiva, R.C.D.; Siqueira, V.A.; Fleischmann, A.; Breda, J. P.L.; Fontana, R.B.; Viana, M.S.; Fernandez, G.M.R.; Laipelt, L.; Oliveira, A.M. (2020). Relatório Síntese do Subprojeto CEAA.

Siqueira, V. A., Paiva, R. C. D., Fleischmann, A. S., Fan, F. M., Ruhoff, A. L., Pontes, P. R. M., Paris, A., Calmant, S., and Collischonn, W. (2018). Toward continental hydrologic–hydrodynamic modeling in South America, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22, 4815–4842.