

Modelos conceitual e analítico para avaliação e planejamento regional de sistemas de armazenamento de água na irrigação de pequena escala – parte 2: aplicação na Bacia do Córrego Sossego/ES

Conceptual and analytical models for the assessment and regional planning of water storage systems in small-scale irrigation – part 2: application in the Sossego Stream Basin/ES

Valeria Albán Domínguez¹ , Bruno Peterle Vaneli¹ , Edmilson Costa Teixeira¹ 

¹Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, Vitória, ES, Brasil.

E-mails: valeriaalban.col@gmail.com, brunopvaneli@gmail.com, edmilson.teixeira@ufes.br

Como citar: Albán Domínguez, V., Vaneli, B. P., & Teixeira, E. C. (2026). Modelos conceitual e analítico para avaliação e planejamento regional de sistemas de armazenamento de água na irrigação de pequena escala – parte 2: aplicação na Bacia do Córrego Sossego/ES. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 23, e06. <https://doi.org/10.21168/rega.v23e06>

RESUMO: Sistemas de armazenamento de água para irrigação em pequena escala são fundamentais para a agricultura familiar, mas ainda carecem de metodologias capazes de integrar diferentes tecnologias, abordagens de planejamento e condições hidrológicas locais. Este estudo aplicou o modelo desenvolvido na Parte 1 desse trabalho, visando discutir seu potencial para caracterização e avaliação desses sistemas em suporte a seu planejamento regional, especialmente no que se refere à definição de sua configuração. Para sua aplicação, adotaram-se hipóteses e simplificações sobre as dimensões e a espacialização dos componentes do sistema. Duas aplicações foram realizadas na bacia do Córrego Sossego – utilizada como meio demonstrativo: (i) um cenário de referência baseado apenas em informações hidroagroclimáticas e (ii) quatro cenários tecnológicos representativos da agricultura familiar. Os resultados mostram que o modelo possibilita estabelecer cenários comparativos, mesmo quando apenas variáveis hidroclimáticas são conhecidas e na ausência de informações detalhadas sobre a configuração das estruturas de armazenamento, bem como diferencia claramente padrões de déficit e capacidade hídrica de armazenamento entre diferentes tecnologias (tanques, cisternas, barraginhas e barragens), oferecendo suporte robusto para a comparação de alternativas e definição de configurações de sistemas de armazenamento em escala regional.

Palavras-chave: Segurança hídrica; Agricultura familiar; Planejamento de irrigação; Armazenamento descentralizado; Modelagem conceitual-analítica; Indicadores de balanço hídrico.

ABSTRACT: Water storage systems for small-scale irrigation are fundamental for family farming, but they still lack methodologies capable of integrating different technologies, planning approaches, and local hydrological conditions. This study applied the model developed in Part 1 of this work, aiming to discuss its potential for the characterization and assessment of these systems in support of regional planning, particularly regarding the definition of their configuration. For its application, assumptions and simplifications were adopted concerning the dimensions and spatial distribution of the system components. Two applications were carried out in the Sossego Stream Basin – used as a demonstrative case: (i) a reference scenario based solely on hydroagroclimatic information, and (ii) four technological scenarios representative of family farming. The results show that the model enables the establishment of comparative scenarios, even when only hydroclimatic variables are known and in the absence of detailed information about the configuration of storage structures. It also clearly distinguishes patterns of water deficit and storage capacity among different technologies (ponds, cisterns, small dams, and reservoirs), providing robust support for the comparison of alternatives and the definition of storage system configurations at the regional scale.

Keywords: Water security; Smallholder farming; Irrigation planning; Decentralized water storage; Conceptual-analytical modeling; Water balance indicators.

1 INTRODUÇÃO

O uso de Sistemas de Armazenamento de Água na Irrigação de Pequena Escala (SAAIPES) contribui para o aumento da produtividade na agricultura familiar, além de diversificar a oferta de alimentos locais e sustentar os meios de subsistência das famílias. Dessa forma, esses sistemas contribuem para promoção da segurança hídrica e alimentar em níveis local e global (Shadeed et al., 2020). Esses sistemas podem abranger uma ou várias estruturas de diferentes tecnologias, operando de forma individual ou coletiva em uma determinada região. Esses sistemas são compreendidos como sistemas socio-hidrológicos, sendo relevante compreender os impactos do planejamento, uso e gestão das estruturas de armazenamento nas dinâmicas do ciclo hidrológico e no bem-estar de comunidades rurais agrícolas (Hansani et al., 2025; Calderon Archina et al., 2024; Alam et al., 2022).

Estruturas de armazenamento de pequeno porte – também conhecidas na literatura em inglês como *small reservoirs*, *small dams*, *farm ponds*, *farm dams*, *local water storage*, ou *water harvesting systems* — apresentam grande potencial para descentralizar o uso da água armazenada, promovendo uma distribuição mais equitativa de seus benefícios e impactos (Rabelo et al., 2021; Ekka et al., 2024). Além disso, essas soluções incentivam a participação ativa dos produtores rurais em todas as etapas do processo — planejamento, construção e manutenção —, sendo essa participação fundamental para garantir maior desempenho e viabilidade do sistema como um todo.

Apesar dessas vantagens, estruturas de armazenamento de pequeno porte ainda são frequentemente subutilizadas e negligenciadas nas políticas de gestão hídrica, o que resulta em baixos níveis de desempenho e eficiência (Owusu et al., 2022; Alam et al., 2022). Essas limitações decorrem, muitas vezes, de um planejamento improvisado e fragmentado, bem como de um sistema de gestão frágil (Hansani et al., 2025). Nesse sentido Singh et al. (2024) recomendam a democratização de metodologias que permitam escalar estratégias para uso coletivo dessas estruturas, reduzindo riscos de falhas e impactos negativos. Já Calderon Archina et al. (2024) apontam a necessidade de encontrar uma forma sustentável na gestão das águas que considere conhecimentos tradicionais aliados a avanços tecnológicos. Assim, torna-se essencial promover o planejamento coletivo, em escala regional, de estruturas de armazenamento tradicionalmente empregadas para irrigação na agricultura familiar, considerando as oportunidades e os desafios espaciais e temporais associados ao armazenamento hídrico, com vista a maximizar seus benefícios e minimizar os impactos.

Todavia, um dos principais desafios para o planejamento dos SAAIPES, em escala regional, é a definição de sua configuração, a qual envolve definir o número, tipo, volume e localização das estruturas de armazenamento de água para atendimento a uma dada região. Geralmente, os elementos da configuração são definidos por abordagens como: a escolha do local e tipo de estrutura baseando-se em análises geoespaciais e multicritério de características físicas e socioeconômicas da região (Bojer et al., 2024); a quantificação dos impactos baseando-se em modelos numéricos que representam o balanço hídrico específico para cada local (Di Francesco et al., 2022; Lima et al., 2023); e as avaliações sobre a distribuição desses sistemas considerando apenas um tipo de tecnologia, agregando espacialmente características hidrológicas e/ou agrícolas para comparar diferentes cenários (Van der Zaag & Gupta, 2018; Habets et al. 2014; Alam et al., 2022; Eriyagama et al. 2020, 2021, 2022). São abordagens que enfatizam e consideram isoladamente apenas alguns elementos do sistema, ignorando seus efeitos sobre outros sistemas próximos e as inter-relações existentes entre os componentes do próprio sistema.

Embora existam metodologias para avaliar os impactos cumulativos de pequenos reservatórios, muitas discussões ainda se concentram na comparação entre o uso de muitos reservatórios pequenos ou de poucos reservatórios grandes. Estudos como os de Búrquez et al. (2024), Lima et al. (2023) e Habets et al. (2014) sugerem que o impacto cumulativo de múltiplos pequenos reservatórios pode igualar ou até superar o dos grandes, afetando inclusive a eficiência de grandes estruturas e aumentando o risco de falhas durante períodos de seca ou estiagem. No entanto, tais análises se baseiam predominantemente no balanço hídrico. Outros autores, como Van der Zaag & Gupta (2008), Eriyagama et al. (2020, 2021, 2022) e Ekka et al. (2024), propõem critérios adicionais para avaliar sistemas de diferentes configurações, como a equidade na distribuição dos benefícios e dos impactos das estruturas de armazenamento. Além disso, Singh et al. (2024) destacam tanto os riscos quanto as potencialidades de escalar essas tecnologias, ressaltando a importância de uma governança adaptativa para garantir maior sucesso. Ainda assim, permanece a ausência de uma metodologia que permita definir configurações ótimas para uma região – por exemplo, avaliar se seria mais eficaz implantar um grande reservatório, vários pequenos, ou uma combinação entre diferentes tipos de tecnologias e localizações. Essa lacuna reforça a necessidade de modelos que apoiem decisões no planejamento regional dos SAAIPES.

Alguns autores, como Shinde et al. (2004), Van der Zaag & Gupta (2008), Eriyagama et al. (2020, 2021, 2022) e Wiatkowski et al. (2021), têm utilizado indicadores para avaliar o desempenho de sistemas similares ao SAAIPE. Com base nessas contribuições, na Parte 1 deste trabalho foi desenvolvido um modelo conceitual e, a partir dele, um modelo analítico que permitem caracterizar e avaliar SAAIPEs. O modelo analítico propõe indicadores para avaliar o desempenho desses sistemas, a partir da aquisição de características hidroagroclimáticas locais e dos mecanismos de funcionamento das diferentes tecnologias.

Enquanto a Parte 1 se dedica à construção teórica e metodológica dos modelos, estabelecendo sua estrutura conceitual e a formulação dos indicadores analíticos, esta segunda parte do estudo tem como objetivo aplicar, de forma prática, os modelos conceitual e analítico apresentados na Parte 1, avaliando seu desempenho por meio de um estudo de caso representativo de sistemas de irrigação de pequena escala e discutindo seu potencial para a caracterização, avaliação e planejamento regional de SAAIPEs, especialmente no que se refere à definição de sua configuração. A aplicação dos modelos foi realizada na bacia hidrográfica do Córrego Sossego, localizada no município de Itarana/ES, a qual apresenta características típicas de regiões rurais brasileiras com predominância de agricultura familiar, marcada por elevada dependência da irrigação e por limitações associadas à disponibilidade hídrica, especialmente durante a estação seca. A análise utilizou dados da bacia piloto e considerou simplificações quanto à espacialização dos componentes do SAAIPE e à capacidade de armazenamento das estruturas, com o intuito de simular uma abordagem de planejamento distribuída que contemple diferentes tecnologias comumente utilizadas na agricultura familiar.

2 MODELOS CONCEITUAL E ANALÍTICO PARA AVALIAÇÃO DE SAAIPEs

Na Parte 1 deste artigo foram apresentados e discutidos com maior detalhe os desenvolvimentos dos modelos conceitual e analítico para avaliação de SAAIPEs. O modelo conceitual resultante estrutura o SAAIPE em três componentes com funções distintas: captação (CAP), armazenamento (ARM) e irrigação (IRR), que representam, respectivamente, os processos de entrada, regularização e saída do sistema de armazenamento de água para irrigação em pequena escala.

O modelo conceitual estabelecido serviu como plataforma orientadora para o desenvolvimento do modelo analítico, no qual as relações entre componentes do SAAIPE foram traduzidas em indicadores quantitativos. A estrutura do modelo abstrai características e processos relacionados ao balanço hídrico nos componentes CAP, IRR e ARM, reduzindo a complexidade associada ao SAAIPE e permitindo avaliar diferentes configurações e abordagens de planejamento com base nas categorias e informações disponíveis. O modelo analítico é composto por 12 indicadores, os quais foram organizados nas categorias CAP-IRR, IRR-ARM e ARM-CAP, sendo quatro indicadores para cada categoria. Para dar suporte à operacionalização dos indicadores, atribuíram-se variáveis a fim de representá-los quantitativamente. Na Tabela 1 são apresentadas as variáveis que caracterizam cada um dos componentes do SAAIPE. E na Tabela 2 são apresentadas as formulações dos indicadores do modelo analítico, de modo a tornar visível as relações entre eles e as variáveis da Tabela 1. Ressalta-se que as faixas de valores associadas aos indicadores descritos na Tabela 2 não devem ser interpretadas como parâmetros normativos, metas de desempenho ou limiar universal, mas sim como intervalo indicativo de valores derivados de estudos conduzidos em diferentes escalas espaciais e contextos. Portanto, seu uso deve considerar as especificidades hidroclimáticas, tecnológicas e de escala de cada aplicação.

Tabela 1. Variáveis adotadas para operacionalizar o modelo analítico para avaliação do SAAIPE

Componente	Variável	Símbolo	Dimensão
CAP	Área de captação	A_{CAP}	$[L^2]$
	Lâmina de escoamento	Q	[L]
	Oferta hídrica	WS	$[L^3]$
IRR	Área de irrigação	A_{IRR}	$[L^2]$
	Lâmina de irrigação	ID	[L]
	Demanda hídrica	WD	$[L^3]$
ARM	Área de armazenamento	A_{ARM}	$[L^2]$
	Capacidade de armazenamento	SC	$[L^3]$

Fonte: os autores.

Tabela 2. Formulação dos indicadores do modelo analítico e respectivas faixas de valores reportados na literatura

Categoria	Indicador	Formulação	Faixa de valores reportados na literatura	
CAP-IRR	Catchment command ratio (CCR)	$\frac{A_{CAP}}{A_{IRR}}$	1 - 60	Shinde et al. (2004)
	Desirable catchment command ratio (DCCR)	$\frac{ID}{Q}$	0,5 - 5	Van-Wambeke et al. (2013); Adham et al., (2016)
	Storage Index (SI)	$\frac{WD}{WS}$	0,2 - 4	Campisano & Modica (2012)
	Normal Deficit Cumulative (NDC)	$\frac{\sum(WD_i - WS_i)}{\sum WS_i}$	0 - 1	Devineni et al. (2013)
IRR-ARM	Storage command ratio (SCR)	$\frac{A_{ARM}}{A_{IRR}}$	0,09 - 2,7	Shinde et al. (2004)
	Water provision capacity (W)	$\frac{SC}{A_{IRR}}$	0,1 - 1,2 m	Van der Zaag & Gupta, (2008)
	Desirable command área (DCA)	$\frac{SC}{ID}$	Indisponível	-
	Storage fraction (SF)	$\frac{SC}{WD}$	0,05 - 80	Campisano & Modica (2012); Wiatkowski et al., (2021)
ARM-CAP	Catchment Storage Capacity Ratio (CSR)	$\frac{A_{CAP}}{A_{ARM}}$	10 - 200	Shinde et al. (2004); Habets et al., (2014)
	Storage Capacity Catchment Ratio (SCCR)	$\frac{A_{CAP}}{SC}$	4 - 100 m ⁻¹	Marín-Comitre et al. (2020)
	Volume fator (VF)	$\frac{SC}{WS}$	0,01 - 5	Wiatkowski et al., (2021); Brasil & Medeiros (2019)
	Modified River Regulation Index (MRRI)	$\sum \left\{ \frac{SC_j}{WS} \times \frac{WS_j}{WS} \right\}$	0 - 1	Eriyagama et al. (2022)

Fonte: os autores.

Nota-se, na Tabela 2, que não há valor de referência estabelecido para o indicador DCA, pois este depende das características específicas de cada sistema e não permite comparações diretas entre diferentes sistemas. O DCA pode ser comparado com a área de irrigação do próprio sistema, e a razão DCA/área irrigada pode indicar o percentual da demanda potencialmente atendida.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia adotada neste estudo foi concebida com o objetivo de avaliar o potencial de aplicação do modelo analítico em contextos territoriais típicos de sistemas de irrigação de pequena escala, e não de reproduzir com elevado nível de detalhamento a dinâmica hidrológica local. Nesse sentido, a bacia do Córrego Sossego foi utilizada como bacia piloto por apresentar características hidroclimáticas e produtivas representativas de regiões rurais dominadas pela agricultura familiar, com forte sazonalidade das chuvas e elevada dependência de sistemas de armazenamento de água.

As simplificações metodológicas adotadas, especialmente no que se refere à espacialização das componentes do SAAIPE e à capacidade de armazenamento das estruturas, foram intencionalmente empregadas para simular uma abordagem de planejamento distribuído, compatível com aplicações exploratórias e comparativas em escala regional.

Para testar o potencial do modelo, foi utilizada uma situação hipotética que representa as condições hidroagrometereológicas da agricultura familiar na bacia do Córrego Sossego, a qual já foi utilizada como área experimental para diversas pesquisas no contexto da gestão integrada e participativa de recursos hídricos, com ênfase no desenvolvimento sustentável local (Albán Domínguez, 2018; Batista, 2016; Lima, 2013; Daré, 2013).

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos a partir de diferentes fontes, incluindo registros locais e informações secundárias disponíveis na literatura técnica e científica. Na ausência de dados primários específicos, foram adotadas estimativas fundamentadas em valores típicos reportados na literatura e em parâmetros técnicos, assumindo-se condições médias representativas ou simplificações para o contexto regional. A maioria dos dados empregados foi abstraída de algumas experiências de pesquisa na bacia experimental, especialmente de Albán Domínguez (2018), trabalho no qual foi utilizado um procedimento metodológico para determinar a capacidade hídrica de armazenamento da bacia do Córrego Sossego. O referido procedimento, a base de dados empregada para a bacia do córrego Sossego e seus resultados são apresentados nos Apêndices A, B e C respectivamente.

Para avaliar o potencial de aplicação do modelo foram realizados dois tipos de testes. Na Tabela 3 são apresentadas as características gerais de cada teste.

Tabela 3. Características gerais dos testes realizados

Teste	Nome do cenário	Descrição	Objetivo e utilidade do teste	Escala de análise
1	Cenário de referência da bacia	Aplicação do modelo na situação hipotética em que não há informações detalhadas sobre o número, localização, capacidade ou tipo de SAAIPE existente na bacia.	Avaliar se o modelo consegue apoiar um planejamento inicial em escala de bacia, mesmo quando só há dados hidroagrometereológicos disponíveis, ou seja, para contextos em que os SAAIPEs ainda não existem ou não estão documentados.	Bacia hidrográfica.
		Portanto, neste cenário simulou-se um SAAIPE genérico, representado por pequenos reservatórios distribuídos ao longo da bacia, considerando apenas dados hidroagrometereológicos da bacia.	Pde ser útil em diagnósticos iniciais e como cenário de referência para comparar com configurações reais no futuro.	
2	Cenários que consideram diferentes tecnologias	Aplicação do modelo na situação hipotética em que se deseja simular tecnologias específicas funcionando como SAAIPE.	Avaliar como o modelo responde a diferentes tecnologias de armazenamento e pode contribuir para a definição da sua configuração.	Propriedade ou sub-região, a depender da tecnologia.
		Nesses cenários, simularam-se, individualmente, as seguintes tecnologias: tanques, cisternas, barraginhas e barragens – totalizando quatro cenários.	Pode ser útil para comparar soluções tecnológicas e apoiar decisões sobre quais implantar.	
		Além dos dados hidroagrometereológicos também foram consideradas informações sobre as tecnologias testadas.		

Fonte: os autores

Ambos os testes buscam contribuir para um planejamento exploratório de SAAIPEs, mostrando a aplicabilidade e comparando os resultados com faixas de valores de referência reportados na literatura. Mais detalhes sobre eles são apresentados na sequência.

3.1 Área de Estudo

A bacia do Córrego Sossego está inserida na bacia hidrográfica do rio Santa Joana, afluente do rio Doce. A bacia piloto possui uma área de drenagem de aproximadamente 65 km². Como ilustrado na Figura 1, está localizada no município de Itarana/ES, Espírito Santo (ES), Brasil, nas coordenadas 40,88° W de longitude e 19,83° S de latitude. A bacia pode ser dividida em oito sub-regiões hidrográficas, considerando os afluentes principais, assim como seus trechos alto e baixo.

A área de estudo apresenta condições típicas de regiões com predominância de agricultura familiar e elevada dependência de sistemas de armazenamento de água para irrigação de pequena escala, o que confere representatividade regional ao estudo de caso. Em 2013, estavam registradas 148 propriedades de tipo familiar dentro de seu limite geográfico (Lima, 2013). Nessa região, as principais culturas são o café e a banana, ambas de elevado valor comercial e alta demanda hídrica. A produção é predominantemente conduzida por famílias de agricultores que dependem desses cultivos tanto para o autoconsumo quanto para a comercialização (Lima, 2013; Daré, 2013; Batista, 2016).

O clima da região é classificado como tropical chuvoso, tipo "Aw" segundo a classificação de Köppen, com precipitação média anual de aproximadamente 1100 mm e forte sazonalidade intra-anual, uma vez que cerca de 80% das chuvas se concentra entre os meses de outubro e março (Daré, 2013). Essa combinação entre elevada variabilidade climática, predominância de atividades agrícolas irrigadas e pequenas propriedades rurais resulta em alta dependência de estruturas de armazenamento de água e em recorrentes conflitos pelo uso da água, caracterizando um contexto típico para a aplicação e avaliação de modelos de planejamento regional de SAAIPEs.

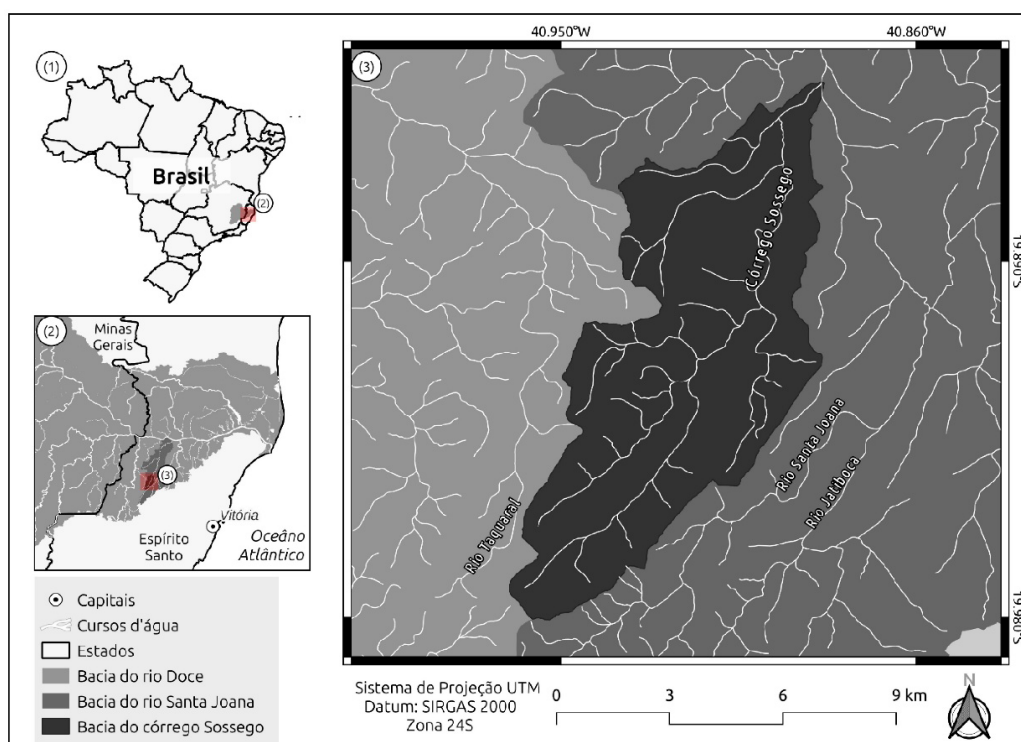


Figura 1. Localização da bacia hidrográfica do Córrego Sossego

Fonte: Os autores

3.2 Aplicação do modelo ao cenário de referência da bacia

Nesta aplicação, testou-se o modelo analítico na bacia experimental do Córrego Sossego por meio da avaliação de um SAAIPE composto por pequenos reservatórios distribuídos ao longo da bacia. O objetivo desse teste foi verificar se o modelo pode apoiar o planejamento inicial de SAAIPEs em escala de bacia hidrográfica, avaliando-o de forma preliminar através dos indicadores considerados na estrutura do modelo. A aplicação foi baseada exclusivamente em dados secundários hidroagroclimáticos disponíveis para a bacia, complementados por estimativas fundamentadas na literatura, de modo a simular uma situação típica de planejamento inicial.

É importante destacar que para este teste considerou-se, de forma hipotética, que na bacia-piloto não há informações detalhadas sobre a configuração de SAAIPE (número, localização, capacidade de armazenamento ou tipo de tecnologia existente). Essa abordagem pode ser utilizada em uma situação em que o planejador dispõe apenas de dados hidroagroclimáticos da bacia, sem um inventário detalhado das estruturas de armazenamento (seja porque elas não existem ainda, seja porque não há registros completos sobre sua distribuição e características), assim como também pode ser utilizada como cenário de referência para comparação com configurações reais.

Para caracterizar os elementos relacionados às componentes CAP e IRR, assumiu-se que a área total da bacia (A_{TOT}) é a soma de A_{XAI} e A_{IPP} . Para as demais variáveis, utilizaram-se os resultados médios multianuais obtidos em Albán Domínguez (2018), os quais foram previamente tratados por meio de análises estatísticas e agregados em médias multianuais, conforme descrito no referido estudo.

Para descrever as variáveis da componente ARM, considerou-se que: 1- o SAAIPE é composto por pequenas estruturas de armazenamento de água superficial distribuídas homogeneamente ao longo da bacia, para as quais se adotou uma profundidade de 2 m; 2- a capacidade de armazenamento (SC) é equivalente à capacidade de regularização da bacia estimada por Albán (2018); e 3- a geometria das unidades de armazenamento têm formato de cone – formato aproximado de estruturas de armazenamento escavadas.

As informações requeridas e os métodos e simplificações adotados para a caracterização das variáveis do SAAIPE, para a bacia do Córrego Sossego, são resumidos na Tabela 4 e na Tabela 5, respectivamente. Mais detalhes sobre essas informações e procedimentos adotados podem ser revisados no Apêndice B.

Tabela 4. Detalhe de informações requeridas para caracterização das variáveis hidroagroclimáticas da bacia do córrego Sossego e respectivas fontes de dados.

Tipo de informação	Descrição
Precipitação diária	Estação de Itarana, código: 1940000, disponíveis na base de dados da Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico (ANA), através do portal hidroweb (hidroweb.ana.gov.br); período de 1975 a 2005.
Precipitação e temperatura média, mínima, máxima mensal	Estação de Itarana do Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural (Incaper), código 01940052; de 1977 a 2012.
Dados pedológicos	Obtidos de Poloni (2010), com base em informações do RADAMBRASIL e do GEARH-NES para redefinir os limites espaciais das classes de solo.
Mapa do uso do solo	Extraídas do mapeamento digital do estado do Espírito Santo - GEBASES em 2012- e atualizado na campanha de campo realizada por Batista (2016).
Culturas e práticas de manejo	Extraídas do mapa do uso do solo por ferramentas de análises de informação geográfica. Eficiência de irrigação obtida de Daré (2013). Cronograma de culturas e coeficiente de cultura baseados na FAO (disponíveis no software CROPWATER).

Fonte: Os autores

Tabela 5. Detalhe de métodos e simplificações requeridas para a caracterização das variáveis consideradas no modelo.

Componente	Variável	Métodos
CAP	Q	Valor médio anual do escoamento determinado pelo método do número de Curva do SCS para séries diárias de escoamento. A série foi agregada em valores mensais.
	$A_{CAP} = A_{TOT} - A_{IRR}$	Assumindo espacialização: $A_{XAI} = A_{TOT} - A_{IPP}$, sendo A_{TOT} a área total da bacia.
	WS	Equivale ao somatório do escoamento mensal multianual multiplicado pela área de captação.
IRR	ID	Valor médio anual da lâmina de irrigação utilizando métodos da FAO para determinar a demanda hídrica de diferentes culturas na bacia experimental. Considera a precipitação efetiva proposta pelo USDA e assume uma eficiência de irrigação de 85%, obtida em Daré (2013).
	A_{IRR}	Somatória das áreas identificadas no mapa de uso do solo como áreas de plantio.
	WD	Equivale ao somatório das lâminas de irrigação mensais multianual (ID) multiplicado pela área de plantio.
ARM	SC	Adotado como o volume de regularização: equivalente ao somatório do déficit entre as séries mensais multianuais de WD e WS.
	A_{ARM}	Assume-se que a geometria de reservatórios escavados se assemelhada a de um cone (Stephens, 2010, p.44), sendo $A_{ARM} = 3 \cdot (SC/H)$ e a profundidade média de reservatórios (H) igual a 2 m, para garantir a abordagem de planejamento distribuído.

Fonte: Os autores.

3.3 Aplicação do modelo a cenários que consideram diferentes tecnologias

Neste teste, o modelo foi aplicado a cenários que consideram diferentes tecnologias de armazenamento de água comumente empregadas na agricultura familiar. O objetivo dessa aplicação não foi diagnosticar a situação atual da bacia, mas simular como o modelo responde a arranjos tecnológicos distintos, permitindo comparar seu desempenho e explorar implicações para o planejamento e a implementação futura de SAAIPes.

Dada a diversidade de classificações e de tipos de tecnologias de armazenamento, foram identificados quatro (4) tecnologias, por sua relevância na literatura e potencial aplicabilidade na região de estudo, sendo elas: tanques, cisternas, barragens e barraginhas. Na Tabela 6 são descritas as principais características de cada tecnologia, assim como os mecanismos que as diferenciam.

Tabela 6. Descrição das tecnologias de armazenamento utilizadas na aplicação do modelo

Tecnologia	Descrição
Tanque	Conhecidas na língua inglesa como <i>tanks</i> , <i>ponds</i> ou <i>farm ponds</i> , são estruturas de armazenamento de água escavadas de pequenas dimensões, usualmente retangulares, que podem ser impermeabilizadas com lonas ou revestidas em cimento para evitar a infiltração.
Cisterna	Conhecidas na língua inglesa como <i>cisterns</i> , são estruturas de armazenamento que coletam e retêm água da chuva de superfícies impermeáveis (teto, calçada, rochas). São instaladas perto de residências ou áreas agrícolas. Podem ser feitas em alvenaria ou pré-fabricada em PVC e são cobertas, evitando a infiltração e a evaporação.
Barragem	Conhecidas na língua inglesa como <i>dams</i> , são estruturas de armazenamento hídrica escavada com barreira perpendicular à rede de drenagem. As dimensões e a capacidade de armazenamento das barragens dependem de sua localização e do relevo do terreno.
Barraginha	Conhecidas na língua inglesa como <i>percolations ponds</i> , são estruturas em depressões naturais de pequenas dimensões, conectadas a riachos sazonais. Favorecem a infiltração e sua função está mais relacionada com a recarga de aquíferos e o aumento da disponibilidade de água no solo.

Fonte: Os autores

Foram caracterizadas representações de cada tecnologia em função de variáveis das componentes CAP, IRR e ARM, compreendendo-as cada uma como um SAAIPE, ou seja, cada tecnologia representa um cenário distinto totalizando quatro cenários. A caracterização considerou simplificações relacionadas à espacialização de cada tecnologia, aos mecanismos para captar e armazenar água, e as condições hidroagrocimáticas da bacia experimental do Córrego Sossego. Para isso, assumiu-se que as características hidroagrocimáticas são homogêneas nas sub-regiões e nas propriedades da bacia-piloto. Cabe ressaltar que para a simulação dos cenários, a bacia foi discretizada em oito sub-regiões e assumiu-se que nela há 150 propriedades rurais, conforme discutido em Albán Domínguez (2018) e Lima (2013).

A espacialização das tecnologias foi definida com base em três abordagens de planejamento, explicadas a seguir:

- Para as tecnologias tanque e cisterna, foi utilizada a abordagem individual, que considera o tamanho da propriedade agrícola como limite do sistema. Desta forma, a caracterização assume que as superfícies das componentes CAP, IRR e ARM estão contidas nos limites geográficos da propriedade. Além disso, assumiu-se que A_{IRR} para essas tecnologias equivale à área de irrigação da bacia dividida pelo número de propriedades.
- Para as barragens utilizou-se uma abordagem coletiva, uma vez que essas estruturas geralmente não correspondem aos limites das propriedades, e sua zona de influência está relacionada com a localização na rede de drenagem. Assumiu-se que as barragens se distribuem nas 8 sub-regiões hidrográficas da bacia. Para verificar o efeito de diferentes distribuições, foram propostas duas representações: BAR1, que representa uma barragem por sub-região hidrográfica; e BAR3, que representa 3 barragens por sub-região hidrográfica. Assim, os valores de A_{XAI} e A_{IPP} dessas tecnologias equivalem ao valor correspondente à bacia-piloto, dividido pelo número de sub-regiões hidrográficas e pelo nível de distribuição.
- Para as barraginhas utilizou-se a abordagem mista, compreendendo que essas tecnologias podem ser planejadas em locais estratégicos fora dos limites da propriedade. No entanto, sua capacidade volumétrica é muito pequena e está associada ao atendimento de demandas individuais, e não coletivas. Assim, a representação adotada considera duas tecnologias por propriedade, visando viabilizar sua manutenção pelas famílias usuárias. Dessa forma, A_{IRR} para essa tecnologia equivale à metade de área irrigada das tecnologias individuais (tanque e cisterna).

Além dessas simplificações, foram estabelecidas outras considerações sobre a espacialização e as dimensões das estruturas de armazenamento para cada tipo de tecnologia, levando em conta seus diferentes mecanismos de captação e armazenamento de água:

- Para a representação do tanque, foi assumido que a área total do SAAIPE (A_{TOT}) corresponde à área da propriedade. Além disso, assumiu-se que 50% dessa área é destinada para irrigação (A_{IRR}), 10% para armazenamento (A_{ARM}) e os 40% restantes para a captação (A_{CAP}).
- Para as cisternas adotaram-se dimensões protótipo baseadas em sistemas voltados para o abastecimento de água para irrigação em famílias do semiárido brasileiro; com capacidade de 52.000 l, profundidade de 1,8 m e diâmetro de 6,4 m (Lindoso et al., 2018). Além disso, determinou-se uma série mensal de escoamento superficial pelo método racional utilizando um coeficiente de 0,9 pois a superfície de captação dessa tecnologia é impermeável (ver Apêndice D).
- Para as barragens assumiu-se que a capacidade de armazenamento (SC) equivale a 50% do volume de regularização necessário para atendimento das demandas hídricas, conforme obtido em Albán Domínguez (2018), dividido entre o número de sub-regiões e o nível de distribuição.
- Para as barraginhas foram adotados valores de referência com base em informações da literatura, definindo-se uma área superficial de 20 m de largura por 12 m de comprimento (Embrapa, 2009).
- Sobre a profundidade (H) das estruturas de armazenamento, foram definidas as profundidades de 2, 3 e 4 m para o tanque, BAR3 e BAR1, respectivamente, garantindo que, quanto maior a capacidade da estrutura, maior a profundidade de armazenamento. Já a profundidade da barraginha foi definida em 1,3 m, inferior às demais tecnologias, pois essa estrutura tem como principal característica promover maior infiltração e está mais exposta à evaporação.
- Para a aplicação do indicador MRRI aos cenários com diferentes tecnologias de armazenamento, assumiu-se que as características hidroagroclimáticas da bacia são homogêneas e que cada tecnologia apresenta um valor característico de disponibilidade hídrica (WS). Sob essas premissas, a formulação apresentada na Tabela 2 se resume a $MRRI = (n \cdot SC_j \cdot WS_j) / WS^2$. Onde, SC_j é a capacidade de armazenamento da tecnologia j; WS_j é disponibilidade hídrica para a tecnologia j; WS é a disponibilidade hídrica total da bacia; e n é número de estruturas da tecnologia que podem ser implantadas na bacia, conforme a abordagem de planejamento adotada (individual, coletiva ou mista). Para os cenários simulados, adotaram-se os seguintes valores de n: 150 para tanques; 150 para cisternas; 300 para barraginhas; 24 para BAR3; e 8 para BAR1.

Os indicadores propostos no modelo foram aplicados de forma integrada, com o objetivo de permitir a comparação entre diferentes tecnologias de armazenamento de água. A interpretação conjunta dos indicadores possibilita avaliar como as interações entre as componentes CAP, IRR e ARM se manifestam em distintos arranjos tecnológicos, oferecendo subsídios para análises comparativas das diferentes tecnologias propostas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Aplicação do modelo ao cenário de referência da bacia

A Tabela 7 apresenta os valores das variáveis das componentes CAP, IRR e ARM, enquanto a Tabela 8 exhibe os indicadores calculados para as categorias CAP-IRR, IRR-ARM e ARM-CAP, bem como as respectivas faixas de valores de referência reportados na literatura.

Tabela 7. Caracterização das variáveis das componentes CAP, IRR e ARM para o teste no cenário de referência.

Componente	Variável (unid.)	Valor
CAP	A_{CAP} (ha)	4988
	Q (mm)	104
	WS (10^6 m ³ /ano)	5,2
IRR	A_{IRR} (ha)	1231
	ID (mm)	664
	WD (10^6 m ³ /ano)	8,2
ARM	A_{ARM} (ha)	980
	SC (10^6 m ³)	6,53

Fonte: Os autores

Tabela 8. Resultados dos indicadores do modelo para o cenário de referência.

Categoria	Indicador	Formulação	Resultado	Faixa de valores reportados na literatura
CAP-IRR	Catchment command ratio (CCR)	$\frac{A_{CAP}}{A_{IRR}}$	4,1	1 - 60
	Desirable catchment command ratio (DCCR)	$\frac{ID}{Q}$	6,4	1 - 60
	Storage Index (SI)	$\frac{WD}{WS}$	1,5	0,2 - 4
	Normal Deficit Cumulative (NDC)	$\frac{\sum(WD_i - WS_i)}{\sum WS_i}$	1,2	0 - 1
IRR-ARM	Storage command ratio (SCR)	$\frac{A_{ARM}}{A_{IRR}}$	0,8	0,09 - 2,7
	Water provision capacity (W)	$\frac{SC}{A_{IRR}}$	0,5	0,1 - 1,2 m
	Desirable command área (DCA)	$\frac{SC}{ID}$	983	Indisponível
	Storage fraction (SF)	$\frac{SC}{WD}$	0,8	0,05 - 80
ARM-CAP	Catchment Storage Capacity Ratio (CSR)	$\frac{A_{CAP}}{A_{ARM}}$	5,1	10 - 200
	Storage Capacity Catchment Ratio (SCCR)	$\frac{A_{CAP}}{SC}$	7,6	4 - 100 m ⁻¹
	Volume fator (VF)	$\frac{SC}{WS}$	1,2	0,01 - 5
	Modified River Regulation Index (MRR)	$\sum \left\{ \frac{SC_j}{WS} \times \frac{WS_j}{WS} \right\}$	Não aplicável	0 - 1

Fonte: Os autores

No geral, em relação ao sistema simulado, os resultados apresentados na Tabela 8 indicam um padrão consistente de déficit hídrico na bacia experimental do Córrego Sossego, evidenciado de maneira convergente pelos indicadores das categorias CAP-IRR, IRR-ARM e ARM-CAP. A análise integrada dos indicadores aponta que as limitações do sistema estão associadas principalmente ao desbalanceamento entre disponibilidade hídrica e demanda de irrigação, o que compromete tanto o enchimento das estruturas de armazenamento quanto sua capacidade de atender os déficits hídricos das culturas.

No que diz respeito aos indicadores da categoria CAP-IRR, os resultados evidenciam tendência geral de demandas hídricas superiores ao potencial de captação, sinalizada pelo fato do valor de DCCR ser superior ao valor de CCR e pelos valores dos indicadores SI e NDC, ambos superiores a 1. O valor do CCR obtido é semelhante aos identificados por Srivastava (2001), que utilizaram o indicador para diferentes culturas e diferentes regimes de precipitação na Índia. De forma integrada, SI e NDC reforçam o padrão de déficit hídrico, considerando diferentes perspectivas temporais e funcionais do sistema, com menor déficit apontado pelo indicador NDC.

Na categoria IRR-ARM, observa-se relação funcional entre capacidade de armazenamento e área irrigada, uma vez que o indicador SCR enquadra-se dentro dos valores de referência, porém o DCA é inferior à área irrigada da bacia (1241 ha) o que indica déficit para atendimento das demandas hídricas de irrigação. O indicador W reforça a pressão sobre o armazenamento quando comparado às faixas típicas de sistemas de irrigação suplementar sugeridas por Devineni et al. (2013) (entre 0,1-0,2 m). Esses resultados revelam que, mesmo quando os valores se situam dentro de faixas de referência reportadas na literatura, a capacidade de armazenamento simulada pode ser avaliada como insuficiente para atender a totalidade da área irrigada da bacia. Esse resultado sugere que o aumento isolado da capacidade de armazenamento não é suficiente para compensar déficits estruturais associados à elevada demanda hídrica e à sazonalidade climática.

No que tange à categoria ARM-CAP, os indicadores analisados de forma conjunta sinalizam alta pressão sobre a disponibilidade hídrica e limitações no enchimento das estruturas de armazenamentos simuladas, evidenciadas pela relação entre VF, CSR e SCCS, em comparação com seus valores de referência. Ou seja, há indícios de que uma parcela significativa da área de captação seria requerida para viabilizar o armazenamento, evidenciando limitações espaciais e hidrológicas para a expansão de sistemas de armazenamento.

Avaliando os resultados obtidos neste cenário, é possível afirmar que a aplicação do modelo permitiu avaliar o desempenho de um SAAIPE hipotético na bacia do Córrego Sossego, mesmo na ausência de informações sobre a configuração dele, utilizando como referência valores encontrados na literatura. A análise comparativa entre indicadores evidencia coerência entre densidade de armazenamento e padrões observados em outros contextos. Por exemplo, o resultado de W encontra-se dentro da faixa considerada típica por Van der Zaag & Gupta (2008) para sistemas baseados em irrigação deficitária (entre 0,5 e 0,7 m). De forma semelhante, Srivastava (2001) identificou valores equivalentes (entre 0,2 e 0,6 m) em sistemas de irrigação alternada com arroz e culturas sazonais no oeste da Índia; o valor obtido para o inverso de SCCR é similar ao reportado por Malveira et al. (2012) para a região de Vitória (Austrália), que apresenta precipitações anuais comparáveis às da bacia experimental (entre 1000 e 1500 mm) estudada neste trabalho. Esse resultado reforça a importância de análises comparativas e integradas entre os indicadores e contextos hidroagroclimáticos, em vez da adoção de valores fixos ou genéricos.

Por outro lado, algumas discrepâncias foram observadas entre os indicadores simulados e a faixa de valores de referência reportados na literatura. Por exemplo, o valor de NDC é superior ao valor ($NDC < 1$) sugerido por Devineni et al. (2013). Essa diferença pode ser atribuída à influência das escolhas metodológicas nas relações funcionais entre disponibilidade e demanda hídrica.

De modo geral, os resultados obtidos convergem para uma tendência sistêmica de déficit hídrico, ainda que provenientes de diferentes categorias de indicadores. Cerca de 20% da área da bacia é destinada à irrigação de culturas altamente demandantes de água, como banana e café, onde já se observam conflitos pelo uso do recurso hídrico. Os resultados sugerem que, mesmo com a presença de estruturas de armazenamento, a oferta hídrica tende a ser insuficiente para atender plenamente às demandas de irrigação. À luz da literatura de gestão integrada de recursos hídricos, esses achados evidenciam que o déficit hídrico observado não decorre apenas de limitações físicas de captação ou armazenamento, mas sobretudo de uma desconexão estrutural entre oferta, demanda e governança da água em escala de bacia (Biswas, 2004; Pahl-Wostl, 2020). Estudos apontam que estratégias centradas exclusivamente na ampliação de infraestrutura tendem a apresentar eficácia limitada quando não articuladas a instrumentos de gestão da demanda, alocação equitativa, regulação do uso da terra e coordenação institucional (Molle, 2008; Garrick et al., 2017). Assim, os resultados reforçam a necessidade de integrar soluções técnicas, institucionais e territoriais no planejamento hídrico, em consonância com abordagens contemporâneas de segurança hídrica e resiliência socio-hidrológica (Grey & Sadoff, 2007; Pahl-Wostl, 2019).

Ressalta-se que as simplificações adotadas na aplicação do modelo decorrem da necessidade de se estabelecer critérios espaciais consistentes para a análise, visto que a localização e as dimensões de pequenos reservatórios podem variar significativamente dentro de uma bacia. Em contextos reais, as estruturas de armazenamento podem estar dispersas ao longo do curso d'água, em diferentes posições e com diferentes profundidades dentro da paisagem, em função das condições topográficas, da demanda hídrica, da localização das propriedades e da tecnologia adotada, entre outros fatores.

Neste cenário, a aplicação do modelo demonstrou potencial para padronizar critérios de avaliação e permitir a comparação entre diferentes realidades, por meio do uso integrado dos indicadores propostos. Essa capacidade de comparação constitui um avanço importante para a sistematização e o planejamento de SAAIPE em diferentes contextos territoriais, configurando-se como uma ferramenta útil para orientar políticas públicas e investimentos. No entanto, para que esse potencial se concretize em estratégias de escala mais amplas, é necessário avançar na sistematização de experiências exitosas com sistemas de armazenamento de água em distintas regiões e com diferentes tipos de tecnologias.

Esse esforço contribuiria para a definição de faixas de referência mais robustas e contextualizadas para os indicadores propostos, fortalecendo o uso do modelo como instrumento de apoio à tomada de decisão em múltiplas escalas.

4.2 Aplicação do modelo a cenários que consideram diferentes tecnologias

Nesta seção, apresentam-se os resultados da aplicação do modelo para diferentes tecnologias de armazenamento comumente empregadas na agricultura familiar na bacia do Córrego Sossego. Da mesma forma que a aplicação do modelo ao cenário de referência, os resultados apresentados para estes cenários correspondem a uma aplicação hipotética baseada em informações reais da bacia piloto e em simplificações de arranjos tecnológicos, considerando referências da literatura para sua caracterização. O objetivo central foi avaliar cada um dos arranjos nas condições da bacia, para poder comparar vantagens e desvantagens entre elas e assim contribuir com o planejamento de SAAIPE na escala regional.

A Tabela 9 resume os valores das variáveis associadas às componentes CAP, IRR e ARM para os protótipos representativos de tanques, cisternas, barraginhas e barragens (BAR1 e BAR3).

Tabela 9. Caracterização das variáveis para cada tecnologia considerada

Componente	Variável	Tanque	Cisterna	Barraginha	BAR1	BAR3
CAP	A_{CAP} (ha)	6,6	2,0E-02	0,6	623,5	207,8
	Q (mm)	104	925	104	104	104
	WS (m ³ /ano)	6.712,2	185,2	629,3	653.918,3	218.042,7
IRR	A_{IRR} (ha)	8,2	8,2	4,1	153,9	51,3
	ID (mm)	664	664	664	664	664
	WD (m ³ /ano)	53.149,0	53.149,0	26.574,5	1.021.124,9	338.824,8
ARM	A_{ARM} (ha)	1,6	3,1E-03	2,4E-02	30,0	15,0
	SC (m ³)	10.942	52	104	400.000	150.000

Fonte: Os autores

Com exceção das variáveis Q e ID, que dependem diretamente das condições hidroagroclimáticas da bacia, as demais variáveis refletem a espacialização de cada cenário simulado. Nota-se na Tabela 9 que as barragens (BAR1 e BAR3), projetadas para uso coletivo, apresentam valores para as demais variáveis substancialmente superiores às tecnologias de uso individual ou misto, como tanques, barraginhas e cisternas. Essa diferença era esperada, dado que as barragens visam atender a demanda de múltiplas propriedades, enquanto as demais tecnologias são dimensionadas para uso individual.

Do ponto de vista dimensional, todas as tecnologias avaliadas se enquadram nos critérios de pequenos reservatórios segundo Owusu et al. (2022) e Mahmoodi et al. (2024), com volumes inferiores a 1 milhão de m³, áreas de espelho d'água abaixo de 20 ha e profundidades menores que 15 m. Contudo, cisternas e barraginhas operam em escalas micro, com áreas inferiores a 0,2 ha – dimensão considerada insuficiente por Marín-Comitre et al. (2020) para suprir a demanda de irrigação durante períodos secos em *farm ponds* no sudeste da Península Ibérica, sugerindo limitações estruturais intrínsecas ao atendimento da demanda.

Além disso, essas pequenas estruturas tendem a ser subestimadas em análises regionais, tanto por sua baixa visibilidade em satélites como o Landsat (Peña-Arancibia et al., 2023), quanto pela ausência de avaliações regionais sobre seus impactos hidrológicos acumulativos. Apesar dessas limitações, cisternas e barraginhas são amplamente utilizadas em regiões semiáridas da América Latina, como o Nordeste brasileiro e o Gran Chaco Americano. Compreender melhor o funcionamento e o potencial dessas tecnologias é fundamental para promover sua replicação em escala regional, especialmente como medida de adaptação aos efeitos das mudanças climáticas que afetam intensamente essas regiões.

Quanto à densidade das estruturas, os arranjos tecnológicos propostos para a bacia do Córrego Sossego estão coerentes com valores típicos da literatura, sendo o valor de BAR3 comparável ao observado para *check-dams* no semiárido indiano de 1 por cada 2 km² de área de drenagem (Alam et al., 2022). No caso dos tanques, a área de armazenamento representa cerca de 4% da área da bacia (quando somada a área dos 150 tanques simulados), 10% da área total das propriedades e 20% da área irrigada.

Esses valores são distintos dos valores reportados por Mahmoodi et al. (2024) e por Peña-Arancibia et al. (2023). O primeiro trabalho observou que 16% de uma bacia no sul da Índia estava ocupada por tanques, enquanto o segundo observou que entre 0,1% e 0,6% da área irrigada das propriedades estudadas eram ocupadas por essas estruturas. Por outro lado, a proposta hipotética avaliada neste estudo considerou a implantação de 300 barraginhas na área da bacia piloto, uma por 21 ha aproximadamente, representando uma densidade consideravelmente superior àquela observada na região do Gran Chaco Americano (1/300 ha ou 1/1.230 ha), como relatam Niborski et al. (2023). No caso das cisternas, embora existam informações sobre densidades em escalas municipal e nacional (Silva et al., 2021), não se identificaram dados diretamente compatíveis com os parâmetros do modelo proposto.

A partir da caracterização das variáveis associadas às diferentes tecnologias, foi possível aplicar o modelo e calcular os indicadores para cada protótipo representativo na bacia do Córrego Sossego. Os resultados da aplicação para cada tecnologia são apresentados na Tabela 10. Para fins de comparação, nesta tabela, também são apresentados os resultados obtidos para o cenário de referência.

De modo geral, a aplicação integrada dos indicadores mostra que existe potencial de déficit hídrico nas três categorias do modelo, em consonância com o cenário de referência. No entanto, a intensidade e a natureza desse déficit variam entre categorias e tecnologias. O déficit hídrico foi mais acentuado nas categorias CAP-IRR e IRR-ARM, indicando limitações na relação entre captação, demanda e capacidade de armazenamento, especialmente nos cenários com tecnologias de menor capacidade como as cisternas e as barraginhas. Por outro lado, quando comparados ao cenário de referência, os cenários com as distintas tecnologias apresentaram um desempenho um pouco melhor na categoria ARM-CAP, tendo em vista que as estruturas simuladas possuem menor capacidade de armazenamento, exercendo assim menor pressão sobre a disponibilidade hídrica local.

Tabela 10. Resultados dos indicadores do modelo para o cenário que considera diferentes tecnologias e para o cenário de referência.

Categoria	Indicador	Tanque	Cisterna	barraginha	BAR1	BAR3	Cenário de referência
CAP-IRR	CCR	0,8	2,0E-03	0,1	4,1	4,1	4,1
	DCCR	6,4	0,7	6,4	6,4	6,4	6,4
	SI	7,9	287,0	42,2	1,56	1,56	1,5
	NDC	7,5	286,4	41,8	1,2	1,2	1,2
IRR-ARM	SCR	0,2	3,7E-04	5,8E-03	0,2	0,3	0,8
	W	0,1	6,3E-04	2,5E-03	0,3	0,3	0,5
	DCA	1,6	7,8E-03	1,6E-02	60,2	22,6	983
	SF	0,2	1,0E-03	4,0E-03	0,4	0,4	0,8
ARM-CAP	CSR	4,1	6,5	25,0	20,8	13,9	5,1
	SCCR	6,0	3,8	57,7	15,6	13,9	7,6
	VF	1,6	0,3	0,2	0,6	0,7	1,2
	MRRI	3,78 E-04	4,95 E-08	6,75E-07	7,18E-02	2,69E-02	Não aplicável

Fonte: Os autores

Na categoria CAP-IRR verificou-se tendência geral de maior déficit hídrico nos cenários com tanques, cisternas e barraginhas quando comparados ao cenário de referência da bacia. Os valores elevados dos indicadores SI e NDC indicam déficit hídrico nesses cenários. Tais valores foram muito superiores aos observados no cenário de referência. Essa diferença ocorre devido à espacialização proposta para essas tecnologias: com áreas de captação em relação à área irrigada muito menores do que a considerada no cenário de referência. Por outro lado, o cenário com barragens apresenta desempenho semelhante, pois ambos os cenários mantêm a mesma lógica de distribuição espacial dos elementos CAP e IRR. Nesta categoria, ressalta-se que o valor do indicador DCCR para o cenário com cisternas é muito menor do que os valores obtidos nos demais cenários, dando indícios de melhor desempenho. Isso ocorre porque as cisternas captam água diretamente de superfícies impermeáveis, o que requer menor área de captação para gerar volume de água. No entanto, quando avaliados os demais indicadores (SI e NDC), o cenário com cisternas apresenta o maior déficit hídrico da categoria.

No que se refere à categoria IRR-ARM, todos os cenários avaliados resultaram em maior déficit hídrico quando comparados ao cenário de referência. A interpretação conjunta dos indicadores demonstra uma insuficiência generalizada da capacidade de armazenamento frente às demandas hídricas de irrigação. Essa tendência é consistente entre os indicadores SCR, W, DCA e SF, cujos valores foram sistematicamente menores do que aqueles observados no cenário de referência. Ressalta-se que para os cenários com tanques e barragens os valores observados estão alinhados com as faixas de referência da literatura. Enquanto nos cenários com cisternas e barraginhas os respectivos valores dos indicadores estão significativamente abaixo da faixa de valores reportados na literatura, confirmando seu desempenho limitado para atender às demandas de irrigação.

Na categoria ARM-CAP, os cenários envolvendo cisternas, barraginhas e barragens apresentaram melhor desempenho quando comparados ao cenário de referência, indicando maior disponibilidade hídrica para o preenchimento das estruturas e, conseqüentemente, menor pressão sobre os recursos hídricos. Os indicadores CSR e SSCR apresentaram valores mais elevados para os cenários com barragens e barraginhas, quando comparados aos valores observados no cenário com cisternas, refletindo diferenças no balanço entre área de captação e capacidade de armazenamento. Nesta categoria, o cenário com os tanques apresentou menor desempenho. Isso pode ser explicado pela espacialização adotada para essa tecnologia, na qual se considerou que apenas 40% da área da propriedade seria a área de captação.

Os valores do indicador MRRI sugerem que a fragmentação espacial é inversamente proporcional à capacidade de armazenamento individual. Os valores obtidos para a bacia do córrego Sossego foram significativamente inferiores aos relatados por Eriyagama et al. (2022), sugerindo uma alta distribuição espacial das configurações propostas para cada uma das tecnologias analisadas. Essa diferença pode ser atribuída à natureza das tecnologias analisadas: enquanto Eriyagama et al. (2022) tratam de grandes reservatórios, este estudo foca em estruturas de pequeno porte, cujo padrão de distribuição tende a ser mais fragmentado e disperso. Espera-se que futuras análises que considerem configurações integradas – combinando diferentes tecnologias – apresentem valores de MRRI mais próximos aos reportados na literatura.

Apesar da consistência interna dos resultados obtidos, a interpretação dos achados deve considerar limitações inerentes à aplicação do modelo. Essa aplicação baseia-se em simplificações estruturais e não representa explicitamente processos hidrológicos como evaporação e infiltração, o que deve ser considerado na interpretação comparativa dos resultados. Adicionalmente, a ausência de dados consolidados sobre cisternas e barraginhas limita a validação dos resultados obtidos. Embora os arranjos tecnológicos adotados neste estudo estejam alinhados com descrições disponíveis na literatura – como as dimensões das barraginhas, que variam entre 12 e 30 metros de diâmetro (Silva et al., 2021) ou 100 x 5 m (Niborski et al., 2023) –, essas tecnologias ainda carecem de parâmetros padronizados que possibilitem comparações robustas entre diferentes contextos. Apesar dessas lacunas, cisternas e barraginhas têm papel reconhecido na adaptação às mudanças climáticas em regiões semiáridas da América Latina, como o Nordeste brasileiro e o Gran Chaco Americano (Lindoso et al., 2018; Niborski et al., 2023; Calderon Archina et al., 2024). No entanto, poucos estudos avaliam seus impactos hidrológicos em nível de bacia. Essa limitação metodológica compromete o avanço de estratégias integradas de planejamento e dificulta o estabelecimento de valores de referência para o dimensionamento adequado dessas estruturas.

A partir desses achados, observa-se que tecnologias de pequeno porte, embora relevantes para a adaptação local, apresentam eficácia limitada quando implementadas de forma isolada, corroborando evidências de que a segurança hídrica depende de arranjos híbridos que combinem múltiplas soluções técnicas, escalas de gestão da água e instrumentos institucionais (Garrick et al., 2017; Pahl-Wostl, 2019). Estudos de gestão da água destacam que sistemas descentralizados só alcançam maior efetividade quando integrados a estratégias de planejamento em nível de bacia, mecanismos de coordenação interinstitucional e processos participativos de governança (Biswas, 2004; Molle, 2008; Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico, 2015). Assim, os resultados deste estudo reforçam que o planejamento de SAAIPE deve ser concebido como parte de uma estratégia mais ampla de gestão integrada de recursos hídricos, orientada por princípios de equidade, eficiência, sustentabilidade e resiliência frente às mudanças climáticas.

As abordagens de planejamento (individual, mista e coletiva) utilizadas neste estudo evidenciam dinâmicas socio-hidrológicas específicas, nas quais a configuração do sistema depende da distribuição das tecnologias ao longo da bacia e da escala de gestão envolvida. Tecnologias individuais – como cisternas, tanques e barraginhas – exigem manutenção domiciliar ou comunitária descentralizada, enquanto estruturas de uso coletivo, como barragens, demandam mecanismos institucionais de governança local para sua manutenção e operação. Nesse contexto, reforça-se a importância de estratégias participativas que envolvam os atores locais no codesenho das tecnologias, na coprodução de conhecimento e na coleta de dados para apoiar estratégias de adaptação relevantes ao contexto e fortalecer a segurança hídrica de longo prazo (Lalonde et al., 2024). A aplicação desse modelo pode ser útil para encaminhar as discussões das comunidades envolvidas em um primeiro momento.

A aplicação do modelo também evidencia seu potencial para organizar, comparar e avaliar diferentes tecnologias a partir de variáveis padronizadas. Essa estruturação facilita o reconhecimento de padrões entre tecnologias de distintas escalas e finalidades, servindo como base para estratégias de replicação territorial. Ainda assim, o desempenho das tecnologias está diretamente condicionado às características locais e ao arranjo espacial adotado, o que reforça a necessidade de se compreender melhor a dinâmica interanual do SAAIPE, o impacto cumulativo de múltiplas estruturas distribuídas na bacia e a integração com outras soluções hídricas — como tecnologias subterrâneas e Soluções Baseadas na Natureza (Rabelo et al., 2021; Lalonde et al., 2024).

5 CONCLUSÕES

Neste estudo aplicou-se o modelo para a avaliação de SAAIPEs, desenvolvido na Parte 1 deste trabalho, avaliando seu desempenho por meio de um estudo de caso representativo de sistemas de irrigação de pequena escala e discutindo seu potencial para caracterização, avaliação e planejamento regional desses sistemas, especialmente no que se refere à definição de sua configuração. De modo geral, a aplicação demonstrou que o modelo permite gerar diagnósticos objetivos do desempenho desses sistemas, mesmo em contextos de dados limitados – condição recorrente em áreas rurais e em sistemas de irrigação de pequena escala – evidenciando seu potencial como ferramenta de apoio ao planejamento regional ao orientar estratégias de implantação, escalonamento e configuração espacial mais apropriadas de SAAIPEs.

No cenário de referência, a aplicação do modelo evidenciou sua capacidade de identificar vulnerabilidades do sistema, ao capturar o déficit hídrico estrutural da bacia de experimentação e subsidiar a comparação de cenários de planejamento. Por outro lado, no cenário envolvendo diferentes tecnologias, o modelo permitiu distinguir o desempenho relativo entre tanques, cisternas, barraginhas e barragens, evidenciando suas limitações e vantagens sob distintas abordagens de planejamento (individual, mista ou coletiva). Além disso, a análise mostrou como a distribuição espacial das tecnologias e a magnitude de sua capacidade de armazenamento influenciam o balanço hídrico local, fornecendo informações de grande relevância à tomada de decisão no contexto do planejamento regional.

Conclui-se que, ao organizar as relações entre componentes CAP, ARM e IRR e traduzi-las em indicadores operacionais, integrando componentes e categorias que tradicionalmente são analisadas de forma fragmentada, o modelo representa um avanço metodológico em suporte a diagnósticos iniciais e a comparações sistemáticas de cenários. Ressalta-se que sua aplicabilidade não depende da bacia analisada, sendo transferível para outros contextos territoriais semelhantes, reforçando que a bacia do Córrego Sossego/ES foi utilizada exclusivamente como estudo de caso representativo para demonstrar sua aplicabilidade e utilidade no planejamento regional.

6 AGRADECIMENTOS

Expressamos nosso agradecimento à CAPES pela bolsa de doutorado concedida à Valeria Albán Domínguez. Agradecemos também ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PPGEA) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), ao Laboratório de Gestão de Recursos Hídricos e Desenvolvimento Regional (LabGest/UFES) e ao Núcleo Estratégico de Água e Desenvolvimento (NEADES) do Centro de Pesquisa, Inovação e Desenvolvimento do Espírito Santo (CPID), vinculado à Secretaria da Ciência, Tecnologia, Inovação e Educação Profissional (SECTI) do ES, pelo apoio técnico e operacional.

7 REFERÊNCIAS

- Alam, M. F., McClain, M. E., Sikka, A., Daniel, D., & Pande, S. (2022). Benefits, equity, and sustainability of community rainwater harvesting structures: an assessment based on farm scale social survey. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 1043896. <http://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1043896>
- Albán Domínguez, V. (2018) *Dimensionamento da capacidade de reserva hídrica de macro sistemas de captação de água de chuva para pequenos sistemas de irrigação em pequenas bacias hidrográficas* (Dissertação de mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória. Recuperado em 8 de dezembro de 2025, de <https://ambiental.ufes.br/pt-br/pos-graduacao/PPGEA/disserta%C3%A7%C3%B5es-defendidas>.
- Adham, A., Riksen, M., Ouessar, M., & Ritsema, C. J. (2016). A methodology to assess and evaluate rainwater harvesting techniques in (semi-) arid regions. *Water (Basel)*, 8(5), 198. <https://doi.org/10.3390/w8050198>
- Batista, N. L. F. (2016) *Utilização de indicadores de erosão hídrica e qualidade de solos na promoção da produção agrícola sustentável em pequena/microbacia hidrográfica* (Dissertação de mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitoria.
- Biswas, A. K. (2004). Integrated water resources management: a reassessment. *Water International*, 29(2), 248-256. <http://doi.org/10.1080/02508060408691775>

- Bojer, A. K., Bekalo, D. J., Debelee, T. G., Nadarajah, S., & Al-Quraishi, A. M. F. (2024). Rainwater harvesting site selection for drought-prone areas in Somali and Borena zones, Oromia Regional State, Ethiopia: a geospatial and multi-criteria decision analysis. *Water*, 16(13), 1789. <http://doi.org/10.3390/w16131789>
- Brasil, P., & Medeiros, P. (2020). NeStRes – Model for Operation of Non-Strategic Reservoirs for Irrigation in Drylands: model description and application to a semiarid basin. *Water Resources Management*, 34(1), 195-210. <https://doi.org/10.1007/s11269-019-02438-x>
- Búrquez, A., Ochoa, M. B., Martínez-Yrizar, A., & de Souza, J. O. P. (2024). Human-made small reservoirs alter dryland hydrological connectivity. *The Science of the Total Environment*, 947, 174673. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174673>
- Calderon Archina, A. A., Escolar, D., Heider, G., Niborski, M. J., Jobbágy, E. G., & Magliano, P. N. (2024). Rainwater harvesting technologies in arid plains of Argentina: small local strategies vs. large centralized projects. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1-9. <http://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1486798>
- Campisano, A., & Modica, C. (2012). Regional scale analysis for the design of storage tanks for domestic rainwater harvesting systems. *Water Science and Technology*, 66(1), 1-8. <http://doi.org/10.2166/wst.2012.171>
- Daré, J. C. (2013). *Sistemas de irrigação na Bacia do Córrego Sossego em Itarana* (Dissertação de mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. Recuperado em 8 de dezembro de 2025, de <https://biblioteca.incaper.es.gov.br/digital/bitstream/item/2669/1/BRT-caracterizacao-dademandadeaguaemsistemasdeirrigacaonabaciadocorregodosossego-darfe.pdf>
- Devineni, N., Perveen, S., & Lall, U. (2013). Assessing chronic and climate-induced water risk through spatially distributed cumulative deficit measures: a new picture of water sustainability in India. *Water Resources Research*, 49(4), 2135-2145. <http://doi.org/10.1002/wrcr.20184>
- Di Francesco, S., Casadei, S., Di Mella, I., & Giannone, F. (2022). The role of small reservoirs in a water scarcity scenario: a computational approach. *Water Resources Management*, 36(3), 875-889. <http://doi.org/10.1007/s11269-021-03052-6>
- Embrapa. (2009). *Barraginhas: água de chuva para todos*. Brasília: Embrapa. Recuperado em 8 de dezembro de 2025, de <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/256599/1/ABCBarraginhasaguadechuvaparatosed012009.pdf>
- Ekka, A., Jiang, Y., Pande, S., & van der Zaag, P. (2024). How economically and environmentally viable are multiple dams in the upper Cauvery Basin, India? A hydro-economic analysis using a landscape-based hydrological model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28(14), 3219-3241. <http://doi.org/10.5194/hess-28-3219-2024>
- Eriyagama, N., Smakhtin, V., & Udamulla, L. (2020). Reviews How much artificial surface storage is acceptable in a river basin and where should it be located: a review. *Earth-Science Reviews*, 208, 103294. <http://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103294>
- Eriyagama, N., Smakhtin, V., & Udamulla, L. (2021). Sustainable surface water storage development pathways and acceptable limits for river basins. *Water*, 13(5), 645. <http://doi.org/10.3390/w13050645>
- Eriyagama, N., Smakhtin, V., & Udamulla, L. (2022). Sustainable surface water storage development: measuring economic benefits and ecological and social impacts of reservoir system configurations. *Water*, 14(3), 307. <http://doi.org/10.3390/w14030307>
- Garrick, D., Hall, J. W., Dobson, A., Damania, R., Grafton, R. Q., Hope, R., Hepburn, C., Bark, R., Boltz, F., De Stefano, L., O'Donnell, E., Matthews, N., & Money, A. (2017). Valuing water for sustainable development. *Science*, 358(6366), 1003-1005. <http://doi.org/10.1126/science.aao4942>
- Grey, D., & Sadoff, C. (2007). Sink or swim? Water security for growth and development. *Water Policy*, 9(6), 545-571. <http://doi.org/10.2166/wp.2007.021>
- Habets, F., Philippe, E., Martin, E., David, C. H., & Leseur, F. (2014). Small farm dams: impact on river flows and sustainability in a context of climate change. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(10), 4207-4222. <http://doi.org/10.5194/hess-18-4207-2014>
- Hansani, K. U. D. N., Schuster, L., Macreadie, P. I., & Malerba, M. E. (2025). Nature positive farm dams. *Agricultural Water Management*, 316, 109580. <http://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.109580>
- Lalonde, M., Drenkhan, F., Rau, P., Baiker, J. R., & Buytaert, W. (2024). Scientific evidence of the hydrological impacts of nature-based solutions at the catchment scale. *WIREs. Water*, 11(5), e1744. <http://doi.org/10.1002/wat2.1744>
- Lindoso, D. P., Eiro, F., Bursztyn, M., Rodrigues-Filho, S., & Nasuti, S. (2018). Harvesting water for living with drought: insights from the Brazilian Human Coexistence with Semi-Aridity approach towards achieving the sustainable development goals. *Sustainability*, 10(3), 622. <http://doi.org/10.3390/su10030622>
- Lima, G. B. (2013). *Avaliação de métodos de manejo da irrigação em pequenas propriedades rurais de base familiar* (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico, Vitória. Recuperado em 8 de dezembro de 2025, de <https://repositorio.ufes.br/handle/10/6142>
- Mahmoodi, N., Wagner, P. D., Lei, C., Narasimhan, B., & Fohrer, N. (2024). Enhancing hydrologic modelling through the representation of traditional rainwater harvesting systems: a case study of water tanks in South India. *Hydrological Processes*, 38(2), e15088. <http://doi.org/10.1002/hyp.15088>
- Malveira, V. T. C., Araújo, J. C., & Güntner, A. (2012). Hydrological impact of a high-density reservoir network in Semiarid Northeastern Brazil. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(1), 109-117. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000404](http://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000404)
- Marín-Comitre, U. C., Schnabel, S., & Pulido, M. F. (2020). Hydrological characterization of watering ponds in rangeland farms in the Southwest Iberian Peninsula. *Water*, 12(4), 1038. <http://doi.org/10.3390/w12041038>

- Molle, F. (2008). Nirvana concepts, narratives and policy models: insights from the water sector. *Water Alternatives*, 1(1), 131-156. Recuperado em 5 de fevereiro de 2026, de <https://dlc.dlib.indiana.edu/dlcrest/api/core/bitstreams/fa763ec6-98de-460c-a081-01c245e0fe5e/content>
- Niborski, M. J., Martin, O. A., Murray, F., Jobbágy, E. G., Nosetto, M. D., Paez, R. A., & Magliano, P. N. (2023). Modeling rainwater harvesting and storage dynamics of rural impoundments in Dry Chaco Rangelands. *Water*, 15(13), 2353. <http://doi.org/10.3390/w15132353>
- Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico – OECD. (2015). *OECD principles on water governance*. Paris: OECD Publishing. Recuperado em 5 de fevereiro de 2026, de <https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/topics/policy-sub-issues/water-governance/oecd-principles-on-water-governance-en.pdf>
- Owusu, S., Cofie, O., Mul, M., & Barron, J. (2022). The significance of small reservoirs in sustaining agricultural landscapes in dry areas of West Africa: a review. *Water*, 14(9), 1440. <http://doi.org/10.3390/w14091440>
- Pahl-Wostl, C. (2019). Governance of the water–energy–food security nexus: a multi-level coordination challenge. *Environmental Science & Policy*, 92, 356-367. <http://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.07.017>
- Pahl-Wostl, C. (2020). Adaptive and sustainable water management: from improved conceptual foundations to transformative change. *International Journal of Water Resources Development*, 36(2-3), 397-415. <http://doi.org/10.1080/07900627.2020.1721268>
- Peña-Arancibia, J. L., Malerba, M. E., Wright, N., & Robertson, D. E. (2023). Characterising the regional growth of on-farm storages and their implications for water resources under a changing climate. *Journal of Hydrology*, 625, 130097. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130097>
- Poloni, D.M. (2010). *Desenvolvimento e aplicação de procedimento metodológico em suporte ao planejamento participativo para a redução de perda de solo em pequenas bacias hidrográficas com emprego da EUPS* (Dissertação de mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.
- Rabelo, U. P., Dietrich, J., Costa, A. C., Simshäuser, M. N., Scholz, F. E., Nguyen, V. T., & Lima Neto, I. E. (2021). Representing Impact dense network of ponds and reservoirs in a semi-distributed dryland catchment model. *Journal of Hydrology*, 603, 127103. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127103>
- Lima, T. B. R., Medeiros, P. H. A., Leite, G., & Araújo, J. C. (2023). Impact of intensive water use from farm dams on the storage dynamics in strategic reservoirs. *Hydrological Sciences Journal*, 68(16), 2422-2434. <http://doi.org/10.1080/02626667.2023.2272669>
- Shadeed, S., Judeh, T., & Riksen, M. (2020). Rainwater harvesting for sustainable agriculture in high water - poor areas in the West Bank, Palestine. *Water*, 12(2), 380. <http://doi.org/10.3390/w12020380>
- Shinde, M., Gorantiwar, S., & Smout, I. (2004). Design and performance indicators for water harvesting irrigation tanks in India. In *30th WEDC International Conference* (pp. 398–404). Vientiane: WEDC.
- Singh, R., Oguge, N., & Odote, C. (2024). Scaling rainwater harvesting for irrigation in Kenya: potential sustainability risks and the need for adaptive governance. *Environmental Research: Food Systems*, 2(1), 015004. <http://doi.org/10.1088/2976-601X/ad93db>
- Silva, T. A., Ferreira, J., Calijuri, M. L., Santos, V. J., Alves, S. C., & Castro, J. S. (2021). Efficiency of technologies to live with drought in agricultural development in Brazil's semi-arid regions. *Journal of Arid Environments*, 192, 104538. <http://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104538>
- Srivastava, R. C. (2001). Methodology for design of water harvesting system for high rainfall areas. *Agricultural Water Management*, 47(1), 37-53. [http://doi.org/10.1016/S0378-3774\(00\)00095-0](http://doi.org/10.1016/S0378-3774(00)00095-0)
- Stephens, T. (2010). *Manual on small earth dams: a guide to siting, design and construction* (124 p.). Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Recuperado em 8 de dezembro de 2025, de <https://www.fao.org/4/i1531e/i1531e.pdf>
- Van der Zaag, P., & Gupta, J. (2008). Scale issues in the governance of water storage projects. *Water Resources Research*, 44(10), 104417. <http://doi.org/10.1029/2007WR006364>
- Van-Wambeke, J., Prieto-Celi, M., & Vieyra, M. J. (2013). Captación y almacenamiento de agua de lluvia. Santiago: FAO. Recuperado em 8 de dezembro de 2025, de <https://www.fao.org/4/i3247s/i3247s.pdf>
- Wiatkowski, M., Wiatkowska, B., Łukasz, G., Rosik-Dulewska, C., Tomczyk, P., & Chłopek, D. (2021). Assessment of the possibility of implementing small retention reservoirs in terms of the need to increase water resources. *Archives of Environmental Protection*, <http://doi.org/10.24425/aep.2021.136451>

APÊNDICE A: PROCEDIMENTO METODOLÓGICO PARA DETERMINAR A CAPACIDADE DE RESERVAÇÃO HÍDRICA DE REGIÕES

Neste apêndice descreve-se o procedimento metodológico empregado para determinar a capacidade hídrica de reservação, mostrando métodos e passos sequenciais para a obtenção das séries de disponibilidade e demanda hídrica mensal, propostos em Albán Domínguez (2018).

Na Figura A1 é apresentado o fluxograma do procedimento metodológico para determinar a capacidade de reservação hídrica. No fluxograma descreve-se que primeiramente devem ser adquiridas informações sobre características hidro-agroclimáticas; na sequência, são determinadas as séries mensais de disponibilidade e demanda hídricas; e por último, se aplica o método de Rippl para determinar o volume de regularização (VR) e se determinam indicadores para avaliar a capacidade de reservação da região. Neste artigo, assumiu-se que a variável SC do modelo analítico é equivalente ao VR. Nas Figuras A2 e A3 são apresentados os passos metodológicos para determinar a demanda e disponibilidade hídrica, respectivamente.

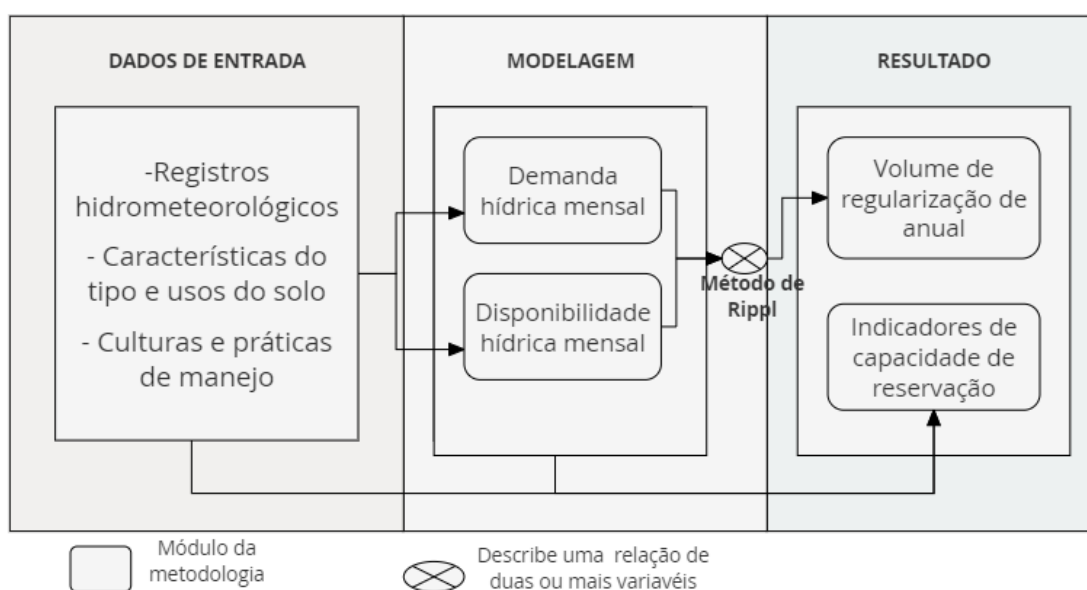


Figura A1. Procedimento proposto para subsidiar o dimensionamento da capacidade de armazenamento de SAAIPES.
Fonte: Albán Domínguez (2018)

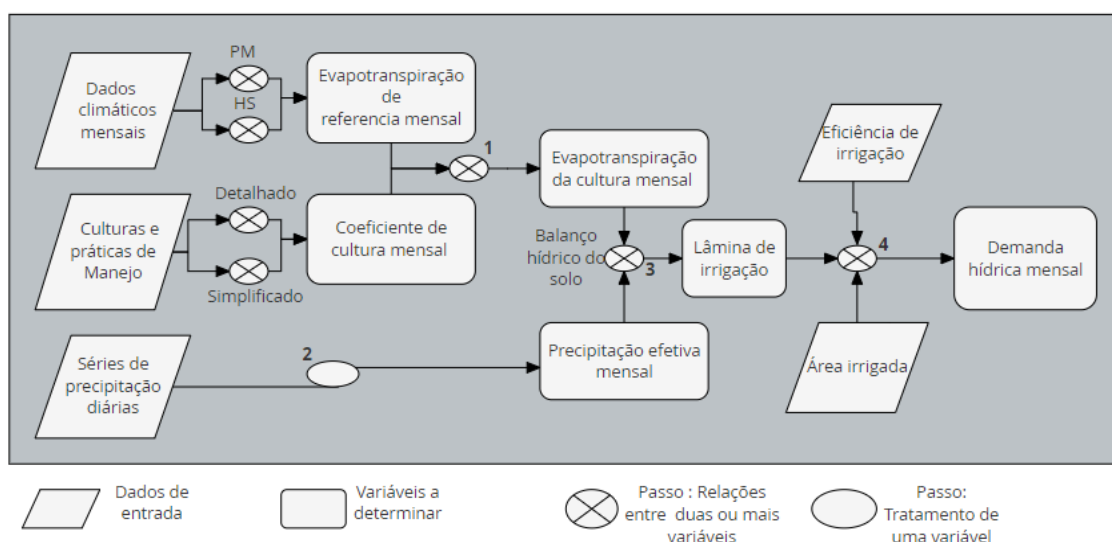


Figura A2. Fluxograma para determinar a demanda hídrica de irrigação de SAAIPES
Fonte: Albán Domínguez (2018)

O fluxograma da Figura A2 apresenta os passos para determinar a demanda hídrica de irrigação, e contempla como alternativa utilizar o método da FAO. Os passos representados no fluxograma são descritos na sequência:

- Passo 1: Determinar a Evapotranspiração mensal da cultura (ET_c) – Para isso, considera-se o método do coeficiente de cultivo que permite estimar a evapotranspiração do cultivo (ET_c) como sendo o produto entre a evapotranspiração de referência (ET_0) e o coeficiente de cultura (k_c). Na proposta metodológica são realizadas sugestões de como determinar ET_0 (pelo método de Penman Monheit-PM ou Hargreaves Samani -HS) e k_c (pelo método simplificado e detalhado).

$$ET_c = k_c \cdot ET_0$$

- Passo 2: Determinação de precipitação efetiva (P_{ef}) mensal - Para isso, a metodologia considera o conceito de precipitação provável mensal utilizado pela Agência Nacional das Águas (2014), que considera uma precipitação específica de ocorrência com base em séries históricas e a parte da precipitação que fica disponível para os cultivos.

$$P_{ef} = \begin{cases} P(80) \cdot \frac{(125 - 0,2 \cdot P(80))}{125}; & P(80) < 250 \\ 125 + 0,1 \cdot P(80); & P(80) > 250 \end{cases}$$

Onde $P(80)$ é a precipitação com um nível de garantia de ser igualada ou superada em 80%.

- Passo 3: Determinação da lâmina de irrigação das culturas (ID) – Para isso o método propõe utilizar o balanço hídrico mensal do solo a fim de determinar o volume e a frequência de irrigação para compensar o déficit hídrico do solo no período vegetativo.

$$ID = \frac{ET_c - P_{eff}}{\text{Eficiência de irrigação}}$$

- Passo 4: A partir da lâmina de irrigação e da área irrigada (A_{IPP}) se obtêm o volume de água demandado mensal para irrigação (WD_{mensal}).

$$WD_{\text{mensal}} = ID \cdot A_{IPP}$$

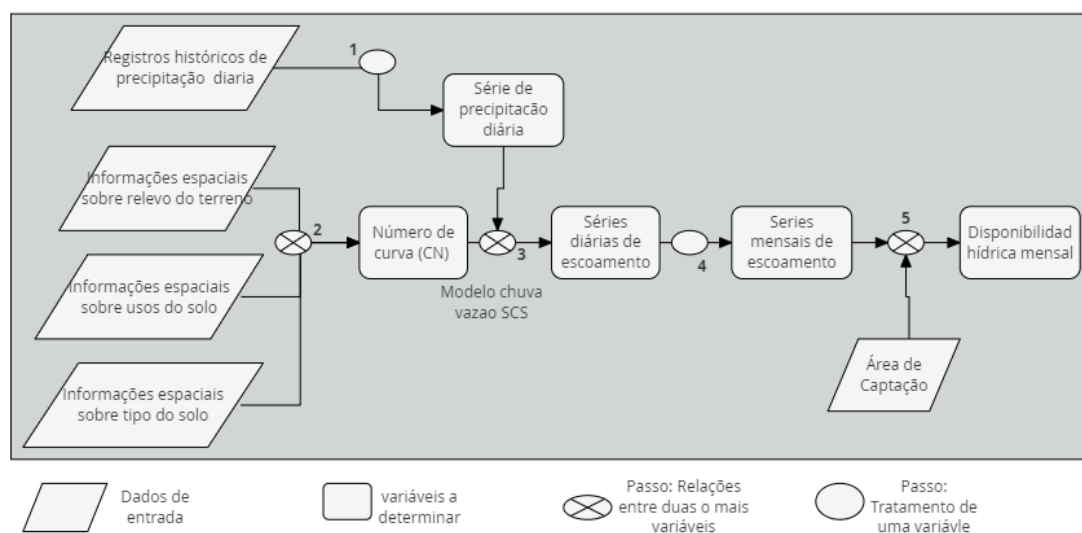


Figura A3. Fluxograma para determinar a disponibilidade hídrica

Fonte: Albán Domínguez (2018)

O fluxograma apresentado na Figura A3 apresenta os passos para determinar a disponibilidade hídrica por meio do método do número de curva (CN) do Soil Conservation Service (SCS). Os passos representados no fluxograma são descritos na sequência.

- Passo 1: Selecionar a série de precipitação de intervalo diário.
- Passo 2: Determinar o CN considerando a classificação de grupos hidrológicos do solo (GHS) regionais, os usos do solo, a umidade antecedente e a declividade do terreno.

• Passo 3: Aplica-se o modelo chuva-vazão CN-SCS, que calcula a capacidade máxima de armazenamento de água no solo S [mm] e o potencial de chuva excedente que, efetivamente, contribui para o escoamento superficial direto, Q [mm], em função de CN e da lâmina de precipitação de um evento P [mm].

$$Q_{\text{diario}} = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S}, \text{ onde } S = \frac{25400}{\text{CN}} - 254$$

• Passo 4: Agregação da série diária de escoamento superficial no intervalo de tempo mensal Q_{mensal} .
• Passo 5: A disponibilidade hídrica mensal para armazenamento (WS_{mensal}) é equivalente ao produto entre o Q_{mensal} e a Área de captação (A_{cap}).

$$WS_{\text{mensal}} = A_{\text{cap}} \cdot Q_{\text{mensal}}$$

O volume de regularização (VR) é aquele programado para ser retirado anualmente do sistema de reservação, sempre que houver disponibilidade. Para determinar o valor podem ser empregados métodos de balanço hídrico entre a disponibilidade e a demanda hídrica. A metodologia propõe utilizar o método de Rippl, que entende VR como o máximo déficit acumulado para o período simulado, representado na seguinte expressão:

$$VR = \sum(WD_i - WS_i)$$

Onde “i” corresponde ao número de meses simulados e pode assumir valores de 1 até o período de planejamento.

REFERÊNCIAS

- Albán Domínguez, V. D. (2018). *Dimensionamento da capacidade de reservação hídrica de macro sistemas de captação de água de chuva para pequenos sistemas de irrigação em pequenas bacias hidrográficas* (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.
- Agência Nacional das Águas – ANA. (2014). *Manual de procedimentos técnicos e administrativos de outorga de direito de uso de recursos hídricos da agência nacional de águas*. Brasília: ANA.

APÊNDICE B: BASES DE DADOS E TRATAMENTO DAS INFORMAÇÕES NA BACIA DO CÓRREGO SOSSEGO

Neste apêndice descrevem-se a base de dados utilizada e o tratamento das informações para aplicação do procedimento metodológico descrito no Apêndice A na bacia do Córrego Sossego.

BASE DE DADOS

Foi utilizada uma série de dados de precipitação diária consistidos da estação de Itarana (código: 1940000), localizada na longitude 40.87°S e latitude 19.87°W, disponíveis na base de dados da Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico (ANA), através do portal hidroweb (hidroweb.ana.gov.br/), de período de 1975 a 2005. Os dados de temperatura mensal (média, mínima e máxima) e de precipitações médias mensais foram obtidos da estação de Itarana do Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural – Incaper.

Os dados pedológicos utilizados foram obtidos do trabalho de Poloni (2010), que usou informações do RADAMBRASIL e do Grupo de Estudos e Ações em Recursos Hídricos (2003) e de imagens de satélite Landsat de baixa resolução, para redefinir os limites espaciais das classes de solo diagnosticadas através de análises físico-químicas e de perfis de solo feitas por Grupo de Estudos e Ações em Recursos Hídricos (2003). Foi destacada a presença de argissolos e latossolos na bacia, que segundo a classificação Brasileira de solos (Sartori et al., 2005) se enquadram nos grupos hidrológicos de solos B e A, respectivamente.

As informações de uso e ocupação do solo foram extraídas do último mapeamento digital do estado do Espírito Santo e da campanha de campo realizada por Batista (2016). A partir do mapa, foram identificados 30 tipos de cultivos diferentes na bacia, sendo assinaladas, além das culturas individuais, as áreas para preparo e as áreas denominadas como mix (muitas culturas em pequenas áreas de irrigação).

O Modelo Digital de Terreno foi obtido do mapeamento digital realizado no estado do Espírito Santo realizado no ano de 2012, com resolução de 25m².

Foi utilizada uma eficiência do sistema de irrigação do 85% tomada do trabalho de Daré (2013), que fez o levantamento dos sistemas de irrigação da bacia do Córrego Sossego.

TRATAMENTO DAS INFORMAÇÕES

Detalham-se os passos para determinar as séries mensais de demanda hídrica para irrigação para um ano médio na bacia piloto:

- Passo 1: Para determinar a evapotranspiração da cultura (ET_{χ}) foi utilizado: 1) o método de Hargreaves Samani para determinar ET_0 com as médias mensais multianuais de precipitação e temperatura mínima, média e máxima do Incaper; e 2) o método detalhado para estimar o k_{χ} . Para usar o método detalhado foi necessário calcular um k_{χ} para cada uma das culturas representativas da bacia do Córrego Sossego. Para isso foram classificadas as culturas identificadas no mapa do uso de solo em culturas representativas (Cana de açúcar, Banana, Café, frutíferas, vegetais, tubérculos, cereais, mix e áreas de preparo). Cabe destacar que para determinar o k_{χ} mensal das categorias mix e das áreas de preparo foi assumido um valor médio mensal como sugerido no método simplificado. Para as demais culturas adotou-se um k_{χ} para cada fase de desenvolvimento utilizando os coeficientes e durações de culturas da base de dados da FAO. Utilizou-se o software Cropwat - considerando que a data de plantio foi no início do ano (1 de janeiro) para todas as culturas, e para as culturas temporais (vegetais, tubérculos e cereais) assumiu-se que o segundo ciclo se inicia no meio do ano (1 de julho). Com o auxílio do software determinou-se um k_{χ} para cada tipo de cultura para 10 dias, e posteriormente os valores de k_{χ} foram agregados para obter um valor mensal. Por fim, ponderou-se esse valor em função do % de ocupação de cada categoria na bacia do Córrego Sossego. Na Tabela B1 é apresentado o k_c escolhido para cada mês para cada cultura representativa.

- Passo 2: Com base nas séries diárias de precipitação estação de Itarana (código: 1940000), se determinou a precipitação efetiva mensal ($P_{\epsilon\phi\phi}$).

- Passo 3: Com as informações de ET_{χ} e $P_{\epsilon\phi\phi}$ mensal, determinou-se a lâmina de irrigação (ID) mensal, assumindo que o sistema de irrigação tem uma eficiência de 85%.

- Passo 4: Calculou-se a área de irrigação (A_{ipp}) como a somatória das áreas das culturas identificadas no mapa do uso de solo. O valor da A_{ipp} foi multiplicado por ID para obter as séries mensais do volume de água demandado (WD).

A seguir, detalham-se os passos para determinação das séries mensais de disponibilidade hídrica para um ano médio na bacia piloto:

- Passo 1. Utilizou-se a série histórica de precipitação diária da estação de Itarana para executar o modelo chuva-vazão.

• Passo 2. Para determinar CN foram classificados os solos da bacia (pelo tratamento do mapa de tipos de solos) em grupos hidrológicos de solos (GHS), segundo a classificação para solos brasileiros. Em seguida foram cruzadas as informações do mapa de usos de solos com a classificação dos GHS, para definir o número de curva em condições normais CN II (Natural Resources Conservation Service, 2004), o qual é então corrigido pelas condições de umidade antecedente do solo (AMC) – definidas com base na precipitação total ocorrida nos cinco dias antecedentes ao evento estudado para cada registro de precipitação - e pela declividade do terreno (incl) – estimada pelo tratamento do modelo digital de elevação do terreno (MDE) no software Arcgis 10.1. Essas relações estão expressas nas seguintes equações:

$$CN I = \frac{4,2 CN II}{10 - 0,058 CN II}; \quad CN III = \frac{23 CN II}{10 + 0,13 CN II}$$

Em que CN I, CN II e CN II, refere-se ao CN nas condições de umidade antecedente para condições de seca, normal e úmidas, respectivamente.

$$CN = \frac{CN III - CN II}{3} \cdot [1 - 2 \cdot \exp(-13,86 \cdot incl)] + CN II$$

• Passo 3. Foi aplicado o modelo chuva-vazão para gerar a série diária de escoamento superficial ao longo dos registros de precipitação que, posteriormente, foi agregada e transformada em série mensal multianual.

• Passo 4. A área de captação ($A_{X_{AII}}$) foi determinada como a diferença entre a área da bacia e A_{IPP} . O valor de $A_{X_{AII}}$ foi multiplicado pela série mensal multianual de escoamento para obter as séries mensais disponibilidade hídrica para armazenamento (WS).

Para determinar o volume de regularização, utilizou-se o método do Rippl, representado pelas equações abaixo:

$$V_t = WD_t - WS_t$$

$$V_R = \sum_1^{12} V_t \text{ para } V_t > 0$$

onde V_t [m^3] é o volume acumulado para reservação no tempo t , WD_t [m^3] é a demanda para irrigação no tempo t , WS_t [m^3] é a disponibilidade hídrica no tempo t [m^3], e t representa os meses do ano (de 1 a 12).

Tabela B1. Informações dos k_r mensais para as culturas representativas do Córrego Sossego, a partir das informações obtidas do mapa do uso do solo

Tipo	Cultura	% Área	Mês											
			Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Anuais	Cana de Açúcar	0,50%	0,4	0,63	1,01	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23
	Banana	17,40%	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
Perenes	Café	58,10%	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
	Frutíferas (70% cobertura vegetal)	8,40%	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
Temporária	Vegetais	2,70%	0,72	0,98	1,03	0,32	-	-	0,72	0,99	1,04	0,32	-	-
	Tubérculos (papa)	2,90%	0,51	0,94	1,13	1,04	0,26	-	0,51	0,96	1,16	1,04	0,26	-
	cereais (milho)	1,50%	0,35	0,95	1,18	0,88	0,14	-	0,35	0,97	1,21	0,99	0,12	-
Mix		6,10%	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Área de preparo		2,40%	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Fonte: Adaptado de Albán Domínguez (2018)

REFERÊNCIAS

- Albán Domínguez, V. (2018). *Dimensionamento da capacidade de reserva hídrica de macro sistemas de captação de água de chuva para pequenos sistemas de irrigação em pequenas bacias hidrográficas* (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.
- Batista, N. L. F. (2016) *Utilização de indicadores de erosão hídrica e qualidade de solos na promoção da produção agrícola sustentável em pequena/microbacia hidrográfica* (Dissertação de mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitoria.
- Daré, J. C. (2013). *Sistemas de irrigação na Bacia do Córrego Sossego em Itarana* (Dissertação de mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.
- Grupo de Estudos e Ações em Recursos Hídricos – GEARH-NES. (2003) *Desenvolvimento de instrumento para a gestão de recursos hídricos no Norte do Espírito Santo. Relatório Final – MCT/FINEP/CT-HIDRO, V.1*. Vitória: GEARH-DEA-CT-UFES.
- Natural Resources Conservation Service – NRCS. (2004). Hydrologic Soil-Cover Complexes. In: US Department of Agriculture (Ed.), *Part 630 Hydrology National Engineering Handbook*. Washington DC: USDA.
- Poloni, D.M. (2010). *Desenvolvimento e aplicação de procedimento metodológico em suporte ao planejamento participativo para a redução de perda de solo em pequenas bacias hidrográficas com emprego da EUPS* (Dissertação de mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.
- Sartori, A., Genovez, A. M., & Lombardi, N. F. (2005). Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método do serviço de conservação do solo dos estados unidos parte 2: aplicação. *RBRH*, 10(4), 19-29. <http://doi.org/10.21168/rbrh.v10n4.p19-29>

APÊNDICE C: RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO PARA DETERMINAR A CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO HÍDRICO NA BACIA DO CÓRREGO SOSSEGO

Neste apêndice são apresentados os resultados da aplicação do procedimento metodológico da bacia do Corrego Sossego, no que se refere à obtenção das séries de demanda e disponibilidade hídrica e à obtenção da capacidade hídrica de armazenamento de SAAIPEs.

Na Tabela C1 são apresentadas as séries mensais de variáveis necessárias para determinação da série de demanda hídrica de irrigação (WD). Os valores anuais de ID e WD anual foram de aproximadamente 664 mm e $8,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$, respectivamente, para uma área de irrigação (A_{IPP}) de 1231 ha.

Tabela C1. Séries mensais de variáveis resultantes para determinar a demanda hídrica de irrigação de SAAIPEs.

Variável	Mês											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
k_z	0,96	0,99	1,00	0,98	0,93	0,92	0,96	0,99	1,00	0,98	0,93	0,92
ET_0	139,4	141,2	126,5	105,1	86,4	76,4	79,3	93,0	108,1	123,7	127,4	131,6
Et_z	133,6	139,5	126,6	102,5	80,6	70,6	76,4	92,3	108,4	120,8	118,9	121,5
$P_{\phi\phi}$	112,8	72,2	85,2	50,2	26,8	16,4	12,3	17,7	25,7	67,5	119,1	132,5
ID	24,5	79,3	48,7	61,6	63,3	63,7	75,4	87,7	97,4	62,8	0,0	0,0
WD	0,30	0,98	0,60	0,76	0,78	0,78	0,93	1,08	1,20	0,77	0,00	0,00

Fonte: Adaptado de Albán Domínguez (2018)

Os resultados dos parâmetros envolvidos na determinação da disponibilidade hídrica são: 6.219 e 4.988 ha para a área da bacia (A_{TOT}) e a área de captação (A_{XAPI}), respectivamente; 16,34% para declividade média da bacia (incl); 66,8 e 70,9 para o número de curva (CN) para condições normais e ajustadas pela declividade do terreno, respectivamente.

Na Figura C1 são representadas as séries dos registros de precipitação e escoamento resultante do modelo chuva-vazão para o período de 1975 a 2005. A bacia mostrou uma precipitação média anual de 1158 mm e uma vazão médio anual de 108 mm. Este foi o resultado empregado neste artigo, tanto para o cenário de referência da bacia como para o cenário com as tecnologias tanques, barragens e barraginhas. O escoamento superficial associado à tecnologia do tipo cisternas é apresentado no Apêndice D.

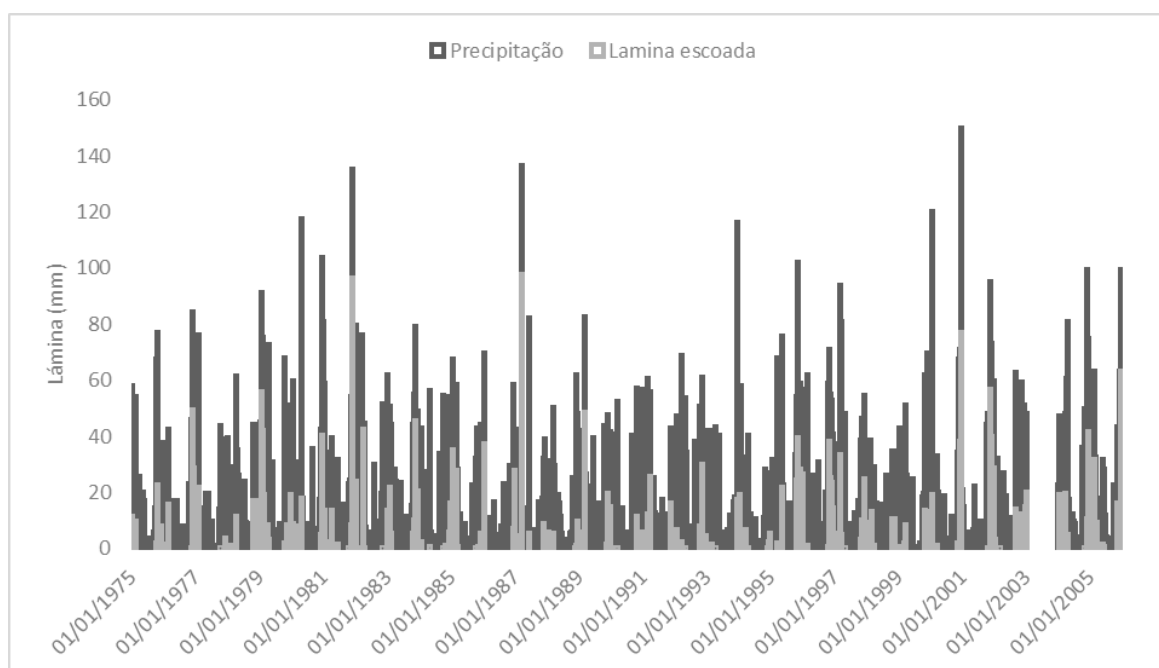


Figura C1. Resultados do modelo chuva-vazão para a bacia do Córrego Sossego

Fonte: Albán Domínguez (2018)

Na Tabela C2 são apresentadas as séries mensais de Q e WD.

Tabela C2. Séries de variáveis de escoamento e volume disponível de armazenamento mensal, Q em [mm] e WD em [10^6m^3] para a bacia do Córrego Sossego

Variável	Mês											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Q	20,88	8,86	12,79	2,07	0,71	0,17	0,00	0,00	0,46	3,11	28,09	31,37
WD	1,04	0,44	0,64	0,10	0,04	0,01	0,00	0,00	0,02	0,15	1,40	1,56

Fonte: Adaptado de Albán (2018)

REFERÊNCIAS

Albán Domínguez (2018). *Dimensionamento da capacidade de reserva hídrica de macro sistemas de captação de água de chuva para pequenos sistemas de irrigação em pequenas bacias hidrográficas* (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

APÊNDICE D: DETERMINAÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL PARA AS CISTERNAS

Neste apêndice descreve-se o procedimento adotado para estimar o escoamento superficial associado à tecnologia de armazenamento do tipo cisternas, caracterizadas por utilizar o teto de casas ou superfícies impermeáveis como área de captação (A_{CAP}) impermeável. Para isso, determinou-se o escoamento superficial como uma adaptação do método racional, amplamente recomendado para a estimativa de escoamento em pequenas áreas impermeáveis.

O cálculo do escoamento superficial (Q) foi realizado a partir do produto entre a precipitação diária observada (P) e um coeficiente de escoamento (C), representado pelas seguintes expressões:

$$Q = C \cdot P$$

$$WS = Q \cdot A_{CAP}$$

Além disso, assumiu-se C igual a 0,9 e A_{CAP} igual a 200 m², adotados como valores representativos para cisternas. Com as séries de precipitação diárias obtidas da ANA (ver Apêndice B), obtiveram-se as séries de Q para o período de 1975 a 2005. Posteriormente foram determinados os valores médios mensais multianuais conforme estabelecido no procedimento metodológico (ver Apêndice A). Os resultados podem ser visualizados na Tabela D1.

Tabela D1. Séries de variáveis de escoamento e volume disponível de armazenamento mensal, Q em [mm] e WD em [10⁶m³]

Variável	Mês											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Q	148,7	79,8	99,6	54,6	28,0	16,1	13,0	19,2	28,1	85,3	166,1	187,0
WS	29,7	16	19,9	10,9	5,6	3,2	2,6	3,8	5,7	17,1	33,2	37,4

Fonte: os autores.

Contribuições dos autores:

Valeria Albán Domínguez: conceituação, escrita - rascunho original, metodologia, investigação, análise formal.

Bruno Peterle Vaneli: conceituação, metodologia, escrita - revisão e edição, supervisão.

Edmilson Costa Teixeira: conceituação, metodologia, escrita - revisão e edição, supervisão.