Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL – MESTRADO -

FERRAMENTA PARA DIMENSIONAMENTO DE RESERVATÓRIO PARA APROVEITAMENTO DE ÁGUA DE CHUVA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO POR MEIO DO COEFICIENTE DE TRANSBORDAMENTO VOLUMÉTRICO

Por

Alvan Antas Cordeiro

Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba para obtenção do grau de Mestre

João Pessoa – Paraíba **09 de Dezembro de 2025**

Universidade Federal da Paraíba

Centro de Tecnologia

PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL – MESTRADO -

FERRAMENTA PARA DIMENSIONAMENTO DE RESERVATÓRIO PARA APROVEITAMENTO DE ÁGUA DE CHUVA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO POR MEIO DO COEFICIENTE DE TRANSBORDAMENTO VOLUMÉTRICO

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre

Alvan Antas Cordeiro

Orientador: Prof. Dr. Gilson Barbosa Athayde Júnior

João Pessoa – Paraíba **09 de Dezembro de 2025**

Catalogação na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

C794f Cordeiro, Alvan Antas.
Ferramenta para dimensionamento de reservatório para aproveitamento de água de chuva no Semiárido brasileiro por meio do coeficiente de transbordamento volumétrico / Alvan Antas Cordeiro. - João Pessoa, 2025.
128 f.

Orientação: Gilson Barbosa Athayde Júnior.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Reservatório de água. 2. Água de chuva. 3. Semiárido brasileiro. 4. Coeficiente de transbordamento volumétrico (CTV). I. Athayde Júnior, Gilson Barbosa. II. Título.

UFPB/BC CDU 628.13(043)

Elaborado por KAROLLYNE FERREIRA DANTAS - CRB-4/2319

PPGECAM
Programa de Pós-Graduação
Engenharia Civil e Ambiental
UFPB Universidade Federal da Paraíba

Mestrado e Doutorado

FERRAMENTA PARA DIMENSIONAMENTO DE RESERVATÓRIO PARA APROVEITAMENTO DE ÁGUA DE CHUVA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO POR MEIO DO COEFICIENTE DE TRANSBORDAMENTO VOLUMÉTRICO

ALVAN ANTAS CORDEIRO

Dissertação aprovada em 09 de dezembro de 2025

Período Letivo: 2025.2

gov.br
Documento assinado digitalmente
GILSON BARBOSA ATHAYDE JUNIOR
Data: 16/12/2025 08:04:55-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof(a). Dr(a). Gilson Barbosa Athayde Junior – UFPB
Orientador(a)

gov.br
Documento assinado digitalmente
DAVI DE CARVALHO DINIZ MELO
Data: 16/12/2025 20:30:46-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof(a). Dr(a). Davi de Carvalho Diniz Melo – UFPB
Examinador(a) Interno(a)

gov.br
Documento assinado digitalmente
MARCIO RICARDO SALLA
Data: 17/12/2025 07:36:46-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof(a). Dr(a). Marcio Ricardo Salla – UFU
Examinador(a) Externo(a)

João Pessoa/PB
2025

Dedico a todos que tornaram isso possível.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe, Luciene, que, mesmo não estando mais presente, foi quem moldou a melhor parte de quem sou e continua a ser a minha base, sendo a força que me permitiu chegar até aqui. Aos meus irmãos, Adônis e Aran, e especialmente à minha irmã, Aline, pelo imenso apoio, inclusive técnico, auxiliando-me em diversas etapas deste trabalho.

Ao meu orientador, Professor Dr. Gilson Barbosa Athayde Jr., cujo conhecimento e habilidade em orientar tornaram este trabalho passível de ser feito e muito menos árduo. Sou grato também a Cinthya Santos da Silva, cujo trabalho serviu como base fundamental para o meu e que me auxiliou enormemente no início desta jornada.

Aos professores Dr. Cristiano das Neves Almeida e Dr. Márcio Ricardo Salla, cujas orientações e questionamentos durante a qualificação foram decisivos para o aprimoramento deste trabalho.

Aos meus amigos Miguel, Thales e Lairton; ao meu namorado, Rodrigo; e às minhas primas, Tamara e Uane, que me acompanharam ao longo deste processo, oferecendo apoio, conversas e conselhos que tornaram tudo mais leve.

Por fim, agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para esta conquista. Mesmo não sendo nomeados individualmente, cada um foi parte fundamental desta trajetória, sem a qual eu não teria conseguido.

RESUMO

A escassez hídrica no Semiárido brasileiro é um desafio histórico e estrutural, agravado pelas mudanças climáticas e pela distribuição irregular de chuvas. Neste contexto, os Sistemas de Captação e Aproveitamento de Água de Chuva (SCAAC) surgem como uma solução vital para o abastecimento, especialmente em comunidades rurais. A eficiência desses sistemas está diretamente ligada ao dimensionamento correto do reservatório, seu componente de maior custo. Este estudo propõe o desenvolvimento e a aplicação de uma ferramenta para o dimensionamento de reservatórios de água de chuva no Semiárido brasileiro, utilizando o Coeficiente de Transbordamento Volumétrico (CTV), definido como a razão entre o volume anual extravasado e a capacidade do reservatório. O objetivo foi criar um método que, ao minimizar o CTV, indicasse o volume "ótimo" do reservatório e minimizasse as perdas por transbordamento. A metodologia baseou-se na simulação do balanço hídrico diário para uma série histórica de 30 anos (1993-2022), abrangendo toda a região semiárida. Foram analisados mapas de valores de CTV gerados a partir de 40 cenários que combinaram diferentes áreas de captação (50 a 200 m²), demandas hídricas (doméstica e de irrigação) e volumes de reservatórios (2 a 50 m³). Os resultados demonstraram que a área de captação é o fator preponderante para a eficiência do sistema, com áreas maiores resultando em CTVs mais elevados para um mesmo volume de reservatório. Verificou-se que aumentar a capacidade do reservatório além de 20 m³ geralmente não reduz de forma substancial as perdas por extravasamento. Com base nessas análises, foi desenvolvido um algoritmo em Python, com interface gráfica, que permite ao usuário inserir sua localização, área de captação e demanda para obter o volume ótimo do reservatório e a confiabilidade do sistema. A ferramenta oferece uma base técnica sólida para o planejamento de SCAAC eficientes, sustentáveis e adaptados às reais necessidades locais.

PALAVRAS-CHAVE: água de chuva, dimensionamento de reservatórios, otimização, Semiárido Brasileiro, CTV.

ABSTRACT

Water scarcity in the Brazilian Semi-Arid Region is a historical and structural challenge, exacerbated by climate change and the irregular distribution of rainfall. In this context, Rainwater Harvesting Systems (RHS) emerge as a vital solution for water supply, especially in rural communities. The efficiency of these systems is directly linked to the correct sizing of the reservoir, which is their most costly component. This study proposes the development and application of a tool for sizing rainwater reservoirs in the Brazilian Semi-Arid Region, using the Volumetric Overflow Coefficient (VOC), defined as the ratio between the annual spilled volume and the reservoir capacity. The objective was to create a method that, by minimizing the VOC, would indicate the "optimal" reservoir volume while minimizing losses. The methodology was based on the simulation of the daily water balance for a 30-year historical series (1993-2022), covering the entire semi-arid region. Maps of VOC values generated from 40 scenarios were analyzed, which combined different catchment areas (50 to 200 m²), water demands (domestic and irrigation), and reservoir volumes (2 to 50 m³). The results demonstrated that the catchment area is the predominant factor for system efficiency, with larger areas resulting in higher VOC for the same reservoir volume. It was found that increasing the reservoir capacity beyond 20 m³ generally does not substantially reduce spillage losses. Based on these analyses, a Python algorithm with a graphical interface was developed, allowing the user to input their location, catchment area, and demand to obtain the optimal reservoir volume and the system's reliability. The tool eliminates offers a solid technical basis for planning efficient, sustainable RHS adapted to real local needs.

KEYWORDS: Rainwater, Reservoir Sizing, Optimization, Brazilian Semi-Arid, VOC.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO....10
2 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS....13
2.1 Objetivo Geral:....13
2.2 Objetivos específicos:....13
3 REFERENCIAL TEÓRICO....14
3.1 ESCASSEZ HÍDRICA, MUDANÇAS CLIMÁTICAS E CONFLITOS PELA ÁGUA....14
3.2 SISTEMAS DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA DE CHUVA....16
3.3 BALANÇO HÍDRICO EM SAAC....20
3.4 EFICIÊNCIA EM SISTEMAS DE CAPTAÇÃO E ARMAZENAMENTO DE ÁGUA DE CHUVA....25
4. MATERIAL E MÉTODOS....42
4.1 ÁREA DE ESTUDO....42
4.2 BANCO DE DADOS PLUVIOMÉTRICOS....44
4.3 CENÁRIOS ANALISADOS PARA GERAÇÃO DE MAPAS E DEMANDA POR ÁGUA DA CHUVA....44
4.5 CÁLCULO DO COEFICIENTE DE TRANSBORDAMENTO VOLUMÉTRICO (CTV)...48
4.6 GERAÇÃO DE MAPAS....48
4.7 DESENVOLVIMENTO DE MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO DE RESERVATÓRIO UTILIZANDO O CTV....49
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES....53
5.1 MAPAS GERADOS A PARTIR DE CENÁRIOS PRÉ-DETERMINADOS....53
5.2 MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO DE RESERVATÓRIOS....61
5.2.1 INTERFACE USUÁRIO/ALGORÍTIMO DO MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO....68
6. CONCLUSÕES....72
7 REFERÊNCIAS....74
APÊNDICE I – MAPAS....80
APÊNDICE II – ALGORÍTIMO DE DIMENSIONAMENTO DE VOLUME DE RESERVATÓRIO 120

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Índice de sazonalidade (Sk) e duração da estação chuvosa (Zk) no Semiárido brasileiro para chuva média da região (D e G), ano chuvoso (2009 – E e H) e ano seco (2012 – F e I).....14
Figura 2 – Mapas do grau de convergência dos cenários climáticos para diminuição na Qmlt (vazão média de longo termo) em todos os períodos.....15
Figura 3 – Tipos de conflitos por água no semiárido brasileiro entre 2002 e 2017: a) Total dos conflitos; b) Apropriação particular; c) Barragens e açudes; e d) Uso e preservação.....17
Figura 4 – Sistema de captação e armazenamento de água de chuva.....18
Figura 5 – Sistema utilizando “calçadão” para captação de água de chuva.....19
Figura 6 – Representação de resultados de CTV utilizando o método de dimensionamento Prático Inglês para uma demanda de 100 L/d.....29
Figura 7 – Eficiência de economia de água e eficiência de armazenamento versus tamanhos de tanques propostos.....31
Figura 8 – Capacidade ótima do tanque (m³) para diferentes limiares de ET (%) e A (m²) para uso em irrigação de jardins.....32
Figura 9 – (a) O intervalo de tamanho ótimo do reservatório é indicado por setas entre os pontos A e B. (b) As setas mostram o intervalo de eficiência de captação que pode ser obtido ao selecionar.…33
Figura 10 – Compatibilidade entre a disponibilidade de água da chuva e a demanda hídrica.....36
Figura 11 – Variação de tamanhos ideais de tanques para uma confiabilidade de abastecimento de água de 90% a partir de um telhado de (a) 100 m², (b) 150 m² e (c) 200 m² com demanda de água para descarga de vasos sanitários e irrigação de jardins.....39
Figura 12 – Mapa de zonas potenciais para captação de água da chuva (CAC) na área de estudo.. .41
Figura 13 – Semiárido brasileiro com divisão limítrofe dos municípios.....42
Figura 14 – Precipitação média anual referente ao período de 1992 a 2022 para o Semiárido brasileiro.....43
Figura 15 – Dados de entrada considerados para cálculo do Coeficiente de Transbordamento Volumétrico (CTV).....46
Figura 16 – Interface usuário/algorítimo para dimensionamento de reservatório de água de chuva utilizando CTV.....50
Figura 17 – Algorítimo do método para dimensionamento de reservatório de água de chuva utilizando CTV.....52
Figura 18 – Mapas de valores de CTVs gerados para uma demanda doméstica de 50 L/dia, áreas de captação de 50 e 75 m² e volumes de reservatórios de 2, 5, 10 e 20 m².....54
Figura 19 – Mapas de valores de CTVs gerados para uma demanda doméstica de 100 L/dia, áreas de captação de 50 e 75 m² e volumes de reservatórios de 2, 5, 10 e 20 m².....55
Figura 20 – Mapas de valores de CTVs gerados para uma demanda doméstica de 50L/dia e demanda de irrigação de 400 L/dia, áreas de captação de 100 e 200 m² e volumes de reservatórios de 20, 30 e 50 m².....57
Figura 21 – Mapas de valores de CTVs gerados para uma demanda doméstica de 100 L/dia e demanda de irrigação de 400 L/dia, áreas de captação de 100 e 200 m² e volumes de reservatórios de 20, 30 e 50 m².....58
Figura 22 – Mapas de valores de CTVs gerados para uma demanda doméstica de 50 L/dia e demanda de irrigação de 650 L/dia, áreas de captação de 100 e 200 m² e volumes de reservatórios de 20, 30 e 50 m².....59
Figura 23 – Mapas de valores de CTVs gerados para uma demanda doméstica de 100 L/dia e demanda de irrigação de 650L/dia, áreas de captação de 100 e 200 m² e volumes de reservatórios de 20, 30 e 50 m².....60
Figura 24 – Pontos representativos de faixas de precipitação média anual.....62
Figura 25 – Histogramas das precipitações médias mensais de pontos com precipitações médias anuais de 371,10, 499,93, 699,98, 900,01, 1100,05 e 1500,13 mm/ano.....63
Figura 26 – Volume “ótimo” de reservatório por ponto representativo considerando uma demanda doméstica de 50 L/dia e áreas de captação de 50, 75, 100 e 200 m², com os respectivos valores de confiabilidade.....64

Figura 27 – Volume “ótimo” de reservatório por ponto representativo considerando uma demanda doméstica de 100 L/dia e áreas de captação de 50, 75, 100 e 200 m², com os respectivos valores de confiabilidade..... 65
Figura 28 – Volume “ótimo” de reservatório por ponto representativo considerando uma demanda de irrigação e doméstica de 50 L/dia e áreas de captação de 100 e 200 m², com os respectivos valores de confiabilidade.....66
Figura 29 – Volume “ótimo” de reservatório por ponto representativo considerando uma demanda de irrigação e doméstica de 100 L/dia e áreas de captação de 100 e 200 m², com os respectivos valores de confiabilidade.....67
Figura 30 – Relação entre Volume “ótimo” e precipitação média anual para demanda doméstica de 50 e 100 L/dia, área de captação de 50, 75, 100 e 200 m², com e sem demanda de irrigação.....68
Figura 31 – Interface usuário/algorítimo para dimensionamento de reservatório para o Semiárido brasileiro.....70
Figura 32 – Utilização da interface para dimensionamento de reservatório para as coordenadas (-9,35; -44,55) com precipitação média anual de 900,012 mm/ano e área de captação de 100 m² e demanda doméstica de 100 L/dia e com área de irrigação de 100m².....71

1 INTRODUÇÃO

A escassez hídrica no semiárido brasileiro é fato consolidado, porém com a degradação dos corpos hídricos, a destruição da caatinga e as mudanças climáticas, esse cenário tem se agravado (NASCIMENTO; BORGES; MELO, 2023). O impacto é ainda maior em um bioma mais vulnerável, a Caatinga foi o terceiro bioma mais desmatado do Brasil em 2022 com 140.637 ha desmatados, sendo o Cerrado com uma área de 659.670 ha e a Amazônia com 1.192.635 ha os biomas mais devastados (RAD, 2023) – isso e as mudanças climáticas têm diminuído a disponibilidade de água para o consumo humano, irrigação e dessedentação. Neste contexto, a água decorrente de precipitação pode ser captada, reservada e utilizada, reduzindo o agravamento dos efeitos da falta de água (IMTEAZ *et al.*, 2011; 2013; SILVA; GHISI, 2016).

O semiárido brasileiro é geograficamente caracterizado por um clima tropical semiárido, com precipitação média anual entre 300 e 800 mm e distribuição temporal irregular das chuvas, além de uma vegetação xerófila, adaptada às condições de aridez, que compõe o único bioma exclusivamente brasileiro, a Caatinga (AB'SÁBER, 2003). Do ponto de vista socioeconômico, a região apresenta dependência histórica de atividades primárias, como o cultivo de milho e feijão (agricultura de sequeiro) e a pecuária extensiva, práticas altamente suscetíveis aos períodos de estiagem prolongada. Somado a isso, destaca-se uma estrutura fundiária concentrada, marcada pela coexistência de latifúndios e minifúndios, cenário que intensifica tensões sociais relacionadas ao acesso desigual a recursos como terra e água (ANDRADE, 1998).

No Brasil, principalmente na zona rural semiárida essa prática de captação de água de chuva já é bastante conhecida e utilizada, através de políticas governamentais principalmente com a instituição de programas como o Programa Um Milhão de Cisternas (P1MC), que capta água utilizada na maioria das vezes para consumo humano (ASA, 2024). Esse e outros programas governamentais atendem a uma população que frequentemente precisa percorrer longas distâncias para acessar esse recurso. No entanto, a implantação de cisternas para captação de água da chuva exige a complementação por meio de políticas habitacionais, além da elaboração de planos logísticos para o abastecimento das cisternas com água de caminhões-pipa e a realização de ações regulares de monitoramento da qualidade da água armazenada (ANDRADE; NUNES, 2014).

Neste contexto, a implantação de sistemas de captação e aproveitamento de água de chuva (SCAAC) deve está embasada em avaliações técnicas e econômicas, a exemplo da área de captação disponível, do regime local de precipitações e do dimensionamento do reservatório (AMOS;

RAHMAN; GATHENYA, 2019; STEC; ZELEŇÁKOVÁ, 2019). Sendo o reservatório o que apresenta maior custo dentro do sistema (DOMÈNECH; SAURÍ, 2011).

Mas para o semiárido, o valor da água vai além de aspectos técnicos e econômicos, já que a carência crônica deste recurso, essencialmente no período da seca, faz com que a disponibilidade dela tenha papel crucial na sobrevivência e desenvolvimento das comunidades rurais dessa região (CAMPOS; ALVES, 2014; SILVEIRA, 2014).

Para tanto, é necessário desenvolver técnicas que subsidiem análises que levam ao dimensionamento de SCAAC de forma eficiente e que resultem em reservatórios com maior capacidade de aproveitar água, considerando o ciclo pluviométrico, a disponibilidade e a demanda por água de cada localidade.

Para que seja feita uma estimativa da quantidade de água passível de aproveitamento ao longo do ano em uma localidade, costuma-se dimensionar o reservatório com base nas médias mensais de precipitação. Entretanto, avaliar o potencial de captação apenas por meio de dados nessa escala temporal pode resultar em imprecisões, uma vez que se desconsidera o volume extravasado devido à incapacidade de retenção durante eventos de chuva de alta intensidade. Quando a análise é realizada com base em dados diários, por outro lado, esta análise se mostra muito mais precisa.

A utilização de parâmetros de eficiência para análise de volumes de reservatórios, considerando determinados valores de demanda, e nos volumes de água que não são aproveitados (extravasados), pode auxiliar no dimensionamento de um sistema mais eficiente.

As pesquisas sobre coeficientes para análise de aproveitamento de água pluvial, desenvolvidas por grupo de pesquisa do PPGECAM, iniciam-se com o trabalho de Luna (2022), que desenvolveu os primeiros coeficientes para avaliar, em escala nacional, o volume potencialmente aproveitável e a eficiência de reservatórios em sistemas residenciais. Utilizando séries diárias de precipitação e considerando diferentes padrões de consumo, a autora introduziu o Coeficiente de Eficiência Volumétrica (CEV), definido como a razão entre o volume anual aproveitado e o volume do reservatório, com o objetivo de quantificar quanto uma unidade de volume do reservatório é capaz de aproveitar anualmente, sendo valores mais altos indicativos de maior viabilidade econômica. Luna (2022) também propôs o Coeficiente de Eficiência Volumétrica Específica (CEVE), concebido para permitir uma comparação equilibrada da eficiência entre regiões com diferentes níveis de pluviosidade, minimizando o efeito da precipitação. Os resultados demonstraram que o CEV foi maior em cenários que combinaram maior área de captação, alta pluviosidade e reservatórios menores, enquanto o CEVE se mostrou particularmente útil para uma análise justa em regiões de baixa precipitação, como o semiárido do Nordeste, com ambos os coeficientes apresentando forte correlação com a precipitação média anual.

Posteriormente, Silva C. S. (2023) expandiu essa base metodológica. Além de adotar o CEV proposto por Luna (2022), a pesquisa introduziu dois novos coeficientes para uma análise: o Coeficiente de Ociosidade Volumétrica (COV), que avalia a fração do volume do reservatório que permanece ocioso anualmente (sendo valores mínimos ideais para identificar reservatórios adequados), e o Coeficiente de Transbordamento Volumétrico (CTV), que mede a proporção da água captada que é perdida por transbordamento em relação ao volume do reservatório, com valores mínimos considerados ótimos para identificar reservatórios com volume satisfatório e otimizar a área de captação. A principal conclusão foi que essa abordagem elimina a subjetividade na seleção do método de dimensionamento, facilita a análise de viabilidade econômica e é especialmente valiosa em regiões com escassez de dados de precipitação, representando um avanço para o planejamento e a optimização de sistemas de aproveitamento de água pluvial (SILVA, C. S., 2023).

Sendo assim, a escolha do CTV para ser utilizado neste trabalho se deu em virtude deste coeficiente realizar análise através da água não aproveitada. Esta premissa é de fundamental relevância quando aplicada ao contexto do semiárido brasileiro, onde a água vai para além do valor econômico, assumindo uma dimensão vital. Em uma região marcada pela escassez hídrica, a água representa um bem crítico para a sobrevivência, a segurança alimentar e a manutenção da qualidade de vida das populações locais. Portanto, minimizar o desperdício, objetivo central do CTV, torna-se não apenas uma questão de eficiência do sistema, mas uma estratégia essencial de convivência com a seca e de garantia de direitos básicos.

Diante do exposto, este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta para dimensionamento de reservatório para aproveitamento de água de chuva aplicada ao Semiárido brasileiro através da utilização do CTV.

2 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

2.1 Objetivo Geral:

- Desenvolver ferramenta para auxiliar na escolha de volume do reservatório de coleta de água de chuva no Semiárido brasileiro utilizando o CTV.

2.2 Objetivos específicos:

- Calcular o CTV no semiárido brasileiro para diversos cenários em meio rural de oferta e demanda de água de chuva.
- Mapear o CTV no semiárido brasileiro para diversos cenários em meio rural de oferta e demanda de água de chuva;
- Analisar a escolha de volume do reservatório utilizando o CTV.

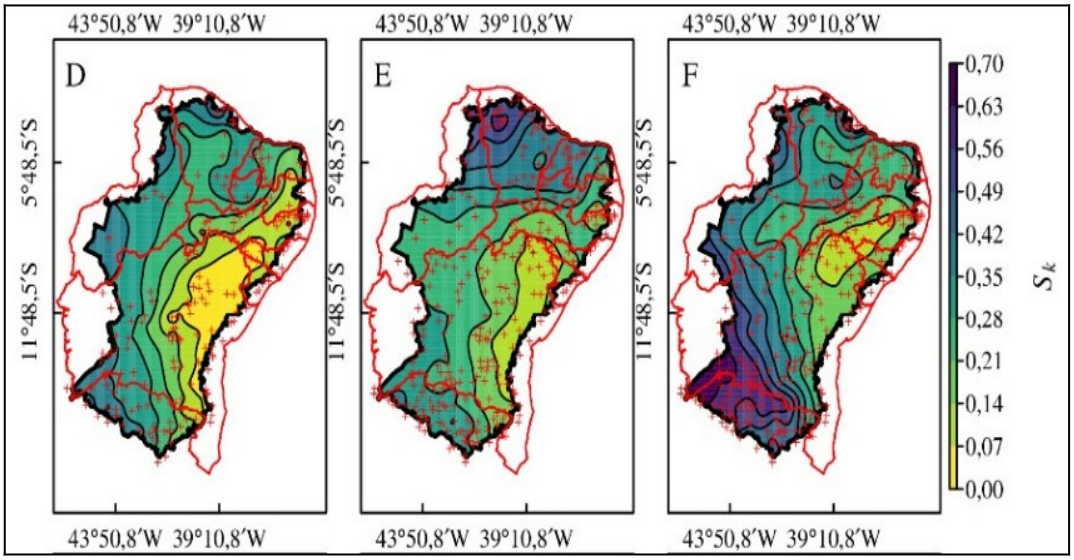
3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 ESCASSEZ HÍDRICA, MUDANÇAS CLIMÁTICAS E CONFLITOS PELA ÁGUA

Cerca de quatro bilhões de pessoas têm experimentado uma escassez severa de água pelo menos um mês ao ano e esta condição tem se agravado devido às mudanças climáticas. Além disso, um quarto da população global vive em países em desenvolvimento que enfrentam sérias dificuldades relacionadas a esse problema. O agravamento dessa situação ocorre ainda por limitações tecnológicas, governos pouco eficientes e infraestruturas inadequadas para a captação e transporte de água (WWAP, 2020).

Ainda de acordo com World Water Assessment Programme (WWAP, 2020) a procura por água aumentou seis vezes nos últimos 100 anos e continua crescendo a uma taxa constante de cerca de 1% ao ano. A crescente escassez hídrica será impulsionada principalmente pelo aumento do consumo humano, diretamente ligado ao crescimento populacional e ao desenvolvimento econômico, que eleva a demanda. Outro fator importante relacionado às mudanças climáticas que provocam efeitos extremos no planeta, é o indicie de sazonalidade (S_k) — que mede a distribuição da chuva ao longo do ano. Anos secos tendem a apresentar S_k mais alto, pois a precipitação é irregular e concentrada em poucos eventos, causando um desequilíbrio na oferta de recursos hídricos, conforme ilustrado na Figura 1 (SANTOS *et al.*, 2017).

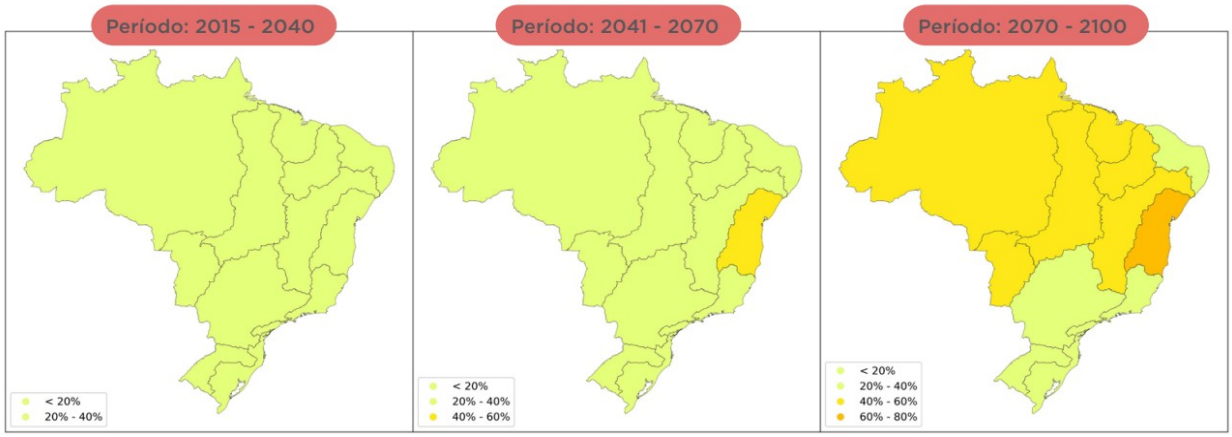
Figura 1 – Índice de sazonalidade (Sk) e duração da estação chuvosa (Zk) no Semiárido brasileiro para chuva média da região (D e G), ano chuvoso (2009 – E e H) e ano seco (2012 – F e I).



Fonte: Adaptado de Santos et al. (2017).

No contexto das mudanças climáticas poderá ocorrer redução da disponibilidade de água em mais de 40% nas bacias hidrográficas do Norte, Nordeste, Centro-Oeste e em parte do Sudeste até 2040 (Figura 2), com a situação se agravando ao longo dos anos (ANA, 2024). No Nordeste, observa-se uma tendência de redução das vazões dos rios e dos volumes médios de precipitação, o que aponta para uma menor disponibilidade de água na região e para o agravamento da seca, tanto no Semiárido como na faixa litorânea. Diante disso, há necessidade de adotar medidas para lidar com secas mais severas e prolongadas, focando no aumento da oferta de água e na racionalização do seu uso no Semiárido nordestino (ANA, 2024).

Figura 2 – Mapas do grau de convergência dos cenários climáticos para diminuição na Qmlt (vazão média de longo termo) em todos os períodos.



Fonte: ANA (2024).

No Semiárido brasileiro, diversas políticas públicas buscam enfrentar a escassez hídrica, com destaque para os programas 1 Milhão de Cisternas (P1MC) e Uma Terra e Duas Águas (P1+2), ambos promovidos pela Articulação do Semiárido Brasileiro (ASA), e o O Programa Água Doce (PAD) criado pelo Ministério do Desenvolvimento Regional em parceria com instituições federais, estaduais, municipais e sociedade civil. O P1MC, iniciado em 2001, tem como objetivo armazenar águas pluviais em cisternas utilizando calhas instaladas nos telhados das casas. Já o P1+2, lançado em 2007, busca garantir o acesso sustentável à terra e à água, tanto para consumo familiar e dos animais quanto para a produção de alimentos.

Essas políticas têm desempenhado um papel importante na redução da dependência das famílias em relação aos carros-pipa, promovendo certa autonomia hídrica. No entanto, apresentam limitações significativas. O PAD enfrenta fragilidades técnicas, baixa participação comunitária e resultados socioeconômicos limitados ao acesso à água potável, enquanto que o P1MC, embora facilite o armazenamento de água da chuva, não consegue atender plenamente às necessidades de muitas famílias (AZEVÊDO, 2015).

Essas iniciativas refletem a necessidade de consolidar uma mudança de paradigma, passando do tradicional “combate à seca” para a “convivência com o Semiárido”. Apesar de alguns exemplos positivos de desenvolvimento sustentável no território, interesses políticos e econômicos não podem se sobrepor à adoção de medidas eficazes e inclusivas e deve-se garantir uma convivência equilibrada e sustentável na região (LINHARES; XIMENES; MONTEIRO, 2021).

A escassez hídrica, somada à fragilidade na gestão dos recursos hídricos, tem gerado inúmeros conflitos pelo uso da água pelo mundo (RIBEIRO; SANTOS; SILVA, 2019), assim se destaca a importância do aproveitamento da água da chuva como uma solução sustentável para reduzir a pressão sobre os mananciais tradicionais e promover a segurança hídrica. No Nordeste, especialmente na região semiárida, esses conflitos estão profundamente ligados a interesses econômicos e políticos, onde a água se torna o centro de práticas clientelistas e dominadoras. Essa dinâmica agrava as desigualdades na distribuição equitativa da água entre diferentes grupos sociais e territórios, resultando em disputas locais e regionais (RIBEIRO; OLIVEIRA, 2019; SILVA, J. I. A. O., 2023)

De acordo com a Comissão Pastoral da Terra, somente em 2022 foram registrados 44.400 conflitos relacionados ao uso da água no Brasil, dos quais 12.075 ocorreram nos dez estados que compõem o Semiárido. Ainda segundo esta comissão, os conflitos por água no Semiárido brasileiro têm origem em diferentes situações: Apropriação Particular, quando a água é controlada diretamente por meio de algum corpo hídrico; Barragens e Açudes, quando obras são construídas para bloquear o fluxo natural dos rios, prejudicando as famílias da região; e Uso e Preservação, quando as águas utilizadas por comunidades enfrentam risco de escassez quantitativa e qualitativa devido à contaminação ou degradação causada por fazendeiros ou empresas (SILVEIRA; SILVA, 2019; MOREIRA *et al.*, 2019) (Figura 3). Nesse contexto, a captação de água da chuva apresenta-se como uma solução viável para reduzir os impactos da escassez hídrica, promover uma convivência sustentável com a seca e a autonomia das comunidades rurais (SILVA; OLIVEIRA, 2020).

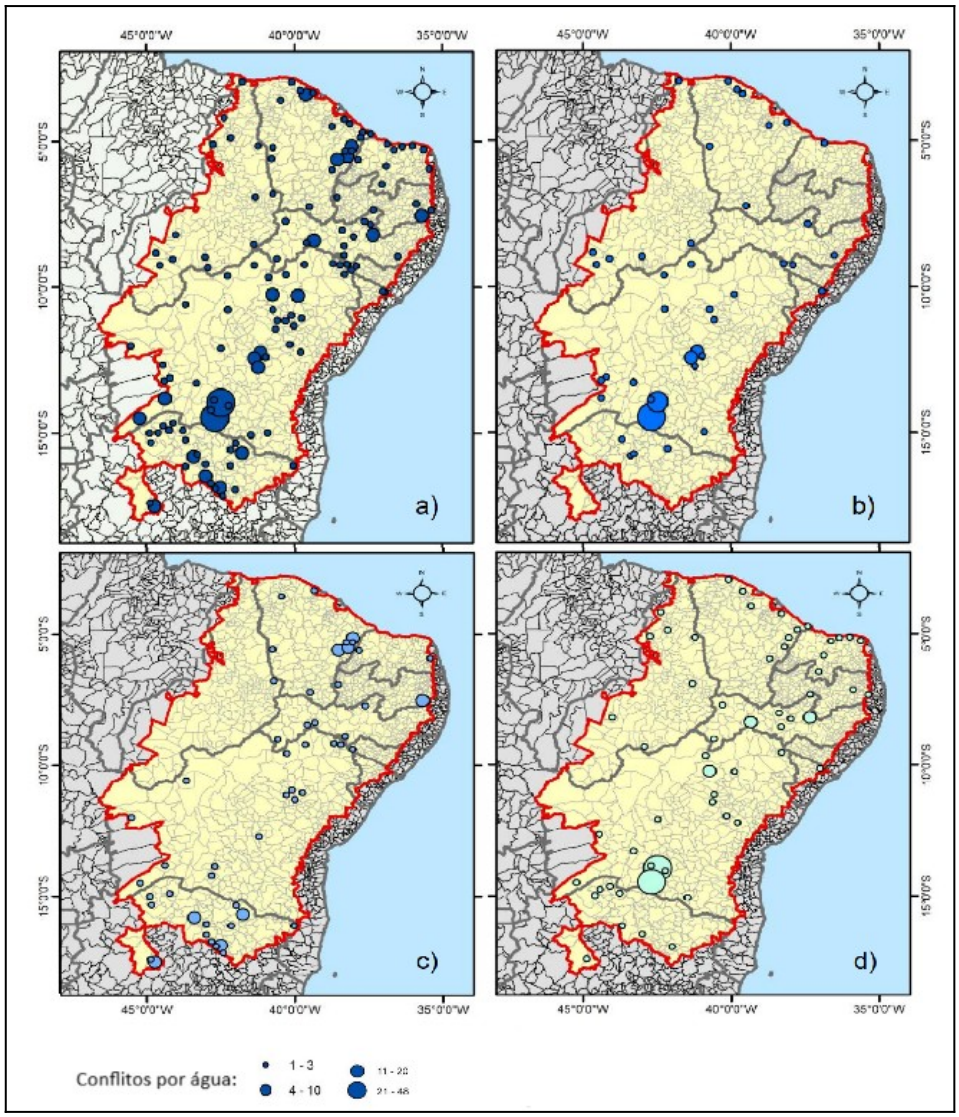
3.2 SISTEMAS DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA DE CHUVA

O uso e o armazenamento de água da chuva têm acompanhado a trajetória da humanidade, desempenhando um papel crucial para a sobrevivência e o progresso de inúmeras civilizações ao longo da história. Para enfrentar a escassez hídrica, especialmente em regiões áridas e semiáridas, diversas técnicas de coleta e armazenamento foram desenvolvidas ao longo do tempo.

Registros históricos indicam que, por volta de 4.000 a.C., povos da Mesopotâmia e do Egito já utilizavam cisternas e reservatórios construídos em pedra ou argila para captar e armazenar água da chuva. Essas estruturas rudimentares garantiam tanto o abastecimento doméstico quanto o suporte à agricultura durante períodos de estiagem (CHANDLER *et al.*, 2012).

A adoção de sistemas de captação de água da chuva gera uma considerável economia de água potável ao longo do ano, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e fortalecendo a resiliência das comunidades diante de crises hídricas (DANTAS, 2024).

Figura 3 – Tipos de conflitos por água no semiárido brasileiro entre 2002 e 2017: a) Total dos conflitos; b) Apropriação particular; c) Barragens e açudes; e d) Uso e preservação.



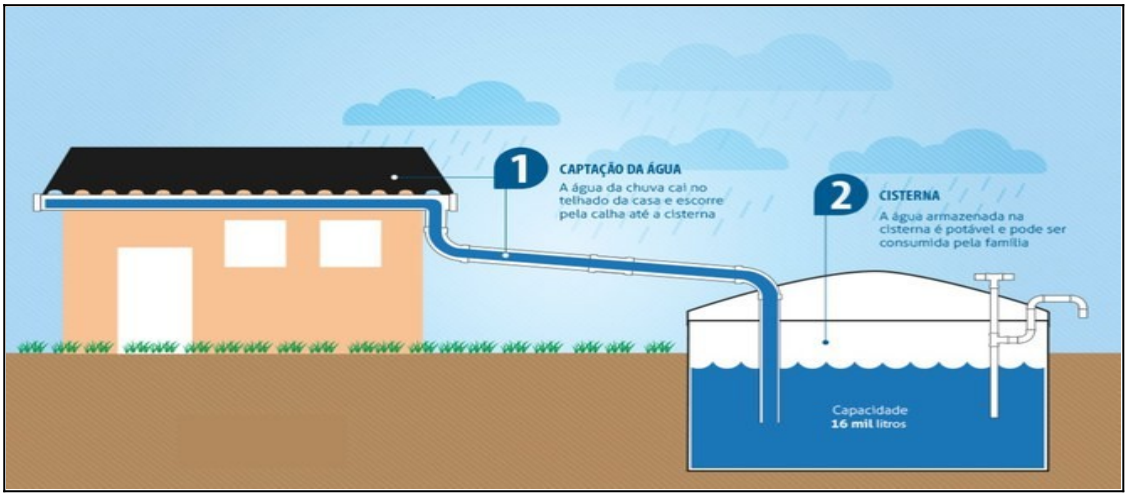
Fonte: Adaptado de Dantas (2019).

O sistema de captação e armazenamento de água de chuva (Figura 4), basicamente consiste numa área de captação, normalmente o telhado da própria residência, tubulações que conduzem a

água até um tanque de armazenamento. Este pode ser uma cisterna em estrutura de concreto armado com volume de 16 mil litros, tamanho padrão do Programa Um Milhão de Cisternas (P1MC), também pode ser encontrado em outros materiais como alvenaria, fibra de vidro, plástico, entre outros.

Outra forma é o sistema cisterna-calçadão que consiste em uma tecnologia social desenvolvida para captar e armazenar água da chuva destinada à produção de alimentos. Construída com placas de cimento, possui capacidade para armazenar até 52 mil litros de água. O sistema utiliza uma calçada de cimento de 200 m², instalada sobre o solo, para direcionar a água da chuva até a cisterna (Figura 5).

Figura 4 – Sistema de captação e armazenamento de água de chuva.



Fonte: https://www.al.pi.leg.br/tv/noticias-tv-1/mds-alerta-para-importancia-do-cuidado-com-as-cisternas.

No contexto técnico do aproveitamento de água pluvial, a ABNT NBR 15527:2019 (BRASIL, 2019) apresenta diretrizes fundamentais para o desenvolvimento de projetos de sistemas de aproveitamento de água da chuva. Dentre elas, destaca-se a necessidade de incluir a área de cobertura como parte do sistema de captação, garantindo que sejam evitadas possíveis fontes de contaminação. Também é recomendada a realização de uma análise de viabilidade técnico-econômica do sistema antes de sua implantação. Outro ponto abordado é a inclusão de estudos sobre as séries históricas e sintéticas das precipitações na região de implementação. As séries históricas referem-se a dados coletados de forma regular ao longo de um período específico, enquanto as séries sintéticas são geradas por modelos baseados nesses dados históricos.

Além disso, a norma destaca que a disponibilidade teórica de água da chuva para captação depende de fatores como a precipitação, a área de captação, o coeficiente de escoamento superficial da cobertura e a eficiência do sistema de tratamento, sendo calculada com base na Equação 1.

$$V_{disp} = P \times A \times C \times \eta \qquad \text{Equação 1}$$

Onde:

- V_{disp}: Volume disponível anual, mensal ou diário de água de chuva (L);
- P: Precipitação média anual, mensal ou diária (mm);
- A: Área de coleta (m^2);
- C: Coeficiente de escoamento superficial da cobertura (runoff – adimensional);
- η: Eficiência do sistema de captação (adimensional). Na falta de dados, recomenda-se o fator de captação de 0,85.

Figura 5 – Sistema utilizando "calçadão" para captação de água de chuva.



Fonte: https://semiaridovivo.org/pt/tecnologia_social/cisterna-calcadao/.

Há a especificação dos usos não potáveis de água em edificações, abrangendo por exemplo as seguintes aplicações: sistemas de resfriamento a água; descarga de bacias sanitárias e mictórios, independentemente do tipo de acionamento; lavagem de veículos; lavagem de pisos; entre outros. Para outros usos, é necessário que o profissional responsável pelo projeto do sistema avalie os parâmetros de qualidade específicos e determine os tratamentos adequados para cada situação.

Em relação aos reservatórios, a norma orienta que seu volume deve ser dimensionado considerando a área de captação, o regime pluviométrico e a demanda não potável a ser atendida, o reservatório deve ser fechado e possuir mecanismos que impeçam a entrada de insetos, roedores ou outros animais e o dimensionamento do volume deve seguir critérios técnicos, econômicos e ambientais, em conformidade com as boas práticas de engenharia (ZANELLA; ALVES, 2020;

MURÇA; JULIO; MORUZZI, 2014; BEZERRA *et al.*, 2010). Por fim, os parâmetros mínimos de qualidade da água devem atender aos requisitos estabelecidos na Tabela 1 pertencente à norma.

Tabela 1 – Parâmetros mínimos de qualidade para usos não potáveis.

Parâmetro	Valor
Escherichia coli	< 200 / 100 mL
Turbidez	< 5,0 uT
pH	6,0 a 9,0

Fonte: ABNT (2019).

3.3 BALANÇO HÍDRICO EM SAAC

A modelagem de sistemas de aproveitamento de água pluvial baseia-se em equações de balanço hídrico que consideram entradas (precipitação), saídas (demanda, evapotranspiração, transbordamento) e o armazenamento. Uma equação fundamental do modelo é apresentada por Snir e Friedler (2021) na Equação 2. O modelo resolve essa equação para cada passo de tempo, sendo que os métodos de cálculo para Et (entradas) e Dt (demandas) variam conforme a abordagem adotada.

$$R_t = \text{MAX}\left\{\begin{matrix} 0 \\ R_{t-1} + E_t - D_t - T_t - FL_t \end{matrix}\right\} \qquad \text{Equação 2}$$

Onde:

- *t*: Passo de tempo atual*;*
- *R*: Volume de água armazenado no reservatório;
- *E*: Entrada de água proveniente da precipitação;
- *D*: Vazão ou demanda atendida pela água pluvial;
- *T*: Transbordamento;
- *FL*: fluxo de liberação controlada de água do tanque.

Londra *et al.* (2021) utilizou para o dimensionamento do reservatório, um modelo de balanço hídrico diário que considera os seguintes fatores: precipitação diária; área de captação; coeficiente de escoamento; volume do reservatório; demanda hídrica e evaporação, semelhante à Equação 2 apresentada por Snir e Friedler (2021). Este modelo permite avaliar a dinâmica diária do armazenamento e consumo de água, considerando as entradas (chuva) e saídas (demanda e evaporação) (Equação 3).

$$S_t = S_{t-1} + R_t - D_t - E_t, \text{ onde } 0 \leq S_{t-1} \leq V_{reservatório} \qquad \text{Equação 3}$$

Onde:

- S_t: Volume armazenado no final do dia t (m³);
- S_{t-1}: Volume armazenado no início do dia t (m³);
- R_t: Volume de água pluvial captada no dia t (m³);
- D_t: Demanda hídrica diária (m³);
- E_t: Evaporação diária (para reservatórios descobertos) (m³);
- $V_{reservatório}$: Capacidade total do reservatório (m³).

A Equação 4 usada para calcular o volume diário de água pluvial captada (R_t), proveniente da área do telhado é uma fórmula bem difundida e utilizada no cálculo do volume de entrada de água no reservatório de armazenamento.

$$R_t = C \times A \times P_t \qquad \text{Equação 4}$$

Onde:

- C: Coeficiente de escoamento;
- A: Área do telhado utilizada para captação (m²);
- P_t: Lâmina de precipitação diária no final do dia "t" (m).

Jenkins *et al.* (1978) desenvolveram um modelo comportamental para sistemas de aproveitamento de água pluvial, estabelecendo dois algoritmos operacionais fundamentais, a primeira abordagem é a Produção Após Extravasamento (YAS - Yield After Spillage) que prioriza a liberação de água apenas após o armazenamento do volume captado, seguindo as Equação 5 e Equação 6. A lógica operacional é que a produção Y_t é limitada pelo menor valor entre a demanda atual Dt e o volume armazenado no passo anterior V_{t-1} e o volume atualizado Vt considera a entrada de escoamento Qt, descontando a produção Yt, e garante que o excesso seja extravasado caso ultrapasse a capacidade ajustada S−Yt.

$$Y_t = min\left\{\frac{D_t}{V_{t-1}}\right\} \qquad \text{Equação 5}$$

$$V_t = min\left\{\frac{V_{t-1} + Q_t - Y_t}{S - Y_t}\right\} \qquad \text{Equação 6}$$

Onde:

- Qt: Escoamento pluvial no intervalo t (m³);
- Vt: Volume armazenado no intervalo t (m³);
- Yt: Produção do reservatório no intervalo t (m³);
- Dt: Demanda no intervalo t (m³);
- S: Capacidade total do reservatório (m³);

- A: Área de captação (m²).

A segunda abordagem é a Produção Antes do Extravasamento (YBS - Yield Before Spillage) prioriza o atendimento da demanda antes de considerar o armazenamento, conforme as Equação 7 e Equação 8. A diferença está no fato de que a YBS a produção Yt pode utilizar tanto o volume armazenado quanto o escoamento atual Qt, enquanto em YAS a produção depende exclusivamente do volume preexistente (V_{t-1}).

$$Y_t = min\left\{\frac{D_t}{V_{t-1}+Q_t}\right\} \quad \text{Equação 7}$$

$$V_t = min\left\{\frac{V_{t-1} + Q_t - Y_t}{S}\right\} \quad \text{Equação 8}$$

Fewkes (2000) analisou a precisão dos modelos apresentados por Jenkins *et al.* (1978) para dimensionamento de sistemas, estabelecendo relações adimensionais. Essas relações permitiram otimizar o dimensionamento de reservatórios com base em dados climáticos e padrões de demanda, garantindo eficiência hidrológica e econômica.

- Fração de Demanda (D/A*R): Razão entre demanda anual D (m³) e o potencial de captação (A×P);
- Fração de Armazenamento (S/A×R): Razão entre capacidade do reservatório S (m³) e o potencial de captação.

Onde:

- A: Área de captação (m²);
- R: Precipitação anual (m).

Khan *et al.* (2022) apresentou um modelo computacional desenvolvido para simular o balanço hídrico diário em sistemas de captação de água pluvial. O modelo foi estruturado em três componentes principais: dados de entrada, cálculo do volume de escoamento captado (Equação 9) e balanço hídrico no reservatório (Equação 10). Os dados de entrada foram divididos em:

- Entradas fixas: parâmetros intrínsecos ao sistema, como área de captação, coeficiente de escoamento e capacidade do reservatório;
- Entradas variáveis: dados climáticos dinâmicos (precipitação diária) e demandas hídricas (consumo diário de água).

$$Vt = (-If) \times A \times Rc \times 0.001 \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

- Vt: Volume de água pluvial captado no dia t (m³);
- It: Precipitação diária (mm);
- If: Parcela de first flush (10 mm), descartada para evitar contaminação inicial;
- A: Área de captação (m²);
- Rc: Coeficiente de escoamento (adimensional, valor padrão = 0,90);
- Observações:
  - Se (It−If) < 0, considera-se Vt = 0 (sem captação).
  - O fator 0.001 converte mm·m² para m³.

$$S_t = V_t + S_{t-1} - D \quad \text{Equação 10}$$

Onde:

- S_t: Volume armazenado no final do dia t (m³);
- S_{t-1}: Volume no início do dia t (m³);
- D: Demanda hídrica diária (m³).
- Restrições do Modelo:
  - Reservatório vazio: Se $S_t < 0$, assume-se $S_t = 0$.
  - Reservatório cheio: Se $S_t > C$, onde C é a capacidade máxima, então $S_t = C$ (excedente é perdido por transbordamento).

O modelo teve como saídas o volume armazenado, eficiência de captação e deficit hídrico. O modelo operou em escala diária, garantindo precisão na avaliação da dinâmica de armazenamento, onde eventos extremos de precipitação e períodos de seca são considerados na simulação e a eficiência do sistema foi avaliada com base na relação entre demanda e disponibilidade hídrica. Esta abordagem permitiu uma análise robusta da viabilidade de sistemas SCAAC, auxiliando no dimensionamento otimizado de reservatórios e na gestão sustentável de recursos hídricos. Modelo semelhante, mas usando o Excel, foi desenvolvido por Quigley, Beavis e White (2016).

Silva e Ghisi (2016) desenvolveram um algorítimo para executar uma série de operações lógicas para analisar a eficácia do sistema de captação de águas pluviais, foi calculado o volume captado diariamente (Q_t) por uma equação simples já abordada aqui (Equação 10), seguindo pelo cálculo do consumo diário (Equação 11) e atualização do volume armazenado foi calculado pela Equação 12 que calcula o volume remanescente no reservatório após consumo.

$$Cp(t) = min\left\{\frac{dp \cdot D(t) \cdot n}{S_{t-1} + Q(t)}\right\} \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

- Cp(t): Volume consumido no dia t (L);
- dp: Porcentagem da demanda suprida por água pluvial (%);
- D(t): Demanda diária per capita (L/(hab×dia));
- n: Número de ocupantes;
- Q(t): Volume captado no dia t (L);
- S_{t-1}: Volume de água pluvial disponível no reservatório no intervalo de tempo anterior (t-1) (m^3).

$$R_t = MAX\left\{\begin{matrix} 0 \\ min\left\{\dfrac{S_{t-1}+Q(t)-Cp_t}{V-Cp(t)}\right\}\end{matrix}\right\} \qquad \text{Equação 12}$$

Onde:

- S(t): Volume armazenado no final do dia t (L);
- V: Capacidade total do reservatório (L).

Essa abordagem permitiu uma avaliação dinâmica e leva em consideração as flutuações na precipitação diária, padrões variáveis de consumo, a capacidade do reservatório e o desempenho global do sistema. Assegura ainda uma estimativa do potencial de redução no consumo de água potável por meio da utilização de águas pluviais.

O trabalho desenvolvido por Ali e Sang (2023) utilizou um modelo dinâmico de balanço hídrico diário, fundamentado no princípio YAS e na equação de balanço hídrico proposta por Zhang *et al.* (2020). A metodologia compreendeu três etapas principais:

a) Captação de Água Pluvial.

Após o descarte inicial (first flush), o volume diário captado (I_t, em m^3) é determinado pela equação 13:

$$I_t = \left\{\begin{matrix} 0,\ se\ \ H_t \le \delta \\ \dfrac{\psi\left(H_t-\delta\right)A}{1000},\ se\ \ H_t > \delta\end{matrix}\right\} \qquad \text{Equação 13}$$

Onde:

- A: Área de captação (m^2);
- H_t: Precipitação diária (mm);
- ψ: Coeficiente de escoamento (0,9);
- δ: Volume do first flush (2 mm).

b) Disponibilidade Hídrica

A produção diária (Y_t) considera:

$$Y_t = \begin{Bmatrix} R_{t-1} + I_t, \ se \ \ R_{t-1} + I_t \leq D_t \\ D_t, \ se \ \ D_t < R_{t-1} + I_t \leq S_c \\ 0, \ se \ \ R_{t-1} + I_t > S_c \end{Bmatrix} \quad \text{Equação 14}$$

Onde:

- D_t: Demanda de água diária (m³);
- Sc: Capacidade do reservatório (m³);
- R_t: Volume armazenado ao final do tempo "t" (m³).

c) Considerações Operacionais

- First flush fixado em 2 mm para garantia de qualidade;
- Coeficiente ψ = 0,9 (10% de perdas);
- Parâmetros ajustáveis conforme: condições atmosféricas, características da superfície de captação, fatores climáticos locais e configurações específicas do sistema.

O modelo apresentou alguns implementos como modelagem dinâmica diária, consideração de parâmetros reais de operação e flexibilidade para ajustes específicos. Esta abordagem permite avaliações precisas do potencial de aproveitamento de águas pluviais em diferentes cenários de demanda e condições climáticas.

Estas modelagens de sistemas de captação de água da chuva se fundamentam em equações de balanço hídrico, que avaliam as entradas (precipitação), saídas (demanda, evaporação, transbordamento) e armazenamento de água de chuva. Em resumo, a seleção do modelo ideal depende de fatores como condições climáticas, padrões de consumo e objetivos do projeto. No entanto, todos os métodos convergem para um mesmo princípio: maximizar o aproveitamento da água pluvial por meio de um balanço hídrico preciso e adaptável.

3.4 EFICIÊNCIA EM SISTEMAS DE CAPTAÇÃO E ARMAZENAMENTO DE ÁGUA DE CHUVA

Os fatores ligados ao desempenho de um sistema de aproveitamento de água de chuva sofrem interferência de eventos excepcionais, como eventos chuvosos extremos, picos de consumo, secas prolongadas, e são influenciados por características de projeto, como área de captação e volume do reservatório. A confiabilidade, a vulnerabilidade e a resiliência foram propostas por Hashimoto, Loucks e Stedinger (1982) e estão descritas em seguida.

A confiabilidade (Equação 15), é definida como a probabilidade de um dado conjunto de saídas (X_t) de uma variável aleatória X no tempo t, pertencer a um conjunto de saídas satisfatórias S, ou seja, a probabilidade de o sistema operar em um estado satisfatório:

$$Conf = Prob\left[Xt \in S \right] \quad \text{Equação 15}$$

Já a Vulnerabilidade se refere à severidade esperada das falhas, medida pela magnitude das consequências, representada pela Equação 16:

$$vul = \sum_{j \in F} s_j e_j \quad \text{Equação 16}$$

Onde s_j indicada numericamente a gravidade da falha e e_j a probabilidade cujo resultado seja o mais insatisfatório e severo que ocorre dentro do conjunto de estados insatisfatórios **F**.

A resiliência (Equação 17) equivale à probabilidade de recuperação do sistema dentro de um conjunto de falhas em um passo de tempo, sendo caracterizado pelo inverso do tempo médio de recuperação após uma falha:

$$Res = probXt \in S \vee Xt + 1 \in F \quad \text{Equação 17}$$

Hashimoto, Loucks e Stedinger (1982) aplicaram esses critérios a um exemplo de operação de um reservatório de abastecimento de água projetado para atender às demandas de irrigação durante o verão, com uma capacidade de 40 milhões de m³. Para isso, utilizaram programação dinâmica estocástica para gerar políticas de operação que minimizam a perda esperada. O estudo revelou que sistemas com alta confiabilidade tendem a apresentar maior vulnerabilidade, uma vez que são projetados para evitar falhas, mas, quando estas ocorrem, as consequências podem ser severas. Por outro lado, políticas que incorporam estratégias de proteção contra futuros déficits tendem a reduzir a vulnerabilidade, mas podem resultar em um tempo maior de recuperação após falhas. Destaca-se que não é possível maximizar simultaneamente todos os critérios, e que as decisões devem ser tomadas com base em compensações entre esses aspectos.

No entanto, a aplicabilidade desse estudo em reservatórios de sistemas residenciais de aproveitamento de água de chuva pode ser limitada, uma vez que esses sistemas geralmente operam com volumes significativamente menores em comparação com o reservatório analisado. Aqueles podem exigir abordagens diferentes para a avaliação de desempenho e a definição de políticas de operação.

Luna (2022) desenvolveu coeficientes que permitem analisar o volume potencialmente aproveitável anualmente e a eficiência de reservatórios utilizados para o aproveitamento de água da chuva em residências. Esses coeficientes são: o Coeficiente de Eficiência Volumétrica (CEV) e o Coeficiente de Eficiência Volumétrica Específica (CEVE). Eles foram calculados utilizando séries

diárias de precipitação, para os padrões baixo, médio e alto de consumo, abrangendo todo o território brasileiro.

O CEV é definido como a razão entre o somatório do volume aproveitado anualmente, calculado com base em séries diárias ($\sum V_{AD}$), e o volume do reservatório (V_R) utilizado para armazenar água da chuva (Equação 18). Sua finalidade é identificar a quantidade de água que uma unidade de volume do reservatório pode aproveitar ao longo de um ciclo anual. Quanto maior a quantidade de água aproveitada e menor o volume do reservatório (resultando em um valor maior do CEV), maior é a tendência de viabilidade econômica do SCAAC.

$$CEV = \frac{\sum V_{AD}}{V_R} \qquad \text{Equação 18}$$

Onde:

- CEV: Coeficiente de Eficiência Volumétrica ($m^3.m^{-3}$);
- $\sum V_{AD}$: Somatório do volume de água aproveitado em base diária (m^3);
- V_R: Volume do reservatório (m^3).

$$CEVE = \frac{(CEV \cdot 1000)}{P} \qquad \text{Equação 19}$$

Onde:

- CEVE: Coeficiente de Eficiência Volumétrica Específica (mm^{-1});
- CEV: Coeficiente de Eficiência Volumétrica ($m^3.m^{-3}$);
- $\sum V_{AD}$: Somatório do volume de água aproveitado em base diária (m^3).

Os resultados mostraram que o CEV alcançou valores mais elevados em cenários que combinam maiores áreas de captação e maior pluviosidade com menores volumes de reservatórios, refletindo a disponibilidade de precipitação. O CEVE permitiu uma comparação mais equilibrada da eficiência volumétrica dos reservatórios entre localidades com diferentes níveis de precipitação, minimizando os efeitos da pluviosidade (Equação 19). Ele apresentou valores mais altos na região Nordeste, principalmente na área semiárida, permitindo uma análise mais justa da eficiência volumétrica em locais com baixos índices pluviométricos. Tanto o CEV quanto o CEVE demonstraram uma forte correlação com a precipitação média anual.

Silva C. S. (2023), além de adotar o Coeficiente de Eficiência Volumétrica (CEV) introduzido por Luna (2022), criou o Coeficiente de Ociosidade Volumétrica (COV) e o Coeficiente de Transbordamento Volumétrico (CTV). A pesquisa aplicou os coeficientes tendo como três métodos de dimensionamento já conhecidos, sendo eles o Método Prático Inglês, de Azevedo Neto e de Rippl, e demandas preestabelecidas, determinando os coeficientes com base no volume do reservatório e nos volumes de água aproveitável, ocioso e transbordado, abrangendo todo o

território brasileiro tendo como fim a criação de mapas para análise (Figura 6). Os resultados mostraram que os valores ideais para o CEV e o COV foram predominantemente alcançados por reservatórios menores, exceto em áreas com alta precipitação anual e baixa variabilidade de chuva. Para o CTV, os resultados mais eficazes foram obtidos com o método de Rippl, empregando dados diários. A pesquisa ressalta que essa abordagem elimina a subjetividade na seleção do método de dimensionamento e facilita a análise de viabilidade econômica, sendo especialmente útil em regiões com falta de dados de precipitação.

O COV foi concebido para avaliar a fração do volume do reservatório que permanecerá ocioso, em média anualmente, em relação ao volume de armazenamento (Equação 20). Isso possibilita uma análise detalhada de reservatórios que podem estar superdimensionados, com os valores mínimos de COV sendo considerados ideais (SILVA, C. S., 2023).

$$COV = \frac{Voc}{V} \qquad \text{Equação 20}$$

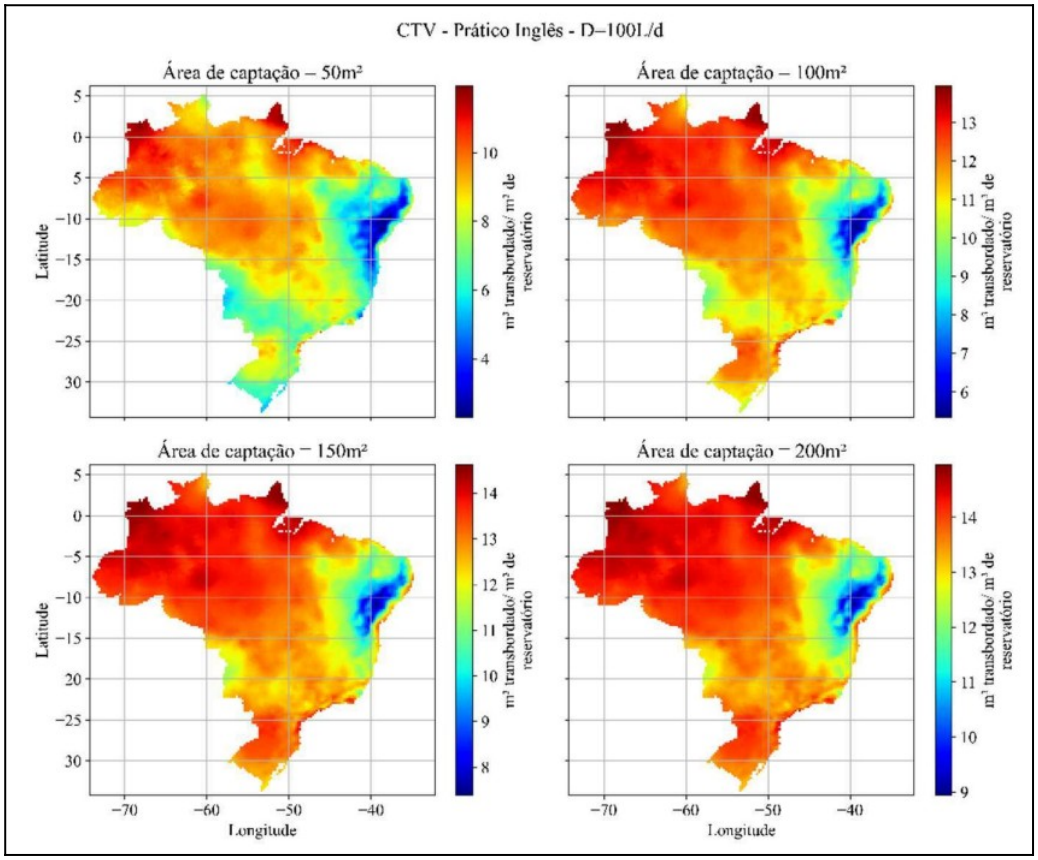
Onde:

- V_{oc}: Volume ocioso anual médio durante o período de análise (m^3);
- V: Volume do reservatório (m^3).

O CTV mede a proporção do volume de água captada que é transbordada em relação ao volume do reservatório, relacionando-se ao volume efetivamente aproveitável. Ele ajuda a avaliar reservatórios subdimensionados e verifica se o aumento da área de captação realmente incrementa o volume de água aproveitável, com valores mínimos de CTV considerados ótimos. Para calcular o CTV, o volume transbordado diário é determinado pela diferença entre o volume de entrada e o volume aproveitável, avaliando-se essa diferença ao longo de um ano em relação ao volume do reservatório. Na Equação 21, V_{tr} representa o volume transbordado anual médio [m^3] e V é o volume do reservatório [m^3] (SILVA, C. S., 2023).

$$CTV = \frac{\left(V_{ent} - V_{AD}\right)}{V} = \frac{Vtr}{V} \qquad \text{Equação 21}$$

Figura 6 – Representação de resultados de CTV utilizando o método de dimensionamento Prático Inglês para uma demanda de 100 L/d.



Fonte: Silva C. S. (2023).

Rosli, Abdullah e Noor (2023) e Goh e Ideris (2021) investigaram o desempenho de SCAAC por meio da eficiência volumétrica de economia de água (Equação 22) e da eficiência de armazenamento do tanque (Equação 23). A eficiência volumétrica de economia de água é definida como a porcentagem da demanda hídrica atendida pelo sistema de captação de água da chuva, enquanto a eficiência de armazenamento do tanque refere-se ao volume de escoamento retido pelo reservatório em relação ao volume total de água da chuva que entra no reservatório. Um valor baixo de eficiência volumétrica de economia de água indica que o aproveitamento da água da chuva é insuficiente em relação à demanda, enquanto uma alta eficiência de armazenamento ocorre quando as perdas por transbordamento são mínimas, aproximando-se de zero.

$$E_{ws} = \frac{\sum_{i=1}^{n} Y_i}{\sum_{i=1}^{n} D_i} \cdot 100 \qquad \text{Equação 22}$$

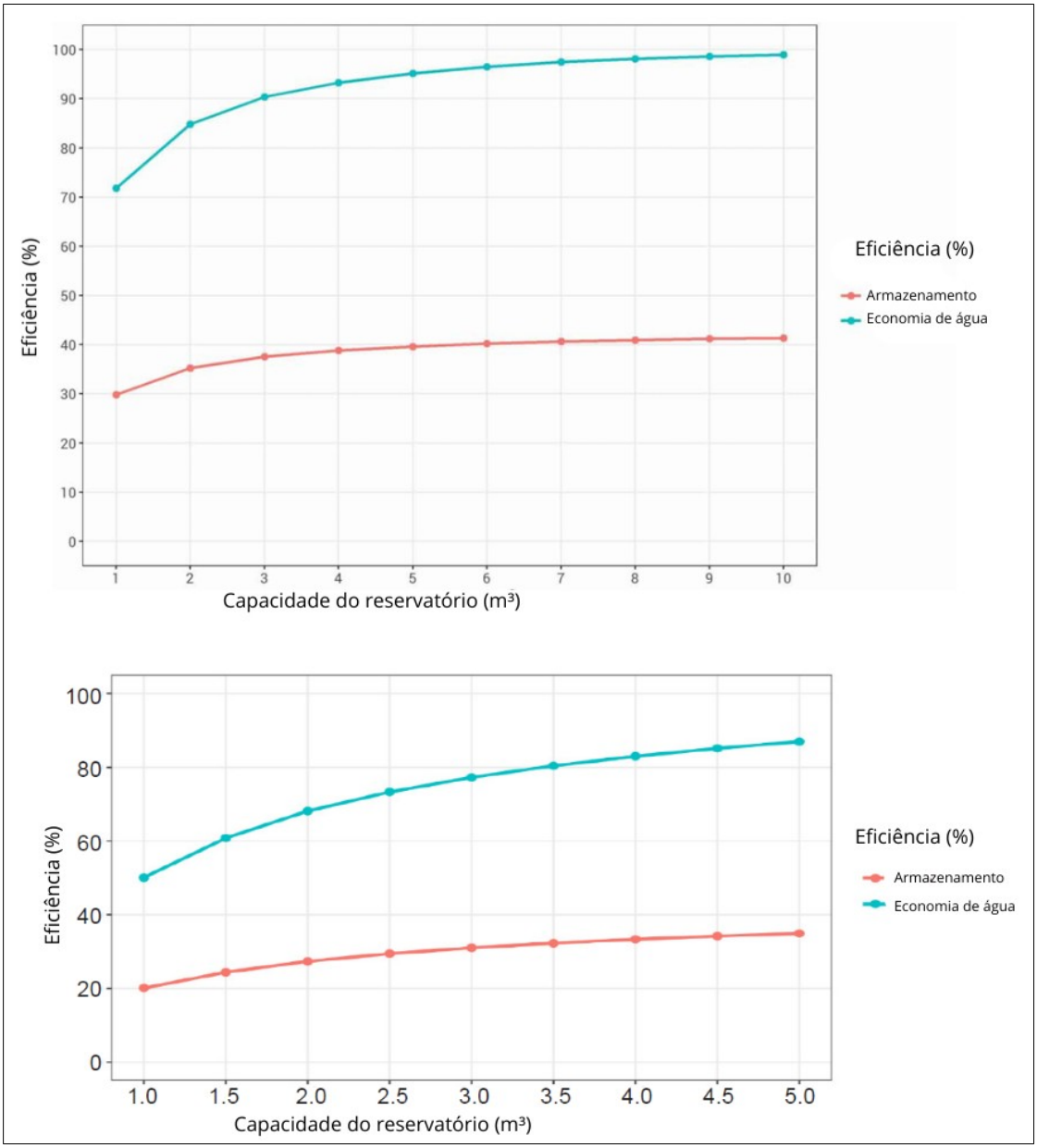
Onde E_{ws} é eficiência volumétrica de economia de água (%), n é o intervalo total de tempo da simulação, Y é o volume de precipitação aproveitado para a demanda de água, e D é a demanda de água do sistema de captação de água da chuva.

$$E_s = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} Qs_i}{\sum_{i=1}^{n} R_i} \right] \cdot 100 \qquad \text{Equação 23}$$

Onde E_s é a eficiência de armazenamento do tanque, R é o volume de escoamento, e Qs é o transbordamento ou excesso.

Ambos os estudos (ROSLI; ABDULLAH; NOOR, 2023; GOH; IDERIS, 2021) utilizaram o software Tangki NAHRIM 2.0 (TN2) para simular um sistema de captação de água da chuva, empregando um modelo de balanço hídrico diário com dados de precipitação obtidos de um banco de dados integrado e adotando a convenção de rendimento após derramamento (Yield-after-spillage – YAS). As simulações foram realizadas para diferentes tamanhos de reservatórios: no estudo de Goh e Ideris (2021), os volumes variaram de 1 a 10 m³, enquanto em Rosli, Abdullah e Noor (2023), os volumes variaram de 1 a 5 m³, ambos com uma demanda constante de água de 200 L/dia. Os dois estudos identificaram um volume "ótimo" de reservatório de 3 m³, uma vez que aumentos adicionais no volume não resultaram em melhorias significativas nos valores de eficiência analisados. No primeiro estudo, a eficiência volumétrica de economia de água atingiu 90%, enquanto no segundo, esse valor foi de 77,3%. Por outro lado, a eficiência de armazenamento foi geralmente baixa, já que o elevado volume de chuva, combinado com a baixa demanda de água, aumentou as perdas por transbordamento, contribuindo para a redução dessa eficiência conforme Figura 7.

Figura 7 – Eficiência de economia de água e eficiência de armazenamento versus tamanhos de tanques propostos.

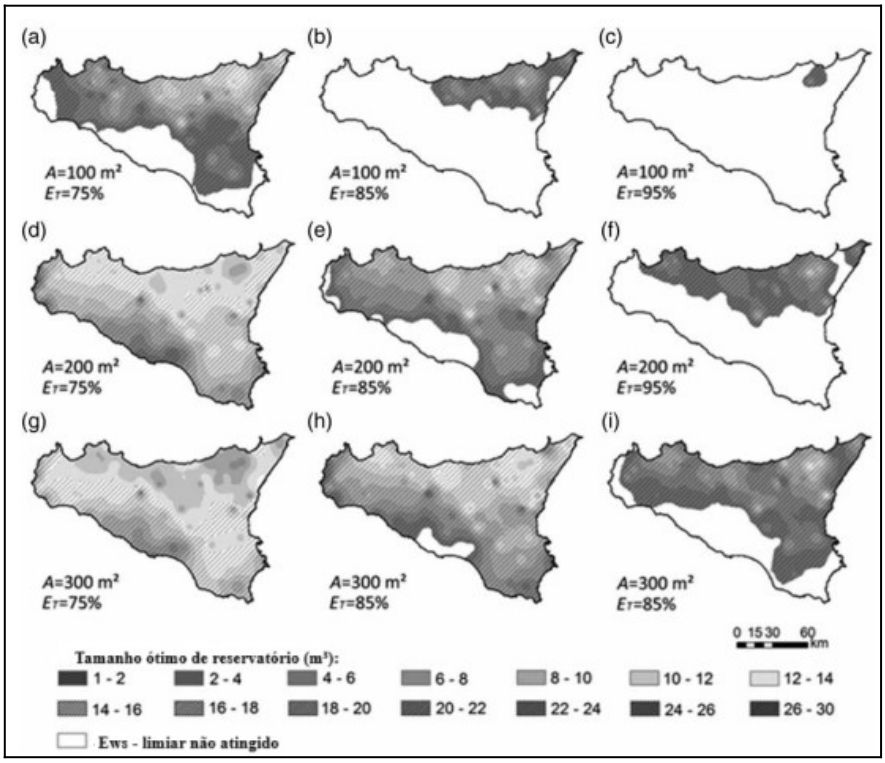


Fonte: a) Adaptado de Goh e Ideris (2021); b) Adaptado de Rosli, Abdullah e Noor (2023).

Notaro, Liuzzo e Freni (2017) também investigaram a eficiência volumétrica de economia de água, mas para a região da Sicília, considerando áreas de captação de 100, 200 e 300 m². O sistema foi projetado para abastecer água em descargas de vasos sanitários, irrigação de jardins e ambos os usos simultaneamente. Os resultados demonstraram que, em algumas áreas da região, o sistema pode proporcionar economias significativas de água, mesmo com a instalação de reservatórios com

capacidade inferior a 10 m³. Especificamente, um tanque com capacidade de 20 m³ foi capaz de atender completamente à demanda de água em muitas áreas da região (Figura 8).

Figura 8 – Capacidade ótima do tanque (m³) para diferentes limiares de E_T (%) e A (m²) para uso em irrigação de jardins.



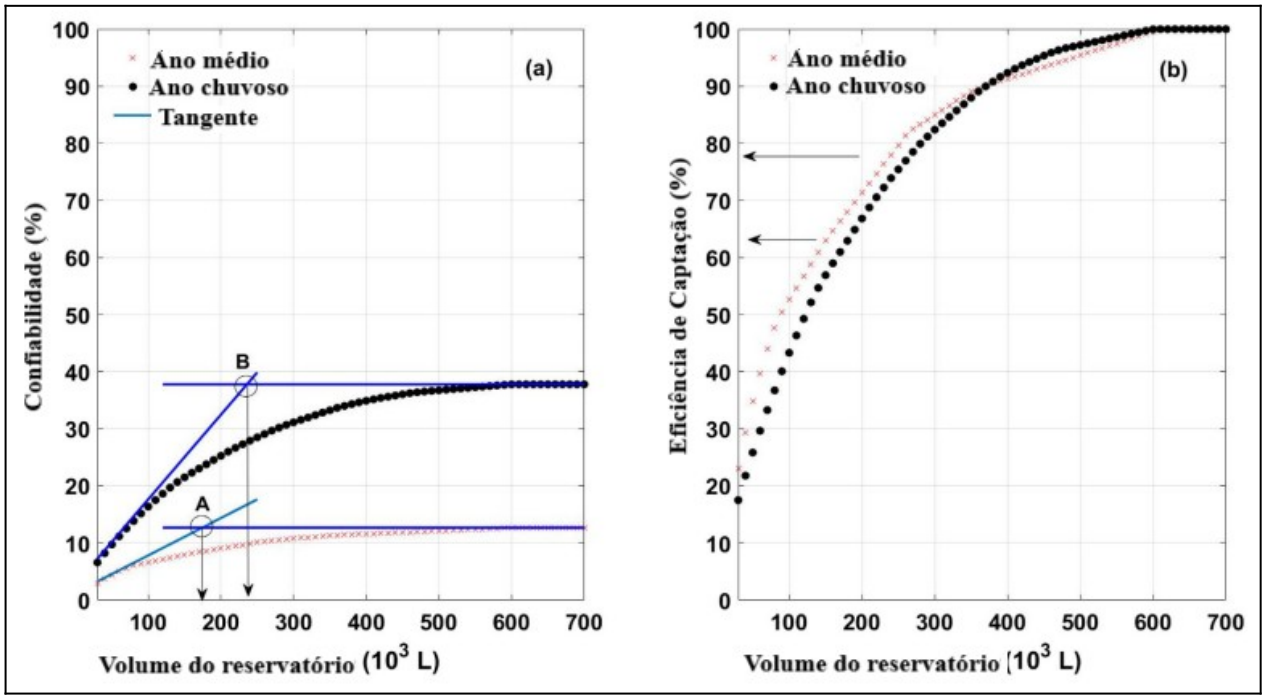
Fonte: Notaro, Liuzzo e Freni (2017).

Outro estudo que também analisou a eficiência volumétrica de economia de água e a eficiência de armazenamento do tanque foi Dauda *et al.* (2023). Os resultados mostraram que, para uma residência com área de 86,86 m², o tamanho ótimo do reservatório foi de 2 m³, com valores alcançando 51% e 63,2%, para a eficiência de economia de água e para eficiência de armazenamento, respectivamente. Verificou-se que, mesmo para uma família de 10 pessoas, o reservatório de 2 m³ ainda é capaz de proporcionar uma economia de água de até 42,1%. Já a eficiência de armazenamento apresentou um leve aumento, passando de 63,2% para 67,8% para essa configuração.

Sultana (2022) analisou três parâmetros de desempenho de reservatórios utilizados em sistemas de aproveitamento de água da chuva: a eficiência de captação do reservatório (Equação 24), a confiabilidade da água do reservatório (Equação 25) e o desempenho do reservatório (Equação 26), sendo este último avaliado com base na redução da demanda em relação ao fornecimento principal. O estudo investigou o tamanho ótimo do reservatório para maximizar o potencial de economia de

água no semiárido do sul da Califórnia. Por meio de um modelo, foi avaliado o desempenho de diversos tamanhos de reservatórios com uma área de captação de 10.000 m², considerando anos secos, médios e chuvosos. Os resultados indicam que reservatórios com capacidades entre 130 e 630 m³ apresentam eficiência de captação de 100%, mas a confiabilidade do sistema varia de 2,8% a 37,75% nos anos secos e chuvosos, respectivamente. O intervalo de tamanho ótimo do reservatório, que variou entre 180 e 240 m³, foi determinado a partir da confiabilidade, sendo capaz de capturar mais de 64% do escoamento do telhado (Figura 9).

Figura 9 – **(a)** O intervalo de tamanho ótimo do reservatório é indicado por setas entre os pontos A e B. **(b)** As setas mostram o intervalo de eficiência de captação que pode ser obtido ao selecionar.



Fonte: Sultana (2022).

A eficiência de captação do reservatório de água da chuva (E) cresceu com o aumento do tamanho do reservatório e atingiu o máximo de 100% quando o volume do reservatório resultou em extravasamento zero. Essa eficiência foi calculada conforme a Equação 24:

$$E = \sum_{i=1}^{n} \frac{V_i}{V_i + S_i} \cdot 100 \qquad \text{Equação 24}$$

Onde:

- i: Número do dia chuvoso e n é o número total de dias chuvosos em um ano;
- V_i: Volume do reservatório no i-ésimo dia chuvoso (m³);
- S_i: Volume de extravasamento no i-ésimo dia chuvoso (m³).

A confiabilidade R representada como a porcentagem de dias que a demanda de água é atendida pelo volume coletado pelo sistema, a confiabilidade foi calculada através da equação abaixo:

$$R = \frac{\sum_{j=1}^{N} V_j}{\sum_{j=1}^{N} D_j} \cdot 100 \qquad \text{Equação 25}$$

Onde:

- N: Número total de dias no ano;
- j: Dia do ano;
- V_j: Volume total de água coletada durante o ano (m^3);
- D_j: Demanda diária de irrigação (m^3/dia).

O escoamento de uma grande área de telhado coletado em um reservatório grande minimiza o extravasamento e aumenta a confiabilidade, porém as características locais da chuva afetam mais a confiabilidade do sistema do que o tamanho do reservatório e da área de captação. Assim, em regiões semiáridas ou áridas com chuvas sazonais e alta demanda de água, uma confiabilidade de 100% pode não ser alcançada, mesmo com um sistema de coleta grande (SULTANA, 2022).

O desempenho do reservatório de água da chuva foi calculado com base na redução anual da demanda de água da rede principal de abastecimento (DR).

$$DR = \frac{\sum_{j=1}^{N} D_j - \sum_{j=1}^{N} V_j}{\sum_{j=1}^{N} D_j} \cdot 100 \qquad \text{Equação 26}$$

Onde: DR representa a redução anual da demanda em relação à linha principal de abastecimento (%).

Li *et al.* (2024) conduziram um estudo que para além da análise da eficiência de economia de água (Equação 24) e da confiabilidade, introduziram novos índices de compatibilidade, sendo eles o Índice de Déficit de Água da Chuva (Equação 27) e o Índice de Excedente de Água da Chuva (Equação 28), para avaliar quantitativamente os impactos dessa compatibilidade no desempenho dos SAAC em 16 cidades de diferentes zonas climáticas da China, sob três cenários de demanda diária de água (baixa, média e alta) e com os volumes de reservatório variando de 1 a 300 m^3. Os resultados mostraram que aumentar o tamanho do reservatório melhora o desempenho dos SAAC, mas essa melhoria é limitada pela compatibilidade entre a disponibilidade de água da chuva e a demanda hídrica e que em regiões áridas, que mesmo com reservatórios grandes, a eficiência de

economia de água pode permanecer baixa devido à escassez de chuva. A eficiência de economia de água e a confiabilidade diminuem linearmente com o aumento do índice de deficit.

- **Índice de Deficit de Água da Chuva (RD)**: Razão entre o déficit total e a demanda total de água em dias com déficit ou equilíbrio:

$$RD = \frac{\sum \left(D_t - I_t\right)}{\sum D}, \quad D_t \geq I_t \qquad \text{Equação 27}$$

Onde: D_t é o volume de demanda de água no dia t [m³] e I_t é volume de água da chuva gerado no telhado no dia t [m³].

- **Índice de Excedente de Água da Chuva (RS)**: Razão entre o excedente total e a demanda total de água em dias com excedente.

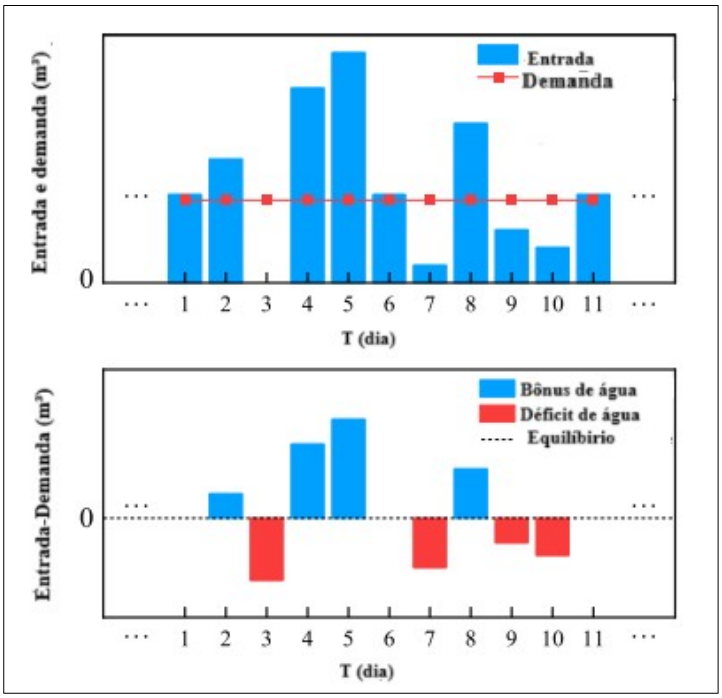
$$RS = \frac{\sum \left(I_t - D_t\right)}{\sum D}, \quad I_t \geq D_t \qquad \text{Equação 28}$$

A análise de compatibilidade entre a disponibilidade diária de água da chuva e a demanda diária de água foi classificada em três situações, conforme ilustrado na Figura 10:

- **Déficit de água da chuva**: ocorre quando a entrada diária de água é menor que a demanda diária;
- **Excedente de água da chuva**: ocorre quando a entrada diária de água no é maior que a demanda diária;
- **Equilíbrio**: ocorre quando a entrada diária de água é igual à demanda diária (It = Dt).

Fonseca *et al.* (2023) realizaram um estudo voltado para a análise de confiabilidade de sistemas de captação de água da chuva, com o objetivo de otimizar a capacidade de armazenamento. Para isso, introduziram o conceito de elasticidade, que relaciona a confiabilidade volumétrica a uma função de custo. A elasticidade foi calculada para três tanques localizados no campus da Universidade de Santander, na Colômbia, por meio de um balanço hídrico diário que levou em consideração demandas de água não potável, características da infraestrutura e a variabilidade climática da região. A eficiência de abastecimento foi determinada com base na razão entre o déficit diário acumulado e a demanda diária (Equação 29), utilizando uma função logarítmica para descrever a relação entre a eficiência Y(S) e o tamanho do tanque.

Figura 10 – Compatibilidade entre a disponibilidade de água da chuva e a demanda hídrica.



Fonte: Li *et al.* (2024).

$$Y_j = \frac{\sum De \cdot f_i}{\sum D_i} \qquad \text{Equação 29}$$

Onde:

- Y_j: Eficiência de abastecimento no período j;
- Def_i: Déficit diário acumulado de água (m³/dia);
- D_i: Demanda diária de água (m³/dia);
- O subíndice i indica um intervalo de tempo diário.

Após estimarem a eficiência e o custo, Fonseca *et al.* (2023) avaliaram a otimização do tamanho do tanque por meio da elasticidade e(S), definida como a razão entre a variação da eficiência anual (Yj) e a variação da função de custo C(S) (Equação 30). A otimização foi alcançada ao maximizar a relação entre eficiência e custo, com o tamanho ótimo do reservatório ocorrendo quando a elasticidade é igual a 1. Este ponto indicou que, a partir dele, aumentos adicionais no tamanho do tanque resultam em custos desproporcionais em relação aos ganhos de eficiência.

Os resultados demonstraram que, para reservatórios com capacidades em torno de 100 m³, a elasticidade apresenta maior sensibilidade, com diferenças significativas entre anos secos e úmidos. Concluiu-se que reservatórios menores são mais estáveis em termos de eficiência/custo, enquanto tanques maiores tendem a ser mais sensíveis às variações climáticas. Em alguns casos, foi possível

reduzir o tamanho do tanque entre 30% e 54% sem comprometer significativamente a eficiência do sistema.

$$e(S)=\frac{\frac{\Delta Y_j}{Y_j}}{\frac{\Delta C}{C}} \qquad \text{Equação 30}$$

Imteaz *et al.* (2012) realizam uma análise de desempenho de projeto de tamanho ideal de tanque doméstico de águas pluviais em zona de floresta tropical úmida do sudoeste da Nigéria, usando dados diários de precipitação, área contribuinte do telhado, fator de perda de chuva, disponibilidade volumétrica de armazenamento, transbordamento de tanques e demanda de água pluvial. O sistema foi configurado para fornecer a demanda ininterrupta durante o período crítico (meses secos). Foi analisado a confiabilidade do sistema utilizando volumes de reservatórios variando de 1 m³ a 10 m³, sendo que a partir de um tamanho de tanque de 7 m³ sob baixa demanda (1,8 m³/mês) foi possível atingir 100% de confiabilidade. No entanto, para um maior consumo (2,45 m³/mês), um tamanho do reservatório de 10 m³ foi necessário para atingir 100% de confiabilidade. A partir da análise do transbordamento, os resultados mostraram um potencial de volume a ser aproveitado utilizando-se de reservatórios maiores que 10 m³.

Imteaz *et al.* (2011) e Imteaz, Ahsand e Shanablehb (2013) realizaram estudos quanto eficiência de reservatórios de água da chuva em Melbourne, Austrália, utilizando dados diários de precipitação em três cenários climáticos – anos secos, médios e chuvosos – com precipitação média anual de 650 mm e utilizando um modelo de balanço hídrico, que considera área de telhado, volume de armazenamento, transbordo e demanda de irrigação.

No primeiro estudo, dois tanques subterrâneos de grande volume (185 m³ e 110 m³) foram analisados, os resultados indicaram maior eficiência em anos chuvosos e médios e menor em anos secos. A análise do período de retorno sugere que os custos de construção dos tanques podem ser recuperados em 15 a 21 anos, dependendo de fatores como o aumento do preço da água. O estudo enfatizou a importância de otimização e análise financeira para maximizar os benefícios desses tanques (IMTEAZ *et al.*, 2011).

Já no segundo, foi analisada a confiabilidade do sistema, definida como a proporção de dias em que o tanque atende à demanda parcial desejada. A simulação considerou diferentes tamanhos de tanques (1 m³ a 10 m³) com demanda diária de 150 L por pessoa, para duas áreas de telhado (100 m² e 200 m²) e dois cenários populacionais (2 e 4 pessoas). Os resultados mostraram que, para telhados de 100 m², mesmo com tanques grandes (10 m³) não atingem 100% de confiabilidade (Figura 11). Já com telhados de 200 m² e reservatórios de 10 m³, é possível alcançar plena

confiabilidade. A análise revelou que entre 4 e 7 m³, o tamanho do tanque deixa de influenciar significativamente a confiabilidade, a depender da localização. O estudo introduziu o conceito de Potencial de Acumulação de Água da Chuva (*Rainwater Accumulation Potential* – RAP), definido como a relação entre área de telhado e demanda por água de chuva, com um RAP recomendado entre 0,8 e 0,9 para a região de Melbourne, indicando que maiores valores de RAP aumentam a confiabilidade do sistema (IMTEAZ; AHSAND; SHANABLEHB, 2013).

Khastagir e Jayasuriya (2010) conduziram um estudo utilizando dados de 20 estações pluviométricas distribuídas pela Grande Melbourne, com informações diárias de precipitação dos últimos 30 anos. Para cada estação, calcularam os tamanhos ideais dos tanques de água da chuva usando um modelo de balanço hídrico, considerando diferentes demandas e tamanhos de telhados. A confiabilidade do abastecimento variou entre 85% e 95%, e a precipitação média anual variou de 450 mm a 1050 mm entre as estações. A demanda por água foi calculada para telhados residenciais de 100 m², 150 m² e 200 m², limitando os tanques a um volume máximo de 20 m³. Observou-se que, para uma mesma precipitação, áreas de captação maiores exigem tanques menores. A relação entre variáveis foi modelada através de uma curva de regressão exponencial em escala logarítmica, representada pela Equação 31:

$$Y = a\,e^{bX} \qquad \text{Equação 31}$$

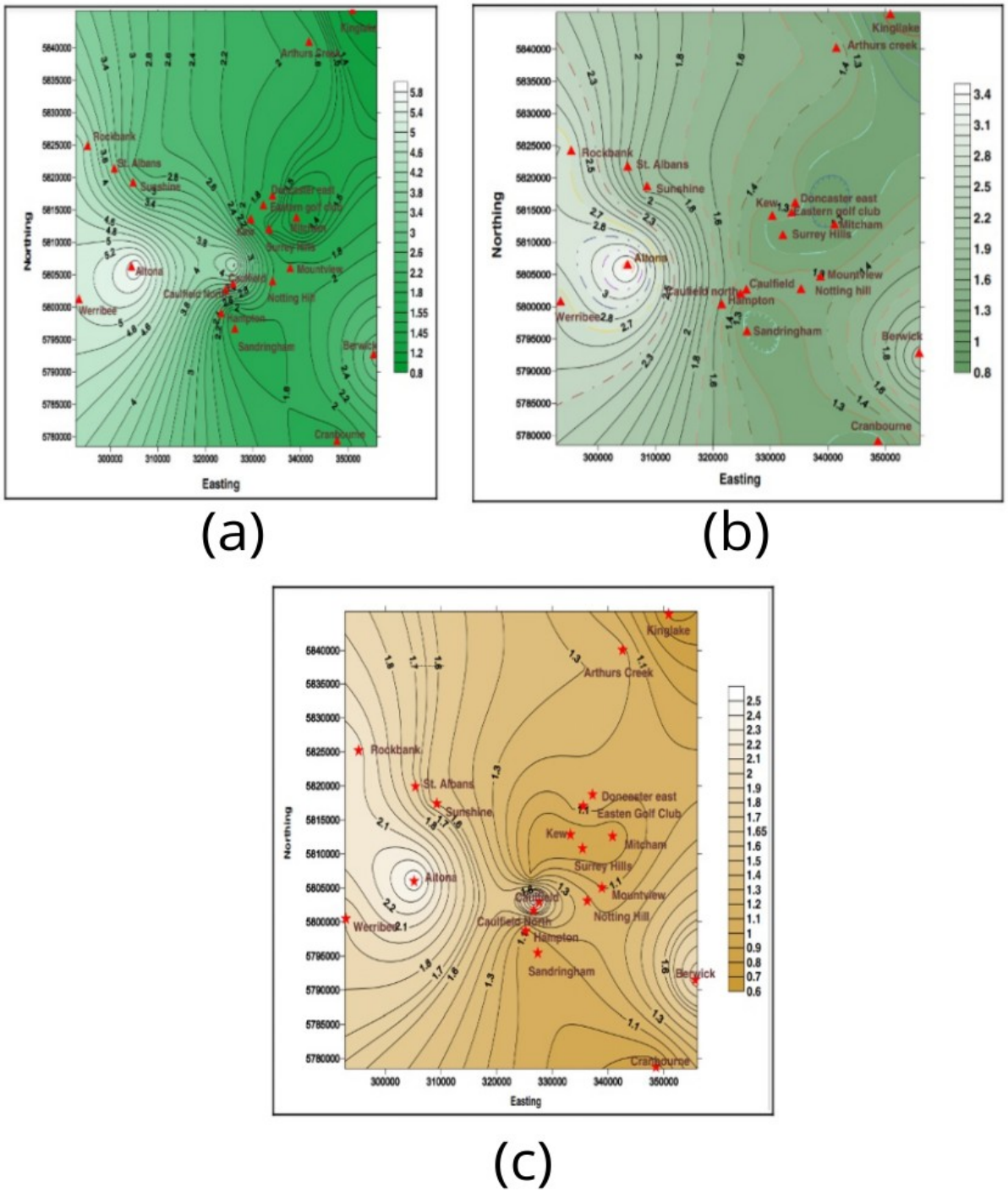
Onde:

- a e b são constantes empíricas;
- Y é o número adimensional igual a $C/A^{3/2}$;
- X é igual a $D/(A \cdot R)$, em que C representa a capacidade do tanque, D a demanda anual de água, A a área do telhado e R a precipitação média anual.

Com essa curva foi possível aos usuários determinarem o tamanho adequado do tanque de água da chuva com base na área do telhado, demanda de consumo e precipitação média anual, ajustando a confiabilidade desejada conforme necessário (Figura 11).

O tamanho ideal do tanque é influenciado por fatores como precipitação média anual, tamanho do telhado, demanda de água e padrões de precipitação. O estudo de Allen e Haarhof (2015) propõe uma equação generalizada, Y = a (X −1)b+c, em que X é o parâmetro de escoamento e Y o parâmetro de armazenamento, com constantes a, b e c específicas de cada local. Assim, o parâmetro de escoamento X é definido pela Equação 32:

Figura 11 – Variação de tamanhos ideais de tanques para uma confiabilidade de abastecimento de água de 90% a partir de um telhado de (a) 100 m², (b) 150 m² e (c) 200 m² com demanda de água para descarga de vasos sanitários e irrigação de jardins.



Fonte: Khastagir e Jayasuriya (2010).

$$X = \frac{PMA * A}{365.000 * DMDA}$$ Equação 32

Onde:

- PMA: Precipitação média anual (mm);
- A: Área do telhado (m^2);
- DMDA: Demanda média diária anual (L/dia).

Enquanto o parâmetro de armazenamento Y representa o número de dias que um tanque cheio pode suprir a demanda média. Após testar a equação ao longo de 16 anos de dados em três estações, o trabalho concluiu que não há correlação entre a PMA e a DMDA, pois, a sazonalidade tem mais influência que a média anual.

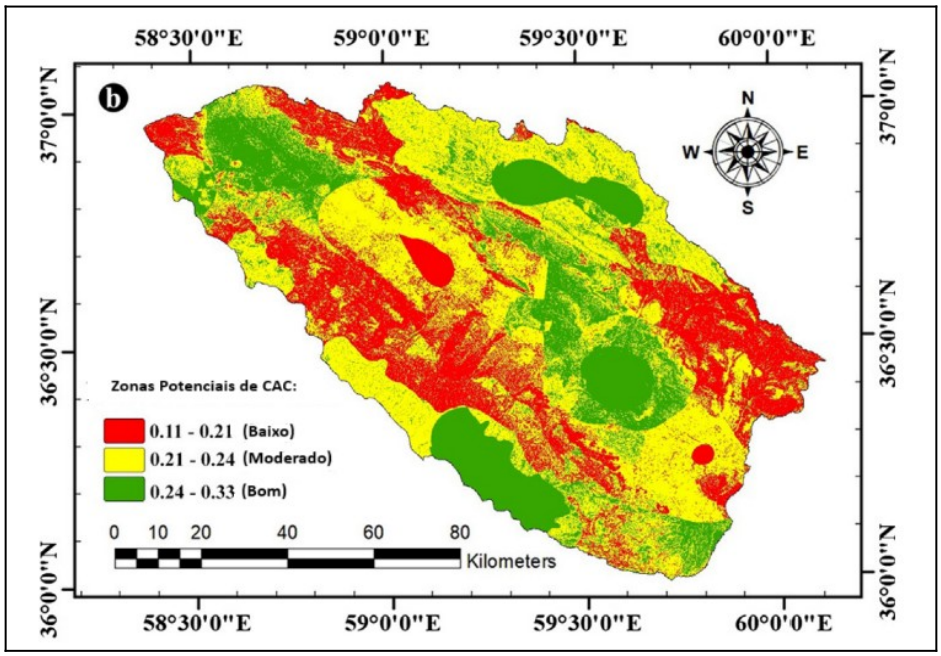
No Brasil, Silva e Ghisi (2016) conduziram um estudo em oito cidades com diferentes padrões pluviométricos para identificar os parâmetros de projeto mais relevantes em SCAAC, focando na economia potencial de água potável e no dimensionamento ideal de tanques subterrâneos. Foi realizado um experimento numérico utilizando simulação computacional de coleta de água da chuva. Os parâmetros avaliados incluíram área de telhado, consumo de água potável, número de habitantes, demanda por água de chuva, e as razões entre esses parâmetros. Os resultados indicaram que o consumo de água potável, o número de habitantes e a demanda por água da chuva foram os fatores mais significativos para definir a capacidade adequada do tanque subterrâneo e estimar o potencial de economia de água potável.

Toosi *et al.* (2020) identificaram áreas com potencial para a implementação de SAAC (Figura 10), integrando critérios socioeconômicos e biofísicos, no nordeste do Irã, com um clima variando de semiárido a árido. Na avaliação dessas zonas foram analisados fatores biofísicos como precipitação, uso do solo, inclinação do terreno, tipo e profundidade do solo, e densidade de drenagem. Os sistemas de captação avaliados incluem barragens de retenção, lagoas, tanques, diques Nala, tampão de ravina, tanques de percolação e terraços. O estudo utilizou uma Análise de Decisão Multicritério apoiada em SIG para identificar o potencial de cada zona para o aproveitamento de água da chuva. A incorporação dos fatores de adequação socioeconômica aumentou a precisão do modelo ao abranger uma gama mais ampla de critérios relevantes, permitindo uma metodologia mais generalizável. Os resultados indicaram que 48% da região não é adequada para SAAC, enquanto o restante foi classificado em áreas de potencial: (a) 'bom' (26% da área total), (b) 'moderado' (43%) e (c) 'baixo' (31%) (Figura 12).

A Jordânia enfrenta um grave problema de escassez de água, com o uso atual excedendo as fontes renováveis. Uma alternativa para aumentar o abastecimento é a coleta de água da chuva, ainda pouco explorada no país. Abdulla e Al-Shareef (2009) avaliaram o potencial da coleta de água da chuva para reduzir o consumo de água potável nas 12 províncias e ofereceram recomendações para aprimorar a qualidade da água coletada. Os resultados indicaram que, se toda a chuva fosse

captada das superfícies dos telhados, seria possível coletar até 15,5 milhões m³ de água anualmente, correspondendo a 5,6% do abastecimento doméstico de 2005. O potencial de coleta variou de 0,023 milhões m³ a 6,45 milhões m³, com a economia de água potável variando entre 0,27% e 19,7% nas diferentes regiões. No entanto, a água da chuva deve ser tratada antes de ser usada para consumo, devido à presença de coliformes fecais, apesar de atender a padrões inorgânicos da OMS.

Figura 12 – Mapa de zonas potenciais para captação de água da chuva (CAC) na área de estudo.



Fonte: Adaptado de Toosi *et al.* (2020).

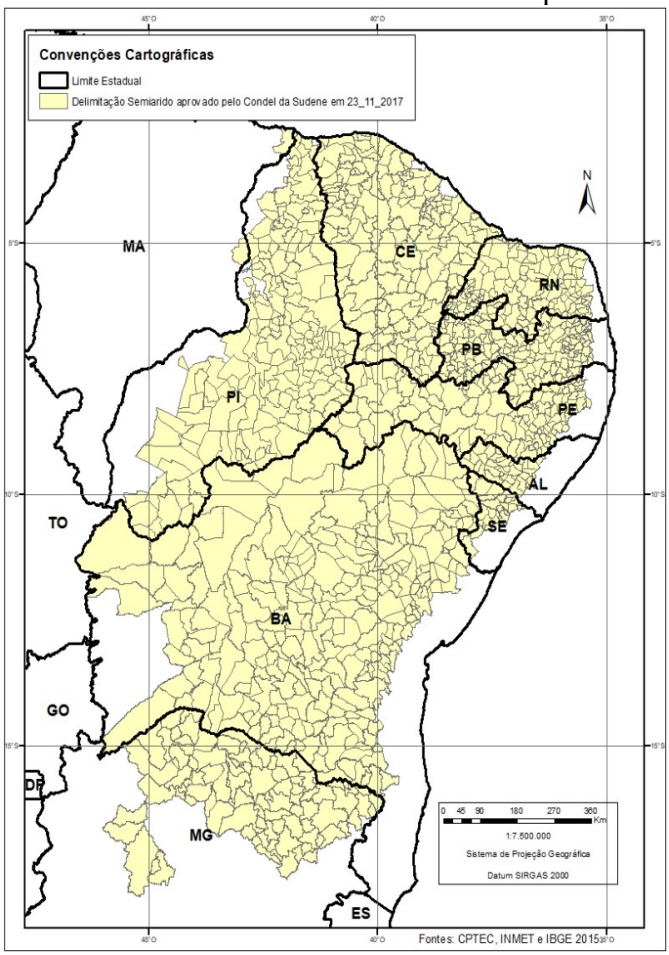
Os parâmetros apresentados aqui, embora ofereçam ferramentas poderosas para a análise de sistemas de aproveitamento de água de chuva, é importante levar em consideração as limitações e desafios associados à sua aplicação, principalmente em regiões com alta variabilidade climática, baixa disponibilidade pluviométrica, baixa demanda de água de chuva e infraestrutura limitada. A combinação dos diferentes parâmetros e a adaptação às condições locais são essenciais para o sucesso de implantação e manutenção satisfatórias desses sistemas.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 ÁREA DE ESTUDO

O Semiárido Brasileiro compreende parte dos nove estados da região nordeste e também a parte setentrional de Minas Gerais. Ocupa 12% do território nacional e abriga cerca de 28 milhões de habitantes, sendo que 62% da população está em cidades e 38% vive na zona rural, sendo portanto um dos semiáridos mais povoados do mundo (INSA, 2024). O Semiárido Legal é composto por 1.262 municípios, sendo que desses 278 estão na Bahia, 194 na Paraíba, 185 no Piauí, 175 no Ceará. 147 no Rio Grande do Norte, 123 em Pernambuco, 38 em Alagoas, 25 em Sergipe, 91 em Minas Gerais e apenas 2 no Maranhão como mostrado na Figura 13 (Resolução 115, de 23 de novembro de 2017, da Sudene).

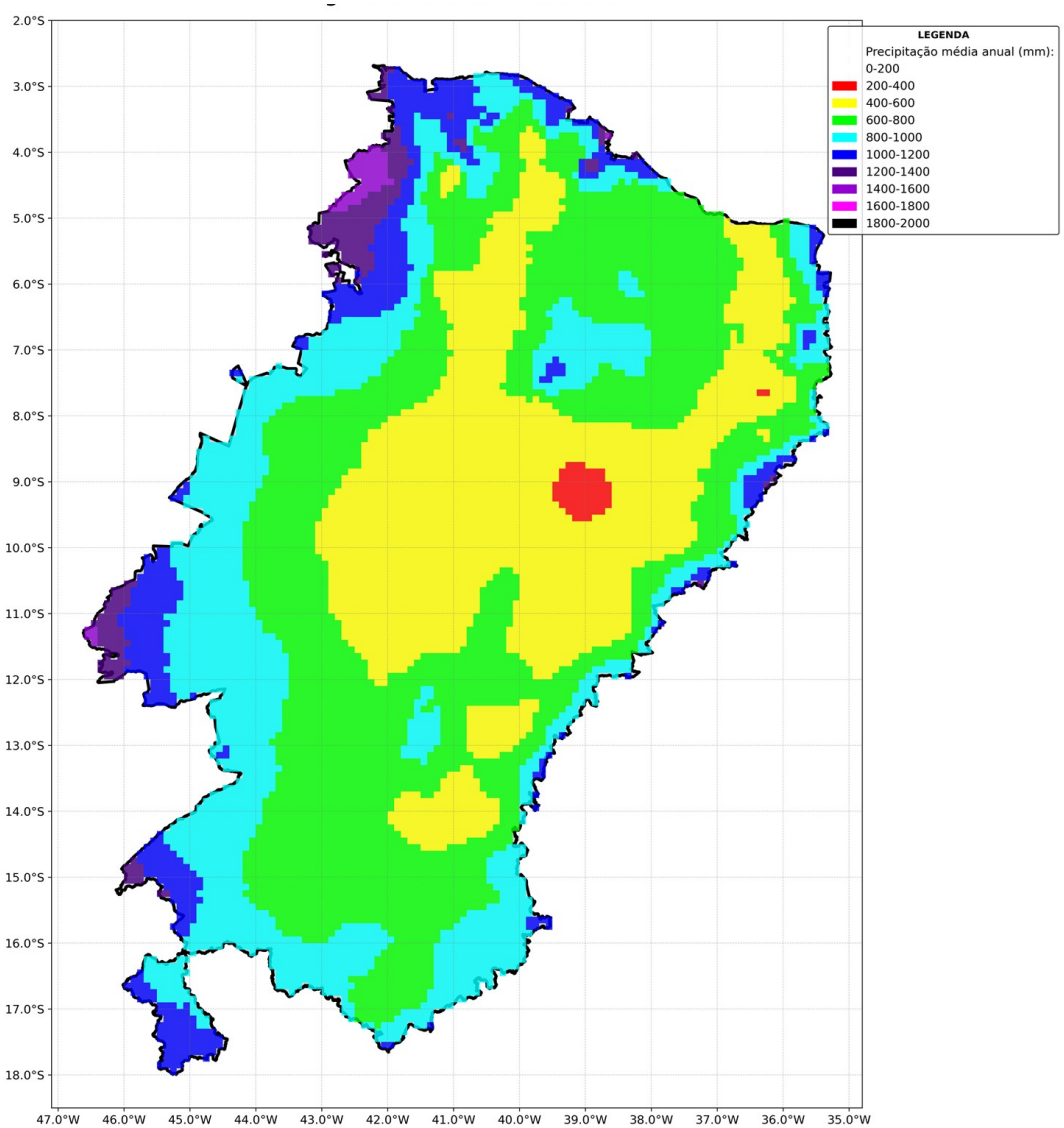
Figura 13 – Semiárido brasileiro com divisão limítrofe dos municípios.



Fonte: https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/3c8b249e-8ec3-4db1-b188-bab3c3c3240f.

A região é caracterizada essencialmente pela irregularidade das chuvas e pelas altas taxas de evapotranspiração, aspectos que contribuem para o risco constante de secas (Figura 14). Porém o Semiárido brasileiro é um dos mais habitáveis do mundo e também um dos mais chuvoso. Tem uma precipitação média de 800 mm anuais e um índice de evaporação de 3.000 mm por ano (ASA, 2024). O déficit hídrico advindo desta situação gera grandes desafios principalmente para a população que vive da agricultura e da pecuária. Desta forma, tecnologias que auxiliem o armazenamento de água da chuva são fundamentais para as comunidades em questão, uma vez que a região é também particularmente suscetível às mudanças climáticas.

Figura 14 – Precipitação média anual referente ao período de 1992 a 2022 para o Semiárido brasileiro.



4.2 BANCO DE DADOS PLUVIOMÉTRICOS

Xavier *et al.* (2022) realizaram em seu trabalho escolha de método, através da aplicação de seis métodos de interpolação e validação cruzada dos resultados, determinando o método ADW e em seguida o método IDW com melhores resultados para estimar a precipitação para estabelecimento do banco de dados interpolado. Após a escolha do método, foi gerado um banco de dados de precipitação disposto em grade com resolução de 0,10º por 0,10º, em território brasileiro e com período de abrangência das séries disponíveis de 1980 a 2015.

Neste trabalho foi utilizado recorte espacial e temporal desse banco de dados (Xavier *et al.,* 2022), referente ao Semiárido brasileiro e ao período de 1993 e 2022, respectivamente, o que corresponde a 9315 pontos de dados diários.

A base de dados em si apresentou-se muito grande, com dados na casa dos bilhões linhas. Para tanto, como forma de tratar os dados, assim como realizar o balanço hídrico e gerar os resultados foi utilizado linguagem de programação Python que se mostrou bastante eficiente ao longo deste trabalho.

4.3 CENÁRIOS ANALISADOS PARA GERAÇÃO DE MAPAS E DEMANDA POR ÁGUA DA CHUVA

Os cenários estudados levaram em consideração quatro áreas de captação – 50 m², 75 m², 100 m² e 200 m². Para cada área de captação foi adotado uma demanda por água de chuva considerando apenas uma demanda doméstica (50 L/dia ou 100 L/dia) ou o somatório do consumo doméstico com a irrigação, variando de 450 L/dia a 750 L/dia, e volumes de reservatórios variando de 2 a 20 m³ quando considerado apenas o consumo doméstico e volumes entre 20 e 50 m³ quando se trata da demanda somada (doméstica+irrigação), totalizando assim 40 cenários a serem analisados, como apresentado na Tabela 2.

O período chuvoso no semiárido brasileiro normalmente compreende os meses de dezembro a maio. A partir de junho a precipitação diminui drasticamente até o mês de novembro, compreendendo assim o período de estiagem nesta região (SILVA; FARIAS, 2021; SILVA NETO; SALES, 2020; SILVA *et al.*, 2018).

Para determinação da necessidade de uso de irrigação foi calculada precipitação mensal para manter um determinado tipo de cultivo, fazendo uso da metodologia de Molle e Cardier (1992) e considerando um cultivo de cenoura, tomate e repolho o que resultou num valor de precipitação igual a 90 mm/mês.

Tabela 2 – Cenários criados a partir da combinação de áreas de captação, demanda de água de chuva e volumes de reservatórios.

Área de captação (m²)	**50**		**75**		**100**				**200**			
Demanda doméstica (L/dia)	50	100	50	100	50	100	50	100	50	100	50	100
Demanda de irrigação (L/dia)	-				400		650		400		650	
Volumes de reservatório (m³)	2						20					
	5						30					
	10						50					
	20						-					

Fonte: Autor.

Sendo assim, aqui foi adotado como mês seco aquele cuja precipitação for inferior a 90 mm mensais cuja pluviometria é geralmente apresentada a partir do mês de maio (Tabela 2). O valor de irrigação será inserido na simulação e geração dos mapas durante esses meses secos. Nos demais meses onde não for necessário a irrigação, o consumo doméstico será o único considerado (MEDEIROS *et al.*, 2020; LUCENA *et al.*, 2013).

Em relação ao coeficiente de escoamento superficial (Runoff) adotado neste trabalho, foi considerado o uso de telhados cerâmicos, amplamente empregados em edificações residenciais em todo o Brasil, apresentando variações que vão de 0,75 a 0,95 de acordo com a Tabela 3 (RIBEIRO; MARINOSKIE, 2020). Neste estudo, optou-se por utilizar um coeficiente de 0,8, de forma a adotar um cenário conservador, absorvendo as flutuações geradas a partir das características do material.

Tabela 3 – Coeficientes de escoamento superficial (Runoff) em função do tipo de material da cobertura.

MATERIAL DE COBERTURA	**COEFICIENTE DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL (RUNOFF)**	**FONTE**
Telhado Cerâmico	0,56	Khan (2001)
	0,75 – 0,95	Pruskie *et al.* (2004)
	0,80 – 0,90	Hofkes e Frasier (1996)

Fonte: Adaptado de Ribeiro e Marinoskie (2020)

4.4 BALANÇO HÍDRICO DO SCAAC – CÁLCULO DO VOLUME EXTRAVASADO

Para cada cenário considerado, foram calculados os volumes de água extravasados pelo sistema. As variáveis de entrada foram inseridas de acordo com cada cenário mostrado anteriormente (Figura 15).

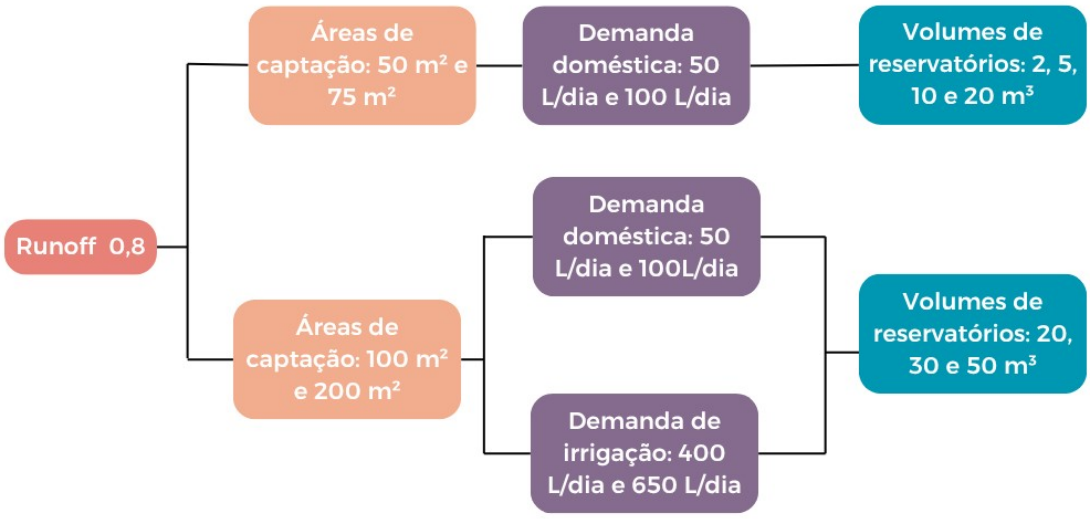
Para tanto, foi considerado o volume de entrada de água em cada precipitação, determinado pela Equação 33:

$$V_{ent} = \frac{P \cdot A \cdot \eta}{1000} \qquad \text{Equação 33}$$

Onde:

- V_{ent}: Volume de entrada (m³);
- P: Precipitação diária (mm);
- A: Área de captação (m²);
- η: Coeficiente de escoamento superficial (adimensional).

Figura 15 – Dados de entrada considerados para cálculo do Coeficiente de Transbordamento Volumétrico (CTV).



Fonte: Autor.

O próximo passo foi calcular o Saldo Diário (S_D), calculado subtraindo do volume de entrada (V_{ent}) da demanda diária (D em m³) (Equação 34), a demanda foi composta pelo uso doméstico e/ou uso combinado entre o consumo doméstico e o de irrigação e em todos os cenários foi considerado vazio o reservatório no dia 1 do período de tempo estudado.

$$S_D = V_{ent} - D \qquad \text{Equação 34}$$

Assim, de posse da demanda diária de água, do volume de entrada e do saldo diário, foram calculados o volume retido acumulado no reservatório ($Vres_{(t)}$) e o volume extravasado, esses volumes foram calculados diariamente conforme Equação 35:

$$\left(Vent_{(t+1)} + Vres_{(t)} - D_{(t+1)}\right)\begin{cases} se \;\; > V \;\; \rightarrow Vtr \;\; = \;\; \left(Vent_{(t+1)} + Vres_{(t)} - D_{(t+1)}\right) \;\; - V \\ se \;\; < V \;\; \rightarrow Vtr \;\; = \;\; 0 \end{cases} \qquad \text{Equação 35}$$

Onde:

- $Vent_{(t+1)}$: Volume de água absorvido pelo sistema diariamente no tempo t+1 (m³);
- $Vres_{(t)}$: Volume retido acumulado no reservatório no fim do intervalo de tempo t (m³);
- $D_{(t+1)}$: Consumo diário no tempo t+1 (m³);
- Vtr: Volume de água transbordado pelo sistema (m³); e
- V: Volume do reservatório adotado (m³).

O volume máximo de água no reservatório foi limitado ao tamanho do reservatório (Equação 36):

$$0 \leq Vres \leq V \qquad \text{Equação 36}$$

Foi posteriormente calculado o somatório do volume transbordado para cada ano do período estudado para cada ponto da grade criada para região semiárida brasileira (Equação 37), e feita a média do volume transbordado para cada um destes pontos com base em todo o período de estudo (Equação 38).

$$V_{tr,anual,p} = \sum V_{tr,p} \qquad \text{Equação 37}$$

Onde:

- $V_{tr,anual,p}$: Volume total transbordado durante o período de um ano no ponto p (m³);
- $V_{tr,p}$: Volume diário transbordado no ponto p (m³).

$$V_{tr,med,p} = \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{N} V_{tr,anual,p} \qquad \text{Equação 38}$$

Onde:

- $V_{tr,anual,p}$: Volume total transbordado durante o período de um ano no ponto p (m^3);
- N: Número de anos do estudo;
- $V_{tr,med,p}$: Volume médio anual transbordado no ponto p durante o período de N anos (m^3).

4.5 CÁLCULO DO COEFICIENTE DE TRANSBORDAMENTO VOLUMÉTRICO (CTV)

O coeficiente de transbordamento volumétrico é razão entre o volume de água extravasado do sistema de aproveitamento de água, e o volume do reservatório utilizado, esta correlação representa uma eficiência indireto do sistema, sabendo assim quanto de água não é aproveitado por um dado volume de reservatório, e permite inferir análises como qual a porcentagem aproveitável de água pode ser conseguida a partir de um aumento do volume do tanque.

Para determinar o CTV – adimensional – foi dividido o valor médio anual para o período estudado do volume transbordado para cada ponto da grade do semiárido ($V_{tr,med,p}$) pelo volume do reservatório adotado em cada cenário aqui estudado (Equação 39):

$$CTV_p = \frac{V_{tr,med,p}}{V} \qquad \text{Equação 39}$$

Onde:

- CTV: Coeficiente de transbordamento volumétrico anual médio para o ponto p (m^3/m^3);
- $V_{tr,med,p}$: Volume médio anual transbordado no ponto *p* durante o período de N anos (m^3);
- V: Volume do reservatório adotado (m^3).

4.6 GERAÇÃO DE MAPAS

Os mapas foram gerados a partir dos valores de CTV calculados (Equação 39) e impressos utilizando-se de linguagem de programação Python. Para representação cartográfica adequada, os pontos de medição das estações foram convertidos em áreas de influência quadrangulares de 0,1° de lado (XAVIER *et al.*, 2022). Esta conversão permitiu uma melhor visualização espacial dos dados pontuais. Os valores de CTV foram classificados em intervalos fixos com a finalidade de agrupar valores similares para representação temática.

A etapa de interpolação espacial utilizou o método cúbico (krigagem) para estimar valores em 0locais não amostrados, criando uma malha regular de 500 × 500 pontos sobre a área de estudo. Uma aplicação de uma máscara geográfica foi criada para restringir a interpolação exclusivamente à área delimitada pelo shapefile do Semiárido, evitando extrapolações espacialmente inconsistentes.

Para impressão foram criadas linhas de igual valor (iso-valor) para representar regiões com faixas pré-determinadas de valores de CTV que conectam pontos com valores equivalentes, facilitando a identificação de gradientes espaciais. O mapa resultante permite analisar padrões de distribuição do CTV para o cenário específico de reservatório, demanda doméstica, consumo de irrigação e área de captação conforme cada cenário determinado pela Tabela 2.

4.7 DESENVOLVIMENTO DE MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO DE RESERVATÓRIO UTILIZANDO O CTV

O método de dimensionamento foi baseado na simulação de volumes de reservatórios variando de 1 a 100 m³ que resultassem em pequenos valores de CTV, ou seja, obter maior aproveitamento de água e assim possibilitar que qualquer pessoa consiga determinar um tamanho de tanque adequado para sua localidade, estrutura disponível e demanda desejada.

O dimensionamento do reservatório foi desenvolvido com um algoritmo em Python (Apêndice II) cuja interface recebe: coordenadas geográficas, área de captação, consumo doméstico e, opcionalmente, a demanda por irrigação, calculada a partir da inserção da precipitação mensal requerida para manter uma cultura específica e área de cultivo, limitada a um intervalo de 50 a 150 m² (Figura 16).

Caso o usuário desconheça o valor da precipitação mensal requerida, será adotado o valor de de 90 mm/mês, necessário para cultivos como cenoura, tomate e repolho (MOLLE; CARDIER, 1992). O algoritmo verifica se a precipitação mensal (P_m) supera a precipitação requerida (P_r); se afirmativo, há irrigação (Equação 40). Considerou-se que o reservatório atende apenas ao déficit necessário para atingir P_r (Equação 41). Em seguida, calcula-se o volume a ser armazenado para suprir esse déficit mensal (Equação 42) e, finalmente, a demanda diária de irrigação (Equação 10).

$$Se \;\; Pr_m < 90 \;\; mm, \;\; há \;\; irrigação \qquad \text{Equação 40}$$

Onde a Pr_m a é a soma da precipitação em um determinado mês (mm).

$$D_m = 90 - Pr_m \qquad \text{Equação 41}$$

Onde D_m é o déficit de precipitação mensal para atingir os 90 mm/mês necessários para a manutenção do cultivo (mm).

$$V_r = \left(\frac{D_m}{1000}\right) \cdot A_c \qquad \text{Equação 42}$$

Onde:

• V_r: Volume a ser reservado para atender ao déficit de precipitação mensal (m^3);

• A_c: Área do cultivo (m^3).

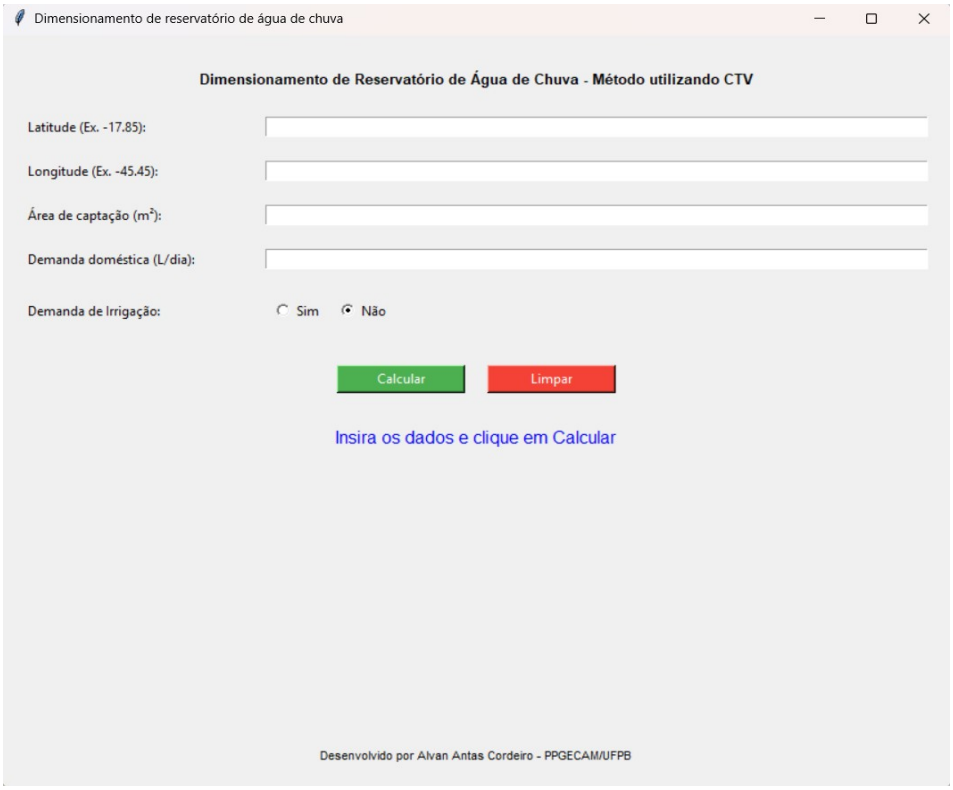
$$DI = \left(\frac{V_r}{N_m}\right) \cdot 1000 \qquad \text{Equação 43}$$

Onde:

• DI: Demanda de irrigação diária (L/dia);

• N_m: número de dias do mês.

Figura 16 – Interface usuário/algorítimo para dimensionamento de reservatório de água de chuva utilizando CTV.



Fonte: Autor.

O algoritmo foi desenvolvido para operar exclusivamente na área de estudo deste trabalho e, como a base de dados está organizada em uma grade de 0,1º × 0,1º. Caso as coordenadas fornecidas

não coincidam exatamente com um ponto existente na malha, o sistema automaticamente utilizará os dados do ponto mais próximo disponível como referência para os cálculos (Figura 17).

O algoritmo opera exclusivamente com valores positivos de área e demanda, emitindo uma mensagem de erro caso sejam inseridos valores negativos. A partir do ponto selecionado, ele simula o balanço hídrico para diferentes volumes do reservatório (1 a 100 m³), calculando o CTV Médio Anual para cada cenário. Em seguida, determina a taxa de variação (derivada) do CTV em relação à faixa de volumes analisados, adotando como critério de parada o momento em que a derivada ultrapassa o limiar de -0,25 – indicando que a curva de CTV está se estabilizando. Quando essa condição é atendida, o algoritmo retorna o volume imediatamente anterior ao ponto de cruzamento, definido como o Volume Ótimo do Reservatório, pois representa o ponto onde benefícios adicionais de capacidade se tornam marginalmente decrescentes.

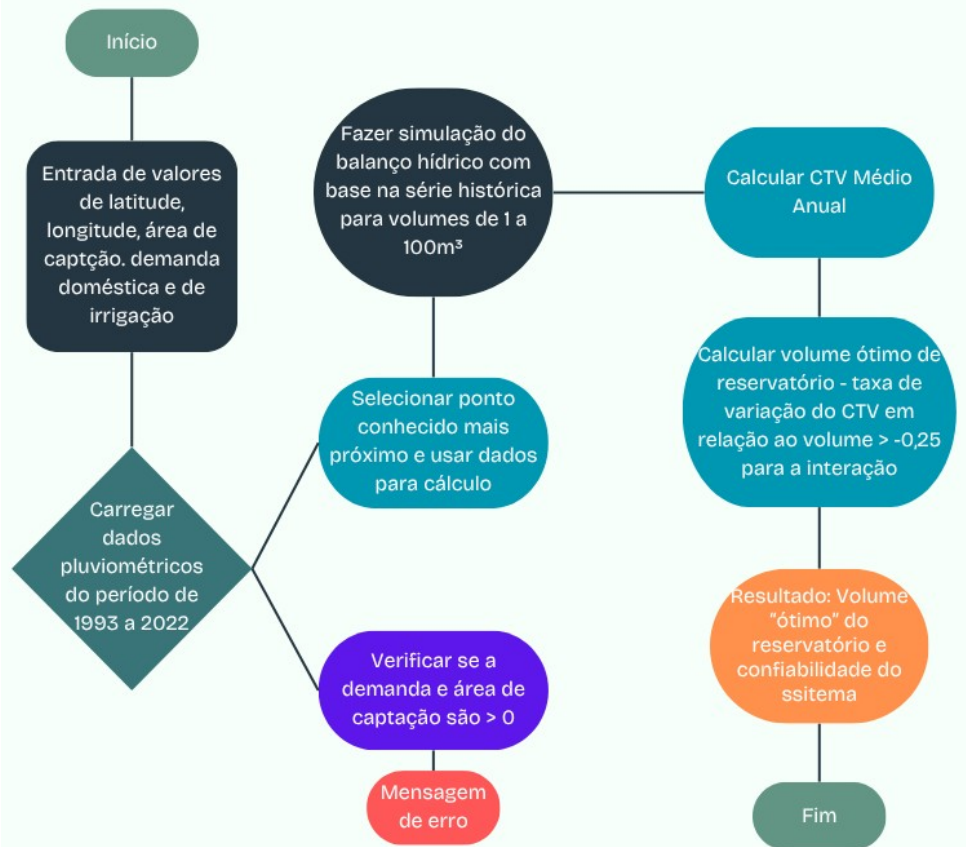
No desenvolvimento do dimensionamento do reservatório, também foi incluído o conceito de Confiabilidade do Sistema. Esse termo indica a probabilidade de o reservatório conseguir fornecer a água de chuva necessária, calculada pela porcentagem de dias com abastecimento adequado em relação ao período total simulado. Assim, a confiabilidade demonstra quão eficaz é um determinado volume de reservatório para atender à demanda diária.

$$C = \left(N_{atend} / N_{total} \right) \cdot 100 \qquad \text{Equação 44}$$

Onde:

- C = Confiabilidade do Sistema (%);
- N_{atend} = Número de dias em que a demanda foi atendida;
- N_{total}= Número total de dias simulados.

Figura 17 – Algorítimo do método para dimensionamento de reservatório de água de chuva utilizando CTV.



Fonte: Autor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados deste trabalho estruturam-se em duas partes, que integram a análise do CTV. Primeiramente, foram analisados mapas do CTV elaborados para 40 cenários distintos, permitindo uma avaliação espacializada da eficiência através do CTV. Posteriormente, foi discutido o desenvolvido de algorítimo em Python, dotado de interface gráfica, que possibilita ao usuário obter, a partir de dados locais, o volume ótimo do reservatório e o índice de confiabilidade correspondente.

5.1 MAPAS GERADOS A PARTIR DE CENÁRIOS PRÉ-DETERMINADOS

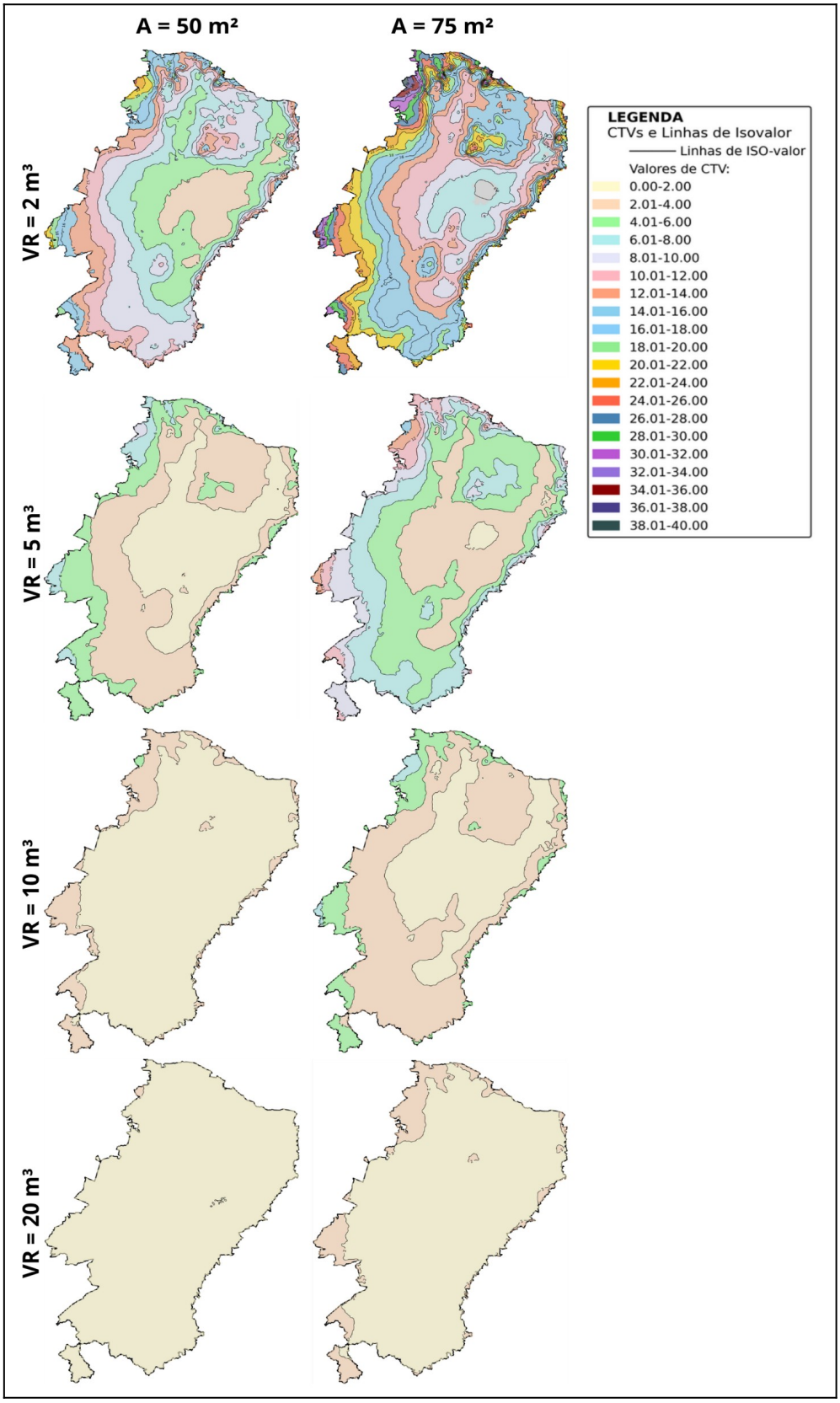
Os dados foram estratificados para o contexto específico do Semiárido brasileiro, com agrupamento por classes de demanda equivalentes. A análise comparativa dos cenários possibilitou identificar configurações ótimas que minimizam o CTV, promovendo assim maior sustentabilidade no aproveitamento de recursos hídricos em ambientes semiáridos.

As Figuras 18 e 19, que comparam sistemas com demandas domésticas de 50 L/dia e 100 L/dia, respectivamente, evidencia a influência direta da área de captação na eficiência do sistema. Observa-se que em áreas maiores (75 m²) os valores do CTV são significativamente superiores aos registrados em áreas menores (50 m²). Essa relação é exemplificada, onde reservatórios de 20 m³ apresentam um CTV médio entre 2,0 e 4,0 – resultado que corrobora as conclusões de Silva C. S. (2023) sobre como maiores áreas de captação podem ampliar os desperdícios em regiões de chuvas irregulares.

Observando mais detalhadamente os resultados, percebe-se que para uma demanda menor (50 L/dia), uma área de 50 m² resulta em valores de CTVs que variam desde quase zero até 24,0, enquanto a área maior (75 m²) apresenta variação entre zero e 40. Já no cenário de maior demanda (100 L/dia), os valores de CTV são similares, com a área menor atingindo CTVs em torno de 20,0 e a maior variando até 36. Esses dados revelam que dobrar a demanda não provoca impacto significativo no CTV quando o sistema possui área de captação semelhante.

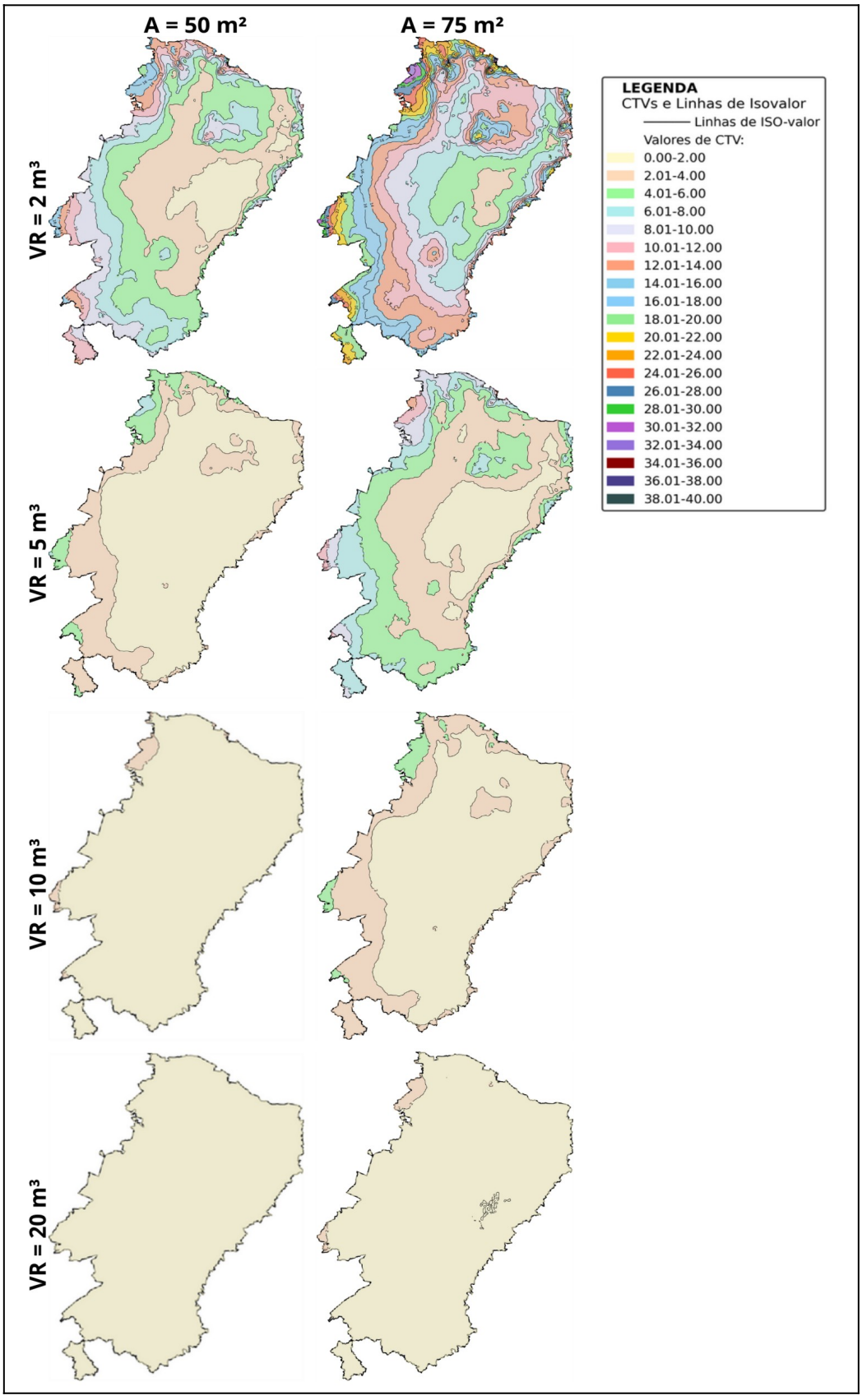
Outro aspecto relevante diz respeito ao dimensionamento dos reservatórios. Os resultados demonstram que aumentar a capacidade de 10 m³ para 20 m³ traz melhorias mínimas no aproveitamento hídrico, especialmente para as áreas de captação menores. Na prática, isso significa que investir em reservatórios maiores que 10 m³ pode não ser a solução mais eficiente – particularmente quando se trabalha com demandas entre 50 e 100 L/dia.

Figura 18 – Mapas de valores de CTVs gerados para uma demanda doméstica de 50 L/dia, áreas de captação de 50 e 75 m² e volumes de reservatórios de 2, 5, 10 e 20 m².



Fonte: autor.

Figura 19 – Mapas de valores de CTVs gerados para uma demanda doméstica de 100 L/dia, áreas de captação de 50 e 75 m² e volumes de reservatórios de 2, 5, 10 e 20 m².



Fonte: autor.

Nas Figuras 20 e 21, a partir do ponto que foram introduzidas demandas de irrigação, representam cenários com demanda doméstica de 50 L/dia e 100 L/dia, respectivamente, combinadas com irrigação de 400 L/dia, para áreas de captação de 100 m² e 200 m² e volumes de reservatórios de 20 m³, 30 m³ e 50 m³. Observa-se novamente que áreas de captação maiores (200 m²) resultam em CTVs substancialmente mais elevados em comparação com áreas menores (100 m²).

Verificou-se que, no cenário de menor demanda (total de 450 L/dia – Figura 20), uma área de 100 m² apresenta CTVs que variam de quase zero até 4,20, enquanto a área de 200 m² apresenta variação entre zero e 10,20, ou seja, dobrando a área de captação, mais que se dobrou os volumes extravasados. Já no cenário de maior demanda (total de 200 L/dia – Figura 21), os valores mantêm proporção semelhante, com a área menor atingindo CTVs em torno de 4,20 e a maior variando até 9,60. Esses resultados demonstram que dobrar a demanda doméstica não provoca impacto significativo nos índices de transbordamento quando a área de captação permanece a mesma, reforçando que a capacidade de coleta é um fator mais determinante que o aumento da demanda.

Outro aspecto relevante diz respeito ao dimensionamento dos reservatórios. Os resultados indicam que, para áreas de captação menores (100 m²), aumentar a capacidade de armazenamento (de 30 m³ para 50 m³) não traz melhorias significativas no aproveitamento hídrico.

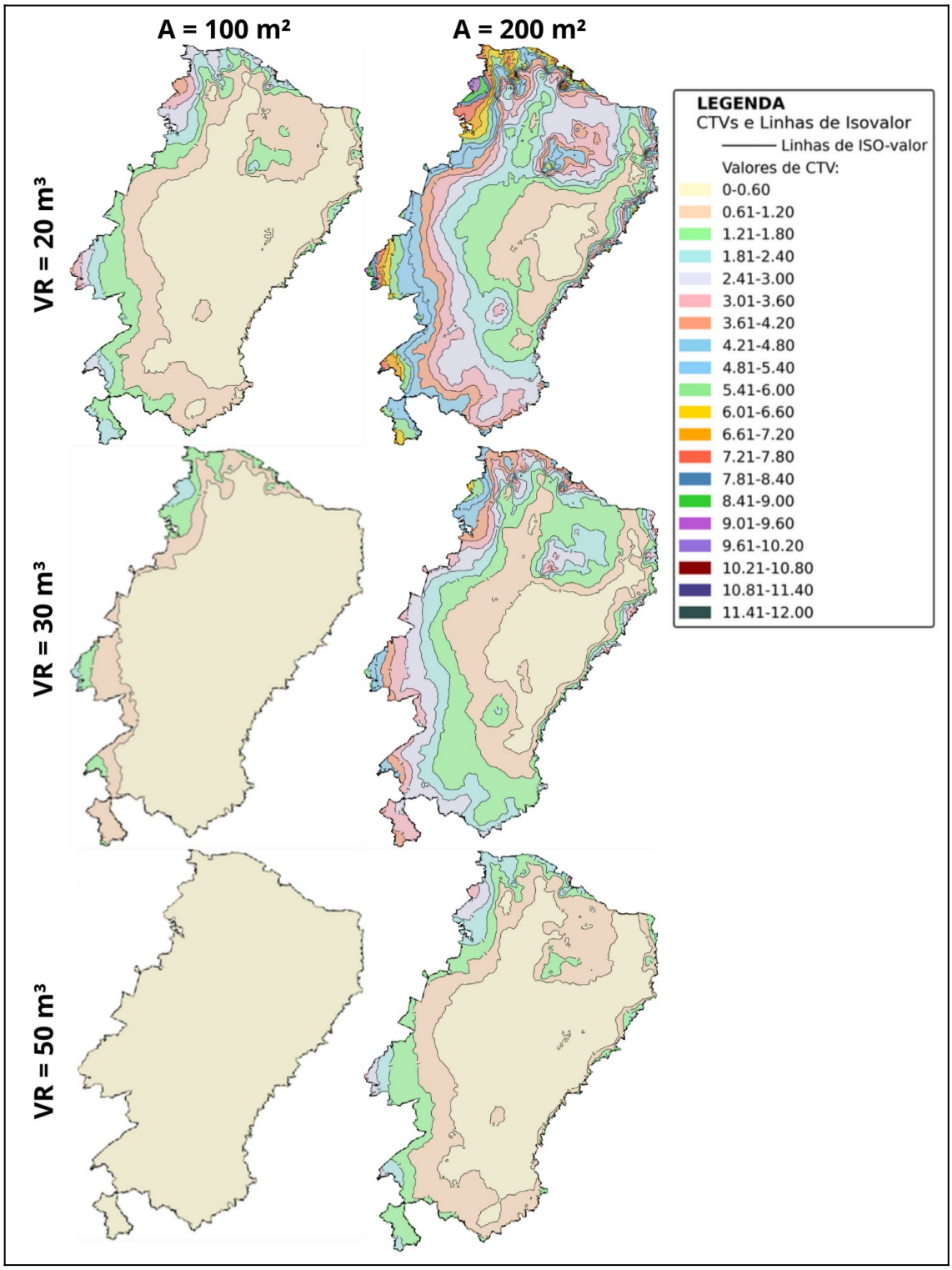
No entanto, para a área de 200 m², os valores de CTV não apresentam grande discrepância com o aumento do volume do reservatório. Entretanto, ao analisar os volumes absolutos de água extravasada, nota-se que, no cenário de maior demanda (Figura 21), um reservatório de 20 m³ resulta num valor máximo de 192 m³ de água não aproveitada para o valor médio de CTV da faixa de valores, enquanto para um de 50 m³ apresenta 180 m³ – uma diferença praticamente irrelevante.

Isso sugere que investir em reservatórios maiores que 20 m³ não implica num maior aproveitamento, pois, embora os CTVs sejam menores, o volume de água desperdiçada permanece quase inalterado. Dessa forma, a otimização do sistema deve priorizar um equilíbrio entre área de captação e demanda, evitando investimentos excessivos em reservatórios sem ganhos expressivos em eficiência hídrica.

O estudo de Luna (2022) sobre eficiência volumétrica, observou-se que regiões semiáridas exigem reservatórios consideravelmente maiores para alcançar a mesma eficiência de áreas mais úmidas. Os resultados obtidos permitem estabelecer diretrizes importantes: a área de captação mantém-se como fator primordial, devendo ser priorizada sobre o simples aumento da capacidade de armazenamento; o incremento na demanda de irrigação não altera significativamente os padrões de CTV quando mantida a área de captação; a escolha do volume do reservatório deve relacionar

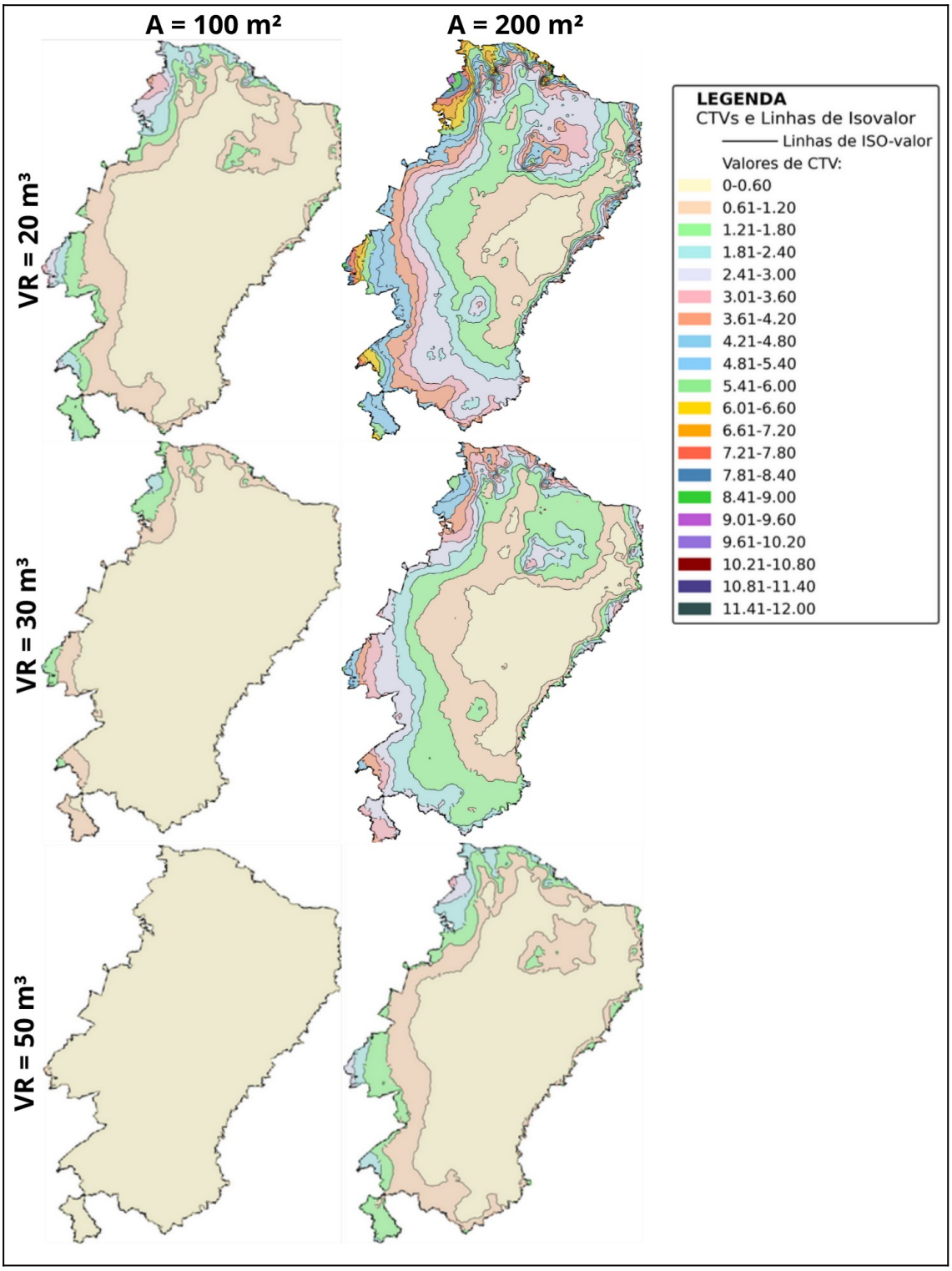
ganho hídrico e custos adicionais; e as particularidades climáticas locais devem ser consideradas como fator determinante.

Figura 20 – Mapas de valores de CTVs gerados para uma demanda doméstica de 50L/dia e demanda de irrigação de 400 L/dia, áreas de captação de 100 e 200 m² e volumes de reservatórios de 20, 30 e 50 m².



Fonte: autor.

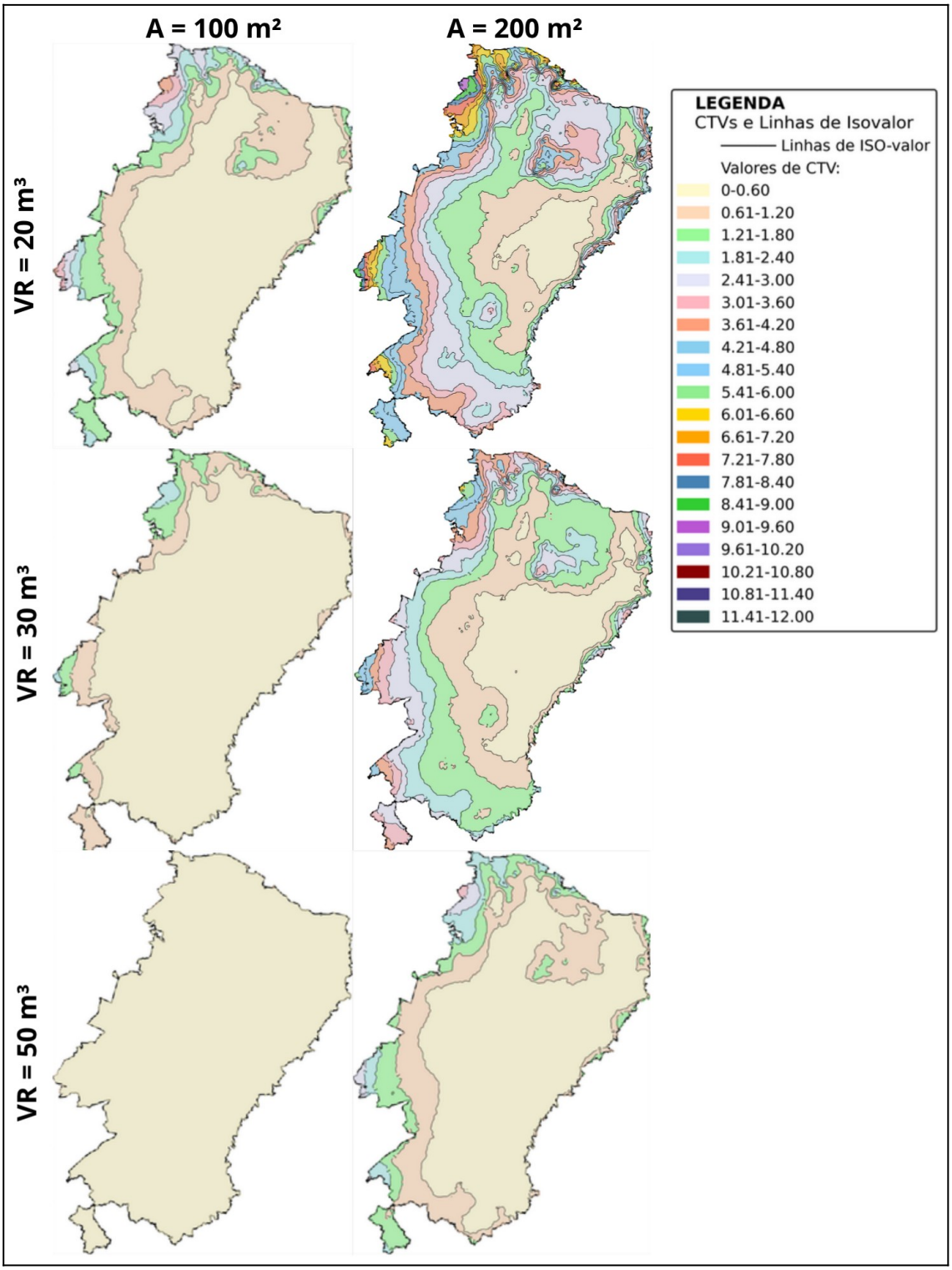
Figura 21 – Mapas de valores de CTVs gerados para uma demanda doméstica de 100 L/dia e demanda de irrigação de 400 L/dia, áreas de captação de 100 e 200 m² e volumes de reservatórios de 20, 30 e 50 m².



Fonte: autor.

Os estudos realizados com demandas domésticas de 50 L/dia (Figura 22) e 100 L/dia (Figura 23), combinadas com uma expressiva demanda de irrigação de 650 L/dia, revelaram padrões interessantes que merecem discussão detalhada. A avaliação considerou diferentes configurações de sistemas com áreas de coleta de 100 m² e 200 m², associadas a reservatórios de 20 m³, 30 m³ e 50 m³, demonstrando que mesmo diante de um aumento na demanda de irrigação (de 400 para 650 L/dia), os valores máximos de Coeficiente de Transbordamento Volumétrico mantiveram-se estáveis.

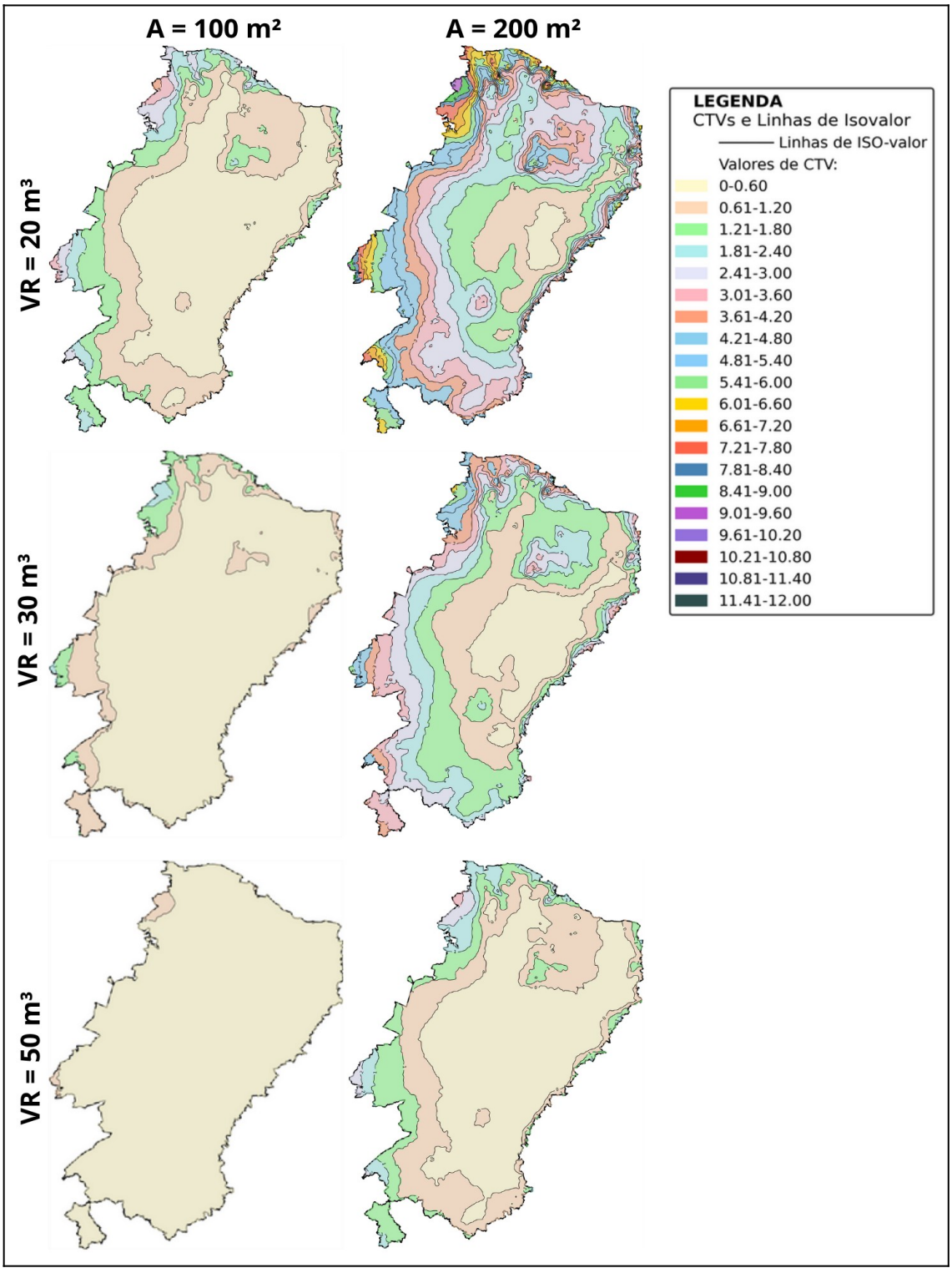
Figura 22 – Mapas de valores de CTVs gerados para uma demanda doméstica de 50 L/dia e demanda de irrigação de 650 L/dia, áreas de captação de 100 e 200 m² e volumes de reservatórios de 20, 30 e 50 m².



Fonte: autor.

Esse comportamento sugere a existência de um limiar a partir do qual o aumento da demanda não impacta significativamente os índices de transbordamento, principalmente porque a demanda de irrigação, apesar de representar maior parte da demanda total, essa demanda não é diária, variando ao longo do ano de acordo com a necessidade durante o período seco.

Figura 23 – Mapas de valores de CTVs gerados para uma demanda doméstica de 100 L/dia e demanda de irrigação de 650L/dia, áreas de captação de 100 e 200 m² e volumes de reservatórios de 20, 30 e 50 m².



Fonte: autor.

No cenário de demanda total de 700 L/dia (Figura 22), os sistemas com 100 m² apresentaram CTVs variando entre 0 e 4,20, enquanto aqueles com 200 m² exibiram uma amplitude significativamente maior (0 – 9,60). Esse padrão se manteve consistente no cenário de maior demanda (750 L/dia – Figura 23), onde os valores máximos de CTV não apresentaram alteração. Esses resultados reforçam que a área de captação é o fator determinante principal no desempenho do sistema, superando em importância até mesmo variações significativas na demanda hídrica total. Tal constatação tem particular relevância para projetos em regiões semiáridas, onde a captação de água de chuva é crucial para o abastecimento.

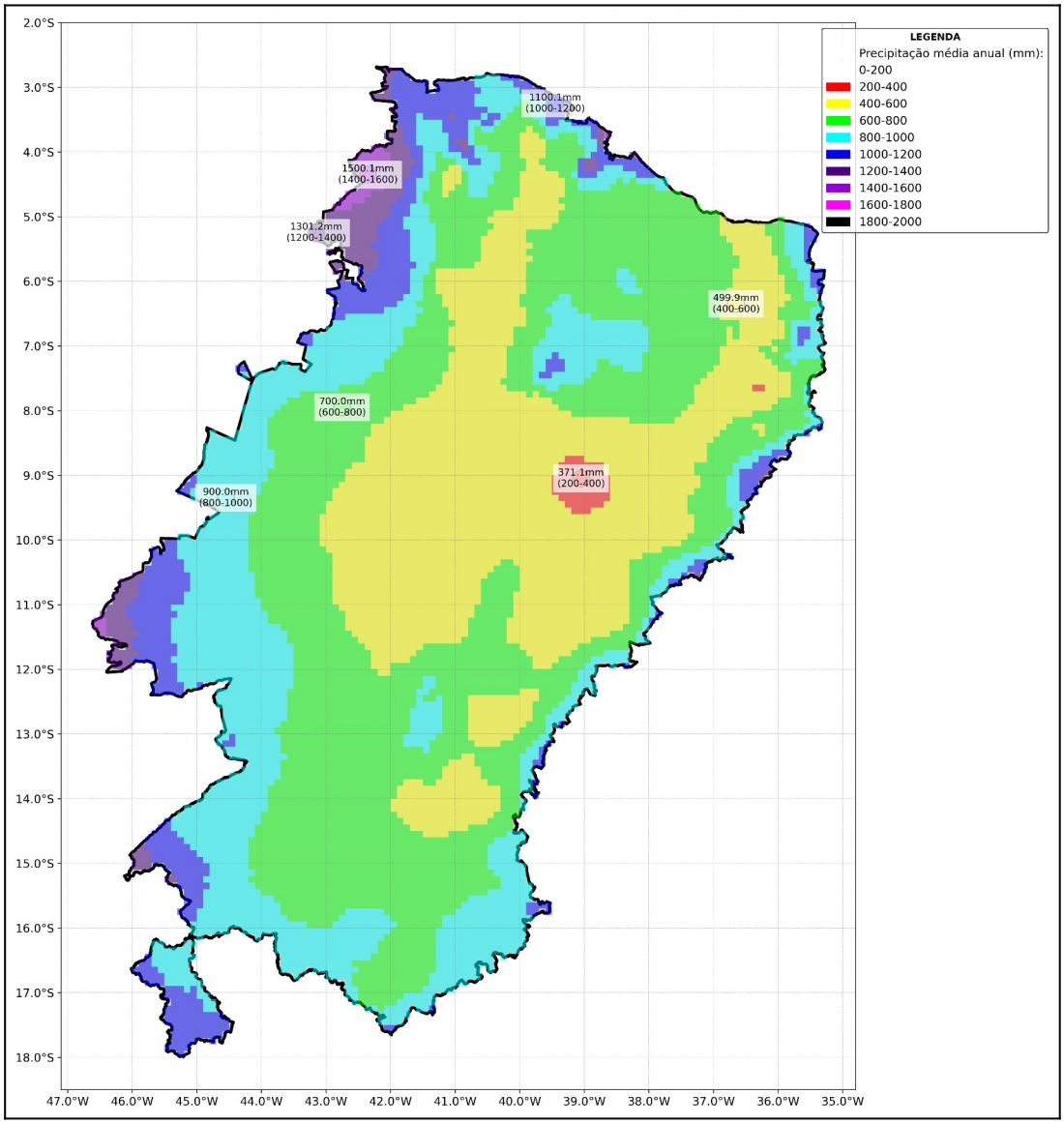
A análise do dimensionamento dos reservatórios revelou aspectos igualmente importantes. Para sistemas com 100 m² de área de captação, a ampliação da capacidade de armazenamento de 30 para 50 m³ mostrou-se praticamente ineficaz em melhorar o aproveitamento hídrico, com ganhos marginais que não justificam o investimento adicional. Já nos sistemas com 200 m², observou-se que os valores de CTV mantiveram-se mais estáveis mesmo com aumento do volume do reservatório e os volumes absolutos de extravasamento não apresentaram variações significativas em comparação com os resultados anteriores. Esse comportamento sugere que existe um ponto além do qual aumentar a capacidade de armazenamento não traz benefícios reais.

Do ponto de vista econômico, a análise demonstra claramente que reservatórios com volumes superiores a 20 m³ dificilmente se justificam quando considerados os custos adicionais de construção e manutenção. Essa conclusão é particularmente relevante para projetos comunitários ou de pequena escala, onde a otimização de recursos é fundamental. Os resultados obtidos permitem estabelecer diretrizes importantes para o planejamento de sistemas de captação: (1) a área de captação deve ser considerada como fator primordial no dimensionamento, devendo receber prioridade sobre o simples aumento da capacidade de armazenamento; (2) incrementos na demanda de irrigação, mesmo quando significativos, não alteram substancialmente os padrões de CTV desde que mantida constante a área de captação; (3) a escolha do volume do reservatório deve considerar cuidadosamente a relação entre ganho hídrico potencial e os custos adicionais envolvidos; e (4) as particularidades climáticas locais, incluindo padrões de precipitação e períodos de estiagem, devem ser consideradas como fatores determinantes no projeto.

5.2 MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO DE RESERVATÓRIOS

Foram escolhidos valores representativos de faixas de precipitação média anual como forma de testar o método de dimensionamento (Figura 24) e mostrar como diferentes faixas de precipitação influenciam o volume dos reservatórios.

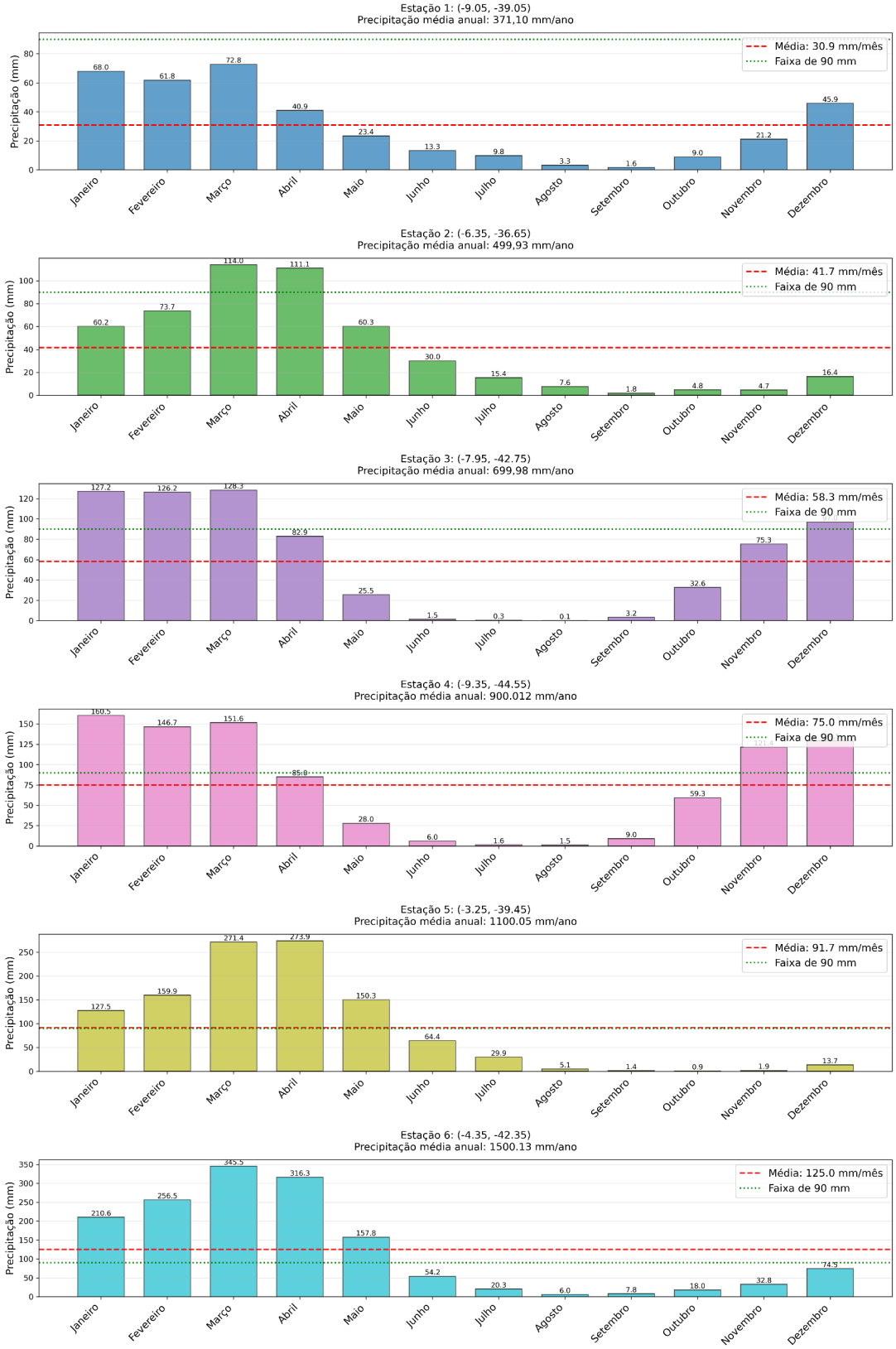
Figura 24 – Pontos representativos de faixas de precipitação média anual.



Fonte: autor.

Mesmo para o Semiárido brasileiro há uma grande variabilidade espacial da precipitação, com valores médios anuais que variam de 371,1 mm a 1500,1 mm, com o período de seca compreendendo normalmente o mês de maio a novembro (Figura 25). Essa heterogeneidade climática influencia diretamente o desempenho dos sistemas de captação, conforme demonstrado nos mapas de CTV. Por exemplo, regiões com precipitação abaixo de 600 mm/ano apresentam CTVs mais baixos, indicando maior desafio para o armazenamento. Em contraste, áreas com precipitação acima de 1400 mm/ano mostram CTVs maiores, refletindo maior disponibilidade hídrica. Esses resultados se alinham com as conclusões de Toosi et al. (2020), onde a precipitação é fator crítico para a viabilidade de sistemas de aproveitamento de água de chuva em regiões áridas.

Figura 25 – Histogramas das precipitações médias mensais de pontos com precipitações médias anuais de 371,10, 499,93, 699,98, 900,01, 1100,05 e 1500,13 mm/ano.

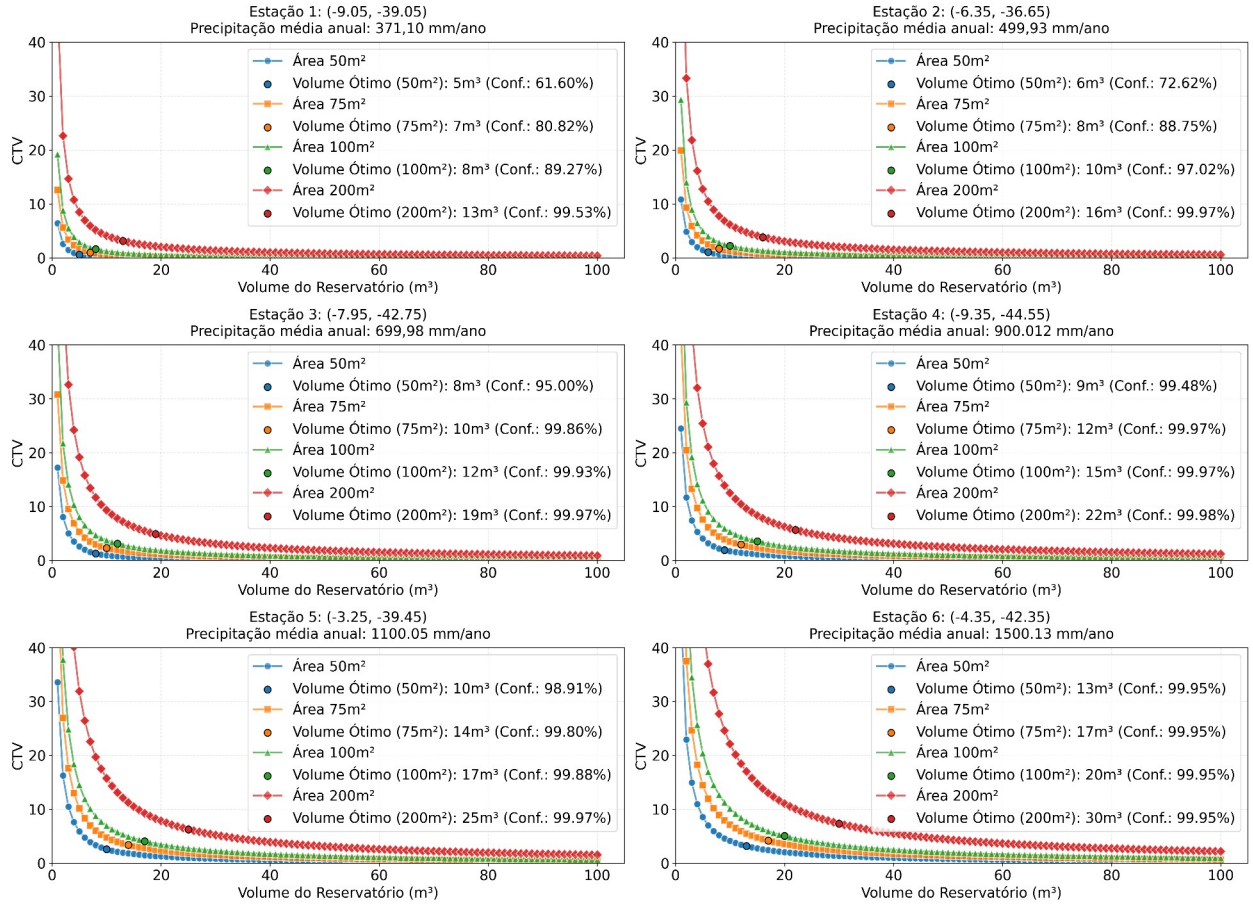


Fonte: Autor.

A aplicação do método, relação entre o CTV e o volume do reservatório, foi realizada nas seis localidades definidas acima, abrangendo valores de precipitação média anual de 371,10 mm até 1500,13 mm e as mesmas áreas de captação, demanda doméstica, com e sem irrigação que foram usadas na geração dos mapas, mas agora usadas pra determinar o volume ótimo do reservatório. A partir da figura 26 pode-se observar que o aumento da área de captação influencia diretamente no aumento do reservatório, porém esse aumento não segue a mesma proporção, assim o incremento do volume é relativamente menor do que da área de captação.

A confiabilidade do sistema para uma pequena demanda (50 L/dia) mostrou que aumentar a área e o volume do reservatório só é eficaz em regiões com baixa precipitação. Em locais com chuva média anual superior a 699,98 mm/ano, esse aumento melhora muito pouco a confiabilidade. Assim, o uso do menor volume viável é a solução mais vantajosa, garantindo boa eficiência com custo reduzido.

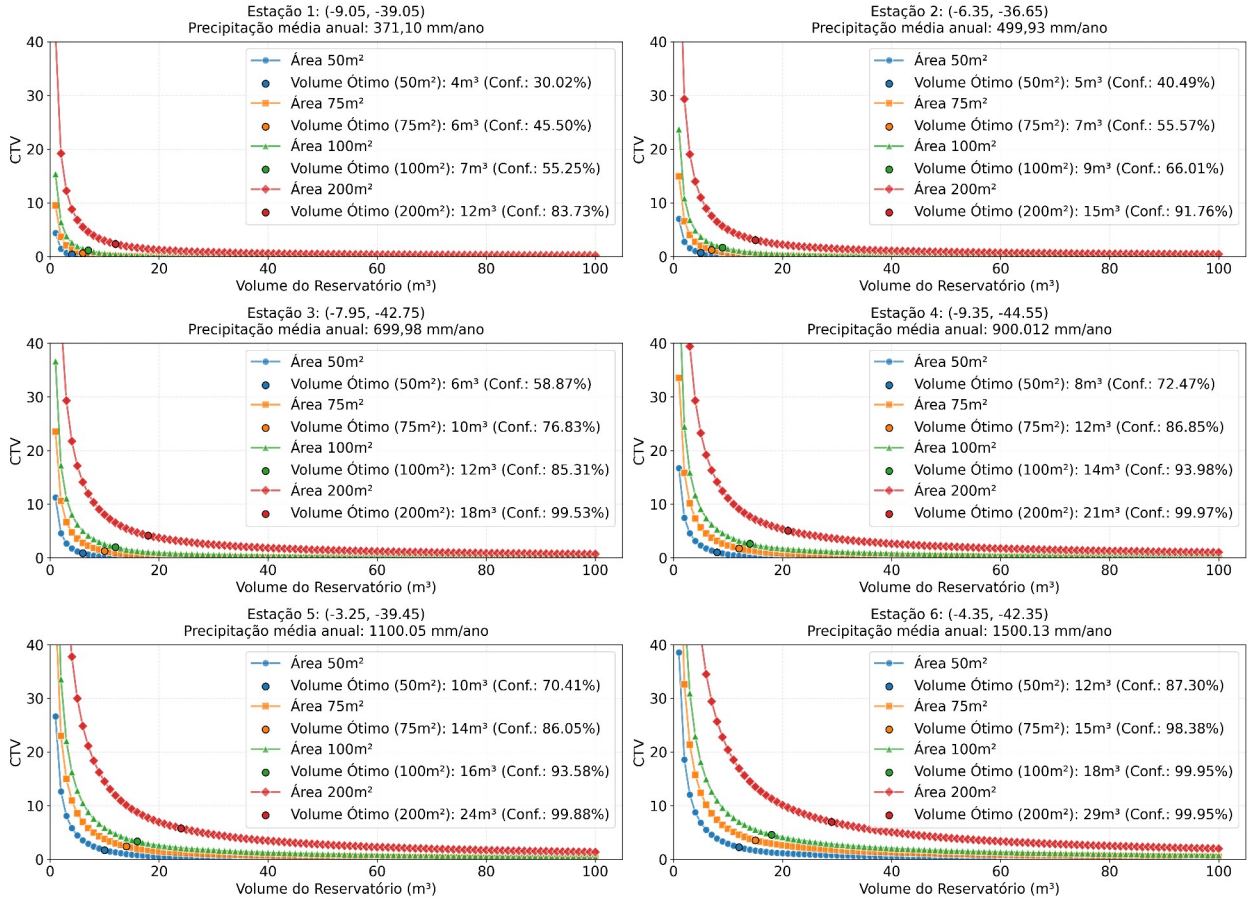
Figura 26 – Volume "ótimo" de reservatório por ponto representativo considerando uma demanda doméstica de 50 L/dia e áreas de captação de 50, 75, 100 e 200 m², com os respectivos valores de confiabilidade.



Fonte: Autor.

Analisando uma demanda de 100 L/dia (Figura 27), observa-se que o aumento em relação à Figura 26 causou uma pequena redução no volume ótimo. Isto ocorre porque uma demanda maior reduz o extravasamento do reservatório, fazendo com que o critério de parada do algoritmo ($\Delta CTV/\Delta V > -0{,}25$) seja atingido mais cedo. O efeito mais notável, porém, está na confiabilidade: ela apresenta uma variação maior, que só diminui quando a precipitação média anual atinge ou ultrapassa 900,012 mm/ano – valor acima da média de grande parte do Semiárido (Figura 24). Dessa forma, fica evidente que a demanda diária influencia o volume ótimo, e que, juntos, eles impactam diretamente o atendimento da demanda.

Figura 27 – Volume "ótimo" de reservatório por ponto representativo considerando uma demanda doméstica de 100 L/dia e áreas de captação de 50, 75, 100 e 200 m², com os respectivos valores de confiabilidade.

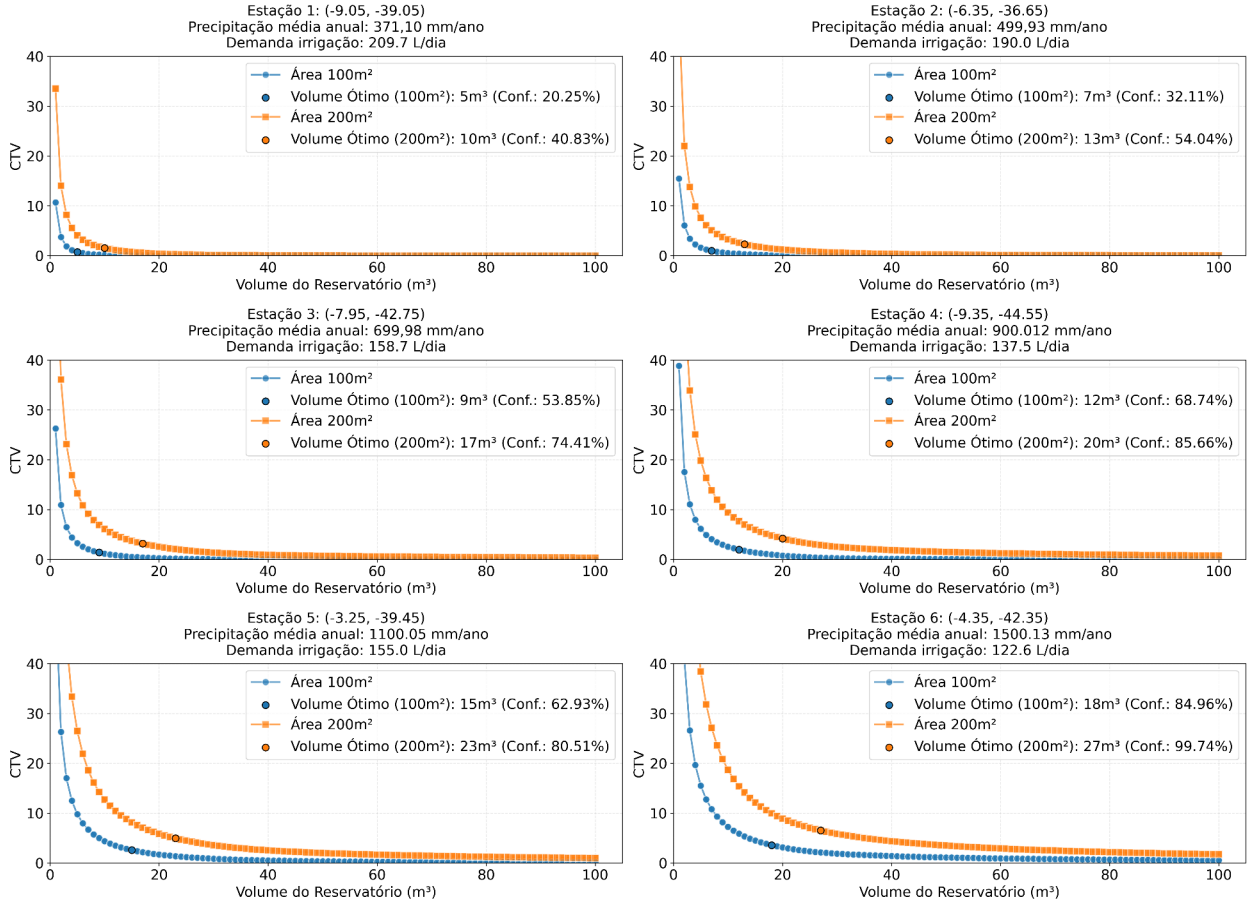


Fonte: Autor.

Com a adição de uma demanda de irrigação foi obtido o volume ótimo com áreas de captação de 100 e 200 m², pois áreas menores podem se mostrar insuficientes para atendê-la (Figuras 28 e 29). Para a demanda doméstica de 50 L/dia, a irrigação elevou a demanda total por água, o que, conforme observado anteriormente, reduz o volume ótimo e a confiabilidade do sistema ao

minimizar o transbordamento. Neste cenário, uma confiabilidade alta só foi atingida com uma área de 200 m² e uma precipitação média anual a partir de 900,012 mm/ano.

Figura 28 – Volume "ótimo" de reservatório por ponto representativo considerando uma demanda de irrigação e doméstica de 50 L/dia e áreas de captação de 100 e 200 m², com os respectivos valores de confiabilidade.



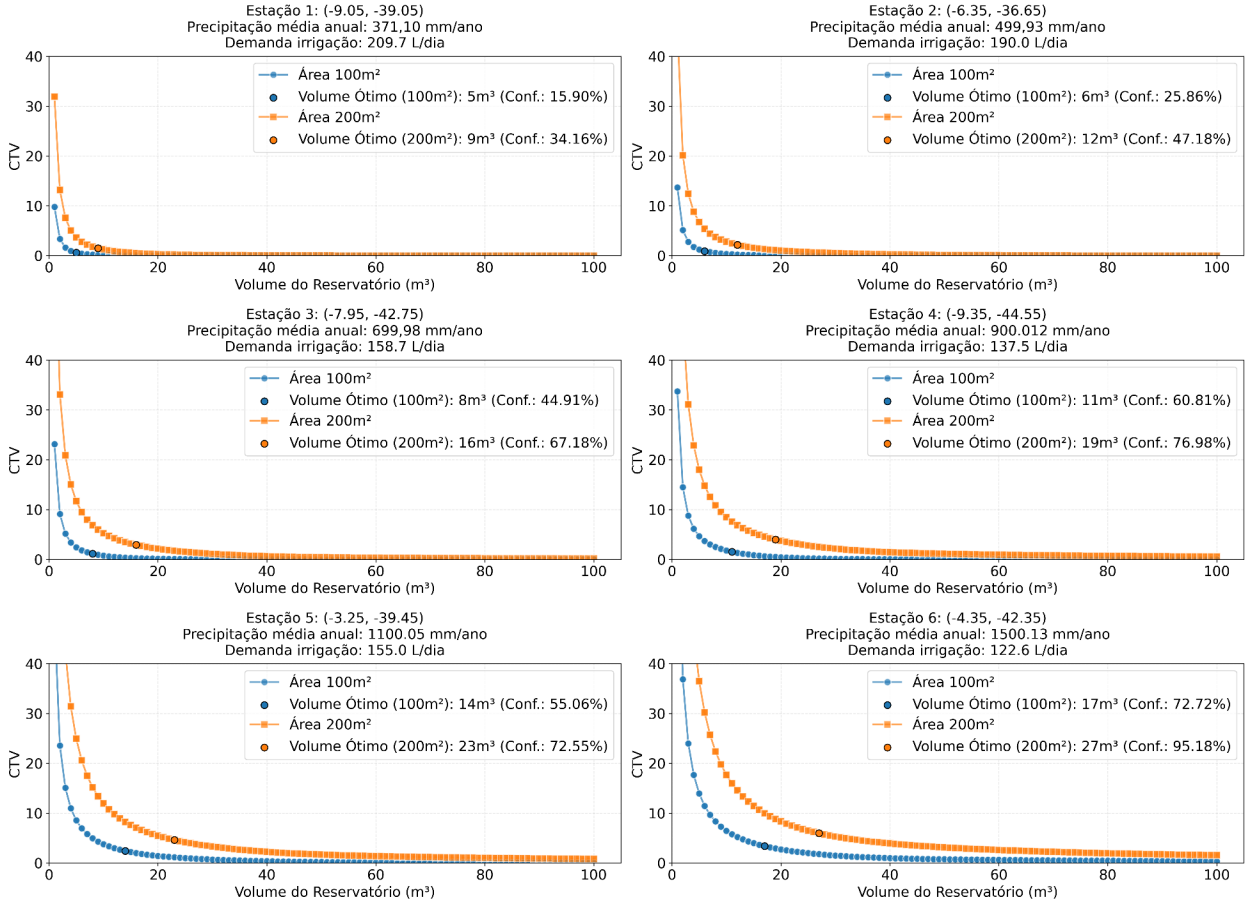
Fonte: Autor.

No cenário de demanda doméstica de 100 L/dia com irrigação (Figura 29), diferente do aumento da demanda apenas doméstica (Figura 27), a demanda combinada gera uma redução irrisória ou inexistente nos volumes ótimos de reservatório. O efeito mais relevante está na confiabilidade, que cai consideravelmente com a maior demanda, enquanto a influência no volume ótimo é menos expressiva. Ademais, aumentar deliberadamente o volume do reservatório acima do que foi obtido pelo modelo desenvolvido é incoerente, pois um incremento do volume não vai resultar em um menor desperdício, já que a partir desse ponto ($\Delta CTV/\Delta V > -0{,}25$) há uma estabilização da curva, resultando em ganhos residuais que não compensam o custo adicional do reservatório.

Ainda existe uma forte correlação positiva entre o volume ótimo e a precipitação média anual. O aumento da precipitação resulta diretamente em um incremento do volume ótimo, como

demonstra o excelente ajuste do modelo linear, que apresenta um coeficiente de determinação (R^2) muito próximo de 1.

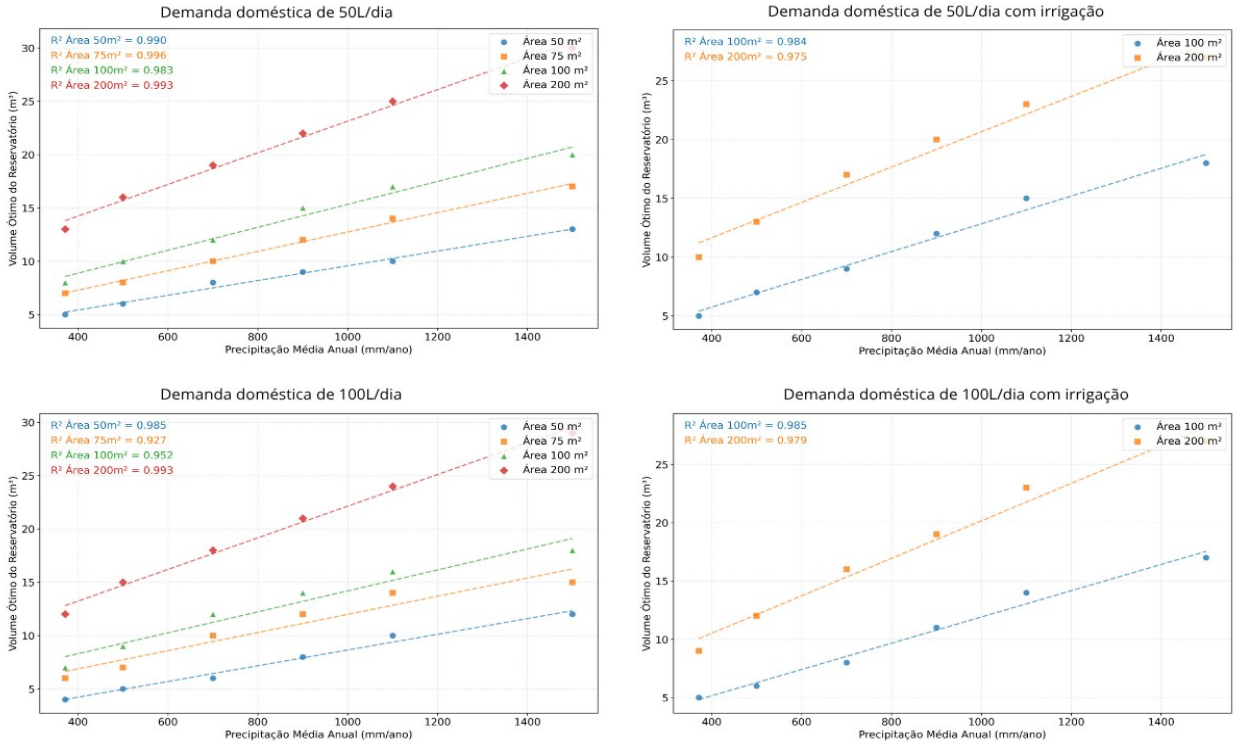
Figura 29 – Volume "ótimo" de reservatório por ponto representativo considerando uma demanda de irrigação e doméstica de 100 L/dia e áreas de captação de 100 e 200 m², com os respectivos valores de confiabilidade.



Fonte: Autor.

A aplicação da metodologia que utiliza o CTV para determinação de um volume ótimo de reservatório, permitiu a análise de parâmetros fundamentais para o dimensionamento. Verificou-se que o aumento da área de captação resulta em incrementos não proporcionais no volume ótimo, sendo o crescimento deste último menor que o da área. Os resultados ainda demonstraram que a demanda diária e a precipitação são determinantes cruciais e que com a incorporação da irrigação, constatou-se que aumento da demanda total reduz tanto o volume ótimo quanto a confiabilidade, com a irrigação assumindo papel predominante na definição do volume em sistemas de maior porte. Ademais, verifica-se uma forte correlação linear positiva entre a precipitação média anual e o volume ótimo.

Figura 30 – Relação entre Volume “ótimo” e precipitação média anual para demanda doméstica de 50 e 100 L/dia, área de captação de 50, 75, 100 e 200 m², com e sem demanda de irrigação.



Fonte: Autor.

Assim, a análise do comportamento do CTV revela que, para volumes inferiores ao ótimo, ocorre um aumento acentuado do CTV, indicando desempenho substancialmente inferior em sistemas subdimensionados. Acima do volume ótimo, o CTV tende à estabilização, sugerindo que ampliações adicionais do reservatório não produzem benefícios relevantes.

Nesse contexto, o critério de parada do modelo adotado ($\Delta CTV/\Delta V > -0,25$) mostrou-se eficaz em identificar o ponto em que investimentos adicionais em capacidade tornam-se injustificáveis, assegurando a otimização do custo-benefício do projeto. Portanto, a expansão do volume além do ponto ótimo mostrou-se técnica e economicamente inviável.

Por fim, estes resultados se alinham ao modelo proposto por Khastagir e Jayasuriya (2010), que relaciona o dimensionamento do reservatório à precipitação e à demanda por meio de uma curva de regressão exponencial, método originalmente desenvolvido para regiões com alta variabilidade pluviométrica, validando a metodologia aplicada.

5.2.1 INTERFACE USUÁRIO/ALGORÍTIMO DO MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO

As Figura 32 e Figura 21 demonstram a aplicação prática do algoritmo desenvolvido (Apêndice B) para dimensionar reservatórios em diferentes localidades do Semiárido. O método,

que utiliza dados diários de precipitação e os parâmetros como área de captação e demanda (doméstica e de irrigação), permite identificar volumes “ótimos” que minimizam o CTV. Por exemplo, para uma demanda de 100 L/dia e área de 50 m², o volume ótimo varia de 6 m³ a 22 m³, dependendo da precipitação local (Figura 27). Essa abordagem supera as limitações de métodos tradicionais, como o de Rippl, que não consideram a variabilidade diária da chuva (SILVA, C. S., 2023).

A estrutura e funcionamento do algoritmo desenvolvido para dimensionamento de reservatórios no Semiárido brasileiro utiliza o (CTV) como métrica principal, implementado em Python com interface gráfica. Sua estrutura segue os seguintes passos:

I. Entrada de Dados:

- O usuário insere coordenadas geográficas, área de captação, demanda doméstica e de irrigação;
- Validação inicial garante que área e demanda sejam valores positivos.

II. Processamento de Dados:

- Carrega série histórica de precipitação (1993-2022) em formato CSV usando `pandas`;
- Identifica a estação pluviométrica mais próxima através de cálculo de distância ‘geopy.distance’.

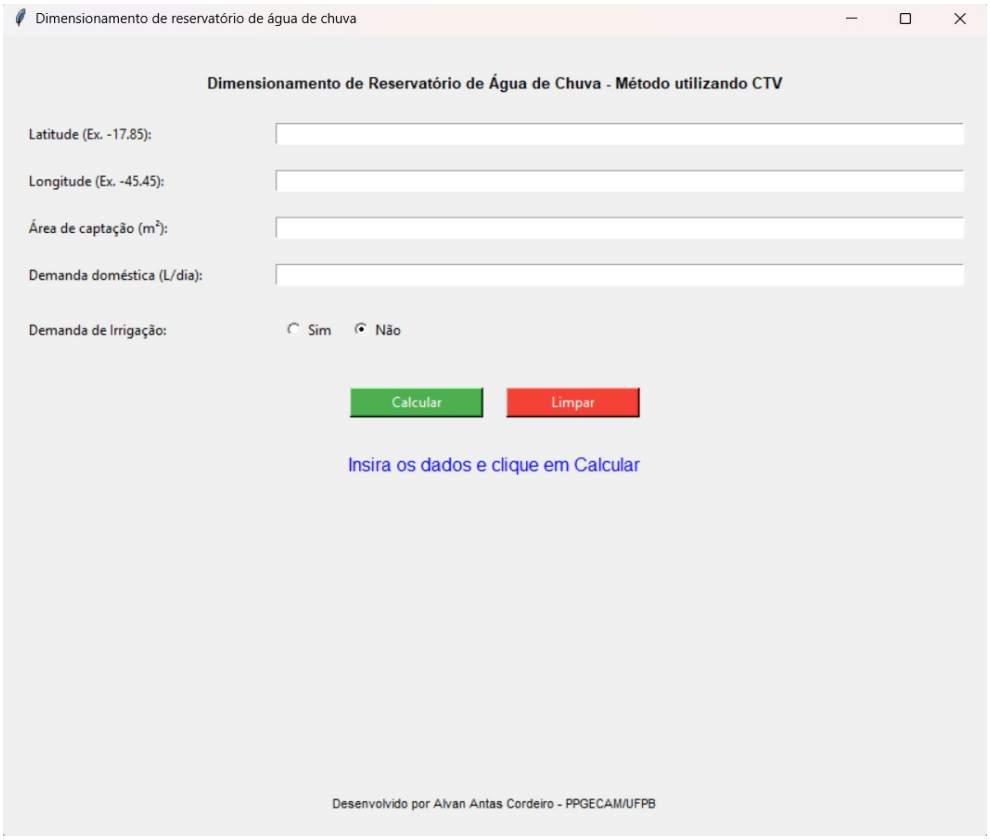
III. Simulação Hidrológica:

- Realiza balanço hídrico diário para volumes de 1 a 100 m³;
- Calculo do volume_entrada [(área * coeficiente de escoamento * precipitação) / 1000] - Conversão para m³;
- Calcula saldo diário (volume de entrada - demanda) e armazena resultados;
- Calculo do volume transbordado diário;
- Calculo do CTV diário (volume transbordado diário dividido pelo volume simulado);
- Calculo do CTV anual (somatório do CTV diário);
- Calcula CTV médio anual para cada volume (média do CTV anual para cada volume simulado).

IV. Determinação do Volume Ótimo:

- Identifica ponto ótimo quando $\Delta CTV/\Delta V > -0,25$ (critério de retorno decrescente);
- Retorna valor ótimo e a confiabilidade na interface gráfica.

Figura 31 – Interface usuário/algorítimo para dimensionamento de reservatório para o Semiárido brasileiro.



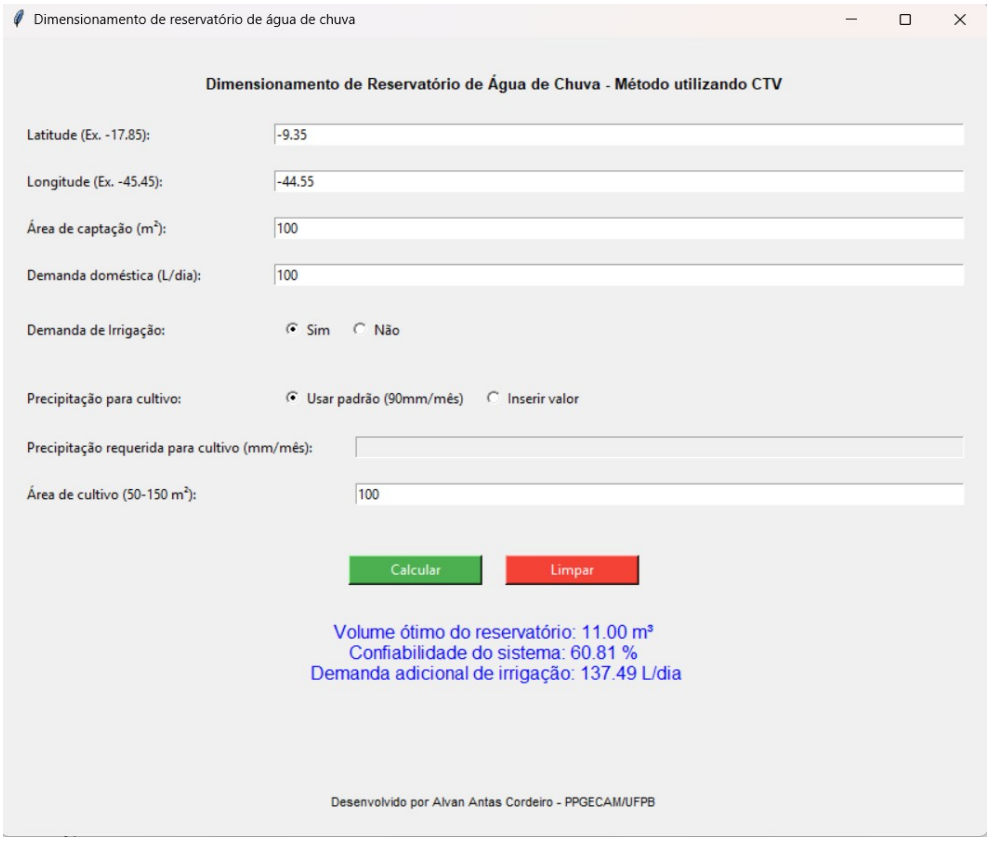
Fonte: autor.

A Figura 32 mostra um exemplo de uso da Interface para as coordenadas (-9,35; -44,55) com precipitação média anual de 900,012 mm/ano e área de captação de 100 m² e demanda diária de 100 L/dia resultando em um valor ótimo de reservatório de 21,00 m³ e confiabilidade de 71,29%.

O método apresentado ajuda reduzir incertezas no planejamento, auxiliando na otimização de recursos e garantia de segurança hídrica para populações do Semiárido, destacando a necessidade de políticas públicas e projetos técnicos que considerem a variabilidade climática regional para sistemas de captação eficientes, sustentáveis e adaptados às reais necessidades locais.

A interface gráfica de usuário, concebida como produto final desta pesquisa, materializa a aplicabilidade do método, transformando a complexidade do modelo de simulação em uma ferramenta de acesso democrático e utilização intuitiva. A interface, desenvolvida em Python, permite que utilizadores sem formação especializada, como agricultores e técnicos de campo, obtenham um dimensionamento técnico robusto mediante a inserção de dados básicos: coordenadas geográficas, área de captação disponível e demandas hídricas doméstica e de irrigação. A aplicação à coordenadas específicas ilustra a funcionalidade e o potencial de impacto da ferramenta para o planejamento local.

Figura 32 – Utilização da interface para dimensionamento de reservatório para as coordenadas (-9,35; -44,55) com precipitação média anual de 900,012 mm/ano e área de captação de 100 m² e demanda doméstica de 100 L/dia e com área de irrigação de 100m².



Fonte: autor.

6. CONCLUSÕES

A análise dos mapas de CTV gerados para os 40 cenários estudados revelou que a área de captação tem uma relação direta com a eficiência do sistema. Esta relação evidencia que um desequilíbrio entre a capacidade de captação e a de armazenamento constitui uma estratégia ineficiente. Um reservatório superdimensionado em relação à área de captação tende a apresentar ociosidade do volume de reservatório, enquanto uma área de captação excessiva para a capacidade do reservatório resulta em perdas sistemáticas por transbordamento, particularmente durante eventos pluviométricos intensos.

O critério de parada estabelecido – identificação do ponto em que a taxa de variação do CTV em relação ao volume ($\Delta CTV/\Delta V$) se torna superior a -0,25 – mostrou-se eficiente em determinar o volume ótimo do reservatório. Este ponto representa o limiar além do qual incrementos adicionais na capacidade de armazenamento produzem ganhos marginais na redução de perdas, tornando o investimento economicamente desaconselhável. Outro ponto é a relação com a precipitação média anual local, que influencia diretamente o volume ótimo do reservatório, demonstrando a capacidade do método em se adaptar às especificidades climáticas de cada região.

Adicionalmente, a análise permitiu estabelecer relações quantitativas fundamentais para o dimensionamento. Ficou comprovada uma forte correlação linear positiva entre a precipitação média anual e o volume ótimo do reservatório. Outra constatação foi o efeito da demanda no desempenho do sistema, em que se verificou o aumento da demanda, particularmente oriunda da irrigação, tende a reduzir o volume ótimo calculado, uma vez que um maior consumo previne o transbordamento. Contudo, este mesmo aumento impacta negativamente a confiabilidade do sistema – definida como a porcentagem de dias no ano em que a demanda é integralmente atendida. Em regiões com precipitação inferior a 500 mm/ano, a confiabilidade manteve-se baixa, mesmo para volumes otimizados, salientando a limitação intrínseca da captação de águas pluviais em ambientes de extrema seca e a necessidade de fontes suplementares.

Em cenários com alta área de captação (100 e 200 m²), a ampliação do reservatório a partir de 20 m³ não promoveu uma redução expressiva no volume absoluto de água desperdiçada. Este é um argumento importante para a otimização de recursos em projetos de política pública, como o P1MC, onde a racionalização de custos é indispensável para ampliar o alcance e a sustentabilidade das ações.

Por fim, conclui-se que esta pesquisa oferece uma contribuição relevante para o campo do aproveitamento de água de chuva no Semiárido brasileiro. A metodologia proposta, ancorada no

CTV e operacionalizada por meio de um algoritmo e uma interface acessível, elimina a subjetividade de métodos de dimensionamento convencionais e fornece uma base técnica sólida para o planejamento de SCAAC. A ferramenta desenvolvida tem o potencial de ser adotada por gestores públicos, organizações da sociedade civil e comunidades, promovendo uma maior eficiência no uso dos recursos hídricos e fortalecendo a estratégia de convivência com o semiárido. Para trabalhos futuros, recomenda-se a incorporação de uma análise de custo-benefício integrada ao algoritmo e a atualização da base de dados pluviométricos com projeções de mudanças climáticas, refinando ainda mais a capacidade de planejamento de longo prazo.

7 REFERÊNCIAS

ABDULLA, F. A.; AL-SHAREEF, A. W. Roof rainwater harvesting systems for household water supply in Jordan. **Desalination**, v. 243, n. 1-3, p. 195-207, 2009. DOI: 10.1016/j.desal.2008.05.013.

AB'SÁBER, A. N. **Os Domínios de Natureza no Brasil: Potencialidades Paisagísticas**. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Impacto da Mudança Climática nos Recursos Hídricos no Brasil**. 96 p., Brasília: ANA, 2024.

ALI, S.; SANG, Y.-F. Implementing rainwater harvesting systems as a novel approach for saving water and energy in flat urban areas. **Sustainable Cities and Society**, v. 89, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scs.2022.104304.

ALLEN, J. E.; HAARHOF, J. A proposal for the probabilistic sizing of rainwater tanks for constant demand. **Journal of the South African Institution of Civil Engineering**. v. 57. n. 2, p. 22-27, Paper 1014, 2015.

AMOS, C. C.; RAHMAN, A; GATHENYA, J. Economic Analysis and feasibility of rainwater harvesting systems in urban and peri-urban environments: A review of the global situation with a special focus on Australia and Kenya. **Water**. v. 8, n. 4, 149, 2019. DOI: https://doi.org/10.3390/w8040149.

ANDRADE, J. A.; NUNES, M. A. Acesso à água no Semiárido Brasileiro: uma análise das políticas públicas implementadas na região. **Revista Espinhaço**, v, 3, n. 2, p. 28-39, 2014. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.3964806.

ANDRADE, M. C. **A terra e o homem no Nordeste: Contribuição ao estudo da questão agrária no Nordeste**. Recife: Editora Universitária UFPE, 1998.

ARTICULAÇÃO SEMIÁRIDO BRASILEIRO (ASA). **Semiárido – É no semiárido que a vida pulsa**. Disponível em: https://www.asabrasil.org.br/semiarido. Acesso em: 27 ago. 2024.

ARTICULAÇÃO SEMIÁRIDO BRASILEIRO (ASA). **Ações – P1MC**. Disponível em: https://www.asabrasil.org.br/acoes/p1mc. Acesso em: 24 dez. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 15527: Aproveitamento de água de chuva de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis – Requisitos.** Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

AZEVÊDO, A. C. Verso e Reverso das Políticas Públicas de Água para o Semiárido Brasileiro. **Revista Política e Planejamento Regional**, v. 2, n. 2, p. 373-392, 2015. ISSN 2358-4556.

BEZERRA, S. M. C.; CHRISTAN, P.; TEIXEIRA, C. A.; FARAHBAKHSH, K. Dimensionamento de reservatório para aproveitamento de água de chuva: comparação entre métodos da ABNT NBR 15527:2007 e Decreto Municipal 293/2006 de Curitiba, PR. **Ambiente Construído**, v. 10, n. 4, 2010. DOI: https://doi.org/10.1590/S1678-86212010000400015

CAMPOS, A.; ALVES, A. M. **O Programa Água para Todos: Ferramenta poderosa contra a pobreza**, 2014.

COMISSÃO PASTORAL DA TERRA. **Conflitos por água registrado no ano de 2022**. Disponível em: https://www.cptnacional.org.br/downlods/download/6-conflitos-pela-agua/14292-conflitos-pela-a-gua-2022-tabela-si-ntese. Acesso em: 24 dez. 2024.

DANTAS, J. C. Conflitos por Água no Semiárido Brasileiro e as Contradições da Ação Estatal. **X Simpósio Nacional de Geografia Agrária, IX Simpósio Internacional**, 2019. ISBN: 978-85-415-1148-3.

DANTAS, E. K. C. **Aproveitamento de água de chuva para usos não potáveis no setor residencial de Bananeiras – PB: Estratégia para crise hídrica.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Campina Grande, 2024, Sumé-PB.

DAUDA, N. M.; DAUD, N. F.; BAKARA, A. A. A.; AZIZA, N. A.; BADREALAMA, S.; DOLLAHA, Z. Performance of a rainwater harvesting tank under under varying non-potable demand: Case study in Kubang Semang, Penang. **Jurnal Kejuruteraan,** v. 35, n. 6, p. 1481-1486, 2023. DOI: https://doi.org/10.17576/jkukm-2023-35(6)-21.

DOMÈNECH, L.; SAURÍ, D. A comparative appraisal of the use of rainwater harvesting in single and multi-family buildings of the Metropolitan Area of Barcelona (Spain): social experience, drinking water savings and economic costs. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, n. 6-7, p. 598-608, 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.11.010.

FEWKES, A. Modelling the Performance of Rainwater Collection Systems: Towards a Generalised Approach. **Urban Water**, v. 1, p. 323-333, 2000.

FONSECA, C. R.; SANDOVAL, L. C. T.; GORDILLO-BARTOLO, F. I.; DELGADO-HERNÁNDEZ; D. J; GONZÁLEZ, F. A. Design of rainwater harvesting storage through efficiency and cost elasticity: case study Santander University. **Urban Water Journal**, v. 20, n. 5, p. 592-603, 2023. DOI: 10.1080/1573062X.2023.2205388.

GOH, Y. C.; IDERIS M. Tangki NAHRIM 2.0: an R-based water balance model for rainwater harvesting tank sizing application. **Water Practice & Technology**. v. 16, n. 1, p. 182-195, 2021. DOI: 10.2166/wpt.2020.106.

GOMES, F. I. B. P.; ZANELLA, M. E. Histórico, causas e características da semiaridez do Nordeste do Brasil. **Geografares**, 37, 2023. Disponível em: http://journals.openedition.org/geografares/10409. Acesso em: 07 jan. 2025.

HANDLER, D. L.; SMITH, J.; MILLER, R. Rainwater Harvesting: Ancient Practices for a Sustainable Future. **Journal of Sustainable Agriculture**, v. 36, n. 4, p. 52-66, 2012.

HASHIMOTO, T.; LOUCKS, D. P.; STEDINGER, J. R.; Reliability, resiliency, robustness, and vulnerability criteria for water resource systems. Water Resources Research, v. 18, n. 1, 1982.

HOFKES; FRAZIER. **Runoff coefficients**. In.: PACEY, Arnold; CULLIS, Adrian. Rainwater Harvesting. 1996.

IMTEAZ, M. A.; ADEBOVE, O. B.; RAYBURG, S.; SHANABLEH, A. Rainwater harvesting potential for southwest Nigeria using daily water balance model. **Resources, Conservation and Recycling**, v 62, p. 51-55, 2012. DOI: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.02.007.

IMTEAZ, M. A.; SHANABLEHB, A.; RAHMANC, A.; AHSAND, A. Optimisation of rainwater tank design from large roofs: A case study in Melbourne, Australia. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 55, p. 1022-1029, 2011. DOI: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.05.013.

IMTEAZ, M. A.; AHSAND, A.; SHANABLEHB, A. Reliability analysis of rainwater tanks using daily water balance model: Variations within a large city. **Resources, Conservation and Recycling**, v 77, p. 37-43, 2013. Doi: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.05.006.

INSTITUTO NACIONAL DO SEMIÁRIDO (INSA). **O Semiárido brasileiro**. Disponível em: https://www.gov.br/insa/pt-br/semiarido-brasileiro#:~:text=O%20Semi%C3%A1rido%20Brasileiro%20se%20estende,semi%C3%A1ridos%20mais%20povoados%20do%20mundo. Acesso em: 27 ago. 2024.

JENKINS, D.; PEARSON, F.; MOORE, E.; SUN, J. K.; VALENTINE, R. Feasibility of rainwater collection systems in California. **Contribution,** n. 173, 1978. Californian Water Resources Centre, University of California.

KHAN, A.; PARK, Y.; PARK, J.; KIM, R. Assessment of Rainwater Harvesting Facilities Tank Size Based on a Daily Water Balance Model: The Case of Korea. **Sustainability**, 14, 15556, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/ su142315556.

KHASTAGIR, A.; JAYASURIYA, N. Optimal sizing of rain water tanks for domestic water conservation. **Journal of Hydrology**, v. 381, n. 3-4, p. 181-188, 2010. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.11.040.

LI, R.; ZHANG, S.; GUO, Y.; ZHANG, F.; ZHANG, W.; YAN, J.; LI, H. Impacts of compatibility between rainwater availability and water demand on water saving performance of rainwater harvesting systems. **Journal of Environmental Management**, v. 370, 2024.

LINHARES, L. I. M.; XIMENES, A.V. S. F. M.; MONTEIRO, J. B. Secas e políticas públicas no semiárido brasileiro: Um debate oportuno acerca do binômio combate a seca X convivência Com o semiárido. **Geopauta**, v. 5, n. 3, p. 1-24, 2021. DOI: 10.22481/rg.v5i3.e2021.e9233

LONDRA, P.A.; KOTSATOS, I.-E.; THEOTOKATOS, N.; THEOCHARIS, A.T.; DERCAS, N. Reliability Analysis of Rainwater Harvesting Tanks for Irrigation Use in Greenhouse Agriculture. **Hydrology**, 8, 132, 2021. https://doi.org/10.3390/ hydrology8030132

LUCENA, R. L.; FERREIRA, A. M.; FERREIRA, H. F. P. A.; STEINKE, E. T. Variabilidade climática no município de Caicó/RN: secas e chuvas num arquétipo do clima semiárido do nordeste brasileiro. **CLIMEP – Climatologia e Estudos da Paisagem,** v. 8, n. 2, p. 67-89, 2013.

LUNA, Y. H. D. M. **Eficiência volumétrica de reservatórios para aproveitamento de água de chuva em edificações residenciais no Brasil**. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2022. 169 p.

MEDEIROS, S. A.; NÓBREGA, R. A.; MORAES NETO, J. M.; BARRETO, A. B.; VASCONCELOS, G. N.; DINIZ, R. R. S. Investigação da influência do El Niño e da La Niña sobre a Variabilidade da precipitação na cidade de Patos, Paraíba. **Revista Brasileira de Geografia Física,** v. 13, n. 1, p. 336-349, 2020. DOI: https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.1.p336-349.

MOLLE, F.; CARDIER, E. **Manual do Pequeno Açude**. SUDENE-DPG-PRN-DPP-APR. Recife, Brasil, 1992.

MOREIRA, E. R. F.; DANTAS, J. C.; DANTAS, D. S.; NASCIMENTO, A. P.; REGALA, R. M.; TARGINO, I.; MOREIRA, J. F.; VIANNA, P. C. G. A luta por água no estado da Paraíba: contradições e conflitos. **Revista Nera**, n. 34, Dossiê 2016, p. 61-81, 2019. ISSN: 1806-6755.

MURÇA, M. C. R.; JULIO, M.; MORUZZI, R. B. Metodologia de Otimização para o Dimensionamento de Reservatórios de Águas Pluviais. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos,** v. 19, n. 2, p. 29-40, 2014.

NASCIMENTO, R. S.; BORGES, V. P.; MELO, D. C. D**.** Implications of climate change on water availability in a seasonally dry tropical forest in the Northeast of Brazil. **Rev. Ceres,** v. 70, n. 3, p. 1-11, 2023. DOI: https://doi.org/10.1590/0034-737X202370030001

NOTARO, V.; LIUZZO, L.; FRENI, G.. Evaluation of the optimal size of a rainwater harvesting system in Sicily. **Journal of Hydroinformatics**. 19.6, p. 853-864, 2017. DOI: 10.2166/hydro.2017.150.

QUIGLEY, N.; BEAVIS, S. G.;WHITE, I. Rainwater harvesting augmentation of domestic water supply in Honiara, Solomon Islands, **Australian Journal of Water Resources**, v. 20, n. 1, p. 65-77, 2016. DOI: 10.1080/13241583.2016.1173314.

RELATÓRIO ANUAL DO DESMATAMENTO NO BRASIL (RAD 2022). **MapBiomas**, 2023.

RIBEIRO, A. K. M.; MARINOSKI, D. L. Estudo sobre Materiais para Coberturas Utilizadas em Sistemas de Aproveitamento de Água Pluvial Residenciais. **MIX Sustentável**, v. 6, n. 2, p. 53-66, 2020. DOI: https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2020.v6.n2.53-66

RIBEIRO, C. C.; SANTOS, C. L. S.; SILVA, L. P. B. Conflito pela água, entre a escassez e a abundância: Marcos teóricos. **Ambientes**. v. 1, n. 2, p. 11-37, 2019. DOI: 10.48075/amb.v1i2.23619

RIBEIRO, C. S.; OLIVEIRA, G. G. A Questão Hídrica no Semiárido Baiano: Conflitos pelo Usos da Água e as Tecnologias Sociais de Aproveitamento de Água de Chuva. **Revista del CESLA. International Latin American Studies Review**, v. 23, p. 355-381, 2019.

ROSLI, M. I.; ABDULLAH, S.; NOOR, N. A. M. Utilizing Rainwater Harvesting System for Water Scarcity at a Double-Story Residential House. **Pertanika J. Sci. & Technol**. v. 31, n 6, p. 2961-2972, 2023. ISSN: 0128-7680. e-ISSN: 2231-8526.

SANTOS, W. M.; SOUZA, R. M. S.; SOUZA, E. S.; ALMEIDA, A. Q.; ANTONINO, A. C. D. Variabilidade espacial da sazonalidade da chuva no semiárido brasileiro. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 2, n. 4, p. 368-376, 2017. DOI: 10.24221/jeap.2.4.2017.1466.368-376.

SILVA, A. S.; GHISI, E. Uncertainty analysis of daily potable water demand on the performance evaluation of rainwater harvesting systems in residential buildings. **Journal of Environmental Management**, v. 180, p. 82-93, 2016. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.05.028.

SILVA, C. S. **Metodologia de dimensionamento de reservatórios para armazenamento de água de chuva em edificações residenciais no Brasil.** 2023. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2023. 202 p.

SILVA, J. I. A. O. **Cidades Inteligentes, gestão de recursos hídricos e planejamento**. Andradina: Meraki, 2023. ISBN 978-65-88781-80-7.

SILVA, G. A.; FARIAS, C. W. L. A. Análise espaço-temporal da vegetação no semiárido do Nordeste brasileiro utilizando parâmetros biofísicos. **Revista Semiárido De Visu**, v. 9, n. 3, p. 195-203, 2021. DOI: https://doi.org/10.31416/rsdv.v9i3.232

SILVA, R. F.; OLIVEIRA, M. A. Captação de Água da Chuva no Semiárido Brasileiro: Uma Análise dos Benefícios e Limitações. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 25, n. 1, p. 43-58, 2020.

SILVA, E. R. A. C.; GALVÍNCIO, J. D.; NASCIMENTO, K. R. P.; SANTANA, S. H. C.; SOUZA, W. M.; COSTA, V. S. O. Análise da tendência temporal da precipitação pluviométrica interanual e intra-anual no semiárido pernambucano. **Revista Brasileira de Climatologia**, Ano 14, v. 22, p. 76-98, 2018. DOI: https://doi.org/10.5380/abclima.v22i0.53956

SILVA NETO, J. A.; SALES, M. C. L. Considerações sobre a aplicabilidade da classificação climática de Thornthwaite no contexto semiárido do nordeste brasileiro: estudo de caso da Serra de Baturité e seu entorno. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 26, p. 833-853, 2020. DOI: https://doi.org/10.5380/abclima.v26i0.69110.

SILVEIRA, S. M. B. **A geopolítica da sede no Brasil: Um estudo sobre água e pobreza no campo**. Tese (Doutorado em Serviço Social), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014.

SILVEIRA, S. M. B.; SILVA, M. G. Conflitos socioambientais por água no Nordeste brasileiro: expropriações contemporâneas e lutas sociais no campo. **Revista Katálysis***,* v. 22, n. 2, 2019. DOI: https://doi.org/10.1590/1982-02592019v22n2p342.

SNIR, O.; FRIEDLER, E. Dual Benefit of Rainwater Harvesting —High Temporal-Resolution Stochastic Modelling. **Water,** v. 13, 2415, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/ w13172415.

STEC, A.; ZELEŇÁKOVÁ, M. An analysis of the effectiveness of two rainwater harvesting systems located in Central Eastern Europe. **Water**, v. 11, n. 3, 458, 2019. DOI: https://doi.org/10.3390/w11030458

SUPERINTENDÊNCIA DO DESENVOLVIMENTO DO NORDESTE (SUDENE). **Resolução nº 115/2017**. Disponível em: https://www.gov.br/sudene/pt-br/centrais-de-conteudo/07resolucao1152017nv.pdf. Acesso em: 27 ago. 2024.

SULTANA, R. Optimum tank size for large rainwater harvesting system. **AWWA Water Science**, e1277, 2022. DOI: https://doi. org/10.1002/aws2.1277.

TOOSI, A. S.; TOUSI, E. G.; GHASSEMI, S. A.; CHESHOMI, A.; ALAGHMAND, S. A multi-criteria decision analysis approach towards efficient rainwater harvesting. **Journal of Hydrology**, 582, 124501, 2020. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.124501

XAVIER, A. C.; SCANLON, B. R.; KING, C. W.; ALVES, A. I. New improved Brazilian daily weather gridded data (1961-2020). **International Journal of Climatology**, v. 42, n. 16, p. 8390-8404, 2022. DOI: https://doi.org/10.1002/joc.7731

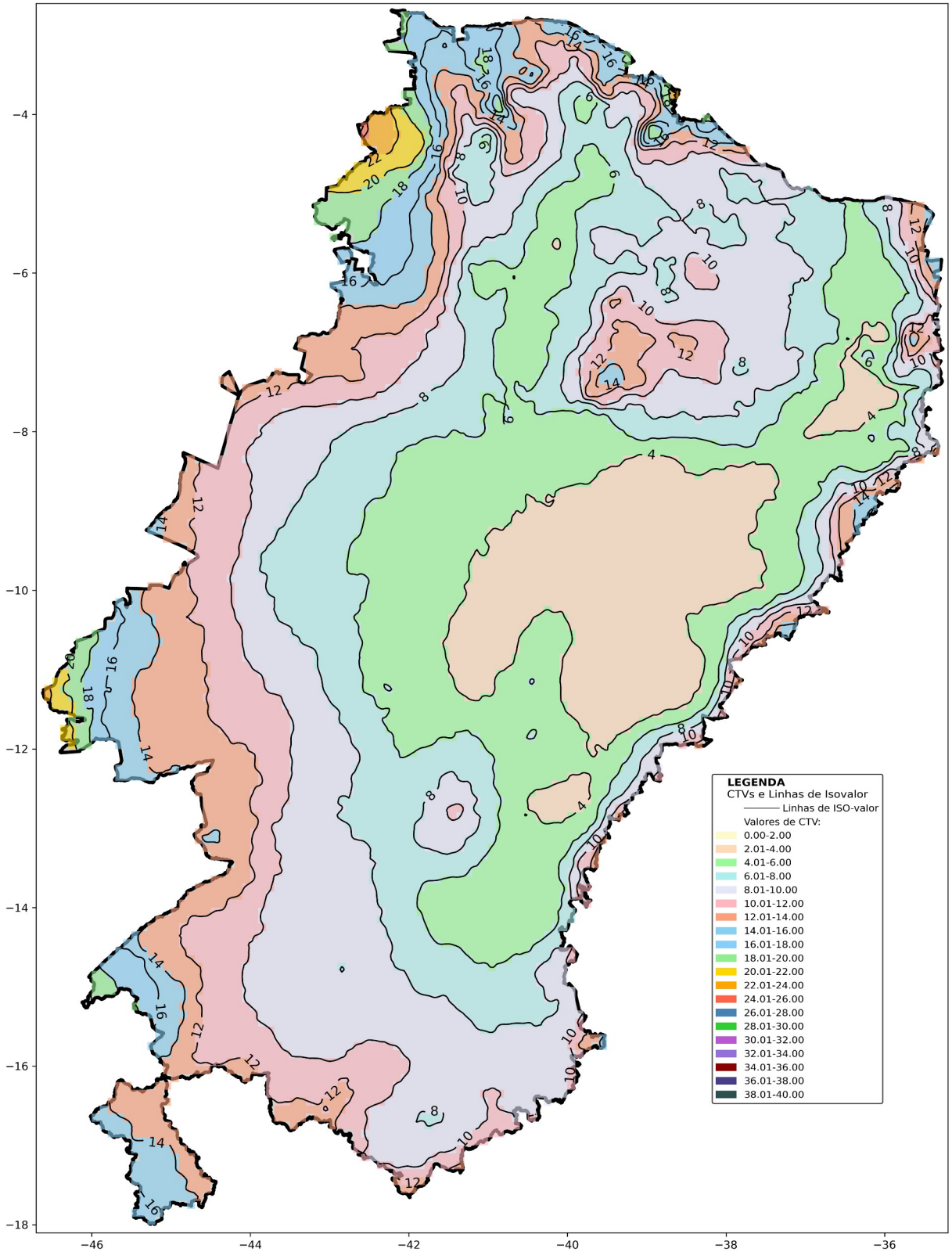
WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME (WWAP). **The United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change**. Paris, UNESCO, 2020. ISBN 978-92-3-100371-4.

ZANELLA, L.; ALVES, W. C. Evolução normativa brasileira sobre sistemas prediais para aproveitamento de água de chuva. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18, 2020, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2020.

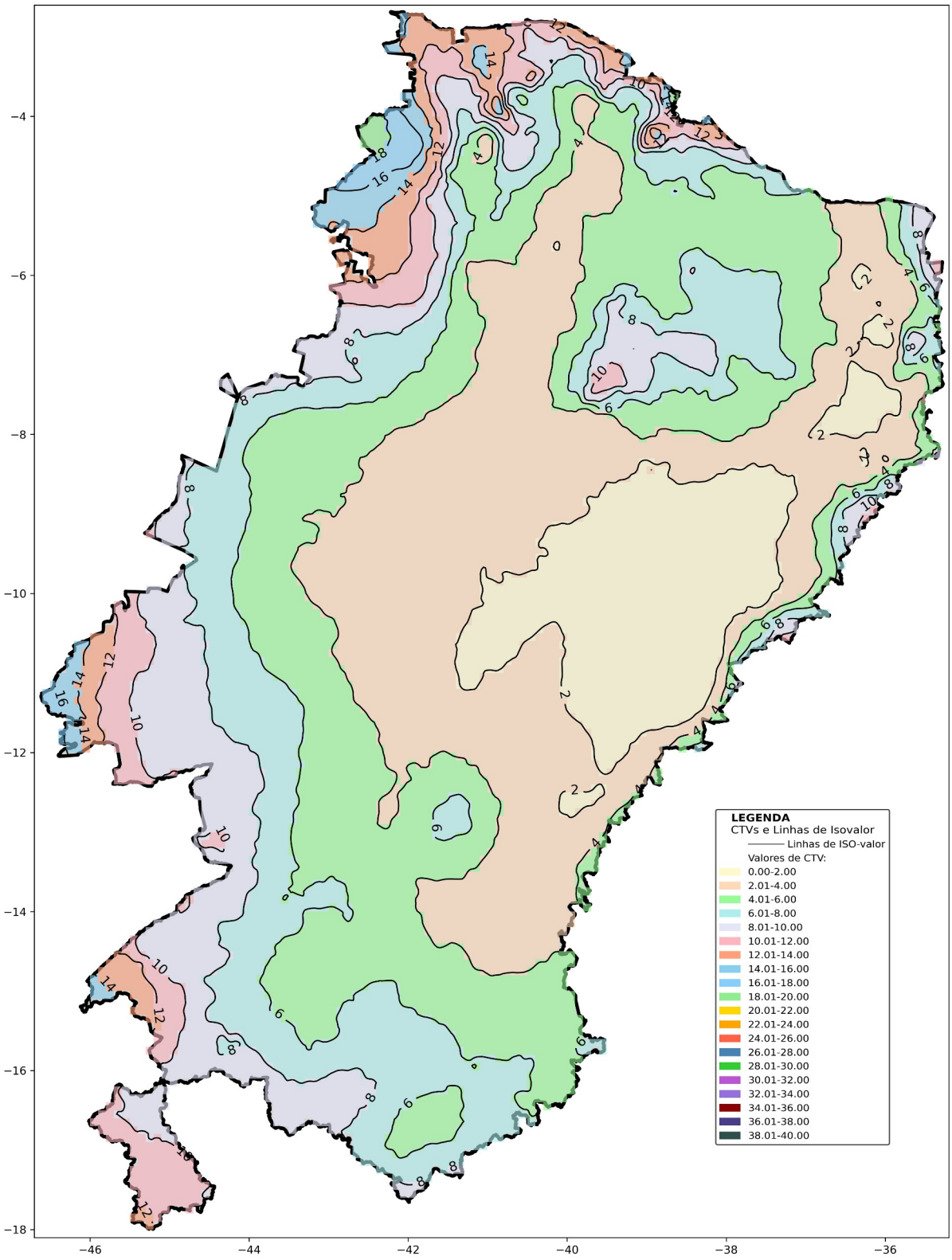
ZHANG, S.; JING, X.; YUE, T.; WANG, J. Performance assessment of rainwater harvesting systems: influence of operating algorithm, length and temporal scale of rainfall time series. **Journal of Cleaner Production**, v. 253, Article 120044, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120044.

APÊNDICE I – MAPAS

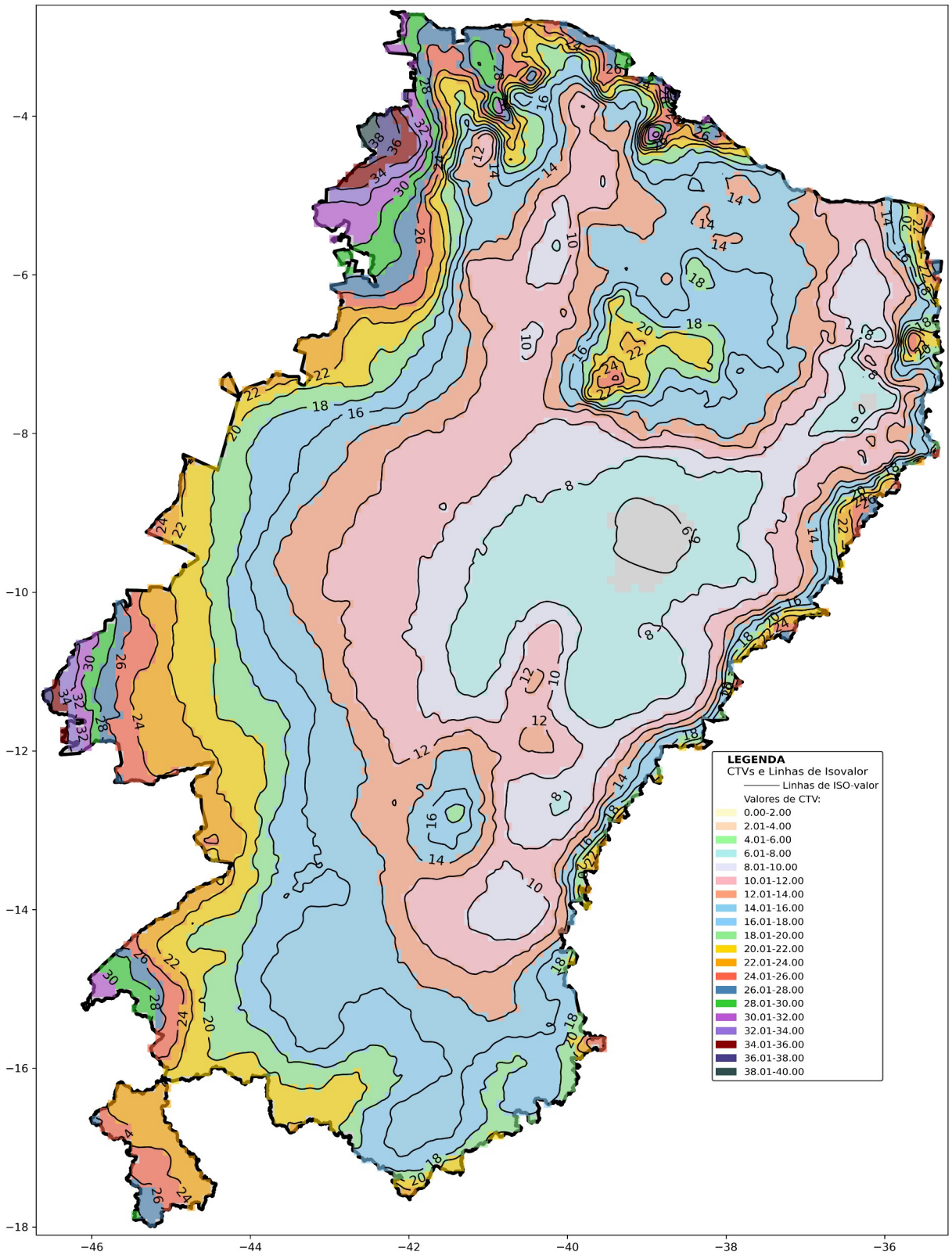
CTV para VR = 2m³ e demanda doméstica de 50l/dia , 50m² de área de captação



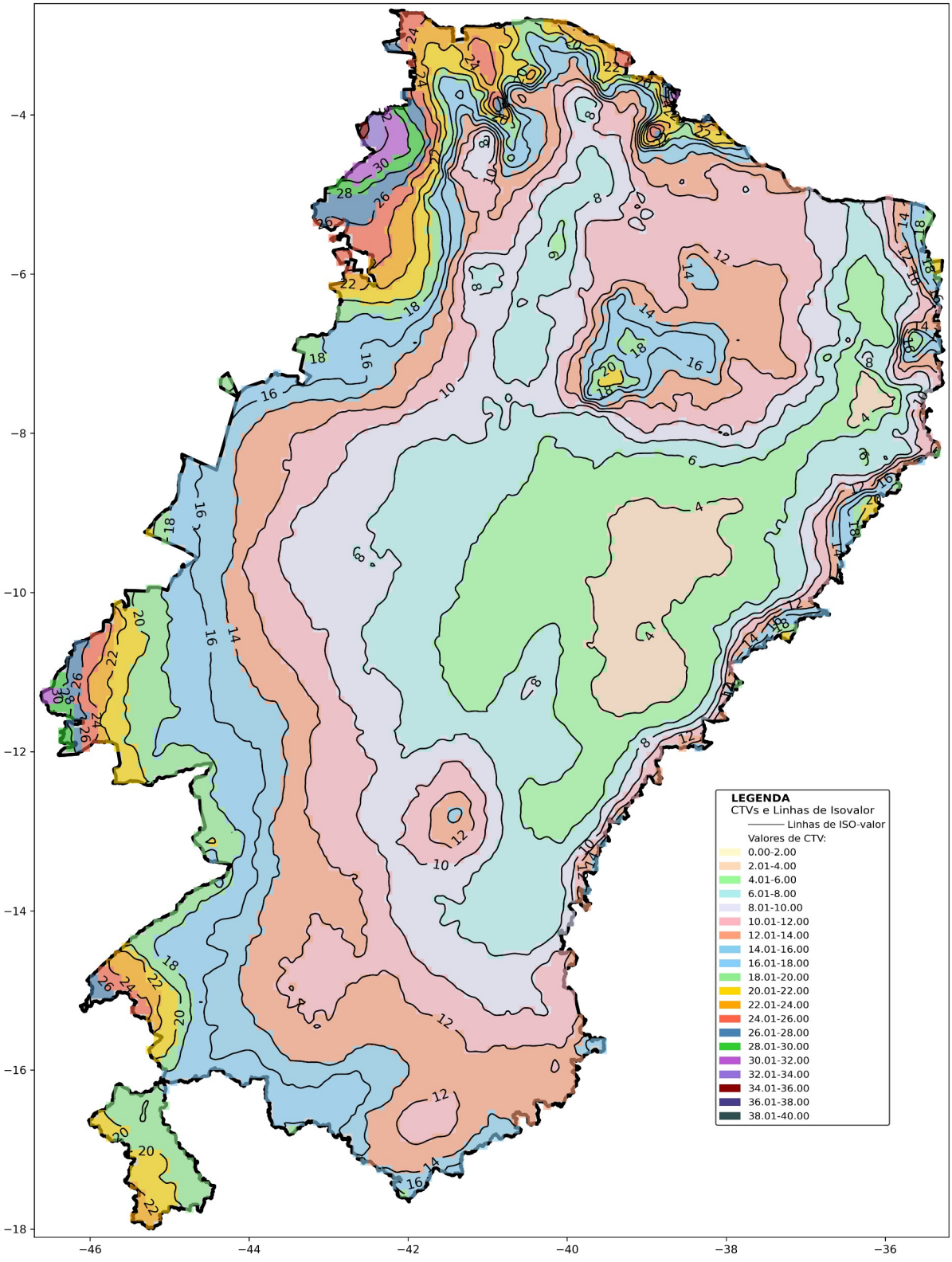
CTV para VR = 2m³ e demanda doméstica de 100l/dia , 50m² de área de captação



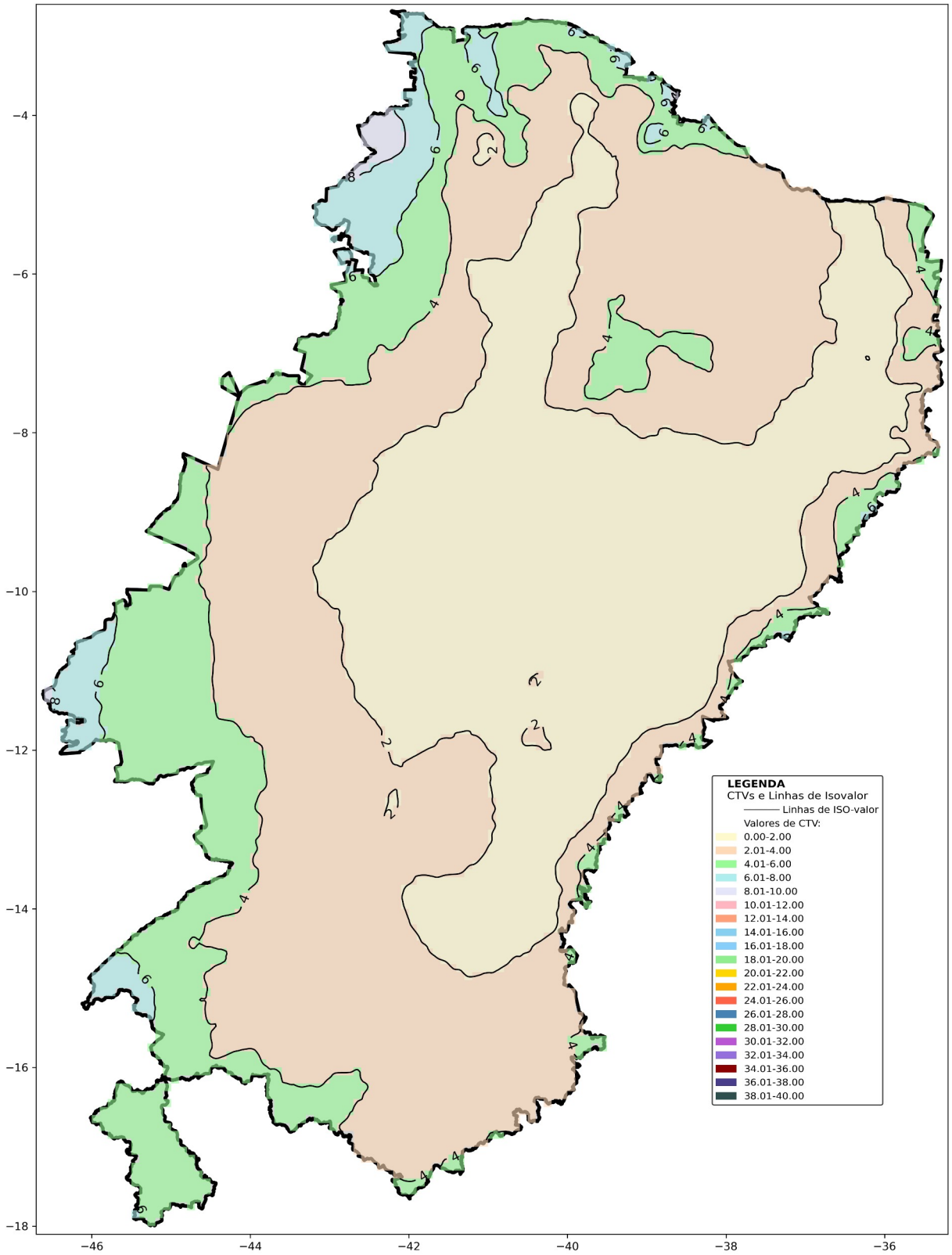
CTV para VR = 2m³ e demanda doméstica de 50l/dia , 75m² de área de captação



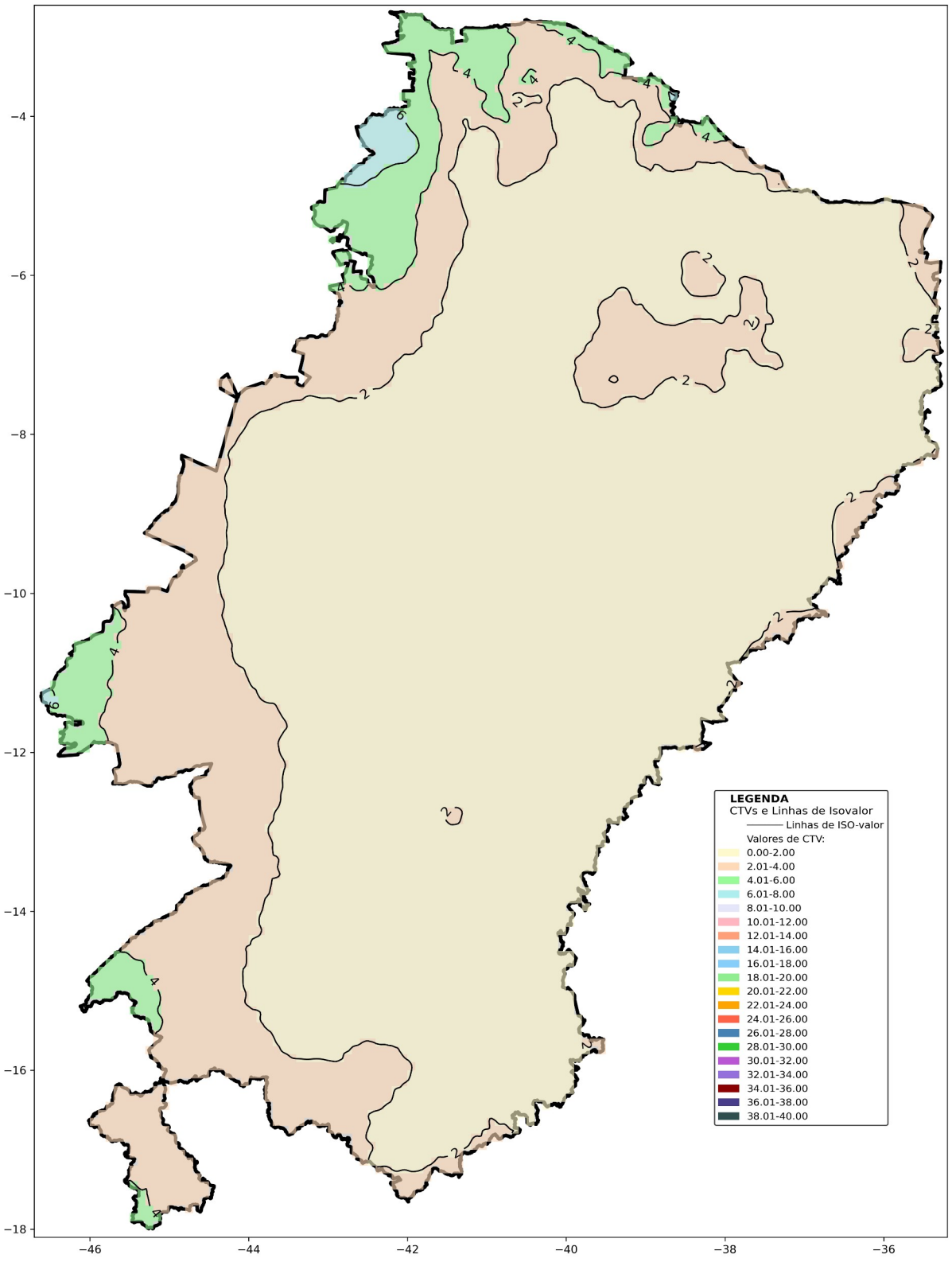
CTV para VR = 2m³ e demanda doméstica de 100l/dia , 75m² de área de captação



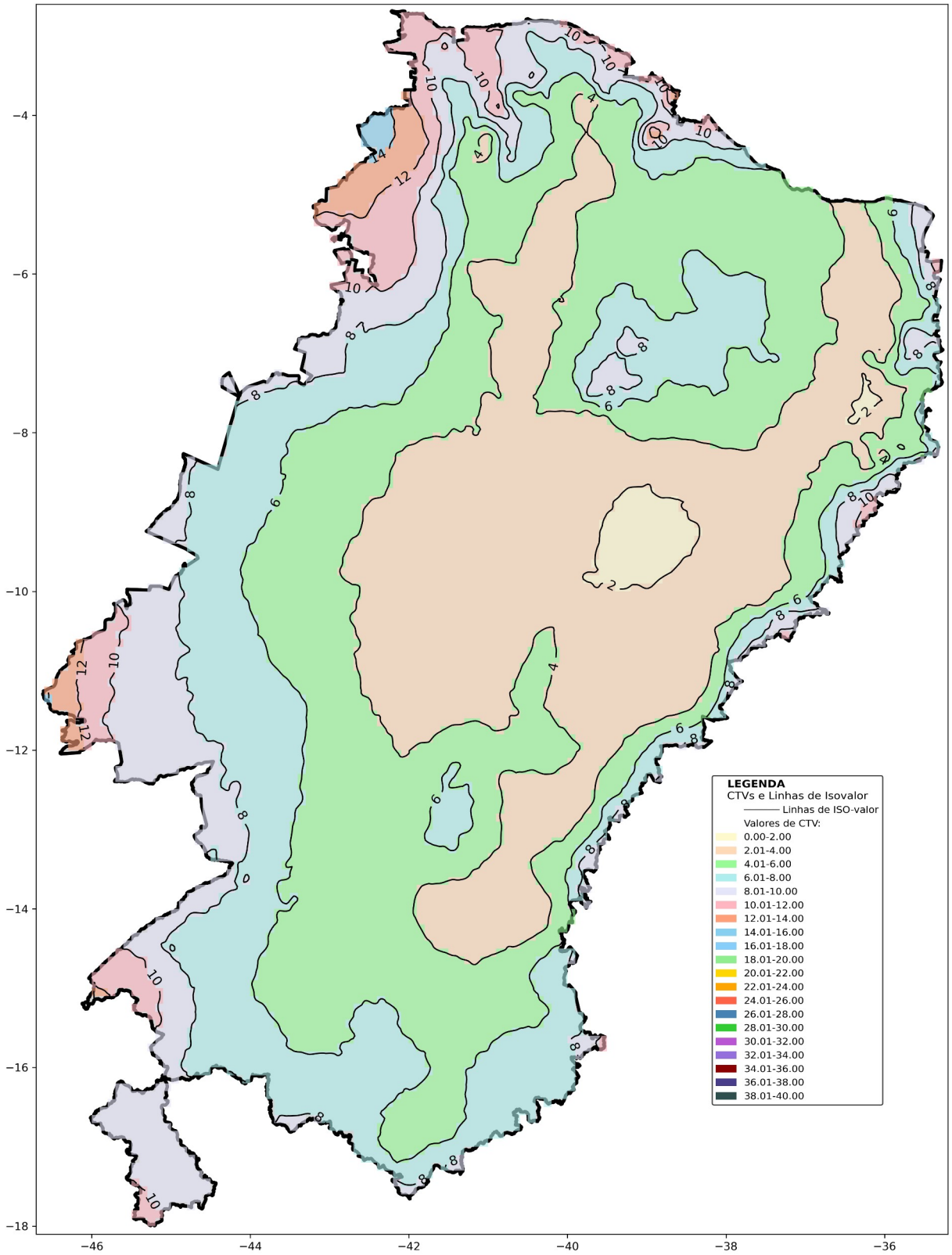
CTV para VR = 5m³ e demanda doméstica de 50l/dia , 50m² de área de captação



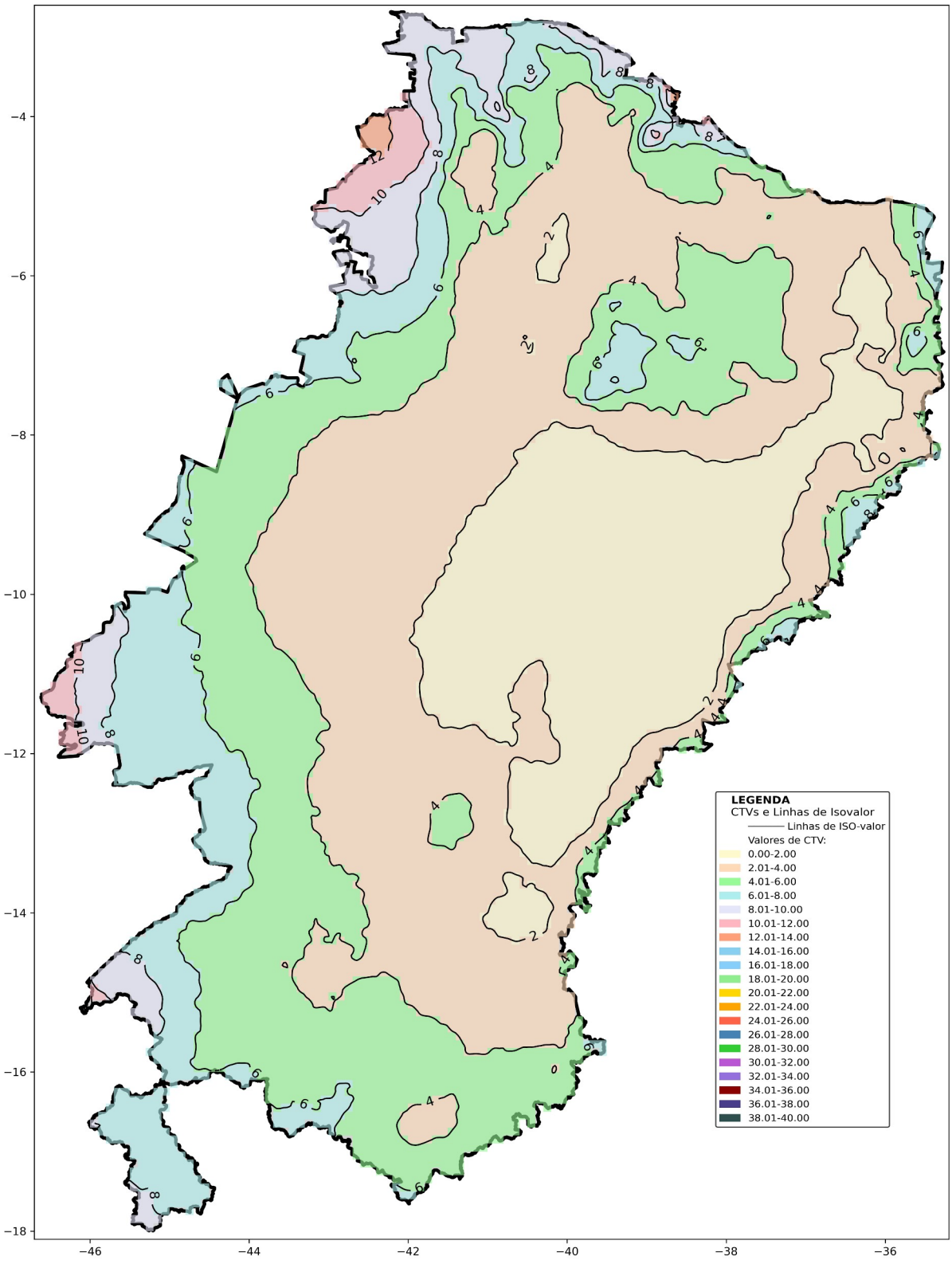
CTV para VR = 5m³ e demanda doméstica de 100l/dia , 50m² de área de captação



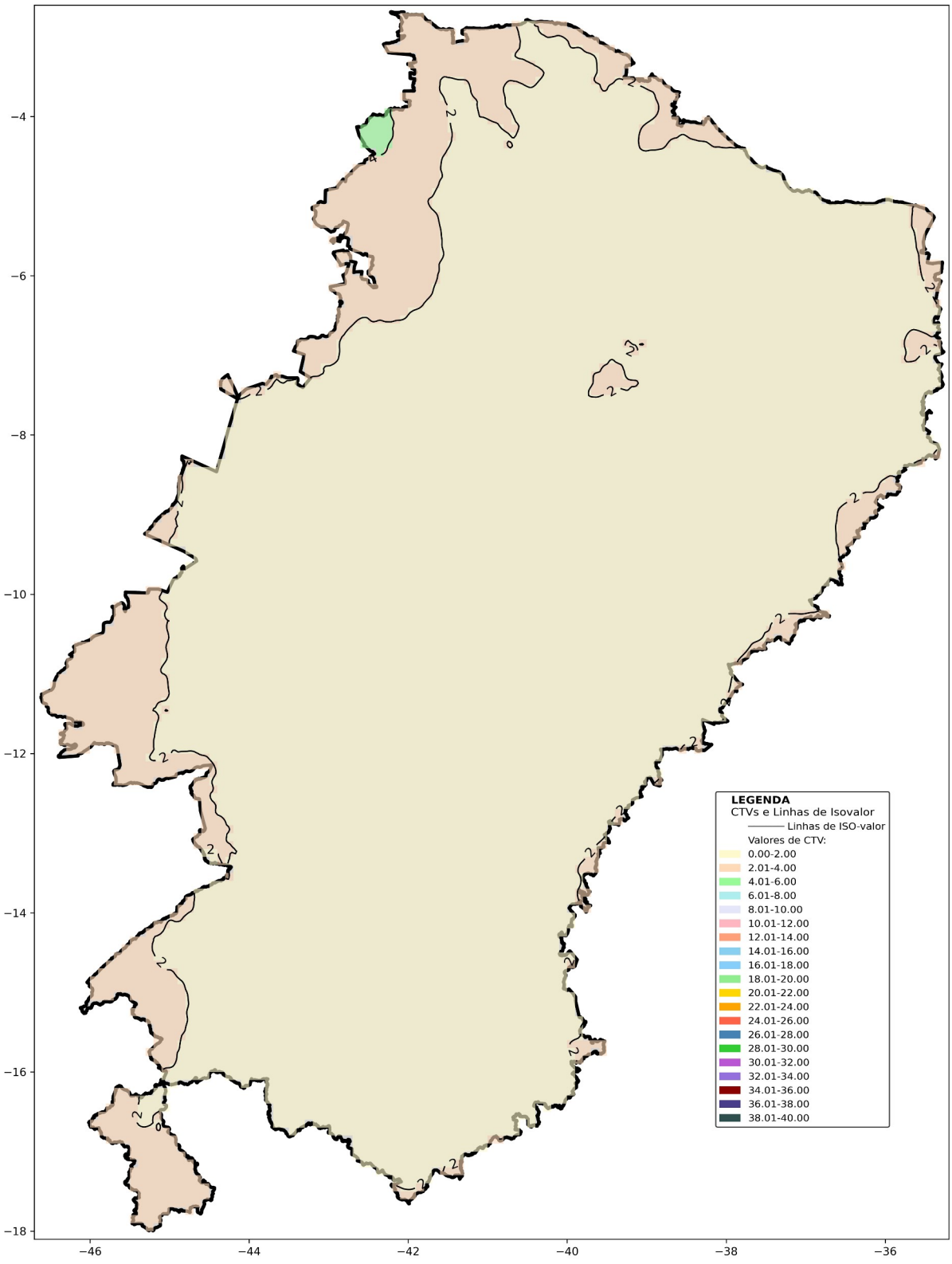
CTV para VR = 5m³ e demanda doméstica de 50l/dia , 75m² de área de captação



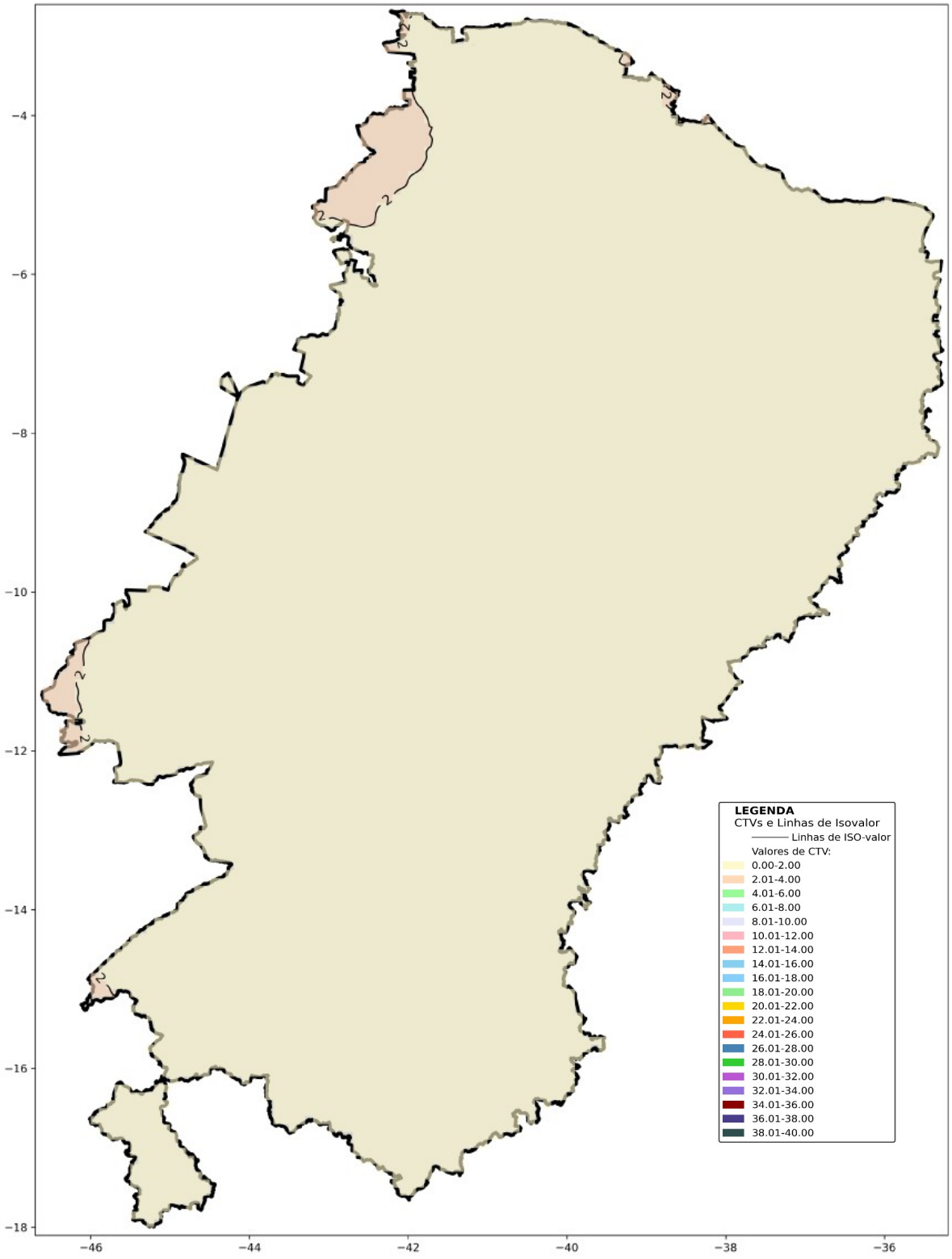
CTV para VR = 5m³ e demanda doméstica de 100l/dia , 75m² de área de captação



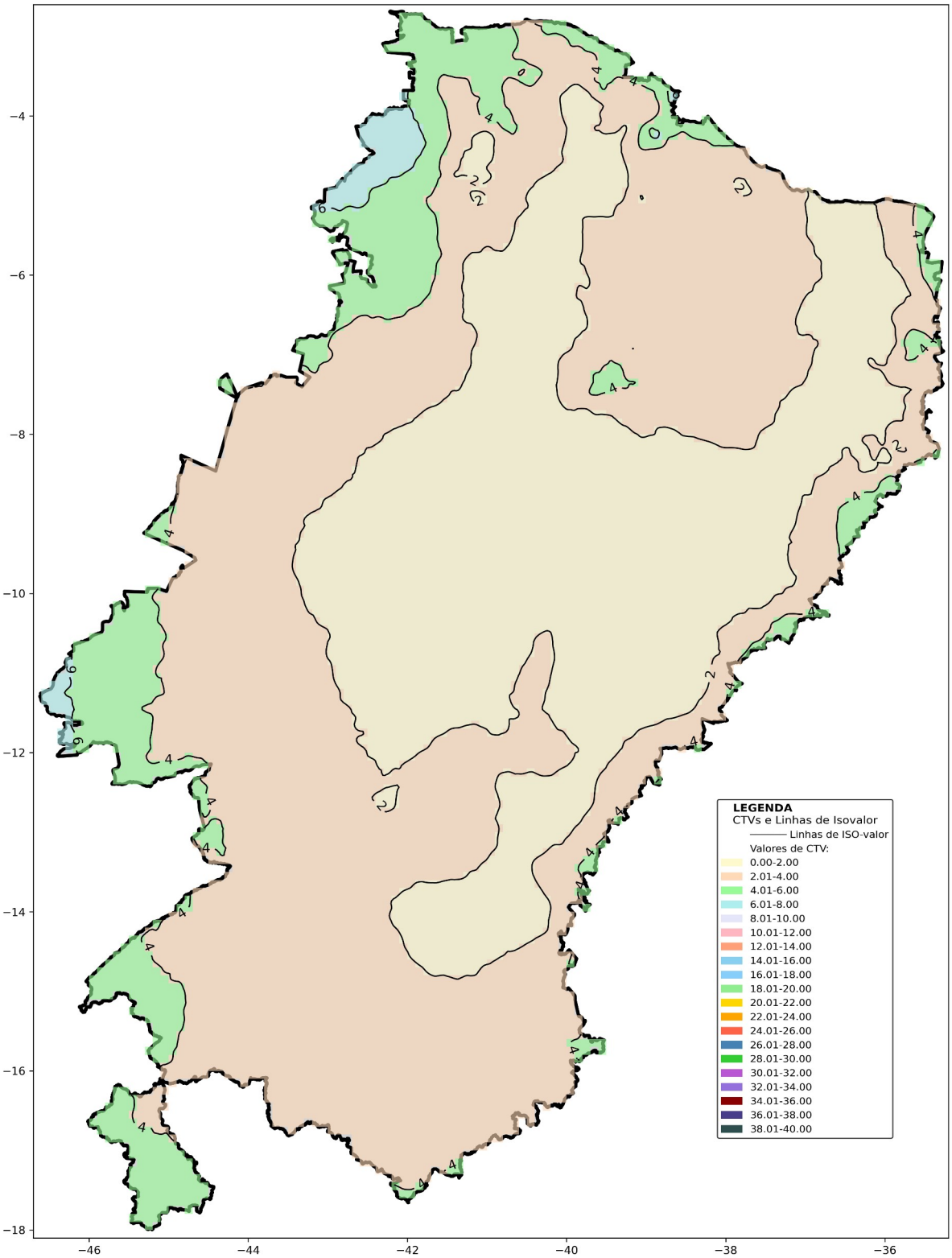
CTV para VR = 10m³ e demanda doméstica de 50l/dia , 50m² de área de captação



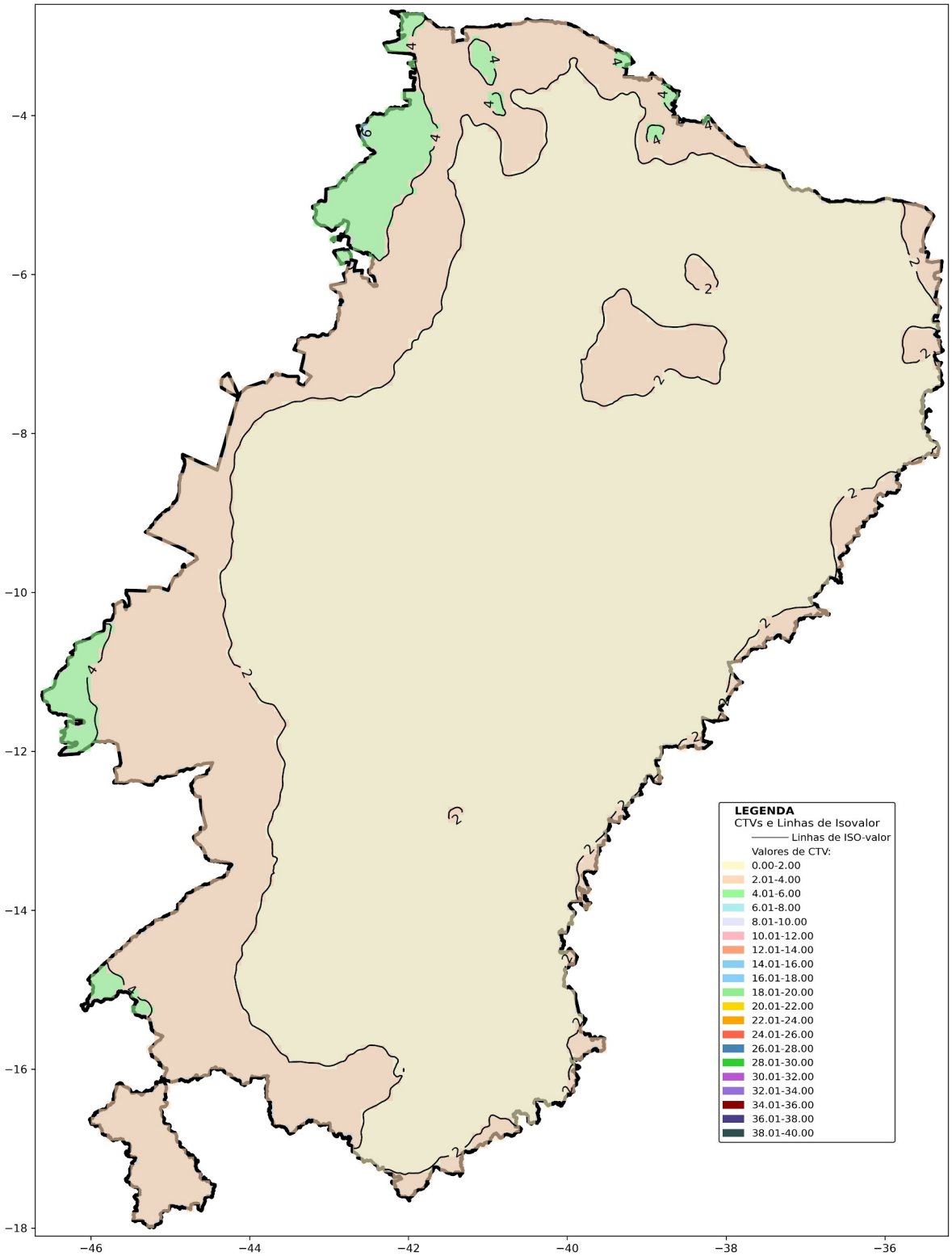
CTV para VR = 10m³ e demanda doméstica de 100l/dia , 50m² de área de captação



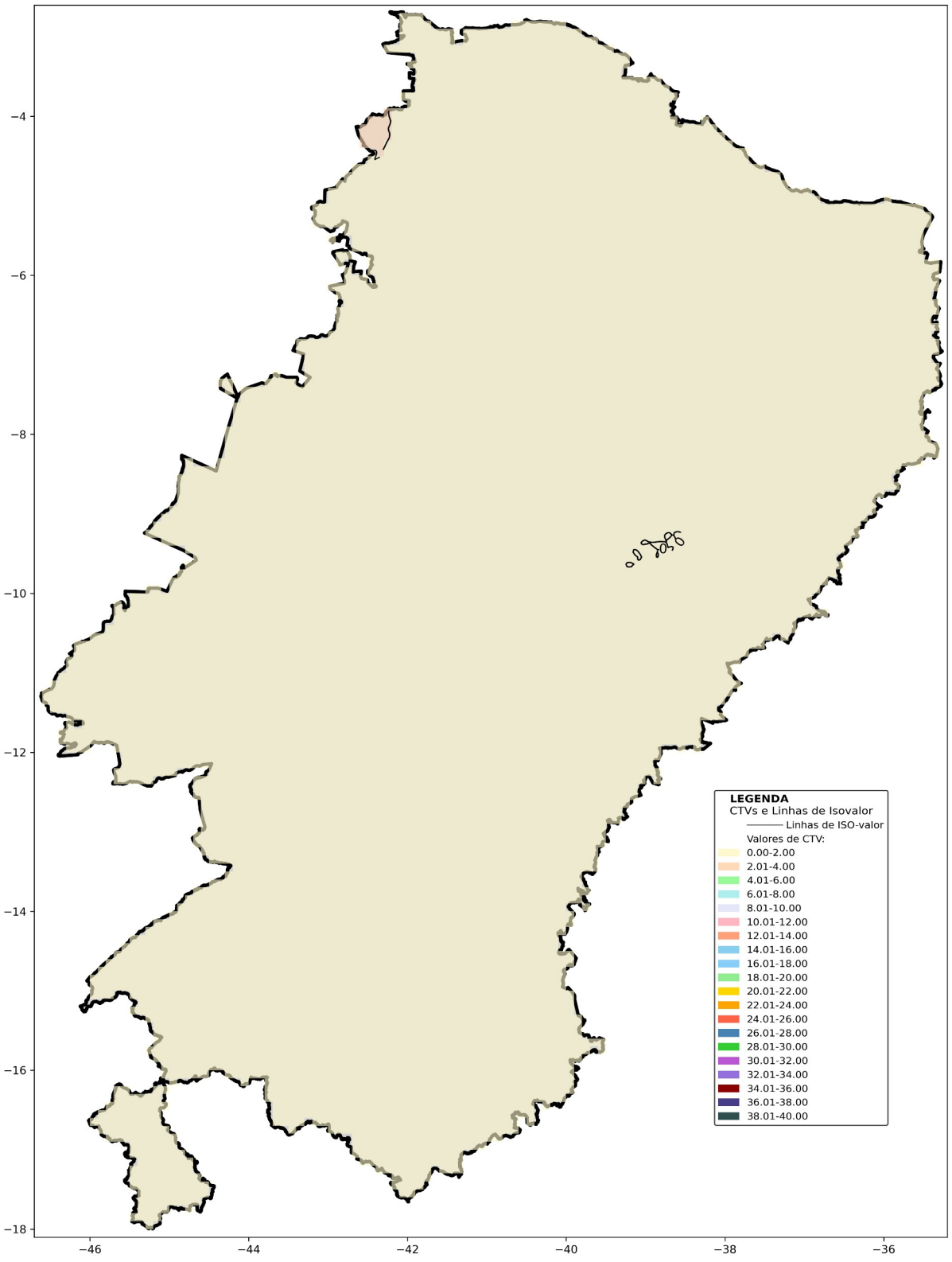
CTV para VR = 10m³ e demanda doméstica de 50l/dia , 75m² de área de captação



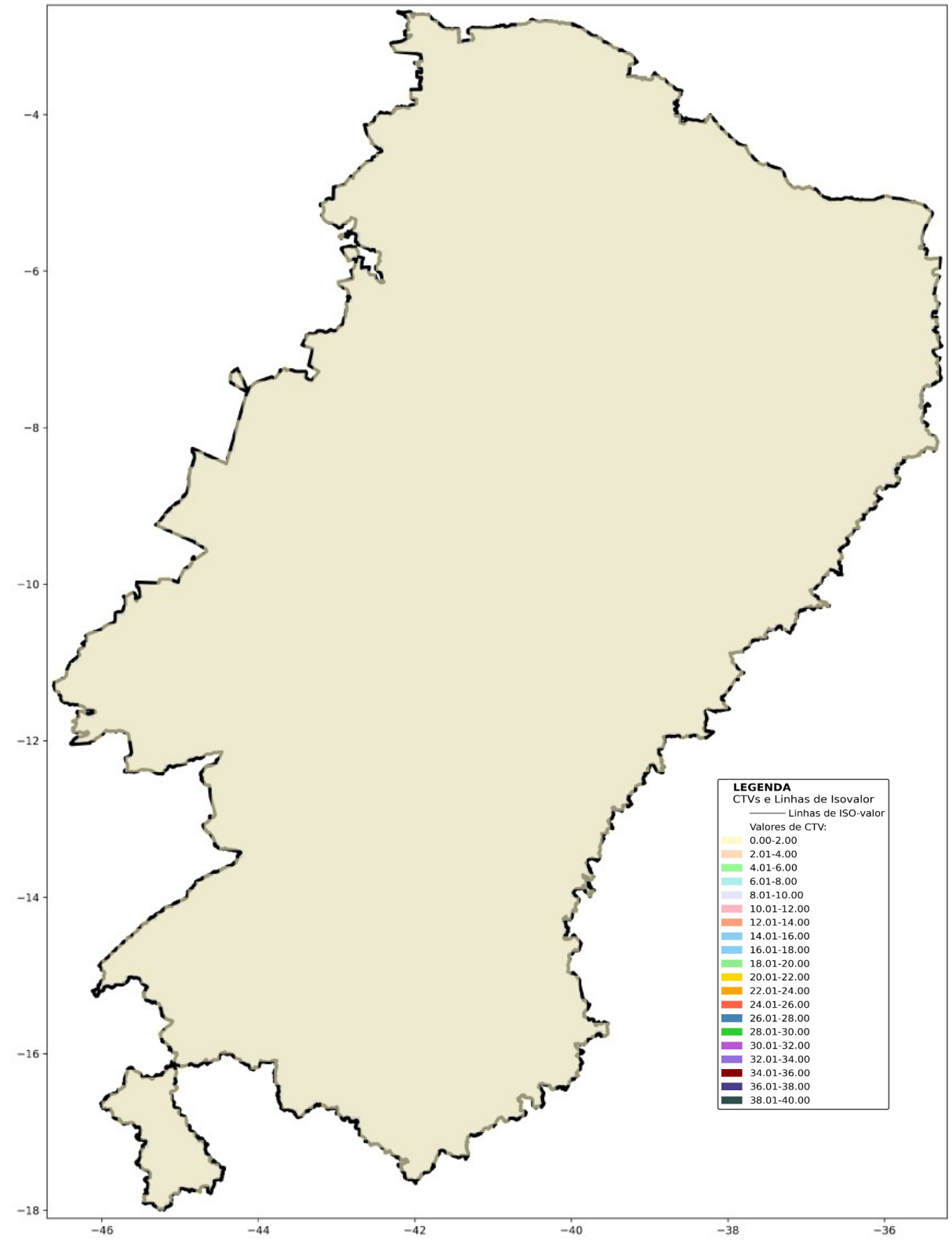
CTV para VR = 10m³ e demanda doméstica de 100l/dia , 75m² de área de captação



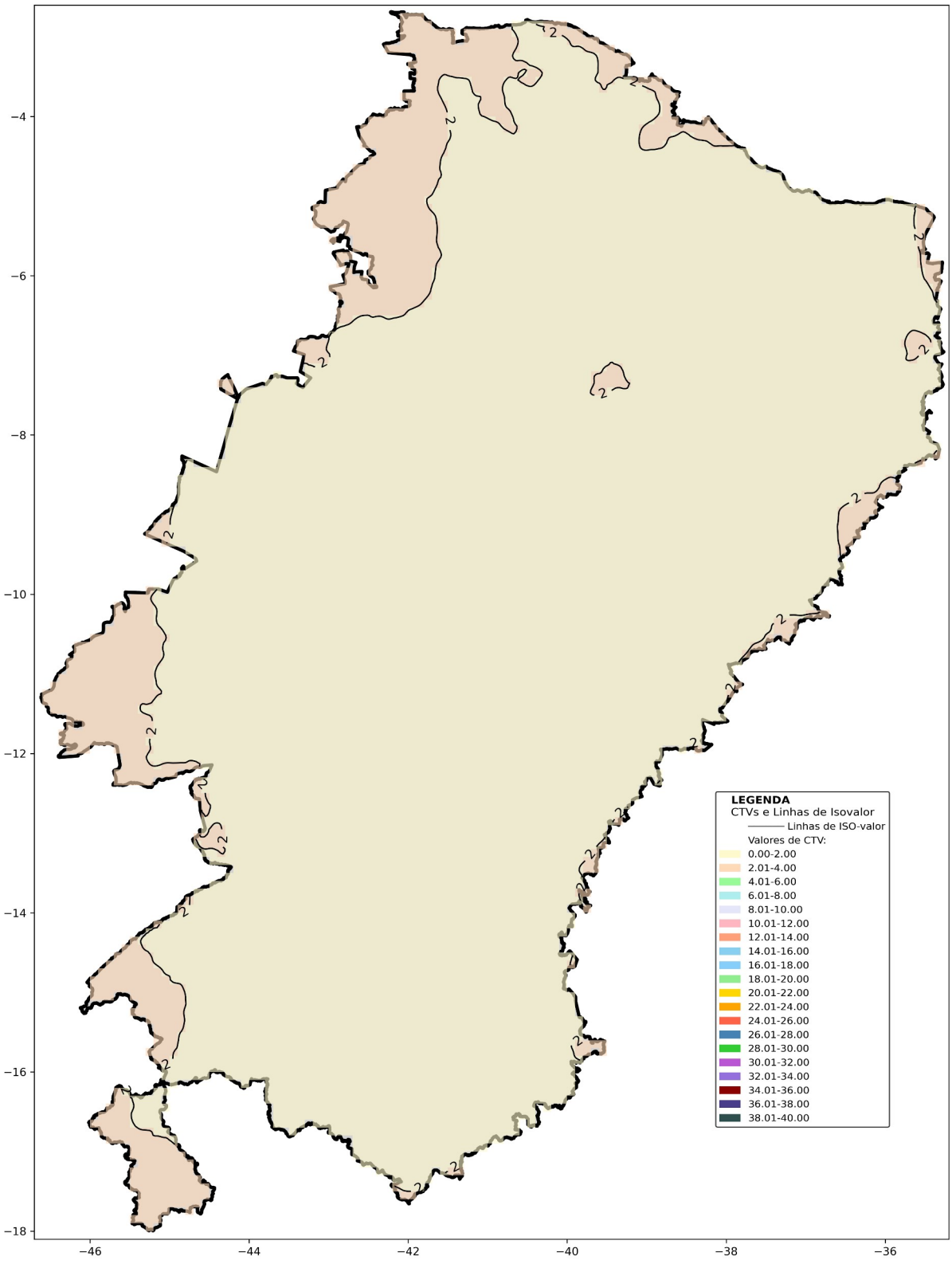
CTV para VR = 20m³ e demanda doméstica de 50l/dia , 50m² de área de captação



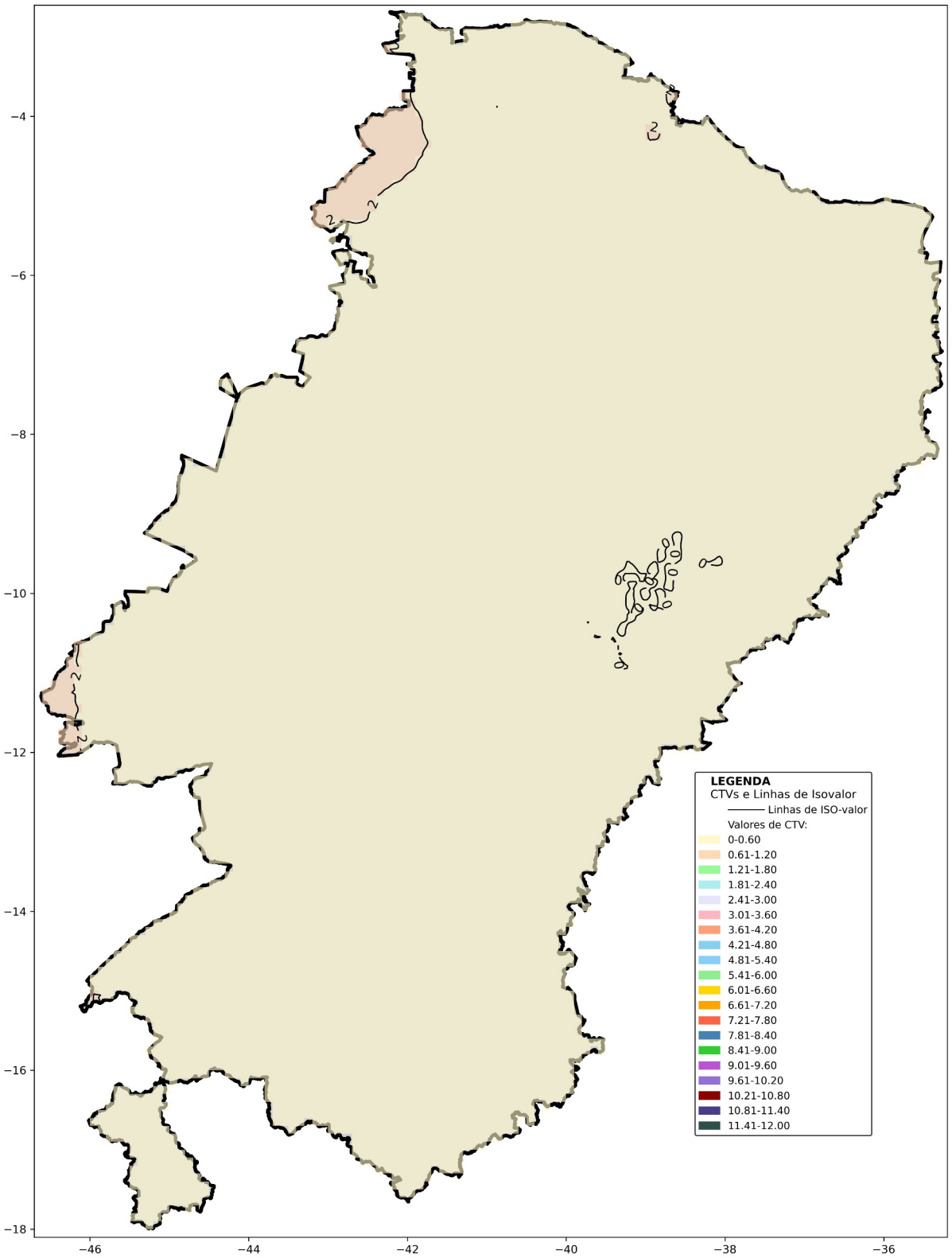
CTV para VR = 20m³ e demanda doméstica de 50l/dia , 50m² de área de captação



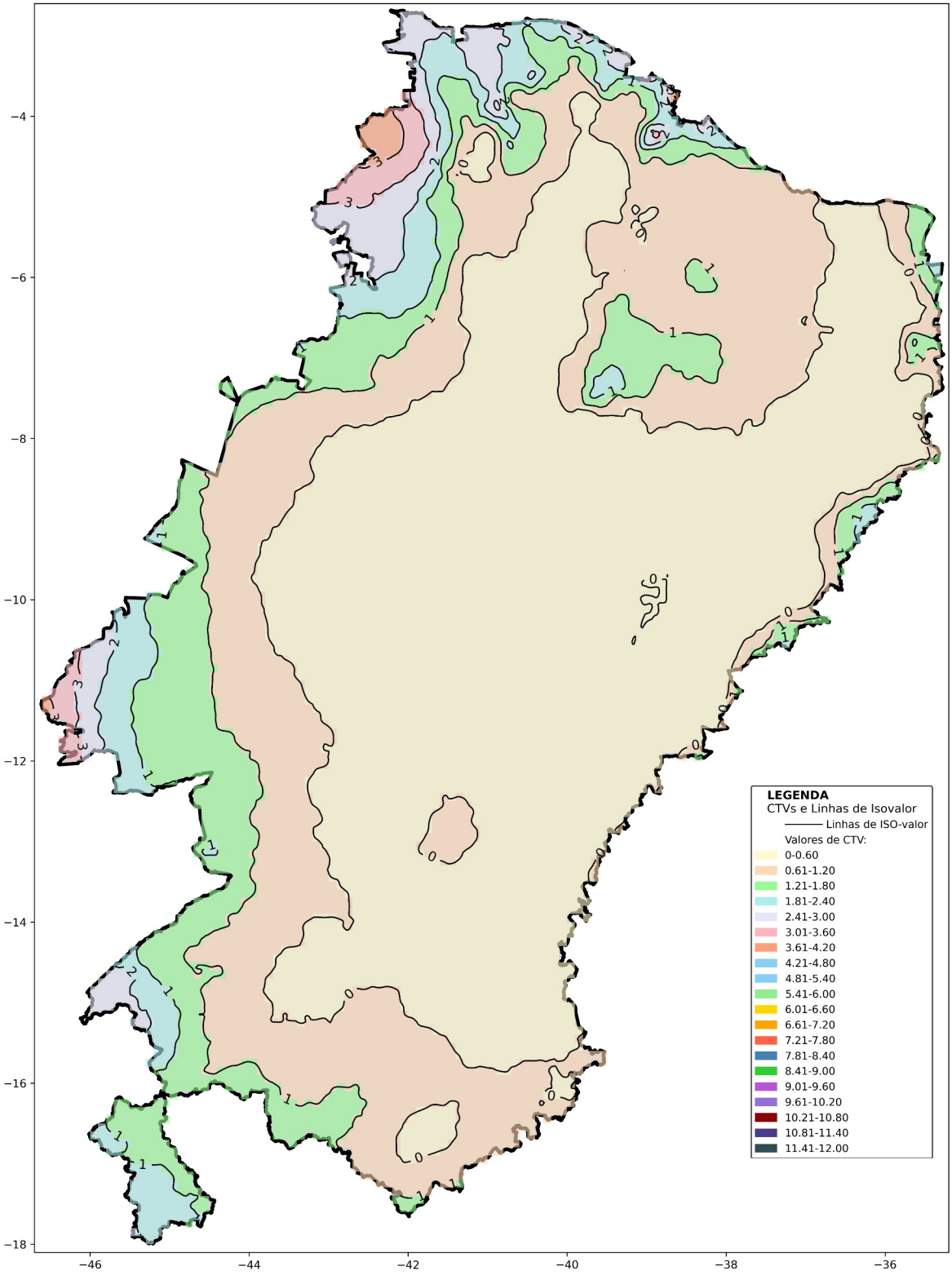
CTV para VR = 20m³ e demanda doméstica de 50l/dia , 75m² de área de captação



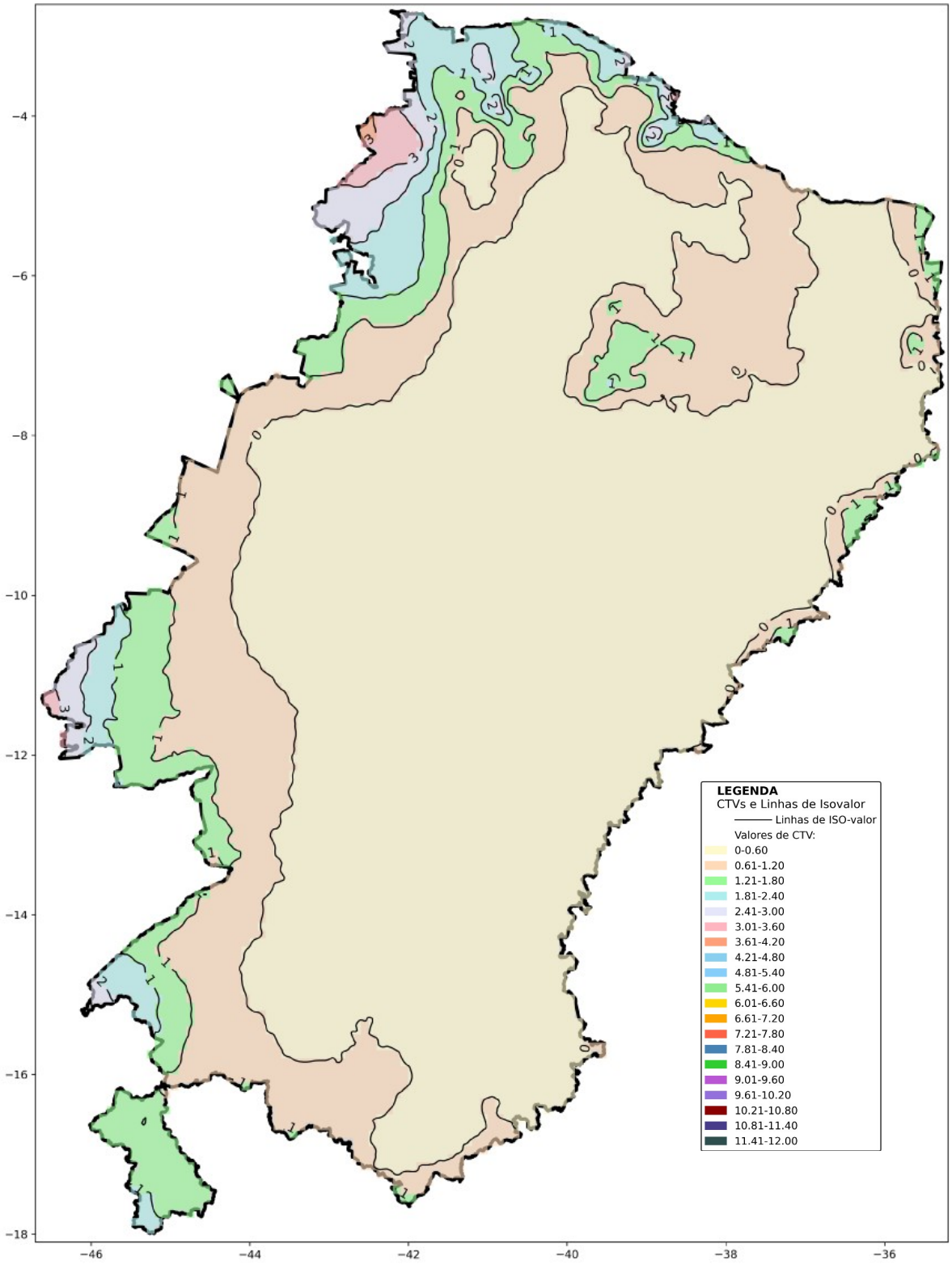
CTV para VR = 20m³ e demanda doméstica de 50l/dia , 75m² de área de captação



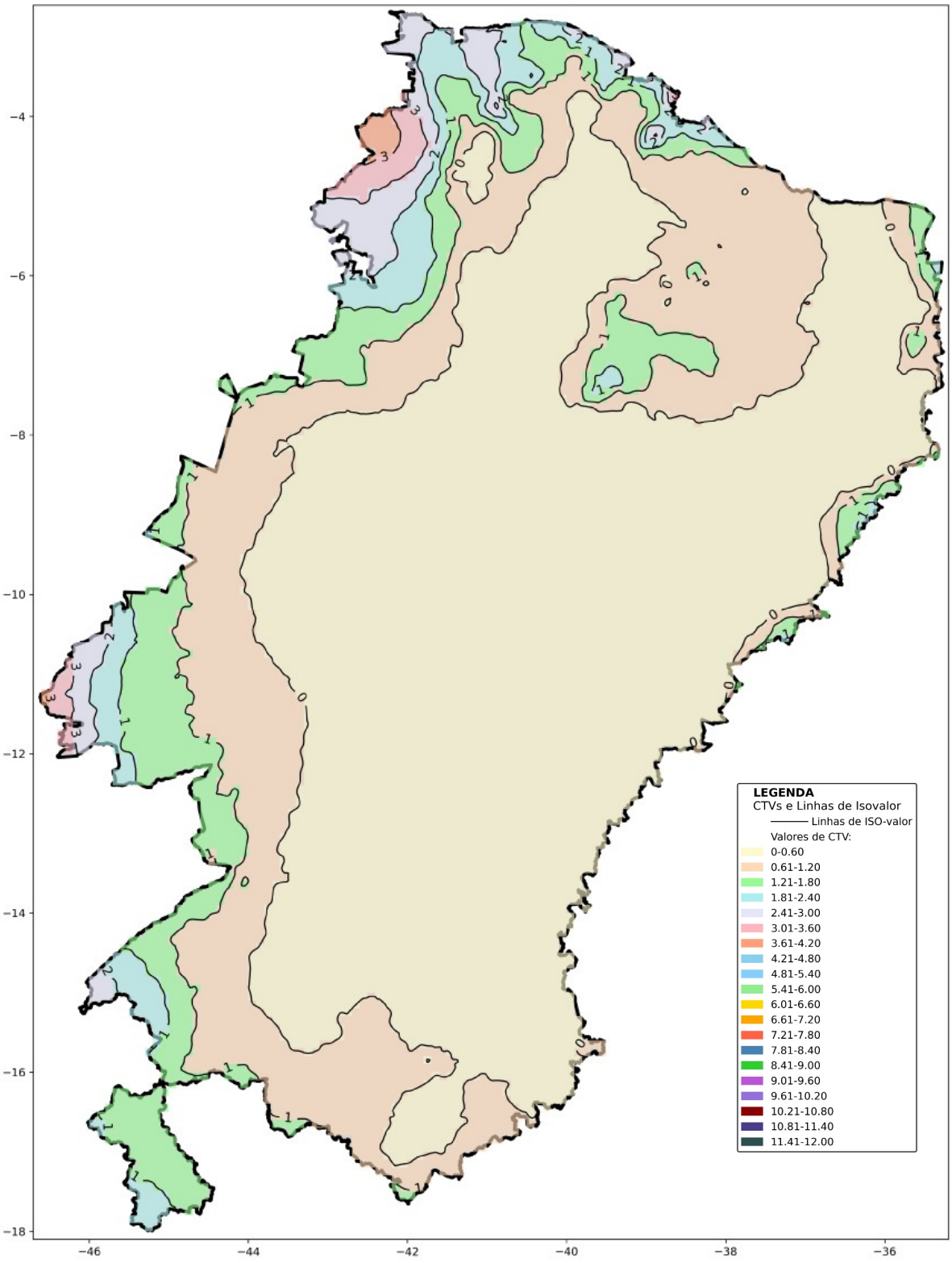
CTV para VR = 20m³ e demanda doméstica de 50 L/dia e 400 L/dia de consumo de irrigação e 100 m² de área de captação



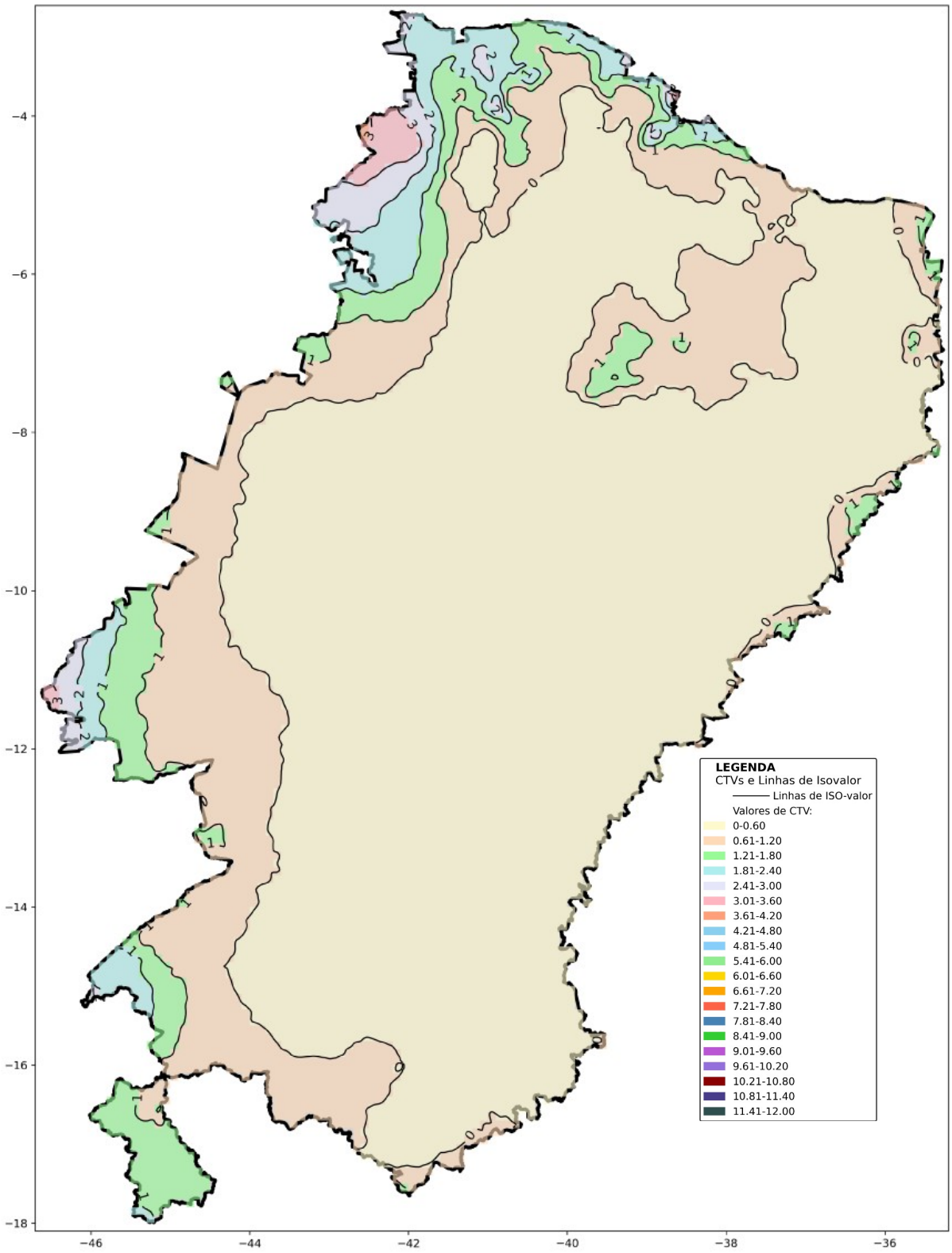
CTV para VR = 20 m³ e demanda doméstica de 100 L/dia e 400 L/dia de consumo de irrigação e 100 m² de área de captação



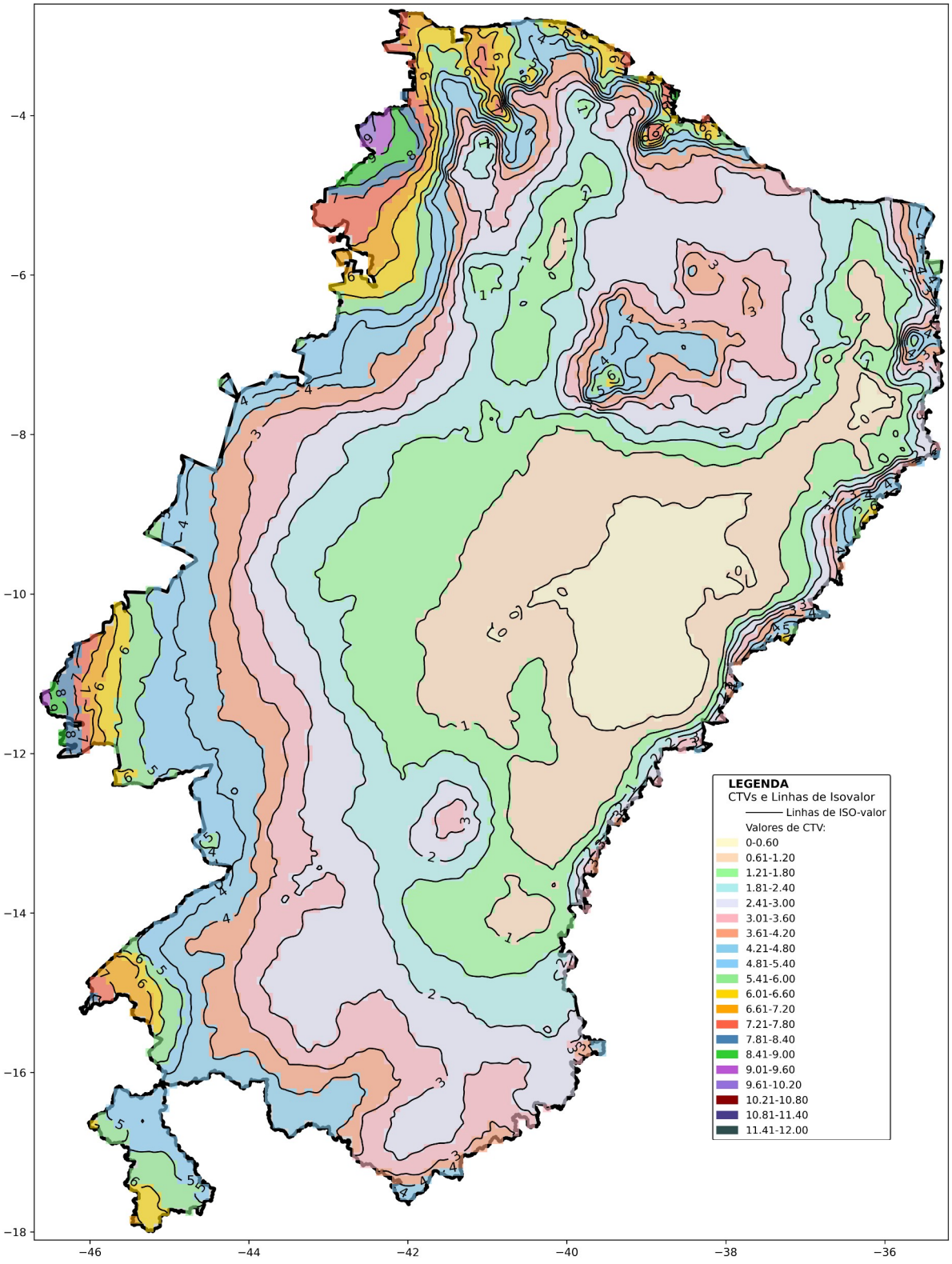
CTV para VR = 20 m³ e demanda doméstica de 50 L/dia e 650 L/dia de consumo de irrigação e 100 m² de área de captação



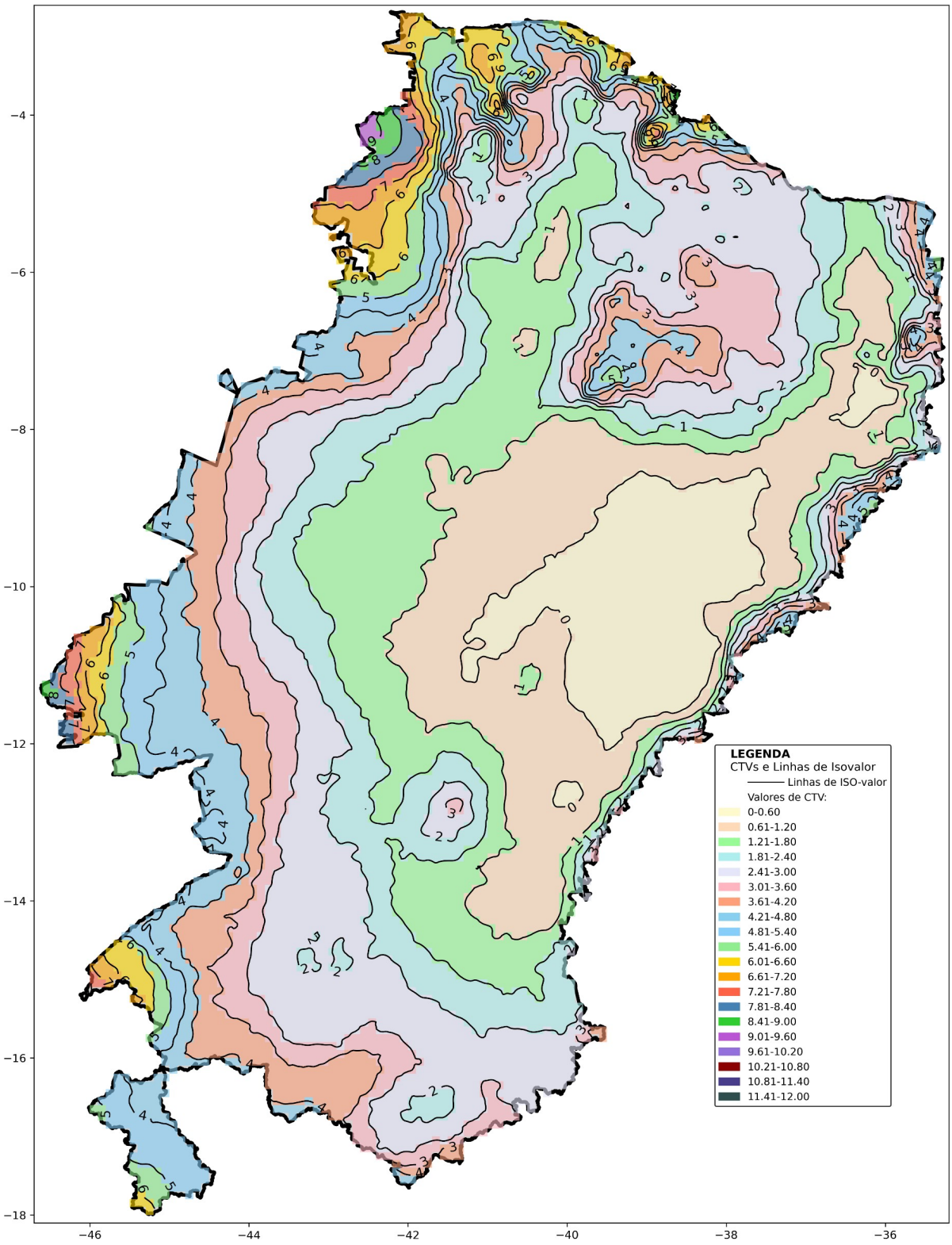
CTV para VR = 20 m³ e demanda doméstica de 100 L/dia e 650 L/dia de consumo de irrigação e 100 m² de área de captação



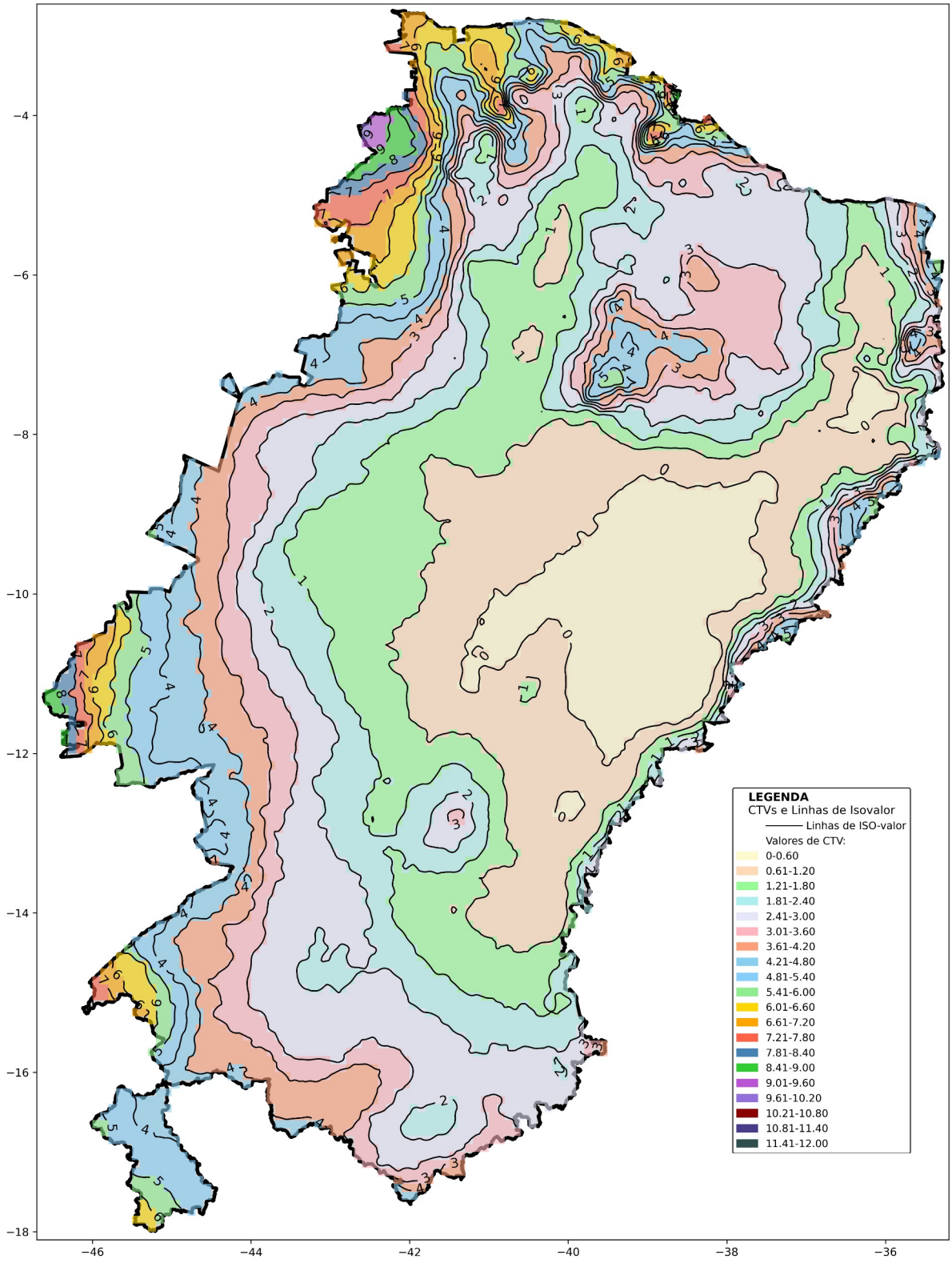
CTV para VR = 20 m³ e demanda doméstica de 50 L/dia e 400 L/dia de consumo de irrigação e 200 m² de área de captação



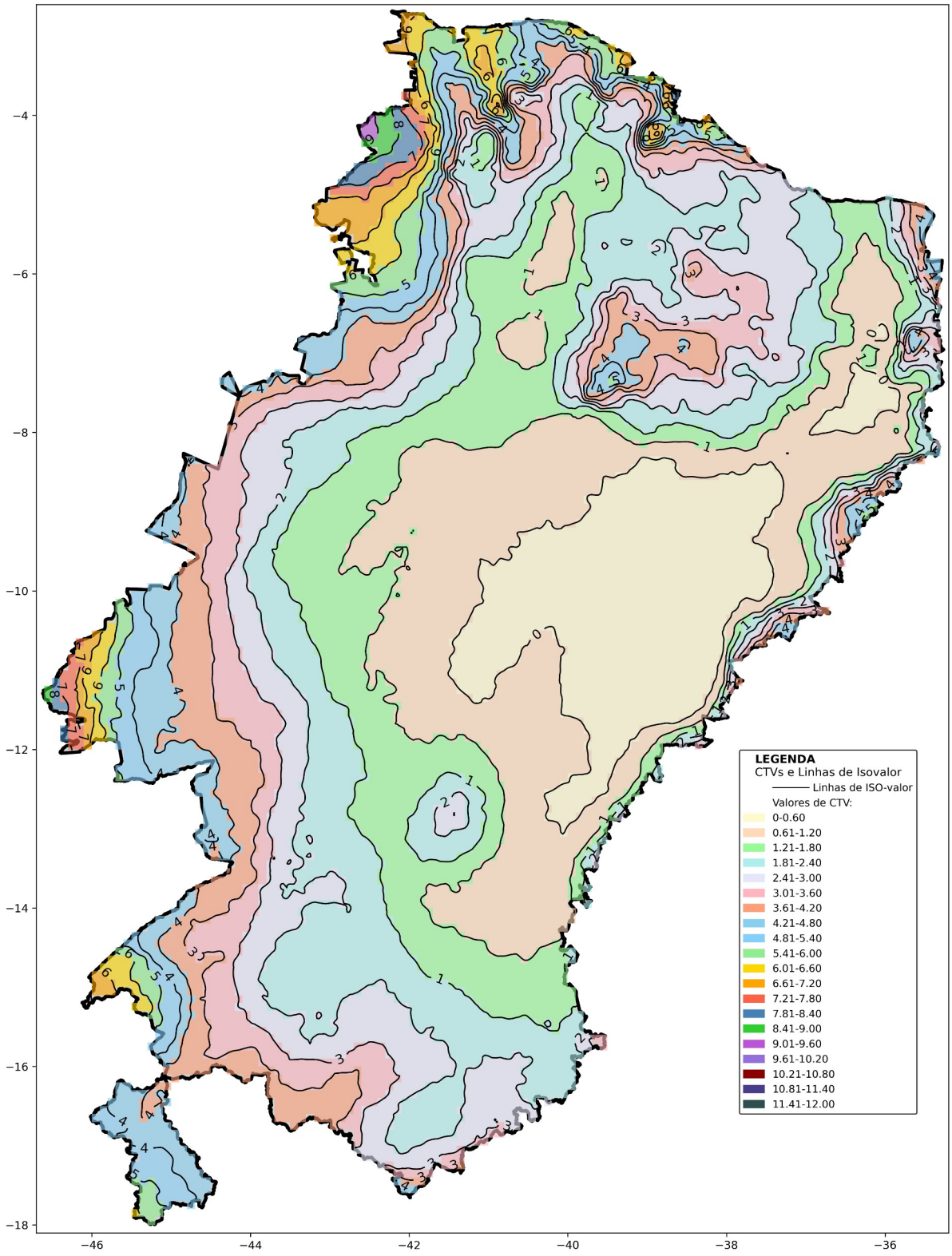
CTV para VR = 20 m³ e demanda doméstica de 100 L/dia e 400 L/dia de consumo de irrigação e 200 m² de área de captação



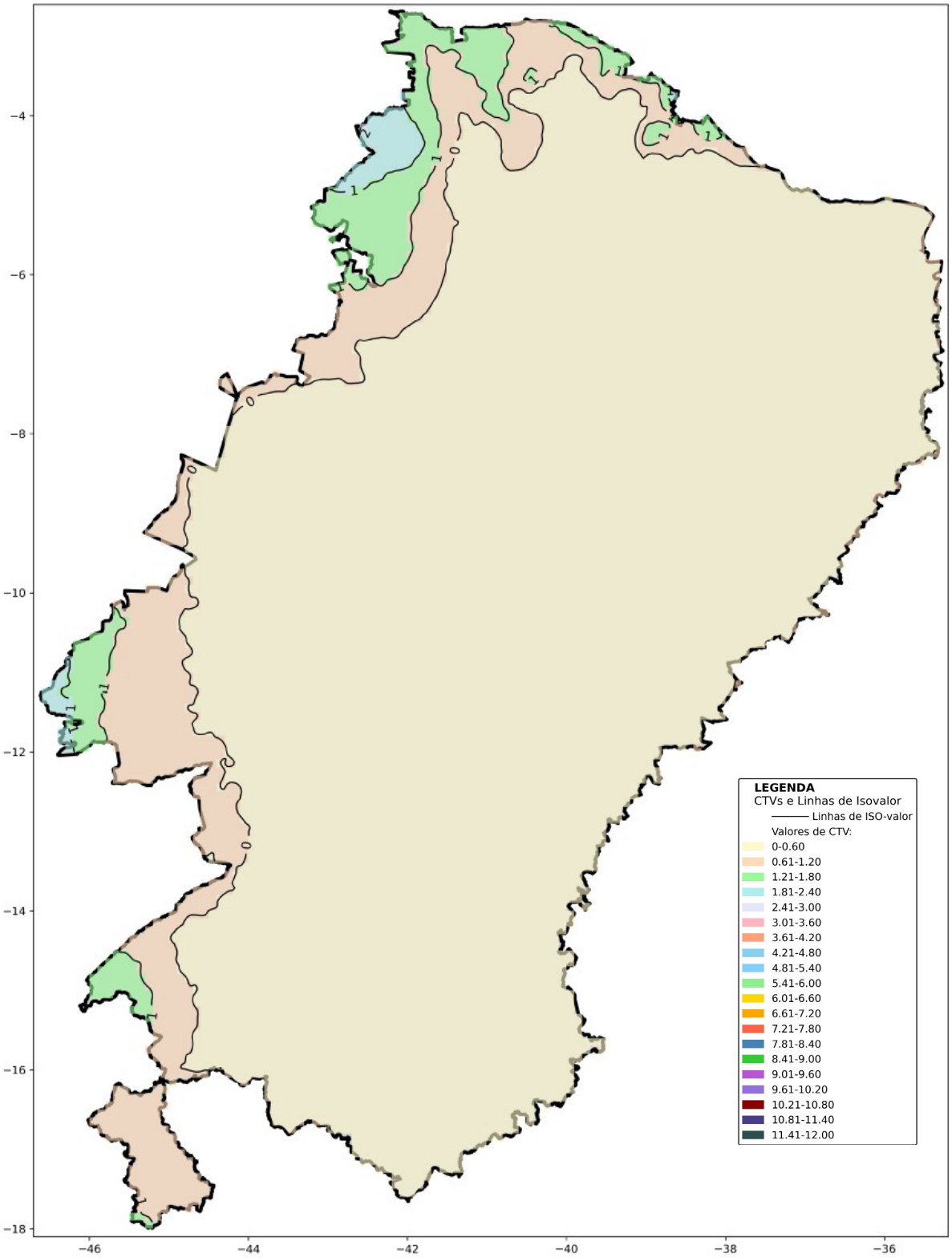
CTV para VR = 20 m³ e demanda doméstica de 50 L/dia e 650 L/dia de consumo de irrigação e 200 m² de área de captação



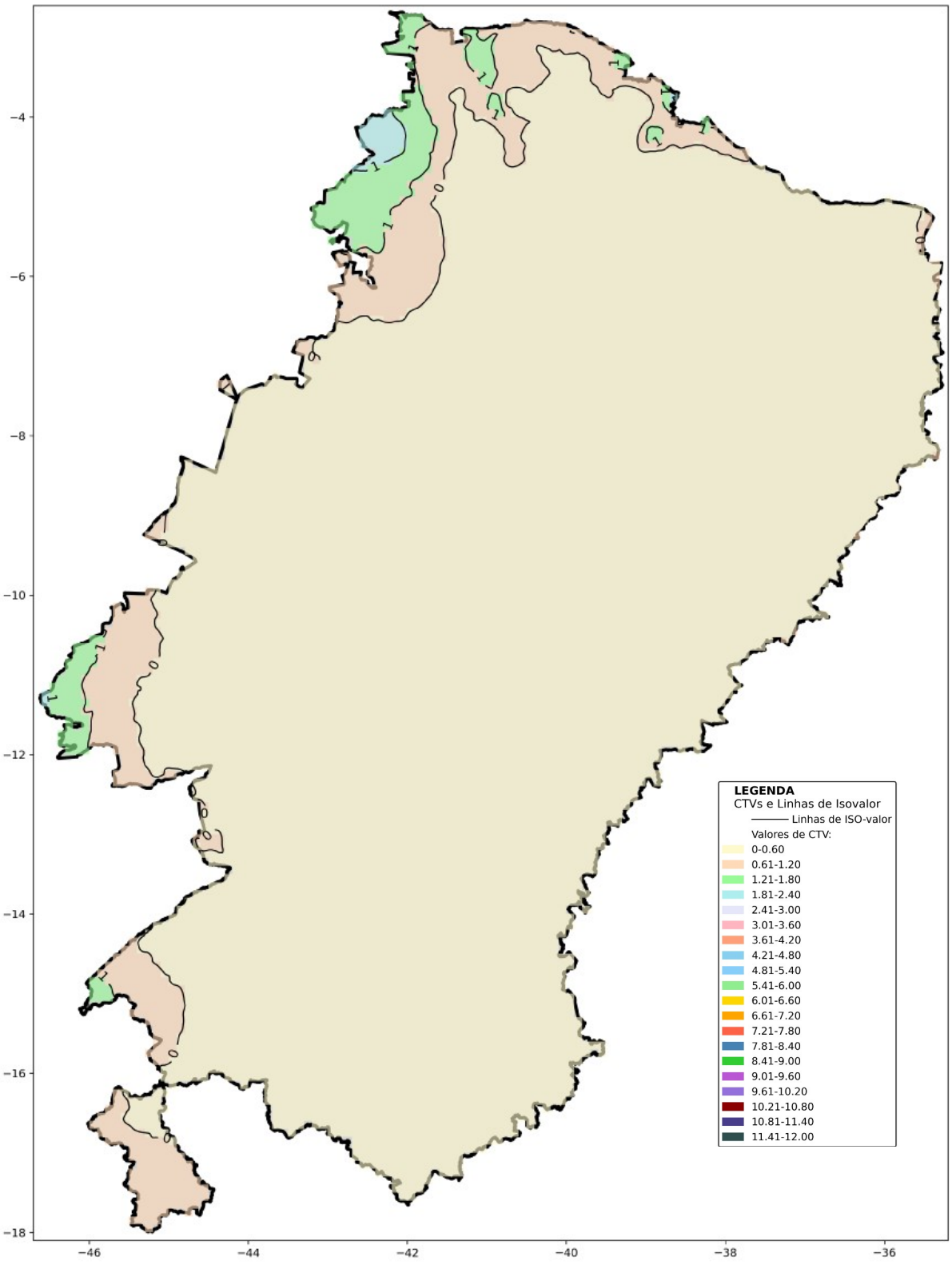
CTV para VR = 20 m³ e demanda doméstica de 100 L/dia e 650 L/dia de consumo de irrigação e 200 m² de área de captação



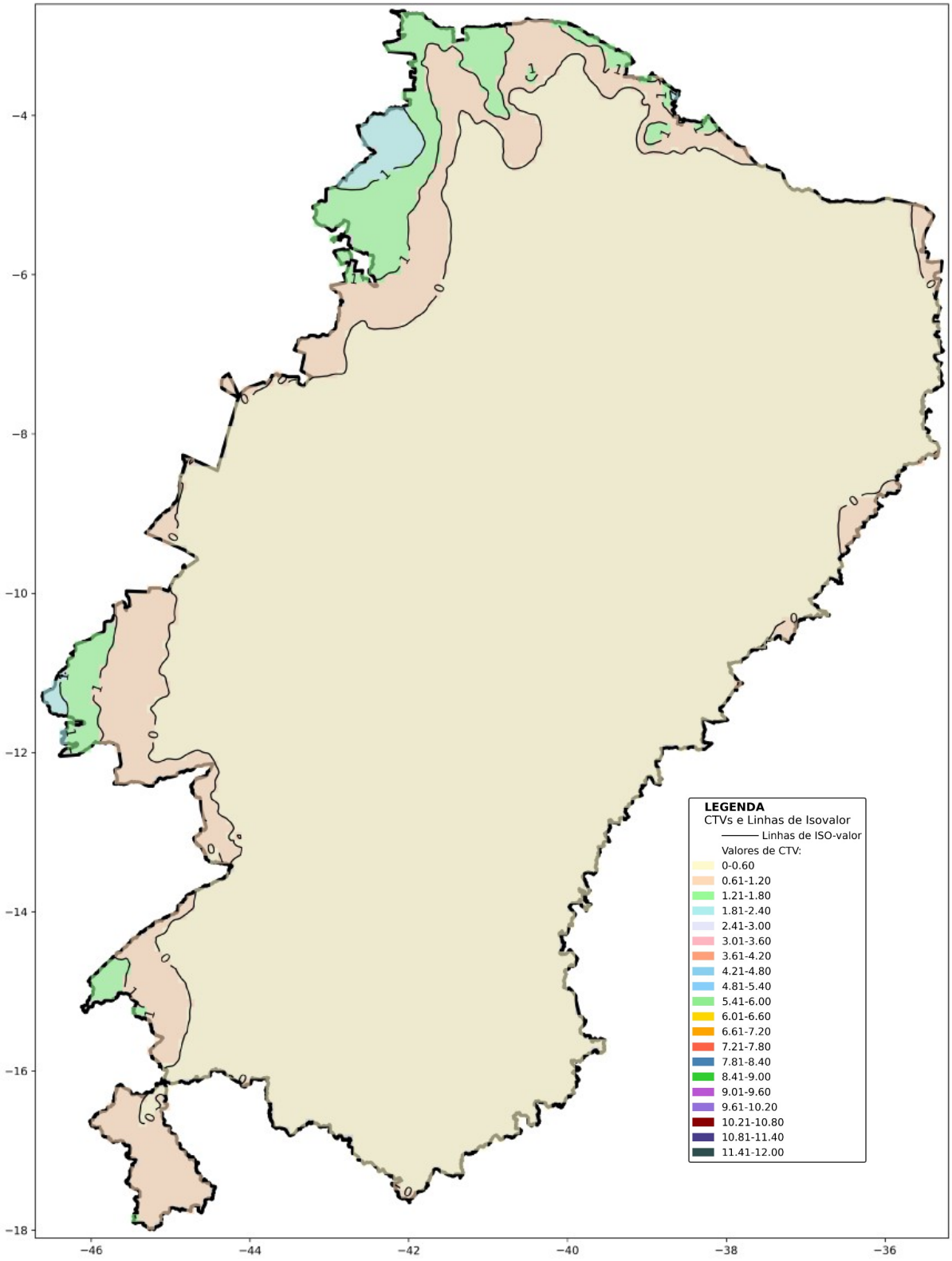
CTV para VR = 30 m³ e demanda doméstica de 50 L/dia e 400 L/dia de consumo de irrigação e 100 m² de área de captação



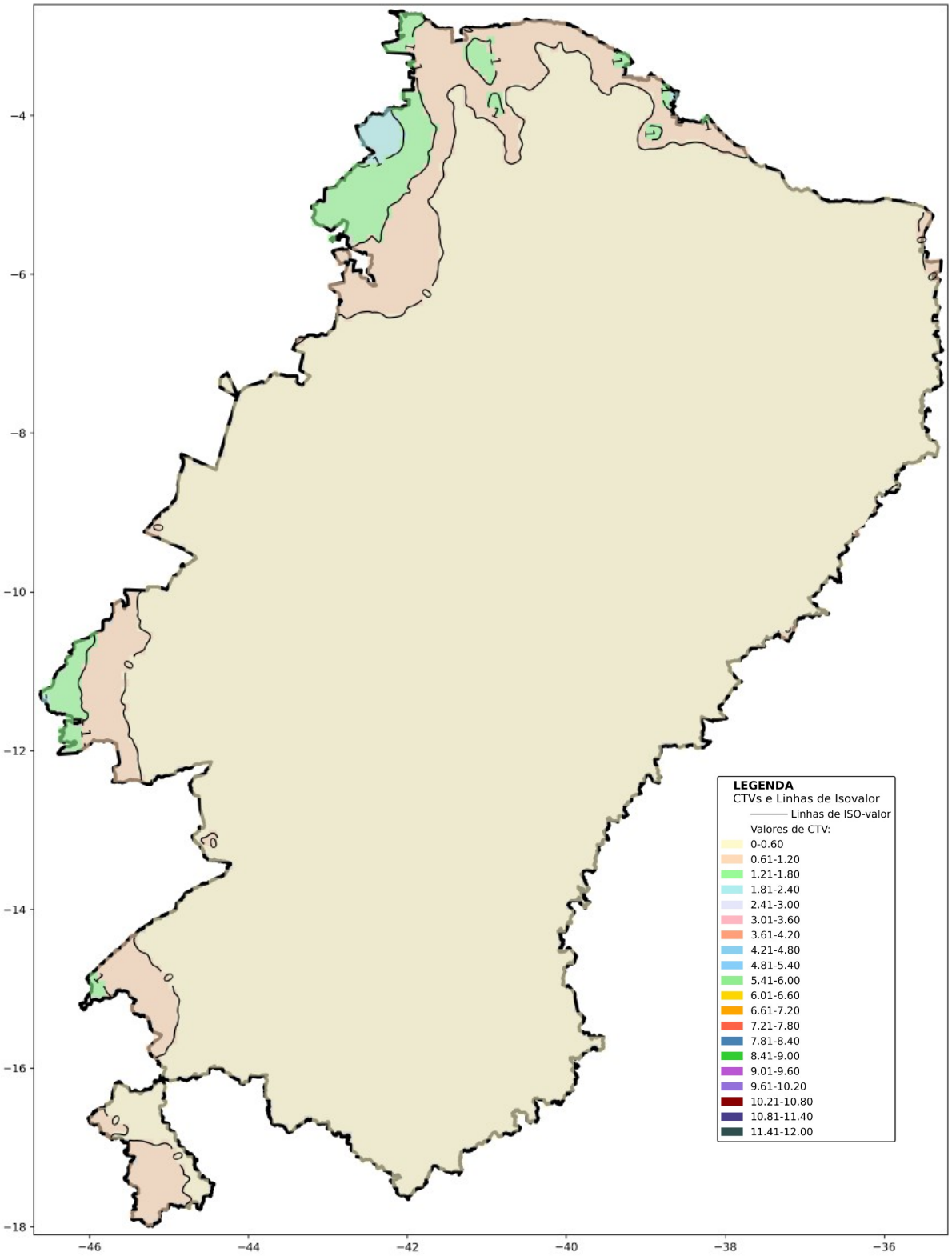
CTV para VR = 30 m³ e demanda doméstica de 100 L/dia e 400 L/dia de consumo de irrigação e 100 m² de área de captação



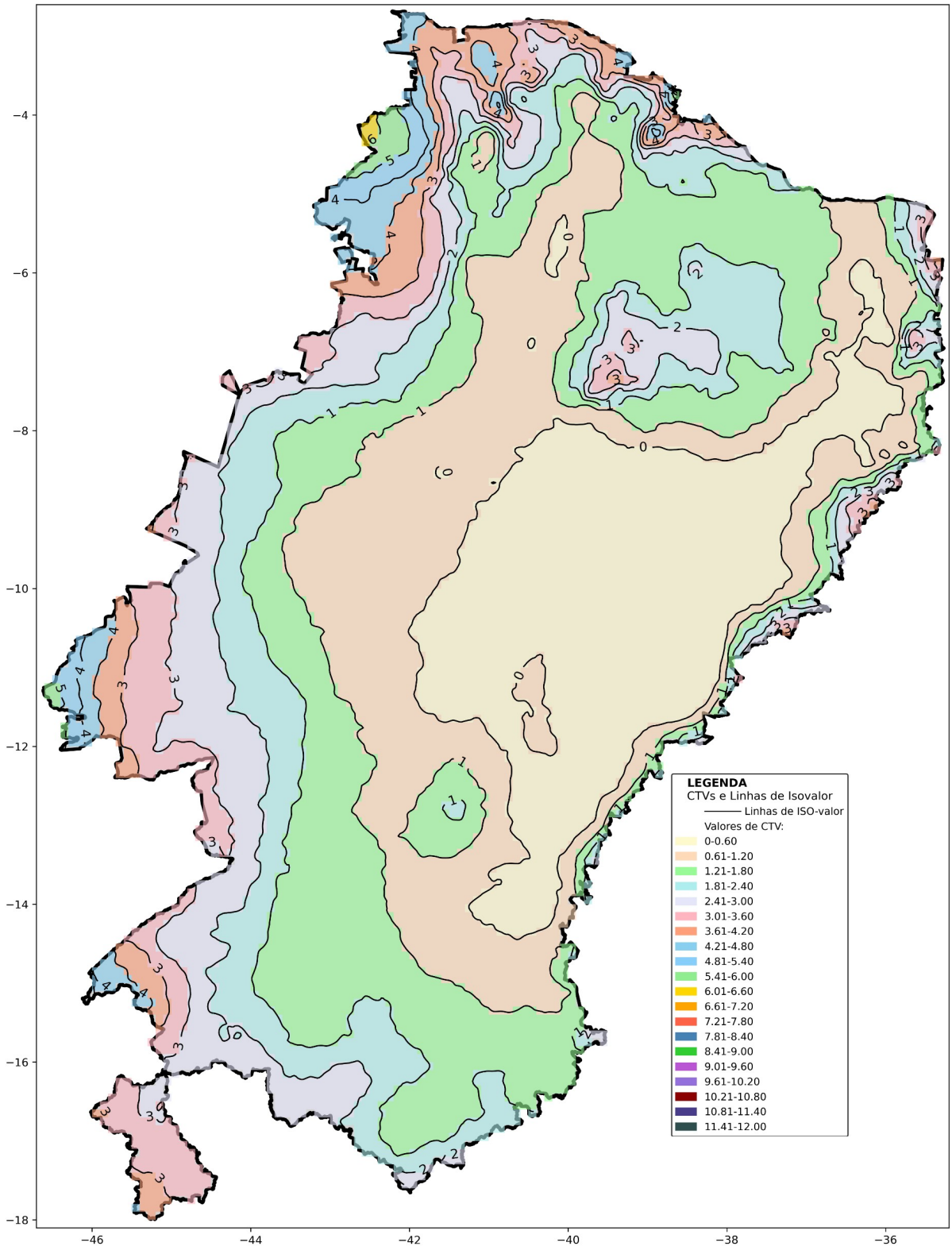
CTV para VR = 30 m³ e demanda doméstica de 50 L/dia e 650 L/dia de consumo de irrigação e 100 m² de área de captação



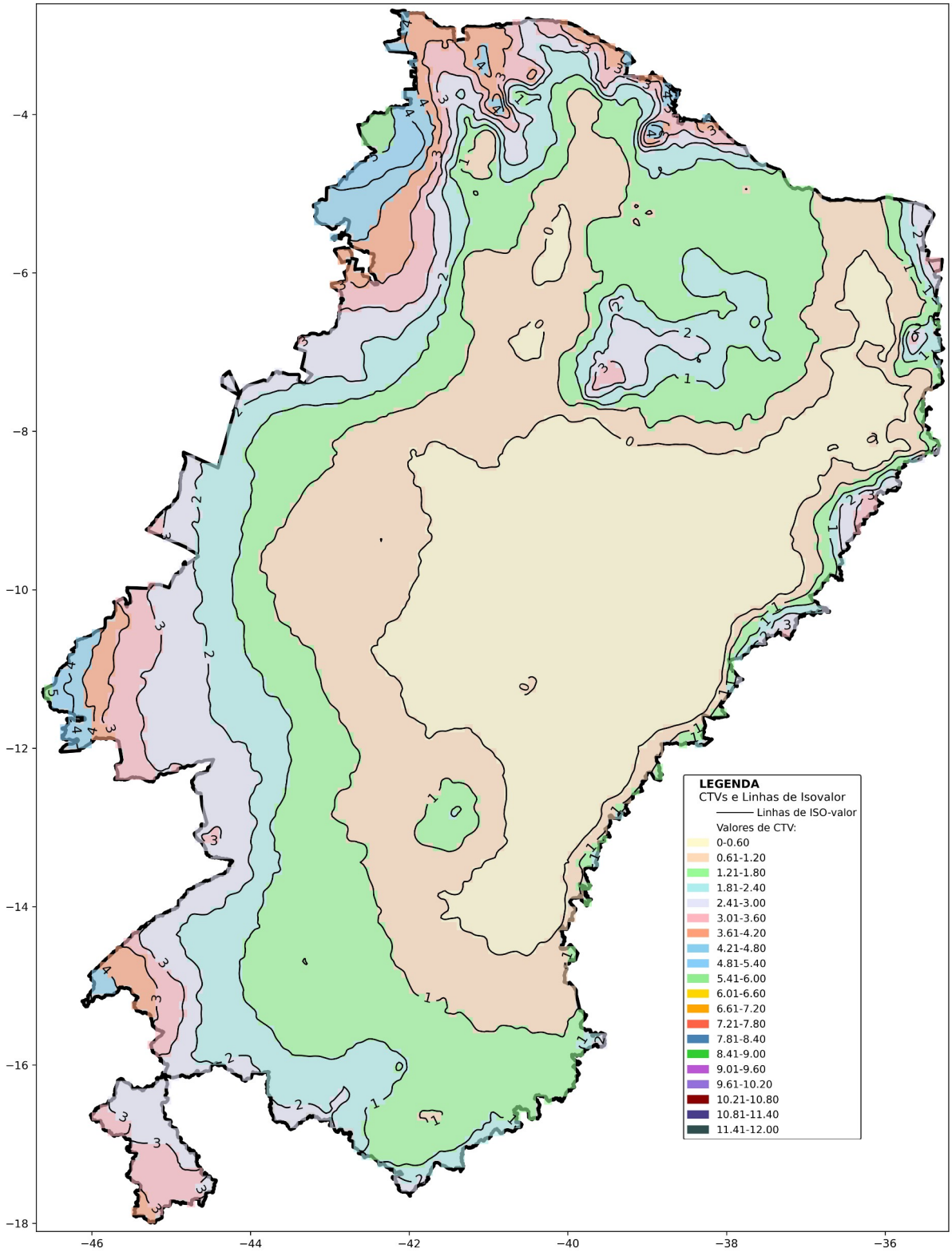
CTV para VR = 30 m³ e demanda doméstica de 100 L/dia e 650 L/dia de consumo de irrigação e 100 m² de área de captação



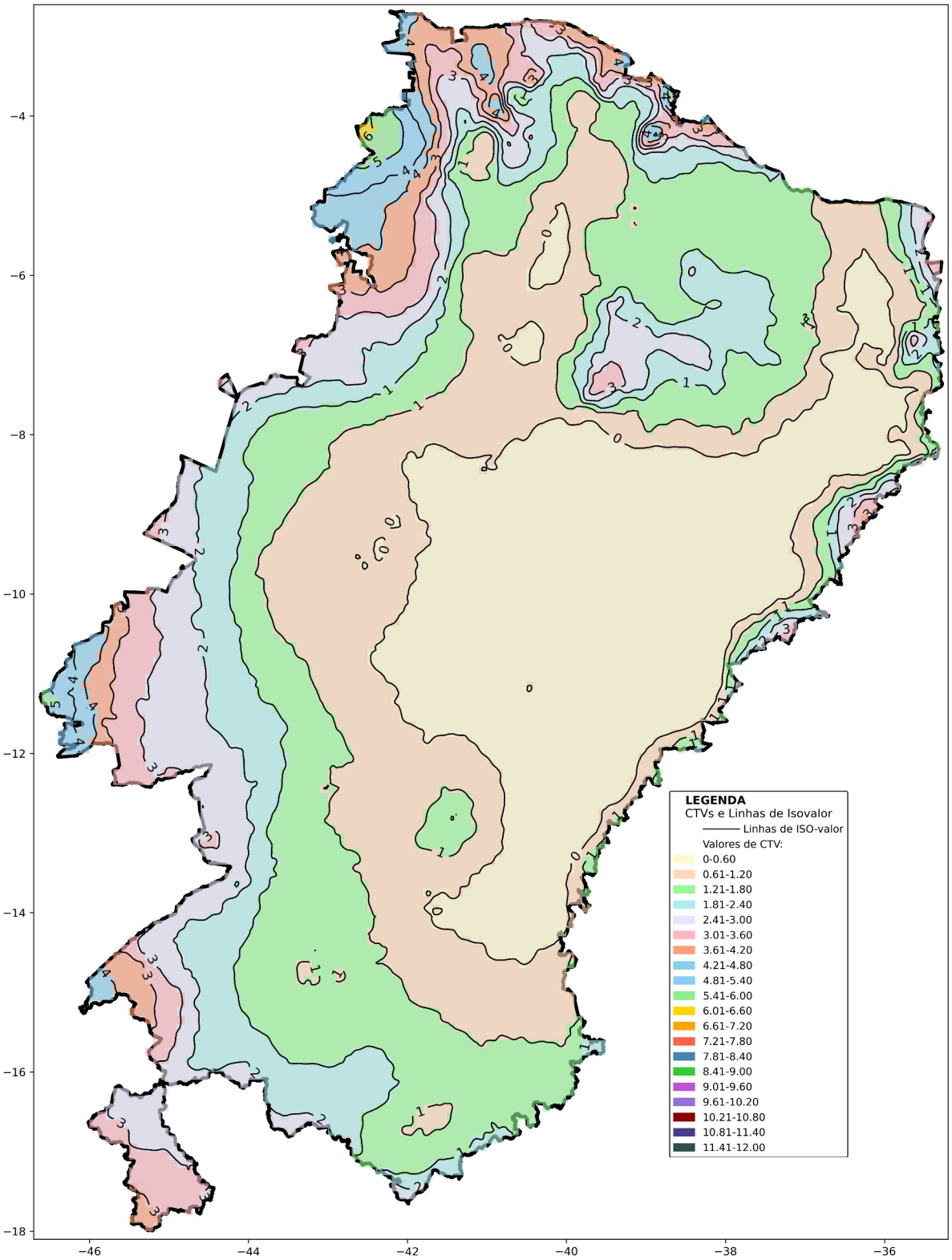
CTV para VR = 30 m³ e demanda doméstica de 50 L/dia e 400 L/dia de consumo de irrigação e 200 m² de área de captação



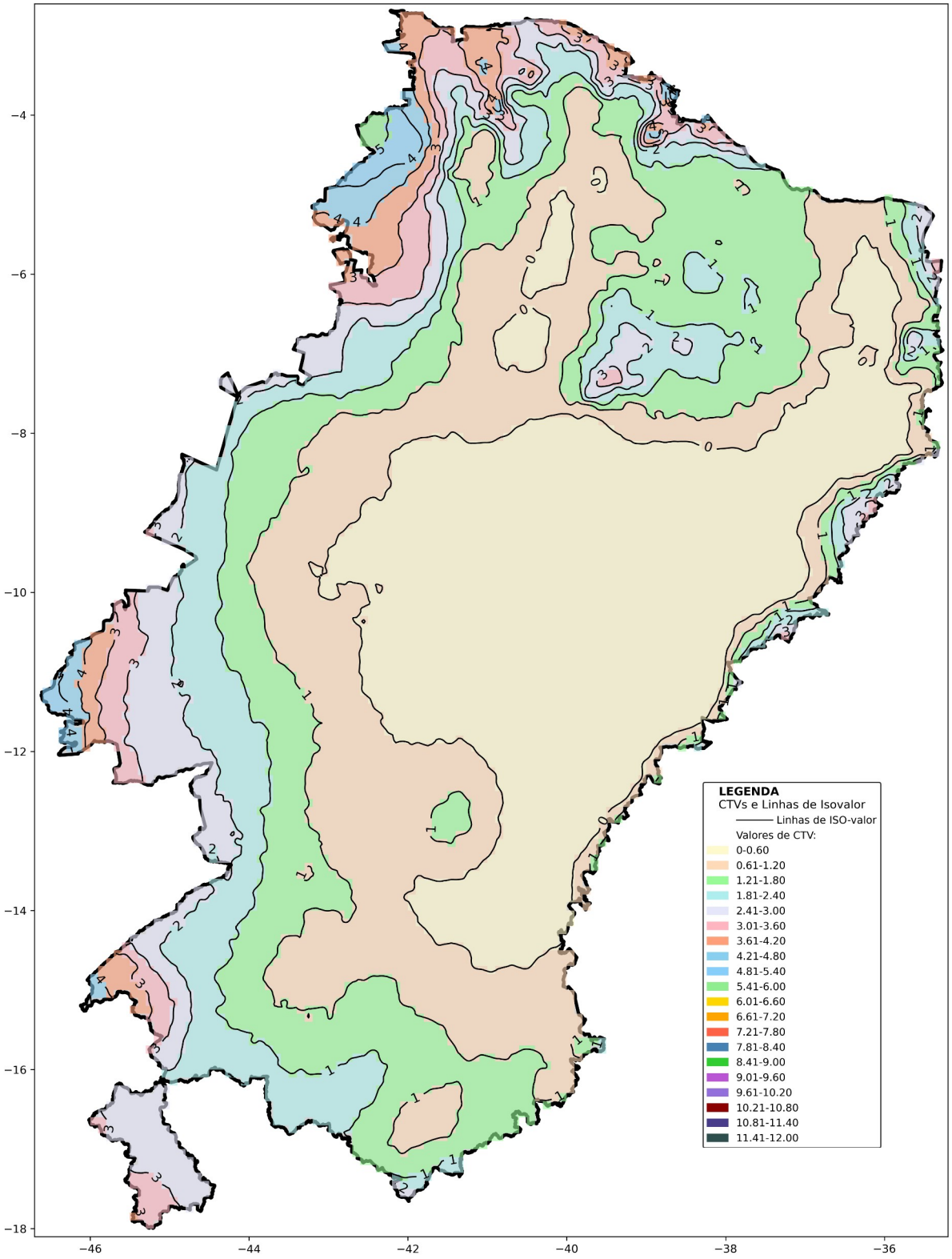
CTV para VR = 30 m³ e demanda doméstica de 100 L/dia e 400 L/dia de consumo de irrigação e 200 m² de área de captação



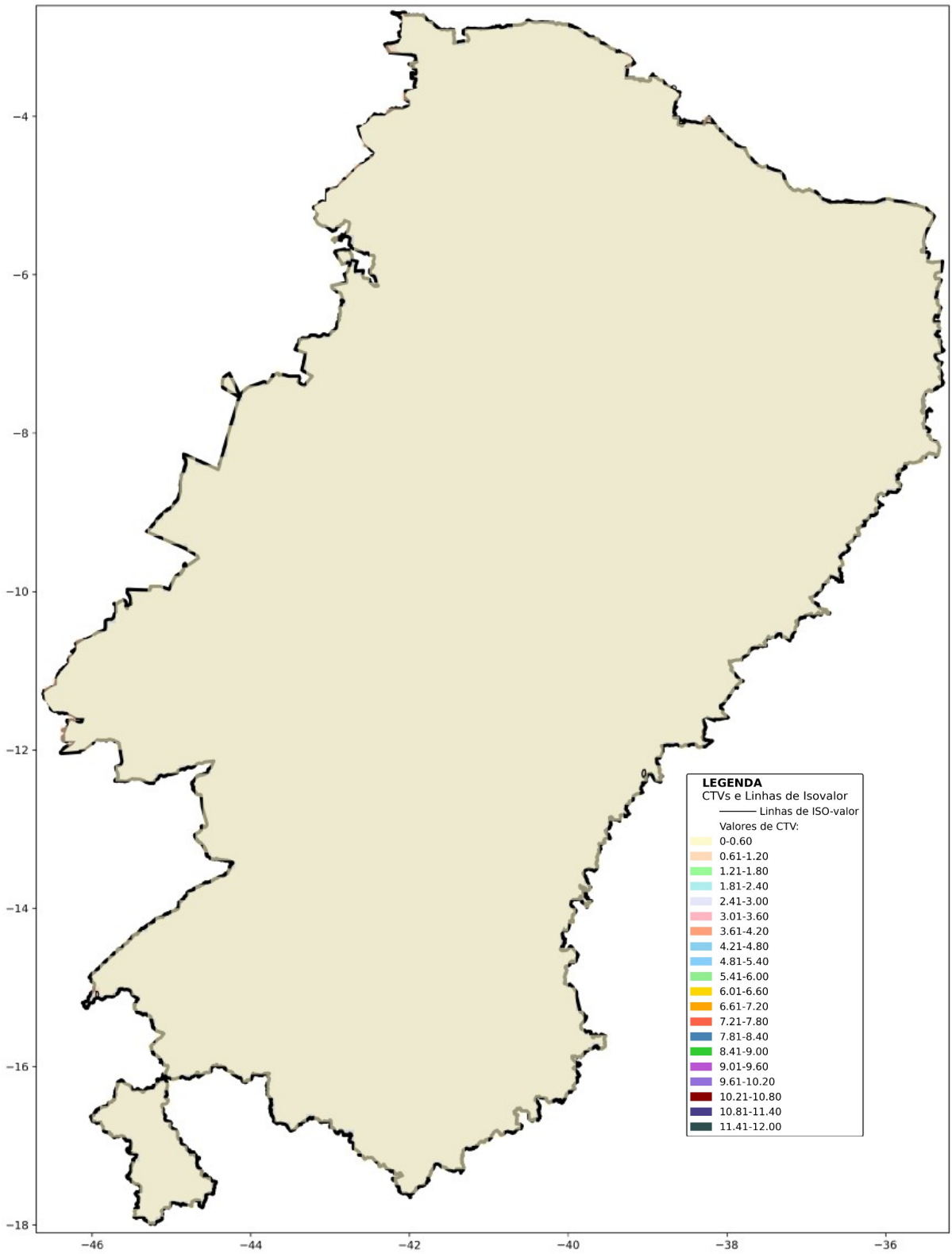
CTV para VR = 30 m³ e demanda doméstica de 50 L/dia e 650 L/dia de consumo de irrigação e 200 m² de área de captação



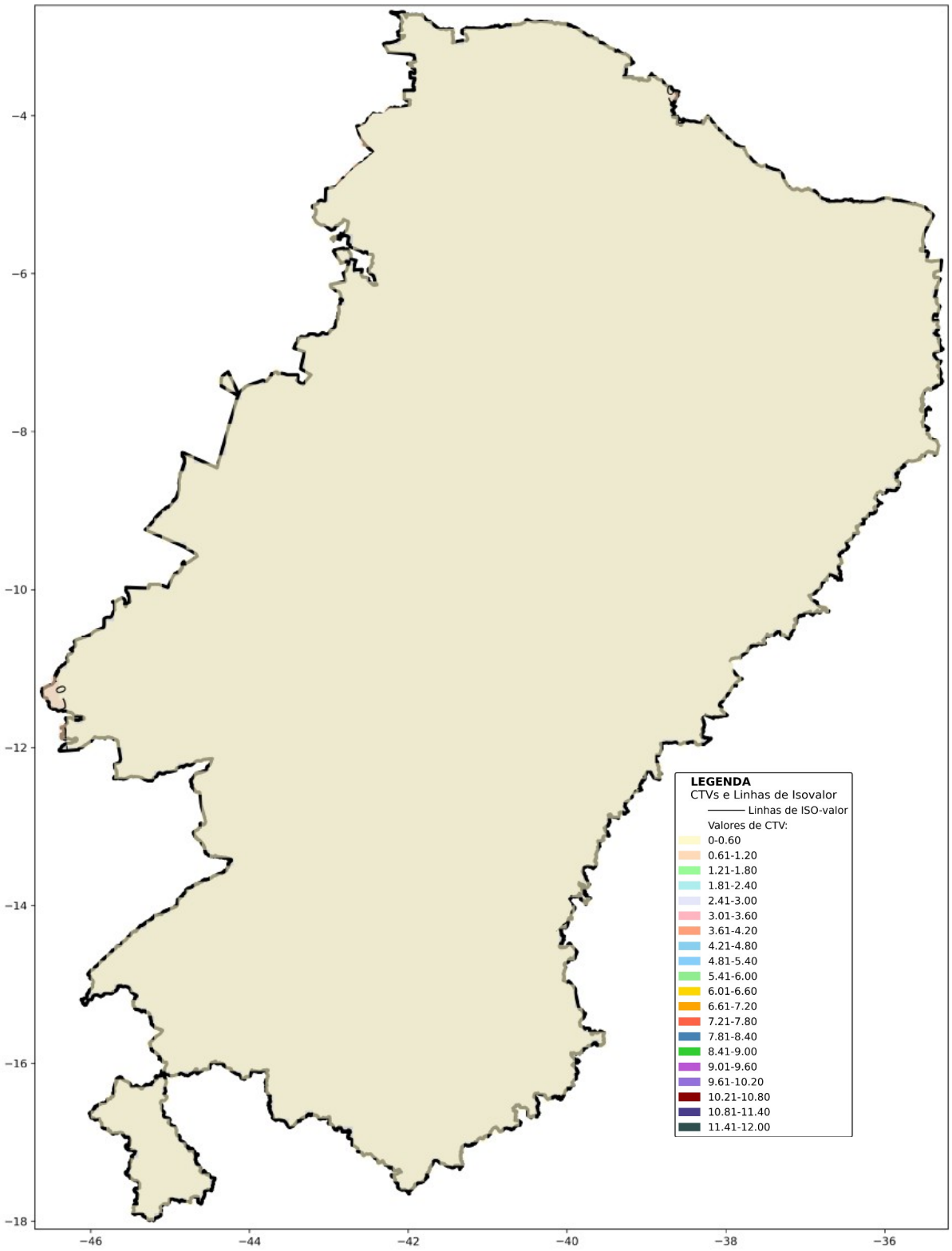
CTV para VR = 30 m³ e demanda doméstica de 100 L/dia e 650 L/dia de consumo de irrigação e 200 m² de área de captação



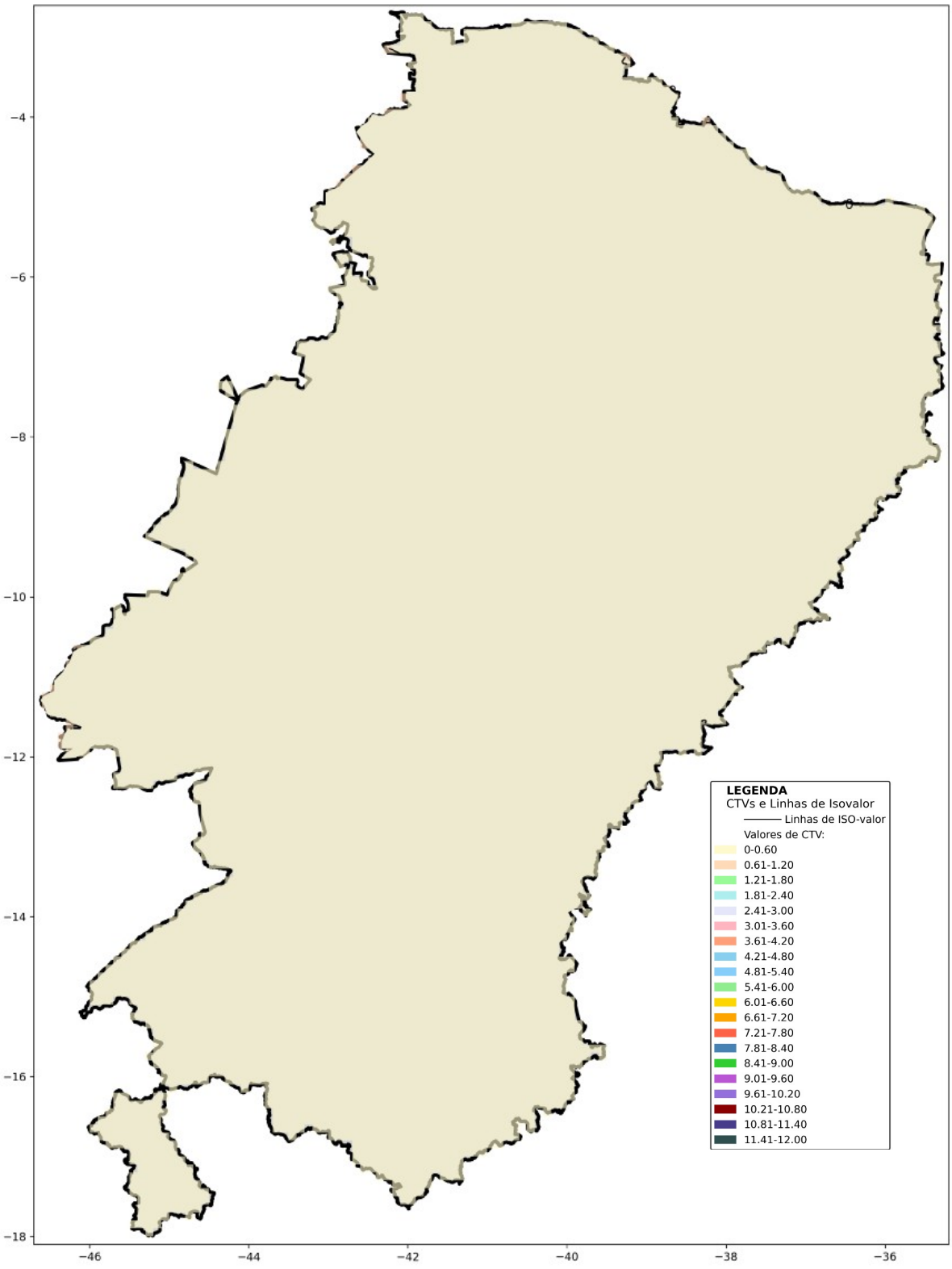
CTV para VR = 50 m³ e demanda doméstica de 50 L/dia e 400 L/dia de consumo de irrigação e 100 m² de área de captação



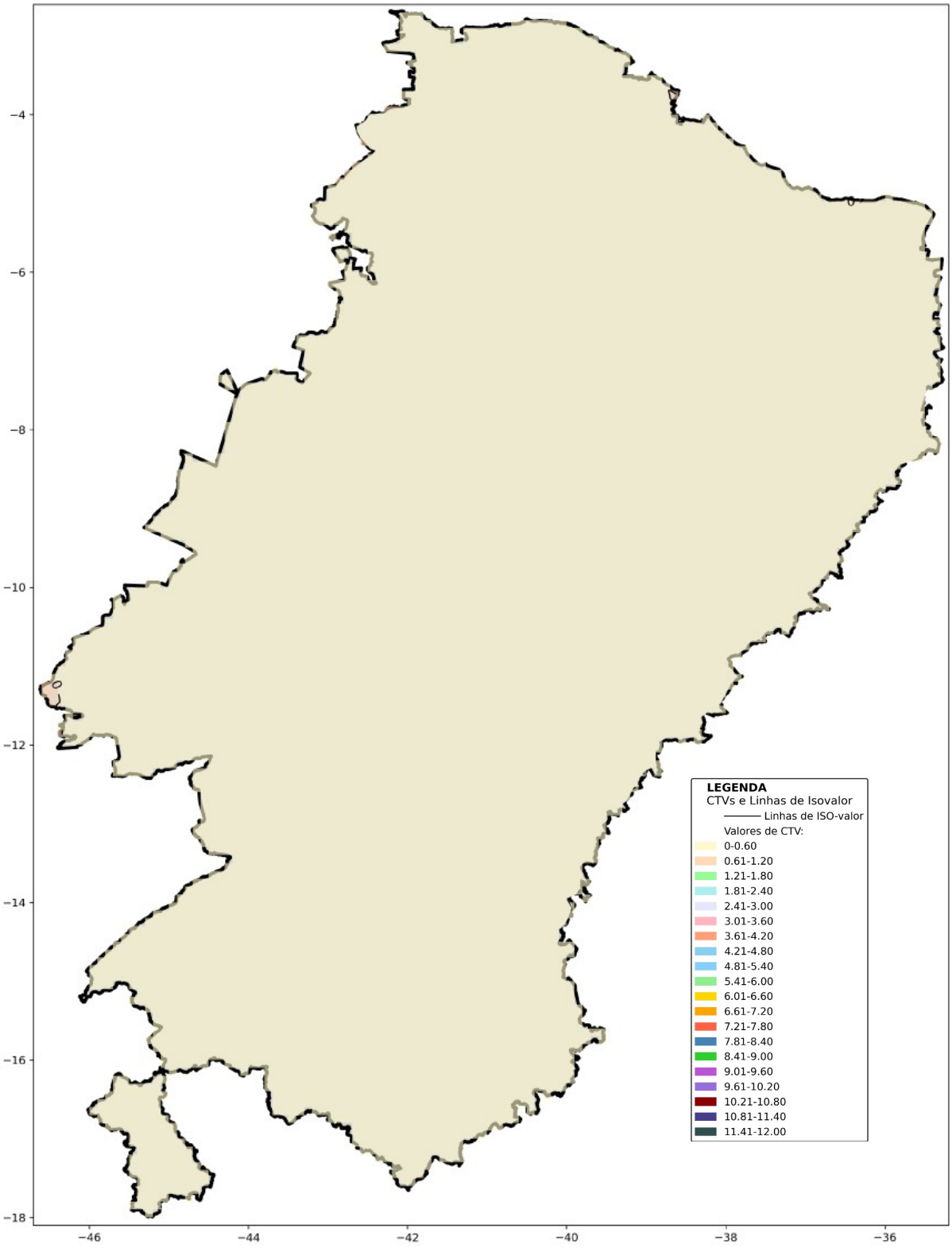
CTV para VR = 50 m³ e demanda doméstica de 100 L/dia e 400 L/dia de consumo de irrigação e 100 m² de área de captação



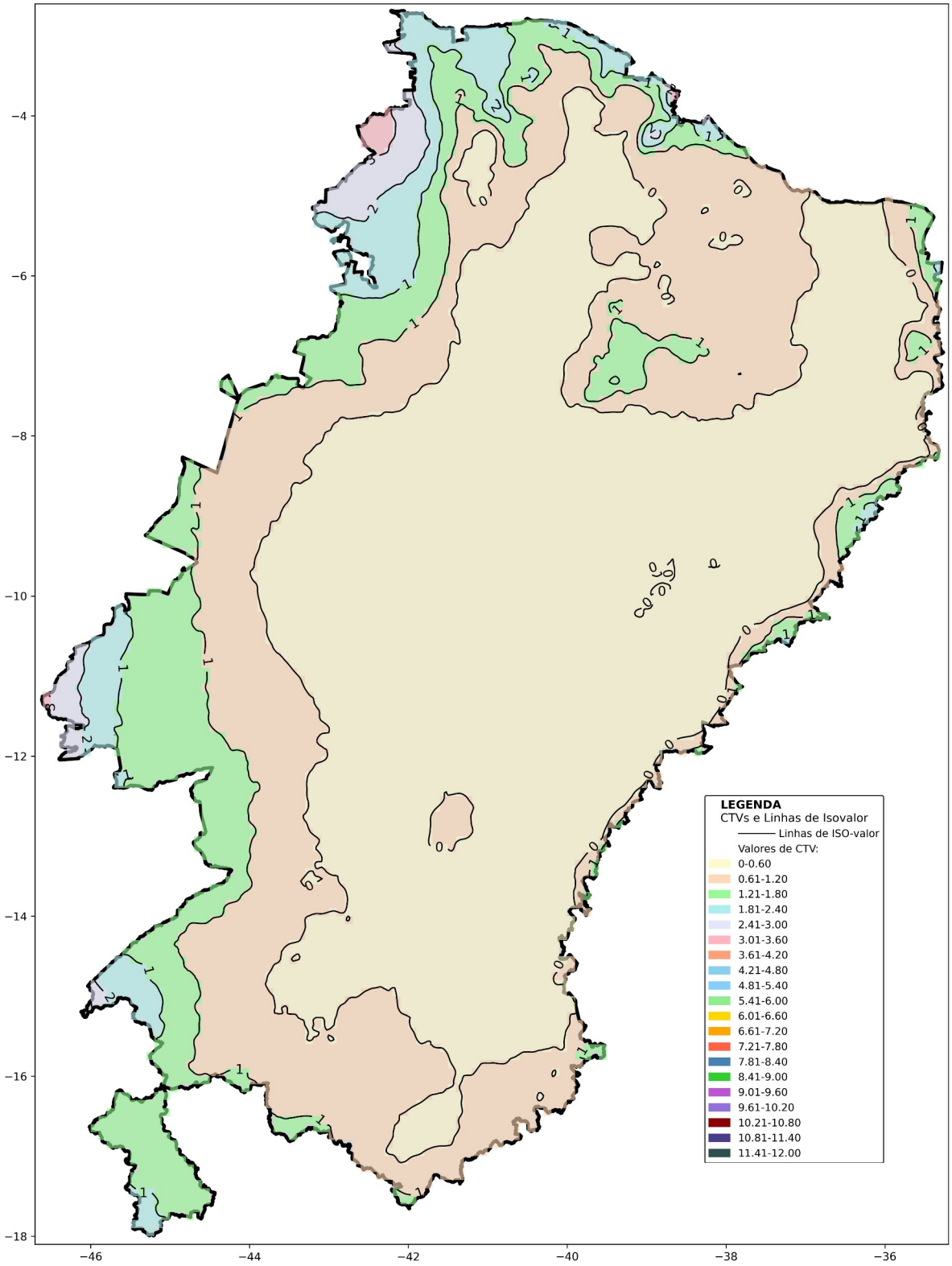
CTV para VR = 50 m³ e demanda doméstica de 50 L/dia e 650 L/dia de consumo de irrigação e 100 m² de área de captação



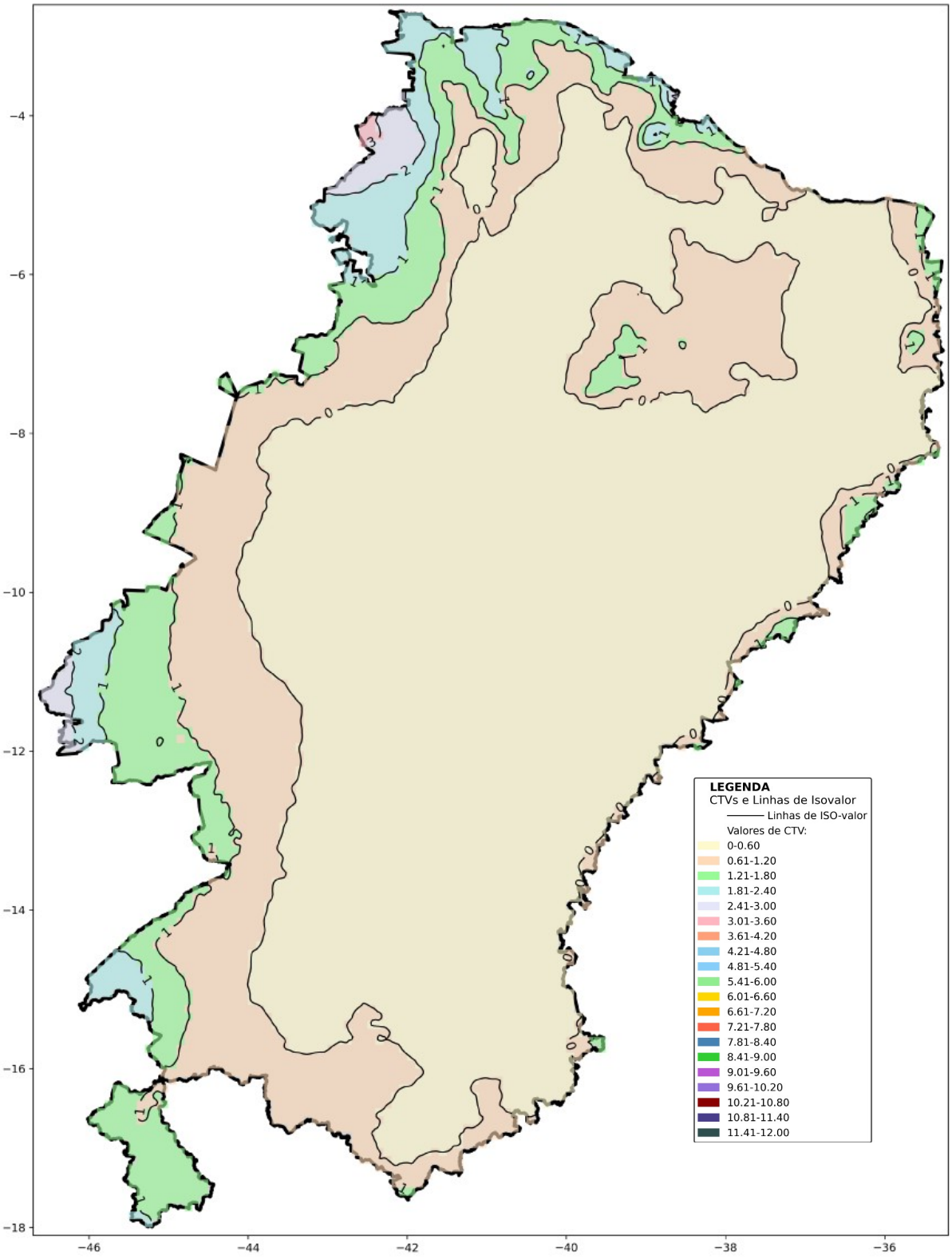
CTV para VR = 50 m³ e demanda doméstica de 100 L/dia e 650 L/dia de consumo de irrigação e 100 m² de área de captação



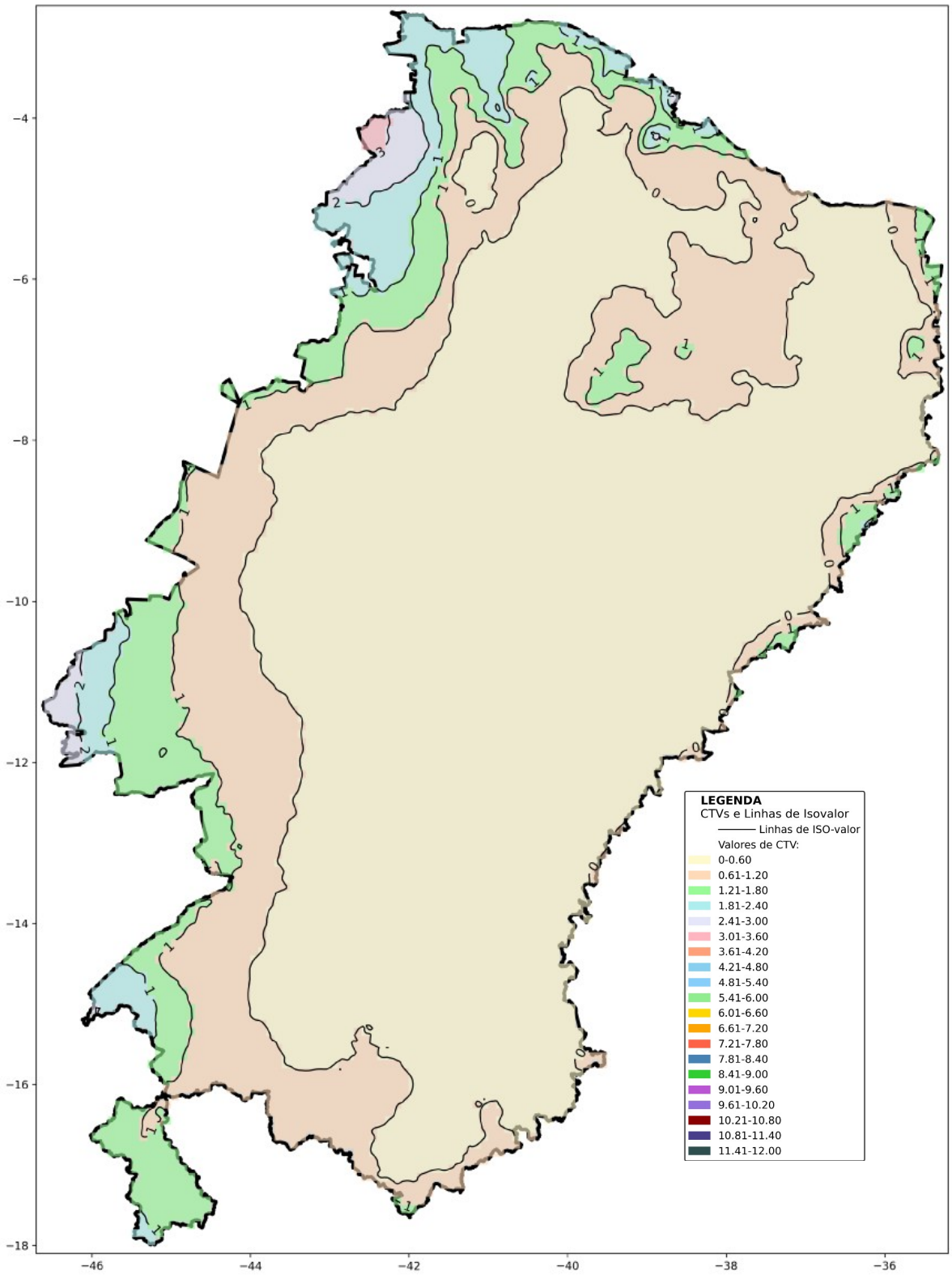
CTV para VR = 50 m³ e demanda doméstica de 50 L/dia e 400 L/dia de consumo de irrigação e 200 m² de área de captação



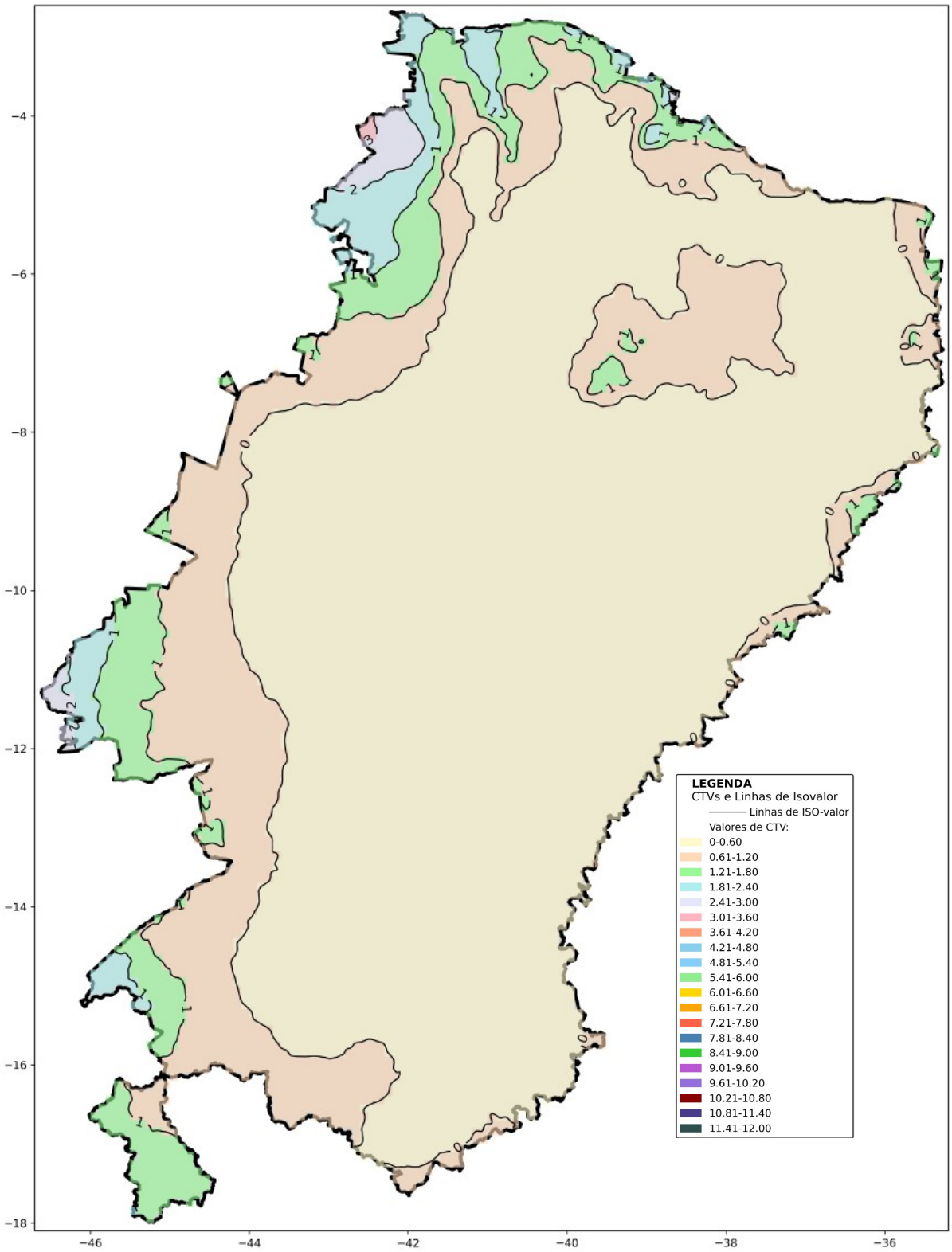
CTV para VR = 50 m³ e demanda doméstica de 100 L/dia e 400 L/dia de consumo de irrigação e 200 m² de área de captação



CTV para VR = 50 m³ e demanda doméstica de 50 L/dia e 650 L/dia de consumo de irrigação e 200 m² de área de captação



CTV para VR = 50 m³ e demanda doméstica de 100 L/dia e 650 L/dia de consumo de irrigação e 200 m² de área de captação



APÊNDICE II – ALGORÍTIMO DE DIMENSIONAMENTO DE VOLUME DE RESERVATÓRIO

DIMENSIONAMENTO DE RESERVATÓRIOS PARA CAPTAÇÃO DE ÁGUA DE CHUVA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Metodologia de dimensionamento de reservatório utilizando CTV.

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL -UFPB

Autor: Alvan Antas Cordeiro, Mat. 20241013014.

In[]

```
import hvplot.xarray
import hvplot.pandas
import holoviews as hv
import matplotlib
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.colors import Normalize
import matplotlib.cm as cm
import glob
import pandas as pd
import xarray as xr
import numpy as np
import cartopy
from cartopy.feature import NaturalEarthFeature, BORDERS
import cartopy.crs as ccrs
import pdb
import seaborn as sns
from scipy import stats
from scipy.interpolate import griddata
from holoviews import opts
import holoviews
from shapely.geometry import box
from matplotlib.cm import ScalarMappable
import geopandas as gpd
from geopy.distance import geodesic
from shapely.geometry import Point
import os
import dask.dataframe as dd
import rasterio
from rasterio.features import geometry_mask
import rioxarray
from matplotlib.ticker import FuncFormatter
```

```
from matplotlib.colors import ListedColormap
import matplotlib.patches as mpatches
import time
import tkinter as tk
from tkinter import messagebox
from geopy.distance import geodesic
import os
import calendar
```

In[]

```
class ReservatorioApp:
    def __init__(self, root):
        self.root = root
        self.root.title("Dimensionamento de reservatório de água de chuva")
        self.root.geometry("850x700")

        self.df = self.carregar_dados()
        self.criar_interface()

    def carregar_dados(self):
        try:
            chunk_size = 10**6
            df_chunk = pd.read_csv(

"C:/Users/alvan/OneDrive/Desktop/base_dados_pluviometricos/1.DADOS_SEMIARIDO_ESTAÇ
ÃO/dados_pluviometricos_1993_a_2022.csv",
                chunksize=chunk_size,
                usecols=['time', 'pr', 'estacao'],
                dtype={'pr': 'float32', 'estacao': 'object'}
            )
            df = pd.concat(df_chunk)
            df['time'] = pd.to_datetime(df['time'])
            if isinstance(df['estacao'].iloc[0], str):
                df['estacao'] = df['estacao'].apply(eval)
            return df
        except FileNotFoundError:
            messagebox.showerror("Erro", "Arquivo de dados não encontrado")
            self.root.destroy()
            return pd.DataFrame()
        except Exception as e:
            messagebox.showerror("Erro", f"Falha ao carregar dados: {str(e)}")
            self.root.destroy()
            return pd.DataFrame()
```

```
    def criar_interface(self):
        main_frame = tk.Frame(self.root, padx=20, pady=20)
        main_frame.pack(fill=tk.BOTH, expand=True)

        tk.Label(main_frame,
                 text="Dimensionamento de Reservatório de Água de Chuva - Método utilizando CTV",
                 font=('Arial', 10, 'bold')).pack(pady=10)

        input_frame = tk.Frame(main_frame)
        input_frame.pack(fill=tk.X, pady=3)

        # Campos básicos fixos
        campos_basicos = [
            ("latitude", "Latitude (Ex. -17.85):"),
            ("longitude", "Longitude (Ex. -45.45):"),
            ("area", "Área de captação (m²):"),
            ("demanda", "Demanda doméstica (L/dia):")
        ]

        self.entradas = {}
        for nome, texto in campos_basicos:
            frame = tk.Frame(input_frame, pady=10)
            frame.pack(fill=tk.X)
            tk.Label(frame, text=texto, width=30, anchor='w').pack(side=tk.LEFT)
            entrada = tk.Entry(frame)
            entrada.pack(side=tk.LEFT, fill=tk.X, expand=True)
            self.entradas[nome] = entrada

        # Seletor de demanda de irrigação
        frame_irrig = tk.Frame(input_frame, pady=15)
        frame_irrig.pack(fill=tk.X)
        tk.Label(frame_irrig, text="Demanda de Irrigação:", width=30,
anchor='w').pack(side=tk.LEFT)
        self.irrigacao = tk.StringVar(value="Não")
        tk.Radiobutton(frame_irrig, text="Sim", variable=self.irrigacao, value="Sim",
                       command=self.toggle_irrigacao).pack(side=tk.LEFT, padx=5)
        tk.Radiobutton(frame_irrig, text="Não", variable=self.irrigacao, value="Não",
                       command=self.toggle_irrigacao).pack(side=tk.LEFT, padx=5)

        # Frame para opções de irrigação (inicialmente oculto)
        self.irrigacao_frame = tk.Frame(input_frame)
        self.irrigacao_frame.pack_forget()

        # Opção de usar valor padrão ou personalizado para precipitação
```

```
        self.precip_opcao_frame = tk.Frame(self.irrigacao_frame, pady=10)
        self.precip_opcao_frame.pack(fill=tk.X)
        tk.Label(self.precip_opcao_frame, text="Precipitação para cultivo:", width=30,
anchor='w').pack(side=tk.LEFT)
        self.precip_opcao = tk.StringVar(value="padrao")
        tk.Radiobutton(self.precip_opcao_frame, text="Usar padrão (90mm/mês)",
                       variable=self.precip_opcao, value="padrao",
                       command=self.toggle_precip_opcao).pack(side=tk.LEFT, padx=5)
        tk.Radiobutton(self.precip_opcao_frame, text="Inserir valor",
                       variable=self.precip_opcao, value="personalizado",
                       command=self.toggle_precip_opcao).pack(side=tk.LEFT, padx=5)

        # Campo para precipitação personalizada (inicialmente oculto)
        frame_precip = tk.Frame(self.irrigacao_frame, pady=10)
        frame_precip.pack(fill=tk.X)
        self.precip_label = tk.Label(frame_precip, text="Precipitação requerida para cultivo
(mm/mês):",
                                     width=40, anchor='w')
        self.precip_label.pack(side=tk.LEFT)
        self.entradas['precipitacao'] = tk.Entry(frame_precip)
        self.entradas['precipitacao'].pack(side=tk.LEFT, fill=tk.X, expand=True)
        self.entradas['precipitacao'].config(state='disabled')

        # Campo para área de cultivo
        frame_area_cultivo = tk.Frame(self.irrigacao_frame, pady=10)
        frame_area_cultivo.pack(fill=tk.X)
        tk.Label(frame_area_cultivo, text="Área de cultivo (50-150 m²):", width=40,
anchor='w').pack(side=tk.LEFT)
        self.entradas['area_cultivo'] = tk.Entry(frame_area_cultivo)
        self.entradas['area_cultivo'].pack(side=tk.LEFT, fill=tk.X, expand=True)
        self.entradas['area_cultivo'].config(state='disabled')

        button_frame = tk.Frame(main_frame)
        button_frame.pack(pady=20)
        tk.Button(button_frame, text="Calcular", command=self.calcular,
                  width=15, bg='#4CAF50', fg='white').pack(side=tk.LEFT, padx=10)
        tk.Button(button_frame, text="Limpar", command=self.limpar,
                  width=15, bg='#f44336', fg='white').pack(side=tk.LEFT, padx=10)

        self.resultado = tk.StringVar()
        self.resultado.set("Insira os dados e clique em Calcular")
        tk.Label(main_frame, textvariable=self.resultado,
                 font=('Arial', 12), fg='blue', pady=10, wraplength=800).pack()
```

```
    tk.Label(main_frame,
             text="Desenvolvido por Alvan Antas Cordeiro - PPGECAM/UFPB",
             font=('Arial', 8)).pack(side=tk.BOTTOM)

def toggle_irrigacao(self):
    """Mostra ou oculta os campos de irrigação"""
    if self.irrigacao.get() == "Sim":
        self.irrigacao_frame.pack(fill=tk.X, pady=10)
        self.toggle_precip_opcao()  # Atualiza estado dos campos de precipitação
    else:
        self.irrigacao_frame.pack_forget()

def toggle_precip_opcao(self):
    """Habilita ou desabilita campos baseado na opção de precipitação"""
    if self.irrigacao.get() == "Sim":
        if self.precip_opcao.get() == "personalizado":
            self.entradas['precipitacao'].config(state='normal')
            self.entradas['area_cultivo'].config(state='normal')
        else:
            self.entradas['precipitacao'].config(state='disabled')
            self.entradas['precipitacao'].delete(0, tk.END)
            self.entradas['area_cultivo'].config(state='normal')

def limpar(self):
    for entrada in self.entradas.values():
        entrada.delete(0, tk.END)
    self.irrigacao.set("Não")
    self.precip_opcao.set("padrao")
    self.irrigacao_frame.pack_forget()
    self.resultado.set("Insira os dados e clique em Calcular")

def calcular(self):
    try:
        # Validação dos dados básicos
        lat = float(self.entradas['latitude'].get())
        long = float(self.entradas['longitude'].get())
        area = float(self.entradas['area'].get())
        demanda = float(self.entradas['demanda'].get())

        if area <= 0 or demanda <= 0:
            raise ValueError("Área e demanda devem ser positivas")

        # Verificar se irrigação está ativada
        usar_irrigacao = self.irrigacao.get() == "Sim"
```

```
        if usar_irrigacao:
            # Validar área de cultivo
            try:
                area_cultivo = float(self.entradas['area_cultivo'].get())
                if area_cultivo < 50 or area_cultivo > 150:
                    raise ValueError("Área de cultivo deve estar entre 50 e 150 m²")
            except ValueError:
                raise ValueError("Informe uma área de cultivo válida entre 50 e 150 m²")

            # Determinar valor da precipitação
            if self.precip_opcao.get() == "personalizado":
                try:
                    precipitacao_requerida = float(self.entradas['precipitacao'].get())
                    if precipitacao_requerida <= 0:
                        raise ValueError("Precipitação deve ser positiva")
                except ValueError:
                    raise ValueError("Informe um valor válido para precipitação requerida")
            else:
                precipitacao_requerida = 90  # Valor padrão

        ponto_usuario = (lat, long)
        estacoes_unicas = self.df['estacao'].unique()
        estacao_proxima = min(estacoes_unicas, key=lambda e: geodesic(ponto_usuario,
e).kilometers)
        df_estacao = self.df[self.df['estacao'] == estacao_proxima].copy()

        # Ordenar por data para garantir continuidade temporal
        df_estacao = df_estacao.sort_values('time').reset_index(drop=True)

        if df_estacao.empty:
            raise ValueError("Nenhum dado disponível para esta estação")

        # Cálculo de demanda de irrigação
        if usar_irrigacao:
            df_estacao['ano'] = df_estacao['time'].dt.year
            df_estacao['mes'] = df_estacao['time'].dt.month
            soma_mensal = df_estacao.groupby(['ano', 'mes'])['pr'].sum().reset_index()
            demanda_irrig_diaria = []
            for _, row in soma_mensal.iterrows():
                dias_mes = calendar.monthrange(int(row['ano']), int(row['mes']))[1]
                if row['pr'] < precipitacao_requerida:
                    deficit_mm = precipitacao_requerida - row['pr']
                    deficit_m = deficit_mm / 1000
```

```
                volume_m3 = deficit_m * area_cultivo  # Usa área de cultivo informada
                demanda_mes_L_dia = (volume_m3 / dias_mes) * 1000
            else:
                demanda_mes_L_dia = 0
            demanda_irrig_diaria.append(demanda_mes_L_dia)
        demanda_irrig_media = np.mean(demanda_irrig_diaria)
        demanda += demanda_irrig_media  # soma à demanda diária

    coef_escoamento = 0.8
    demanda_m3 = demanda / 1000
    df_estacao['volume_entrada'] = (area * coef_escoamento * df_estacao['pr']) / 1000
    df_estacao['saldo_diario'] = df_estacao['volume_entrada'] - demanda_m3

    volumes = range(1, 101)
    resultados = []
    for volume in volumes:
        print(f"Processando volume: {volume} m³")
        df_simulado = self.simular_volume_com_continuidade(df_estacao, volume)
        resultados.append(df_simulado)
    df_resultados = pd.concat(resultados)

    df_resultados['ano'] = df_resultados['time'].dt.year
    ctv_anual = df_resultados.groupby(['volume_reservatorio_simulado', 'ano'])
['volume_transbordado'] \
                    .sum().reset_index()
    ctv_anual['ctv'] = ctv_anual['volume_transbordado'] /
ctv_anual['volume_reservatorio_simulado']
    ctv_medio = ctv_anual.groupby('volume_reservatorio_simulado')['ctv'].mean().reset_index()
    volume_otimo = self.calcular_volume_otimo(ctv_medio)

    # Cálculo da confiabilidade:
    df_otimo = self.simular_volume_com_continuidade(df_estacao, volume_otimo)
    dias_total = len(df_otimo)
    dias_atendidos = (df_otimo['volume_acumulado'] >= demanda_m3).sum()
    confiabilidade = (dias_atendidos * 100) / dias_total if dias_total > 0 else 0

    # Montar mensagem de resultado
    mensagem = f"Volume ótimo do reservatório: {volume_otimo:.2f} m³\n"
    mensagem += f"Confiabilidade do sistema: {confiabilidade:.2f} %\n"

    if usar_irrigacao:
        mensagem += f" Demanda adicional de irrigação: {demanda_irrig_media:.2f} L/dia"

    self.resultado.set(mensagem)
```

```
    except ValueError as e:
        messagebox.showerror("Erro", str(e))
    except Exception as e:
        messagebox.showerror("Erro", f"Ocorreu um erro inesperado: {str(e)}")

def simular_volume_com_continuidade(self, df_estacao, volume):
    """
    Simula o reservatório com persistência do volume entre anos
    """
    # Ordenar por data para garantir continuidade
    df_estacao = df_estacao.sort_values('time').reset_index(drop=True)

    saldo_acumulado = 0  # Saldo inicial zero
    saldo_diario_list = []
    transbordo_diario_list = []
    volume_acumulado_list = []

    for i, row in df_estacao.iterrows():
        saldo_diario = row['saldo_diario']
        saldo_acumulado += saldo_diario

        # Garantir que o volume não fique negativo
        if saldo_acumulado < 0:
            saldo_acumulado = 0
            transbordo = 0
        # Verificar transbordo
        elif saldo_acumulado > volume:
            transbordo = saldo_acumulado - volume
            saldo_acumulado = volume
        else:
            transbordo = 0

        saldo_diario_list.append(saldo_diario)
        transbordo_diario_list.append(transbordo)
        volume_acumulado_list.append(saldo_acumulado)

    df_resultado = df_estacao.copy()
    df_resultado['saldo_diario'] = saldo_diario_list
    df_resultado['volume_transbordado'] = transbordo_diario_list
    df_resultado['volume_acumulado'] = volume_acumulado_list
    df_resultado['volume_reservatorio_simulado'] = volume

    return df_resultado
```

```
    def calcular_volume_otimo(self, df):
        try:
            df_sorted = df.sort_values('volume_reservatorio_simulado')
            x = df_sorted['volume_reservatorio_simulado'].values
            y = df_sorted['ctv'].values

            # Calcular derivadas (declividades)
            dx = np.diff(x)
            dy = np.diff(y)
            derivadas = np.where(dx != 0, dy/dx, np.inf)

            limite = -0.25

            # Encontrar o primeiro ponto onde a derivada é maior que o limite
            for i in range(len(derivadas)):
                if derivadas[i] > limite:
                    return x[i]

            # Se não encontrar, retorna o último volume
            return x[-1]

        except Exception:
            return df['volume_reservatorio_simulado'].median() if not df.empty else 50

if __name__ == "__main__":
    root = tk.Tk()
    app = ReservatorioApp(root)
    root.mainloop()
```