UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
NÚCLEO DE DESENVOLVIMENTO AMAZÔNICO EM ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE BARRAGEM E GESTÃO AMBIENTAL

CLEVELAND GUSTAVO CANTO SILVA

DIMENSIONAMENTO DE BARRAGEM DE ACUMULAÇÃO DE ÁGUA PARA SISTEMA DE IRRIGAÇÃO DE PLANTIO DE CACAU NO SUDESTE DO ESTADO DO PARÁ

Tucuruí – PA
2024

CLEVELAND GUSTAVO CANTO SILVA

DIMENSIONAMENTO DE BARRAGEM DE ACUMULAÇÃO DE ÁGUA PARA SISTEMA DE IRRIGAÇÃO DE PLANTIO DE CACAU NO SUDESTE DO ESTADO DO PARÁ

Texto dissertativo apresentado ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental da Universidade Federal do Pará como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita.

Tucuruí – PA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S586d Silva, Cleveland Gustavo Canto.
Dimensionamento de barragem de acumulação de água para sistema de irrigação de plantio de cacau no sudeste do estado do Pará / Cleveland Gustavo Canto Silva. — 2024.
65 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Tucuruí, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental, Tucuruí, 2024.

1. Reservatório artificial. 2. Agricultura Familiar. 3. Agroclimatologia. 4. Balanço hídrico. I. Título.

CDD 620

CLEVELAND GUSTAVO CANTO SILVA

DIMENSIONAMENTO DE BARRAGEM DE ACUMULAÇÃO DE ÁGUA PARA SISTEMA DE IRRIGAÇÃO DE PLANTIO DE CACAU NO SUDESTE DO ESTADO DO PARÁ

Texto dissertativo apresentado ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental da Universidade Federal do Pará como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Barragem e Gestão Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita.

Tucuruí, 25 de abril de 2024.

Aprovado por:

Documento assinado digitalmente
ANDRE LUIZ AMARANTE MESQUITA
Data: 11/06/2024 14:06:45-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. André Luiz Amarante Mesquita. (PEBGA/NDAE/UFPA)

(Orientador)

Documento assinado digitalmente
RAYNNER MENEZES LOPES
Data: 11/06/2024 15:03:16-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Raynner Menezes Lopes (PEBGA/NDAE /UFPA)

(Avaliador interno)

Documento assinado digitalmente
ALAN KARDEK REGO SEGUNDO
Data: 11/06/2024 16:57:31-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Alan Kardek Rêgo Segundo (DECAT /UFOP)

(Avaliador Externo)

RESUMO

A região amazônica possui alto potencial hídrico e grandes reservatórios naturais de água existentes nas mais diversas formas (mananciais, aquíferos, lagos, etc.), todavia a distribuição e o acesso a este recurso por parte da população são desiguais, tornando a demanda por água muito maior do que a sua disponibilidade em determinadas regiões, o que leva estas ao estresse hídrico. Na Amazônia, a agricultura familiar representa atividade relevante no desenvolvimento sustentável regional, e demanda parte deste recurso que é fator limitante do desenvolvimento regional. Face a essa realidade tem-se aumentado a utilização de tecnologias de captação, armazenamento e conservação da água, sendo os barramentos uma das tecnologias disponíveis que cumprem um papel importante para a democratização do acesso a este recurso natural. Busca-se, portanto, através deste trabalho, dimensionar um barramento que servirá como reservatório artificial para armazenamento de água, destinado ao consumo agrícola do plantio de cacau em escala agrofamiliar em uma fazenda localizada no município de Novo Repartimento, para otimização de seus ciclos de cultivo aliado ao uso de novas tecnologias que utilizem recursos locais e fontes renováveis de energia disponíveis na Amazônia. Para isso se avaliou a demanda hídrica necessária para a atividade agrícola do empreendimento, compreendendo o Balanço Hídrico da localidade, bem como a delimitação da bacia hidrográfica de contribuição direta do barramento, permitindo dimensionar o reservatório artificial para atender ao volume de água necessário na atividade.

Palavras-chave: Reservatório artificial, Agricultura Familiar, Agroclimatologia, Balanço hídrico

ABSTRACT

The Amazon region has high water potential and large natural reservoirs of water existing in the most diverse forms (springs, aquifers, lakes, etc.), however the distribution and access to the resource by the population are unequal, making the demand for water much greater than its availability in certain regions, which leads to water stress. In the Amazon, family farming is a relevant activity in regional sustainable development, and demands part of this resource, which is a limiting factor for regional development. Faced with this reality, water capture, storage and conservation technologies are used, with dams being one of the available technologies that play an important role in the democratization of water use. Therefore, through this research, we seek to design a dam that will serve as an artificial reservoir for water storage, intended for agricultural consumption of cocoa plantation on an agro-family scale on a farm located in the municipality of Novo Repartimento, to optimize its cultivation cycles, combined with the use of new technologies that use local resources and renewable energy sources available in the Amazon. For this, the water demand necessary for the agricultural activity of the enterprise was evaluated, comprising the Water Balance of the location, as well as delimiting the watershed of direct contribution of the dam, allowing the dimensioning of the artificial reservoir to meet the volume of water needed in the activity.

Keywords: Artificial Reservoir, Family Agriculture, Agroclimatology, Water balance.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO **5**

1.1 Generalidades **5**

1.2 Justificativa **6**

1.3 Objetivos **7**

1.3.1 Objetivo Geral *7*

1.3.2 Objetivos específicos *7*

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA **8**

2.1 Caracterização Climatológica **8**

2.2 Cacauicultura no Estado do Pará **9**

2.3 Irrigação na Amazônia **13**

2.4 Barragens **15**

2.4.1 Critérios de Projetos para Pequenas Barragens de Terra *18*

2.5 Contexto Geológico Regional **21**

2.5.1 Domínio Bacajá *22*

3 METODOLOGIA **25**

3.1 Estudos Preliminares **25**

3.1.1 Área de Estudo *25*

3.1.2 Dados Climatológicos *27*

3.2 Consumo de água do Cacau **29**

3.3 Balanço Hídrico Climatológico **29**

3.4 Delimitação da área de contribuição **32**

3.5 Dimensionamento do barramento **33**

3.5.1 Dimensionamento hidráulico *33*

3.5.2 Dimensionamento geotécnico e estrutural *36*

3.6 Estudo de Caso da Fazenda Corona **38**

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES **39**

4.1 Balanço Hídrico **39**

4.2 Volume de água demandada para irrigação **42**

4.3 Delimitação da área de contribuição **42**

4.4 Dimensionamento hidráulico **43**

4.5 Dimensionamento geotécnico **48**

5 CONCLUSÃO **54**

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS **56**

APÊNDICE I **63**

APÊNDICE II **64**

1 INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

Na Amazônia, a agricultura familiar representa atividade relevante no desenvolvimento sustentável regional, sendo consequência do incentivo das políticas governamentais de integração da região Amazônica pela migração de pessoas de outras regiões do Brasil com planejamento incipiente. Becker (2011), explica que esse fenômeno ocupacional gerou enormes problemas e conflitos territoriais, desigualdade na distribuição e acesso à serviços básicos como saneamento, água potável, energia elétrica etc.

Apesar da região amazônica possuir alto potencial hídrico e grandes reservatórios naturais de água, existentes nas mais diversas formas (mananciais, aquíferos, lagos etc.) (ROCHA *et al*., 2015), a distribuição e o acesso a este recurso por parte da população são desiguais, tornando a demanda por água muito maior do que a sua disponibilidade em determinadas regiões (MENDONÇA, 2013), levando estas ao estresse hídrico. Este é o fenômeno denominado quando a quantidade de água demandada é superior à quantidade do recurso disponível, uma vez que a água é recurso utilizado pelos mais diversos segmentos da sociedade, desde o consumo humano direto, até processos industriais, na mineração e produção agrícola.

Ao se observar o cultivo de cacau, um produto agrícola de relevante importância para produção rural paraense, estado que no ano de 2023 liderou a produção de cacau no Brasil, contribuindo com 149.396 toneladas (EMBRAPA, 2019), representa cerca de 80% da produção nacional, verifica-se sua forte dependência hídrica, assim como diverso cultivares, e que, por isso, necessita de soluções para garantir a disponibilidade adequada da água necessária à boa produção.

Vistas as características climáticas da região amazônica, que possui forte sazonalidade na distribuição temporal das chuvas, a principal fonte de água para as lavouras da região, que compreende cerca de seis meses de abundância de chuvas e outros seis com precipitação mínima (GOMES, 2018), é notório a necessidade por técnicas de irrigação objetivando a melhoria da produtividade, tornando os agroecossistemas mais eficientes.

Dentre as tecnologias disponíveis, os barramentos cumprem um papel importante para o acesso a água. Tal tecnologia, é utilizada pelos mais diversos seguimentos da sociedade, tendo como função principal garantir a manutenção do abastecimento de água (VAL *et al*., 2010), permitindo, assim, que o consumo deste recurso natural em regiões que sofrem com o estresse hídrico ocorra de forma contínua, e portanto, possibilite a ampliação dos ciclos de cultivo.

O tipo de barramento mais popularmente empregado nas atividades agrícolas, é aquele feito em terra, que consiste em um maciço formado por solos compactados em camadas sucessivas, com sua estabilidade garantida pelo peso próprio da estrutura. Suas principais vantagens são: utilização de materiais naturais do local, projeto construtivo simplificado, menores investimentos, fundações mais simples devido a bases largas e facilidade na construção. (LISAR *et al*., 2012).

A área objeto deste estudo, localiza-se no município de Novo Repartimento, no estado do Pará, mais especificamente às proximidades Vila de Belo Monte, que possui como atividade principal a pecuária. No entanto, pequenos agricultores apostam na agricultura e no cultivo do cacau, uma vez que pequenas áreas podem ser bem mais produtivas na agricultura do que na pecuária, que geralmente necessita de grandes demandas de terra para subsistência dos animais (ALMEIDA, 2019).

Finalmente, busca-se aqui compreender as dinâmicas, identificar as necessidades e recursos disponíveis para atender a demanda por água do cultivo de cacau em escala agrofamiliar. Face a isso propõem-se desenvolver e avaliar a alternativa de armazenamento de água para emprego na irrigação do plantio, aliado ao uso de novas tecnologias que utilizem recursos locais e fontes renováveis de energia disponíveis na Amazônia.

1.2 Justificativa

Diante do exposto, o trabalho propõe uma solução ao explorar a utilização de barragens como uma ferramenta para o acesso à água. Os barramentos em questão, principalmente os construídos em terra, apresentam-se como tecnologias viáveis e economicamente acessíveis, utilizando materiais locais e proporcionando uma fonte contínua de água para regiões sujeitas ao estresse hídrico.

Além disso, a produção de conhecimento técnico-científico desempenha um papel crucial na otimização das tecnologias de barragem, elevando padrões de segurança e estimulando o desenvolvimento de políticas públicas voltadas para a gestão qualitativa do setor agrícola. A implementação bem-sucedida dessa abordagem pode representar não apenas um avanço no setor agrícola, mas também contribuir para a mitigação dos desafios socioeconômicos enfrentados pela agricultura familiar na região.

Portanto, a presente pesquisa justifica-se pela sua contribuição direta para a compreensão das necessidades de irrigação na produção de cacau na Amazônia, propondo uma alternativa viável e economicamente acessível, com potencial para transformar positivamente a agricultura familiar na região.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Projetar um barramento para acumulação e fornecimento de água à sistema de irrigação aplicado a cultura de cacau durante o período de deficiência hídrica em região do Sudeste do Estado do Pará.

1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar o déficit hídrico para a cultura de cacau de uma determinada fazenda da região;
- Dimensionar o reservatório artificial para atender ao volume solicitado;
- Projetar o barramento a nível conceitual.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Caracterização Climatológica

O Estado do Pará experimenta variações ao longo do ano quanto à maioria dos elementos climáticos como temperatura do ar, insolação, umidade, direção e velocidade dos ventos. Entretanto, o índice pluviométrico apresenta marcadamente duas estações, sendo uma bastante chuvosa, regionalmente conhecida como inverno Amazônico, e outra considerada seca, a qual pode ser chamada de verão Amazônico. Em relação à temperatura, a região apresenta uniformidade com valores entre 24 ºC e 26 ºC com pequenas variações de temperaturas, de 1 ºC a 2 ºC ao longo do ano. (LOPES *et al*., 2013)

Explica Albuquerque *et al*. (2010) que a época chuvosa tem seu início em dezembro e dura de cinco a seis meses, sendo o mês de março mais chuvoso em todas as mesorregiões, exceto no Baixo Amazonas que é o mês de Abril, fato que é justificado pela intensificação dos efeitos locais associados à presença da Zona de Convergência Intertropical - ZCIT. A época menos chuvosa, onde predominam as chuvas de caráter convectivo na forma de pancadas de chuvas isoladas, abrangem os demais meses do ano, sendo que o período de menor precipitação mensal climatológica ocorre entre os meses de setembro e outubro em todas as mesorregiões, exceto para o Sudeste e Sudoeste que é entre agosto e setembro.

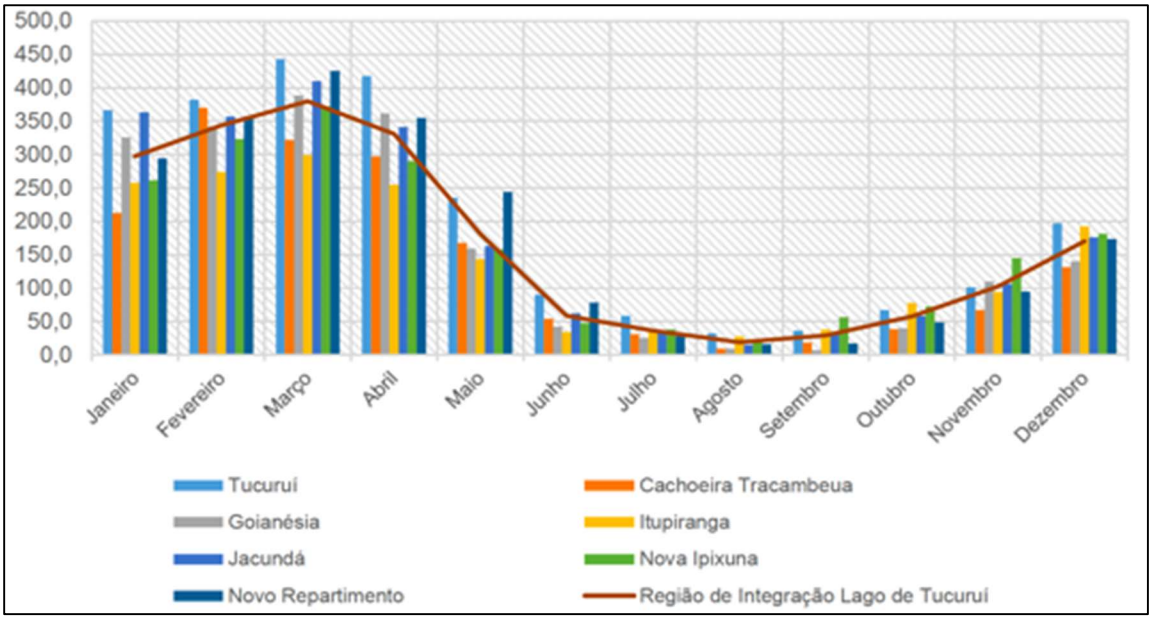
Neves Junior (2018) realizou uma análise espacial e temporal da variabilidade climática na Região de Integração (RI) Lago de Tucuruí, no Estado do Pará, que engloba a área de estudo desta pesquisa, situada no município de Novo Repartimento. Foram coletados dados históricos de 7 (sete) estações meteorológicas da região do Lago de Tucuruí, que são: Tucuruí, Cachoeira Tracambeua, Goianésia, Nova Jacundá, Novo Repartimento, Nova Ipixuna e Itupiranga.

No estudo realizado por Neves Junior (2018) foi observado o regime pluviométrico da região ao longo da série histórica de 1972-2016, porém aqui se restringirá a observar os dados obtidos entre o período de 2000-2016, pois anterior a isto não há dados relativos à estação meteorológica de Novo Repartimento, sendo está a mais próxima da área de estudo do presente trabalho.

Observou-se, portanto, que o mês de março é o mais chuvoso e o mês de agosto, o mais seco. Além disso, percebem-se dois períodos bem distintos: um mais chuvoso, de

janeiro a abril, que caracteriza na escala regional o "inverno" amazônico; e outro mais seco, de junho a outubro, chamado de "verão" amazônico. Vale ressaltar que há dois períodos de transição entre a época mais chuvosa e mais seca, que são representados pelos meses de maio e novembro/dezembro. O gráfico abaixo (Figura 1) apresenta a categorização destes dados.

Figura 1 - Média dos totais pluviométricos mensais das estações meteorológicas e sua média da RI Lago de Tucuruí (PA) 2000-2016.



Fonte: Elaborado por Neves Junior (2018) a partir de dados de HidroWeb/ANA, 2017.

2.2 Cacauicultura no Estado do Pará

Acredita-se que o cultivo deliberado do cacau na região amazônica brasileira tenha se iniciado na década de 1970, especialmente nas cercanias de Belém (ALMEIDA, 2017). Nesta mesma década, com a abertura da Rodovia Transamazônica (Br-230), a cacauicultura se expandiu para o restante do estado, ancorada em projetos do Governo Federal e condições edafoclimáticas, assim, o polo da Transamazônica passou a ser considerado a zona de maior importância para o desenvolvimento e expansão da lavoura cacaueira do Brasil (CALVI *et al*., 2010). O estado do Pará sozinho produziu na safra de 2017 mais de 100 mil toneladas (IBGE/SIDRA, 2018) deste produto agrícola.

Para Guimarães (2011), é importante ressaltar que este desempenho está diretamente relacionado à predominância de pequenos produtores rurais no processo produtivo do cacau, tanto na escala territorial como na escala local, no qual a gestão das

unidades de produção é feita diretamente pela família, que detém o controle da mão-de-obra.

A prática produtiva, portanto, reflete as características agroecológicas de cada estabelecimento agrícola, que na agricultura familiar resultam das diversas experiências e conhecimentos tradicionais, na antítese da agricultura convencional (SILVA, 2013). Segundo Mendes (2005) a cacauicultura na região amazônica é considerada viável economicamente, ambientalmente sustentável e socialmente justa, sendo diretamente influenciada por fatores socioeconômicos, por eventos históricos como a construção de estradas, políticas públicas com a disponibilização de créditos e incentivos fiscais, e pelas constantes mudanças impostas pela revolução verde que se dedica a tornar o setor agrícola mais sustentável (CRUZ & SOUZA, 2019)

Sabendo da importância desse modelo produtivo para a região e para a sustentabilidade da produção familiar, os agricultores, apoiados em suas organizações coletivas, têm buscado o fortalecimento dessas atividades consideradas por estes como alternativas sustentáveis.

Pode-se, então, afirmar que o modelo de organização da produção é fator determinante na produtividade de um insumo agrícola. O alcance de bons resultados está intrinsecamente ligado à introdução de inovações que possibilitem eliminar as ineficiências relativas à organização do processo produtivo e da produção (RODRIGUES *et al*., 2013).

Tais implementos devem destinar-se a melhoria de métodos e meios relacionados a produção do insumo agrícola, permitindo assim, maximizar características naturais favoráveis de determinada localidade ou suprir a falta desta, podendo se mencionar o melhoramento genético, inovações tecnológicas em irrigação, fertilização, entre outras técnicas que visam o desenvolvimento de cultivares adaptadas para distintas regiões (BRESEGHELLO *et al*., 1999).

Como exemplo dessa premissa, analisa-se as características naturais do Cacau para consumo de água. Este é extremamente exigente deste recurso, e embora não mostre facilmente sintomas de déficit hídrico, o cacaueiro é muito sensível à deficiência de água. A seca pode ter dois efeitos distintos sobre a planta: um do déficit interno, que pode ser curto ou cumulativo e outro sobre o transporte de nutrientes. Logo, a quantidade e

distribuição anual da pluviosidade afeta diretamente a produção das lavouras de cacau (SOUZA *et al*., 2009).

Almeida *et al*. (2000) estimaram a demanda hídrica para o cacau pelo método do balanço climatológico, sob a condição de sequeiro entre os anos de 1988 á 1994 no município de Ilhéus, Bahia. Seu objetivo maior foi determinar a Evapotranspiração Real (ETR), variável importante para o manejo da agricultura irrigada. Ao concluir o experimento observou-se que a ETR corresponde a, aproximadamente, 85% da Evapotranspiração Potencial (ETP) obtida pelo método de Penman-Monteith estabelecido pela FAO (Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura) em 1998. A média diária da demanda hídrica do cacaueiro, cultivado no espaçamento de 3 m x 3 m, foi de 20,2 litros por planta, o que corresponde a uma lâmina de Evapotranspiração da Cultura (ETC) de, aproximadamente, 2,2 mm.

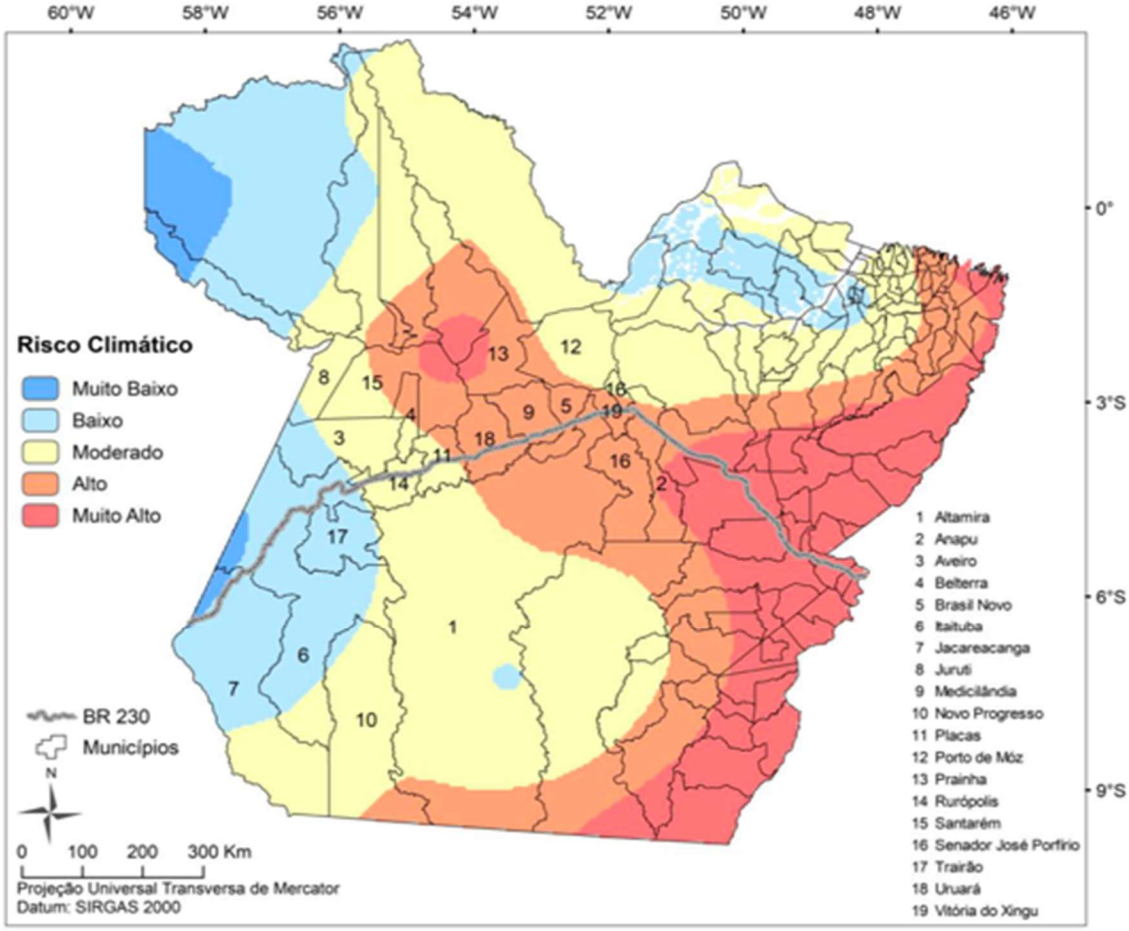
Por outro lado, de acordo com Silva (2020), que avaliou a demanda hídrica do cacaueiro irrigado e conduzido a pleno sol em Cruz das Almas - BA, o cacaueiro em sua fase jovem demanda de 3,97 a 4,53 mm de água por dia, durante o ciclo de 1 ano da cultura.

Devido à variabilidade espacial e temporal, a quantidade de precipitação pluviométrica constitui um dos principais fatores de risco para a cacauicultura, por isso, é interessante que o regime pluviométrico seja um fator analisado adequadamente no processo produtivo (SCERNE; CARVALHO, 1983).

Ao observar o regime de chuvas na Amazônia, este apresenta sazonalidade no que se refere a sua distribuição anual. Buscando entender o comportamento do cacau frente a estas premissas, Despontin (2018), através da espacialização de dados de evapotranspiração potencial (ETP) e real (ETR), deficiência hídrica (DEF) e excedente hídrico (EXC), analisados a partir de uma série de dados climáticos do período de 1980-2013 proveniente do sistema *DailyGridded* (XAVIER *et al*., 2016), propôs um zoneamento agroclimático para a cultura do cacau buscando identificar o risco climático para essa atividade no estado do Pará.

A Figura 2 mostra que parte considerável das regiões leste e central do estado do Pará são classificadas como de alto a muito alto risco para a cacauilcultura, considerando as principais condições agroclimáticas, especialmente por causa do critério adotado de deficiência hídrica em um *worst case*.

Figura 2 - Risco climático para a cultura do cacau no estado do Pará



Fonte: EMBRAPA (AGRITEMPO, 2018)

O risco quantificado, considera dados históricos que podem refletir condições de inviabilidade ao longo de um ciclo amplo de tempo. Tal cenário chama atenção para a necessidade em investir em novas tecnologias que possibilitem analisar variáveis que podem ser limitantes para o cultivo do cacau (MÜLLER & VALLE, 2007), prever este risco e mitigá-lo, tendo à disposição da produção, quando se fizer necessário, ferramentas que reduzam tais riscos. Nessa perspectiva, tais informações são imprescindíveis para que se conheça as regiões do estado que demandam maior atenção para a produção de cacau.

A forma mais popularmente utilizada para suprir a necessidade hídrica na agriculta é o armazenamento de água em reservatório artificiais destinado à irrigação do plantio. Tal técnica requer conhecimento sobre as relações hídricas da cultura, além de informações primárias sobre solo e clima, que constituirão base extremamente importante para o correto planejamento, dimensionamento e manejo do reservatório e da irrigação (JUNIOR, 2017).

Deve-se, no entanto, destacar que não existe um sistema de irrigação considerado ideal e especificamente recomendado para o cultivo do cacaueiro, comumente sua cultura é empregada em regiões húmidas, com indicies pluviométricos acima de 1.500 mm por ano (SODRÉ, 2017).

A seleção do método será determinada, portanto, pelo tipo de solo, clima, disponibilidade hídrica e qualidade da água de irrigação, mão-de-obra disponível e do custo de implantação do sistema na região.

2.3 Irrigação na Amazônia

A irrigação é um dos componentes essenciais no processo produtivo relativo ao cultivo de diversas culturas e sua eficiência de distribuição de água deve ser avaliada sempre que possível, pois, tanto o excesso como a deficiência de aplicação da água as culturas aumentam os custos de produção e queda da produtividade (SILVA *et al*., 2014). Para uma melhor eficiência são necessários menores perdas, maior uniformidade e distribuição da água durante o funcionamento do sistema de irrigação (KELLER & BLISNER, 1990).

De acordo com Santana *et al*. (2022) a utilização de técnicas de irrigação na Amazônia tem sido ampliada para diversos cultivos além das hortaliças, como para arroz, açaizeiro, bananeira, pimenteira-do-reino, pastagens, cacaueiro, coqueiro, laranjeira, limoeiro, mamoeiro, aceroleira, abacaxizeiro. O mesmo autor informa que implementação desse método tem sido ampliada com o intuito de obtenção da produção na entressafra, bem como da necessidade de superar os riscos da seca, que para muitos produtores tem se acentuado, em comparação com décadas anteriores a 1970.

Em algumas regiões o emprego da técnica de irrigação tem sido devido as condições climáticas de dificultam o cultivo de certas culturas a céu aberto, como o caso da Amazônia sul ocidental, onde os produtores têm utilizado a técnica de irrigação por gotejamento para contornar essa dificuldade (SILVA *et al*., 2014).

O uso da irrigação, no estado do Pará, terá uma abordagem mais detalhada por incluir área de estudo deste trabalho. O mesmo, apresentou uma evolução notória ao longo dos anos, particularmente entre 2006 e 2017, quando a área irrigada aumentou de 29.519 ha para 103.343 ha, respectivamente (SANTANA *et al*., 2022).

Mesmo com a cresceste implementação desta técnica a tabela 1, mostra que a irrigação é uma tecnologia pouco utilizada pelos produtores paraenses como instrumento de modernização e aumento da produtividade em comparação com o observado em outros estados. Uma evidência nesse sentido é a baixa participação do Pará na área irrigada do Brasil. Para Souza *et al*. (2012) os motivos para essa situação incluem a predominância de uma agricultura de baixo nível tecnológico no estado, limitada capacidade de investimento e de conhecimentos técnicos dos produtores e pouca disponibilidade de energia elétrica.

Tabela 1: Área irrigada nas microrregiões mais dinâmicas do estado do Pará, no período 1995–2017 (em hectares)

Microrregião	**1995**	**2006**	**2017**
Paragominas	121	5.119	10.577
Tucuruí	238	1.984	1.416
Altamira	30	1.740	1.161
São Felix do Xingu	174	65	813
Itaituba	5	178	425
Pará	4.797	29.519	103.343
Brasil	3.121.642	4.545.534	6.694.245

Fonte: IBGE (1998, 2009, 2019) *apud* Santana *et at*. 2022

Em relação ao uso da irrigação nas microrregiões mais dinâmicas do Pará, nota-se que, em termos gerais, o crescimento foi mais acentuado no período 1995–2006 do que em 2006–2017. Isso ocorreu de modo mais especial nas microrregiões de Paragominas, Altamira e Itaituba (SANTANA *et al*., 2022). De acordo com Souza *et al*. (2012), as maiores áreas irrigadas no Pará estão localizadas na região do Rio Capim, a qual inclui alguns municípios da microrregião de Paragominas. Para esses autores, a predominância da irrigação nessa região resulta da condição climática e do processo de ocupação que favoreceu o desenvolvimento de uma agricultura mais intensiva. Os principais cultivos irrigados compreendem o açaizeiro, a pimenteira-do-reino, o cacaueiro, a bananeira e as hortaliças. A expansão da irrigação nas microrregiões de Tucuruí e Altamira está associada, respectivamente, à exploração do açaizeiro e do cacaueiro.

A irrigação tem ainda mostrado avanços significativos em associação à em Internet das Coisas (IoT) e sensores aplicados a ela. A relação entre os tipos de irrigação e o processo de implementação é crucial para otimizar o uso da água. Diferentes tipos de sistemas, como gotejamento, aspersão e pivô central, oferecem opções adaptadas às necessidades específicas das culturas e das condições locais. A instalação de sensores para monitorar parâmetros como umidade do solo, temperatura e radiação solar permite

ajustes eficientes na irrigação, garantindo que as plantas recebam a quantidade adequada de água. Além disso, tecnologias emergentes, como redes de sensores sem fio, permitem a conectividade entre dispositivos, facilitando o monitoramento remoto e a tomada de decisões automatizada.

Atualmente existem pesquisas que apresentam a integração dessas novas tecnologias aos sistemas de irrigação. Abioye *et al*. (2020) apresenta diversas abordagens para otimizar o uso da água na agricultura, incluindo arquiteturas, componentes, software e tecnologias utilizadas em sistemas de irrigação, e apresenta ainda a importância da coleta de dados por meio de sensores para ajustar a irrigação com base nas condições do solo e do ambiente.

Nesse contexto, é notório a importância crescente do uso de tecnologias da informação para uma abordagem inteligente, não apenas para economia de água, mas também aumenta a produtividade e contribuição para a sustentabilidade agrícola, como a exemplo da fertirrigação que é o é o processo de aplicação de fertilizantes via irrigação.

2.4 Barragens para armazenamento de água

As barragens consistem em uma estrutura projetada para modificar características naturais de cursos d'água, possibilitando controle da vazão de água dos mananciais nos períodos de chuva, bem como proporcionam o acúmulo e reservação da água que será utilizada para diversas finalidades nos períodos de escassez, atuando então, de forma direta e eficaz, na disponibilidade hídrica para atender aos padrões demandados pela sociedade (OLIVEIRA, 2017).

A utilidade das barragens compreende as mais diversas finalidades, desde a produção de energia elétrica, regularização de vazões de cursos d'água, abastecimento doméstico e industrial, irrigação, dessedentação animal, piscicultura, embelezamento paisagístico, lazer, entre outros ramos.

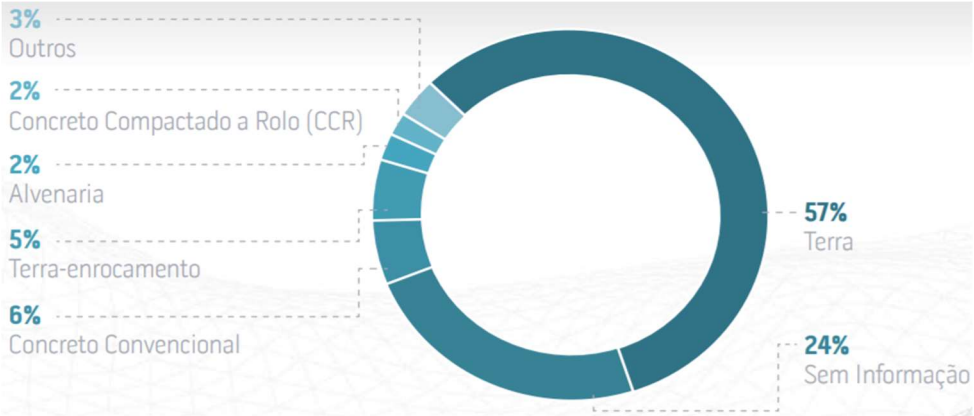
As barragens podem ser classificadas de acordo com material empregado, podendo ser de terra, pedra ou enrocamento, alvenaria, concreto ou mista. A definição do material mais adequado à construção do barramento, leva em consideração a segurança e eficiência da barragem, e depende das caraterísticas geológicas e geotécnicas do local onde ela será implantada, bem como da disponibilidade de cada material e recursos para a obras, entre outros fatores.

Quanto a técnica de construção, Carvalho (2008) indica os principais tipos de barragens que variam principalmente em geometria e material empregado, sendo estas:

- Barragens de Gravidade: apresenta uma seção típica triangular e sua estabilidade é garantida pelo peso próprio da estrutura;
- Barragens de Arco: possui estrutura delgada e em arco, de concreto, apoiada em obreiras e fundações rochosas;
- Barragens de Contrafortes: utiliza pilares de sustentação (contrafortes) a jusante ao longo do corpo da barragem;
- Barragens de Terra: maciço formado por solos compactados em camadas sucessivas, com sua estabilidade garantida pelo peso próprio da estrutura.

Neste estudo, dar-se-á maior ênfase nas barragens de terra, vista as suas vantagens, como por exemplo: utilização de materiais naturais do local, projeto construtivo simplificado, menores investimentos, fundações mais simples devido as bases largas e facilidade na construção. Tais vantagens fazem com que as barragens de terra sejam as mais utilizadas, segundo dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico - ANA, 57% das barragens cadastradas no Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SISNB) até 2022 são construídas em Terra, como mostrado na figura 3 que apresenta os principais materiais empregados na construção de barragens.

Figura 3 - Tipos de barragem por material empregado



Fonte: ANA (2022)

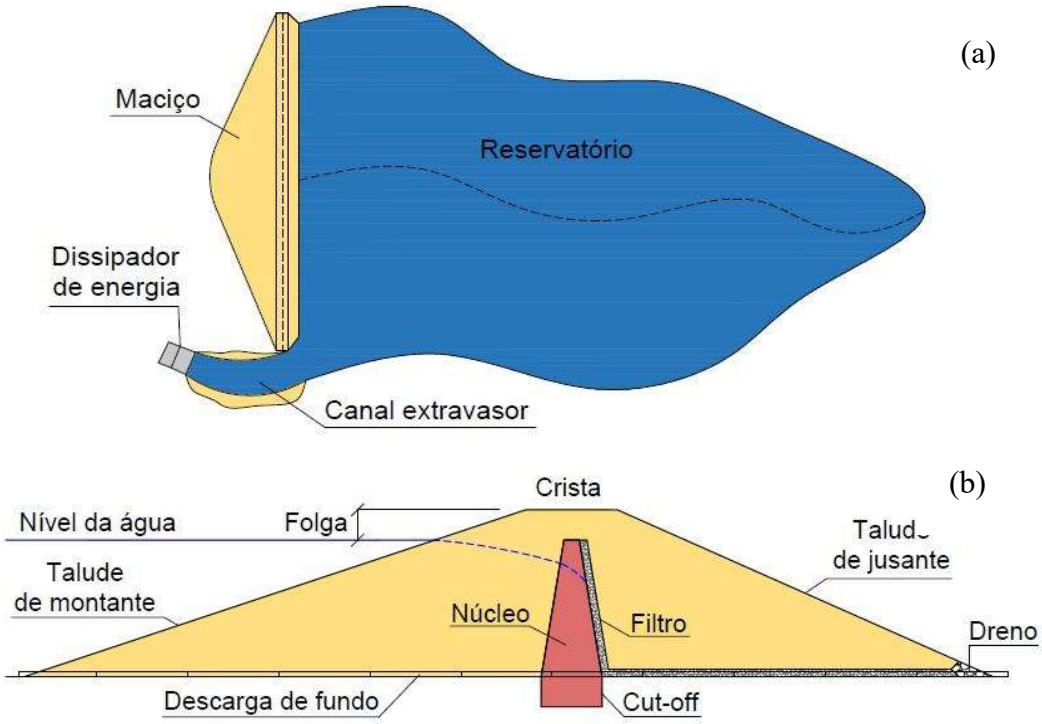
Segundo Carvalho (2008), as principais partes constituintes de uma barragem de terra e seus conceitos básicos são descritos a seguir e ilustradas na figura 4:

- Maciço ou aterro: é a própria estrutura da barragem, construído transversalmente ao curso d'água, encarregado de reter a água;
- Reservatório: é o volume de água armazenada a montante do maciço, sendo sua superfície denominada espelho d'água;
- Canal extravasor: estrutura construída para dar escoamento ao excesso de água disponibilizado pelas chuvas e após a ocorrência destas;
- Dissipador de energia: estrutura hidráulica construída com a finalidade de diminuir a energia cinética da água a ser restituída ao leito natural do curso d'água;
- Crista: é a parte superior do aterro;
- Taludes: são as faces laterais inclinadas, paralelas ao eixo do aterro, sendo, talude de montante o lado que fica em contato com a água (lado molhado) e talude de jusante o lado externo ao reservatório (lado seco);
- Cut-Off: fundação construída transversalmente ao curso d'água e no eixo da barragem. Constitui-se numa vala preenchida com terra de boa qualidade devidamente compactada que ancora o maciço;
- Núcleo: elemento construído no centro do aterro com material fino (argilosa), diminuindo a infiltração da água no corpo do aterro, para efeito de segurança;
- Descarga de fundo ou desarenador: instalada sob o aterro, tem a finalidade de garantir o escoamento continuo a jusante, promover o esvaziamento da represa e o controle de nível do reservatório;
- Nível d'água: é a altura da lâmina d'água na barragem em condições normais;
- Borda livre: distância vertical entre o nível d'água, quando a represa estiver cheia, e a crista do aterro;
- Filtro: estrutura para interceptar a linha de saturação no maciço da barragem, conduzindo-a na direção do dreno;
- Dreno: dispositivo instalado para o escoamento da água que percola no maciço à jusante.

Vale ressaltar que as barragens de terra podem estar sujeitas a maior susceptibilidade a danos e rompimento com a passagem de água. Todavia, este tipo de barragem apresenta boa capacidade de adequação a grandes deformações, sem ruptura, além disso, a elevada relação largura da base/altura que as caracteriza são fatores que recomendam este tipo de barragem para qualquer tipo de fundação, pois as tensões

aplicadas ao terreno são bastante reduzidas, e o trajeto da água infiltrada através da fundação é necessariamente longo (BRASIL, 2016).

Figura 4 - Elementos constituintes de uma barragem de terra clássica (a) vista em planta; (b) Corte transversal.



Fonte: Gomes & Teixeira, 2017.

2.4.1 Critérios de Projetos para Pequenas Barragens de Terra

A segurança deve constituir o objetivo fundamental no projeto, construção e operação de barragens (QUINTAS, 2002). Este deve ser referencial a ser buscado, uma vez que possibilita minimizar os riscos relativos ao colapso de uma barragem, tendo em vista que o dano associado a uma ruptura tem consequências imensuráveis em termos de impactos ambientais e socioeconômicos (MEDEIROS & MEDEIROS, 2012).

Durante a fase de projeto, os riscos consistem em não se definir, ou definir de forma equivocada, os critérios a serem seguidos pelo projetista no desenvolvimento dos projetos (PISANIELLO *et al.*, 2017). Esses critérios estão relacionados com a hidrologia, a geologia, a geotecnia, o dimensionamento hidráulico, o dimensionamento geotécnico e o dimensionamento estrutural (FACCHINETTI, 2008).

Segundo o Guia Prático de Pequenas Barragens da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), os projetos de pequenas barragens deverão conter minimamente os seguintes conteúdos que visam dar maior segurança às barragens durante a sua elaboração a nível conceitual.

- Levantamento planialtimétrico da área a ser inundada pelo reservatório, com a estimativa da área inundada e volume do reservatório, bem como a localização da barragem;
- Estudos hidrológicos para a determinação da vazão disponível para barramento e vazão máxima de cheia com base em precipitações associadas a intensidade, duração e características da bacia hidrográfica;
- Dimensionamento hidráulico da descarga de fundo, tomada d'água e extravasor com base nos estudos hidrológicos;
- Dimensionamento estrutural com a geometria da barragem (cotas, borda livre, inclinação dos taludes, altura da barragem e características e dimensões dos diferentes tipos de maciços constituintes.

A nível de detalhamento do projeto, sugere a complementação com informações inerentes as especificidades do local que se pretende instalar tais estruturas, como por exemplo:

- Reconhecimento do terreno de fundação por meio de poços ou sondagens e análise de amostras indeformadas e ensaios *in situ* para determinação das características de resistência ao cisalhamento e de permeabilidade;
- Estudo dos locais de empréstimo de solos para construção do aterro e a avaliação dos respectivos volumes, ensaios laboratoriais de identificação e de compactação;
- Levantamento e caracterização da zona a jusante da barragem, afetada por uma eventual ruptura e a proposta de um plano simplificado de segurança da barragem;
- Medidas mitigadoras dos impactos ambientais, que incluam a recuperação das áreas de empréstimo, a proteção do reservatório em relação ao assoreamento e a alteração da qualidade da água.

Não obstante, deve-se ainda dar atenção a escolha do local para construção da barragem de forma a possibilitar a construção de uma estrutura eficiente e segura. Lopes

e Lima (2008), elencam as principais características que devem ser observadas para escolha do local ideal para a construção do barramento.

- Não possuir nascentes e afloramento rochoso no local de assentamento do aterro;
- Dar preferência aos locais de solo argiloso, seco e profundo, evitando os solos arenosos e alagados. Caso seja necessário, procurar área de empréstimo que possua solo adequado para a construção do aterro, principalmente para o núcleo impermeável, se for o caso;
- Ser no local mais estreito possível da calha do manancial, formando uma garganta natural, diminuindo o volume do aterro e, consequentemente, os custos de construção;
- O local deverá ser espraiado, aberto e com pouca declividade para se acumular um maior volume de água.
- Dispor de material adequado para o aterro próximo a área da barragem, minimizando os custos com movimentação e transporte de terra;
- Evitar interferências em edificações, plantações, estradas. Verificar as condições de ocupação a jusante da barragem.

Os fatores climáticos influenciam não só no dimensionamento da barragem em si, mas também nas características do solo da região, assim como interferem no prazo (cronograma da obra) (MENDES *et al*. 2017). De um modo geral, lugares com clima úmido tem disponibilidade de solos finos em camadas espessas, enquanto os com clima seco tem solos mais grosseiros em camadas rasas (SOUZA, 2013).

A Associação brasileira de Normas Técnicas em sua norma NBR 13028 fornece orientações sobre a concepção das barragens de mineração (em particular barragens de rejeitos) e reservação de água. Neste instrumento normativo são indicados os principais requisitos a serem atendidos nos projetos de construção de barragem, principalmente relacionados as condições de estabilidade de barragens de terra. Para tanto, a norma citada determina os fatores de segurança (FS) mínimos a serem considerados para a operação de barragem considerando as diferentes condições geotécnicas as quais a estrutura será submetida. A Tabela 2 a seguir, apresenta a valor estabelecido para cada fase, ou seja, para condição geotécnica a qual condicionará uma possível instabilidade.

Tabela 2: Fatores de segurança mínimos estabelecidos para barragens de mineração e reservação de água segundo NBR 13.029.

Fase	Tipo de ruptura	Talude	FS mínimo
Final de construção	Maciço e fundações	Montante e jusante	**1,3**
Operação com rede de fluxo em condição normal de operação, nível máximo do reservatório	Maciço e fundações	Jusante	**1,5**
Operação com rede de fluxo em condição extrema de operação, nível máximo do reservatório	Maciço e fundações	Jusante	**1,3**
Operação com rebaixamento rápido do nível d´água do reservatório	Maciço	Montante	**1,1**
Operação com rede de fluxo em condição normal Solicitação sísmica, com nível máximo do reservatório	Maciço e fundações	Jusante	**1,5**
		Entre bermas	**1,3**
		Montante e jusante	**1,1**

Fonte: ABNT, 2017.

2.5 Contexto Geológico Regional

A área de estudo deste trabalho situa-se no Domínio Bacajá, pertencente a Província Transamazonas a qual faz parte do Cráton Amazônico. Este último abrange uma área de aproximadamente 4.500.000 km^2 e configura uma das principais unidades tectônicas da Plataforma Sul-Americana (SCHOBBENHAUS & BRITO NEVES, 2003).

Segundo Santos *et al*. (2006) a Província Transamazonas, apresenta caraterísticas de um expressivo orógeno de idade paleoproterozóico que se estende ao longo da porção oriental do Cráton Amazônico, desde o nordeste do Escudo Brasil Central, recobrindo parte do Escudo das Guianas, estendendo-se pelo do norte do Brasil (Amapá e noroeste do Pará), e por parte da Guiana Francesa, Suriname até leste da Venezuela. Essa Província foi intensamente afetada durante o Ciclo Transamazônico (2,26 – 1,95 Ga), ao longo do qual ocorreram processos magmáticos que proporcionaram o surgimento de crosta juvenil e o retrabalhamento de blocos arqueanos, compreendendo, portanto, predominantemente rochas ígneas e metamórficas.

2.5.1 Domínio Bacajá

O Domínio Bacajá está delimitado a sul pela Província Carajás, a oeste pelo Domínio Iriri-Xingu da Província Amazônia Central, a leste pelo Cinturão Araguaia e é ainda encoberto pela Bacia Sedimentar do Amazonas. Este domínio é composto de granitóides, rochas charnoquíticas e rochas supracrustais como: ortognaisses, migmatitos e granulitos para e ortoderivados. Dados geocronológicos desse domínio indicam retrabalhamento de crosta arqueana e formação de crosta juvenil durante o Ciclo Transamazônico (FARACO *et al*., 2005; VASQUEZ *et al*., 2008; VASQUEZ, 2006). Vasquez *et al*. (2008), subdivide o Domínio Bacajá em associações de rochas que compõem os seguintes grupos: Complexos Metamórficos, *greenstone belts* e suítes plutônicas resultantes de magmatismo orogênico.

Na figura 5, são apresentadas as unidades geológicas que, segundo o mesmo autor, ocorrem na área de estudo para auxiliar na compreensão do contexto geológico da porção noroeste do Domínio Bacajá, uma vez que as características geológicas do substrato influenciam diretamente na estabilidade e segurança de estruturas geotécnicas como as barragens.

Sendo, portanto, as unidades de ocorrência na localidade: O Complexo Cajazeiras, que compreende as rochas da unidade Caiama, o Ortognaisse Pacajá, que faz parte dos Complexos Metamórficos; a Sequência de Rochas Supracrustais 1, que está inserida nos *greenstone belts*; e o Complexo Bacajaí, oriundo do Magmatismo Orogênico Sin a Tardi-Colisional.

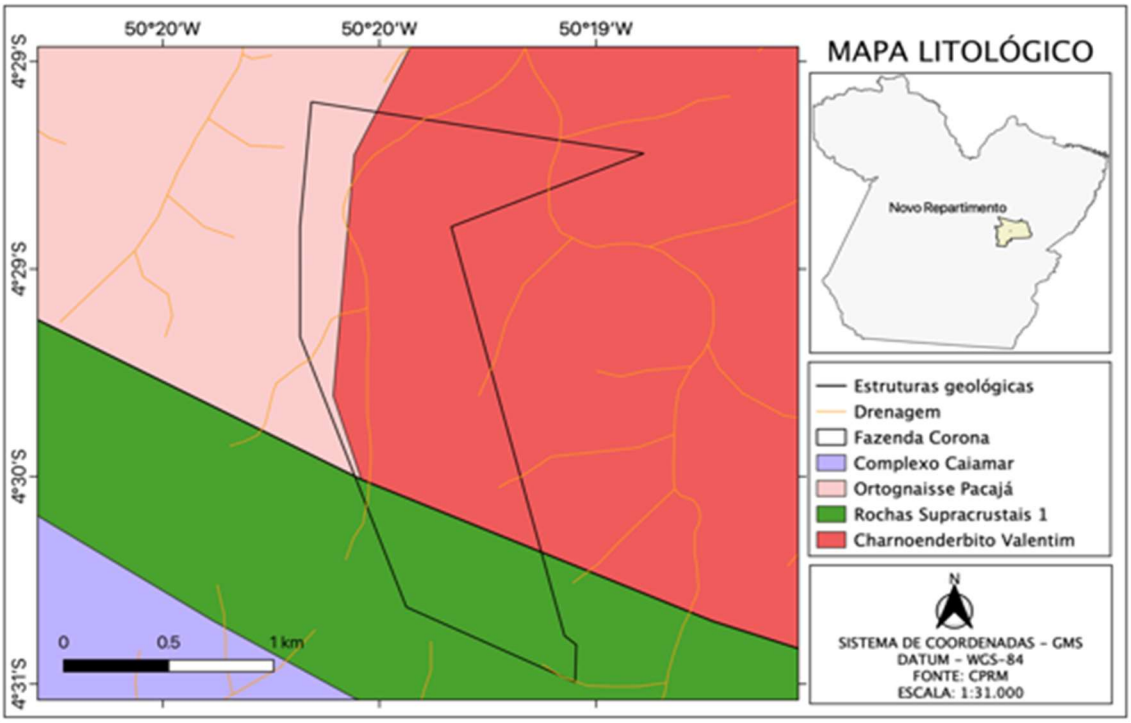
2.5.1.1 Complexos Metamórficos

Complexo Cajazeiras

De acordo com Ricci (2000), ocorre nesta unidade ampla predominância de granulitos fortemente reidratados (piroxênios pseudomorfisados ou completamente reequilibrados), tonalíticos a graníticos, com texturas granulíticas geralmente intactas. Milonitos de alto grau também são frequentes, com tramas de alta temperatura e elevada ductibilidade (*striped gneisses*).

Os litotipos do Complexo Cajazeiras apresentam um bandamento composicional muito largo (decimétrico a até dezenas de metros de largura), frequentemente realçado por pequenos corpos máficos aleitados, geralmente *boudins*, e mobilizados migmatíticos diversos, de fácies granulito e anfibolito (VASQUEZ *et al*., 2008).

Figura 5 - Mapa litológico com representação da delimitação da Fazenda Corona



Fonte: CPRM (2008).

Ortognaisse Pacajá

Para Vasquez *et al*. (2008), esta unidade reúne corpos restritos de ortognaisses e migmatitos com metamorfismo em fácies anfibolito. Essas rochas típicas de assembleias de embasamento, aliadas a gnaisses com ausência de texturas ígneas preservadas e de estruturas magmáticas primárias, respaldam o Ortognaisse Pacajá como uma unidade metamórfica, corroborada ainda pelas texturas nematoblásticas dos corpos anfibolíticos associados. Os litossomas mapeados ora são constituídos por migmatitos graníticos a tonalíticos, ora por ortognaisses predominantemente tonalíticos.

Quanto a tectônica, Vasquez *et al*. (2008) informa que nos corpos de ortognaisses (mais ou menos migmatizados, com biotita marrom e/ou hornblenda verde), a trama é marcada pela alternância de bandas centimétricas a decimétricas, de colorações

cinza-esverdeadas e rosadas, além de frequentes lentes anfibolíticas concordantes. Em geral, as bandas tonalíticas, granodioríticas e máficas são mais estreitas e bem definidas, finamente foliadas e esverdeadas, do que as dos ortognaisses granulíticos (mais ricos, ainda, em corpos máficos).

2.5.1.2 Greenstone Belts

Sequência de Rochas Supracrustais 1

Sob a denominação informal de Sequencias Metavulcano-Sedimentares do Tipo Greenstone, essa unidade foi mapeada por Faraco *et al*. (1996) com auxílio de interpretações fotogeológicas, o qual individualizou corpos com geometrias lenticulares e irregulares, sustentados por cristas estruturais. Os estudos de Vasquez *et al*. (2008) nesta unidade, apontam que a maioria desses corpos encontram-se orientados estruturalmente seguindo o *trend* WNW-ESE e são compostos por quartzitos puros ou micáceos, brancos a amarelados, anisotrópicos a maciços, de baixo grau metamórfico (com clorita e/ou muscovita e/ou sericita), os quais apresentam foliações sub-verticalizadas. Em algumas porções de ocorrência desta unidade, Oliveira *et al*. (1994) descreve a ocorrência de quartzitos puros ou com muscovita, foliados, e com metamorfismo em fácies xisto verde e, também, mica-quartzo xistos. No entanto, alguns outros tipos de litossomas desconhecidos podem estar representados por restos metavulcano-sedimentares, como o caso do garimpo aurífero do Manelão, estudado por Souza (1995).

2.5.1.3 Magmatismo Orogênico Sin a Tardi-Colisional (Ciclo Transamazônico)

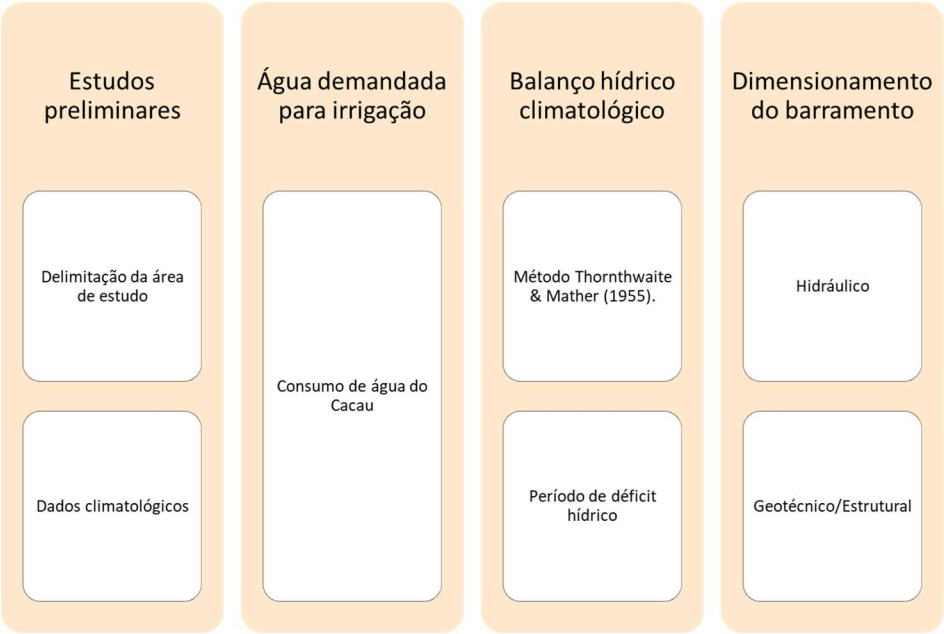
Complexo Bacajaí

O Complexo Bacajaí estudado por Vasquez *et al*. (2008) engloba enderbitos e charnoenderbitos dominantes, que se associam a subordinados charnockitos, jotunitos e mangeritos. Os principais litossomas dessa unidade são aqueles banhados pelo Lago de Tucuruí, no rio Bacajaí e, o maior de todos, seccionado pelos rios Iriri e Xingu. Trata-se de granitóides catazonais intrusivos, orogênicos, gnaissificados a isotrópicos, e com textura ígnea preservada.

3 METODOLOGIA

As etapas e ferramentas definidas para o desenvolvimento deste trabalho estão descritas a seguir e compreendidas em quatro etapas principais conforme esquematização na Figura 6.

Figura 6 - Fluxograma ilustrando etapas da elaboração do trabalho



Fonte: Autor (2023).

3.1 Estudos Preliminares

3.1.1 Área de Estudo

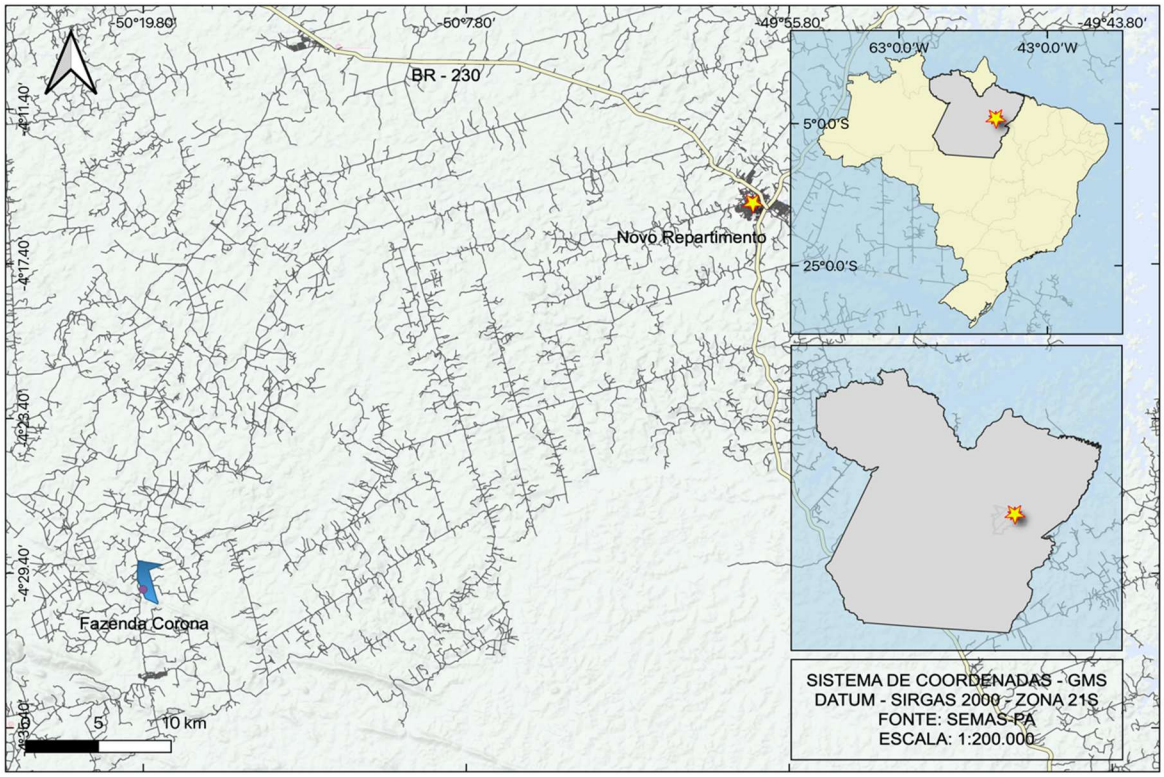
A localidade alvo deste estudo, situa-se nas proximidades da Vila Belo Monte, município de Novo Repartimento, Sudeste do estado do Pará, pertencente ao polo Araguaia Tocantins, região do Lago de Tucuruí, onde se localiza a propriedade denominada Fazenda Corona.

O acesso até a propriedade, a partir da cidade de Novo Repartimento se dá através de estradas, iniciando-se pela Rodovia BR-320, por cerca de 10 km, em seguida através de estradas vicinais como mostrado na figura 7 a seguir.

Através de uma breve avaliação sobre a origem e evolução das paisagens do estado do Pará, Jorge João *et al*. (2013) caracterizaram os compartimentos

geomorfológicos existentes no Estado. Com base na análise dos produtos de sensoriamento remoto disponíveis, perfis de campo e estudos geomorfológicos regionais anteriores (IBGE, 1995; ROSS, 1985, 1997), os terrenos paraenses foram compartimentados, em 18 domínios geomorfológicos, dos quais predomina na área do estudo as Superfícies Aplainadas do Sul da Amazônia.

Figura 7 – Mapa de localização e acesso com indicação da propriedade Fazenda Corona



Fonte: Autor (2022)

Essa unidade geomorfológica compreende relevos aplainados com alinhamento de morros e serras baixas posicionadas invariavelmente em cotas modestas, entre 100 e 400 m. Toda a rede de drenagem apresenta um padrão dendrítico a subdendrítico e converge em sentido aproximado norte-sul. Sobre esses terrenos se desenvolvem solos pobres e bem drenados, com amplo domínio de Argissolos Vermelho-Amarelos distróficos, com ocorrência subordinada de Latossolos Vermelho-Amarelos distróficos.

De acordo com a Köppen e Geiger o clima da região é classificado como Am – clima tropical de monção tendo como principais características temperaturas quentes, com elevada umidade e estação chuvosa bem definida, normalmente na estação do verão

3.1.2 Dados Climatológicos

A obtenção de dados climatológicos compreende análises do regime pluviométrico, valores de temperatura do ar, irradiação solar, bem como seu comportamento e a distribuição espacial e temporalmente que fornecem informações sobre carga hídrica da localidade, volume, frequência e sazonalidade das variações climatológicas (SILVA *et al*., 2017).

Na região de estudo são encontradas seis estações meteorológicas, mais especificamente na Região de integração do Lago de Tucuruí, sendo cinco estações pluviométricas localizadas em um raio de aproximadamente 100 km a 150 km da propriedade. A Tabela 2 abaixo mostra a distância aproximada entre cada estação meteorológica e a área de estudo. São elas: Estação meteorológica de Tucuruí, Jatobal, Nova Jacundá, Nova Ipixuna e Novo Repartimento conforme mostra a figura 8.

Tabela 3: Estações meteorológicas identificadas nas proximidades da área de estudo

Cod. Estação	Nome Estação Meteorológica	Distância (Km)
449002	E.M. Novo Repartiment	51,0
449000	E.M. Jatobal	86,0
349000	E.M. Tucuruí	109,0
449001	E.M. Nova Jacundá	134,0
449003	E.M. Nova Ipixuna	146,0

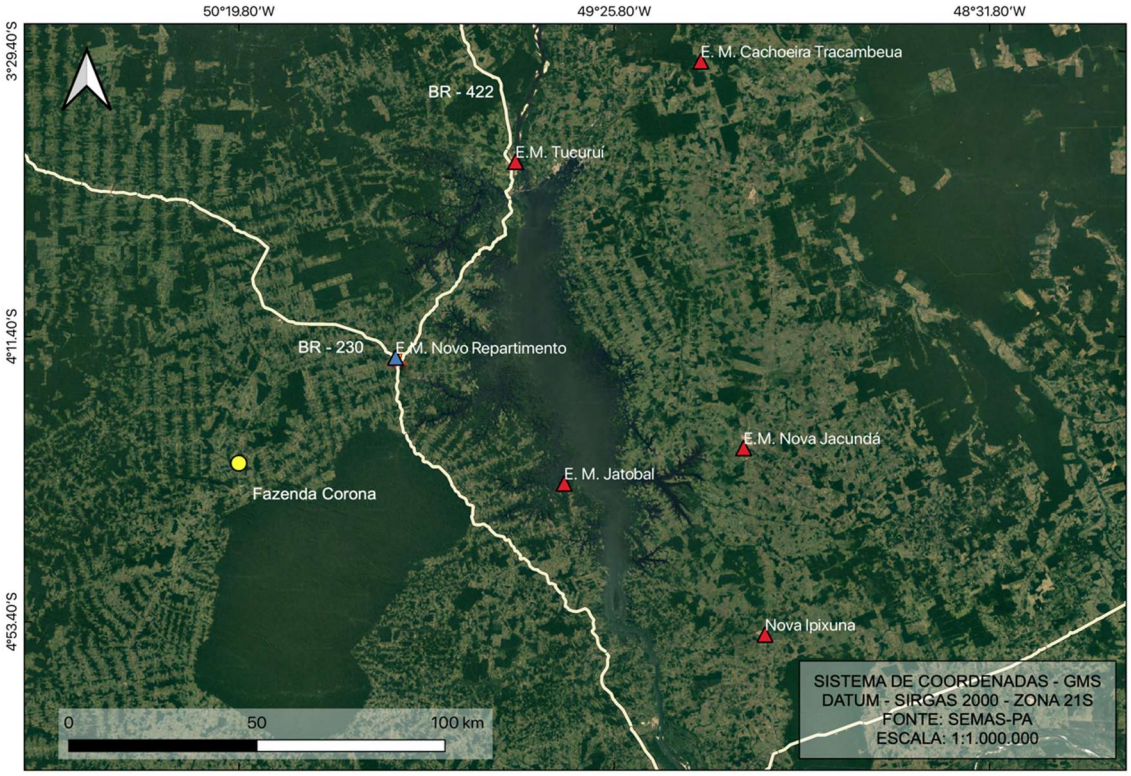
Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados de INMET, 2023.

Dentre estas estações a que foi identificada mais próxima da propriedade foi a denominada Estação Meteorológica Automática de Novo Repartimento, localizada no Município de Novo Repartimento e operada pela Companhia de Pesquisas e Recursos Minerais – CPRM, por isso optou-se por concentrar as análises a partir dos dados desta estação.

Neste estudo foram utilizados dados climatológicos reunidos por Junior (2018) a partir de dados de indicies pluviométricos e climatológicos de séries históricas nestas estações, disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia, Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH) que oferece o acesso ao banco de dados que contém todas as informações coletadas pela Rede Hidrometeorológica Nacional (RHN). Optou-se por usar os dados do referido autor pela ausência de estudos de normais

climatológicas pelo Instituto Nacional de Meteorologia para a estação de Novo Repartimento.

Figura 8 - Localização da Estações Metereologicas em relação à Fazenda Corona



Fonte: Autor (2023).

Os dados dos índices pluviométricos analisados por Junior (2018) compreendem o período de 1999 a 2016 e são apresentados na Tabela 4 com a pluviometria média mensal histórica e temperatura média mensal histórica.

Tabela 4 - Pluviometria e temperatura média mensal histórica da estação pluviométrica automática de Novo Repartimento. T (ºC) – Temperatura; P (mm) – Pluviometria.

Meses	T (ºC)	P (mm)
Jan	26,04	294,3
Fev	25,94	357,1
Mar	26,19	425,9
Abr	26,41	354,3
Mai	26,72	244,3
Jun	26,50	78,3
Jul	26,37	28,1
Ago	26,51	16,2
Set	27,09	17,2
Out	27,58	49,1
Nov	26,82	94,6
Dez	26,55	173,3

Fonte: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2017) *Apud* Junior (2018)

3.2 Consumo de água do Cacau

Para a determinação do balanço hídrico, com base na necessidade do consumo de água da cultura de cacau, adotou-se o postulado por Silva (2020), que avaliou a demanda hídrica do cacaueiro irrigado e conduzido a pleno sol em Cruz das Almas - BA, no estádio vegetativo inicial, até os 12 primeiros meses de plantio a cultura consome de 0,8 a 1,6 mm/dia. Dos 12 aos 24 meses, demanda de 3,97 a 4,53 mm de água por dia. Deste modo para efeito deste trabalho optou-se por usar o valor médio compreendido entre essa faixa, sendo 4,25 mm/dia/individuo, uma vez que representa a idade de maior produtividade da planta, compreendendo sua fase juvenil.

O volume de água demandada mensalmente para irrigação do plantio nos meses que apresentam deficiência hídrica. O volume mensal de água requerida foi calculado através da equação (Eq. 1) abaixo elaborado pelo próprio autor, sendo função do consumo mensal da cultura, a área de plantio e a quantidade de individuas (plantas) cultivados.

$$V_{adc} = CC \times NI \times A \qquad \text{(Eq. 1)}$$

Em que:

V_{adc} = volume de água requerida para irrigação (m^3);
CC = consumo mensal da cultura (m^3/indivíduo);
NI = número de indivíduos por hectare (indivíduo/hectare)
A = área total da cultura na bacia (ha).

Considerando-se o quantitativo médio de indivíduos por hectare tal como recomendado pela EMBRAPA (2018) para regiões de clima temperado húmido, adotou-se a média de 833 indivíduos/hectare.

3.3 Balanço Hídrico Climatológico

Os dados hidrológicos coletados foram utilizados no cálculo do balanço hídrico normal através da metodologia preconizada por Thornthwaite & Mather (1955).

Galvani (2008) explica que este método é uma maneira de estimar o armazenamento médio de água do solo ao longo do tempo. Partindo-se do suprimento natural de água ao solo, simbolizado pelas chuvas (P), e da demanda atmosférica, simbolizada pela evapotranspiração potencial (ETP), e com uma capacidade de água

disponível (CAD) apropriado, o balanço hídrico climatológico fornece estimativas da evapotranspiração real (ETR), da deficiência hídrica (DEF), do excedente hídrico (EXC) e do armazenamento da água no solo (ARM).

Diferentes métodos podem ser aplica para o cálculo do balanço hídrico. Entre os métodos mais clássicos estão os métodos de Penman-Monteith (1948) e o de Thornthwaite (1948). Muitos trabalhos, em diferentes partes do mundo, vêm avaliando o desempenho dos diferentes métodos (CAMARGO; SENTELHAS, 1996; MACHADO; MATTOS, 2000; MENDONÇA *et al*., 2003; MENDONÇA; DANTAS, 2010). Alves *et al.* (2020) ao comparar os resultados entre esses dois os métodos em seu estudo na região de Santana do Araguaia, concluiu que as estimativas do balanço hídrico tiveram comportamento semelhante. Deste modo, considerando o caráter mais conservador do método Thornthwaite, optou-se por utilizá-lo neste estudo, considerando as suas adaptações e atualizações propostas por Mather (1955) abaixo descrito.

No método modificado de Thornthwaite & Mather (1955) para o cálculo do balanço hídrico se inicia pelo cálculo do valor de ETP através da equação 02:

$$ETP = 16\left(\frac{Ti}{\mathrm{I}}\right)^{a} \qquad \text{Eq. 02}$$

Em que:

ETP = evapotranspiração potencial (mm);

Ti =temperatura média mensal, ºC;

I = índice térmico anual (-);

a = constante que depende do local (-)

Para calcular o valor do índice térmico anual (I), utiliza-se a equação 03:

$$\mathrm{I} = 1{,}049(T_{anual})^{1{,}514} \qquad \text{(Eq. 03)}$$

Em que:

I = índice térmico anual (-);

T_{anual} = temperatura média anual.

O cálculo do valor da constante “a” que depende do local, é dado pela equação 04:

$$a = 6{,}75_{x}10^{-7}\ \mathrm{I}^{3} - 7{,}71_{x}10^{-5}\ \mathrm{I}^{2} + 1{,}792_{x}10^{-2}\ \mathrm{I} + 0{,}49239 \qquad \text{(Eq. 4)}$$

Outro valor de entrada a ser definido é a capacidade de água disponível (CAD), que para a maioria dos solos é definida em função da sua textura. Na região do estudo, onde ocorrem latossolo argiloso, é comumente utilizado em diversos estudos o valor de 100 a 120 mm. (LOBATO *et al*., 2018; AMARAL *et al*., 2014; DIAS *et al*., 2013; PONTES *et al*., 2013). Deste modo optou-se por utilizar o valor de CAD de 100 mm neste estudo a fim de obter resultados mais conservadores em um *worst case.*

A evapotranspiração real (ETR) é obtida pela equação 05 e 06:

Se (P – ETP) >= 0 ETR=ETP (Eq. 05)

Se (P-ETP) < 0 ETR = P – ALT (Eq. 06)

Onde ALT é "Alteração de umidade no solo" e é dado pela equação 07:

$$ALT = ARM_i - ARM_{i-1} \quad \text{(Eq. 07)}$$

Em que:

ARM = Armazenamento de água no solo.

Para calcular o valor do Armazenamento de água no solo, faz necessário primeiramente verificar os valores de Negativo acumulado (NegAc) da precipitação da seguinte maneira:

a) Para a estação seca tem-se a equação 08 e 09:

Se P -ETP >= 0 NegAc = 0 (Eq. 08)

Se P – ETP < 0 $NegAc = NegAc_{i-1} + (P\text{-}ETP)$ (Eq. 09)

b) Para estação chuvosa utiliza-se a equação 10:

$$NegAc = CAD\ In\left(\frac{ARM}{CAD}\right) \quad \text{(Eq. 10)}$$

O ARM então é calculado pela seguinte condição:

a) Estação seca utilizando-se as equações 11 e 12 abaixo:

Se NegAc = 0 ARM = CAD (Eq. 11)

Se NegAc < 0 $ARM = CAD\ e^{(NegAc/CAD)}$ (Eq. 12)

b) Estação chuvosa através da equação 13:

$$ARM_i = ARM_{i-1} + (P\text{-}ETP)_i \quad \text{(Eq. 13)}$$

A Evapotranspiração da Cultura (ETC) pode ser calculada multiplicando-se o valor da ETR pelo coeficiente da cultura (Kc) através da equação 14 considerando o valor de Kc como 0,94, conforme indicado por Silva (2020).

$$ETC = ETR \times Kc \qquad \text{(Eq. 14)}$$

Finalmente pode-se calcular o Déficit hídrico (DEF) e o Excedente hídrico (EXC), respectivamente pelas equações 15 e 16:

$$DEF = ETP - ETR \qquad \text{(Eq. 15)}$$

$$EXC = (P - ETP) - ALT \text{ (Apenas quando (P-ETP) > 0 e ARM = CAD)} \qquad \text{(Eq. 16)}$$

Todo o equacionamento apresentado foi realizando utilizando a macro desenvolvido no programa Excel™ conforme metodologia apresentada por Rolim *et al.* (1998) (Anexo 1). Na contabilidade hídrica, considerou-se a chuva como o único suprimento de água naturalmente disponível para a cultura.

Desta maneira, o processo contábil sequencial mensal, permitiu estimar o armazenamento de água no solo (ARM_i), a evapotranspiração potencial (ETP), evapotranspiração real (ETR), a deficiência hídrica (DEF) e o excedente hídrico (EXC), sendo nestes dois últimos produtos em que se concentram as análises deste trabalho.

3.4 Delimitação da área de contribuição

O uso do geoprocessamento, aplicado às informações climáticas e geográficas em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG), é uma importante ferramenta para a agricultura, bem como para a engenharia, possibilitando a tomada de decisões mais confiável impactando positivamente nas práticas sustentáveis da produção e a diminuição dos impactos pós-exploração (CASSOL e FLEIG, 2014).

Tais ferramentas, portanto, foram empregadas neste estudo objetivando acurar informações relevantes para a delimitação da bacia hidrográfica a partir do georreferenciamento dos dados hidrológicos, geomorfológicos e geológicos.

Para delimitação da bacia hidrográfica e identificação das áreas de contribuição destas, utiliza-se dados de altimetria, provenientes do *Shuttle Radar TopographyMission* - SRTM (RABUS *et al.*, 2003), processados e disponibilizados pela Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais Brasileira no seguinte endereço eletrônico: https://cprm.gov.br/.

Também utilizou-se os dados de drenagem e de bacias obtidos junto a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), por meio do seguinte endereço: http://www.ana.gov.br. Base de dados digital disponibilizadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), composta por arquivos da Carta Internacional ao Milionésimo (1:1.000.000) obtida no seguinte endereço: http://www.ibge.gov.br, além de dados de hidrografia disponibilizados pela Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Sustentabilidade do Pará (SEMAS-PA).

O processamento e análise destes dados foi realizado pelo software QGis v. 3.16, com auxílio das extensões *SpatialAnalyst e ArcHydro Tools* 9.0.

O programa *ArcHydro Tools* gera uma matriz com a delimitação das microbacias na área, utilizando as matrizes com a direção de fluxo e com a segmentação da rede de drenagem. Em seguida são vetorizadas as linhas de drenagem e das microbacias que estavam no formato matricial.

O software QGis também foi utilizado na elaboração de mapas apresentados neste trabalho, como o mapa geológico produzido a partir de dados da CPRM disponibilizados na plataforma Geobank, a partir da qual foram obtidos os dados de espacialização das unidades geológicas existentes na região deste estudo.

3.5 Dimensionamento do barramento

Para se determinar as características do barramento foram definidas algumas premissas como: volume de reservatório, determinado a partir do balanço hídrico identificado através dos dados obtidos nas análises de hidrologia, à dados de topografia, altimetria e nas características geológicas da localidade.

3.5.1 Dimensionamento hidráulico

Nesta etapa foi realizado o dimensionamento da vazão de projeto a ser considerada para o barramento. Uma vez conhecida e delimitada a área da bacia de hidrográfica de contribuição parte-se para o cálculo do tempo de concentração (equação 17) que é uma função da equação de Vem Te Chow (indicada para aplicação em bacias com área de contribuição de até 25 km^2).

$$Tc = 5{,}77\left(\frac{L}{\sqrt{S_0}}\right)^{0{,}64} \qquad \text{(Eq. 17)}$$

Onde:

Tc = Tempo de contração, em minutos;

L = Comprimento do talvegue ou curso d'água principal, em km;

S_0 = Declividade média do talvegue, em m/m;

Na sequência faz-se necessário conhecer a intensidade de precipitação calculada pela equação 18, a depender do tempo de retorno, que é definido pelo tipo de obra, tempo de duração de chuvas, e os parâmetros da curva de intensidade-duração-frequência (IDF) do local.

$$\mathrm{i} = \frac{k\,T^{a}}{(b+t)^{c}} \qquad \text{(Eq. 18)}$$

Onde:

i = Intensidade de precipitação, em mm/h

T = Tempo de retorno, em anos

t = Tempo de duração da precipitação, em minutos

k, a, b, c = Parâmetros da equação

Finalmente a vazão de projeto pode ser obtida através do Método Racional Modificado (Eq. 19), bastante utilizado em estudos hidrológicos, que de acordo com Gomes (2017) apresenta resultados próximos aos obtidos por outro método de cálculo de vazão de McMaath e Burkli-Ziegler.

$$\mathrm{Q} = \frac{C\,i\,A}{360}\,\varphi \qquad \text{(Eq. 19)}$$

Onde:

Q = Vazão máxima de escoamento superficial, em m^3/s

C = Coeficiente de escoamento superficial, adimensional

i = Intensidade de precipitação, em mm/h

A = área da bacia de contribuição, em há

φ = Coeficiente de retardamento do escoamento, dado por: 0,278 – 0,0000034ª

A determinação das equações IDF por meio de dados pluviográficos apresenta grande dificuldade em razão da baixa densidade de pontos de coleta, do pequeno período

de observações normalmente disponíveis ou mesmo ausência deste tipo informação, como ocorre para estação pluviométrica de Novo Repartimento.

Uma alternativa para a estimativa dessas equações é a utilização de dados pluviométricos através da utilização de metodologias que empregam coeficientes para transformar chuva de 24 h, em chuvas de menor duração.

Dentre as metodologias possíveis destaca-se a desagregação de chuvas de 24 h com os coeficientes propostos pelo DAEE-CETESB/SP(1980) para intensidades máximas de precipitação. Nesta sistemática, as durações de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 60, 360, 480, 600, 720 e 1440 minutos foram utilizadas pelo emprego dos coeficientes multiplicativos, conforme apresentados na Tabela 5, permitindo desta forma a geração de pontos suficientes para definir as curvas de intensidade-duração referentes a diferentes períodos de retorno.

Tabela 5 - Coeficiente de desagregação da chuva de 24 h de duração

Duração	Coeficiente	Duração	Coeficiente
24 h 24 h^{-1}	1,14	30 min 24 h^{-1}	0,74
12 h 24 h^{-1}	0,85	25 min 24 h^{-1}	0,91
10 h 24 h^{-1}	0,82	20 min 24 h^{-1}	0,81
8 h 24 h^{-1}	0,78	15 min 24 h^{-1}	0,70
6 h 24 h^{-1}	0,72	10 min 24 h^{-1}	0,54
1 h 24 h^{-1}	0,42	5 min 24 h^{-1}	0,34

Fonte: DAEE/CETESB (1980)

O modelo de distribuição de probabilidades de Gumbel utilizado para o cálculo anual das precipitações máximas diárias foi ajustado através da equação 20, conforme Pinto (1995):

$$Y_{TR} = -\ln\left[-\ln\left(1 - \frac{1}{TR}\right)\right]$$

$$K_{TR} = -0{,}45 + 0{,}78 \times Y_{TR}$$

$$X_{TR} = \bar{X} + K_{TR} \times S \qquad \text{(Eq. 20)}$$

Onde:

YTR: Variável reduzida da distribuição de Gumbel.

TR : Período de retorno em anos.

XTR: Precipitação máxima diária para um determinado TR em mm.

KTR: Fator de frequência, adimensional.

X : Média da precipitação máxima diária em mm.

S : Desvio padrão dos dados de precipitação máxima diária em mm.

3.5.2 Dimensionamento geotécnico e estrutural

A altura da lâmina d'água ou profundidade do reservatório é definida em função do volume mínimo de água a ser armazenado e a partir do levantamento topográfico da bacia de reservação podendo ser calcula pela equação 21.

$$V = \left(\frac{An+A(n+1)}{2}\right) h \quad \mathrm{V} = \left(\frac{\mathrm{An+A(n+1)}}{2}\right) \mathrm{h} \qquad \text{(Eq. 21)}$$

Onde:

Vp é o Volume parcial da seção, em m³;

An é a área da seção da cota n, em m²;

A(n+1) é a área da seção da cota n+1, em m²; e

h é a altura entre a cota n e n+1, em m;

A altura do aterro, calculada pela equação 22, é função da altura da lâmina d'água acumulada, da altura máxima de água no extravasor, e da altura de borda livre.

$$H = hn + he + bl \qquad \text{(Eq. 22)}$$

Onde:

H é a altura do aterro, em m;

hn é a altura ou profundidade da lâmina d'água na barragem, em m;

he é a altura da lâmina d'água máxima no extravasor, em m; e

bl é a altura de folga da barragem, em m;

Para pequenos barramentos pode-se adotar a altura do extravasor indicada na Tabela 6.

Tabela 6 – Alturas de extravasor a serem adotadas em função da altura da barragem

Altura da barragem (m)	**Altura de água no extravasor (m)**
Até 5	de 0,7 a 0,8
Entre 5 e 10	de 0,8 a 1,5

Fonte: Lopes & Lima (2008).

A crista da barragem pode ser calculada pela equação 23. Para o uso do aterro como estrada, a crista deve possuir largura mínima de 6,00 m, conforme Carvalho (2008).

$$C = \frac{H}{5} + 3 \qquad \text{(Eq. 23)}$$

Onde:

C a largura da crista, em m; e

H a altura total da barragem, em m.

As inclinações dos taludes do aterro podem ser determinadas a partir da Tabela 7, considerado a utilização de um solo genérico, a ser definido em premissa de projeto, devendo ser verificado no caso concreto, através de ensaios laboratoriais de caracterização de solo.

Tabela 7 – Inclinação dos taludes em função do material e altura do aterro da barragem

Material do aterro	**Até 5,0 m**		**De 5,1 m a 10,0 m**	
	Montante	Jusante	Montante	Jusante
Argiloso	2,00:1	1,75:1	2,75:1	2,25:1
Areno-siltoso/argiloso	2,25:1	2,00:1	3,00:1	2,25:1
Geral	2,50:1	2,00:1	2,50:1	2,00:1

Fonte: Matos, Silva, Pruski (2012)

Definida a inclinação dos taludes torna-se possível determinar a largura da base do aterro por meio da equação 24.

$$B = C + (Z1 + Z2)\, H \qquad \text{(Eq. 24)}$$

Onde:

B a largura da base, em m;

C a largura da crista da barragem, em m;

Z1 a inclina o do talude de montante, em m/m;

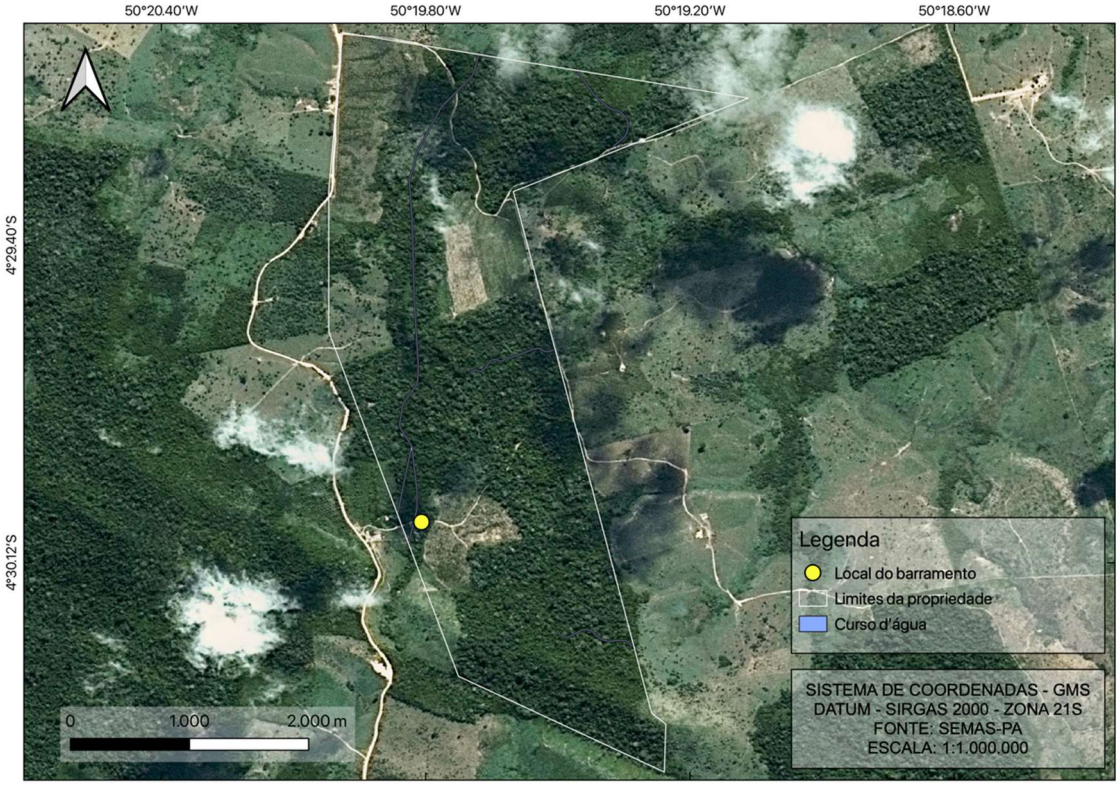
Z2 a inclina o do talude de jusante, em m/m; e

H a altura total da barragem, em m.

3.6 Estudo de Caso da Fazenda Corona

A Fazenda Corona, situada no município de Novo Repartimento, mas especificamente nas coordenadas Lat. 04º23’25,9’’ Long. 050º20’01,3’’ (SIRGAS 2000, Zona: 21S) e tem entre as suas principais atividades agrícolas o plantio de Cacau. O cultivo agrícola de cacau, ocorre em uma área de aproximadamente 55 hectares (550.000 m²) mostrada no mapa abaixo da figura 9.

Figura 9 – Imagem de satelite abrangendo a área da propriedade Fazenda Corona



Fonte: Autor (2022).

A planta atual de beneficiamento da fazenda é bastante simples, praticamente sem planejamento, ou seja, sendo construída de acordo com a necessidade por meio de tentativa e erro, o resultado é uma planta sem uma fluidez de produção engajada e sem possibilidade de expansão.

Todavia a produção de amêndoas de cacau na fazenda Corona tem apresentado alto potencial de crescimento, o que é indicado pelas safras de 2017 e 2018, com 45 e 55 toneladas de produção respectivamente (ALMEIDA, 2019), tendo um aumento em 10 toneladas de cacau seco no intervalo de 1 ano.

A produção máxima da fazenda deve ocorrer no ano de 2022, quando a fazenda produzirá cerca de 100 toneladas de cacau fino, o que se deve ao fato de mudas jovens chegarem na idade de produção dos pés regulares (ALMEIDA, 2019).

Atualmente a fonte disponível de água para o plantio é apenas aquela ofertada naturalmente pela precipitação das chuvas, que se limita a uma abundância apenas durante cerca de 5 meses do ano, limitando assim, a produção da fazenda.

Face a esta realidade, viu-se a oportunidade de introduzir nova fonte de água que permita a irrigação controlada e contínua ao longo do ano, possibilitando o cultivo perene do Cacau na Fazenda Corona.

Para isto, foi identificada na fazenda uma área que pudesse receber um barramento afim de formar um reservatório artificial para a concentração da água necessária para a irrigação, mostrada no mapa da figura 9 apresentada anteriormente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Balanço Hídrico

A parir dos dados pluviométricos utilizados pode-se notar que a pluviometria média máxima mensal da localidade foi 425,9 mm no mês fevereiro, e a temperatura média mensal máxima ocorreu em outubro atingindo 27,58 ºC. A pluviometria média mínima mensal, por sua vez, foi de 15,8 mm no mês de agosto. Já a temperatura média mensal foi menor em fevereiro com 25,94 ºC.

Os dados climatológicos obtidos foram utilizados para determinar o balanço hídrico da localidade através do método proposto por Thornthwaite & Mather (1955) permitindo a obtenção de todos os elementos do balanço hídrico para as condicções climatológicas obtidas para a localidade (Tabela 8), possibilitando, assim, visualizar aspectos climáticos importantes na produtividade agrícola.

Entre os meses de dezembro e maio a pluviometria variou entre 174,1mm e 425,9 mm, período em que as chuvas excederam a evapotranspiração potencial em 1.054,0 mm

produzindo um excedente hídrico de 954,0 mm entre janeiro a maio. Os déficits hídricos e as retiradas de água no solo foram registrados de junho a novembro com totais mensais de deficiência de 465 mm. As reposições hídricas foram registradas em dezembro, quando não houve excedente, mas também não houve déficit.

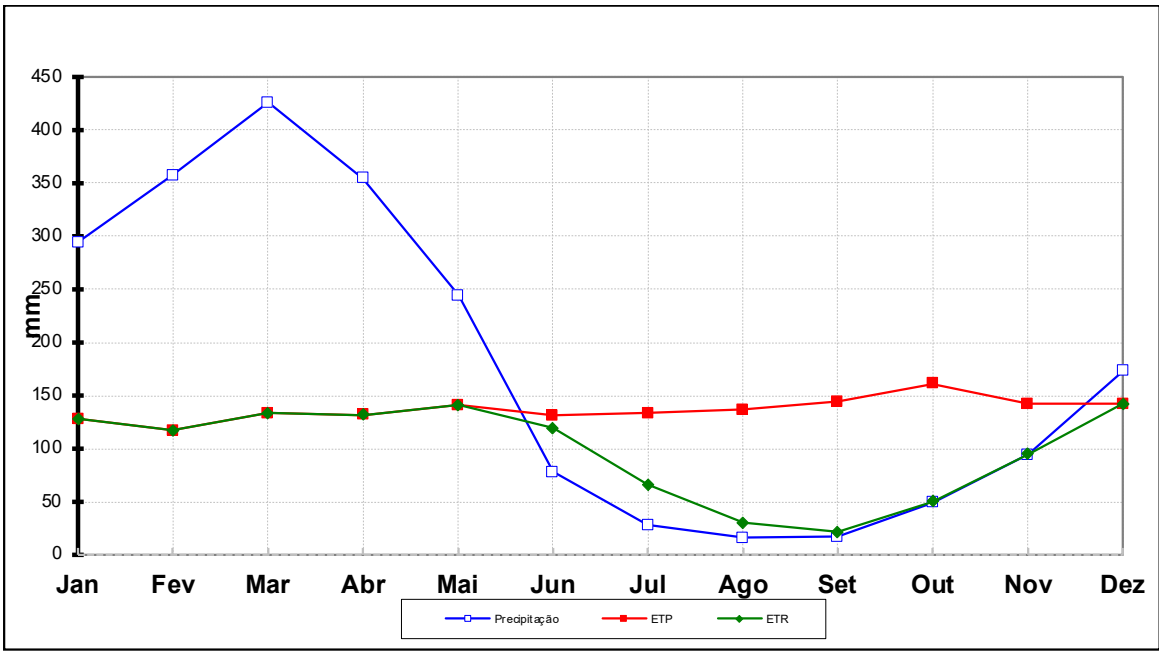
Tabela 8 – Elementos calculados através do balanço hídrico pelo método de Thornthwaite & Mather (1955). ETP – Evapotranspiração, P – Precipitação, NEG - Negativo acumulado, ARM - Armazenamento de água, ALT – Alteração de umidade no solo, ETR – Evapotranspiração de referencia, DEF – Déficit Hídrico, EXC – Excedente Hídrico.

Mês	ETP	P-ETP mm	NEG-AC	ARM mm	ALT mm	ETR mm	DEF mm	EXC mm
Jan	128,06	166,2	0,0	100,00	68,52	128,1	0,0	97,7
Fev	117,21	239,9	0,0	100,00	0,00	117,2	0,0	239,9
Mar	133,43	292,5	0,0	100,00	0,00	133,4	0,0	292,5
Abr	131,96	222,3	0,0	100,00	0,00	132,0	0,0	222,3
Mai	141,09	103,2	0,0	100,00	0,00	141,1	0,0	103,2
Jun	131,43	-53,1	-53,1	58,78	-41,22	119,5	11,9	0,0
Jul	133,25	-105,2	-158,3	20,54	-38,24	66,3	66,9	0,0
Ago	136,52	-120,3	-278,6	6,17	-14,37	30,6	105,9	0,0
Set	144,54	-127,3	-405,9	1,73	-4,44	21,6	122,9	0,0
Out	161,31	-112,2	-518,2	0,56	-1,16	50,3	111,0	0,0
Nov	141,97	-47,4	-565,5	0,35	-0,21	94,8	47,2	0,0
Dez	142,17	31,1	-115,6	31,48	31,13	142,2	0,0	0,0

Fonte: Autor, 2023

A figura 10 apresenta o balanço hídrico partir dos dados calculados acima (Tabela 5) onde verificou-se que para a cultura do cacau na localidade estudada ocorre

Figura 10: Relação do Balanço hídrico da localidade para precipitação, evapotranspiração potencial e evapotranspiração real



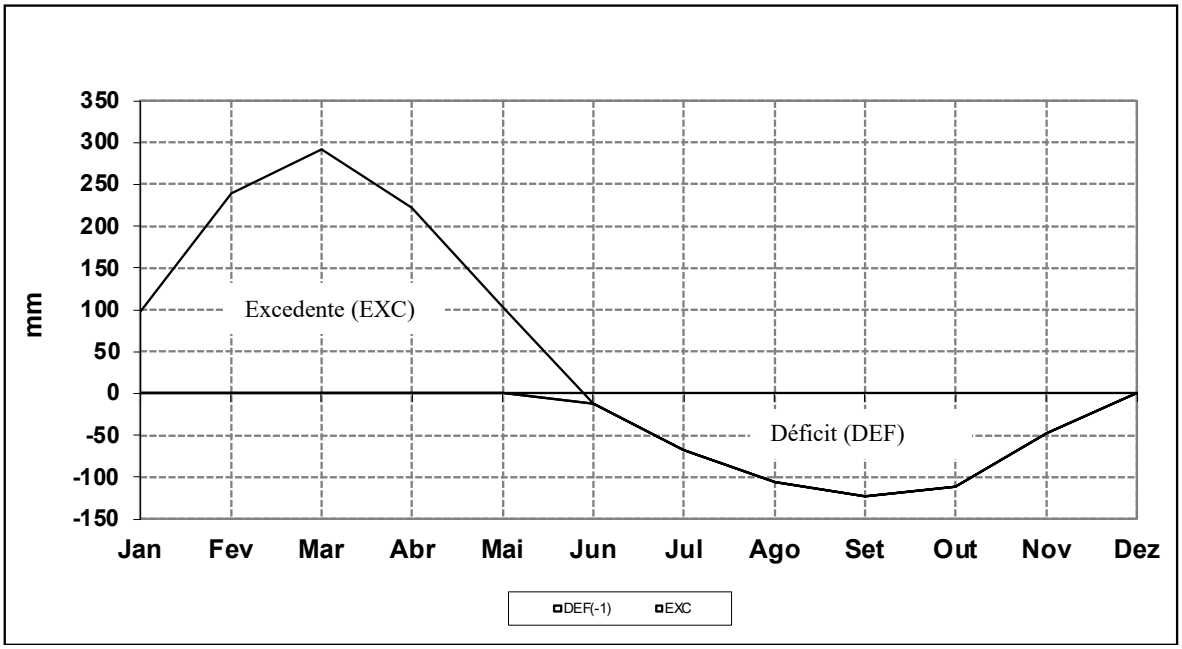
Fonte: Autor (2023)

um estresse hídrico durante o período compreendido entre os meses de junho a novembro, observado pelos valores de evapotranspiração real inferiores aos da evapotranspiração potencial, que representam meses de baixa produtividade da lavoura, ocasionados pela diminuição da precipitação no período estando abaixo do ideal para manutenção do consumo da cultura.

O pico da evapotranspiração real ocorre em maio, sendo que a evapotranspiração potencial indica que esta deveria ocorrer em outubro, época em que tem-se maiores valores de temperatura, e consequentemente umidade relativa do ar mais baixa, assim como, maior radiação solar, o que provavelmente eleva a taxa de evapotranspiração de referência, todavia o comportamento que se observa está relacionado a deficiência hídrica natural deste período ocasionado pela estiagem das chuvas que caracteriza o período seco da região.

O balanço hídrico é utilizado para realizar o acompanhamento do armazenamento de água no solo, devendo este ser mantido em níveis ótimos para maximizar a produtividade agrícola (REICHARDT, 1990). Por meio do balanço hídrico é possível estabelecer critérios para a irrigação e o planejamento agrícola de uma região, pelo qual se observa neste caso, que no período entre junho e novembro ocorre um déficit hídrico (Figura 11) havendo a necessidade de realizar a reposição de água no solo.

Figura 11: Extrato do Balanço hídrico da localidade



Fonte: Autor (2023)

4.2 Volume de água demandada para irrigação

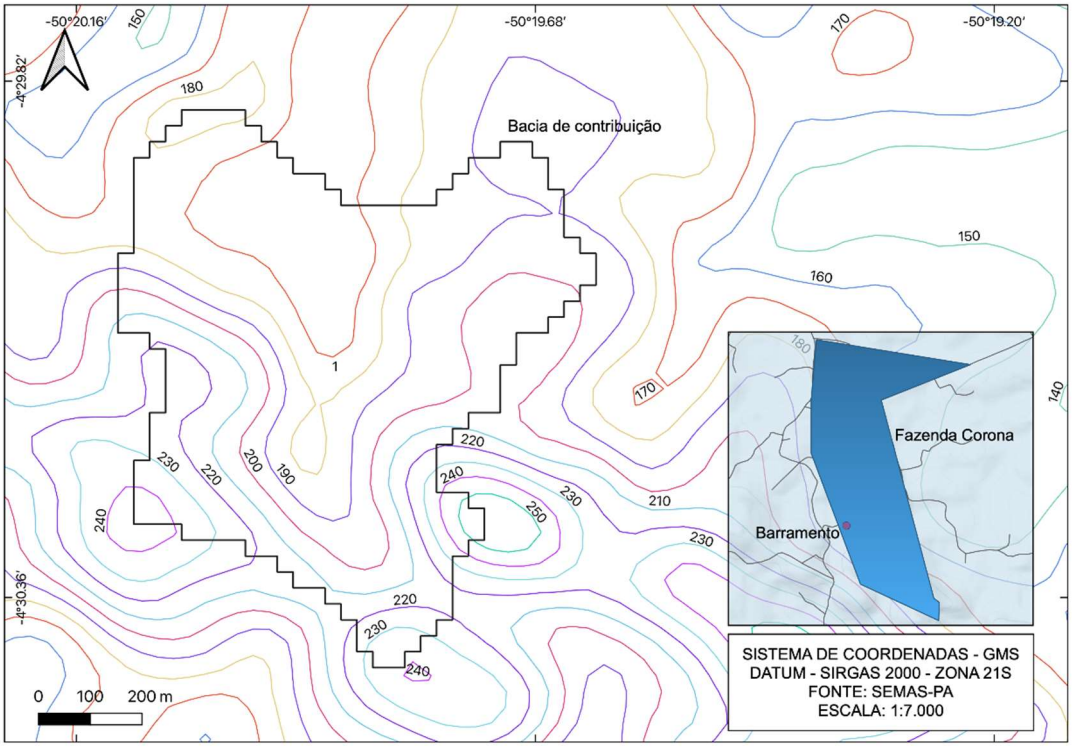
O volume mensal de água requerida pela cultura de cacau foi calculado considerando-se o consumo médio de um cacaueiro sendo de 42,5 litros/individuo. Deste modo o consumo mensal por hectare de uma plantação de cacau é 1.062 m³/mês. Portanto para a fazenda coroca, com 55 hectares de plantação tem-se um consumo médio de 58.414 m³/mês. Finalmente, o volume de água necessário a cultura durante os meses de junho a novembro foi obtido pela fórmula 1, sendo este: 350.484,00 m^3.

A partir da determinação do balanço hídrico nos meses de menor intensidade de precipitação, tem-se um aporte de água de chuvas de aproximadamente 140.250 m^2. Logo, a quantidade de água a ser utilizada na irrigação será de 210.234 m^2.

4.3 Delimitação da área de contribuição

A área de contribuição foi calculada com base nos dados planialtimétricos extraídos de imagens SRTM. A Figura 12 ilustra a área de contribuição obtida,

Figura 12 – Microbacia de contribuição das proximidades do barramento.



Fonte: Autor (2023).

considerando como limite o centroide do dique de fechamento, localizado no ponto exultório do talvegue, abrangendo um total de 59,40 Ha.

4.4 Dimensionamento hidráulico

Os valores desagregados dos totais anuais de precipitação máxima diária segundo diversos valores de duração da precipitação estão apresentados na Tabela 10.

Os dados de precipitação máxima foram ajustados ao modelo de distribuição de Gumbel, onde para cada série de duração de chuva foram estimadas as chuvas máximas para períodos de retorno de 5, 10, 25, 50, 100, 200, 500, 1.000, 2000, 5000 e 10.000 anos e são apresentados na Tabela 11 com os valores das alturas de precipitação máxima em mm para diversas recorrências e durações da precipitação.

Da mesma forma, na Tabela 12, são apresentados os valores das intensidades de precipitação em mm/hora, segundo diversas recorrências e durações da precipitação.

As curvas de Intensidade x Duração x Frequência, obtidas a partir da série histórica de dados pluviométricos da estação de Novo Repartimento operada pela Agência Nacional de Águas - ANA e que dispõem de um período observado de 20 anos está apresentada a seguir.

Após a conversão das precipitações em intensidades de chuva, foram obtidos os parâmetros da curva IDF, dada pela equação 16.

Para a geração dos hidrogramas de cheia os quantis de chuva obtidos foram discretizados pelo método de Huff (1967) (Tabela 13), utilizando-se as curvas do segundo quartil com 50% de probabilidade de ocorrência (Figura 13).

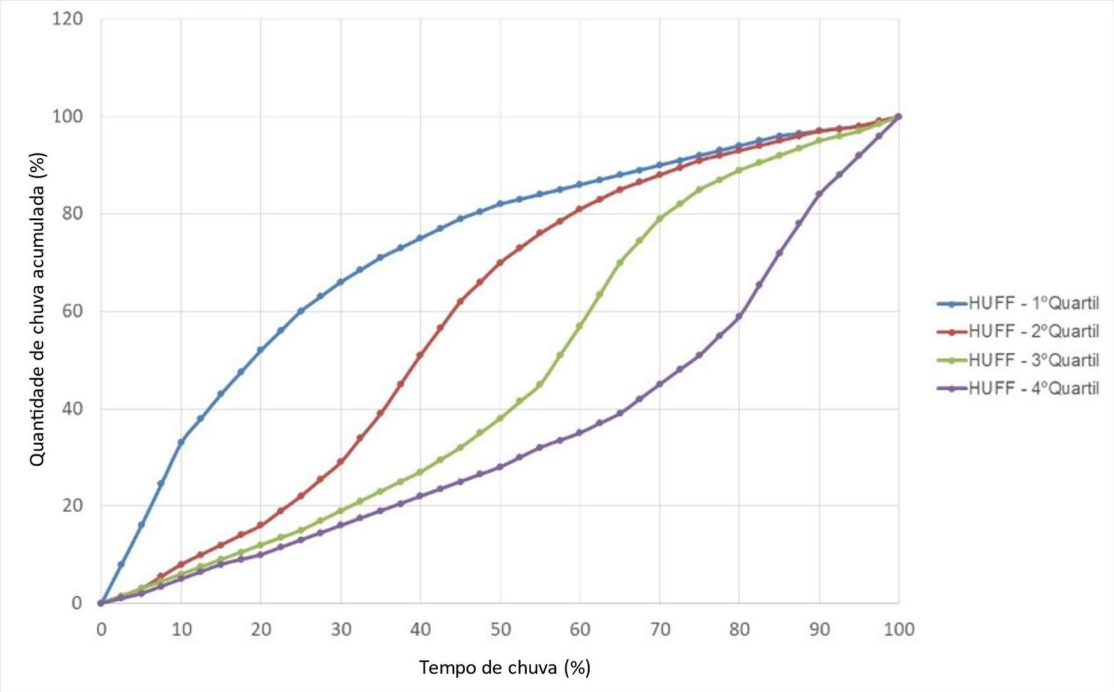
Na composição da chuva de projeto considerou-se o total precipitado de 373,47 mm referente à um evento chuvoso com período de retorno de 10.000 anos e duração de 24 horas, considerando-se as boas práticas de engenharia para barragens.

As análises consideram a distribuição temporal da chuva concentrada mais no início da tormenta adotando-se o hietograma de Huff, formulado com maior intensidade de precipitação centralizada no segundo quartil.

Nesta avaliação, foram consideradas apenas as contribuições por precipitação direta por se tratar de uma avaliação conceitual de projeto. Todavia, importa ressaltar que

para a elaboração de um projeto detalhado deve-se avaliar outras contribuições que possam existir, como por exemplo nascentes de água.

Figura 13 – Quantis de chuva discretizados.



Fonte: Autor (2023).

Tabela 10 - Desagregação da Precipitação Máxima Diária (mm) para Diversas Durações.

n⁰ ordem	Ano	Chuva Diária (mm)	Duração da Chuva											
			24h	12h	10h	8h	6h	1h	30min	25min	20min	15min	10min	5min
1	**2009**	193	220,02	187,02	180,42	171,62	158,41	92,41	68,38	62,23	55,39	47,87	36,93	23,25
2	**2010**	153,7	175,22	148,94	143,68	136,67	126,16	73,59	54,46	49,56	44,11	38,12	29,41	18,52
3	**2000**	152,7	174,08	147,97	142,74	135,78	125,34	73,11	54,1	49,23	43,82	37,87	29,22	18,4
4	**2002**	143,9	164,05	139,44	134,52	127,96	118,11	68,9	50,99	46,4	41,3	35,69	27,53	17,34
5	**1999**	143,7	163,82	139,25	134,33	127,78	117,95	68,8	50,91	46,33	41,24	35,64	27,49	17,31
6	**2013**	140,3	159,94	135,95	131,15	124,75	115,16	67,18	49,71	45,24	40,27	34,8	26,84	16,9
7	**2005**	117,2	133,61	113,57	109,56	104,21	96,2	56,12	41,53	37,79	33,64	29,07	22,42	14,12
8	**2008**	117,2	133,61	113,57	109,56	104,21	96,2	56,12	41,53	37,79	33,64	29,07	22,42	14,12
9	**2001**	113,3	129,16	109,79	105,91	100,75	93	54,25	40,14	36,53	32,52	28,1	21,68	13,65
10	**2015**	103,6	118,1	100,39	96,85	92,12	85,03	49,6	36,71	33,4	29,73	25,69	19,82	12,48
11	**2012**	96,3	109,78	93,31	90,02	85,63	79,04	46,11	34,12	31,05	27,64	23,88	18,42	11,6
12	**2017**	90,7	103,4	87,89	84,79	80,65	74,45	43,43	32,14	29,24	26,03	22,5	17,35	10,93
13	**2003**	87,9	100,21	85,18	82,17	78,16	72,15	42,09	31,14	28,34	25,23	21,8	16,82	10,59
14	**2019**	87,6	99,85	84,68	81,92	77,65	71,83	41,88	31,06	28,24	25,1	21,75	16,8	10,55
15	**2007**	87,3	99,52	84,59	81,61	77,63	71,66	41,8	30,93	28,15	25,05	21,65	16,7	10,52
16	**2006**	87,2	99,41	84,5	81,51	77,54	71,57	41,75	30,9	28,12	25,03	21,63	16,68	10,5
17	**2011**	84,7	96,56	82,07	79,18	75,32	69,52	40,55	30,01	27,31	24,31	21,01	16,21	10,2
18	**2014**	80	91,2	77,52	74,78	71,14	65,66	38,3	28,34	25,79	22,96	19,84	15,31	9,64
19	**2020**	78,2	88,15	74,43	71,89	67,56	62,7	36,81	27,32	24,2	21,6	18,72	14,23	9,1
20	**2016**	72,6	82,76	70,35	67,87	64,56	59,59	34,76	25,72	23,41	20,84	18,01	13,89	8,75
21	**2018**	52,6	59,96	50,97	49,17	46,77	43,17	25,18	18,64	16,96	15,1	13,05	10,06	6,34
22	**2004**	39	44,46	37,79	36,46	34,68	32,01	18,67	13,82	12,57	11,19	9,67	7,46	4,7
Média	**119,15**	**101,28**	**97,70**	**92,94**	**85,79**	**50,04**	**37,03**	**33,70**	**30,00**	**25,92**	**20,00**	**12,59**	**119,15**	**101,28**
Desv Pad.	**37,78**	**32,11**	**30,98**	**29,47**	**27,20**	**15,87**	**11,74**	**10,69**	**9,51**	**8,22**	**6,34**	**3,99**	**37,78**	**32,11**

Fonte: Autor, 2023.

Tabela 11 – Estimativa de chuvas máximas para períodos de retorno- de 2,33 a 10.000 anos.

Período de Retorno (ano)	Fator de Freq.	Total Pluviométrico											
		24h	12h	10h	8h	6h	1h	30min	25min	20min	15min	10min	5min
2,33	0,00	119,19	101,32	97,74	92,97	85,82	50,06	37,05	33,71	30,01	25,93	20,00	12,60
5	0,72	146,34	124,39	120,00	114,14	105,36	61,46	45,48	41,39	36,84	31,84	24,56	15,46
10	1,30	168,44	143,18	138,12	131,39	121,28	70,75	52,35	47,64	42,41	36,65	28,27	17,80
25	2,04	196,38	166,92	161,03	153,17	141,39	82,48	61,03	55,54	49,44	42,72	32,96	20,75
50	2,59	217,10	184,53	178,02	169,34	156,31	91,18	67,47	61,40	54,65	47,23	36,44	22,94
100	3,14	237,67	202,02	194,89	185,38	171,12	99,82	73,87	67,22	59,83	51,71	39,89	25,11
200	3,68	258,16	219,43	211,69	201,36	185,87	108,43	80,24	73,01	64,99	56,16	43,33	27,28
500	4,39	285,20	242,42	233,86	222,45	205,34	119,78	88,64	80,66	71,80	62,05	47,86	30,14
1000	4,94	305,63	259,79	250,62	238,39	220,05	128,36	94,99	86,44	76,94	66,49	51,29	32,30
2000	5,48	326,06	277,15	267,37	254,32	234,76	136,94	101,34	92,22	82,08	70,94	54,72	34,46
5000	6,19	353,05	300,10	289,50	275,38	254,20	148,28	109,73	99,85	88,88	76,81	59,25	37,31
10000	6,73	373,47	317,45	306,25	291,31	268,90	156,86	116,08	105,63	94,02	81,25	62,68	39,47

Fonte: Autor (2023).

Tabela 12 - Intensidade de Precipitação Máxima (mm/hora) para Diversas Recorrências e Durações

Período de Retorno (ano)	Fator de Freq.	Duração da Chuva											
		24h	**12h**	**10h**	**8h**	**6h**	**1h**	**30min**	**25min**	**20min**	**15min**	**10min**	**5min**
2,33	**0,00**	4,97	8,44	9,77	11,62	14,30	50,06	74,09	80,91	90,02	103,73	120,03	151,15
5	**0,72**	6,10	10,37	12,00	14,27	17,56	61,46	90,96	99,33	110,52	127,35	147,36	185,56
10	**1,30**	7,02	11,93	13,81	16,42	20,21	70,75	104,70	114,34	127,22	146,59	169,62	213,60
25	**2,04**	8,18	13,91	16,10	19,15	23,57	82,48	122,07	133,30	148,31	170,89	197,75	249,02
50	**2,59**	9,05	15,38	17,80	21,17	26,05	91,18	134,95	147,36	163,96	188,93	218,61	275,29
100	**3,14**	9,90	16,83	19,49	23,17	28,52	99,82	147,73	161,32	179,50	206,83	239,33	301,37
200	**3,68**	10,76	18,29	21,17	25,17	30,98	108,43	160,47	175,23	194,97	224,66	259,96	327,36
500	**4,39**	11,88	20,20	23,39	27,81	34,22	119,78	177,28	193,59	215,39	248,19	287,19	361,65
1000	**4,94**	12,73	21,65	25,06	29,80	36,68	128,36	189,98	207,46	230,83	265,97	307,77	387,56
2000	**5,48**	13,59	23,10	26,74	31,79	39,13	136,94	202,68	221,32	246,25	283,75	328,34	413,46
5000	**6,19**	14,71	25,01	28,95	34,42	42,37	148,28	219,46	239,65	266,64	307,24	355,52	447,69
10000	**6,73**	15,56	26,45	30,62	36,41	44,82	156,86	232,15	253,51	282,06	325,01	376,09	473,59

Fonte: Autor (2023).

Tabela 13 - Hidrogramas de cheia consideram a distribuição temporal da chuva

% Chuva	% Chuva acumulada			
	QI	QII	QIII	QIV
0	0	0	0	0
5	16	3	3	2
10	33	8	6	5
15	43	12	9	8
20	52	16	12	10
25	60	22	15	13
30	66	29	19	16
35	71	39	23	19
40	75	51	27	22
45	79	62	32	25
50	82	70	38	28
55	84	76	45	32
60	86	81	57	35
65	88	85	70	39
70	90	88	79	45
75	92	91	85	51
80	94	93	89	59
85	96	95	92	72
90	97	97	95	84
95	98	98	97	92
100	100	100	100	100

Fonte: Autor (2023).

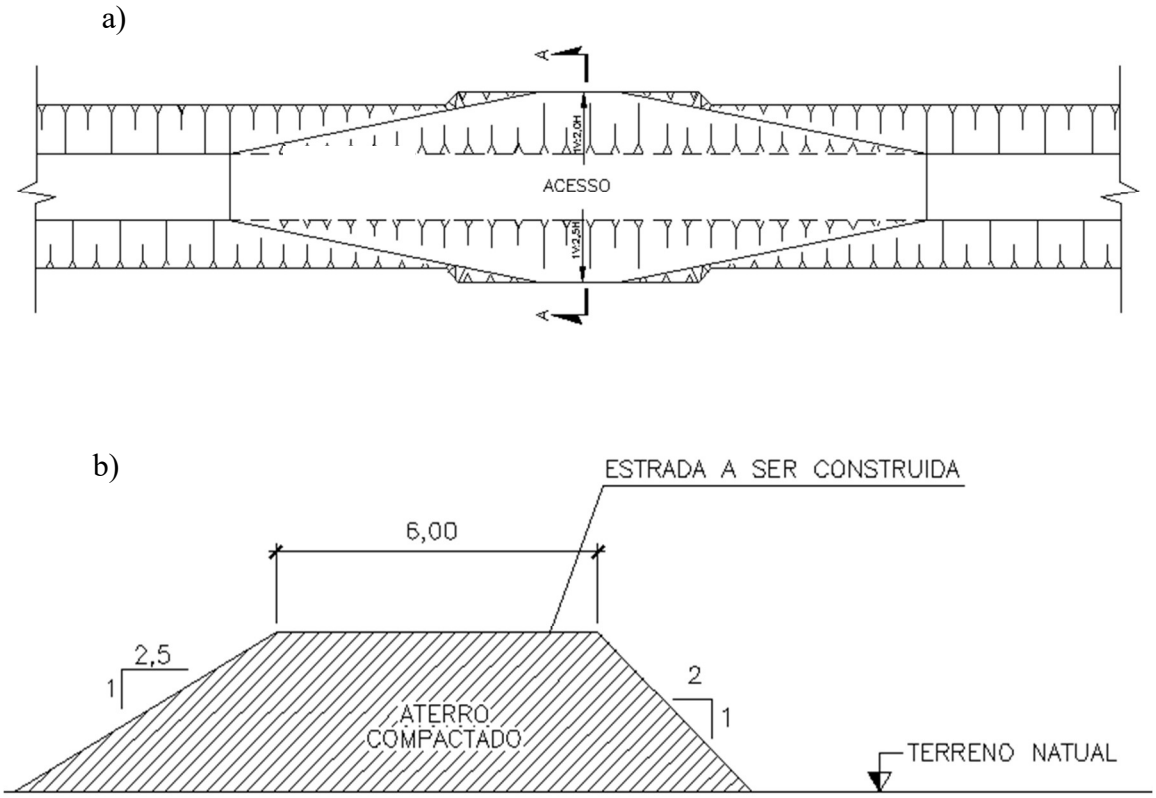
4.5 Dimensionamento geotécnico

A seguir são apresentadas as características geotécnicas da estrutura projetada (Figura 13a) contemplando a definição da seção típica, características do sistema de drenagem interna e instrumentação de monitoramento. Deste modo, a construção do barramento deverá atender as especificações construtivas apresentadas a seguir.

Inicialmente recomenda-se uma limpeza superficial do terreno, de modo a seguir o critério de remoção dos materiais superficiais porosos existente no terreno, com o intuito de evitar percolações e gradientes hidráulicos indesejáveis na fundação, o que poderia resultar em aumento da vazão de infiltração e ocorrência de erosão regressiva.

A seção típica do barramento consiste em solo argiloso compactado de forma homogênea (Figura 14b). Considerado o volume adicional exigido pela cultura de cacau em um ciclo completo, pode-se adotar a altura do reservatório como 4,0 metros, este a ser construindo em aterro de solo compactado.

Figura 14 – a) Vista em planta do barramento projeto b) Seção simplificada do barramento projetado com detalhe à inclinação dos taludes de montante e jusante.

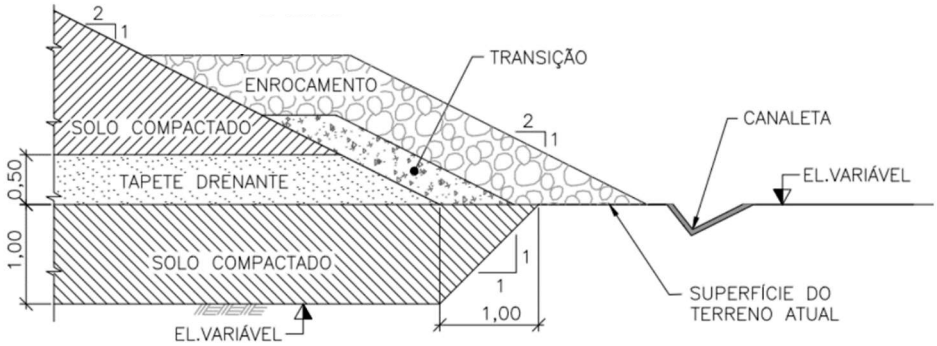


Fonte: Autor (2023).

Na fundação deve-se aplicar uma camada horizontal de areia média a grossa com 0,50 m de espessura para atuação na drenagem interna da estrutura, operando como tapete drenante, objetivando aliviar a poropressão e consequentemente, garantido maior estabilidade. Dada a altura pouco acentuada do barramento, não se adotará filtro vertical. Deverá ser implantado ainda uma canaleta no pé do dique para condução e dissipação no terreno, do fluxo de água coletada na saída do dreno horizontal após o enrocamento. A Figura 15 a seguir apresenta o detalhamento da drenagem interna projetada.

Na base jusante da estrutura, onde deverá estar locada a saída do dreno horizontal, deve haver uma camada de transição e enrocamento com gradação da granulometria do material, de modo a servir como filtro evitando carreamento de partículas do interior da estrutura.

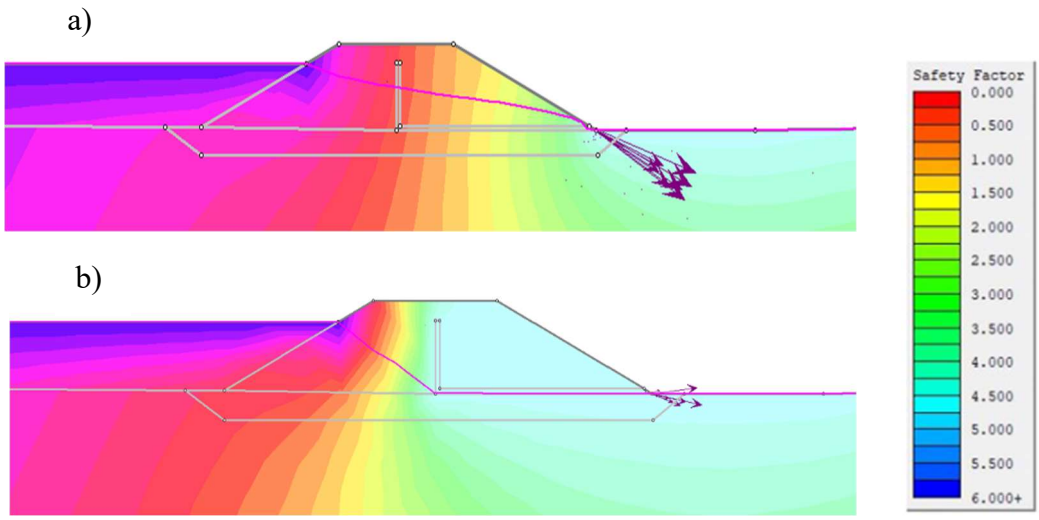
Figura 15 – Seção tipica do barramento projetado com detalhe à drenagem interna.



Fonte: Autor (2023).

A figura 16 abaixo representa o funcionamento e importância da implantação do sistema de drenagem interna, capaz de rebaixar a altura dos níveis piezométricos no interior do dique, aliviar a poropressão que atuam diretamente na diminuição da tensão efetiva e, desta forma, garantir maior estabilidade ao maciço e consequentemente o aumento dos fatores de segurança (fatores de segurança) nas avaliações de estabilidade dos diques.

Figura 16 – Seção típica do barramento projetado. a) Seção com drenagem interna não implantada; b) Seção com drenagem interna em funcionamento, efeito de rebaixamento da linha piezométrica.



Fonte: Autor (2023).

Com a finalidade de proteção superficial da crista do dique, recomenda-se a utilização de uma camada de material granular, compactada com a espessura de 0,15 m. No talude de jusante pode ser aplicado o mesmo material ou proteção vegetal. A crista do dique também

deverá ser recoberta por camada de material granular com espessura 30cm, a qual deverá possuir inclinação de 0,5% para o interior do reservatório, para escoamento superficial.

A altura da lâmina d'água no extravasor, considerando-se pequenos barramentos de até 5 metros, será de 0,80 metros, adicionados 0,20 metros para o amortecimento de águas pluviais totalizando 5 metros de altura para o dique de fechamento na sua seção de maior altura. A largura da crista do aterro deverá ter a dimensão mínima de 6,0 metros de modo a atender a servidão como estrada de acesso.

As inclinações dos taludes do aterro foram estabelecidas utilizando-se um solo genérico, para o qual definiu-se a inclinação na proporção de 2,50V:1,00H na face montante e 2,00V:1,00H na face jusante. Ressalta-se que estes valores são considerados premissas de projeto, devendo ser verificado no caso concreto, os parâmetros geotécnicos através de ensaios laboratoriais de caracterização do solo.

Outro elemento dimensionado foi a largura da base do aterro que é função da largura da base e da declividade dos taludes de jusante e montante. Para o barramento em questão a largura da base mínima a ser considerado é de 28,50 metros, adotando-se a largura da crista de 6,0 metros.

Para garantia da segurança geotecnia dos barramentos foi proposto a implantação de sistema de instrumentação. Os mais comumente empregado em estruturas de barramento são os Piezômetros tipo Casagrande (PZ), manuais; Medidores de Nível de Água (MNA), e Marcos Superficiais (MS) instalados para verificação de movimentações da estrutura.

Os medidores de nível d'água (MNA) serão instalados com o objetivo de medir a posição da linha freática no terreno de fundação e deverão ser instalados no maciço, fundação e ombreiras.

Os piezômetros de Casagrande serão do tipo tubo aberto (PZ) tendo como finalidade medir a pressão da água intersticial de subsuperfície, no maciço de solo compactado e terreno de fundação sob o barramento, devendo ser instalados nas cotas determinadas ou nas camadas de solo ou feições geológicas identificadas nos projetos futuros onde deverá haver detalhamento dessas informações.

Os marcos superficiais têm por objetivo a medição dos deslocamentos superficiais e estão condicionados à medições realizadas a partir de nivelamento topográfico de precisão.

Dado o pequeno porte da barragem os marcos deverão ser monitorados, pelo menos, durante os dois primeiros de vida da barragem ou até que a acomodação estrutural desta seja estabilizada.

As leituras dos instrumentos e análises dos resultados devem ser realizadas regularmente por profissional preparado e treinado, tendo em vista que quando necessário os resultados poderão ser utilizados com os seguintes objetivos:

1. Correlacionar as leituras dos instrumentos com os níveis de operação estabelecidos na Carta de Risco de forma a indicar quais os procedimentos devem ser seguidos;
2. Detectar condições insatisfatórias, relacionadas ao fluxo de água pelos maciços, que não foram possíveis de serem observados pela inspeção visual;
3. Verificar o arranjo e localização dos instrumentos, com as cotas de topo e fundo.

Com relação à periodicidade das leituras, deve ser seguido o especificado no item 13.2.

As leituras ocorrem em períodos menores quando qualquer instrumento apresenta tendência anômala ou quando ocorre algum dos fatores listados a seguir:

1. Nível de atenção/alerta dos instrumentos com base na carta de risco;
2. Condições geotécnicas ou geológicas críticas;
3. Chuva maior que a precipitação máxima aquela definida para a condição de operação normal.

A definição e locação das seções instrumentadas no maciço não foi objeto de estudo deste trabalho e deve ser realizada quando do detalhamento das características geotécnicas dos materiais empregados na construção do maciço, bem como da definição das condições de contorno adotadas para a verificação das condições de estabilidade da estrutura, que contempla, mas não se limita à definição da linha freática, grau de saturação, permeabilidade entre outros.

Para tal, os valores de referência dos níveis de controle devem ser obtidos por meio de análises de estabilidade determinísticas acopladas a análises de percolação, a partir das quais deverão ser simulados diferentes níveis piezométricos/freáticos no interior do maciço, de modo a definir a linha freática correspondente a faixas de valores de fator de segurança (FS) pré-definidas. Dessa forma, será possível estimar qual seria a leitura nos instrumentos instalados para tais condições de estabilidade.

Nesta metodologia deverá se considerar as seções mais críticas do maciço, ou seja, aquelas de maior altura e/ou menor largura, na qual se aplica a verificação da instabilidade de

aterros, a adoção de faixas de fator de segurança associados aos níveis: normal (FS ≥ 1,50), atenção (1,30 ≤ FS < 1,50), alerta (1,10 ≤ FS < 1,30) e emergência (FS < 1,10).

A tabela 14 mostra os valores dos fatores de segurança segundo a NBR 13.028 (ABNT, 2017) que deverão ser considerados para a definição dos níveis de controle (cota em metros do NA) a serem adotados para os instrumentos da estrutura.

Tabela 14 – Niveis alerta conforme fator de segurança observados na NBR 13.028.

Nível	Considerações	Critério
Normal	Representa o funcionamento normal da barragem/dique ou quando são encontradas pequenas anomalias que não afetam a segurança.	FS ≥ 1,50
Atenção	É aplicado quando são detectados problemas com elementos operacionais, estruturais, de observação, ou ainda outras condições que possam vir a comprometer a estabilidade da barragem/dique.	1,30 ≤ FS < 1,50
Alerta	Aplicado quando se detectam problemas graves e o nível d'água no interior do maciço aproxima-se ainda mais da superfície do talude de jusante.	1,10 ≤ FS < 1,30
Emergência	Grau máximo de gravidade.	FS < 1,10.

Fonte: ABNT, 2017.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho abordou uma questão crucial para a região Amazônica, que é a agricultura familiar e seu desafio de garantir o acesso à água para irrigação, especialmente no cultivo de cacau. A região enfrenta desigualdades na distribuição e acesso à água, o que gera estresse hídrico em certos períodos do ano.

O objetivo do trabalho foi proposto projetar um barramento para acumulação de água e seu fornecimento a um sistema de irrigação para o cultivo de cacau durante períodos de deficiência hídrica no sudeste do Estado do Pará. Para alcançar esse objetivo, realizou-se um balanço hídrico, fez-se determinação do volume de água necessário para irrigação, delimitou-se a área de contribuição para o barramento e finalmente o dimensionamento da estrutura de reservação de água.

Os resultados obtidos no balanço hídrico revelaram a existência de um estresse hídrico durante os meses de junho a novembro, o que justificou a necessidade de irrigação controlada para o cultivo de cacau. O volume de água demandado para a irrigação foi calculado com base nos déficits hídricos mensais, resultando em um total de 210.234 m^2 para toda a área de plantio.

Além disso, fez-se o dimensionamento geotécnico da estrutura do barramento, considerando a seção típica, sistema de drenagem interna e instrumentação de monitoramento. A estrutura do barramento foi projetada com base em solo argiloso compactado e incluiu medidas de segurança, como emprego de drenagem interna, recomendação de instrumentação geotécnica, recomendação de fatores de segurança mínimos, e inspeções periódicas.

A implementação de instrumentação para monitorar a estabilidade geotécnica do barramento abordada inclui: piezômetros, medidores de nível d'água e marcos superficiais. Essa instrumentação é fundamental para garantir a segurança da estrutura e permitir a detecção precoce de problemas.

Finalmente, o trabalho abordou uma importante questão relacionada ao acesso à água para a agricultura familiar na região Amazônica, especialmente no cultivo de cacau. Os resultados obtidos fornecem informações necessárias para o desenvolvimento de uma estrutura de armazenamento de água para alimentação de um sistema de irrigação, contribuindo para a eficiência dos agroecossistemas familiares na região.

No entanto, é recomendado a realização de trabalhos futuros para detalhamento do projeto, principalmente no que diz respeito aos aspectos ambientais, de licenciamento

ambiental, detalhamento de topografia local, verificação de curva cota x área x volume e avaliação de outras fontes de contribuição de água para a alimentação do reservatório que possam existir, uma vez que o dimensionamento do barramento, considerou apenas a contribuição direta da precipitação. Portanto, pode-se afirmar que os resultados deste trabalho são suficientes para apresentar o projeto a nível conceitual e têm o potencial de impactar positivamente a agricultura familiar na região Amazônica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIOYE, E A., ABIDIN, M. S. Z., MAHMUD, M. S. A., BUYAMIN, S., ISHAK, M. H. I., ABD RAHMAN, M. K. I., OTUOZE, A. O., ONOTU, P., RAMLI, M. S. A. **A review on monitoring and advanced control strategies for precision irrigation.** In: Computers and Electronics in Agriculture. Volume 173. 2020.

ABREU1, L. S.; WATANABE, M. A. **Agricultores familiares do Sul da Amazônia: Desafios e estratégias para inovação agroecológica de sistemas de produção**. Revista Verde - ISSN 1981-8203 - (Pombal - PB) v. 11, n.5, p.114-122, Edição especial. 2016.

ALBUQUERQUE, M. F.; SOUZA, E. B.; OLIVEIRA, M. C. F.; SOUZA JÚNIOR, A. A. **Precipitação nas Mesorregiões do Estado do Pará: climatologia, variabilidade e tendências nas últimas décadas (1978-2008).** Revista Brasileira de climatologia. ISSN: 1980-055X. 2010.

ALMEIDA, C.M.V.C. **Avanços no melhoramento genético do cacaueiro na Amazônia brasileira**. In: MENDES, F.A.T. (Ed.). A cacauicultura na Amazônia: história, genética, pragas e economia. Belém: CEPLAC/SUEPA. p.55-100. 2017.

ALMEIDA, H. A.; VILLA NOVA, N. A.; KLAR, A. E. **Estimativa da demanda hídrica do cacaueiro (*Theobromacacao L.*)**. Revista Brasileira de Fruticultura. Jaboticabal, São Paulo, v. 22, n. 3, p. 402-406, dezembro 2000.

ALMEIDA, J. S. **Projeto e gestão de uma planta de beneficiamento de cacau - Theobroma Cacoa L**. Trabalho de conclusão em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Pará. Tucuruí-PA. 94 pg. 2019.

AMARAL, V. P.; FILHO, P. B. S.; MORAES, J. S. C.; COSTA, J. F.; SANTIAGO, A. V. **Balanço hídrico e classificação climatológica para o município de Belterra-PA**. Simpósio de Estudos e Pesquisas em Ciências Ambientais na Amazônia. Belém. ISSN 2316-7637. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 13028 - Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reservação de água** (3ª Ed.). 2017.

BECKER, C. L. **Tecnologia Social: isso serve para que mesmo?** In: Revista Primeiro Pano-Responsabilidade e Sustentabilidade. n. 20. p. 44-45. 2011.

BORGES, F. F.; LUNA, F. M. **Tecnologias sociais e energias renováveis na agricultura familiar: Experiências do NDTS/IFPB e parceiros**. Revista Práxis: saberes da extensão, João Pessoa, v. 5, n. 10, p. 112-119. 2017.

BRASIL. Agência Nacional de Águas - ANA. **Guia Prático de Pequenas Barragens**. Brasília: ANA. 120 p. 2016.

_____. Serviço Geológico do Brasil – CPRM. **Geologia e recursos minerais do Estado do Pará, Nota explicativa**. Belém. 2008.

BRESEGHELLO, Flávio, RANGEL; Paulo Hideo Nakano; MORAIS, Orlando Peixoto de. **Ganho de produtividade pelo melhoramento genético do arroz irrigado no nordeste do Brasil**. Pesq. agropec. bras., Brasília, v.34, n.3, p.399-407. 1999.

CALVI, M. F., AUGUSTO, S. G., ARAÚJO, A., **Diagnóstico do arranjo produtivo local da cultura do cacau no território da Transamazônica – Pará.** Universidade Federal do Pará. 2020.

CÂMARA, G.; DAVIS, C. **Arquitetura de Sistemas de Informação Geográfica**. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. Introdução a Ciência da Geoinformação. São Paulo: INPE. 2001.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. **Equação para a estimativa da evapotranspiração potencial baseada no método de Hargreaves – 1974**. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 77-81, 1996.

CARVALHO, J. A. **Dimensionamento de pequenas barragens de terra para a irrigação**. Lavras, MG: Editora UFLA. 158 p. 2008.

CARVALHO, J. A. **Dimensionamento de pequenas barragens de terra para a irrigação**. Lavras, MG: Editora UFLA. 2008.

CASSOL, Henrique Luis Godinho; FLEIG, Frederico Dimas. **Utilização de geoprocessamento na simulação de áreas de clareiras em um sistema de manejo em regime jardinado**. Ciência Florestal, Santa Maria, v. 24, n. 1, p. 171-183. 2014.

CRUZ, Brenda Glaude Arrais; SOUZA, Carla Giovana Rocha, **Mudanças nas práticas de agricultores de cacau orgânico certificado no Sudoeste paraense.** Amazônia Oriental. 2019.

DESPONTIN, Maiara Alonso. **Zoneamento agroclimático e de risco climático para a cultura do cacau (Theobroma cacao L.) no estado do Pará**. Piracicaba, 2018.

DIAS, J. L.; GOMES, R R. K. A.; OLIVEIRA, A B. **Estudo do balanço hídrico climatológico e classificação climática de Thornthwaite para a cidade de Marabá-PA**. Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. Universidade Federal do Para, Belém. 2013.

EMBRAPA. Artigos. **Os desafios da Agricultura Familiar**. 2002. Disponível em: http://www.embrapa.br/imprensa/artigos/2002/artigo.2004-12-07.2590963189/

ESRI.ArcGis Version 9.2. Environmental Systems Research Institute, Inc., Redlands, CA. 2008.

EVA, H.D. & HUBER, O. **Proposta para definição dos limites geográficos da Amazônia: síntese dos resultados de um seminário de consulta a peritos organizado pela Comissão Européia em colaboração com a Organização do Tratado de Cooperação Amazônica**, CCP ISpra. 2005.

FACCHINETTI, Roberto. **Riscos Associados ao Projeto e a Construção de Barragens.** Brasil: 2008. Disponível em: www.cbdb.org.br/documentos/ROFacchinetti.pdf.

FARACO, M.T.L. *et al*. **Levantamento geológico da região ao norte da Província Carajás.** In: SOUZA, V.; HORBE, A.C. (Coord.). Contribuições à geologia da Amazônia. Manaus: SBG– Núcleo Norte, v. 4, p. 32-44. 2005.

FARACO, M.T.L.; CARVALHO, J.M. DE A.; KLEIN, E.L. **Carta Metalogenética da Província de Carajás – SE do Pará**. Folha Araguaia (SB.22). Nota Explicativa. Escala 1: 1.000.000. Belém: CPRM, 1996b. 28 p.

FERNANDEZ, José Carrera; FERREIRA, Paulo Moraes. **Otimização dos recursos hídricos e sistemas de bacia hidrográfica: o caso da Bacia do Rio Formoso**, na Bahia. Revista Econômica do Nordeste, v. 33, n. 3, p. 536-553, 2002.

GALVANI, Emerson. **Estudo comparativo dos elementos do Balanço Hídrico Climatológico para cidades de São Paulo e para Paris**, Confins[Online], 4 | 2008, posto online no dia 05 outubro 2019, consultado o 13 julho 2022.

GOMES, Daniel Dantas Moreira. **Geoprocessamento aplicado à análise e zoneamento dos sistemas ambientais da bacia hidrográfica do Rio Mundaú - PE/AL**. 230 f. Tese (Doutorado)- Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2015.

GOMES, Wesley de Brito. **Balanço de água na Amazônia: o papel do desflorestamento e das mudanças climáticas**. Dissertação (Mestrado) -INPA/UEA. Manaus. 2018.

GUASSELLI, Laurindo Antônio; ETCHELAR, Cecilia Balsamo; BELLOLI, Tássia Fraga. **Os impactos do cultivo de arroz irrigado sobre as áreas úmidas da Área de Proteção Ambiental do Banhado Grande do rio Gravataí – RS**. p.447-452. 2013.

GUIMARÃES, José Raul dos Santos. **A importância da cultura do cacau para o desenvolvimento local no território da Transamazônica (PA): um estudo centrado em alternativas de sustentabilidade econômico-espacial**.. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Núcleo de Meio Ambiente. Belém. 159 p. 2011.

IBGE. **Levantamento sistemático da produção agrícola.** 2018. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indcadores/agropecuaria/lspa/default_publl_completa.shtm>. Acesso em: 15 de junho de 2018.

JORGE JOÃO, X. S.; TEIXEIRA, S. G.; FONSECA, D. D. F. **Geodiversidade do Estado do Pará - Belém**: CPRM. 256 p. 2013.

JUNIOR, Luciano Sobral Fraga. **Relações hídricas do cacaueiro: efeito da área foliar, potencial da água do solo e condições de sombreamento**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Recôncavo da Bahia. 2017.

KELLER, J., BLIESNER, R. D. **Sprinkle and trickle irrigation.** New York: Avibook, 1990. 649p. http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4757-1425-8

KÖGLER, F.; SÖFFKER, D. **Water (stress) models and deficit irrigation: System-theoretical description and causality mapping**. Ecological Modelling, v.361, p.135-156. 2017.

LANNA, Antônio Eduardo. **Gestão dos recursos hídricos**. In: TUCCI, Carlos E. M. (org.). Hidrologia Ciência e Aplicação. 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABH. 727- 768 p. 2009.

LISAR, S. Y. S.; MOTAFAKKERAZAD, R.; HOSSAIN, M. M.; RAHMAN, I. M. M. **Water Stress in Plants: Causes, Effects and responses**. In: Rahman, I. M. M.; Hasegawa, H. Water stress. Intech, p.1-14. 2012.

LOBATO, W. T. S.; ALMEIDA, G. M. A.; SOUZA A. M. B.; LIMA, B. M.; LIMA, M. J. A. **Water Balance And Climate Classification According To Thornthwaite To The Municipality Of Tracuateua-Pa.** Congresso Internacional das Ciências Agrárias – PDVAGRO. 2018.

LOPES, J. D. S.; LIMA, F. Z. **Construção de pequenas barragens de terra**. Viçosa-MG, CPT. 274p. 2008.

LOPES, M.; DE SOUZA, E.; FERREIRA, D. **Climatologia Regional da Precipitação no Estado do Pará. Revista Brasileira de Climatologia**. 12. ISSN: 1980-055x. 10.5380/abclima.v12i1.31402. 2013.

MACHADO, R. E.; MATTOS, A. **Avaliação do desempenho de três métodos de estimativa da evapotranspiração de referência.** Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v. 8, n. 2, p. 193-197, 2000.

MALHI, Y.; ROBERTS, J.T.; BETTS, R.A.; KILLEEN, T.J.; Li, W.; NOBRE, C.A. **Climate Change, Deforestation, and the Fate of the Amazon**. *Science*, 319(5860): 169-172. 2008.

MATOS, A. T. SILVA, D. D. e PRUSKI, F. F. **Barragens de terra de pequeno porte**. Viçosa, MG: Editora UFV. 136 p.: il. 2012.

MEDEIROS, C. H. de A. C. and MEDEIROS, Y. D. P. **A Structural Framework For Dam Safety Plan According To Brazilian National Law On Dam Safety** CIGB-ICOLD 2012 Kyoto. International Symposium On Dams For A Changing World,Kyoto, Japan, June 5, page 5-31 / 5-36. 2012.

MENDES, C. A. B.; BELUCO, A.; CANALES, F. A. **Some important uncertainties related to climate change in projections for the Brazilian hydropower expansion in the Amazon**. Energy, 2017.

MENDES, F. A. T. **A importância da cacauicultura do cacau para Amazônia**. In: MENDES, F. A. T. (Org.). Economia do cacau na Amazônia. Belém: UNAMA. 249 p. 2005

MENDONÇA, E. A.; DANTAS, R. T. **Estimativa da evapotranspiração de referência no município de Capim, PB**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 14, n. 2, 2010, p. 196-202, 2010.

MENDONÇA, J. C.; SOUSA, E. F.; BERNARDO, S.; DIAS, G. P.; GRIPPA, S. **Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ETo) na região Norte Fluminense, RJ**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 275-279, 2003.

MENDONÇA, Nivaldo dos Santos. **Sustentabilidade e usos múltiplos da água da Barragem Poção da Ribeira-SE**. Dissertação de mestrado –Universidade Federal de Sergipe. 2013.

MÜLLER, M. W.; VALLE, R. R. **Ecofisiologia do cultivo do cacaueiro**. In: VALLE, R. R. (Ed.). Ciência, tecnologia e manejo do cacaueiro. Ilhéus, CEPLAC: CEPEC: SEFIS. 17-41 p. 2007.

NEVES JÚNIOR, Walter Luís Teixeira. **Análise da variabilidade climática na região de integração lago de Tucuruí, estado do Pará**. Campus Universitário de Ananindeua, Universidade Federal do Pará, Ananindeua. 2018.

OLIVEIRA, J.R.; SILVA NETO, C.S.; COSTA, E.J.S. **Serra pelada; folha SB.22.X.C**. Estado do Pará, escala 1:250.000. Brasília: CPRM, 1994. 220 p., il. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil (PLGB).

OLIVEIRA, M. G.; TEIXEIRA, R. L. **Análise e desenvolvimento de projeto construtivo de uma pequena barragem de terra no Córrego da Cava – Morrinhos/GO, com foco na segurança**. Trabalho de Conclusão de Curso Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Goiânia. 51 p. 2017.

PISANIELLO, J. D.; DAM, T. T.; TINGEY-HOLYOAK, J. L. **International small dam safety assurance policy benchmarks to avoid dam failure flood disasters in developing countries**. Journal of Hydrology, 2015.

PONTES, M. L.C.; GONÇALVES, L. J. M.; COSTA, A. C.; SAMPAIO, T. R.; ROCHA, E J.P. **balanço hídrico para a cidade de Itaituba.** Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, Universidade Federal do Para, Belém. 2013.

QUINTAS, Fernando Eduardo Geraldes. **Planeamento da construção de Barragens de Terra**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Portugal. 2002.

RABUS, B.M.; EINEDER, A.R.; BAMLER R. **The shuttle radar topographymission- a new classof digital elevation models acquired by space borne radar**. PhotogrammetricEngineering & Remote Sensing v. 57. 241-262 p. 2003.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. 2ª Edição. São Paulo: Ed. Manole. 1990.

RICCI, P.S.F. **Metamorfismo e deformação**. In: COSTA, J.L. (Org.). Castanhal: folha SA.23-V-C; Estado do Pará, escala 1:250.000. Brasília: CPRM, 2000. 1 CDROM. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil (PLGB).

ROCHA V.M.; CORREIA F.W.S.; SATYAMURTY P.; de FREITAS S.R.; MOREIRA D.S.; da SILVA P.R.T.; FIALHO E.S. **Impacts of land cover and greenhouse gas (GHG) concentration changes on the hydrological cycle in amazon basin: a regional climate model study**. Revista Brasileira de Climatologia. 7-27 p. 2015.

RODRIGUES, G. C.; PAREDES, P.; GONÇALVES, J. M.; ALVES, I; PEREIRA, L. S. **Comparing sprinkler and drip irrigation systems for full and deficit irrigated maize using multicriteria analysis and simulation modelling: Ranking for water saving vs. farm economic returns.** Agricultural Water Management, v.126, p.85-96, 2013.

ROLIM, G. S.; SENTELHAS, P. C. **Balanço Hídrico Normal por Thornthwaite & Mather (1955)**. Piracicaba. ESALQ. 1999.

SANTANA, C. A. M., SOUSA, G. S., HOMMA, A. K. O., GOMES, E. G., ARAGÃO, A. A. **40 anos de transformações na agricultura paraense:** implicações para políticas públicas. p. 178. 2022.

SANTOS, J. S. O.; HARTMANN, L. A.; FARIA, M. S.; RIKER, S. R.; SOUZA, M. M.; ALMEIDA, M. E.; McNAUGHTON, N. J.. **A compartimentação do Cráton Amazonas em províncias: avanços ocorridos no período 2000-2006.** Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém. 2006.

SATYAMURTY, P.; da COSTA, C.P.W.; MANZI, A.O. **Moisture source for the Amazon Basin: a study of contrasting years**. Theoretical and Applied Climatology. 195-209. 2013.

SCERNE, R. M. C., CARVALHO, C. J. R., **Climatologia e Ecofisiologia do cacau**. Belem, CEPLAC/DEPEA/COPES. 56p. 1983.

SCHOBBENHAUS, C.; BRITO NEVES, B. B. **A geologia do Brasil no contexto da Plataforma Sul-Americana**. Geologia, tectônica e Recursos Minerais do Brasil: texto, mapas e SIG. Brasília, CPRM, p. 5-54. 2003.

SETTI, Arnaldo Augusto; LIMA, Jorge Enoch Furquim Werneck; CHAVES, Adriana Goretti de Miranda; PEREIRA, Isabella de Castro. **Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos**. 2a ed. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas, 2001.

SILVA, F. R., HUGO, M. F. L., SOUSA, L. P. **Desempenho de sistemas de irrigação por gotejamento em áreas de produção agrícola familiar da Amazônia ocidental.** II Inovagri International Meeting. 2014.

SILVA, G. N.; SILVA, J. G. F.; SANTANA, W. N.; **Estimation of Climatological Water Balance: A Case Study.** Vivências: Revista Eletrônica de Extensão da URI. Vol. 13, N.25: p.117-127. 2017.

SILVA, M. C. C. **Agricultura orgânica e a sustentabilidade de agroecossistemas familiares em Medicilândia-PA**. Dissertação (Mestrado). Universidade do Estado do Pará (UFPA). Belém. 2013.

SODRÉ, G. A.; MARROCOS, P. C. L.; SARMENTO, D. A. **Cultivo do cacaueiro no estado do Ceará. Ilhéus, BA, CEPLAC/CEPEC**. Boletim Técnico nº 209. 34p. 2017.

SOUZA, C.A.S.; AGUILAR, M.A.G.; DIAS, L.A. dos S. Cacau. In: MONTEIRO, J.E.B.A. (ed.). **Agrometeorologia dos cultivos: O fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília: INMET. 333-350 p. 2009.

SOUZA, M. M. **Estudo para o projeto geotécnico da barragem de Alto Irani, SC**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 129 p. il. 2013.

SOUZA, R. O. R. de M.; PANTOJA, A. V.; AMARAL, M. A. C. M.; PEREIRA NETO, J. A. **Cenário da agricultura irrigada no Estado do Pará. Irriga**, v. 17, n. 2, p. 177-188, abr./jun. 2012

SOUZA, V.S. **Geologia e mineralizações auríferas do Garimpo do Manelão, região do Bacajá – PA**. 1995. 111 f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 1995.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. **The water balance. Climatology 8**: Johns Hopkins University, Lab. of Climatology, 1955. 104p.

VAL, A. L.; ALMEIDA-VAL, V. M. F.; FEARNSIDE, P. M.; SANTOS, G. M.; PIEDADE. M. T. F.; JUNK, W.; NOZAWA, S. R; SILVA, S. T. & DANTAS, F. A. C. **Amazônia: recursos hídricos e sustentabilidade. In: Águas do Brasil: Análises estratégicas**, BICUDO, C. E. de M.; TUNDISI, J. G.; SCHEUENSTUHL, M. C. B. São Paulo, Instituto Botânica. 244 p. 2010.

VASQUEZ, M.L. **Geocronologia em zircão, monazita e granada e isótopos de Nd das associações litológicas da porção oeste do Domínio Bacajá: Evolução Crustal da Porção Meridional da Província Maroni-Itacaiúnas, Sudeste do Cráton Amazônico**. Universidade Federal do Pará, Belém. 2006.

VASQUEZ, M.L., ROSA-COSTA, L.T. **Geologia e Recursos Minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas – SIG. : texto explicativo dos mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará**. Belém: CPRM. 328 p. 2008.

XAVIER, A.C.; KING, C.W.; SCANLON, B.R. **Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013)**. International Journal of Climatology, v. 36, n. 6, 2644-2659 p. 2016.

ZOBAYED, S.M.A.; AFREEN, F.; KOZAI, T. **Phytochemical and physiological changes in the leaves of St John´s wort plants under a water stress condition.** Environmental and Experimental Botany, Oxford, v. 59, 109-116 p. 2007.

APÊNDICE I

Meses	Num de dias	T oC Atual	P mm	N horas	I	a
Jan	30	26,0	292,3	12,2	12,2	3,8
Fev	28	25,9	358,1	12,2	12,1	3,8
Mar	31	26,2	425,9	12,1	12,3	3,8
Abr	30	26,4	354,3	12,0	12,4	3,8
Mai	31	26,7	243,3	11,9	12,6	3,8
Jun	30	26,5	77,9	11,8	12,5	3,8
Jul	31	26,4	28,7	11,8	12,4	3,8
Ago	31	26,5	15,8	11,8	12,5	3,8
Set	30	27,1	17,5	11,9	12,9	3,8
Out	31	27,6	49,1	12,0	13,3	3,8
Nov	30	26,8	95,2	12,2	12,7	3,8
Dez	31	26,6	174,1	12,2	12,5	3,8
TOTAIS		318,7	2132,2	144,0	150,4	45,0
MÉDIAS		26,6	177,7	12,0	12,5	3,8

APÊNDICE II

BHnorm_Fazenda_Corona.xls