

Pedro Wadenphul de Moraes

IRRIGAÇÃO PARA ERVA-MATE:

**Estudo e dimensionamento de projeto de irrigação
localizada por gotejamento.**

Porto Alegre

2024

Pedro Wadenphul de Moraes

**IRRIGAÇÃO PARA ERVA-MATE: Estudo e
dimensionamento de projeto de irrigação localizada por
gotejamento.**

Trabalho de conclusão apresentado ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheiro Hídrico.

Orientadora: Nilza Maria dos Reis Castro

Porto Alegre

2024

CIP - Catalogação na Publicação

de Moraes, Pedro
IRRIGAÇÃO PARA ERVA-MATE: Estudo e dimensionamento
de projeto de irrigação localizada por gotejamento. /
Pedro de Moraes. -- 2024.
92 f.
Orientadora: Nilza Maria dos Reis Castro.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto
de Pesquisas Hidráulicas, Curso de Engenharia Hídrica,
Porto Alegre, BR-RS, 2024.

1. Irrigação. 2. Erva-mate. 3. Evapotranspiração.
4. Gotejamento. I. dos Reis Castro, Nilza Maria,
orient. II. Título.

Pedro Wadenphul de Moraes

IRRIGAÇÃO PARA ERVA-MATE: Estudo e dimensionamento de projeto de irrigação localizada por gotejamento.

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Hídrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido e aprovado em 15/02/2024 pela Comissão Avaliadora constituída pelos professores:

Banca Examinadora:

.....
Prof Dr. Maurício Andrades Paixão - Departamento de Obras Hidráulicas - Instituto de Pesquisas Hidráulicas - UFRGS

.....
Prof^a. Dr^a. Nilza Maria dos Reis Castro - Departamento de Obras Hidráulicas - Instituto de Pesquisas Hidráulicas - UFRGS

.....
Prof^a. Dr^a. Priscila Pacheco Mariani – Departamento de Engenharias, Arquitetura e Computação UNISC

Dedico este trabalho a meus pais, Adriano de Moraes e Vera Regina Wadenphul de Moraes, que sempre me apoiaram e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha professora orientadora que já ao decorrer da disciplina de irrigação e drenagem, semestres atrás, estava transmitindo toda essa metodologia sem saber que já estava sendo aplicada e a resposta em tempo real para mostrar que funciona muito bem. Não pensei em outra professora, senão a Nilza, para me orientar na elaboração do trabalho baseado nesse projeto de irrigação.

Agradeço à minha família que ao longo desses anos de graduação esteve me dando suporte e acreditando na minha capacidade de eu chegar à diplomação.

Agradeço à empresa Raul Moraes Consultoria e Representações LTDA de ter me oferecido essa oportunidade, em especial aos sócios diretores Raul e Ana, juntamente de me fazer parte da equipe durante o cumprimento do meu estágio curricular e principalmente pela oportunidade de fazer parte desse projeto que me enriqueceu muito como profissional.

Agradeço também aos proprietários da fazenda Ervais do Futuro, Natalie da Silva Machado e Ilo Diehl dos Santos por, não só financiar o projeto ao seu empreendimento, mas também, estar presente e acompanhar de perto do planejamento ao monitoramento, e a toda equipe que ofereceram suporte com mão-de-obra toda de instalação e manejo do sistema e técnica agrícola para que o projeto fosse pensado para a cultura de erva-mate.

“Como é difícil sonhar
e não fazer.
Os sonhos numa fila enorme
de padaria, fim de tarde,
e na frente se atropelam
as urgências desimportantes.”
Bernardo de Moraes Bueno

É melhor fazer as coisas sistematicamente, uma vez que nós somos somente
humanos, e a desordem é a nossa pior inimiga.
Hesíodo

RESUMO

Este estudo propõe-se a sintetizar e relatar um projeto de irrigação por micro gotejamento para a cultura de erva-mate, quais metodologias e o procedimento para caracterizar o local, dimensionar e verificar o sistema de acordo com a necessidade hídrica da planta assim como a forma de operar e automatizar o processo, com o objetivo de padronizar e torná-lo mais eficiente. Este projeto foi realizado pela Raul Moraes Consultoria e Representações LTDA integrando o aluno durante seu estágio curricular para ser implementado em uma fazenda produtora de erva-mate. O objetivo da implementação do sistema de irrigação é de garantir que a planta receba a quantidade de água necessária para seu pleno desenvolvimento e aumentar a produtividade da erva mate, que já vinha sendo cultivada na propriedade agrícola. O projeto foi dimensionado e instalado na fazenda Ervais do Futuro, localizada no município de Espumoso no estado do Rio Grande do Sul. Na primeira etapa foi feita a caracterização do local, na sequência foi calculada a dose líquida diária a ser aplicada na cultura pelo método de gotejo, depois foi feito o dimensionamento hidráulico do sistema incluindo cálculo de vazão, diâmetro da tubulação, velocidade da água, perdas de carga linear e localizada, pressões requeridas nas tubulações e finalmente foi dimensionada a bomba para pressurizar de forma adequada o sistema. Como resultado pode-se afirmar que o projeto de irrigação foi bem dimensionado e sua implantação garantiu que a demanda hídrica da cultura foi atendida pelo sistema de irrigação, atendendo aos critérios de segurança.

Palavras-chave: evapotranspiração; erva-mate; irrigação; irrigação localizada; irrigação por gotejamento; reservatório, tensiômetro.

Resumen

Este estudio propone sintetizar y describir un proyecto de riego por goteo para el cultivo de yerba mate, incluyendo metodologías y procedimientos para caracterizar el sitio, dimensionar y verificar el sistema de acuerdo con las necesidades hídricas de la planta, así como la forma de operar y automatizar el proceso, con el objetivo de estandarizarlo y hacerlo más eficiente. Este proyecto fue realizado por Raul Moraes Consultoria y Representações LTDA, con la participación del estudiante durante su pasantía curricular para su implementación en una finca productora de yerba mate. El objetivo de la implementación del sistema de riego es asegurar que la planta reciba la cantidad de agua necesaria para su desarrollo óptimo y aumentar la productividad de la yerba mate, que ya se estaba cultivando en la propiedad agrícola. El proyecto fue dimensionado e instalado en la finca Ervais do Futuro, ubicada en el municipio de Espumoso, en el estado de Río Grande do Sul. En la primera etapa se realizó la caracterización del lugar, luego se calculó la dosis líquida diaria a aplicar en el cultivo mediante el método de goteo, después se realizó el dimensionamiento hidráulico del sistema, incluyendo el cálculo de caudal, diámetro del tubo, velocidad del agua, pérdidas de carga lineales y localizadas, presiones requeridas en los tubos y finalmente se dimensionó la bomba para presurizar adecuadamente el sistema. Como resultado, se puede afirmar que el proyecto de riego fue bien dimensionado y su implementación garantizó que la demanda hídrica del cultivo fuera atendida por el sistema de riego, cumpliendo con los criterios de seguridad.

Palabras clave: evapotranspiración; yerba mate; riego; riego localizado; riego por goteo; depósito; tensiómetro.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Quantidade produzida de erva-mate no Brasil: 2018-2020 – BR ...	18
Figura 2 - Quantidade produzida de ervamate no Rio Grande do Sul: 2018-2020 – RS	18
Figura 3 - Cultura de couve irrigada por aspersão	23
Figura 4 - Cultura de couve irrigada por aspersão	24
Figura 5 - Pé de erva-mate em bom estágio para corte, ultrapassando 2 metros de altura. Fazenda Ervais do Futuro	30
Figura 6 - Disponibilidade de minerais no solo de acordo com o pH do meio	31
Figura 7 - Produção anual de erva-mate dos 2 maiores produtores mundiais	32
Figura 8 - Rendimento médio anual de erva-mate dos 3 estados mais produtivos no Brasil	33
Figura 9 - Representação esquemática da necessidade hídrica da planta na irrigação	36
Figura 10 - Tensiômetro analógico com vacuômetro.....	39
Figura 11 - Tensímetro digital.....	40
Figura 12 - Folha de erva-mate apresentando doença de Antracnose.....	42
Figura 13 - Muda de erva-mate com sinais claros de queda das folhas, além de necrose no tronco e raízes.....	44
Figura 14 - Localização do município de Espumoso	45
Figura 15 - Dados com a média mensal da precipitação, temperatura máxima e mínima ao longo de 30 anos.	46
Figura 16 - Série de dados de precipitação entre 2020 e 2023.....	47
Figura 17 - Mapa de classe de solos e Declividade de Espumoso.....	48
Figura 18 - Exemplo de irrigação por gotejamento em vaso com emissores de múltiplas saídas: crisântemo (esquerda) e tomate cereja (direita).....	52
Figura 19 - Diagrama de características bomba centrífuga.....	62
Figura 20 - Curvas características, NPSHR e potência consumida.....	64
Figura 21 - Linha DRIPNET PC de emissores Netafim	69
Figura 22 - Especificações do emissor 16250 com diferentes vazões de operação	69
Figura 23 - Layout preliminar do sistema de irrigação	70
Figura 24 - Cavalete de irrigação	71
Figura 25 - Perda de carga de filtro disco.....	80

Figura 26 - Desnível máximo de recalque	81
Figura 27 - Curva característica da bomba centrífuga.....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficiente de cultura (K_c).....	37
Tabela 2 - Intervalo indicativo de pressão.....	41
Tabela 3 - Classes de declividade	47
Tabela 4 - Coeficiente de redução F em função de N, m e da distância entre o primeiro e o último aspersor	57
Tabela 5 - Perdas de carga localizadas – equivalência em metros de tubulação de PVC rígido ou cobre	58
Tabela 6 - Dados do emissor e cultura	66
Tabela 7 - Resultado do cálculo de dose mínima diária.....	67
Tabela 8 - Resultados do Setor 8.....	75
Tabela 9 - Somatório dos valores de K LP8.....	77
Tabela 10 - Somatório dos valores de K Adutora	79

LISTA DE SIGLAS

ANA: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
COMGRAD-Híd: Comissão de Graduação da Engenharia Hídrica;
CPRM: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, atual SGB;
Dc: Diâmetro comercial
De: Diâmetro externo
ET: Evapotranspiração
ETP: Evapotranspiração potencial
ET_{rf} ou ET₀: Evapotranspiração de referência
EUA: Eficiência do uso da água
FAO: *Food and Agriculture Organization*
Hz: Hertz
IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
Ibramate: Instituto Brasileiro de Erva-Mate
INYM: *Instituto Nacional de la Yerba Mate* | Argentina
IPH: Instituto de Pesquisas Hidráulicas;
IRGA: Instituto Rio Grandense do Arroz
LA: Linha adutora
LL: Linha lateral
NPSH_D: NPSH Disponível
NPSH_R: NPSH Requerido
PILL: Pressão no início da linha lateral
Q_{LL}: Vazão da linha lateral
RiGeo: Repositório Institucional de Geociências;
Rpm: rotações por minuto
SGB: Serviço Geológico do Brasil
UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

SUMÁRIO

1.	Introdução.....	17
2.	Objetivos.....	20
2.1.	Objetivo geral	20
2.2.	Objetivos específicos	20
3.	Revisão Bibliográfica	21
3.1.	Métodos de irrigação.....	21
3.1.1.	Irrigação por superfície.....	21
3.1.2.	Irrigação sob pressão	22
3.2.	Evapotranspiração	25
3.2.1.	Evapotranspiração Potencial.....	27
3.2.2.	Evapotranspiração Real	27
3.2.3.	Evapotranspiração de Referência	27
3.2.4.	Evapotranspiração potencial da Cultura (ETc)	28
3.3.	Dados da cultura - <i>Ilex paraguariensis</i>	29
3.4.	Monitoramento da umidade do solo	37
3.4.1.	Umidade do solo - Tensiômetro.....	38
3.4.2.	Análise foliar da planta	41
4.	Materiais e Métodos	45
4.1.	Caracterização da área de estudo	45
4.2.	Dimensionamento do sistema de irrigação por gotejamento.....	48
4.2.1.	Cálculo de dose e turno.....	48
4.2.2.	Escolha dos emissores.....	51
4.2.3.	Levantamento topográfico da área de interesse.....	52
4.2.4.	Layout do sistema de irrigação	53
4.2.5.	Dimensionamento das linhas.....	53
4.2.6.	Dimensionamento e escolha da bomba.....	61

5.	Resultados.....	65
5.1.	Levantamento Topográfico do local	65
5.2.	Dose e Turno	65
5.3.	Escolha dos Emissores.....	68
5.4.	Layout do Sistema	69
5.5.	Dimensionamento das Linhas	71
5.5.1.	Dimensionamento Linhas Laterais	71
5.5.2.	Dimensionamento Linhas Principais.....	76
5.5.3.	Dimensionamento Linha Adutora	78
5.6.	Dimensionamento da Bomba Hidráulica	80
5.7.	Discussão dos Resultados.....	83
6.	Conclusão.....	85
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86
	ANEXO A - Levantamento planialtimétrico da área de estudo	90
	Anexo B - Levantamento de mangueira gotejadora	91
	Anexo C - Layout dos setores	92

1. INTRODUÇÃO

A irrigação corresponde à prática agrícola que utiliza um conjunto de equipamentos e técnicas para suprir a deficiência total ou parcial de água para as plantas (ANA, 2021).

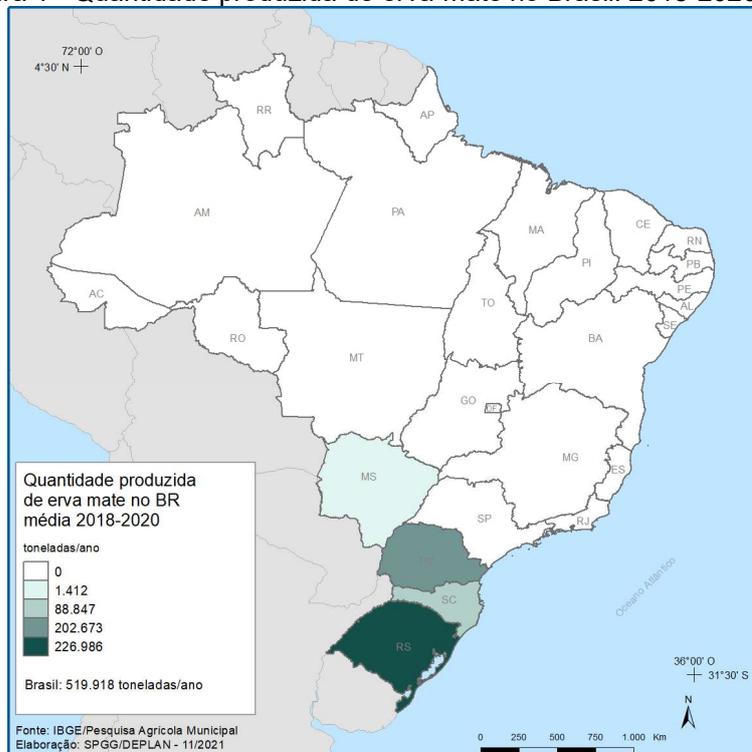
A erva-mate (*Ilex paraguariensis* A. St. Hil) é uma espécie nativa do Brasil e fortemente ligada à cultura e à história dos estados da região sul do Brasil, sendo utilizada, principalmente, para o consumo do chimarrão, um chá preparado em um recipiente feito de Porongo, que é o fruto das plantas dos gêneros *Lagenaria* e *Cucurbita*. O chimarrão pode ser tomado de forma individual, mas é muito comum a roda de chimarrão, onde as pessoas compartilham a bebida seguindo uma série de regras estabelecidas culturalmente e repassando-as de geração em geração.

Além do chimarrão, tererê e chás, outros produtos e formas de uso estão em desenvolvimento. A expansão do uso está relacionada com a elucidação de diversas propriedades benéficas como antioxidante, antimicrobiana entre outras. Essas características se devem à presença de compostos como metilxantinas, como cafeína e teobromina; flavonoides; vitaminas A, B, C e E; saponinas e taninos (CROGE; CUQUEL; PINTRO, 2021). Isso tem despertado o interesse do mercado consumidor internacional, refletindo no aumento da sua demanda nos últimos anos (CARDOZO JUNIOR; MORAND, 2016).

A exploração da espécie consiste na colheita de folhas e ramos finos das árvores após maturação foliar (SANTIN et al., 2019). A erva-mate é o principal produto florestal não madeireiro da economia na região Sul do Brasil. A espécie ocorre naturalmente somente nos estados do Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul e no Sul do Mato Grosso do Sul e extremo Sul de São Paulo. O Rio Grande do Sul é o estado que mais produz essa cultura com média de 226.986 t/ano, seguido por Paraná, Santa Catarina e por último Mato Grosso do Sul (Figura 1) considerando dados entre 2018 e 2020. Na Figura 2 são ilustradas as regiões do estado do Rio Grande do Sul produtoras de erva-mate. Destaca-se a região Alta do Vale do Taquari que deu origem à Rota da Erva-mate, constituída pela união de 10 municípios: Anta

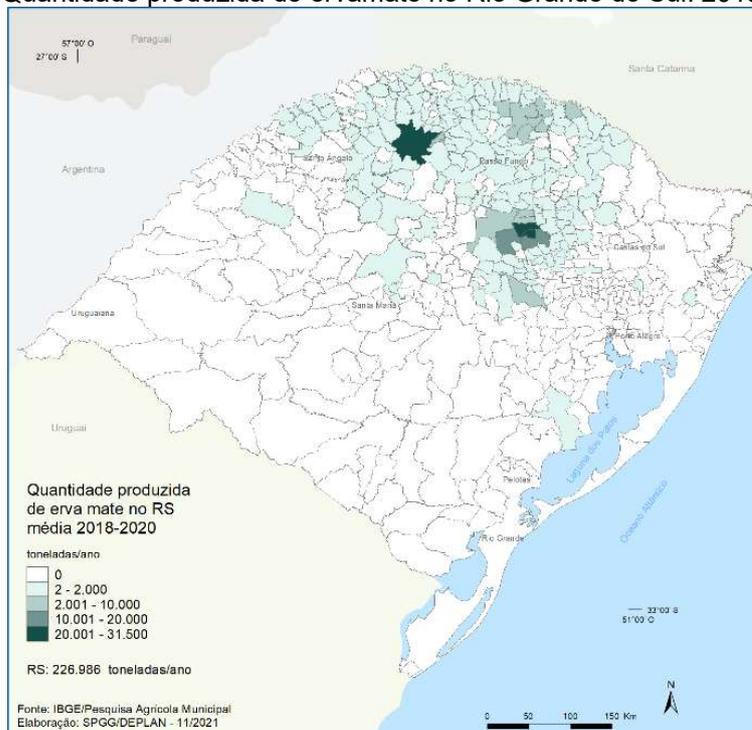
Gorda, Arvorezinha, Coqueiro Baixo, Doutor Ricardo, Encantado, Ilópolis, Itapuca, Nova Brésia, Putinga e Relvado.

Figura 1 - Quantidade produzida de erva-mate no Brasil: 2018-2020 – BR



Fonte: <https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/midia/imagem/map-2018-2020-erva-mate-br>.

Figura 2 - Quantidade produzida de ervamate no Rio Grande do Sul: 2018-2020 – RS



Fonte: <https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/midia/imagem/map-2018-2020-erva-mate-rs>.

Ainda pouco explorada, a adoção da irrigação para a cultura da erva-mate pode ser uma peça chave para o êxito na produção, assim como já consolidada a prática para o café e a produção de cítricos como a laranja, por exemplo. A irrigação, aliada a outras técnicas - datas corretas de plantio e colheita (visando máxima eficiência da soma térmica, temperatura do ar ideal, ...), técnicas de plantio, adubação, tratamento fitossanitário (herbicidas, pesticidas, ou tratamentos orgânicos) - permite que a planta se desenvolva com seu máximo potencial, garantindo uma melhora significativa de sua produtividade.

Além do aumento da produtividade, é importante ressaltar que a irrigação também aumenta a previsibilidade e a padronização da cultura, auxiliando a atender o mercado internacional que busca um padrão de qualidade. Um exemplo dos benefícios da irrigação na cultura da erva-mate foi constatado na Fazenda Ervais do Futuro, objeto desta pesquisa. Após implementação do sistema de irrigação na fazenda produtora, a perda de mudas caiu significativamente, já não sendo mais ocasionada por estresse hídrico da planta. Nessa fazenda, a colheita que era realizada a cada 18 meses passou a ser realizada a cada 12 meses, aumentando, portanto, bastante a produtividade da cultura.

2. OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho estão divididos em geral e específicos, como descritos a seguir:

2.1. OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo apresentar a elaboração e dimensionamento de um projeto de irrigação localizada por gotejamento para cultura de erva-mate.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Levantar informações pertinentes ao dimensionamento de um sistema de irrigação por gotejamento,
- Pesquisar o tipo de equipamentos a serem utilizados,
- Fazer o layout da área a ser irrigada,
- Apresentar uma metodologia de cálculo para o dimensionamento do sistema de irrigação,
- Fazer a verificação do sistema de irrigação já implantado,
- Planejar o monitoramento da área e do sistema para maior eficiência e produtividade da cultura irrigada.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. MÉTODOS DE IRRIGAÇÃO

A escolha adequada do método de irrigação a ser utilizado constitui-se em um dos requerimentos básicos essenciais ao sucesso da agricultura irrigada. Nessa seleção, devem ser considerados os aspectos técnicos, econômicos e sociais, possibilitando a melhor adequação do método a cada situação em particular.(RODRIGUES *et al.*, [s. d.]). A seguir serão descritos os métodos de irrigação e as características principais desses métodos.

3.1.1. Irrigação por superfície

Os sistemas de irrigação por superfície, ou irrigação por gravidade, têm como principal característica a distribuição da água na superfície do solo utilizando a energia gravitacional para a condução da água na área irrigada(FRIZZONE, [s. d.]. 2017.).

A irrigação por superfície é toda aquela aplicada sob pressão atmosférica na cultura, não excluindo o uso de pressurização em parte do sistema para condução de água, como o uso de bombas hidráulicas para captação de água e recalque até a linha principal ou também para reservação, por exemplo. Os dois métodos mais utilizados na agricultura irrigada por superfície são sulcos e inundação e serão descritos a seguir.

3.1.1.1. Sulcos

A irrigação por sulcos consiste na aplicação da água através de sulcos: pequenos vales ou depressões, situados entre os camalhões, que por sua vez são pequenas elevações ou cristas em que serão feitas as linhas de plantio; durante o tempo necessário para infiltrar a água, umedecendo o perfil do solo.

Para a irrigação por sulcos, a faixa de declive recomendada situa-se entre 0,1 a 0,5% (DE CARVALHO, [s. d.]). Segundo esse autor, a irrigação no sistema sulco/camalhão é realizada por sulcos em áreas sistematizadas com declive e por inundação intermitente (banhos rápidos) em áreas sem declive (cota zero).

Para aplicar esse método o relevo tem que ter declividade constante ao longo de todo o comprimento do sulco. A água se desloca do início ao final do sulco, se infiltrando ao longo do caminho percorrido e umedecendo as faixas localizadas entre

os sulcos. Esse método tem a vantagem de não molhar as folhas das plantas, pois a água é aplicada diretamente no sulco, porém tem a desvantagem de ter uma eficiência do uso da água baixa, em torno de 60% da água aplicada é proveitosa para a planta, podendo chegar a valores menores ou maiores, dependendo do tipo de solo e do comprimento do sulco. Esse método não era muito utilizado no Rio Grande do Sul até poucos anos atrás, porém nos últimos anos tem sido utilizado para plantio de soja em lavouras tradicionalmente irrigadas com arroz, como alternativa de rotação de cultura de verão em vez da prática do pousio. Nos últimos 10 anos houve rápida expansão do cultivo da soja nessas áreas, passando de pouco mais de 10.000 hectares, na safra 2009/10, para 341.000 hectares, na safra 2019/20 (IRGA, 2020), o que representa 35% da área cultivada com arroz nesta safra. Em parte dessa soja cultivada foi utilizada a irrigação por sulcos (IRGA, 2020). O milho também tem sido uma alternativa de cultivo nessa área com o emprego de irrigação por sulcos (Oliveira, 2016 e IRGA 2020b).

3.1.1.2. Inundação

A irrigação por inundação caracteriza-se pela aplicação de água ao solo, em forma de lâmina de água estagnada ou contínua, cobrindo totalmente a superfície do terreno. (MONTEIRO, [s. d.]). Esse método é muito utilizado em lavoura de arroz no Rio Grande do Sul, pois tem relevo plano ou com baixa declividade, solos com camada impermeável, como os planossolos ou com baixa condutividade hidráulica saturada, como os gleissolos, e conseqüentemente gerando pouca perda de água por fluxo vertical.

3.1.2. Irrigação sob pressão

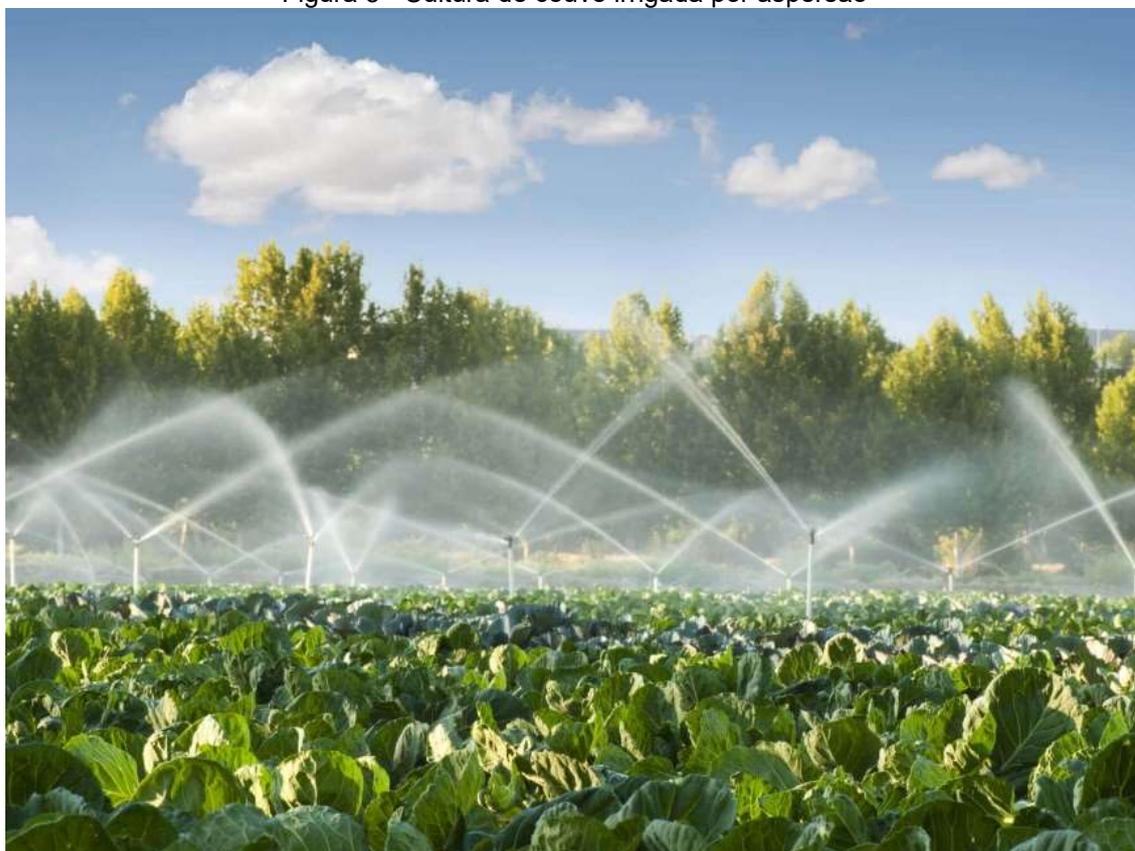
Irrigação sob pressão se refere a todo aquele sistema em que a aplicação da água é feita por um sistema pressurizado, ou seja, pressão acima da atmosférica, através de bomba centrífuga ou até por potencial gravitacional. Esse método pode ser dividido em dois grupos: irrigação por aspersão, que imita uma chuva, e irrigação por gotejamento.

A literatura cita alguns tipos de sistemas de irrigação por aspersão: como aspersão convencional, pivô central, lateral rolante e auto rolante (ou auto propelido).

3.1.2.1. Aspersão

A irrigação por aspersão é uma técnica que simula uma chuva artificial onde um aspersor expelle água para o ar, que por resistência aerodinâmica se transformam em pequenas gotículas de água que caem sobre o solo e plantas, como ilustrado na Figura 3. O aspersor é o mecanismo responsável pela pulverização do jato de água. A irrigação por aspersão se desenvolveu, principalmente, após a segunda guerra mundial, com a produção de tubos de alumínio, leves, e sistemas de acoplamentos rápidos, facilitando o transporte manual, a operação e o manejo dos equipamentos no campo. Atualmente, há muitos modelos de aspersores no mercado e para cada situação a utilização de um tipo ou de outro pode ser recomendada. A maioria dos aspersores utilizados em lavoura tem um giro de 360 graus. São utilizados vários aspersores espaçados igualmente entre si, ao longo de uma tubulação (linha lateral). A linha principal conduz a água até a linha lateral, e a linha adutora conduz até a linha principal. Pode haver várias linhas laterais e várias linhas principais e até mesmo mais de uma adutora, no sistema de irrigação projetado.

Figura 3 - Cultura de couve irrigada por aspersão



Fonte: <https://www.myfarm.com.br/agricultura-irrigada>.

3.1.2.2. Gotejamento

A irrigação por gotejamento, assim como por aspersão, é um método que conduz água para a planta através de um tubo de plástico. Nesses tubos são colados internamente, ou acoplados externamente, os gotejadores, também conhecidos como emissores (*drips*). Esses tubos ficam dispostos sobre a superfície do solo, suspensos por estacas (muito comum em pomares) para evitar entupimento e facilitar a passagem de máquinas, ou abaixo dele, através do uso de tubos enterrados. A principal vantagem do sistema de gotejamento é a eficiência do uso da água (EUA).

Este é o método mais eficiente comparado com todos os demais (EUA de 95% por gotejamento, 60% inundação, 65% Sulcos, 80% irrigação por aspersão convencional (ANA 2021) por isso economiza água e nutrientes. Na pode-se verificar a disposição dos tubos de irrigação por gotejo sobre o solo. É possível perceber a localização dos emissores no centro de cada bulbo úmido formado no solo, evidenciando o quão localizado o método pode irrigar.

Figura 4 - Cultura de couve irrigada por aspersão



Fonte própria do autor.

Esse método se baseia em baixa vazão e alta frequência, ou seja, doses aplicadas em curto espaço de tempo várias vezes na semana ou até mesmo mais de uma vez no mesmo dia. A vazão utilizada no sistema irá depender do número e da vazão dos emissores que funcionam simultaneamente. Já a vazão dos emissores mais convencionais dependerá da pressão da água na saída dos mesmos. Como há perda de carga linear e localizada ao longo da tubulação, e desnível no terreno, as pressões da água serão diferentes ao longo da tubulação, e conseqüentemente, as vazões também serão diferentes nos emissores. A diferença de pressão entre o início e o final da tubulação admitida para haver uma boa uniformidade de irrigação é de 20% do valor da pressão no início da tubulação. Quando essa situação não é atingida deve-se redimensionar o sistema tomando-se medidas para diminuir a perda de carga (aumentando o diâmetro da tubulação ou diminuindo o comprimento desta).

Caso não seja possível diminuir a diferença de pressão entre o início e o final da tubulação, devido ao desnível do terreno, para garantir a mesma pressão, e conseqüentemente a mesma vazão ao longo de todas as tubulações em toda a área, pode-se utilizar os gotejadores autocompensantes, que tem um mecanismo que garante a mesma vazão desde que a pressão da água que chega no emissor esteja dentro da faixa de trabalho explicitada no catálogo do fabricante.

3.2. EVAPOTRANSPIRAÇÃO

O conceito de evapotranspiração (ET) consiste no processo de difusão da água do estado líquido para o estado gasoso, transportando água do solo para a atmosfera através da planta (Sistema Solo-Planta-Atmosfera) em função de diferença de potencial hídrico, podendo ser:

- Transporte da água do solo para a planta através das raízes;
- Transporte da água líquida através do caule até as folhas;
- Mudança de estado físico da água (líquido-gasoso) na cavidade sub-estomatal;
- Liberação do vapor d'água da folha para a atmosfera.

O fenômeno corresponde ao conjunto de dois processos que ocorrem: evaporação e transpiração; a evaporação está relacionada à transferência diretamente de superfícies líquidas, como lagos, rios, reservatórios ou até mesmo do

solo; a transpiração envolve a retirada de água do solo pelas raízes e passagem para a atmosfera através dos estômatos.

Normalmente os processos de evaporação e transpiração ocorrem simultaneamente (apesar de apresentarem escalas temporais e espaciais distintas), em áreas relativamente grandes é difícil saber cada parcela em separado.

Pode-se medir a evapotranspiração principalmente através de dois instrumentos: lisímetros, também conhecidos como evapotranspirômetros, consistem basicamente em tanques enterrados e abertos na parte superior, preenchidos com o solo e a vegetação características dos quais se deseja medir a evapotranspiração, dessa forma, o tanque é pesado após um evento de chuva ou diariamente para medir a diferença do balanço hídrico, obtendo a perda de água ao longo dos dias que sucedem o evento de chuva ou estimá-la através de equações e expressa em milímetros (mm) em razão do tempo, que pode ser horas ou dias por exemplo.

Outra forma de se calcular o valor de evapotranspiração é através de algumas equações, algumas com base física e outras com base empírica, sendo a Equação de Penman-Monteith a principal equação de evapotranspiração de base física, apresentada na sua formulação geral por (1), podendo ser obtida a partir de representações simplificadas do fluxo de calor latente e sensível a partir de uma superfície úmida, combinadas à equação de balanço de energia em uma superfície, sendo esta, a equação utilizada para o presente projeto, objeto de estudo tratado neste relatório.

$$E = \left(\frac{\Delta \cdot (R_L - G) + \rho_A \cdot c_p \cdot \frac{(e_s - e_d)}{r_a}}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \right) \cdot \frac{1}{\lambda \cdot \rho_w} \quad (1)$$

Onde:

- E (m/s) taxa de evaporação da água;
- λ (MJ/kg) calor latente de vaporização;
- Δ (kPa/C) taxa de variação da pressão de saturação do vapor com a temperatura do ar;
- R_L (MJ/m².s) radiação líquida que incide na superfície;
- G (MJ/m².s) fluxo de energia para o solo;

ρ_a (kg/m ³)	massa específica do ar;
ρ_w (kg/m ³)	massa específica da água;
c_p (MJ/kg.C)	calor específico do ar úmido ($c_p = 1,013 \cdot 10^{-3}$ MJ/kg.C);
e_s (kPa)	pressão de saturação do vapor;
e_d (kPa)	pressão real de vapor de água no ar;
γ (kPa/C)	constante psicrométrica ($\gamma = 0,066$, aproximadamente);
r_s (s/m)	resistência superficial da vegetação;
r_a (s/m)	resistência aerodinâmica.

3.2.1. Evapotranspiração Potencial

Evapotranspiração Potencial (ETP): É o total de água que é transferida do solo, passando pela planta, para a atmosfera pelos processos conjuntos de evaporação e transpiração, por unidade de tempo, de uma superfície extensa completamente coberta de vegetação de porte baixo e bem suprida de água (Penman, 1956).

3.2.2. Evapotranspiração Real

É a soma total da transferência de vapor para a atmosfera que é evaporada pela superfície e transpirada pelas plantas nas condições atuais de parâmetros atmosféricos, umidade do solo e tipo de vegetação. Ou seja, é a evapotranspiração real que ocorre na planta em condições reais, e não ideais, de umidade e fertilidade do solo.

3.2.3. Evapotranspiração de Referência

Evapotranspiração de referência (ET_{rf} ou ET_o), em substituição ao termo Evapotranspiração potencial (ETP), é um parâmetro climático que expressa o poder de evaporação da atmosfera. Os únicos fatores que afetam a ET_o são os parâmetros climáticos. Conseqüentemente, é um parâmetro climático e pode ser calculado a partir de dados meteorológicos. (Allan; Pereira; Smith, 1998).

O método FAO Penman-Monteith é recomendado porque se aproxima da ET_o da grama no local avaliado, é baseado fisicamente e incorpora explicitamente parâmetros fisiológicos e aerodinâmicos. Além disso, foram desenvolvidos procedimentos para estimar parâmetros climáticos que não apresentados dados

observados, como modelo padrão para quantificar a demanda atmosférica de evapotranspiração.

• A cultura de referência utilizada é uma cultura hipotética, cujas características se assemelham a grama com características específicas. Isto permite que tais características se mantenham como parâmetros constantes adotados no cálculo da ET_{rf} ou ET_o. Estes parâmetros para uma cultura hipotética são:

- altura de 0,12 m;
- albedo igual a 0,23;
- resistência superficial igual a 70 s/m;
- sem restrições hídricas.

Logo, a ET_o é um elemento indicativo da demanda hídrica das culturas de um determinado local e período [padronização adotada em cultivos agrícolas] que pode ser determinado através de (2)- Equação para determinação da evapotranspiração de referência apresentada por Allen et al (1998).

$$ET_o = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T_{med} + 273} \cdot U_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot U_2)} \quad (2)$$

Em que,

ET_o evapotranspiração de referência (mm/d)

R_n saldo de radiação à superfície da cultura (MJ/(m² d));

G densidade do fluxo de calor do solo (MJ/(m² d));

T_{med} temperatura do ar a 2 m de altura (°C);

U₂ velocidade de vento a 2 m de altura (m/s);

e_s pressão de vapor de saturação (kPa);

e_a pressão parcial de vapor (kPa);

Δ declividade da curva de pressão de vapor de saturação (kPa °C⁻¹);

γ coeficiente psicrométrico (kPa °C⁻¹).

3.2.4. Evapotranspiração potencial da Cultura (ET_c)

A ET_c é determinada a partir do produto da evapotranspiração de referência (ET_o), do coeficiente da cultura (K_c), que varia de acordo com o tipo de cultura e seu

estágio fenológico (Moura et al., 2013) e do fator de disponibilidade hídrica do solo (K_s), como pode-se observar na (3):

$$E_{tc} = E_{t0} \cdot K_c \cdot K_s \quad (3)$$

Considerando a evapotranspiração de referência, e o K_c pode-se estabelecer a evapotranspiração potencial da cultura (E_{Tc}) em cada fase de seu desenvolvimento, sem restrição hídrica, em condições ótimas de crescimento. Assim a E_{Tc} depende das condições meteorológicas (expressas por meio da E_{T0}) e das características da cultura ao longo de seu ciclo (maior ou menor resistência à disponibilidade hídrica, índice de área foliar (IAF), desenvolvimento das raízes, época de enchimento de grãos, etc.

3.3. DADOS DA CULTURA - ILEX PARAGUARIENSIS

A erva-mate (*Ilex paraguariensis*) é uma espécie arbórea endêmica da América do Sul de cultura perene, cujo consumo iniciou-se com os povos nativos e, posteriormente, foi adotado pelos colonizadores.

Seu habitat ocupa o nordeste da Argentina, o leste do Paraguai e o sul do Brasil, abrangendo uma área com cerca de 540.000 km², entre as latitudes 21°S e 30°S e as longitudes 48°W e 56°W. Possui dois tipos climáticos conforme a classificação de Köppen: Cfb (clima temperado) e Cfa (clima subtropical), com chuvas regulares, bem distribuídas ao longo do ano e com médias de precipitação pluviométrica variando de 1.500 mm a 2.000 mm, e em altitudes que variam de 500 a 1.500 m de altitude, onde as temperaturas médias anuais variam de 15° C a 18° C e as geadas são frequentes ou pouco frequentes, dependendo da altitude. No Brasil, está distribuída nos estados do Mato Grosso do Sul, Paraná, Rio Grande do Sul e Santa Catarina, com nichos reduzidos em Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo (GOULART; SANTIN; BRASILEIRO, 2022). Na Figura 5 é apresentado um pé de erva-mate plantado na fazenda Ervais do Futuro em que foi implementado o sistema de irrigação por gotejamento, localizada no município de Espumoso no estado do Rio Grande do Sul.

Figura 5 - Pé de erva-mate em bom estágio para corte, ultrapassando 2 metros de altura. Fazenda Ervais do Futuro

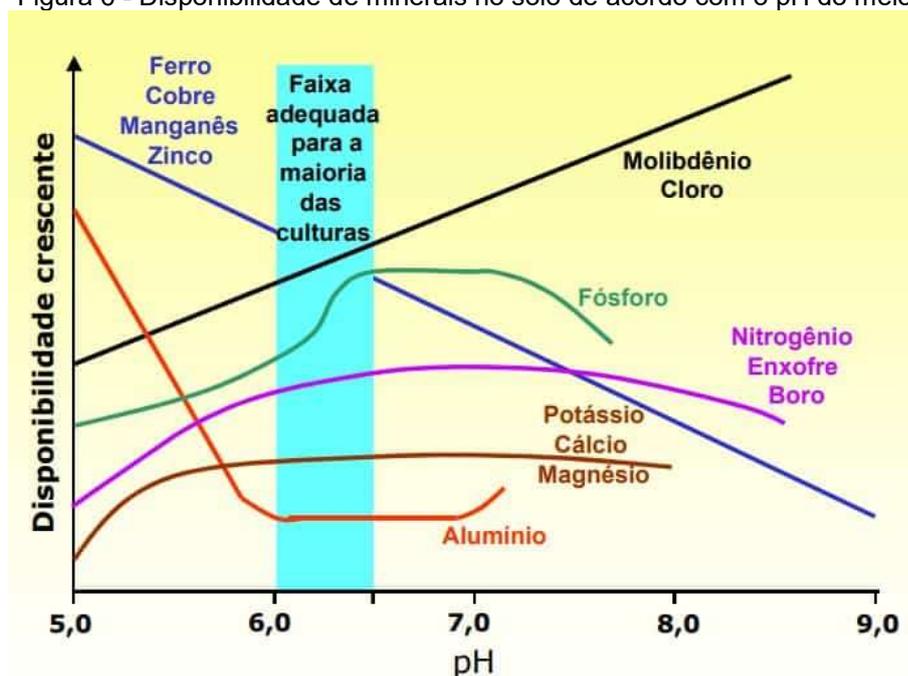


Fonte: própria do autor.

São considerados solos aptos para o plantio da erva-mate aqueles que apresentam textura argilosa, com boa profundidade e drenagem adequada.

A espécie ocorre naturalmente em solos de baixa fertilidade, com altos teores de alumínio e pH baixo (Medrado et al., 2000). Muito foi debatido, durante a implantação e acompanhamento do projeto, qual seria o valor ideal do pH do solo para o cultivo da erva-mate. A princípio, essa espécie se adapta bem em solos ácidos, pH abaixo de 7, contudo muitas enzimas presentes na erva-mate não atuam em pH abaixo de 5, então deve-se ater ao quão baixo o pH do solo deve ser mantido durante o cultivo. Além das enzimas, os minerais se dispõem mais facilmente no solo em uma faixa de pH entre 6 e 6,5 como pode ser observado na Figura 6.

Figura 6 - Disponibilidade de minerais no solo de acordo com o pH do meio



Fonte: Adaptado de Malavolta (1979).

Por essas razões, a erva-mate se desenvolve bem nessas condições (pH entre 6 e 6,5), desde que a umidade e os teores de macronutrientes (nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio) sejam ideais no solo (Wendling; Santin, 2015). A adubação dos solos cultivados com erva-mate é necessária quando a atividade tem o cunho comercial, com colheitas e comercialização de matéria-prima, independentemente de ser manejada de forma convencional ou orgânica.

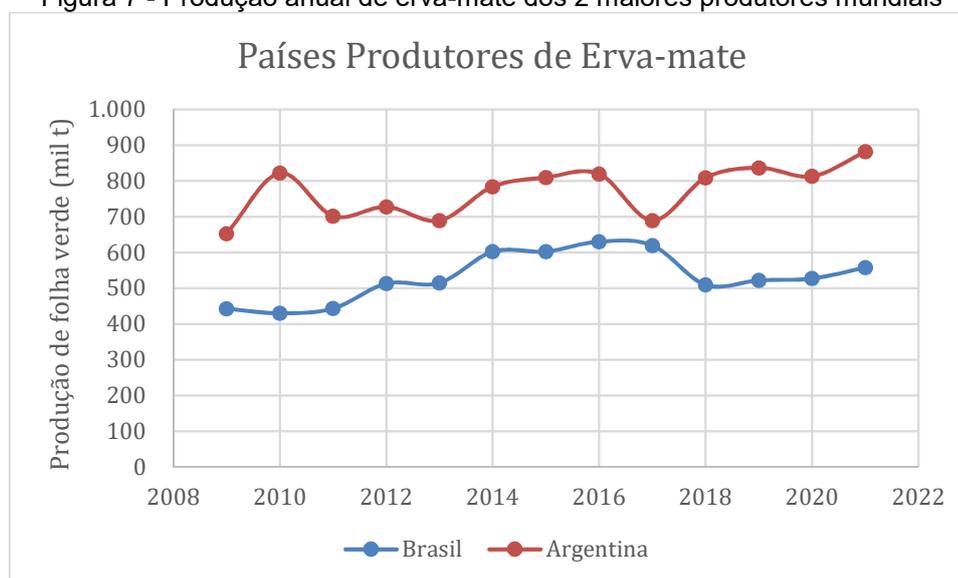
Uma erva-mate considerada de boa qualidade, deve manter os níveis dos compostos encontrados em suas folhas e preservar suas características sensoriais no aroma e no sabor para a produção de chá. A autora Gabira *et al.*, [s. d.] (2023) em seu experimento: CEVAD campo: cultivo de erva-mate em alta densidade no campo, relata que a colheita foi composta em média por 75% folhas e 25% ramos finos:

“A baixa proporção de ramos finos indica uma vantagem do manejo com podas frequentes. Foi observada também grande produção de brotações e folhas jovens [...]. Essa matéria-prima é diferenciada, possuindo alta concentração de compostos bioativos como cafeína e ácidos cafeoilquínicos.”

O mercado busca por folhas sem ataque de pragas, fungos ou ácaros, podendo chegar a criar um *terroir*, análogo ao mercado do café por exemplo.

Historicamente, a exploração comercial da erva-mate foi responsável por um dos principais ciclos da economia brasileira, e estimulou o surgimento e o desenvolvimento de diversas cidades na região Sul brasileira. Atualmente, o cultivo dessa espécie ainda representa importante potencial econômico, social e ecológico à região, sendo o Brasil o segundo maior produtor mundial com quase 558 mil t produzidas em 2021, atrás da Argentina com 882 mil t. produzidas no mesmo ano de acordo com dados do IBGE e INYM com dados que podem ser visualizados na Figura 7.

Figura 7 - Produção anual de erva-mate dos 2 maiores produtores mundiais

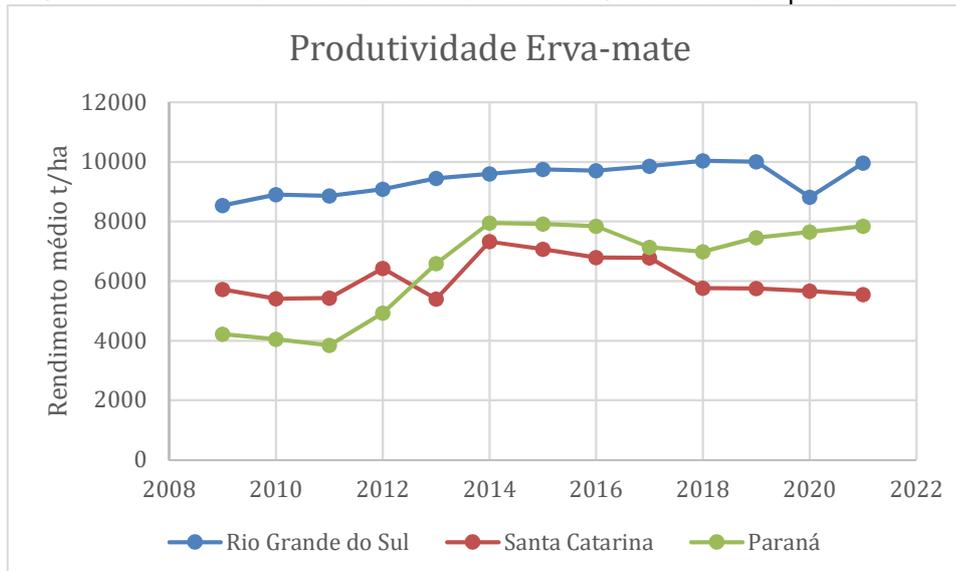


Fonte: adaptado de IBGE, Produção Agrícola – Lavoura Permanente e INYM. *Estadísticas del Sector Yerbatero*.

Entretanto, o desempenho produtivo dos ervais cultivados no Brasil vem diminuindo ao longo dos últimos anos, apesar das tecnologias de produção à disposição dos produtores (GOULART; SANTIN; BRASILEIRO, 2022). Nas últimas décadas a produtividade dos ervais brasileiros vem diminuindo, mesmo com adoções de algumas boas práticas de cultivo e manejo. Atualmente a média da produtividade da erva-mate não ultrapassa 7,7 t/ha (CARMO et al., 2018; IBGE, 2020a), sendo que inovações tecnológicas estão disponíveis para proporcionar níveis de produtividade acima de 20 t/ha. A Figura 8 apresenta o rendimento médio entre os três estados com maior produção de erva-mate no Brasil: Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná, com valores entre 4 e 10 mil t/ha, enquanto que, em áreas experimentais, esse valor tem sido superior a 18 t/ha, podendo alcançar valores de até 35 t/ha (Lourenço, 1997;

Lourenço; Medrado, 1999; Santin et al., 2017). Essa situação tem desestimulado os produtores, que acabam substituindo o cultivo da erva-mate por outras atividades. Segundo MAYOL et al., (2014, p.1. *apud* MASLOFF, 2013), as principais causas da diminuição da produtividade dos ervais são fatores como o esgotamento da fertilidade do solo, o ataque de pragas, a competição com plantas daninhas, as podas excessivas, entre outros.

Figura 8 - Rendimento médio anual de erva-mate dos 3 estados mais produtivos no Brasil



Fonte: adaptado de IBGE, Produção Agrícola – Lavoura Permanente.

A diferença de produtividade entre ervais comerciais e experimentais se deve, entre outros fatores, à baixa adoção de tecnologias ou baixa tecnificação dos ervais comerciais. Muitas práticas e tecnologias não são aplicadas no campo, o que limita fortemente a obtenção de produtividade e qualidade de matéria-prima. Os avanços tecnológicos e científicos, embora já existam, enfrentam dificuldades para serem multiplicados e transferidos à comunidade ervateira e demoram a ser assimilados no processo exploratório da erva-mate (MELO, 2010). A falta de informações que partem dos estudos e pesquisas e chegam ao campo, aliado ao “conservadorismo” preservam métodos do manejo, limitando a produtividade e a qualidade dos ervais. No entanto, a produtividade é o resultado do sistema de produção exercido, onde cada prática de manejo tem sua importância relativa, de forma que, se qualquer uma for negligenciada, o potencial produtivo não é alcançado, assim, a adoção de tecnologias de forma isolada não é suficiente para o alcance de melhores produtividades (PENTEADO JUNIOR, J. F., 2019).

Quando ocorre a perda de mudas, que pode ser por falta de água, deve-se replantá-las e isso traz uma desuniformidade muito grande para o erval, visto que as novas mudas passam a coexistir com as mudas mais antigas. Isso dificulta a poda das plantas e os tratamentos fito sanitários, pois haverá na área plantas em diferentes estádios de desenvolvimento, que necessitam de diferentes tratamentos, tornando a área de cultivo menos rentável.

O cultivo de erva-mate vem se reinventando ao longo da sua história, com histórico extrativista o cultivo de erva-mate no Brasil tem pouco aporte tecnológico em comparação com outras culturas (Gerhardt, 2003), passando a ser cultivado como monocultura sob pleno sol; depois por ervais arborizados, forma de cultivo em que coexistem a cultura de interesse com espécies de eucalipto ou *pinnus* em remanescentes de florestas nativas a cultura pode se beneficiar do sombreamento e por último (Goulart et al., 2022a; Penteado Junior; Goulart, 2019), podendo chegar ao adensamento de ervais, de forma em que tanto a distância entre linhas de plantio quanto entre plantas diminui em torno de três vezes, fazendo com que o mesmo hectare produza ainda mais a folha verde que será comercializada.

Ainda existem poucos estudos que compare essas novas formas de cultivo para que se convirja a uma melhor forma de se cultivar erva-mate, mas sabe-se que essas visam aumentar a produção, embora uma série de novas medidas são recomendadas, ou até necessárias, para o crescimento da planta, como o sombreamento por estacas no colo da muda para diminuição da evapotranspiração, por exemplo. Mesmo com o cultivo sombreado, a umidade do solo decai muito com a incidência da radiação solar e também por ação do vento, muitas vezes negligenciada, mas muito importante para o balanço hídrico. Em meio a este cenário, é que a irrigação tem o papel indispensável, podendo se tornar protagonista para o sucesso do cultivo da erva-mate.

A irrigação deve ser feita de maneira que não cause problemas como erosão do solo e excesso hídrico, e o sistema de irrigação deve ser bem elaborado, levando em conta as questões socioambientais do produtor. O projeto deve considerar questões técnicas e ambientais, mas também respeitar as preferências do produtor, como por exemplo, decidir se a irrigação será automatizada ou manual, se será

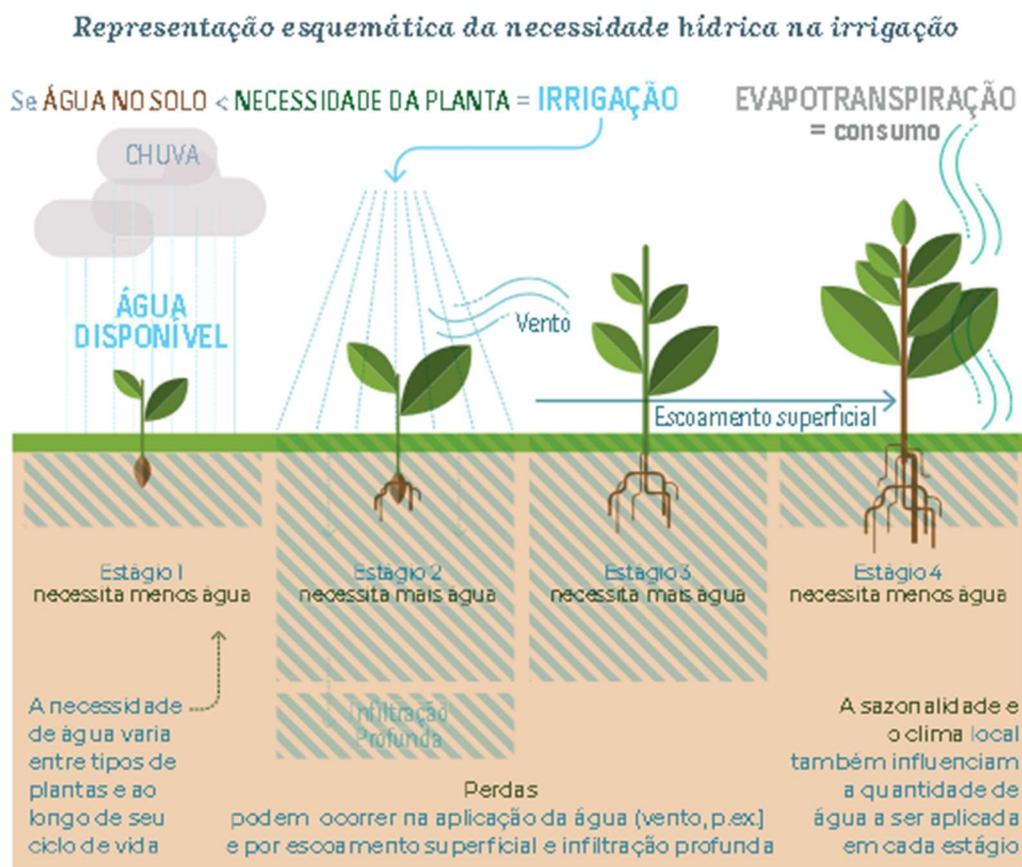
irrigada toda a área simultaneamente ou dividida em setores, se o sistema será enterrado ou ficará na superfície do solo, etc.

A erva-mate é uma espécie raramente encontrada em areias quartzosas (solos com menos de 15% de argila) e também não ocorre em solos encharcados (hidromórficos). Todavia, tem ocorrência esparsa em solos rasos. Os efeitos negativos dos solos rasos aos plantios são acentuados em períodos de deficiência hídrica, podendo causar a morte de plantas (Medrado et al., 2000) se essas não forem irrigadas.

Como medida de conservação do solo pode-se cultivar outras culturas entre as linhas de erva-mate como o amendoim forrageiro, e aveia que formam uma cobertura sobre o solo bem fechada, ou então o sorgo que pode ser utilizado para sombreamento por ser mais alto que as mudas de erva-mate, de forma a auxiliá-la na sua fase inicial em campo a pleno sol. Na fazenda Ervais do Futuro essa prática é realizada com bons resultados.

Os dados climáticos informam qual o suprimento de água da chuva para as plantas e qual a evapotranspiração potencial de uma região. Cada cultura necessita de uma quantidade de água e em cada fase de desenvolvimento da mesma cultura essa quantidade varia. Essa informação é agregada para se calcular a evapotranspiração real da cultura, ou seja, o suprimento hídrico necessário para seus processos fisiológicos naquele clima local. Na Figura 9 a seguir é representado um esquema da necessidade hídrica da planta:

Figura 9 - Representação esquemática da necessidade hídrica da planta na irrigação



Fonte: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Ministério do Desenvolvimento Regional, (2021).

O clima e a cultura, em conjunto com informações sobre o solo, auxiliam na estimativa da disponibilidade de água no solo e da precipitação efetiva (água da chuva que a planta consegue efetivamente aproveitar). A irrigação visa suplementar o que a planta necessita, ou seja, complementa o que é fornecido pelas demais fontes (solo e chuva). Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. Ministério do Desenvolvimento Regional, (2021).

O K_c é calculado com base no estágio de crescimento da planta, como ilustra a Tabela 1, varia, mas para culturas perenes como a erva-mate esse valor se mantém constante, no caso da erva-mate possui valor médio de $K_c=1$, conforme Tabela 1 de trecho retirado da publicação Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada. 2a. edição. Brasília: (ANA, 2021).

Tabela 1 - Coeficiente de cultura (Kc)

Código Prodlist	Nome	Coeficiente de cultura (kc) médio	Profundidade radicular efetiva (Z) (m)	Fator de disponibilidade de água (f)
1399040	Erva-mate (folha verde)	1	0,9	0,4

Fonte: Adaptado de: COEFICIENTES TÉCNICOS DE USO DA ÁGUA PARA A AGRICULTURA IRRIGADA. BRASÍLIA. (ANA, 2019).

Para ervateiros que planejam cultivar a erva-mate para produção e comercialização de folhas, uma pequena muda que chegou do viveiro agora plantada a campo leva em média cinco anos e dois meses para estar apta a primeira colheita, de acordo com o Instituto Brasileiro de Erva-Mate (Ibramate), a partir daí, a colheita passa a ser anual ou bianual, dependendo do tipo de poda que será realizada para a retirada das folhas e ramos.

Com base na experiência obtida durante a realização do projeto de irrigação para a fazenda Ervais do Futuro, em três anos a cultura já está apta para a primeira colheita para comercialização, passando por poda de formação e manutenção ao longo desse período visando uma maior produção e homogeneidade do erval; relatos da equipe de que após a primeira colheita, a poda normalmente é realizada a cada dezoito meses, embora com a implantação do sistema de irrigação a resposta da cultura tenha sido mais rápida, realizando podas posteriores em doze meses.

3.4. MONITORAMENTO DA UMIDADE DO SOLO

É importante monitorar o manejo do sistema de irrigação para que não ocorra, como mencionado anteriormente, a falta de água. O monitoramento da umidade do solo pode ser feito utilizando por exemplo, tensiômetros, que são equipamentos de baixo custo (aproximadamente R\$ 150,00. Média de preço consultado no primeiro semestre de 2023). Já, um método indireto para avaliar a umidade do solo na plantação de erva-mate é a observação atenta das folhas. Essa observação pode indicar se a planta está sofrendo um estresse ou excesso hídrico. A seguir serão abordados esses dois métodos de monitoramento da umidade do solo.

3.4.1. Umidade do solo - Tensiômetro

O tensiômetro, aparelho desenvolvido por Gardner em 1922 (Camargo et al., 1982), é empregado para medir a tensão com que a água é retida pelas partículas do solo, também conhecido por potencial matricial. Dispondo-se da relação entre o conteúdo de água no solo e a tensão em que ela se encontra, pode-se estabelecer, indiretamente, o teor de água no solo a partir das leituras desse aparelho. Segundo Campbell & Mulla (1990), de todos os métodos disponíveis para conhecimento dos potenciais de água no solo em irrigação, o tensiômetro é talvez o mais utilizado.

Em comparação com outros métodos de controle da irrigação, o tensiômetro tem como vantagens: o conhecimento em tempo real da tensão de água no solo e, indiretamente do teor de água no solo; utilização do conceito de potencial, medindo diretamente a energia de retenção da água pelo solo; facilidade de uso, desde que convenientemente instalado, mantido e interpretado; custo relativamente baixo e o fato de ser facilmente encontrado no comércio. Isso tudo possibilita uma maior aplicação deste equipamento por parte de agricultores irrigantes.(DE AZEVEDO, 1999).

O tensiômetro consiste em uma cápsula porosa, geralmente de cerâmica ou porcelana, conectada a um medidor de vácuo (que pode ser um vacuômetro metálico ou um manômetro de mercúrio) através de um tubo plástico ou de outro material, tendo todas as partes preenchidas com água (Figura 10).

Figura 10 - Tensiômetro analógico com vacuômetro



Fonte: Própria do autor.

A cápsula porosa é permeável à água e aos solutos na solução do solo, sendo, entretanto, impermeável a gases e à matriz do solo, até determinado nível de tensão. A água dentro do tubo é, aos poucos, absorvida pelo solo quando esse não está saturado, sendo exercida uma sucção no tubo, que pode ser lida através do manômetro por um observador. A água deve ser reposta no tubo com uma frequência adequada para que o tubo nunca fique seco. Segundo Campbell & Mulla (1990), esse tensiômetro consiste unicamente em uma cápsula porosa e um tubo cheio de água com sua extremidade superior tampada com uma rolha de borracha.

Outra versão de tensiômetro, mais avançada em termos do processo de medida da tensão estabelecida em seu interior, é o que usa um transmissor eletrônico de pressão com saída digital, conhecido como tensímetro digital, como ilustrado na Figura 11.

Figura 11 - Tensímetro digital



Fonte: <https://www.doutorirrigacao.com.br/medicao-e-instrumentacao/tensimetro-medidor-digital-de-umidade-do-solo-blumat--p>.

Dessa forma como descrito, o tensiômetro possui tipicamente dois tipos de leitores: analógicos e digitais. Durante a leitura, o tensímetro digital é conectado ao tensiômetro por meio de uma agulha inserida através da rolha, sensibilizando o medidor imediatamente. Utilizando esse tipo de equipamento de sistema, é possível atender a um grande número de tensiômetros instalados no solo em campo com um único medidor ou até mesmo ser utilizado nos modelos que já possuem manômetros analógicos instalados, caso o outro apresente algum defeito, queira conferir a medição ou calibrar o instrumento, visto que o tubo é o mesmo com a mesma tampa de silicone para vedação.

O valor da tensão de água no solo é calculado a partir da leitura do tensiômetro e depende principalmente da profundidade de instalação da cápsula porosa no solo. A Tabela 2, adaptada de James (1988), traz alguns valores de pressão medidos pelos instrumentos relacionados à condição em que se encontra o solo e sua interpretação. Salienta-se que essa é uma tabela indicativa. Especial atenção deve ser dada, principalmente em relação ao momento de irrigar, pois deve-se considerar o limite hídrico inferior da cultura, que varia para cada tipo de planta.

Tabela 2 - Intervalo indicativo de pressão.

Leitura		
Condição (kPa)		Interpretação
Saturação	0	Acumulação de água; Nível freático raso; Aeração prejudicada; Tensiômetro com vazamento.
Capacidade de campo	6 a 10	Ponto para interrupção das irrigações. Evitar percolação e lixiviação de nutrientes.
Momento de aplicação	20 a 40	Irrigações dirigidas para produtividade máxima e culturas de maior valor econômico e solos arenosos;
	40 a 50	Valor usual para irrigações; Aeração assegurada; Solos de textura média.
Intervalo de irrigação	50 a 60	Início de irrigação em solo argiloso; Manutenção da umidade disponível.
Seco	70 a 80	Valor de início de déficit hídrico; Alguma umidade disponível; Risco de perda de produção.

Fonte: adaptado de James (1988).

3.4.2. Análise foliar da planta

Outra forma com que se pode monitorar o manejo do sistema de irrigação é através do comportamento do próprio erval. Um método muito subjetivo, mas que aliado ao monitoramento da umidade do solo mencionado no item anterior, se torna uma medida potencializadora da produção para a cultura realizar uma análise foliar do erval.

Mantendo-se por muito tempo em condições de saturação do solo ou ainda umidade do solo mais alta que a capacidade de campo, a planta se torna muito suscetível a pragas e doenças.

O excesso de umidade do solo, com valores que ultrapassem a capacidade de campo ou até mesmo cheguem na saturação, é a principal causa de doenças fúngicas, por isso, ressalto a importância do correto manejo e funcionamento do sistema de irrigação. A seguir menciono as principais doenças causadas pelo excesso de umidade no solo ou no ambiente, para que se tenha atenção à incidência generalizada ou frequente delas e possam ser identificadas e controladas de forma rápida e eficiente. São elas:

Antracnose: Causada pelo fungo *Colletotrichum* sp, nas brotações e ramos jovens, ápices e folhas surgem sinais do patógeno na forma de massas de conídios de coloração amarelo alaranjada, como ilustrado na Figura 12. Nas sementeiras, geralmente ocorre a queima do ápice das plântulas, impedindo o seu crescimento.

Figura 12 - Folha de erva-mate apresentando doença de Antracnose



Foto: Celso Garcia Auer

Fonte: PENTEADO JUNIOR, J. F., 2019.

Além da Antracnose, outra doença que pode ser causada pelo excesso de umidade é a Fuligem. Os sintomas são observados na face ventral das folhas, onde ocorrem manchas superficiais escuras de forma circular que podem cobrir totalmente a folha.

A fumagina, caracteriza-se pela presença de uma crosta espessa e negra cobrindo total ou parcialmente a parte dorsal das folhas e ramos da erva, prejudicando sua respiração, transpiração e fotossíntese, podendo levá-la à morte.

A Roseliniose apresenta sintomas visíveis na parte aérea da planta são a redução no crescimento, o amarelecimento, a murcha das folhas, a seca e a morte de perfilhos que saem da base do tronco. Os sintomas nas raízes são observados na forma de necrose e escurecimento dos tecidos. A pinta preta é causada pelo fungo *Cylindrocladium spathulatum*. Os sintomas aparecem como lesões foliares escuras, arredondadas, no interior ou nas bordas do limbo.

Além dessas, as duas principais doenças causadas principalmente pelo encharcamento do solo, ocasionado por uma soma de fatores, irrigação em excesso ou longos períodos de chuva com solo mal drenado, resultando em falta de aeração, é a podridão das raízes e do tronco, tendo como principais agentes os fungos são *Fusarium sp.*, *Rhizoctonia sp.* e *Phytium sp.* nas raízes e fungos basidiomicetos (cogumelos) nos troncos. Os sintomas manifestam-se na parte aérea, na forma de manchas foliares, amarelecimento, queda de folhas, redução do crescimento, murcha e secamento das mudas. No sistema radicular, surgem lesões necróticas que provocam o escurecimento e a podridão. A Figura 13 ilustra bem um caso de muda que apresenta a doença da pinta preta, somado à podridão das raízes e queda das folhas com sinais de necrose.

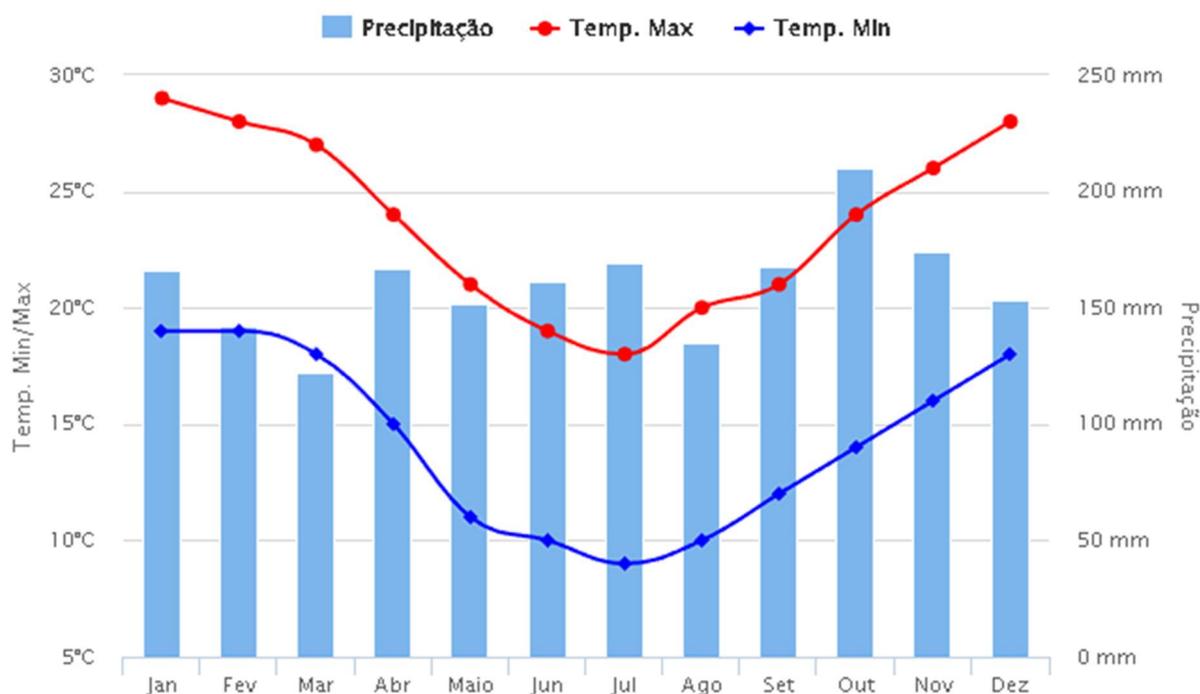
Figura 13 - Muda de erva-mate com sinais claros de queda das folhas, além de necrose no tronco e raízes



Fonte: própria do autor.

de 1993 a 2023), a precipitação média anual é de 1.800 mm, distribuídos mensalmente (Gráfico 4). As temperaturas médias das mínimas e média das máximas mensais, com variação entre 8 °C em julho e de 29°C em janeiro (Figura 15).

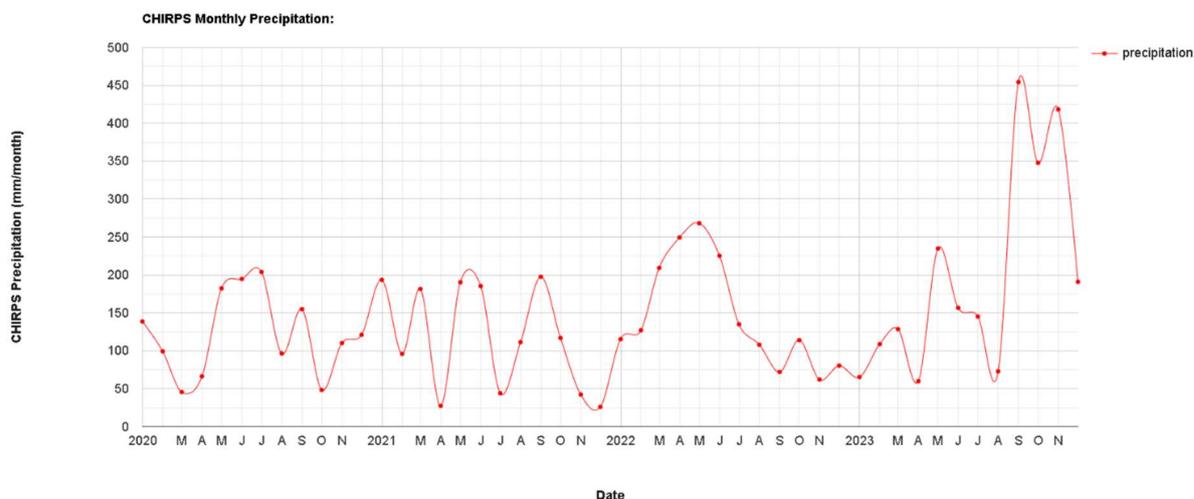
Figura 15 - Dados com a média mensal da precipitação, temperatura máxima e mínima ao longo de 30 anos.



Fonte: Climatempo, (2024).

A precipitação média mensal, de acordo com a série histórica de longo prazo, foi de 159,92 mm/mês. No entanto, esse valor apresenta variações significativas de ano para ano, como observado nos anos de *La Niña*, como em 2020, 2021 e 2022, com médias de 121,81 mm/mês, 117,69 mm/mês e 147,16 mm/mês, respectivamente. Em contraste, durante o ano de *El Niño*, como em 2023, a média foi de 198,62 mm/mês, conforme demonstrado na Figura 16.

Figura 16 - Série de dados de precipitação entre 2020 e 2023



Fonte: Funk, Chris, Pete Peterson, Martin Landsfeld, Diego Pedreros, James Verdin, Shraddhanand Shukla, Gregory Husak, James Rowland, Laura Harrison, Andrew Hoell & Joel Michaelsen. "The climate hazards infrared precipitation with stations-a new environmental record for monitoring extremes". Scientific Data 2, 150066. doi:10.1038/sdata.2015.66 2015.

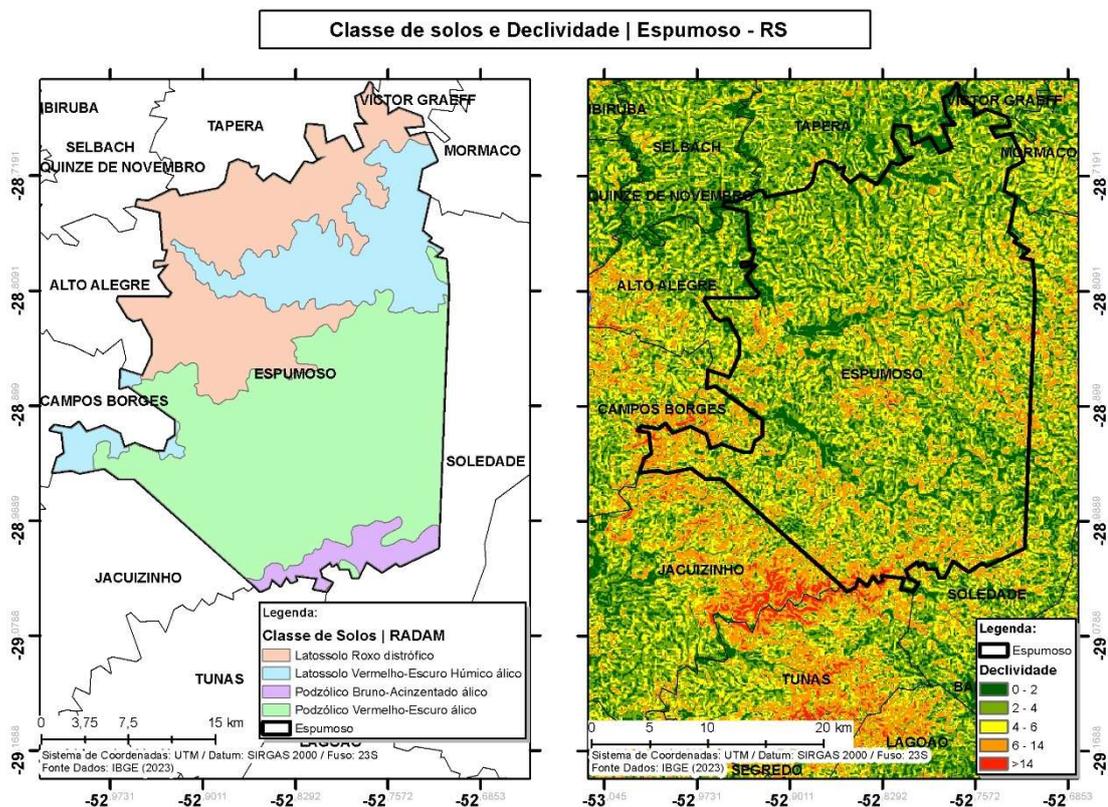
O município apresenta quatro classes de solos: Latossolo Roxo distrófico, Latossolo Vermelho-Escuro Húmico álico, Podzólico Bruno-Acinzentado álico e Podzólico Vermelho-Escuro álico conforme classificação do Projeto RADAM Brasil. Sua declividade está classificada em cinco classes, variando de Plano a Escarpado, conforme Tabela 3, podendo ser visualizada através do mapa da Figura 17.

Tabela 3 - Classes de declividade

Intervalo de declividade (graus)	Classificação
0-2	Plano
3-4	Suave ondulado
5-6	Ondulado
7-9	Forte ondulado
10-14	Montanhoso
>14	Escarpado

Fonte: adaptado de (Lepsch *et al.*, 2015).

Figura 17 - Mapa de classe de solos e Declividade de Espumoso



Fonte: própria do autor.

4.2. DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO

Neste item é apresentada uma metodologia para dimensionar um sistema de irrigação por gotejamento, baseado no conteúdo abordado por (Gomes, H. P., 1997).

4.2.1. Cálculo de dose e turno

Dentre outras formas para qual o sistema de irrigação pode ser dimensionado, duas delas apresentadas neste trabalho se baseiam na forma em que a dosagem de água é aplicada na cultura. Após o início das operações do sistema, pode-se acompanhar e coletar dados de campo para verificar se a estimativa coincide ou se aproxima dos dados observados por meio do monitoramento citado no item 3.4.1.

4.2.1.1. Dose Líquida Máxima

Máxima quantidade de água que se aplica no solo considerando que a irrigação acontecerá quando o solo atingir a umidade correspondente ao limite hídrico inferior da cultura (LHIC) e que seja irrigado até o solo atingir a umidade correspondente à sua capacidade de campo, sendo aplicada até a profundidade do sistema radicular, conforme (4):

$$DL \text{ máx} = (\theta_{cc} - \theta_{LHIC}) \cdot p \quad (4)$$

Onde,

DL máx.= Dose líquida máxima (mm);

θ_{cc} = Umidade volumétrica correspondente à Capacidade de Campo;

θ_{LHIC} = Umidade volumétrica correspondente ao Limite Hídrico Inferior da Cultura;

p = profundidade da raiz (mm).

Pode-se utilizar essa dose líquida máxima e esperar alguns dias (turno) até o solo atingir novamente o LHIC para se realizar uma nova irrigação. Esse método é geralmente utilizado quando o equipamento para irrigação disponível não cobre toda a área, e ele deve ser montado, utilizado em um setor, e depois desmontado e remontado em outro setor. Pode-se levar alguns dias para realizar esse rodízio. Nesse caso, se utiliza a dose líquida máxima diária.

Outra forma de irrigar, é utilizando a dose líquida mínima diária, e como o próprio nome sugere, ela deve ser aplicada diariamente.

Pode-se utilizar qualquer valor entre a dose líquida mínima diária e a dose líquida máxima para a irrigação.

4.2.1.2. Dose Líquida Mínima Diária

Corresponde a quantidade de água que a planta consome em um dia. É calculada, portanto, como sendo o mesmo valor da evapotranspiração potencial máxima diária que a cultura consumiria, em condições ideais de fertilidade e umidade do solo. Se fosse aplicado menos água que esta dose, a planta diminuirá seu crescimento devido à falta de água (estresse hídrico).

$$DL \text{ mín diária} = Eto \cdot kc \quad (5)$$

Onde,

DL min diária = Dose líquida mínima diária (mm);

Eto = Evapotranspiração diária potencial da cultura de referência (grama) (mm/dia);

Kc = coeficiente de cultivo.

O Kc varia ao longo do ciclo da cultura, e a ETo varia ao longo do ano, por isso essa dose terá valores distintos ao longo de seu ciclo. Para a ETo pode-se utilizar dados obtidos de série histórica para a região onde o cultivo está localizado, mas o ideal é obter os dados diariamente de uma estação meteorológica instalada na própria área, ou muito próximo dela. Principalmente nos dias atuais, com as mudanças climáticas, podem ocorrer dias muito quentes no inverno, com valores muito maiores de ETo do que se obteria se retirados de uma série histórica.

A aplicação dessa dose líquida mínima diária é indicada para sistemas automáticos de acionamento, pensando que a operação será feita diariamente, inclusive mais de uma. Nos dias com maior evapotranspiração, podendo demandar muito tempo de mão-de-obra no campo para o irrigante. Mas também pode ser utilizada em sistemas manuais.

4.2.1.3 Dose Bruta

Tendo em vista as duas doses líquidas apresentadas, a quantidade de água captada para cada aplicação traz o conceito de Dose Bruta, levando em consideração as perdas de água por evaporação ou percolação. Idealmente a dose bruta teria o mesmo valor da dose líquida calculada, mas como nenhum sistema apresenta 100% de eficiência do uso da água, o volume de água aplicado é sempre maior que do que a cultura consegue aproveitar. Neste aspecto o sistema de gotejamento é mais vantajoso, por ele ser o mais eficiente se comparado aos demais, chegando aos 95% de EUA. A dose bruta é calculada de acordo com a $Db = \frac{DL}{ef}$:

$$Db = \frac{DL}{ef} \quad (6)$$

Onde,

Db = Dose bruta (mm);

DL = dose líquida (mm);

Ef = eficiência do sistema de irrigação.

4.2.1.4 Turno de Irrigação

O turno de irrigação refere-se à frequência de irrigação, ou seja, de quantos em quantos dias (considerando que a Etc é calculada em mm/dia) será aplicada a dose bruta e pode ser calculado pela Equação 5. Ele só é calculado quando não se aplica a dose líquida mínima diária, pois nesse caso, a irrigação é feita diariamente.

$$Turno = \frac{DL}{Etc} \quad (7)$$

Onde,

DL = Dose líquida que foi aplicada a irrigação. Pode ser a dose líquida máxima diária ou uma dose menor que essa, desde que maior que a mínima diária;

Etc = Evapotranspiração da cultura.

4.2.2. Escolha dos emissores

O mercado dispõe de diversos modelos de emissores que podem ser utilizados no projeto de irrigação e nem sempre fica claro a diferença entre os produtos, quais suas vantagens e desvantagens, por isso é sempre interessante dispor um tempo para conversar com um representante da marca que possa sanar alguma dúvida. Neste trabalho divido a gama de produtos em categorias diferentes de acordo com alguma característica em comum:

Emissores Longos

Estes emissores são muito comuns para irrigar vasos por gotejamento, eles trazem uma versatilidade com relação a locomoção devido aos tubos com estacas nas pontas, podendo acompanhá-los

Figura 18 - Exemplo de irrigação por gotejamento em vaso com emissores de múltiplas saídas: crisântemo (esquerda) e tomate cereja (direita)



Fonte: Testezlaf, Roberto. (2017). Irrigação: métodos, sistemas e aplicações.

Nesse tipo de sistema, uma ponta do tubo é inserida na tubulação ou linha de irrigação e a outra é colocada dentro do recipiente ou vaso, fixada sobre o substrato com o auxílio de um pequeno peso ou de uma estaca de plástico ou madeira. Nestes modelos, o regulador de vazão está localizado na saída da linha principal e ele quem determinará a vazão de rega, lembrando que estes não são autocompensantes, de forma com que uma diferença na altura da estaca pode alterar significativamente a vazão. Estes sistemas são projetados para aplicar água e produtos químicos diretamente sobre o substrato, eliminando assim a irrigação sobre áreas não produtivas e aumentando a eficiência aplicação.

Emissores curtos

A diferença básica entre os emissores longos, é que nestes modelos, não existe um tubo com estaca na ponta, os emissores estão localizados geralmente dentro da própria linha de irrigação, dessa forma o agricultor posiciona o emissor na linha de plantio com espaçamento conforme a distância entre plantas.

4.2.3. Levantamento topográfico da área de interesse

Para que se possa dimensionar o sistema de irrigação, é necessário primeiramente realizar o levantamento topográfico da área de interesse, envolvendo os talhões em que serão ou já está o plantio da cultura, podendo é claro ser mais de uma, além do local de captação de água para o abastecimento do sistema.

4.2.4. Layout do sistema de irrigação

Pode-se dizer que não existe somente um layout para um sistema de irrigação, de forma análoga como é uma redação ou um código de programação, existem várias formas de se escrever e pensando nisso, para cada área de cultivo, existe elaborado um layout distinto. Para um sistema de irrigação eu posso criar um layout de formas diferentes, mas sempre seguindo algumas orientações:

- As linhas laterais devem acompanhar as linhas de plantio. Para áreas de pouco declive e que as linhas de plantio foram feitas em curvas de nível, é possível utilizar gotejadores que não sejam autocompensantes, vantagem por serem mais acessíveis, tanto financeiramente, quanto disponibilidade no mercado. Além é claro, de ser uma medida de boas práticas de manejo e conservação do solo, evitando a lixiviação pelo solo.
- Manter os espaçamentos entre os emissores em cada linha lateral (LL) e também entre cada LL conforme dimensionamento hidráulico e recomendações do fabricante.
- Traçar as linhas minimizando os comprimentos evitando fazer muitas voltas para diminuir perda de carga e gastos desnecessários com tubos.
- É recomendado que se mantenha o mesmo espaçamento entre uma parcela e outra (um conjunto de LP e várias LLs é considerado uma parcela), visto que a vazão de cada parcela é controlada por um registro do qual deverá ser calculado a vazão e a perda de carga a qual estará submetido.

Recomenda-se traçar as linhas do layout de montante para jusante, iniciando onde será captada a água, passando pela adutora, seguindo pelas linhas principais, podendo ser uma ou mais, chegando às linhas laterais e chegando aos emissores. Este é basicamente o sentido que a água fará durante a sua operação.

4.2.5. Dimensionamento das linhas

O dimensionamento hidráulico se dará no sentido inverso que a água percorre até chegar à planta, iniciando pela vazão dos emissores e seguindo pelas linhas laterais.

Neste item será demonstrado os treze passos a serem seguidos para o dimensionamento de cada linha lateral:

1. Vazão da linha lateral

$$Q_{LL} = Q_{emissor} \cdot n^{\circ} \text{ emissores} \quad (8)$$

Sendo:

Q_{LL} = Vazão da linha lateral (m³/s)

$Q_{emissor}$ = Vazão do emissor (m³/s)

2. Diâmetro mínimo da linha lateral

Para comportar a vazão calculada com a velocidade máxima admitida da água dentro da tubulação, é necessário calcular o diâmetro mínimo da linha lateral considerando a velocidade recomendada = 2 m/s, segundo Granados, A. (1990). Velocidades maiores que esse valor além de causarem maior perda de carga podem danificar a tubulação por problemas de golpe de aríete, desgaste nos tubos, nos elementos de conexão e das peças especiais (Gomes, H. P., 1997).

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot Q}{V \cdot \pi}} \quad (9)$$

Sendo:

D = Diâmetro em metros;

Q = Vazão em m³/s.

3. Escolha do diâmetro comercial (Dc) igual ou imediatamente superior ao calculado no passo 2. Usar o diâmetro interno da tubulação.

$$D_{c \text{ interno}} = D_{c \text{ externo}} - 2 \cdot \text{espessura da parede} \quad (10)$$

4. Velocidade de escoamento na linha lateral

$$V = \frac{Q}{\frac{\pi \cdot D^2}{4}} \quad (11)$$

V = Velocidade (m/s);

Q = Vazão m³/s da Linha Lateral (calculada no passo1),

D = Diâmetro comercial interno da tubulação adotado no passo 3.

5. Comprimento da tubulação – L (m)

Para obtermos o comprimento da linha lateral em função do número de emissores, utiliza-se uma das duas equações abaixo de acordo com a posição em que é instalada a linha lateral:

- a) Se o primeiro aspersor estiver na metade espaçamento dos demais aspersores:

$$L = S1/2 + (\text{número emissores} - 1) \cdot S1 \quad (12)$$

- b) Se o primeiro aspersor estiver no mesmo espaçamento dos demais aspersores

$$L = S1 \cdot \text{número emissores}$$

$$\therefore n^{\circ} \text{ emissores} = \frac{L}{S1} \quad (13)$$

Sendo $S1$ a distância entre os emissores.

6. Perda de carga linear unitária – J (equação de Hazen Willians ou de Scobey).

A Perda de carga linear unitária é calculada utilizando-se duas equações, de acordo com o diâmetro interno da linha lateral.

Para LLs com diâmetro maior ou igual a 75mm, deve-se utilizar a equação de Hazen Willians.

$$J = 10,66 \cdot \frac{1}{D^{4,87}} \cdot \left(\frac{Q}{C}\right)^{1,852} \quad (14)$$

Para irrigação por gotejamento, as LLs de modo geral são mangueiras flexíveis com diâmetros menores, entre 16 e 17 mm, para estes, utiliza-se a equação de Scobey:

$$J = \frac{Ks}{387} \cdot \frac{1}{D^{1,1}} \cdot V^{1,9} \quad \text{Eq. 1}$$

Sendo para as duas equações:

D = Diâmetro comercial interno em m (passo 3);

Q = Vazão da Linha Lateral em m^3/s (passo 1);

C = Coeficiente de atrito de Hazen Willians =145 para PVC;

K_s = Coeficiente de atrito de Scobey = 0,32 para plástico e pvc;

V = Velocidade de escoamento (passo 4).

7. Coeficiente de perda de carga F em função do número de emissores (N)

Correção da perda de carga pois usa-se uma vazão (Hazen Willians) e Velocidade (Scobey) constante, mas na verdade a vazão diminui ao longo da tubulação, conforme a água vai saindo dos aspersores. Então utiliza-se a vazão ou a velocidade (se usar Hazen ou Scobey respectivamente) para abastecer todos os aspersores e corrige-se essa vazão com o coeficiente f . Valores apresentados pela Tabela 4.

Tabela 4 - Coeficiente de redução F em função de N, m e da distância entre o primeiro e o último aspersor

N	Hazen m = 1,85		Scobey m = 1,9		Darcy m = 2,0	
	F*	F**	F*	F**	F*	F**
1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
2	0,639	0,519	0,634	0,512	0,625	0,500
3	0,535	0,442	0,528	0,442	0,518	0,422
4	0,486	0,412	0,480	0,405	0,469	0,393
5	0,457	0,397	0,451	0,390	0,440	0,378
6	0,435	0,387	0,433	0,381	0,421	0,369
7	0,425	0,381	0,419	0,375	0,408	0,363
8	0,415	0,377	0,410	0,370	0,398	0,358
9	0,409	0,374	0,402	0,367	0,391	0,355
10	0,402	0,371	0,396	0,365	0,385	0,353
11	0,397	0,369	0,392	0,363	0,380	0,351
12	0,394	0,367	0,388	0,361	0,376	0,349
13	0,391	0,366	0,384	0,360	0,373	0,348
14	0,387	0,365	0,381	0,358	0,370	0,347
15	0,384	0,364	0,379	0,357	0,367	0,346
16	0,382	0,363	0,377	0,356	0,365	0,345
17	0,380	0,362	0,375	0,356	0,363	0,344
18	0,379	0,361	0,373	0,355	0,361	0,344
19	0,377	0,361	0,372	0,355	0,360	0,343
20-21	0,376	0,360	0,370	0,354	0,359	0,342
22-23	0,374	0,359	0,368	0,353	0,357	0,341
24-25	0,372	0,358	0,366	0,352	0,355	0,341
26-27	0,370	0,358	0,364	0,352	0,353	0,340
28-29	0,369	0,357	0,363	0,351	0,353	0,340
30-34	0,368	0,357	0,362	0,351	0,350	0,339
35-39	0,365	0,356	0,359	0,350	0,347	0,338
40-49	0,364	0,355	0,357	0,349	0,345	0,338
50-99	0,361	0,354	0,355	0,348	0,343	0,337
≥ 100	0,351	0,353	0,350	0,347	0,338	0,337

Fonte: (Gomes, H. P., 1997).

* Se o primeiro aspersor estiver no mesmo espaçamento dos demais aspersores;

** Se o primeiro aspersor estiver na metade espaçamento dos demais aspersores.

8. Perda de carga linear - hp linear

$$h_p \text{ linear} = L_{LL} \cdot J \cdot f \quad (15)$$

$h_p \text{ linear}$ = perda de carga linear (m.c.a.);

L_{LL} = comprimento da linha lateral em metros (passo 5);

J = perda de carga linear unitária adimensional (passo 6);

f = coeficiente de correção da perda de carga adimensional (passo 7).

9. Soma de K para o cálculo da perda de carga localizada.

O K corresponde aos coeficientes de perda de carga localizada de cada singularidade presente no trecho da tubulação analisada, sendo seu valor adimensional. A Tabela 5 traz valores de K das peças especiais e conexões mais usuais nas instalações de projetos para irrigação.

Tabela 5 - Perdas de carga localizadas – equivalência em metros de tubulação de PVC rígido ou cobre

Diâmetro nominal		Joelho 90°	Joelho 45°	Curva 90°	Curva 45°	Tê 90° Passagem direta	Tê 90° Saída de lado	Tê 90° Saída bilateral	Entrada normal	Entrada de borda	Saída de canaliz.	Válvula de pé e crivo	Válvula retenção		Registro globo aberto	Registro gaveta aberto	Registro ângulo aberto
DN (mm)	Ref. (pot.)																
15	(1/2)	1,1	0,4	0,4	0,2	0,7	2,3	2,3	0,3	0,9	0,8	8,1	2,5	3,6	11,1	0,1	5,9
20	(3/4)	1,2	0,5	0,5	0,3	0,8	2,4	2,4	0,4	1,0	0,9	9,5	2,7	4,1	11,4	0,2	6,1
25	(1)	1,5	0,7	0,6	0,4	0,9	3,1	3,1	0,5	1,2	1,3	13,3	3,8	5,8	15,0	0,3	8,4
32	(1 1/4)	2,0	1,0	0,7	0,5	1,5	4,6	4,6	0,6	1,8	1,4	15,5	4,9	7,4	22,0	0,4	10,5
40	(1 1/2)	3,2	1,3	1,2	0,6	2,2	7,3	7,3	1,0	2,3	3,2	18,3	6,8	9,1	35,8	0,7	17,0
50	(2)	3,4	1,5	1,3	0,7	2,3	7,6	7,6	1,5	2,8	3,3	23,7	7,1	10,8	37,9	0,8	18,5
60	(2 1/2)	3,7	1,7	1,4	0,8	2,4	7,8	7,8	1,6	3,3	3,5	25,0	8,2	12,5	38,0	0,9	19,0
75	(3)	3,9	1,8	1,5	0,9	2,5	8,0	8,0	2,0	3,7	3,7	26,8	9,3	14,5	40,0	0,9	20,0
100	(4)	4,3	1,9	1,6	1,0	2,6	8,3	8,3	2,2	4,0	3,9	28,6	10,4	16,0	42,3	1,0	22,1
125	(5)	4,9	2,4	1,9	1,1	3,3	10,0	10,0	2,5	5,0	4,9	37,4	12,5	19,2	50,9	1,1	26,2
150	(6)	5,4	2,6	2,1	1,2	3,8	11,1	11,1	2,8	5,6	5,5	43,4	13,9	21,4	56,7	1,2	28,9

Fonte: Macintyre, 2017.

* Azevedo Netto (2013) sugere K=0,03 para a existência de pequena derivação.

10. $h_p \text{ localizada}$ – Perda de carga localizada (m.c.a.)

Se a tubulação for com engates, recomenda-se multiplicar por 1,25 o resultado da perda de carga localizada, para considerar as perdas localizadas devido aos engates nas tubulações, pois não há esses valores tabelados.

$$h_{p \text{ localizada}} = \sum k \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (16)$$

V = Velocidade de escoamento (passo 4);

$g = \text{Aceleração da gravidade} = 9,8 \text{ m/s}^2$.

11. $h_p \text{ total}$ – Perda de carga total (m.c.a.)

$$h_p \text{ total} = h_p \text{ linear} + h_p \text{ localizada} \quad (17)$$

$h_p \text{ linear}$ = perda de carga linear em m.c.a. (passo 8);

$h_p \text{ localizada}$ = perda de carga localizada em m.c.a. (passo 10).

12. Critério dos 20%:

Este critério é utilizado para garantir a uniformidade de irrigação em toda a lavoura. A pressão da água no final da linha lateral deve ser inferior a 20% da pressão no início da linha. Essa diferença de pressão será devido à perda de carga total e ao desnível ao longo da linha (tubulação) considerada. No caso da linha lateral com irrigação por gotejo, é possível informar também se existe a necessidade de utilizar emissores autocompensantes, para garantir a uniformidade de pressão e conseqüentemente da vazão, ao longo de toda a tubulação (mangueira gotejadora).

O primeiro termo do teste é em módulo, ou seja, não importa se os valores são negativos ou positivos, tem que ser menor ou igual aos 20% da pressão de serviço do aspersor (que é a pressão deve chegar no final da linha lateral). Se esse critério for obedecido, significa que se obterá uma diferença de pressão considerada adequada para uma boa uniformidade de irrigação ao longo da Linha Lateral; ou seja, a vazão ao longo da linha lateral não será uniforme: vai diminuindo devido as perdas de cargas ao longo da tubulação (considerando desnível zero), mas de uma forma não muito intensa, aceitável.

Caso o critério não seja obedecido, no caso de irrigação por gotejo, pode-se adotar gotejadores autocompensantes, respeitando-se a faixa de pressão que o gotejador trabalha (essa informação consta nos catálogos dos fabricantes). Outra alternativa, é aumentar o diâmetro comercial da tubulação, para diminuir a perda de carga (linear e localizada), ou seja, dimensionar tudo novamente a partir do passo 3, aumentando um diâmetro comercial.

$$|h_p \text{ total} \pm \Delta Z| \leq 20\% P_s \quad (18)$$

Onde:

$h_p \text{ total}$ = Perda de carga total (m.c.a. – passo 11);

ΔZ = Desnível entre o final e o início da Linha Lateral (m);

P_s = Pressão de serviço do aspersor (m.c.a.).

13. Pressão no Início da Linha Lateral – PILL (m.c.a.)

Como mencionado no início do item 4.2.5. o dimensionamento é realizado no sentido de jusante para montante, ou seja, inicia-se no final da linha lateral e, por fim, no Passo 13, calcula-se a pressão no início da linha lateral.

$$PILL = P_s + h + 0,75 \cdot (h_p \text{ total} \pm \Delta Z) \quad (19)$$

Sendo:

P_s = pressão de serviço do emissor (m.c.a.);

h = altura dos aspersores (m);

$h_p \text{ total}$ = perda de carga total (m.c.a.) calculada no passo 11;

ΔZ = diferença de cota entre o final e o início da linha lateral (cota no fim – cota no início). Assim sendo:

+ ΔZ , se a diferença de cota for ascendente;

- ΔZ , se a diferença de cota for descendente.

Com base nos 13 passos realizados no item anterior, obtêm-se três informações importantes: a Vazão da linha lateral (QLL), o diâmetro comercial (D_c) e a Pressão no início da linha lateral (PILL). Analisando o layout do sistema, um talhão dificilmente terá somente uma linha lateral, por isso, estes mesmos 13 passos serão feitos para cada linha lateral, mas para não ficar um trabalho muito oneroso, é possível utilizar uma planilha digital, como o software Microsoft Excel para repetir o processo alterando o comprimento de cada linha e a cota em que se encontram.

De forma análoga como demonstrado para a LL, deve-se aplicar o método dos 13 passos para o dimensionamento da linha principal, e das linhas adutoras.

Seguindo o dimensionamento no sentido de jusante para montante, todas as linhas laterais são conectadas a uma linha principal em comum, a vazão dessa linha principal QLP será o somatório de todas linhas laterais conectadas a ela e que funcionam simultaneamente.

$$Q_{LP} = \sum Q_{LL} \quad (20)$$

Já a pressão no início da linha principal será (PILP) será a pressão no início da linha lateral (PILL), considerando a pior situação (a maior das pressões das linhas laterais) somada à perda de carga total da linha principal (passo 11) e o desnível da linha principal:

$$PILP = PILL + hp \text{ total} \pm \Delta Z \quad (21)$$

Da mesma forma ocorre para obtermos a vazão e a pressão no início da linha adutora. Se houver apenas uma linha principal, a vazão da linha adutora será igual à vazão da linha principal. Se a linha adutora abastecer mais de uma linha principal simultaneamente, a vazão da linha adutora será a soma das vazões das linhas principais que funcionam simultaneamente.

$$Q_{LA} = \sum Q_{LP} \quad (22)$$

$$PILA = PILP + hp \text{ total} \pm \Delta Z \quad (23)$$

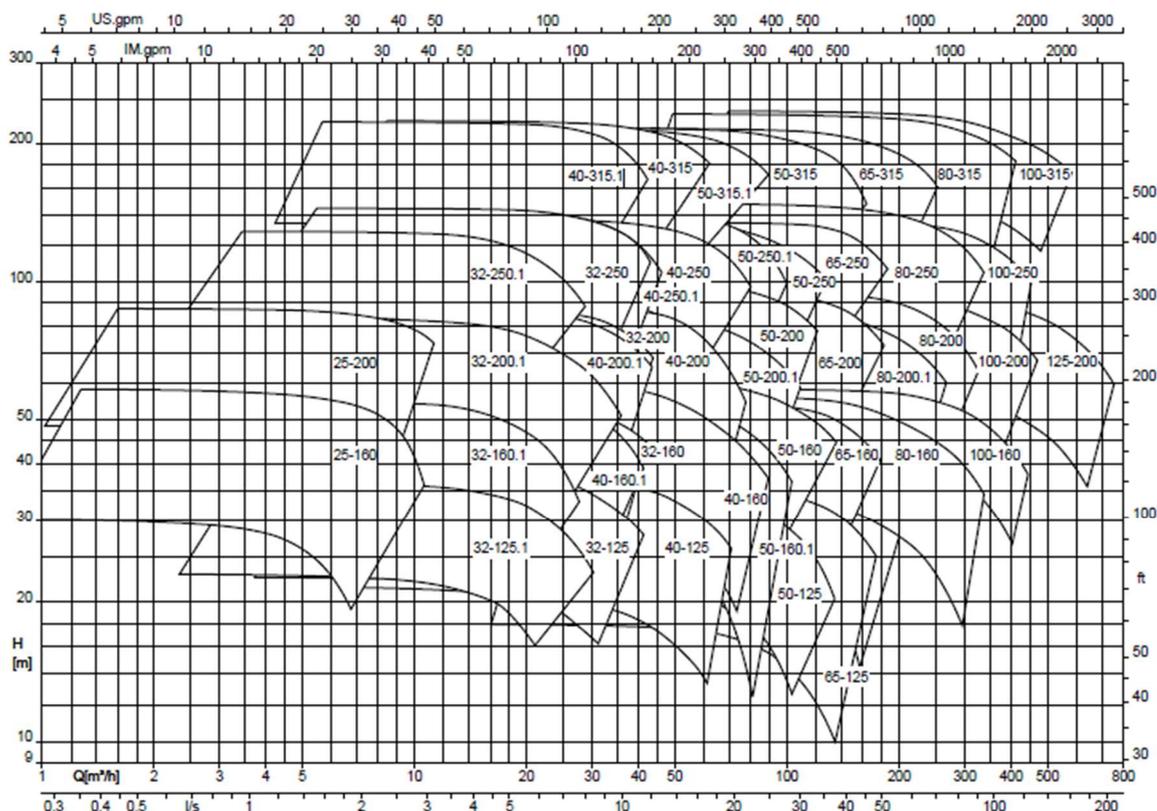
4.2.6. Dimensionamento e escolha da bomba

Em posse das informações da pressão no início da linha adutora (PILA) e da vazão da adutora (QLA), é necessário buscar uma bomba hidráulica que atenda a essas características do sistema de irrigação.

De modo geral, os fabricantes de bombas centrífugas disponibilizam a faixa de operação dos seus produtos em um gráfico ou uma tabela relacionando essas duas variáveis: Vazão de operação e Altura manométrica (m) através de um catálogo, contendo também outras características como temperatura de trabalho, NPSH e frequência de operação. Do inglês, Net Positive Suction Head (NPSH) pode ser entendida como a carga absoluta na aspiração, acima da tensão de vapor saturado, a ser mantida no orifício de aspiração da bomba hidráulica.

A Figura 19 é um exemplo de um gráfico retirado do catálogo de bombas da marca KSB que informa as categorias em que se pode adquirir cada modelo, o número de rotações $n = 3500$ rpm e as características de cada modelo.

Figura 19 - Diagrama de características bomba centrífuga
MegaCPK, Magnochem, Magnochem-Bloc, Meganorm, Megabloc, n = 3.500 rpm



Fonte: Adaptado de Folheto de curvas características MegaCPK, HPK-L, Magnochem, Magnochem-Bloc, Meganorm, Megabloc 60 Hz KSB.

Cálculo do NPSHd

Para evitar e até impedir com que ocorra cavitação¹ na bomba, é necessário calcular e verificar se o NPSH disponível ($NPSH_D$) é maior que o NPSH requerido ($NPSH_r$) pela bomba, de acordo com informações do fabricante.

$$p_z = p_0 e^{-z/8000} \quad (24)$$

Sendo:

P_z = pressão atmosférica na altitude z (m.c.a.)

P_0 = pressão atmosférica no nível do mar $\approx 10,33$ (m.c.a)

Z = altitude local (m)

¹ Cavitação é o fenômeno de vaporização de um líquido causado pela redução da pressão, durante seu movimento. Em máquinas hidráulicas é responsável por grandes danos ao equipamento.

$$NPSH_D = \pm H_{gs} - \sum \Delta H_S + \frac{P_{atm}}{\gamma} - \frac{P_{vapor}}{\gamma} \quad (25)$$

Sendo:

$NPSH_D$ Carga de sucção positiva disponível (m.c.a.);

H_{gs} Altura estática de sucção:

Positiva quando a bomba está afogada (abaixo do nível de captação);

Negativa quando a bomba está acima desta referência;

ΔH_S Perda de total na tubulação de sucção;

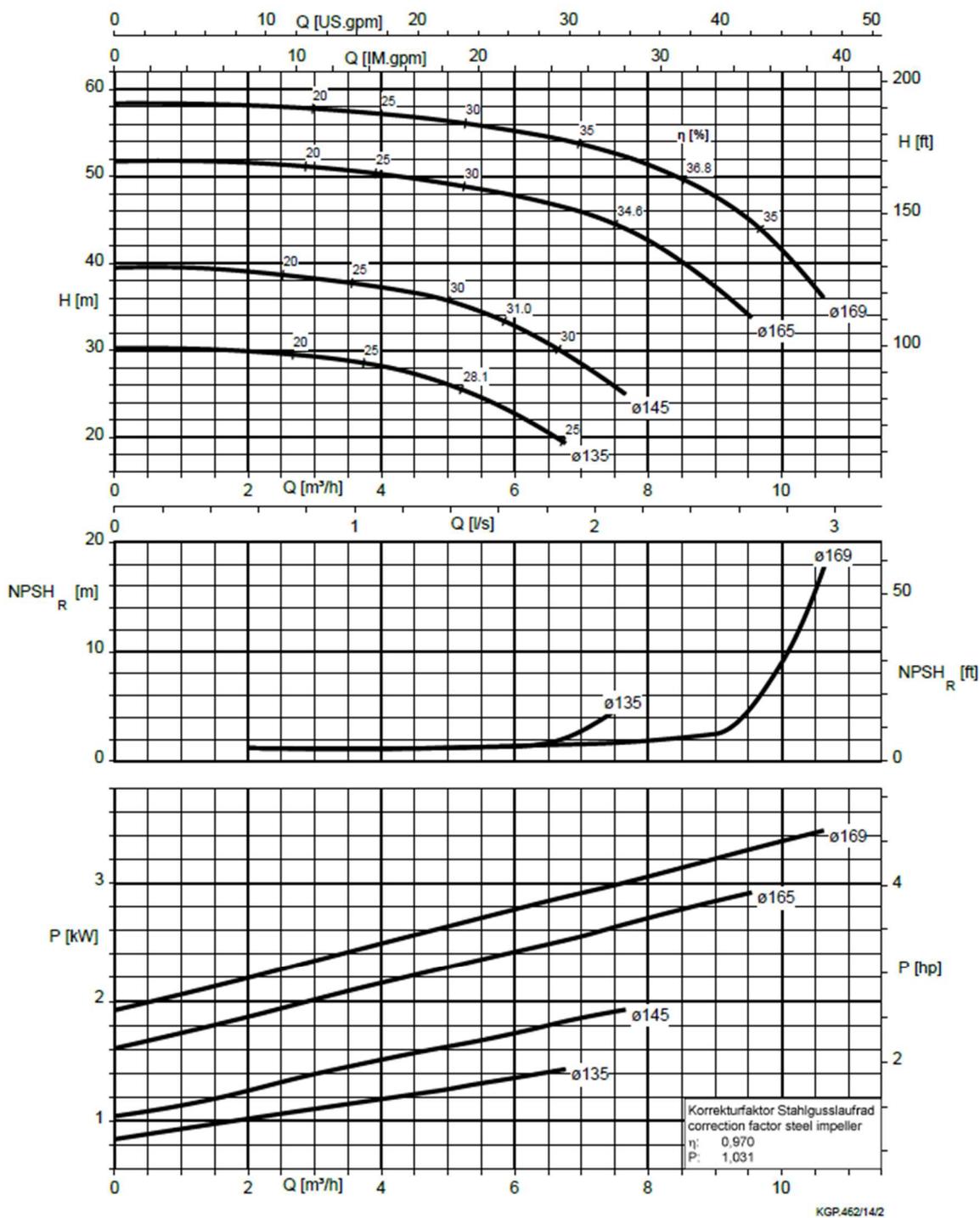
P_{atm} Pressão atmosférica (N/m²);

P_{vapor} Pressão de vapor d'água (N/m³);

γ Peso específico da água.

O valor de NPSH requerido (NPSHR) pela bomba é informada pelo fabricante junto às curvas características do modelo e rotor, como na Figura 20.

Figura 20 - Curvas características, NPSHR e potência consumida
 MegaCPK 040-025-160, $n = 3.500 \text{ rpm}$
 HPK-L, Magnochem, Magnochem-Bloc, Meganorm, Megabloc



Fonte: Adaptado de Folheto de curvas características MegaCPK, HPK-L, Magnochem, Magnochem-Bloc, Meganorm, Megabloc 60 Hz KSB.

5. RESULTADOS

5.1. LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO DO LOCAL

Para este projeto, a empresa W Madrid Topografia LTDA sediada no município de Erechim | RS realizou por meio de contrato o levantamento planialtimétrico georreferenciado de toda a fazenda, assim como da fonte de captação de água que consiste basicamente na localização e identificação de toda paisagem e/ou entidade existente na superfície terrestre, com a utilização de coordenadas geográficas conhecidas. Com base na topografia calculou-se a perda de carga hidráulica que o escoamento sofrerá assim como também se realizou o levantamento do comprimento de tubulação necessária para abastecer o sistema. No Anexo A é apresentado o mapa deste levantamento altimétrico em formato de imagem (.jpeg), mas o material foi entregue aos proprietários e nos foi cedido o material em formato .dwg para subsidiar o dimensionamento em arquivo vetorial.

5.2. DOSE E TURNO

Na Tabela 6 são apresentadas as características do gotejador, área molhada, intensidade de irrigação. Na Tabela 7 são apresentadas a dose líquida diária que deve ser irrigada (dose bruta) ao longo de todo o ano, caso não ocorra chuva na quantidade necessária para a cultura, e o tempo de aplicação da irrigação para atingir essa dose. Esse tempo varia entre 38 e 163 minutos por dia, sendo o menor tempo em julho e o maior em dezembro, considerando os dados de evapotranspiração potencial da cultura de referência para o município Soledade, o mais próximo de Espumoso com dados disponíveis (considerando uma série de 30 anos – Beltrame et al. 1994), e também os dados do coeficiente de cultivo (kc) para a pior situação, que é no estágio de desenvolvimento da erva-mate quando ela consome mais água. O tempo de aplicação da irrigação é calculado em função da dose bruta e da intensidade de irrigação (mm/h) que o sistema de irrigação promove. Para esse cálculo foi considerada que os gotejadores molham uma área de 1,5 m² em torno deles, e que o sistema molha 50% da área total cultivada. A vazão do gotejador utilizado é de 1,6 L/h e o espaçamento entre gotejadores foi de 50 cm.

Salienta-se que a Tabela 7 é indicativa, serve como referência para se saber ao longo do ano, os tempos aproximados de aplicação da irrigação, mas o ideal é monitorar a umidade do solo para que esse fique sempre entre o limite hídrico inferior da cultura e a capacidade de campo. Quando ocorre uma chuva, a camada onde ficam as raízes do solo, ficará com água armazenada por alguns dias. Essa água irá evapotranspirar, e eventualmente, drenar para camadas mais profundas onde a planta não conseguirá aproveitá-la. O momento certo de fazer uma irrigação, após a chuva, deverá só poder ser identificado com o monitoramento da umidade do solo, com uso de tensiômetros, por exemplo. Se esse monitoramento com tensiômetros não for feito, poderá ser feito de forma visual, com a prática e a experiência do responsável pela irrigação. É possível. Mas, o ideal, é ter um apoio técnico com o uso de tensiômetros. O tempo da irrigação para se atingir a dose bruta planejada, apresentado na Tabela 7, pode ser diferente na vida real. Isso pois, essa tabela foi feita com base em uma série histórica climática de dados meteorológicos (Beltrame et al. 1994), e podem ocorrer valores de ETo bastante diferentes dessas médias, podendo em julho ter uma evapotranspiração bem maior que a apresentada na tabela e em dezembro uma Eto bem menor, por exemplo. Por isso, o ideal é monitorar a umidade do solo e tomar as decisões em função desse monitoramento. Na fazenda em que foi feito esse estudo, foram instalados alguns tensiômetros e têm-se informações que esse monitoramento está sendo adequadamente realizado.

Tabela 6 - Dados do emissor e cultura

Cultura:	Erva-mate	
Município:	Espumoso	ETo de Soledade
Eficiência sistema de irrigação por gotejo	0.95	-
Vazão gotejador (L/h)	1.60	L/h
Espaçamento gotejador (m)	0.50	M
Espaçamento entre linhas (m)	3.00	M
Vazão gotejador	0.0016	m3/h
área molhada	1.50	m2
área molhada	50	%
Intensidade irrigação (mm/h)	2.13	mm/h

Fonte: própria do autor.

Tabela 7 - Resultado do cálculo de dose mínima diária

DOSE MÍNIMA DIÁRIA							
Soledade - RS	Eto (mm) / 10 dias	Eto (mm/dia) a)	kc	Dose líquida (mm/dia) Eto x kc	Dose bruta (mm/dia)	Tempo de irrigação (horas)	Tempo de irrigação (minutos)
1 - 10 jan	51.0	5.1	1	5.10	5.37	2.52	150.99
11 - 20 jan	52.0	5.2	1	5.20	5.47	2.57	153.95
21 - 31 jan	55.0	5.5	1	5.50	5.79	2.71	162.83
1 - 10 fev	49.0	4.9	1	4.90	5.16	2.42	145.07
11 - 20 fev	45.0	4.5	1	4.50	4.74	2.22	133.22
21 - 28 fev	41.0	4.1	1	4.10	4.32	2.02	121.38
1 - 10 mar	39.0	3.9	1	3.90	4.11	1.92	115.46
11 - 20 mar	37.0	3.7	1	3.70	3.89	1.83	109.54
21 - 31 mar	35.0	3.5	1	3.50	3.68	1.73	103.62
1 - 10 abr	31.0	3.1	1	3.10	3.26	1.53	91.78
11 - 20 abr	27.0	2.7	1	2.70	2.84	1.33	79.93
21 - 30 abr	23.0	2.3	1	2.30	2.42	1.13	68.09
1 - 10 mai	21.0	2.1	1	2.10	2.21	1.04	62.17
11 - 20 mai	19.0	1.9	1	1.90	2.00	0.94	56.25
21 - 31 mai	15.6	1.6	1	1.56	1.64	0.77	46.18
1 - 10 jun	15.0	1.5	1	1.50	1.58	0.74	44.41
11 - 20 jun	13.0	1.3	1	1.30	1.37	0.64	38.49
21 - 30 jun	15.0	1.5	1	1.50	1.58	0.74	44.41
1 - 10 jul	15.0	1.5	1	1.50	1.58	0.74	44.41
11 - 20 jul	15.0	1.5	1	1.50	1.58	0.74	44.41
21 - 31 jul	17.0	1.7	1	1.70	1.79	0.84	50.33
1 - 10 ago	19.0	1.9	1	1.90	2.00	0.94	56.25
11 - 20 ago	17.0	1.7	1	1.70	1.79	0.84	50.33
21 - 31 ago	23.0	2.3	1	2.30	2.42	1.13	68.09
1 - 10 set	25.0	2.5	1	2.50	2.63	1.23	74.01
11 - 20 set	29.0	2.9	1	2.90	3.05	1.43	85.86
21-30 set	33.0	3.3	1	3.30	3.47	1.63	97.70
1 - 10 out	35.0	3.5	1	3.50	3.68	1.73	103.62
11 - 20 out	40.2	4.0	1	4.02	4.23	1.98	119.01
21 - 31 out	43.0	4.3	1	4.30	4.53	2.12	127.30
1 - 10 nov	45.0	4.5	1	4.50	4.74	2.22	133.22
11 - 20 nov	47.0	4.7	1	4.70	4.95	2.32	139.14
21 - 30 nov	48.8	4.9	1	4.88	5.14	2.41	144.47
1 - 10 dez	51.2	5.1	1	5.12	5.39	2.53	151.58
11 - 20 dez	52.0	5.2	1	5.20	5.47	2.57	153.95
21 - 31 dez	55.0	5.5	1	5.50	5.79	2.71	162.83

Fonte: própria do autor.

5.3. ESCOLHA DOS EMISSORES

Para selecionar o emissor para este projeto, sabe-se que alguns talhões já possuem mudas plantadas que distam meio metro entre si e que será mantido nessa distância os próximos. De maneira arbitrária, as mangueiras gotejadoras, que neste caso serão as linhas laterais (LLs) devem ter a mesma distância entre os emissores fixos na mangueira para que coincidam com as mudas plantadas, pensando que será aplicada uma dose mínima diária no pé de cada muda, nada impede que se utilize distâncias diferentes que o plantio, de acordo com o objetivo de cada projeto.

Com o levantamento planialtimétrico em mãos, buscou-se também um modelo de emissor que fosse autocompensante, tendo em vista a diferença de quinze metros de cota entre o início e final de várias linhas laterais dentro do mesmo talhão.

Dentre as opções de mercado, localizou-se duas marcas que oferecem emissores que atendam a essas características: NaandanJain® e a Netafim®, buscou-se contato com representantes de ambas marcas e comparando qualidade dos produtos oferecidos, preço, disponibilidade de estoque e tempo de entrega, optou-se pelo emissor da marca Netafim, linha DRIPNET PC AS, modelo 16250, que possui características e aplicações conforme Figura 21 em trecho retirado do catálogo da marca.

Figura 21 - Linha DRIPNET PC de emissores Netafim

DRIPNET PC™ AS

Tubo gotejador autocompensado de parede fina a média recomendado para aplicação de laterais de gotejamentos em:

- Cultivos anuais e semi-perenes em múltiplas safras como cana-de-açúcar, grãos, algodão e hortaliças;
- Cultivos Perenes como árvores frutíferas e cultivos florestais;
- Cultivos em linha com topografia irregular ou quando há a necessidade laterais de gotejamento mais longas;
- Sistemas de irrigação por gotejamento superficial ou subterrâneo.



O labirinto patenteado TurboNet™ garante ao produtor maior uniformidade de aplicação de água e resistência a entupimentos já que proporciona passagens de água mais amplas e curtas que os concorrentes em cada vazão respectivamente.

O mecanismo de compensação de pressão mais confiável do mundo garante vazão constante e uniforme em toda a área de cultivos, proporcionando distribuição uniforme de água e nutrientes em todas as plantas. Devido ao mecanismo anti-sifão que evita sucção de partículas durante o esvaziamento da tubulação, DripNet PC™ AS é a solução ideal para gotejamento subterrâneo.

Disponível em diversas combinações de espaçamento, vazões e espessuras de parede, DripNet PC™ AS se adapta a qualquer requerimento de cultivos e necessidade do agricultor.

Produzido com base na norma ISO 9241 e com sua produção certificada pelo instituto de normas técnicas de Israel (SII), DripNet PC™ AS é resistente contra raios ultravioletas e nutrientes comumente utilizados na agricultura.

Dados Técnicos DripNet PC™ AS

Modelo	Diâmetro Interno (mm)	Espessura		Diâmetro Externo (mm)	Máxima Pressão de Trabalho (bar)	Máxima Pressão de Lavagem (bar)	KD
		(mm)	(mil)				
16125	16.2	0.31	12.5	16.82	1.8	2.1	0.40
16150	16.20	0.38	15	16.96	2.2	2.9	0.40
16200	15.50	0.50	20	16.50	2.5	3.3	0.40
16250	15.50	0.63	25	16.76	2.8	3.6	0.40
22150	22.20	0.38	15	22.96	1.8	2.3	0.18
22250	22.20	0.63	25	23.56	2.5	2.9	0.18

* A pressão máxima de trabalho também depende da pressão máxima do gotejador.

Fonte: Catálogo de emissores Netafim. DRIPPERLINES, DRIPPERS & OTHER EMITTERS. 2020

O mesmo modelo 16250 é oferecido em diferentes vazões dos emissores, por questão de disponibilidade, selecionou-se o produto que opera com 1,6 l/h (Figura 22).

Figura 22 - Especificações do emissor 16250 com diferentes vazões de operação

Vazão Nominal*	Faixa de Pressão de Trabalho	Dimensões da Passagem de Água			Área de Filtragem	Filtragem Recomendada
		Largura (mm)	Profundidade (mm)	Comprimento (mm)		
(l/h)	(bar)				(mm²)	(mesh/micron)
0.60	0.25 - 2.5	0.52	0.60	22	42	130/120
1.00	0.40 - 3.0	0.61	0.60	8	42	130/120
1.60	0.40 - 3.0	0.76	0.73	8	42	200/80
2.00	0.40 - 3.5	0.84	0.80	8	42	200/80
3.00	0.40 - 3.5	1.02	0.88	8	42	200/80
3.80	0.40 - 3.5	1.02	0.88	8	42	200/80

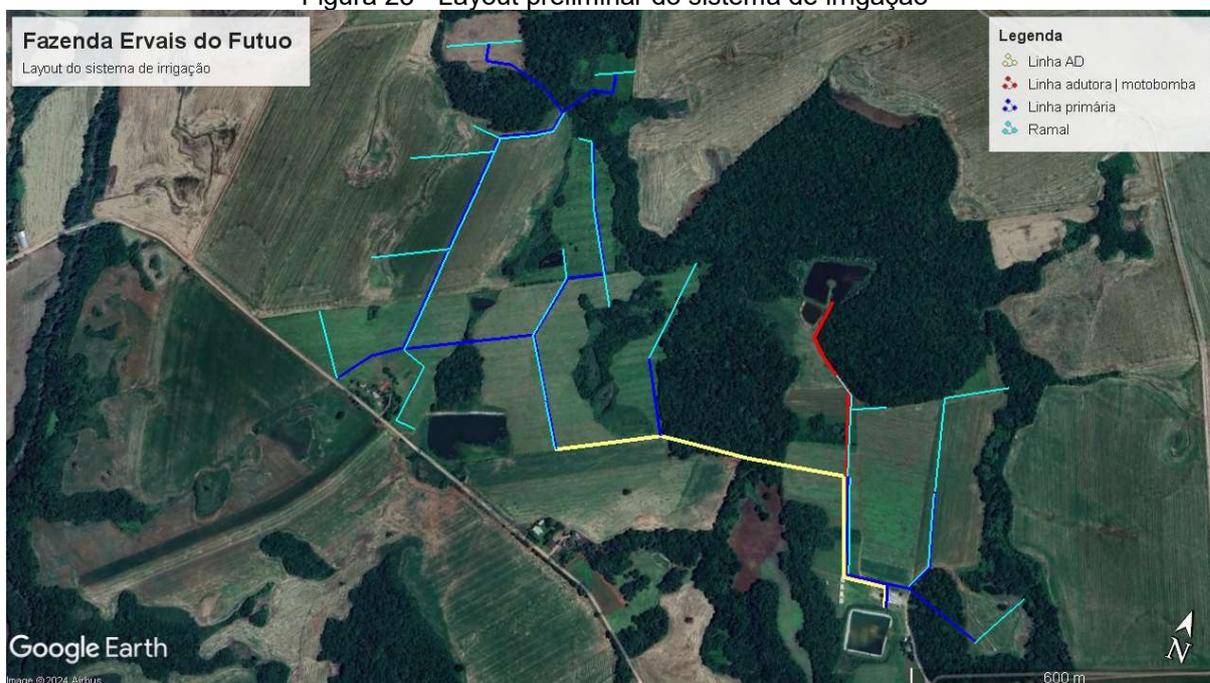
Fonte: catálogo de emissores Netafim.

5.4. LAYOUT DO SISTEMA

Para levantamento do material necessário, principalmente da quantidade de rolos de mangueiras gotejadoras, para a instalação do sistema de irrigação, o

revendedor da de produtos da Netafim com quem negociou-se a compra do material, a equipe da Agrimar elaborou um layout ilustrado pelo Anexo B com base nos locais que já estava definido para a captação de água, bateria de filtros e divisão de setores (Figura 23). Com o levantamento planialtimétrico fornecido a eles, foi estimado a compra de 145.846 metros de mangueira gotejadora, sendo que este modelo é vendido em rolos de 800 m, conforme o catálogo, chegando à nota de 183 rolos. O objetivo de fazer com que o vendedor estimasse a quantidade dos produtos, se dá por conta da responsabilidade de devolver o valor incidente sobre o material que tenha sobrado, ou caso falte, venda pelo mesmo valor negociado na última compra; além é claro, de custear o frete deste material.

Figura 23 - Layout preliminar do sistema de irrigação



Fonte: própria do autor.

Além do levantamento das mangueiras gotejadoras, foi definido o local dos cavaletes para o controle e manejo do sistema (Anexo C). O cavalete para um sistema de irrigação tem a principal função de acessibilizar algumas peças especiais ao operador, tanto para condutos aterrados quanto para elevar as peças sobre o solo a uma altura, normalmente entre 0,5 e 1 metro dependendo das peças a serem instaladas, para otimizar a operação das peças, manutenção ou até leitura de manômetros. A Figura 24 ilustra um dos modelos de cavalete de irrigação instalados no sistema implementado.

Figura 24 - Cavalete de irrigação



Fonte: própria do autor.

5.5. DIMENSIONAMENTO DAS LINHAS

Com base no layout apresentado no item Layout do Sistema, demonstro como foi realizado o dimensionamento das linhas laterais e principais para um dos setores com maior perda de carga linear do sistema; além do dimensionamento da linha adutora com a maior altura manométrica, com o objetivo de que a bomba hidráulica fará o maior esforço para irrigar o setor; tendo em vista que para os demais, ela estará super dimensionada.

5.5.1. Dimensionamento Linhas Laterais

Do mesmo talhão, denominado Setor 8, que será utilizado para demonstrar como foi realizado os cálculos para o dimensionamento para as demais linhas laterais.

Iniciando pelo layout do sistema elaborado com base no levantamento planialtimétrico, para a linha 1 estimou-se que o comprimento da linha lateral a ser instalada possui 108,28 m, não será necessário utilizar linha cega visto que o plantio inicia junto à linha e possui um desnível de 3 m entre início e final de linha.

Com isso, obtêm-se a pressão da linha lateral da Linha 1 do Setor 8 utilizando as equações demonstradas na metodologia no item 4.2.5. Dimensionamento das linhas

Iniciando pelo levantamento altimétrico, calcula-se a quantidade de emissores fixados ao longo da linha lateral (mangueira gotejadora).

$$L = S1 \cdot \text{número emissores}$$

$$N^{\circ} \text{ de emissores} = 108,28\text{m}/0,5\text{m} = 216,6 \approx 217 \text{ emissores}$$

Sabendo o número de emissores que a linha contém, calcula-se a vazão que irá escoar durante a operação.

$$Q_{LL} = 0,0016 \text{ m}^3/\text{s} \cdot 217$$

Ou

$$Q_{LL} = 0,000096 \text{ m}^3/\text{s}$$

Sabendo a vazão de escoamento e admitindo que a velocidade máxima de operação seja 2 m/s, calcula-se o diâmetro mínimo que mangueira gotejadora, que corresponde à linha lateral aqui demonstrada, deverá possuir, influenciando na escolha do produto seguindo a metodologia descrito no item Escolha dos emissores.

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,000096 \text{ m}^3/\text{s}}{2 \text{ m/s} \cdot \pi}}$$

$$D = 0,007835 \text{ m}$$

Com base na mangueira selecionada, o diâmetro interno da linha pode ser calculado como a Equação 28, como demonstrado, mas também muitos fabricantes informam esse dado em seus catálogos.

$$Dc \text{ interno} = 0,01676 \text{ m} - 2 \cdot 0,00063 \text{ m}$$

$$Dc \text{ interno} = 0,0155 \text{ m}$$

Tendo em vista que o diâmetro da mangueira adotada é maior que o diâmetro mínimo, calcula-se então a velocidade de escoamento para este diâmetro utilizado.

$$V = \frac{0,000096 \text{ m}^3/\text{s}}{\frac{\pi \cdot 0,0155 \text{ m}^2}{4}}$$

$$V = 0,51 \text{ m/s}$$

Seguiu-se para o cálculo do somatório dos coeficientes de perda de carga localizada (k), sendo 0,5 para a entrada da linha lateral somado a 0,03 para cada emissor.

$$\sum k = 0,5 + 0,03 \cdot 217 \text{ emissores}$$

$$\sum k = 7,01$$

Este somatório é utilizado para calcular a perda de carga linear unitária:

$$J = \frac{7,01}{387} \cdot \frac{1}{0,007835^{1,1}} \cdot 0,51^{1,9}$$

$$J = 0,4953$$

De acordo com a Tabela 4, o coeficiente de redução F, para perdas localizada de carga que se utiliza a equação de Scobey, será igual a 0,35 para linhas laterais com mais de 100 emissores.

$$\begin{aligned} hp_{linear} &= 108,28 \cdot 0,49527 \cdot 0,35 \\ hp_{linear} &= 18,77 \text{ m. c. a.} \end{aligned}$$

Utilizando o somatório de k, calcula-se a perda de carga localizada:

$$\begin{aligned} hp_{localizada} &= 7,01 \cdot \frac{0,51^2}{2 \cdot 9,81} \\ hp_{localizada} &= 0,884 \text{ m. c. a.} \end{aligned}$$

Somando as duas perdas de carga, linear e localizada, obtém-se a perda de carga total:

$$\begin{aligned} hp_{total} &= 0,91 \text{ m. c. a.} + 0,884 \text{ m. c. a.} \\ hp_{total} &= 1,794 \text{ m. c. a.} \end{aligned}$$

Somando a perda de carga total ao desnível que a linha possui, com base no levantamento planialtimétrico, verifica-se que resultou foi aproximadamente cinco vezes maior que o admitido para um emissor convencional que tenha uma pressão de serviço, $P_s=10\text{m.c.a.}$ Para que o critério seja atendido, mesmo que aumente o diâmetro da tubulação e diminua a perda de carga localizada, somente a pressão devido ao desnível fará com que o critério não seja atendido; portanto, para este caso, será necessário utilizar uma mangueira gotejadora autocompensante

$$\begin{aligned} |hp_{total} \pm \Delta Z| &\leq 20\% \cdot P_s \\ |1,794 \text{ m. c. a.} + 3\text{m}| &\leq 20\% \cdot 10 \text{ m. c. a.} \\ 4,794 \text{ m. c. a.} &\leq 1 \text{ m. c. a.} \end{aligned}$$

Para que o critério seja atendido, mesmo que aumente o diâmetro da tubulação e diminua a perda de carga localizada, somente a pressão devido ao desnível fará com que o critério não seja atendido; portanto, para este caso, será necessário utilizar uma mangueira gotejadora autocompensante como já selecionada e agora apenas verificada a necessidade.

Deste modelo, a mangueira opera com P_s entre 4m.c.a. e 28m.c.a., agora sim, atendendo ao critério de 20%.

Finalizando a rotina de cálculo para o dimensionamento da LL, calcula-se a Pressão de Início da LL (PILL):

$$\begin{aligned} PILL &= P_s + h + 0,75 \cdot (hp_{total} \pm \Delta Z) \\ PILL &= 10 \text{ m. c. a.} + 0\text{m} + 0,75 \cdot (0,884 \text{ m. c. a.} + 3\text{m}) \end{aligned}$$

De forma análoga, fez-se essa rotina de cálculo, por meio de uma tabela utilizando o software Microsoft Excel, para as demais linhas laterais do mesmo setor resultando na Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados do Setor 8

Setor 8									
Linha nº	L PEBD (m)	L linha lateral (m)	L total (m)	Desnível (m)	Núm. INTEIRO	Q (m³/s)	Critério 20%	PILL (m.c.a.)	Emissor?
1	0	108,2800	108,2800	3,00	217,0	0,000096	NÃO	26,397171	Sim
2	0	106,6000	106,6000	3,00	213,0	0,000095	NÃO	25,464700	Sim
4	0	105,8600	105,8600	3,00	212,0	0,000094	NÃO	25,199947	Sim
5	0	103,9800	103,9800	2,00	208,0	0,000092	NÃO	23,554225	Sim
6	0	102,8600	102,8600	2,00	206,0	0,000092	NÃO	23,103848	Sim
7	0	99,9400	99,9400	2,00	200,0	0,000089	NÃO	21,872893	Sim
8	0	98,4800	98,4800	3,00	197,0	0,000088	NÃO	22,045189	Sim
9	0	95,3900	95,3900	3,00	191,0	0,000085	NÃO	20,946480	Sim
10	0	93,1600	93,1600	3,00	186,0	0,000083	NÃO	20,132209	Sim
11	0	90,7900	90,7900	2,00	182,0	0,000081	NÃO	18,726348	Sim
12	0	88,0800	88,0800	3,00	176,0	0,000078	NÃO	18,630386	Sim
13	0	86,5900	86,5900	3,00	173,0	0,000077	NÃO	18,226890	Sim
14	0	85,7200	85,7200	2,00	171,0	0,000076	NÃO	17,226831	Sim
15	0	85,2500	85,2500	2,00	171,0	0,000076	NÃO	17,195623	Sim
16	0	83,1800	83,1800	2,00	166,0	0,000074	NÃO	16,613389	Sim
17	0	81,7800	81,7800	1,00	164,0	0,000073	NÃO	15,609559	Sim
18	0	78,2900	78,2900	1,00	157,0	0,000070	NÃO	14,867287	Sim
19	0	77,2300	77,2300	1,00	154,0	0,000068	NÃO	14,598017	Sim
20	0	75,8300	75,8300	1,00	152,0	0,000068	NÃO	14,392804	Sim
21	0	76,6100	76,6100	1,00	153,0	0,000068	NÃO	14,498264	Sim
22	0	71,0900	71,0900	1,00	142,0	0,000063	NÃO	13,574102	Sim
23	0	69,3600	69,3600	1,00	139,0	0,000062	NÃO	13,346225	Sim
24	0	66,6100	66,6100	0,00	133,0	0,000059	NÃO	12,205005	Sim
25	0	64,2100	64,2100	0,00	128,0	0,000057	NÃO	11,910768	Sim
26	0	60,9800	60,9800	0,00	122,0	0,000054	NÃO	11,588346	Sim
27	0	57,4400	57,4400	0,00	115,0	0,000051	SIM	11,270331	Sim
28	0	54,3300	54,3300	0,00	109,0	0,000048	SIM	11,036254	Sim
29	0	51,6600	51,6600	0,00	103,0	0,000046	SIM	10,842940	Sim
30	0	49,7400	49,7400	0,00	99,0	0,000044	SIM	10,738146	Sim
31	0	47,5700	47,5700	0,00	95,0	0,000042	SIM	10,630418	Sim
32	0	44,4100	44,4100	0,00	89,0	0,000040	SIM	10,492312	Sim
33	0	42,7100	42,7100	0,00	85,0	0,000038	SIM	10,417589	Sim
34	0	37,6200	37,6200	0,00	75,0	0,000033	SIM	10,261806	Sim
35	0	33,4900	33,4900	0,00	67,0	0,000030	SIM	10,171927	Sim
36	0	29,3200	29,3200	0,00	59,0	0,000026	SIM	10,107101	Sim
37	0	23,4200	23,4200	0,00	47,0	0,000021	SIM	10,047152	Sim
38	0	16,7100	16,7100	0,00	33,0	0,000015	SIM	10,013678	Sim
39	4,7	9,3600	14,0600	0,00	19,0	0,000008	SIM	10,002982	Sim
40	0	100,7100	100,7100	3,00	201,0	0,000089	NÃO	22,850638	Sim
41	0	100,4300	100,4300	3,00	201,0	0,000089	NÃO	22,821321	Sim

Setor 8									
Linha nº	L PEBD (m)	L linha lateral (m)	L total (m)	Desnível (m)	Núm. INTEIRO	Q (m³/s)	Critério 20%	PILL (m.c.a.)	Emissor?
42	0	100,1500	100,1500	3,00	200,0	0,000089	NÃO	22,644574	Sim
43	0	99,6100	99,6100	3,00	199,0	0,000088	NÃO	22,443534	Sim
44	0	98,3000	98,3000	3,00	197,0	0,000088	NÃO	22,027382	Sim
45	0	97,0000	97,0000	3,00	194,0	0,000086	NÃO	21,489853	Sim
46	0	95,7000	95,7000	2,00	191,0	0,000085	NÃO	20,224585	Sim
47	0	93,3000	93,3000	2,00	187,0	0,000083	NÃO	19,514194	Sim
48	0	93,9300	93,9300	2,00	188,0	0,000084	NÃO	19,690216	Sim
49	0	94,2900	94,2900	2,00	189,0	0,000084	NÃO	19,845319	Sim
50	0	94,6500	94,6500	2,00	189,0	0,000084	NÃO	19,877003	Sim
51	0	95,0100	95,0100	2,00	190,0	0,000084	NÃO	20,034742	Sim
52	0	95,5500	95,5500	2,00	191,0	0,000085	NÃO	20,210986	Sim
53	0	92,5100	92,5100	1,00	185,0	0,000082	NÃO	18,459506	Sim
54	0	91,4500	91,4500	2,00	183,0	0,000081	NÃO	18,891793	Sim
55	0	90,3800	90,3800	2,00	181,0	0,000080	NÃO	18,583132	Sim
56	0	89,3200	89,3200	1,00	179,0	0,000080	NÃO	17,534904	Sim
57	0	88,6300	88,6300	1,00	177,0	0,000079	NÃO	17,273178	Sim
58	0	87,4300	87,4300	1,00	175,0	0,000078	NÃO	16,982841	Sim
59	0	86,3400	86,3400	1,00	173,0	0,000077	NÃO	16,709738	Sim
60	0	85,0500	85,0500	1,00	170,0	0,000076	NÃO	16,339408	Sim
61	0	82,4100	82,4100	1,00	165,0	0,000073	NÃO	15,731081	Sim
62	0	77,4100	77,4100	1,00	155,0	0,000069	NÃO	14,677546	Sim
63	0	72,6100	72,6100	1,00	145,0	0,000064	NÃO	13,807703	Sim
64	0	66,7200	66,7200	1,00	133,0	0,000059	NÃO	12,958619	Sim
65	0	59,7500	59,7500	1,00	120,0	0,000053	NÃO	12,236671	Sim
66	0	51,6600	51,6600	1,00	103,0	0,000046	NÃO	11,592940	Sim
TOTAL	4,7						Mínimo	4	m.c.a.
							Máximo	28	m.c.a.

5.5.2. Dimensionamento Linhas Principais

Ainda com base no setor 8, demonstro o dimensionamento da linha principal, iniciando pelo cálculo da vazão, que se dá através da equação:

$$Q_{LP} = 0,004475 \text{ m}^3/\text{s}$$

Ou

$$Q_{LP} = 16,11 \text{ m}^3/\text{h}$$

Visto que é uma unidade mais recorrente no mercado em que buscou-se especificação de peças e bombas hidráulicas. Seguindo para o cálculo do diâmetro mínimo necessário. Seguiu-se para o cálculo do diâmetro mínimo para a adutora

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,004475 \text{ m/s}}{2 \text{ m/s} \cdot \pi}}$$

$$D = 0,05337 \text{ m}$$

Embora o diâmetro mínimo calculado para esta linha principal poderia ser de 50mm que seria, foi adotado o diâmetro de 75 mm, por razões comerciais.

$$V = \frac{0,004475 \text{ m}^3/\text{s}}{\frac{\pi \cdot 0,0725 \text{ m}^2}{4}}$$

$$V = 1,08 \text{ m/s}$$

Para diâmetros de tubulação igual ou maiores que 75 mm como desta linha principal, utiliza-se a equação de perda de carga de Hazen Willians; além disso, considerando-se o Coeficiente de atrito de Hazen Willians $C = 145$ para PVC;

$$J = 10,66 \cdot \frac{1}{0,0725^{4,87}} \cdot \left(\frac{0,004475}{145}\right)^{1,852}$$

$$J = 0,0168$$

De acordo com a Tabela 4, o coeficiente de redução F, para perdas localizada de carga que se utilizando a equação de Hazen Willians, será igual a 0,361 para linhas principais que possuem entre 50 e 100 linhas laterais.

$$hp_{linear} = 501,8 \text{ m} \cdot 0,0051 \cdot 0,354$$

$$hp_{linear} = 3,037 \text{ m. c. a.}$$

Para calcular a perda de carga localizada, primeiramente, soma-se os valores de k das peças utilizadas para a linha principal, neste caso do Setor 8, a Tabela 9 demonstra as peças e quantidades utilizadas com seus respectivos valores de k:

Tabela 9 - Somatório dos valores de K LP8

K da Linha Principal	quantidade	k
k redução gradual - Derivação da Adutora para a LP8	1	0,15
k curva 90°	1	0,4
K registro gaveta (totalmente aberto)	1	0,2
Pequena derivação da saída das LLs	39	0,03
k válvula borboleta aberta	2	0,3

Fonte: própria do autor.

$$\sum k = 3,69$$

$$hp_{localizada} = 3,69 \cdot \frac{1,08^2}{2 \cdot 9,81}$$

$$hp_{localizada} = 0,221 \text{ m. c. a.}$$

$$hp_{total} = 3,037 \text{ m. c. a.} + 0,221 \text{ m. c. a.}$$

$$hp \text{ total} = 3,258 \text{ m. c. a}$$

Verificando o critério dos 20%, nota-se que em módulo o resultado não atenderia ao critério ($10,8\text{m.c.a.} > 7,742\text{m.c.a.}$), demonstrando que poderá ocorrer uma subpressão na tubulação durante a operação, fazendo-se necessário a utilização da válvula quebra vácuo instalada no início da linha principal, compondo uma das peças especiais do cavalete.

$$\begin{aligned} 3,258 - 11 &\leq 20\% \cdot 13,0354 \text{ m. c. a.} \\ -7,742 \text{ m. c. a.} &\leq 2,61 \text{ m. c. a.} \end{aligned}$$

5.5.3. Dimensionamento Linha Adutora

Para a linha adutora, verifica-se pelo levantamento planialtimétrico o comprimento $L=1770\text{m}$ e um desnível = -45m (sinal negativo porque a bomba hidráulica está acima do final da linha adutora).

Considerando que somente este Setor 8 estará sendo irrigado, então a vazão da adutora será a própria vazão da linha principal:

$$Q_{LA} = 0,004479 \text{ m}^3/\text{s}$$

Ou

$$Q_{LA} = 16,11 \text{ m}^3/\text{h}$$

O diâmetro também segue sendo o mesmo da linha principal:

$$D = 0,0533 \text{ m}$$

Podendo adotar uma adutora com 50 mm de diâmetro, mas pensando em ampliar a vazão de rega ou então ou irrigar mais setores de forma simultânea, optou-se por um diâmetro maior: 100mm.

$$V = \frac{0,004479 \text{ m}^3/\text{s}}{\frac{\pi \cdot 0,0996^2}{4}}$$

$$V = 0,62 \text{ m/s}$$

Utilizando novamente a equação de Hazen Wilians para se obter o coeficiente de carga linear J e considerando $C = 145$:

$$J = 10,66 \cdot \frac{1}{0,0996^{4,87}} \cdot \left(\frac{0,004479}{145}\right)^{1,852}$$

$$J = 0,004271$$

De acordo com a Tabela 4, o coeficiente de redução F , para perdas localizada de carga que se utilizando a equação de Hazen Wilians, será igual a 1.

$$h_p \text{ linear} = 770m \cdot 0,004271 \cdot 1$$

$$h_p \text{ linear} = 3,289 \text{ m. c. a.}$$

Para calcular a perda de carga localizada, primeiramente, soma-se os valores de k das peças utilizadas agora par a linha adutora, a Tabela 10 demonstra as peças e quantidades utilizadas:’

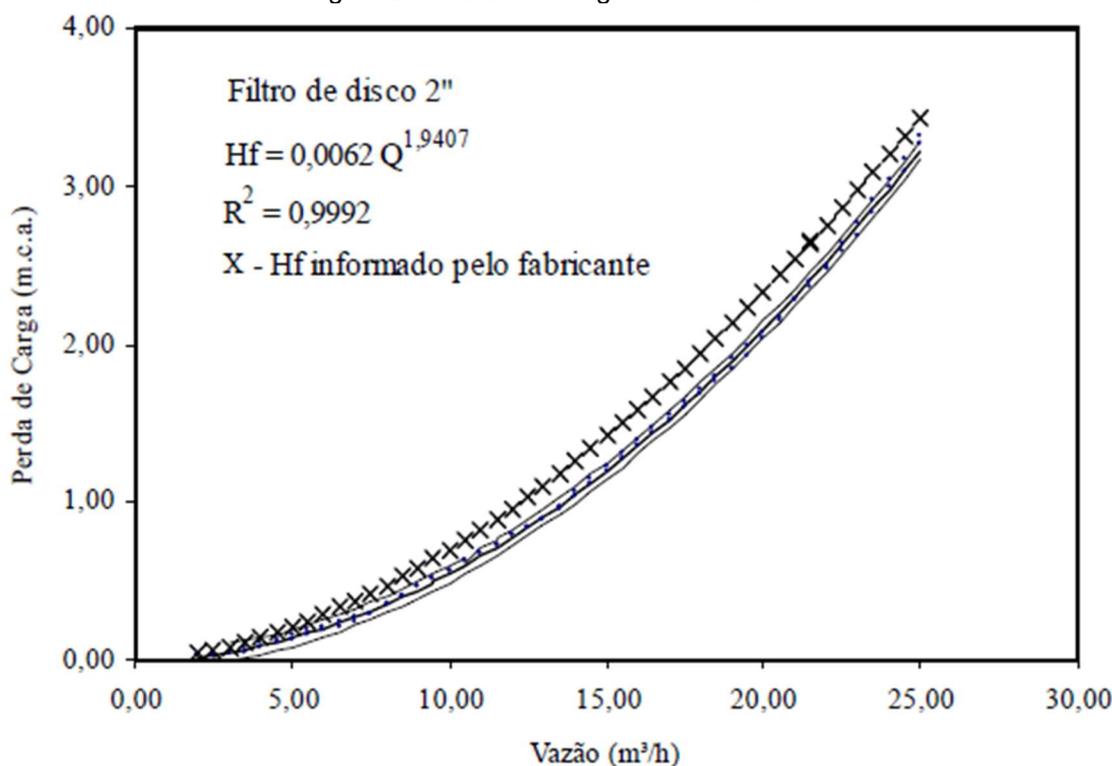
Tabela 10 - Somatório dos valores de K Adutora

K da adutora		
Tê saída 90°	1	1.3
Tê saída bilateral	1	1.80
registro gaveta aberto	1	0.20
válvula retenção	1	2.50
Curva 45 graus	6	0.20
Tê de saída bilateral	2	1.80

$$\sum k = 10,6$$

Para a perda de carga localizada, além do valor obtido pela Equação 2, é acrescentado a perda de carga localizada devido aos filtros utilizados no sistema. Este sistema utiliza uma bateria de 3 filtros em paralelo, da marca Azud modelo Helix 2NR com conexão de diâmetro de 2”, a sua perda de carga varia conforme a vazão de escoamento do sistema. A perda de carga do filtro pode ser estimada conforme (Oliveira, 2006) apresenta seus resultados que utiliza este filtro como objeto de estudo com a Equação (26) adaptados de sua obra no gráfico da Figura 25.

Figura 25 - Perda de carga de filtro disco



Fonte: adaptado de (Oliveira, 2006).

$$H_f = 0,0062 \cdot 8,49^{1,9407} \quad (26)$$

$$H_f = 0,0062 \cdot 8,49^{1,9407}$$

$$H_f = 0,394 \text{ m.c.a.} / 3 = 0,131 \text{ m.c.a.}$$

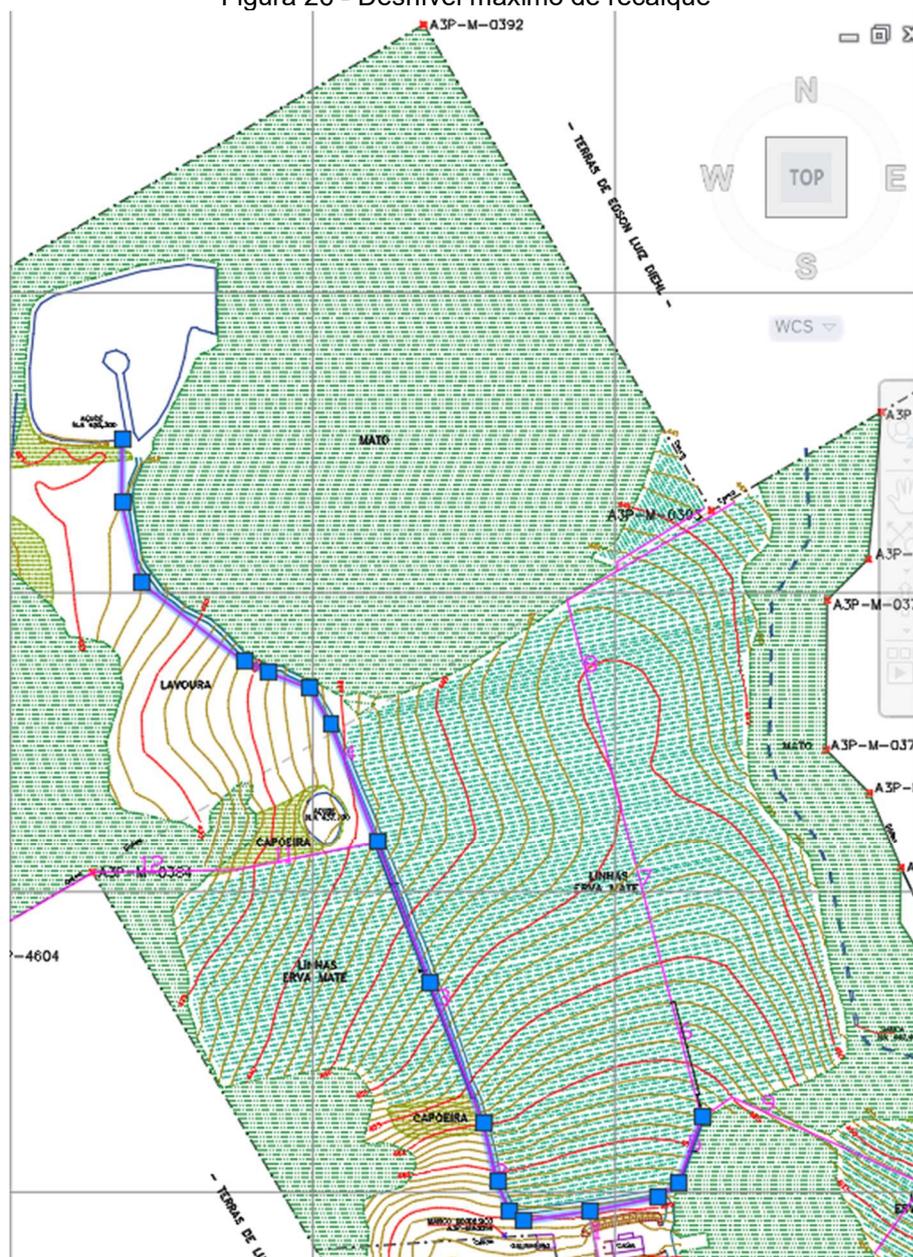
$$h_{p_{localizada}} = 10,6 \cdot \frac{0,62^2}{2 \cdot 9,81}$$

$$h_{p_{localizada}} = 0,661 + 0,131 = 0,792 \text{ m.c.a.}$$

5.6. DIMENSIONAMENTO DA BOMBA HIDRÁULICA

Para dimensionar uma bomba hidráulica que possa recalcar água para o setor 8, considera-se o desnível existente entre o local de instalação da bomba, próxima ao açude para captação de água, até o ponto mais alto pelo qual a adutora está instalada. Partindo do nível do açude, 425m até 470m do ponto mais alto com o comprimento total de aproximadamente 770m conforme indicado na Figura 26.

Figura 26 - Desnível máximo de recalque



Fonte: própria do autor.

Para este recalque, iniciou-se calculando a pressão atmosférica:

$$p_z = 10,33e^{-470m/8000}$$

$$p_z = 9,74 \text{ m.c.a.}$$

Admitindo que a pressão de vapor da água a 20°C é de 0,2386m.c.a. calculou-se o valor de NPSH_D:

$$NPSH_D = -1m - 0,11 \text{ m.c.a.} + 9,74 \text{ m.c.a.} - 0,2386 \text{ m.c.a.}$$

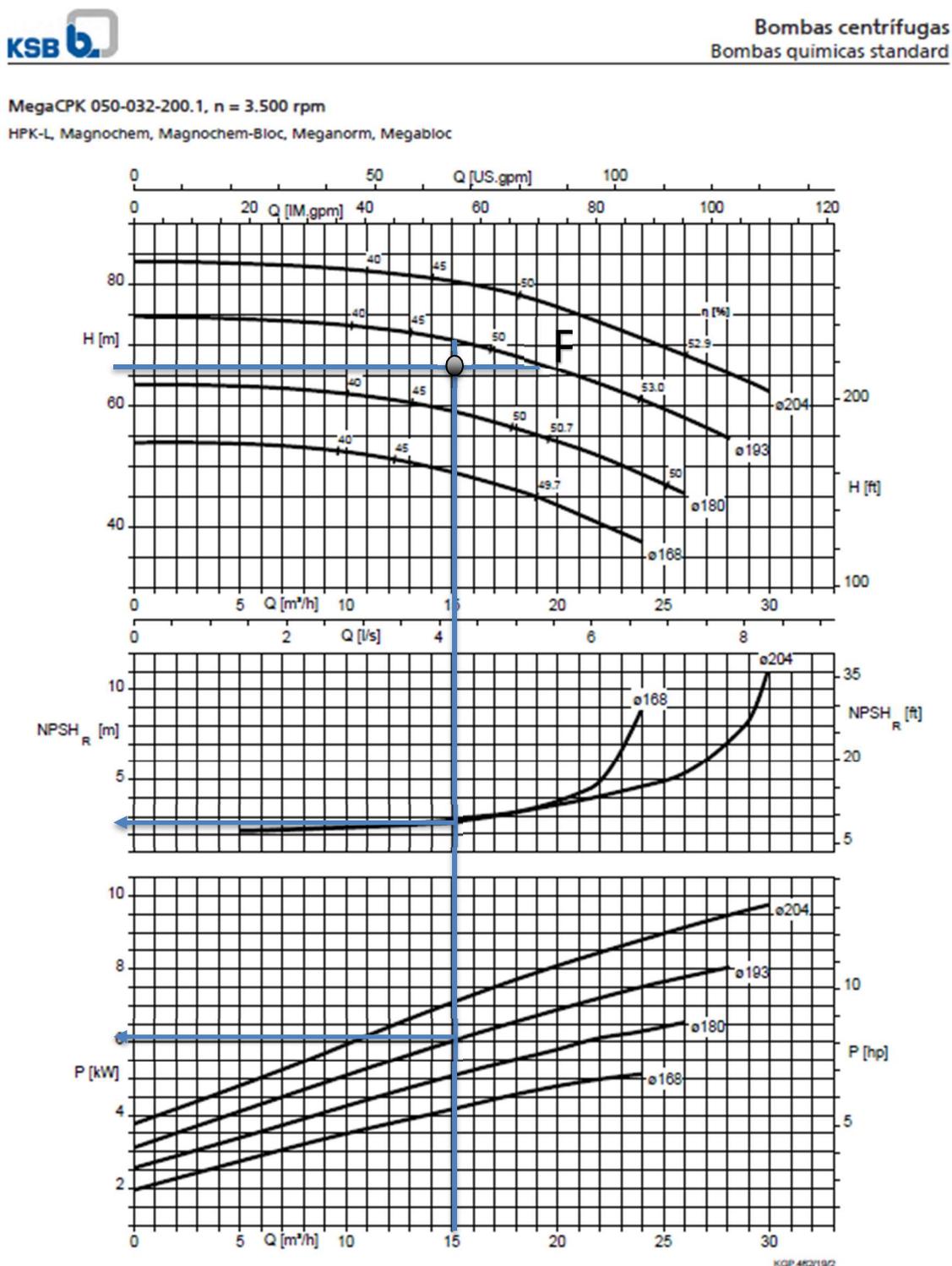
$$NPSH_D = 8,39 \text{ m.c.a.}$$

Sabendo que a vazão da adutora é de $0,004475\text{m}^3/\text{s}$ ($16,1104\text{m}^3/\text{h}$) e que a pressão no início da linha adutora (PILAS) é de $65,98\text{m.c.a.}$, procurou-se uma bomba hidráulica que atendesse a esses critérios.

$$NPSH_R = 1,9\text{m} < 8,03\text{m} = NPSH_D$$

Tendo em vista que o NPSH requerido é quatro vezes menor que NPSH disponível, pode-se dizer que está bomba centrífuga não irá cavitatar. O modelo é encontrado nos tipos HPK-L, Magnochem, Magnochem-Bloc, Meganorm e Megabloc, conforme a sua aplicação para água captada do açude, com tamanho 032-200.1 com rotor de 193mm de diâmetro e operando a 3500rpm . Visto que o ponto de funcionamento da bomba (PF) será a interseção das linhas demonstradas na Figura 27.

Figura 27 - Curva característica da bomba centrífuga



Fonte: folheto de curvas características 60Hz. KSB.

5.7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com base nos resultados apresentados, verifica-se que o dimensionamento de toda a tubulação deve operar com segurança hidráulica, de acordo com a velocidade

de escoamento muito abaixo da considerada a máxima admissível (2 m/s), oferecendo assim margem de ampliação do sistema sem que seja necessário a substituição das tubulações aterradas por outras com diâmetro maior, irrigando uma área maior simultaneamente ao passo que irá proporcionar um aumento de vazão e velocidade; como também os resultados mostram que os emissores operam dentro da faixa de pressão especificado pelo fabricante, fazendo com que eles fornecem uma vazão uniforme para as linhas de plantio.

Além das linhas, laterais, principais e adutora, verifica-se que não deve ocorrer cavitação na bomba hidráulica, tendo em vista que o $NPSH_D$ pelo sistema fica muito acima do requerido por ela.

6. CONCLUSÃO

Este Trabalho de Conclusão de Curso sintetiza e relata a metodologia utilizada para o dimensionamento de um sistema de irrigação por gotejo para a cultura da erva-mate, bem como sua implantação, além de relatar os primeiros resultados obtidos com a implantação do sistema. O objetivo da implementação do sistema de irrigação é de garantir que a planta receba a quantidade de água necessária para seu pleno desenvolvimento e aumentar a produtividade da erva-mate, que já vinha sendo cultivada na propriedade agrícola.

O projeto foi dimensionado e instalado na fazenda Ervais do Futuro, localizada no município de Espumoso no estado do Rio Grande do Sul. Na primeira etapa do projeto foi feita a caracterização do local incluindo dados climáticos para estimativa de evapotranspiração, identificação do ponto de captação de água e na sequência foi calculada a dose diária a ser aplicada na cultura pelo método por meio de irrigação localizada por gotejo, depois foi elaborado o layout do sistema e posteriormente, o dimensionamento hidráulico incluindo cálculo de vazão, diâmetro da tubulação, velocidade da água, perdas de carga, pressões requeridas nas tubulações e finalmente foi dimensionada e selecionado um modelo de bomba hidráulica para pressurizar de forma adequada o sistema.

Como resultado pode-se afirmar que o projeto de irrigação foi bem dimensionado e sua implantação garantiu que a demanda hídrica da cultura foi atendida pelo sistema de irrigação, até mesmo nos anos do fenômeno *La Niña* ao longo dos anos 2020, 2021 e 2022, quando a precipitação anual foi de 1461,66 mm, 1412,33 mm e 1765,87 mm respectivamente, sendo que a média anual da série histórica com trinta anos de dados nessa região é de 1.919 mm. Este projeto foi realizado (dimensionado e implementado) pela empresa Raul Moraes Consultoria e Representações LTDA, integrando o aluno durante seu estágio curricular. O trabalho foi bastante desafiador, pois envolveu teoria (todo o dimensionamento) e prática (instalação dos equipamentos dimensionados) seguindo para o manejo e operação do sistema, além do monitoramento realizado de forma como relatado neste trabalho.

Como conclusão, destaco a grande importância de aplicar na prática diversos conceitos vistos em sala de aula de áreas e disciplinas distintas. Isso foi fundamental para minha formação acadêmica e profissional.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE AGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL (org.). Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada. 2a. edição. Brasília: ANA, 2021.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. COEFICIENTES TÉCNICOS DE USO DA ÁGUA PARA A AGRICULTURA IRRIGADA. BRASÍLIA. ANA, 2019.
- ALLAN, R.; PEREIRA, L.; SMITH, M. Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. [S. l.: s. n.], 1998. v. 56
- ARRUDA, F.B.; LELIS, L.G.L.; BARROS, S.B.M. DE. MONTAGEM E TESTE DO TENSÍOMETRO SIMPLIFICADO. CAMPINAS: IAC, 1986. 10P. (IAC. BOLETIM TÉCNICO, 223).
- ATLAS SOCIOECONÔMICO RIO GRANDE DO SUL. QUANTIDADE PRODUZIDA DE ERVA MATE 2018-2020 – RS. DISPONÍVEL EM [HTTPS://ATLASSOCIOECONOMICO.RS.GOV.BR/MIDIA/IMAGEM/MAP-2018-2020-ERVA-MATE-RS](https://atlassocioeconomico.rs.gov.br/midia/imagem/map-2018-2020-erva-mate-rs). ACESSO EM 12 NOV. 2023.
- CAMARGO A.P.; GROHMANN, F.; CAMARGO, M.B.B. TENSÍOMETRO SIMPLES DE LEITURA DIRETA. PESQUISA AGROPECUÁRIA BRASILEIRA, BRASÍLIA, V.17, N.12, P.1963-1972, 1982.
- CAMPBELL, G.S.; MULLA, D.J. MEASUREMENT OF SOIL WATER CONTENT AND POTENTIAL. IN: STEWART, B.A.; NIELSEN, D.R., ED. IRRIGATION OF AGRICULTURAL CROPS. MADISON: ASA, 1990. P.127141. (AGRONOMY MONOGRAPH, 30).
- CARDOZO JUNIOR, E. L.; MORAND, C. INTEREST OF MATE (ILEX PARAGUARIENSIS A. ST.-HIL.) AS A NEW NATURAL FUNCTIONAL FOOD TO PRESERVE HUMAN CARDIOVASCULAR HEALTH – A REVIEW. JOURNAL OF FUNCTIONAL FOODS, [S. L.], V. 21, P. 440-454, 2016.
- CARMO, F. ET AL. EFEITO DA ÁREA E PRODUTIVIDADE NA PRODUÇÃO DE ERVA-MATE NO BRASIL. NATIVA, SINOP, V. 6, P. 85, 2018.
- CLIMATEMPO. CLIMATOLOGIA E HISTÓRICO DE PREVISÃO DO TEMPO EM ESPUMOSO, BR, DISPONÍVEL EM [HTTPS://WWW.CLIMATEMPO.COM.BR/CLIMATOLOGIA/2973/ESPUMOSO-RS](https://www.climatempo.com.br/climatologia/2973/espumoso-rs). ACESSO EM 01 FEV. 2024.
- CROGE, C. P.; CUQUEL, F. L.; PINTRO, P. T. M. YERBA MATE: CULTIVATION SYSTEMS, PROCESSING AND CHEMICAL COMPOSITION. A REVIEW. SCIENTIA AGRICOLA, PIRACICABA, V. 78, N. 5, E20190259, 2021.

- DE AZEVEDO, J. A. TENSÍMETRO: DISPOSITIVO PRÁTICO PARA CONTROLE DA IRRIGAÇÃO. TENSÍMETRO: DISPOSITIVO PRÁTICO PARA CONTROLE DA IRRIGAÇÃO, [S. L.], 1999.
- DE CARVALHO, E. N. CLAUDIO ALBERTO SOUZA DA SILVA¹ GIOVANI THEISEN¹ JOSÉ MARIA BARBAT PARFITT² JÚLIO JOSÉ CENTENO DA SILVA³ NATÁLIA FERREIRA POHLMANN⁴ EVANISA NUNES DE CARVALHO⁴ DANIELE RODRIGUES SEGABINAZI⁴. [S. L.],
- DERAL, DEPARTAMENTO DE CONJUNTURA AGROPECUÁRIA. PROGNÓSTICO ERVA MATE – NOVEMBRO DE 2020. DISPONÍVEL EM [HTTPS://WWW.AGRICULTURA.PR.GOV.BR/SITES/DEFAULT/ARQUIVOS_RESTRI-OS/FILES/DOCUMENTO/2021-09/PROGOSTICO_ERVA_MATE_-_2020.PDF](https://www.agricultura.pr.gov.br/sites/default/arquivos_restritos/files/documento/2021-09/progostico_erva_mate_-_2020.pdf). ACESSO EM 12 NOV. 2023.
- FRIZZONE, J. A. OS MÉTODOS DE IRRIGAÇÃO. [S. L.],
- GABIRA, M. M. et al. CEVAD campo: cultivo de erva-mate em alta densidade no campo. [s. l.], Colombo, PR. Março, 2023
- GOMES, H. P., ENGENHARIA DE IRRIGAÇÃO: HIDRÁULICA DOS SISTEMAS PRESSURIZADOS, ASPERSÃO E GOTEJAMENTO. 3ª EDIÇÃO. 412 P.
- GOULART, I. C. G. R.; SANTIN, D.; BRASILEIRO, B. P. FACTORS AFFECTING THE PRODUCTIVITY OF YERBA MATE PLANTATION. CIÊNCIA FLORESTAL, [S. L.], V. 32, N. 3, P. 1345–1367, 2022.
- GRANADOS, A. – INFRAESTRUCTURAS DE DE REGADÍOS – REDES COLECTIVAS DE RIEGO A PRESIÓN. SERVÍCIO DE PUBLICACIÓN DE LA E.T.S.I. DE CAMIINOS DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID. 1990.
- IBGE. PRODUÇÃO AGRÍCOLA – LAVOURA PERMANENTE. DISPONÍVEL EM [HTTPS://CIDADES.IBGE.GOV.BR/BRASIL/PESQUISA/15/11941?TIPO=GRAFICO&INDICADOR=11943](https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pesquisa/15/11941?tipo=grafico&indicador=11943). ACESSO EM 12 NOV. 2023.
- IBGE. PRODUÇÃO AGRÍCOLA MUNICIPAL. RIO DE JANEIRO, 2020A. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://SIDRA.IBGE.GOV.BR/PESQUISA/PAM/DOCUMENTOS](https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pam/documentos).
- IBGE. PRODUÇÃO DO EXTRATIVISMO VEGETAL E SILVICULTURA. RIO DE JANEIRO, 2020B. DISPONÍVEL EM: [HTTPS://SIDRA.IBGE.GOV.BR/PESQUISA/PEVS/DOCUMENTOS](https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pevs/documentos).
- IBRAMATE. Instituto Brasileiro de Erva-Mate. Disponível em : <https://www.ibramate.com.br/>.
- INYM. ESTADÍSTICAS DEL SECTOR YERBATERO. DISPONÍVEL EM [HTTPS://INYM.ORG.AR/DESCARGAR/PUBLICACIONES/ESTADISTICAS/2023.HTM](https://inym.org.ar/Descargar/Publicaciones/Estadisticas/2023.htm) L. ACESSO EM 12 NOV. 2023.

- JAMES, L.G. PRINCIPLES OF FARM IRRIGATION SYSTEM DESIGN. NEW YORK: J. WILEY, 1988. 543P.
- LEPSCH, I. F. et al. Manual para levantamento utilitário do meio físico e classificação de terras no sistema de capacidade de uso. 1. ed. Viçosa - MG: [s. n.], 2015.
- LEPSCH, I. F.; ESPINDOLA, C. R.; FILHO, O. J. V.; HERNANI, L. C.; SIQUEIRA, D. S. MANUAL PARA LEVANTAMENTO UTILITÁRIO DO MEIO FÍSICO E CLASSIFICAÇÃO DE TERRAS NO SISTEMA DE CAPACIDADE DE USO. 1ª ED. VIÇOSA - MG: [S. N.], 2015.
- MACINTYRE, 2017. MACINTYRE , ARCHIBALD JOSEPH. INSTALAÇÕES HIDRÁULICAS PREDIAIS E INDUSTRIAIS. 4ª ED. RIO DE JANEIRO: LTC, 2017.
- MASLOFF, V. M. A. YERBA MATE: COMPENDIO DE EXPERIENCIAS EN LA RECUPERACIÓN DE AGROECOSISTEMAS YERBATEROS. ENCARNACIÓN: MR PRODUCCIONES, 2013. 93 P.
- MAYOL, R. M. ET AL. CAUSAS QUE AFECTAN LA ADOPCIÓN DE TECNOLOGÍA EN PRODUCTORES DE YERBA MATE EN LA PROVINCIA DE MISIONES: ENFOQUE CUALITATIVO. BUENOS AIRES: INTA, 2014. (ESTUDIOS SOCIOECONÓMICOS DE LA ADOPCIÓN DE TECNOLOGÍA, 8).
- MEDRADO, M. J. S.; LOURENÇO, R. S.; RODIGHERI, H. R.; DEDECEK, R. A.; PHILIPPOVSKI, J. F.; CORREA, G. IMPLANTAÇÃO DE ERVAIS. COLOMBO: EMBRAPA FLORESTAS, 2000. 26 P. (EMBRAPA FLORESTAS. CIRCULAR TÉCNICA, 41).
- MONTEIRO, J. SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR INUNDAÇÃO. [S. L.],
- MOURA, A.R.C.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; ANTONINO, A.C.D.; AZEVEDO, J.R.G.; SILVA, B.B.; OLIVEIRA, L.M.M. M. EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA BASEADA EM MÉTODOS EMPÍRICOS EM BACIA EXPERIMENTAL NO ESTADO DE PERNAMBUCO - BRASIL. REVISTA BRASILEIRA DE METEOROLOGIA, V. 28, N. 2, P.181-191, 2013.
- OLIVEIRA, C. F. D. Perda de carga em filtros de tela e de discos utilizados na irrigação localizada. 2006. Mestrado em Irrigação e Drenagem - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006. Disponível em:
<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11143/tde-22022006-140618/>. Acesso em: 5 fev. 2024.
- OLIVEIRA, CLEOMAR FERREIRA DE PERDA DE CARGA EM FILTROS DE TELA E DE DISCOS UTILIZADOS NA IRRIGAÇÃO LOCALIZADA / CLEOMAR FERREIRA DE OLIVEIRA. - - PIRACICABA, 2005. 57 P. : IL.
- PENTEADO JUNIOR, J. F., G., I. C. G. DOS R. ERVA 20: SISTEMA DE PRODUÇÃO PARA ERVA-MATE. 2019. DISPONÍVEL EM:

[HTTPS://AINFO.CNPTIA.EMBRAPA.BR/DIGITAL/BITSTREAM/ITEM/193651/1/2019-MANUAL-ERVA20-WEB.PDF](https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/193651/1/2019-MANUAL-ERVA20-WEB.PDF).

PENTEADO JUNIOR, J. F., G., I. C. G. dos R. Erva 20: sistema de produção para ervamate. 2019. Disponível em:

<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/193651/1/2019-Manual-Erva20-web.pdf>.

RIGeo - Repositório Institucional de Geociências – CPRM, atual Serviço Geológico do Brasil (SGB). Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/14710>.

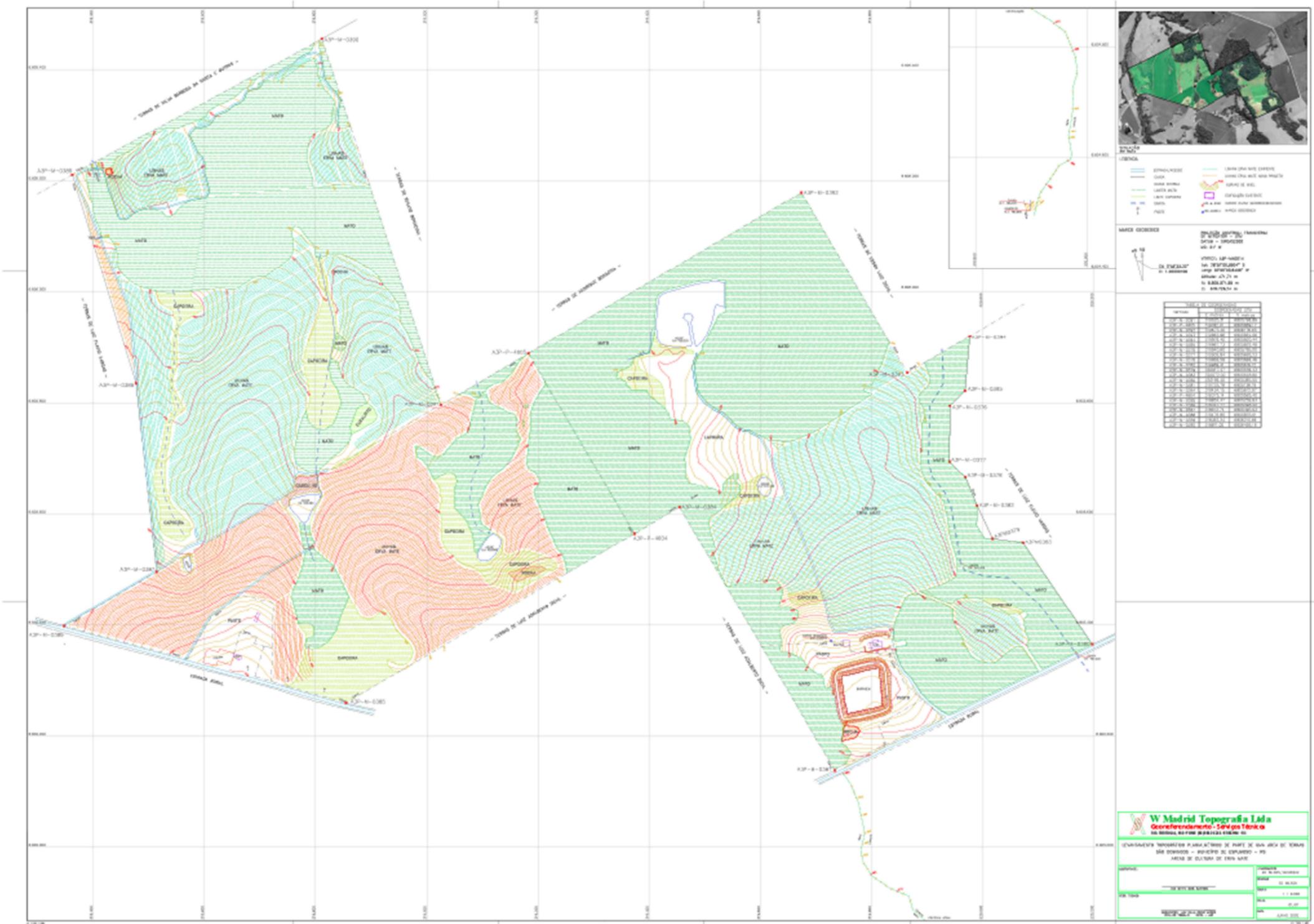
RODRIGUES, J. F. ; CASTRO, N. M. R. ; SILVA, P. R. F. ; SCHOENFELD, R. ; MASS, M. B. ; PAGLIARINI, N. . RENDIMENTO DE GRÃOS E EFICIÊNCIA DO USO DE ÁGUA DA CULTURA DO MILHO EM ÁREAS DE CULTIVO DE ARROZ INUNDADO COM DIFRENTE MANEJO DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM. IRRIGA (UNESP. CD-ROM), V. 1, P. 274-290, 2016.

RODRIGUES, R. ET AL. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. [S. L.],

SOUSA, I.F.; SILVA, V.P.R.; SABINO, F.G.; NETTO, A.O.A.; SILVA, B.K.N.; AZEVEDO, P.V. V. EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA NOS PERÍMETROS IRRIGADOS DO ESTADO DE SERGIPE. REVISTA BRASILEIRA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA E AMBIENTAL, V. 14, N. 6, P. 633-644, 2010.

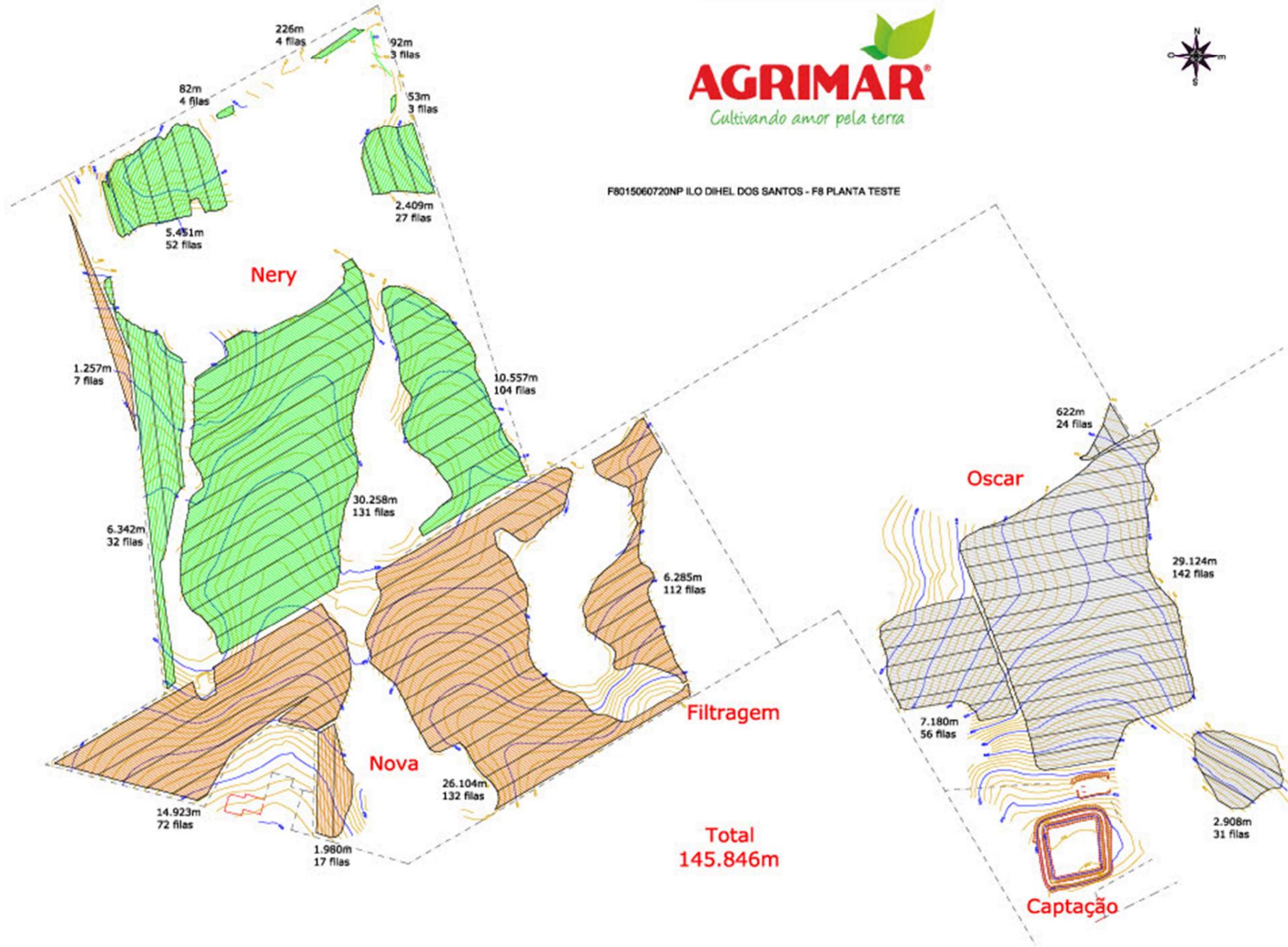
WENDLING, I.; SANTIN, D. PROPAGAÇÃO E NUTRIÇÃO DE ERVA-MATE. BRASÍLIA, DF: EMBRAPA, 2015. 195 P.

ANEXO A - LEVANTAMENTO PLANIALTIMÉTRICO DA ÁREA DE ESTUDO



Fonte: cedida pelos proprietários.

ANEXO B - LEVANTAMENTO DE MANGUEIRA GOTEJADORA



Fonte: cedido pelos proprietários.

ANEXO C - LAYOUT DOS SETORES



Fonte: própria do autor.