

Universidade de São Paulo  
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

Sensoriamento proximal no monitoramento de variáveis biométricas de plantas  
forrageiras em sistema de pastejo com cercas móveis

**Orlando Daniel Masnello**

Dissertação apresentada para obtenção do título de  
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia  
de Sistemas Agrícolas

Piracicaba  
2022

Orlando Daniel Masnello  
Engenheiro Agrônomo

Sensoriamento proximal no monitoramento de variáveis biométricas de plantas  
forrageiras em sistema de pastejo com cercas móveis

Orientador:  
Prof. Dr. **JOSÉ PAULO MOLIN**

Dissertação apresentada para obtenção do título de  
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia  
de Sistemas Agrícolas

Piracicaba  
2022

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação**  
**DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Masnello, Orlando Daniel

Sensoriamento proximal no monitoramento de variáveis biométricas de plantas forrageiras em sistema de pastejo com cercas móveis / Orlando Daniel Masnello. - - Piracicaba, 2022.

95 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Sensoriamento proximal 2. Sensores de distância 3. Cercas móveis  
4. Pastejo em faixas 5. Altura do dossel I. Título

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, que sempre esteve ao meu lado me incentivando e apoiando, mesmo com todas as dificuldades deste período de pandemia.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” e todo seu corpo docente, que possibilitaram uma formação profissional e acadêmica de excelência, tanto na graduação quanto na pós-graduação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Paulo Molin, pela confiança em mim depositada, paciência e respeito durante a condução do trabalho e pela dedicação com que conduz todas as atividades do Laboratório de Agricultura de Precisão (LAP) e os demais orientados, fazendo com que o ambiente de trabalho seja leve e possibilite oportunidades de complementar nossa formação.

A todos os colegas que fiz no LAP, da graduação no gMAP e da pós-graduação, pelo companheirismo e auxílio nas dificuldades. Por mais que tenhamos convivido pessoalmente por um curto período de tempo, tenho certeza que podemos contar uns com os outros, principalmente para um churrasco.

Ao meu amigo Bruno, pelas horas de conversas e ideias sobre o projeto de cercas móveis, pela amizade, companheirismo e bons queijos.

Ao meu irmão Júlio, pela ajuda com as várias coletas de campo, principalmente à noite, sempre ajudando com carinho e dedicação.

À minha querida namorada Júlia, desde a ajuda com a inscrição no mestrado, passando pelo auxílio em várias coletas de biomassa, até a revisão textual quando preciso. E também por todo companheirismo e momentos felizes.

Agradeço também a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), a Fundação de Estudos Agrários “Luiz de Queiroz” (FEALQ) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pelas bolsas de estudo concedidas durante a realização deste trabalho.

*“Olhem de novo esse ponto. É aqui, é a nossa casa, somos nós. Nele, todos a quem ama, todos a quem conhece, qualquer um sobre quem você ouviu falar, cada ser humano que já existiu, viveram as suas vidas... em um grão de pó suspenso num raio de sol.”*

**Carl Sagan**

## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| RESUMO .....  | 7  |
| ABSTRACT .....  | 8  |
| 1. INTRODUÇÃO.....  | 9  |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....   | 13 |
| 2.1.1. Manejo de pastagens.....   | 13 |
| 2.1.2. Cercas móveis.....   | 14 |
| 2.1.3. Cercas virtuais .....  | 19 |
| 2.1.4. Monitoramento de pastagens .....   | 22 |
| 2.1.4.1. Capacitância.....  | 23 |
| 2.1.4.2. Altura do dossel .....   | 23 |
| 2.1.4.3. Altura comprimida do dossel forrageiro.....  | 26 |
| 2.1.4.4. Estimativas visuais e visão computacional.....   | 30 |
| 2.1.4.5. Índices de vegetação .....   | 32 |
| 2.1.4.6. Perspectivas para o monitoramento de plantas forrageiras .....   | 33 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS.....  | 35 |
| 3.1. Local e período dos experimentos .....   | 35 |
| 3.2. Material vegetal utilizado .....   | 36 |
| 3.2.1. <i>Cynodon dactylon</i> cv. coast-cross .....  | 36 |
| 3.2.2. <i>Cynodon dactylon</i> cv. tifton-85 .....  | 36 |
| 3.2.3. <i>Megathyrsus maximus</i> cv. sempre-verde.....   | 37 |
| 3.2.4. <i>Pennisetum purpureum</i> cv. cameroon .....   | 37 |
| 3.3. Sensores utilizados .....  | 37 |
| 3.3.1. Sensor ultrassônico .....  | 37 |
| 3.3.2. Sensor LiDAR .....   | 38 |
| 3.3.3. Sensor de distância a laser .....  | 38 |
| 3.4. Determinação do número mínimo de pontos amostrais de altura do dossel forrageiro em pastos de capim tifton-85, cameroon e sempre-verde ..... | 39 |
| 3.5. Uso de sensores de distância de maneira pontual para correlação entre altura e biomassa de tifton 85, cameroon e sempre-verde.....           | 40 |
| 3.6. Uso de sensores de distância para coleta de dados sobre o dossel e correlação com altura e biomassa de capim coast-cross .....               | 42 |
| 3.7. Uso de esteiras de borracha para medidas de altura comprimida de capim <i>coast-cross</i> .....  | 43 |

|   |    |
|---|----|
| 3.8. Uso de esteira de borracha de baixa densidade para medidas de altura de plantas de <i>Cynodon dactylon</i> cv. coast-cross .....           | 45 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....   | 47 |
| 4.1. Número mínimo de pontos amostrais de altura do dossel forrageiro em pastos de capim tifton-85, cameroon e sempre-verde .....               | 47 |
| 4.2. Sensores de distância de maneira pontual para correlação com altura e biomassa em pastos de capim tifton-85, cameroon e sempre-verde ..... | 48 |
| 4.3. Sensores de distância para coleta de dados e correlação com altura e biomassa de capim coast-cross .....                                   | 52 |
| 4.4. Esteiras de borracha para medidas de altura comprimida de capim coast-cross .....  | 55 |
| 4.5. Esteira de borracha de baixa densidade para medidas de altura de plantas em pastos de capim tifton-85, cameroon e sempre-verde .....       | 58 |
| 4.6. Análise do conjunto dos resultados .....   | 62 |
| 5. CONCLUSÕES .....   | 65 |
| REFERÊNCIAS .....   | 67 |
| ANEXO .....   | 77 |

## RESUMO

### **Sensoriamento proximal no monitoramento de variáveis biométricas de plantas forrageiras em sistema de pastejo com cercas móveis**

No Brasil e no mundo as áreas de pastagem representam uma expressiva proporção do uso da terra. A intensificação do uso dessas áreas pode representar benefícios econômicos e ambientais, aumentando a rentabilidade e reduzindo os efeitos negativos trazidos pela pecuária extensiva. Essa intensificação pode ser realizada a partir da adequação entre oferta e demanda de forragem aos animais, tendo como uma de suas estratégias mais eficazes o manejo de pastejo. Dentre os principais métodos de pastoreio, o que possibilita o maior controle sobre a oferta de forragem é o pastejo em faixas, baseado na restrição em subdivisões das áreas de pastagem. Na maioria das vezes, o pastoreio é realizado de maneira manual, existindo também algumas propostas de cercas móveis automáticas, que realizam a movimentação dos animais pela área. Essa movimentação por sua vez, deve levar em consideração algum parâmetro estabelecido no planejamento agrônomo, idealmente entendido como alguma variável biométrica das plantas forrageiras relacionada com a biomassa. Dentre elas, destaca-se a altura e a altura comprimida do dossel, como as mais utilizadas. Com base na concepção de em um sistema de cercas móveis automático, que realize movimentação baseada em variáveis das plantas forrageiras, foram conduzidos experimentos buscando estabelecer o número mínimo de pontos amostrais de altura do dossel forrageiro em faixas de pastagem; avaliar o uso de quatro esteiras de borracha deslizadas sobre o dossel forrageiro para estimativas de altura comprimida e também avaliar duas metodologias de uso de sensores de distância para coleta de dados de altura do dossel. Os resultados obtidos demonstram que o uso de esteiras de borracha de diferentes densidades realiza compressão proporcional aos seus pesos, sendo também proporcionais as suas correlações com biomassa, apresentando potencial uso em medidas de altura comprimida do dossel. Sensores de distância laser, sonar e LiDAR podem ser calibrados para correlação com biomassa. Dados coletados pontualmente sobre o dossel forrageiro não devem ser usados para representar a altura real. Contudo, a coleta de dados em um deslocamento sobre o dossel forrageiro pode representar satisfatoriamente sua altura, apresentando  $R^2 = 0,96$  e  $RMSE = 0,03$  m em pastos de capim coast-cross para os sensores sonar e LiDAR. Como critério de amostragem, assumindo um erro inferior a 10%, é necessário um dado de sensor para representar a altura média do dossel referente à área de  $3,5 \text{ m}^2$ .

Palavras-chave: Sensoriamento proximal, Sensores de distância, Cercas móveis, Pastejo em faixas, Altura do dossel



## ABSTRACT

**Proximal sensing in the monitoring of biometric variables of forage plants in a grazing system with mobile fences**

In Brazil and in the world, pasture areas represent a significant proportion of land use. The intensification of the use of these areas can represent economic and environmental benefits, increasing profitability and reducing the negative effects brought about by extensive livestock farming. This intensification can be carried out from the adequacy between the supply and demand of forage to the animals, having grazing management as one of its most effective strategies. Among the main grazing methods, the one that allows greater control over forage supply is strip grazing, based on the restriction in subdivisions of pasture areas. Most of the time, grazing is carried out manually, and there are also some proposals for automatic mobile fences, which move the animals through the area. This movement, in turn, must take into account some parameter established in agronomic planning, ideally understood as some biometric variable of forage plants related to biomass. Among them, the height and compressed height of the canopy stand out as the most used. Based on the concept of an automatic mobile fence system, which performs movement based on forage plant variables, experiments were carried out seeking to establish the minimum number of sampling points for forage canopy height in pasture strips; to evaluate the use of four rubber mats slid over the forage canopy to estimate compressed height and also to evaluate two methodologies for using distance sensors to collect canopy height data. The results obtained demonstrate that the use of rubber mats of different densities performs compression proportional to their weights, being also proportional to their correlations with biomass, presenting potential use in measures of compressed height of the canopy. Laser, sonar and LiDAR distance sensors can be calibrated for correlation with biomass. Data collected on the forage canopy should not be used to represent actual height. However, data collection in a displacement over the forage canopy can satisfactorily represent its height, presenting  $R^2 = 0.96$  and  $RMSE = 0.03$  m in coast-cross grass pastures for the sonar and LiDAR sensors. As a sampling criterion, assuming an error of less than 10%, a sensor data is required to represent the average height of the canopy for the area of  $3.5 \text{ m}^2$ .

Keywords: Proximal sensing, Distance sensors, Moving fences, Strip grazing, Canopy height

## 1. INTRODUÇÃO

Segundo o censo agropecuário realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017), cerca de 45% do uso da terra nas propriedades nacionais é destinada a pastagens, somando aproximadamente 160 milhões de hectares. Sua maioria é destinada a criação de bovinos, representando a segunda maior produção e maior exportação mundial de carne (ABIEC, 2019).

No Brasil, várias são as razões para o perfil de produção baseado em pastagens, dentre elas as condições climáticas favoráveis para a produção de forrageiras, a grande extensão territorial brasileira e o baixo custo da terra. A esses, soma-se o fato de que as terras e o rebanho bovino têm sido vistos como investimentos seguros para a realidade econômica nacional, o que fez com que a atividade pecuária brasileira se estabelecesse quase que em sua totalidade a pasto (Ferraz, 2010; Amaral et al., 2012; Dias Filho, 2014). Apesar de representar a grande maioria da produção pecuária nacional e do uso da terra, nas últimas décadas a pecuária extensiva vem perdendo força frente à agricultura. Com maior estabilidade econômica, novas tecnologias e mercado extremamente competitivo, cada vez mais entende-se a necessidade de intensificar a produção (Dias Filho, 2014).

O avanço nas técnicas de manejo vem aumentando a produtividade e longevidade de pastagens cultivadas. Uma delas é o pastejo rotativo, o qual se baseia na divisão da área a ser pastejada em piquetes e permite que a pastagem se recupere sem a presença de animais. Uma variação dessa técnica é o pastejo em faixas, observado em países com maior intensificação do uso da terra. Consiste em movimentar os animais pela área constantemente, realizando assim a subdivisão dos piquetes em áreas menores, ocasionando menor perda por pisoteio e defecação (Costa e Queiroz, 2007).

Além do avanço das técnicas de pastoreio dos animais o monitoramento de variáveis biométricas das pastagens também é importante para o desenvolvimento sustentável da pecuária. Esse monitoramento permite identificar o melhor momento para realização do pastejo, aumentando a produtividade das fazendas. Um exemplo disso é o uso da altura do dossel forrageiro como base para estabelecer o momento de entrada dos animais e o período de ocupação em cada piquete. Além da altura do dossel, existem outras respostas das plantas forrageiras utilizadas como base para pesquisa e produção pecuária, as quais podem ser interceptação luminosa do dossel, índice de área foliar, capacitância do dossel forrageiro e altura comprimida do dossel (Pedreira, 2002; Silva e Júnior, 2007).

A altura comprimida do dossel forrageiro vem sendo estudada nas últimas décadas e se apresenta como uma boa métrica para o manejo de plantas forrageiras por integrar os

atributos altura e densidade do dossel em uma única medida (Mannetje, 2000). Vários equipamentos para medida de altura comprimida do dossel forrageiro são descritos na literatura (Castle, 1976; Earle e McGowan, 1979; Moyer e Schrock, 2007). O principal equipamento conhecido e utilizado, tanto por pesquisadores quanto por pecuaristas é o prato ascendente, do inglês “Rising Plate Meter” (RPM), o qual realiza uma pressão vertical sobre o dossel de cerca de  $5 \text{ kg m}^{-2}$  com um disco metálico ou acrílico de alta densidade e estima a massa de forragem naquele ponto pela altura do prato até o solo (Castle, 1976).

O monitoramento de aspectos morfológicos e fisiológicos das plantas forrageiras permite a intensificação do manejo por parte dos produtores, sendo parte essencial para a otimização de recursos na produção pecuária. Com o avanço de tecnologias de processamento e coleta de dados surgem novas oportunidades referentes a estas avaliações, o que pode trazer avanços significativos tanto na pesquisa quanto na produção de plantas forrageiras (Franco et al., 2021). Um exemplo disso é o uso de sensores proximais, que representa um avanço na coleta e processamento de dados biométricos de interesse.

Sensores de distância, em sua maioria ultrassônicos (sonar ou radar) e LiDAR (Light Detection And Ranging) são estudados na agricultura para modelagem de copa em plantio de frutíferas, estimativas de falhas em plantios silvestres e culturas perenes e também em medidas de altura e volume de dossel forrageiro (Safari et al., 2016; Colaço et al., 2018). Em específico para medidas de altura, a estimativa é calculada a partir da localização conhecida do sensor e o valor da distância entre o sensor e o alvo (Schulze-Bruninghoff et al., 2019). Alguns trabalhos buscam investigar o uso de sensores de distância em medidas de altura do dossel forrageiro de maneira pontual ou em movimento (Fricke et al., 2011; Legg e Bradley, 2019), além dos equipamentos comerciais existentes para esse tipo de medida (Schaare, 2005; Yule et al., 2010).

Algumas propostas com foco em altura comprimida do dossel forrageiro também são encontradas na literatura. Exemplos são as melhorias no RPM com uso de sensores e softwares de gestão de dados que facilitam a mão de obra da coleta dos dados, mas não alteram o princípio de funcionamento do equipamento (McSweeney et al., 2019). Existem também equipamentos que realizam pressão lateral sobre o dossel forrageiro, por meio de uma prancha deslizante acoplada a um sensor de angulação em sua extremidade (Moyer e Schorock, 2007; Grasstec, 2017). Contudo, não são encontrados trabalhos que buscam encontrar a relação entre a pressão lateral sobre o dossel forrageiro e sua biomassa, uma vez que os poucos equipamentos encontrados na literatura utilizam a pressão padronizada nos RPMs, de  $5 \text{ kg m}^{-2}$ .

O uso de sensores para coleta de dados biométricos de pastagens pode representar ganhos na redução da mão de obra e otimização de insumos, uma vez que facilita a obtenção de um grande número de pontos em comparação com medidas manuais. Isso pode representar melhorias significativas nos processos produtivos de fazendas, possibilitando a criação de mapas com atributos biométricos das pastagens de maneira espacializada, com séries temporais desses atributos ou aplicação de insumos com taxa variada em tempo real (Paula Neto et al., 2014; Safari et al., 2016).

Entende-se que sensores que realizem medidas representativas de altura ou altura comprimida do dossel forrageiro em uma área de pastagens podem ser utilizados como importante ferramenta no manejo. Considerando um sistema de cercas móveis, a movimentação do gado pelo pasto pode ser realizada de maneira automática, utilizando os dados coletados por sensores acoplados a extremidade dessas cercas. Durante o deslocamento, o limite de uma cerca móvel disponibiliza área para pastejo de maneira gradativa aos animais. Essa área pode ser entendida como uma faixa de largura definida, onde a mensuração de variáveis da planta pode ser realizada e cada faixa é disponibilizada aos animais no momento correto, estabelecido no planejamento do sistema.

Paralelamente a este trabalho, foram estudadas alternativas para cercas móveis com recursos de automação compatíveis com pastos tropicais, tendo como base os dados biométricos da pastagem. Foi gerada uma proposta (Anexo) e submetida à Agência USP de Inovação (AUSPIN). O sistema conta com a estrutura mecânica, eletrônica embarcada e um fluxograma de deslocamento automático baseado em variáveis das plantas forrageiras, obtidas a partir do monitoramento das áreas.

A obtenção de dados biométricos da pastagem pode ser feita de diferentes formas, desde coletas manuais até sistemas totalmente automatizados, com o uso de sensores proximais. Para isso, é necessário entender a relação entre os parâmetros utilizados, como número mínimo de pontos de coleta representativos e metodologias efetivas para o uso dos sensores. Com base nisso, os objetivos deste trabalho foram estabelecer o número mínimo de pontos amostrais de altura do dossel forrageiro em faixas de pastagem; avaliar o uso de esteiras de borracha deslizadas sobre o dossel forrageiro para estimativas de altura comprimida e também avaliar duas metodologias de uso dos sensores de distância para coleta de dados de altura do dossel forrageiro.



## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1.1. Manejo de pastagens

O manejo de pastejo é entendido como a estratégia de gestão do rebanho que visa otimizar o desenvolvimento das plantas forrageiras em um sistema de produção animal baseado em pastagens. Pode ser classificado em contínuo, alternado e rotativo, diferindo em relação ao nível de controle sobre a oferta de forragem. Enquanto no pastejo contínuo não se tem o controle sobre o consumo animal e o desenvolvimento da forrageira, no rotativo há a possibilidade de se reduzir o tempo de permanência dos animais na mesma área, possibilitando que a forrageira desenvolva os processos de crescimento vegetativo sem a interferência dos animais. Sendo o pastejo alternado o método intermediário, existe um período sem a ocupação dos animais, mas o controle sobre o desenvolvimento da forrageira é mínimo (Martha Júnior et al., 2003).

Independentemente do método a ser utilizado, o produtor pode manejar sua pastagem sob taxa de lotação fixa ou variada, também conhecida como carga animal. Quando em lotação variada, o número de animais ou a área são alterados em função de alguma resposta na pastagem durante um período de tempo. Para Pedreira (2002), um pastejo contínuo só poderá ter a sua taxa de lotação variada caso se altere o número de animais na área, uma vez que a área não é restrita aos animais. Já em um sistema de pastejo rotativo, a variação da área também pode ser realizada, pois existe um controle da área disponível aos animais. Segundo Silva e Cunha (2003), o pastejo rotativo é o que permite o maior controle sobre o desenvolvimento das plantas forrageiras, dividindo a área em vários módulos, denominados piquetes, e disponibilizando-os aos animais separadamente, o que faz com que o período entre a saída dos animais do piquete e a sua reentrada proporcione o desenvolvimento das plantas sem a interferência dos animais. O manejo utilizado para a rotação dos piquetes é majoritariamente estabelecido por um tempo pré-determinado na implantação do sistema. No entanto, já é constatado que a melhor maneira de realizar o manejo é utilizando parâmetros de desenvolvimento das plantas, como índice de área foliar, interceptação luminosa e biomassa (Silva e Júnior, 2007). Isso por que as variações no crescimento das plantas forrageiras durante o ano e a variabilidade entre os piquetes, causada por inúmeros fatores, não garantem uma gestão padronizada (Dias Filho, 2014; Silva, 2007).

Vários métodos são estudados para realizar esse manejo de maneira mais otimizada e invariavelmente eles têm como princípios a correlação entre algum parâmetro que possa ser mensurado a partir de respostas morfológicas da planta forrageira utilizada. Por

exemplo, a altura das plantas e a densidade do dossel forrageiro apresentam boa relação com biomassa e interceptação luminosa (Pedreira, 2002; Silva, 2007). Outros parâmetros como índices de vegetação e uso de visão computacional para identificação de plantas e da estrutura do dossel também vem sendo estudados (Handcock, 2016; Batistoti et al., 2019). O manejo mais eficiente é aquele que leva em conta os atributos das plantas forrageiras, deixando o tempo necessário para sua recuperação após o pastejo e também otimizando o próprio processo de pastejo, reduzindo perdas por pisoteio e defecação. Em países com alta intensificação na produção leiteira, como Nova Zelândia, Austrália, França e Reino Unido, por exemplo, é utilizado o pastejo em faixas, “strip grazing” ou “fast rotation grazing”, que é uma variação do sistema convencional de pastejo rotativo, onde o piquete é dividido em faixas menores, disponibilizadas ao gado de maneira gradual durante o dia. No entanto, é um sistema que demanda mão de obra para pastorear o rebanho e realizar a movimentação das cercas (Clark et al., 1998).

### **2.1.2. Cercas móveis**

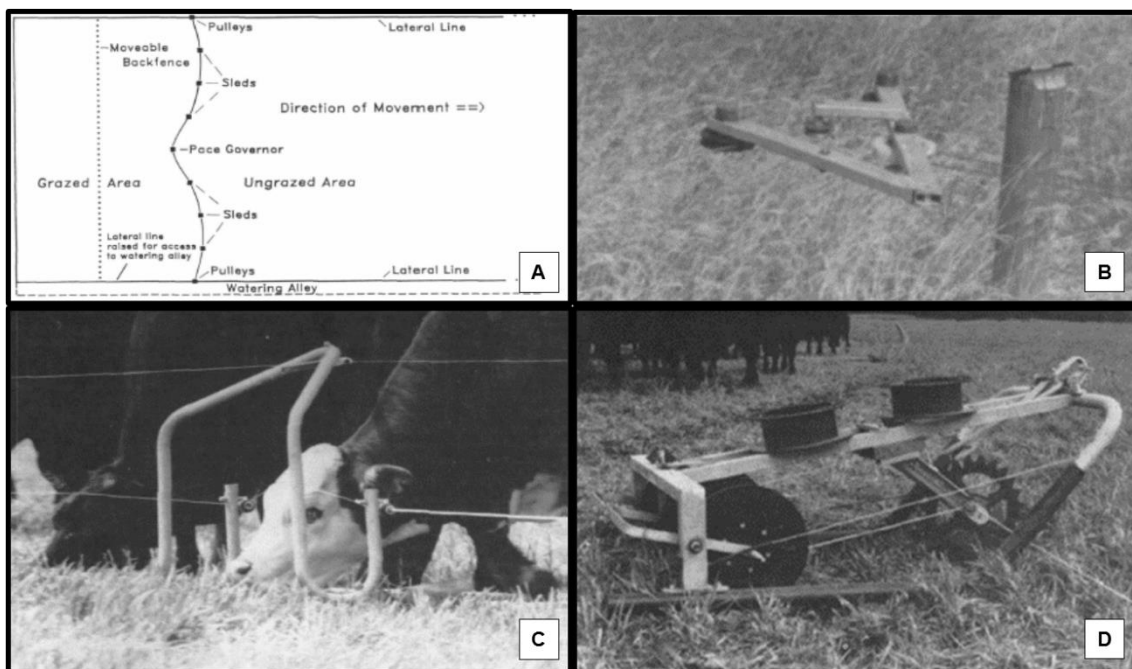
Quanto mais otimizado for o manejo, visando maior produtividade animal, maior será a necessidade de infraestrutura de divisão dos pastos e mão de obra, tanto para manutenção das cercas, bebedouros e cochos, quanto para a movimentação dos animais entre os piquetes. Mesmo que de maneira tímida, com poucos estudos a respeito, algumas propostas para automação deste manejo podem ser encontradas na literatura e no mercado, visando reduzir a mão de obra e aumentar a eficiência do processo de pastejo.

Os primeiros registros de automação desse processo, com uso de tração animal para movimentação das cercas dentro de piquetes, similar ao pastejo em faixas, são do início da década de 1990 (Volesky, 1990). Contudo, a primeira patente encontrada é de meados do século XX. Nela, Miler et al. (1956) propõem uma estrutura metálica que delimita a área de um piquete, com rodados de madeira ou borracha por toda sua dimensão. O formato retangular ou quadrado dessa estrutura se encaixa de modo a ser arrastado por trator sem deformações na área interna do piquete. Não existem fios elétricos ou farpados para controle dos animais, apenas grades metálicas por toda a extensão do piquete móvel.

Uma variação desta ideia pode ser observada em piquetes móveis para animais menores, como em criação de galinhas em aviários móveis (Oliveira et al., 2018; Naves et al., 2017; Veloso, 2010) movidos por uma fonte de potência externa, como trator ou quadriciclo. Esta estratégia não tem sido explorada para animais maiores, como cabras, gado de corte e leite.

Volesky (1990) propôs e avaliou uma estratégia de manejo que ficou conhecido como “pastejo frontal”, baseando-se em uma patente de Marseillán (1976). O sistema (Figura 1) é baseado estritamente na demanda de alimento pelos animais, onde uma cerca móvel disponibiliza pastagem nova ao gado de maneira gradual. Os animais realizam a movimentação da cerca pelo processo de pastejo, sempre pastejando algo à sua frente, imediatamente após “empurrar” a cerca, por isso denominado pastejo frontal (Figura 1A).

O sistema consiste em cercas laterais fixas e uma cerca móvel transversal. Estruturas metálicas tipo trenó sustentam os fios e se movem sobre a pastagem ao serem empurradas pelo gado em pastejo (Figura 1C). Uma estrutura metálica mais robusta, também em formato de trenó é posicionada ao centro da cerca móvel para manter o tensionamento mínimo nos fios (Figura 1D). Essa estrutura pode ser tracionada por um trator para adequar a linearidade e realizar a movimentação da cerca, quando necessário, além de possibilitar a regulação da tensão nos fios da cerca, uma vez que o gado poderia pastejar de maneira não linear, empurrando apenas uma parte da cerca. Um arranjo de polias mantém a cerca transversal móvel ligada às cercas laterais fixas (Figura 1A).



**Figura 1.** Sistema de pastejo frontal proposto por Volesky (1990) A ) Esquema de funcionamento para o sistema de pastejo frontal B) Equipamento de junção entre as cercas fixas laterais e a cerca móvel. Mourão de cerca com estrutura que proporciona a passagem do equipamento; C) Animal pastejando e forçando a movimentação de uma das estruturas metálicas de sustentação tipo trenó; D) Estrutura metálica reguladora de tensão dos fios, localizada ao centro da cerca móvel.

Seu uso não foi disseminado, e dentre as razões pode se considerar a dificuldade de adoção de novas tecnologias por parte de produtores de gado (Dias Filho, 2014), prováveis



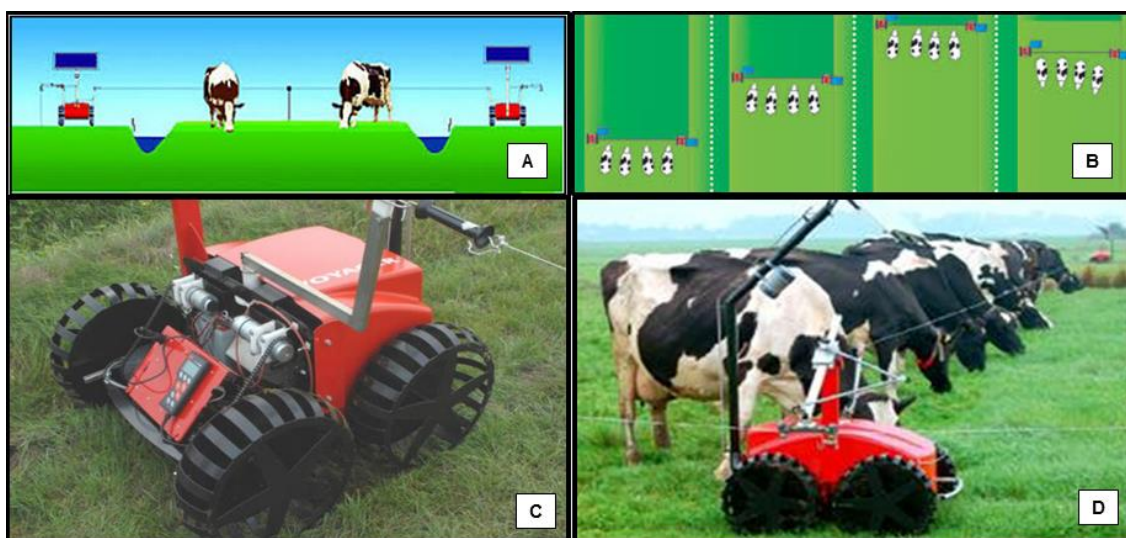
dificuldades no seu funcionamento efetivo e praticidade em fazendas comerciais. Volesky (1994) indica que o sistema não apresentou resultados satisfatórios em relação ao ganho de peso por área, como esperado, uma vez que o gado perderia menos pastagens por pisoteio e consumiria mais devido a seu aspecto competitivo. No entanto, isso não foi observado, provavelmente devido a uma desfolha muito leniente pelos animais, encurtando o ciclo da forrageira, que perde valor nutricional por características estruturais da população de plantas em subpastejo (Peterson, 1961; Volesky, 1994).

Sbrissia e Silva (2001) destacam o manejo de pastejo como sendo apenas uma das características a serem levadas em conta no sistema de produção animal a pasto, uma vez que o mesmo é influenciado por diversos outros fatores que interagem entre si, onde mudanças em quaisquer fatores do sistema individualmente podem não demonstrar ganhos significativos no resultado final. Com isso, pode se entender que para a realidade dos estudos acerca de pastejo frontal no início da década de 1990, a disponibilidade de pastagens de maneira irrestrita pelos animais não era vantajosa. É similar a um pastejo contínuo com alta oferta de forragem, o que favorece o ganho de peso por animal, mas desfavorece o ganho de peso por área, entendendo então a necessidade de um controle sobre a oferta de forragem na demanda animal (Silva & Pedreira, 1996).

Com os avanços em estudos sobre pastejo rotacionado, juntamente com os avanços em automação de sistemas, em 2007 a empresa Lely propôs um equipamento automatizado para o manejo de pastejo (Figura 2), com maior controle sobre a oferta de forragem ao rebanho e com menos demanda de mão de obra quando comparado aos sistemas de pastejo rotacionado (Lely, 2007). Esta automação seria realizada por dois robôs capazes de movimentar cercas elétricas em um sistema similar ao pastejo em faixas (Figura 2D), onde a área do piquete é subdividida em áreas menores. Neste caso, os robôs movimentam a cerca de maneira linear, disponibilizando áreas com pastagens mais novas aos animais (Fone, 2007).

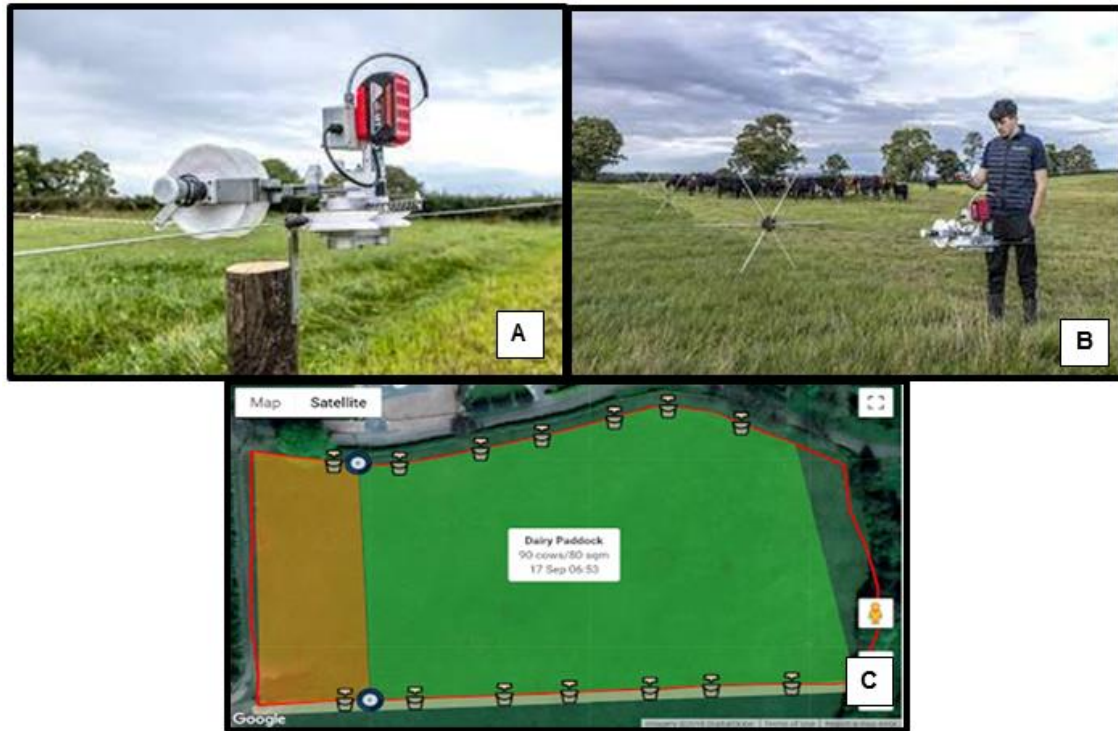
O controle do consumo animal seria baseado na programação prévia do deslocamento da cerca pela área de pastagem, com intervalos de tempo e distância de deslocamento definidas a partir dos dados de área disponível por dia. Seu acionamento é elétrico, alimentado por painéis solares e baterias, com tensão de 12v e corrente 110 Ah (Figura 2C). Os fios são mantidos esticados por meio de um sistema motorizado de rolo em um dos robôs e a comunicação entre os robôs é realizada via bluetooth. Ao que se pode entender sobre o equipamento, a disponibilidade de água aos animais seria realizada através de canais disponíveis ou escavados nas faixas em que o gado pasteja (Figura 2A). O custo de aquisição do equipamento em 2007 era de € 35.000,00 e sua adoção não

avançou, sendo logo descontinuado. Dentre os motivos pode-se analisar seu baixo benefício/custo se comparado a um sistema de pastejo em faixas de operação manual ou até mesmo a um pastejo rotacionado convencional, além das dificuldades de uso em áreas declivosas ou com deformidades entre as faixas.



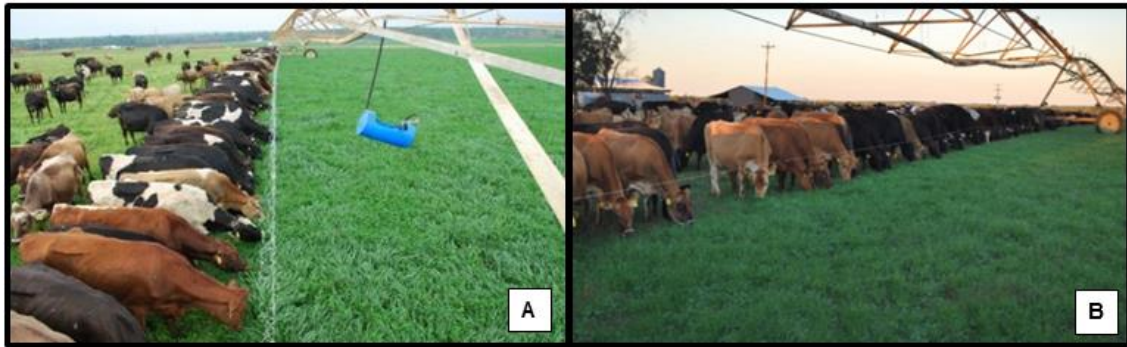
**Figura 2.** Robô para movimentação das faixas de pastejo de maneira automática proposto pela empresa Lely (2007). A) Esquemática dos córregos utilizados como bebedouro; B) Esquema do processo de pastejo proposto com o uso do equipamento Lely Voyage); C) Sistema de tração e display de programação do robô Lely Voyager; D) Vista lateral do sistema em funcionamento.

Em 2018, dois estudantes neozelandeses da Universidade de Dublin (UCD), na Irlanda, desenvolveram um equipamento acoplado a cerca elétrica, utilizando-a como guia, também com o mesmo princípio de manejo do pastejo em faixas (Figura 3). O equipamento foi desenvolvido a partir do manejo utilizado nas propriedades da região de Delvin, na Nova Zelândia, e ainda se encontra em processo de desenvolvimento, como produto principal da startup “Freshgraze”. O sistema, similar ao proposto pela empresa Lely (Lely, 2007), é acoplado aos fios das cercas laterais do piquete, utilizando-as como guia (Figura 3A). Um conjunto de três polias pressiona o fio elétrico e se desloca sobre ele. Um sistema de rolo motorizado é responsável por manter o fio transversal tensionado e sustentar os equipamentos na posição horizontal. O sistema pode ser manejado remotamente a partir de um aplicativo de celular (Figura 3C), o qual é comercializado juntamente com o equipamento (Freshgraze, 2019). É inspirado nos sistemas leiteiros intensivos com uso de pastejo em faixa de operação manual, bastante presente na região em que foi desenvolvido. Os únicos testes conhecidos são os divulgados pela empresa em seu site oficial e redes sociais.



**Figura 3.** Robô para movimentação das faixas de pastejo de maneira automática proposto pela empresa Freshgraze (2019). *A)* Equipamento acoplado a cerca lateral e fixação usada nos mourões permitindo o caminhamento; *B)* Imagem promocional do equipamento, mostrando uma visão lateral de seu funcionamento e o controle remoto por meio de smartphone; *C)* Tela de visualização do posicionamento da cerca móvel do software desenvolvido pela empresa.

Em áreas maiores e com o mesmo princípio de funcionamento, mas sem ter sido identificados estudos a respeito, alguns produtores utilizam pivô central de irrigação como suporte para cerca móvel (Figura 4), de modo a fixar fios elétricos no comprimento do pivô (Scot, 2014). Após a rega, o pivô retorna ao piquete em que o gado se encontra, realizando uma movimentação gradual e disponibilizando a forragem aos animais. Entre as torres de sustentação do pivô é posicionado um fio eletrificado, o qual impede a passagem do gado. O fio é suspenso durante a irrigação da área total e na passagem sobre as cercas que delimitam os piquetes. Não são encontrados estudos relacionados aos custos e eficiência desse sistema.



**Figura 4.** Sistema de pastejo em faixas baseado na movimentação de pivô central de irrigação (Poncio, 2011). A) Vista lateral de um pivô de irrigação contendo um fio elétrico acoplado e o gado pastejando em seu limite; B) Vista frontal de um pivô de irrigação contendo um fio elétrico acoplado e o gado pastejando em seu limite.

### 2.1.3. Cercas virtuais

As cercas virtuais também têm como foco a mecanização e automação dos espaços de pastejo, mas com maior diversidade de estudos e patentes se comparado com as cercas moveis. Utilizam algum sistema de localização para delimitar o espaço em que o rebanho deve permanecer, substituindo assim as cercas fixas convencionais. O rebanho utiliza colares, coletes ou algum adereço como brincos, embarcados com o sinal de localização e um dispositivo para sinais sonoros e estímulos elétricos. Mais recentemente vêm sendo testados sensores para coleta de informações dos animais, também embarcados nestes equipamentos (Umstatter, 2011; Campbell, 2020; Bhattacharya, 2018).

Em princípio as cercas virtuais foram pensadas para animais domésticos, como cães e gatos. Uma patente deu origem a um dispositivo tipo colar para animais, o qual responde a uma área delimitada por um fio, que pode ser enterrado ou não, ainda disponível no mercado (Peck 1973). Ao se aproximar deste fio o colar emite um sinal sonoro e ao atingir os limites ou ultrapassa-los é acionado um impulso elétrico aversivo aos animais. Uma evolução nesse conceito substituiu os fios de delimitação por um ponto central de emissão de ondas de radiofrequência e um dispositivo receptor que responde à intensidade desse sinal para aplicar os sinais sonoros e estímulos elétricos, delimitando a área pela intensidade do sinal de radiofrequência (Brose, 1990). Desta forma, o sinal sonoro e o impulso elétrico respondem à distância dos animais para uma estação emissora, ao atingirem uma intensidade definida previamente. Weinstein (1991) propõe um sistema com múltiplos sinais de rádio e antenas direcionais, possibilitando áreas delimitadas com geometria irregular e bem definidas, não mais dependentes de um ponto central de emissão dessas ondas, mas ainda regulando a intensidade do sinal recebido para aplicação dos

estímulos. As propostas apresentadas foram idealizadas para animais domésticos, mesmo que fossem generalistas na descrição das patentes.

Transmissores de ondas de rádio também foram propostos por Aine (1992), desta vez em específico para estabelecer áreas a serem pastejadas por gado de corte, podendo ser elas áreas de exclusão ou de pastejo, dependendo do posicionamento dos lóbulos de transmissão, facilmente movidos para realização de pastejo rotativo. Com esse sistema seria possível a delimitação de porteiras eletrônicas na intersecção entre três lóbulos de transmissão; a intersecção de dois deles delimitaria a área a ser pastejada e o terceiro sobreposto a essa intersecção habilita a passagem do gado.

Em 1999 foi concedida uma patente com uso de Sistemas Globais de Navegação por Satélites (GNSS) (Marsh, 1999). Esta proposta difere das demais que necessitam de algum tipo de estrutura para a delimitação das áreas, como fios (Peck, 1973) e antenas transmissoras (Aine, 1992; Brose, 1990). O sistema é proposto para uso em bovinos, em que um brinco colocado nos animais emite os sinais sonoros e impulsos elétricos a partir do posicionamento dos animais. Uma área de exclusão é delimitada previamente e inserida em uma estação fixa que controla o posicionamento dos animais.

Anderson e Hale (2001) propõem um sistema também baseado em GNSS, inicialmente como colar, e proposto posteriormente como um dispositivo a ser posicionado na cabeça e orelhas dos animais. O diferencial deste sistema é o uso de um dispositivo com atuadores bilaterais, onde estímulos no lado direito do animal o fariam virar para a esquerda e vice-versa. Desta forma os animais saberiam para que lado estaria a delimitação e até mesmo poderiam ser direcionados para os cochos ou novas áreas. Algoritmos para otimizar os estímulos a serem aplicados também são propostos, impossibilitando os animais de receberem muitos estímulos e sinalizando quais equipamentos necessitam de reparos (Butler et al., 2004; Schwager et al., 2007).

Os equipamentos acoplados em colares, com uso de GNSS e estímulos variados (Marsh, 1999; Anderson e Hale, 2001) vêm sendo estudados para uso em rebanhos de propriedades comerciais. Bhattacharya et al. (2018) avaliaram a otimização no uso de energia para as cercas virtuais eShepherd®. Os autores propõem um sistema de acionamento automático do equipamento GNSS de leitura de posicionamento a partir da movimentação dos animais, uma vez que a alta frequência de coleta dos dados de posicionamento resulta no maior fator de consumo de energia pelo equipamento. Desta forma, os dados de posicionamento não são coletados quando os animais estão parados, e o equipamento fica em modo de espera, com consumo de energia reduzido. Os autores relatam uma economia expressiva de energia, atingindo 90% quando em descanso, 85%

com animais pastando e 70% com animais em movimento, comparados com o sistema de coleta contínua de dados de localização.

Campbell et al. (2020) testaram a campo o dispositivo de cercas virtuais eShepherd®, mantendo 20 novilhas zebuínas (*Santa Gertrudis*) em uma área por 44 dias. Inseriram uma zona de exclusão que continha o dobro de forragem disponível em comparação à zona pastejada. A maioria dos animais respeitou a área de exclusão durante o período do estudo, com exceção de três animais, os quais foram removidos do experimento após o 39º dia, devido à alta taxa de sinais emitidos. Os autores atribuíram essas ocorrências a defeito na intensidade do impulso elétrico desses equipamentos quatro dias antes da remoção dos animais.

Umstatter (2010) testou a exatidão de um equipamento de cercas virtuais baseado em posicionamento GNSS (BlueSky Telemetry, Aberfeldy, Reino Unido) para aplicação de impulsos elétricos. A autora posicionou um colar equipado com um receptor GNSS, de frequência não informada, no limite de duas linhas virtuais, caracterizando um animal posicionado em um dos vértices do limite de uma área poligonal qualquer, registrando a localização a cada 4 segundos durante 35 minutos, em um total de 524 pontos. Ao analisar os pontos registrados ela observou que apenas 21 pontos estavam dentro do limite da linha virtual 1, e 66 pontos dentro do limite da linha 2.

A resposta a estímulos para a delimitação de áreas envolve considerações sobre raças de animais e manejos que resultam em diversidade de respostas possíveis por parte dos animais. Estudando especificamente o aprendizado dos animais Markus et al. (2014) demonstram a capacidade dos animais de assimilarem estímulo aos limites estabelecidos. Constataram que alguns animais, mesmo após vários dias sem o uso dos equipamentos, não ultrapassaram os limites estabelecidos, o que dificultaria mudanças nesses limites de maneira dinâmica, como abertura e fechamento de porteiras virtuais ou pastejo em faixas. Resultados similares foram observados por Fay et al. (1989), em que alguns animais não responderam aos sinais sonoros e estímulos elétricos corretamente. Os autores indicaram que alguns animais não possuem boa capacidade de assimilação dos estímulos com a área a ser excluída, não respondendo da maneira correta. Os resultados encontrados por Campbell et al. (2017) apontam que os animais devem ser previamente treinados para assimilação dos estímulos e conduzidos pelos sinais sonoros bilaterais, associando o estímulo com a necessidade de movimento e não com uma localização específica. Desta maneira seria possível realizar a rotação das áreas de exclusão, realizando o manejo das pastagens.

#### **2.1.4. Monitoramento de pastagens**

O monitoramento de aspectos morfológicos e fisiológicos das plantas forrageiras sempre foi imprescindível para os avanços nas técnicas de manejo de pastagens. Esse monitoramento permite a intensificação do manejo por parte dos produtores (Franco et al., 2021). A massa de forragem é um dos principais atributos quantitativos avaliados, tanto na pesquisa quanto na produção, por representar a massa total de forragem presente em uma determinada área, sendo base para as estimativas de acúmulo de forragem (AF) e oferta de forragem (OF). Segundo Burns et al. (1989), a massa de forragem é uma das quatro medições de maior importância para experimentação, além de fundamental para técnicas de manejo de pastejo (Silva e Júnior, 2007). Outra variável de importância a interceptação de luz pelo dossel forrageiro, o qual pode indicar a taxa de acúmulo ideal e consequente índice de área foliar ótimo, para cada cultivar, sendo correspondente às fases de crescimento, e com isso aferir o momento ideal para desfolha, otimizando os processos de crescimento das plantas entre os ciclos de pastejo (Parsons et al., 1988).

Diversas técnicas de monitoramento têm sido descritas na literatura ao longo dos anos, buscando entender a relação entre a produção de forragem e o consumo dos animais, representando um importante passo nos avanços em produtividade e otimização de recursos de sistemas pecuários. Mannetje (2000) aborda alguns métodos de estimativa de variáveis de interesse em pastagens. As mesmas podem ser coletadas por métodos diretos e indiretos, sendo os métodos indiretos correspondentes a medidas de variáveis correlacionadas às variáveis de interesse, geralmente menos laboriosas e de menor custo.

Dentre as medidas por métodos indiretos para estimativas de massa de forragem, Mannetje (2000) e Pedreira (2002) citam como principais o uso de avaliações visuais, altura do dossel, densidade do dossel, altura comprimida do dossel e capacitância ou capacidade elétrica do dossel. Além disso, Shelberrg (2008) descreve a quantificação da reflectância a partir de respostas espectrais em diferentes bandas do espectro eletromagnético para correlações com massa de forragem, índice de área foliar e composição nutricional de pastagens, sendo esta técnica facilitada com o avanço do poder de processamento computacional e sensoriamento proximal (Anderson et al., 2017).

#### **2.1.4.1. Capacitância**

A capacitância é a grandeza escalar que mede a capacidade de armazenamento de energia de um corpo. A diferença da capacitância do ar e do interior das plantas forrageiras apresenta uma correlação positiva com a biomassa, e essa diferença pode ser quantificada por sondas de capacitância (Currie et al., 1987). A sonda emite uma corrente eletromagnética por uma haste sensora capaz de estimar a capacitância ao seu redor. Medidas são realizadas sobre o dossel (ao ar livre) e no seu interior, estimando assim a capacitância do dossel forrageiro para um determinado volume. Essas sondas são desenvolvidas para forrageiras de clima temperado e o volume de amostragem é correspondente a um espaço cilíndrico de 100mm de diâmetro e 400mm de altura, nos equipamentos comerciais mais encontrados na literatura (Hirata, 2000; Sanderson et al., 2001)

Serrano et al. (2009) avaliaram o uso da sonda de capacitância em estimativas espacializadas de biomassa de pastagens. Encontraram bons coeficientes de determinação ( $R^2$ ) em gramíneas de clima temperado, entre 0,67 e 0,90. Outros autores também obtiveram boa relação entre massa de forragem e sonda de capacitância. Hirata (2000) obteve valores de  $R^2$  de até 0,98 nas condições específicas do experimento realizado com bahia grass em Miyazaki no Japão. Contudo, esta técnica apresenta grande variação para as diferentes épocas do ano e diferentes espécies de plantas forrageiras, variando de níveis muito baixos de  $R^2$  de 0,14 (Canduro et al., 2006) a níveis moderados e altos de 0,7 (Hirata, 2000) e 0,8 (Serrano et al., 2009). Por se tratar de um método indireto de segunda ordem (estima umidade para estimar biomassa), sofre muita interferência de fatores como microclima, solo e material morto. Esses fatores tornam o seu uso restrito a calibrações frequentes, e ainda apresentado baixa correlação com biomassa em alguns casos, principalmente em regiões com grande variação espacial do volume de água presente nas plantas (Hirara, 2000; Serrano et al., 2009).

#### **2.1.4.2. Altura do dossel**

A altura do dossel também apresenta correlação positiva com a massa de forragem (Pedreira, 2002). O método tradicional para medidas da altura do dossel forrageiro baseia-se na medida da distância entre o solo e uma folha de papel ou filme plástico de baixa densidade depositado sobre o dossel. A correlação entre altura e massa de forragem é tão forte quanto melhor distribuída for a massa de forragem nos estratos do dossel. Normalmente espécies leguminosas apresentam densidade mais homogênea entre os



extratos se comparadas com gramíneas, em especial as tropicais (Moore et al., 1987, Sollenberg e Burns, 2001). Contudo, a altura do dossel forrageiro é usada não apenas para estimativas de biomassa como também para correlações com interceptação luminosa, sendo uma importante métrica para o manejo de pastagens, tendo em vista a facilidade na obtenção dos dados em comparação com as demais medidas usadas no manejo (Pedreira, 2002; Silvae Júnior, 2007).

As soluções disponíveis no Brasil para o manejo de forragem pela altura do dossel são de uso prático, e apoiadas nos conceitos de baixo custo e de boa aceitação por parte do produtor. Várias réguas para medida de altura do dossel de pastagens já foram propostas para diversas cultivares de plantas forrageiras. Invariavelmente, consistem em um bastão graduado com as alturas demarcadas para entrada e saída dos animais no piquete (Costa, 2017). No entanto, esta técnica é manual e depende de pessoal treinado para realização das medidas de maneira representativa dentro da área de pastagens, a fim de estimar uma média de altura do dossel para a área. Outra estratégia para o manejo é apresentada por Paula Neto et al. (2014), em que os autores avaliam a distribuição espacial da altura do dossel, massa de forragem e solo exposto em pastos de *Urochloa* híbrida cv. Mulato II, visando a redução de solo exposto em sistemas de pastejo contínuo, encontrando dependência espacial para o atributo altura do dossel forrageiro em todos os tratamentos estudados.

Sensores eletrônicos de distância e de presença também podem ser usados para medidas de altura do dossel forrageiro. O equipamento C-DAX (C-dax Agriculturam Solutions; Palmerston North, Nova Zelândia) é baseado em sensores de presença dispostos verticalmente em duas barras paralelas presentes em uma estrutura metálica acoplada a um quadriciclo, responsável pela tração da mesma pela área de pastagem. Ao se movimentar, essa plataforma permite que a pastagem passe por entre o espaço das duas barras, e a interrupção do sinal proporcional a um número de receptores é usada para estimar a altura do dossel forrageiro. Yule et al. (2010) apresentam o procedimento de calibração em campo do equipamento, mostrando dados para diferentes espécies, com resultados de  $R^2$  entre 0,70 a 0,91 (apud. Fulkerson, 2007).

Atualmente sensores de distância são estudados para modelagem de copa em plantio de frutíferas, altura e volume de dossel forrageiro, estimativas de falhas em plantios silvestres e culturas perenes e semi-perenes (Safari et al., 2016; Colaço et al., 2018). São em sua maioria sensores de distância ultrassônicos (sonar ou radar) e LiDAR. Em geral, estes sensores estimam a distância até um objeto por meio da emissão e recepção de um sinal. A diferença entre o tempo de emissão e recepção do sinal pelo sensor é convertida

em distância, a partir da constante de velocidade do sinal em questão, seja ele sonoro, de luz ou qualquer tipo de onda mensurável. Sensores LiDAR tem ainda a vantagem de sinais múltiplos, que possibilitam uma gama de pontos de distância, podendo ser usados em modelagem de superfícies. A partir dos dados de distância obtidos pelos sensores, e da localização conhecida do sensor, é possível estimar a altura do dossel (Schulze-Bruninghoff et al., 2019).

Schaefer e Lamb (2016) utilizaram um sensor LiDAR em combinação com índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) para estimativas de biomassa e cobertura vegetal em pastos de *Festuca arundinacea*, encontrando  $R^2 = 0,61$  entre altura LiDAR e massa de forragem. Schulze-Bruninghoff et al. (2019) testaram quatro modelos de agrupamento de dados de LiDAR para correlações com massa de forragem em pastos nativos na Alemanha, encontrando  $R^2$  de até 0,54 para o modelo de cobertura de superfície.

Ali et al. (2017) avaliaram o uso de ondas de rádio de sensores orbitais do satélite TerraSAR-X de alta resolução para avaliar a altura de pastagens nativas na Irlanda, encontrando  $R^2=0,55$  em correlações com altura medida pelo método tradicional e  $R^2=0,75$  com biomassa. Santos (2019) validou o uso de micro-ondas moduladas em frequência para medidas de porte de plantas de milho. Essa estratégia permite que radares de baixo custo possam mensurar distâncias curtas, sem que os mesmos sofram interferência de poeira, radiação ultravioleta ou ruídos, como é o caso dos sensores comumente usados para medidas de curta distância em ambiente aberto. Apesar de uma técnica válida para medidas a campo, o acamamento da cultura impossibilitou a correlação entre altura e biomassa da cultura.

Geralmente a altura medida por sensores a laser é diferente da altura medida pelo método tradicional, pois medem pontualmente a cobertura do dossel e não uma média suavizada como nas medidas usando filme plástico. Com base nisso, Benvenuti et al. (2019) propuseram um estudo utilizando um sensor de distância a laser para medidas de altura e densidade de capim Kikuo, na Austrália. Os autores realizaram a média de 100 medidas em um intercepto de 0,5 m, posteriormente dividiram os dados de cada ponto pelo maior valor a cada 0,05 m de intercepto, resultando no que os autores chamaram de índice de densidade aparente. Uma regressão não linear usando dados de altura e índice de densidade aparente proporcionou valores de  $R^2=0,82$ , em comparação com  $R^2=0,77$  de medidas de altura realizadas pelo método tradicional.

Schaare (2005) documenta a primeira patente referente a um sensor ultrassônico para medidas de altura de pastagens, onde descreve o funcionamento básico deste tipo de medidas sobre um dossel forrageiro qualquer. O autor descreve que o instrumento pode ser

usado em veículos, para medidas em movimento, mas sem citar estudos a respeito. Fricke et al. (2011) realizaram um ensaio de um sensor ultrassônico e um receptor GNSS para medidas de altura do dossel forrageiro em tempo real. Algumas limitações nas medidas em movimento foram documentadas, dentre elas a baixa resposta às variações abruptas do dossel forrageiro e a área ampliada de resposta do sensor em movimento, reduzindo a exatidão dos dados. Os autores propõem o uso de uma matriz de sensores e a modulação da frequência do sinal emitido como possíveis soluções em avaliações em tempo real.

Safari et al. (2016) também avaliaram o uso de uma plataforma com sensores espectrais e ultrassônicos, em movimento, para coleta de dados especializados. Relataram baixa precisão causada pela desuniformidade do terreno com a plataforma em movimento, mas obtendo valores de  $R^2 > 0,80$  nos ensaios estáticos em pastos de *Lolium cynosuroides*. Moeckel et al. (2017) testaram uso de sensores ultrassônicos em conjunto com sensores multiespectrais. Os autores encontraram  $R^2$  entre 0,36 e 0,74 utilizando apenas a altura do dossel pelos sensores ultrassônicos, atribuindo esse desempenho à variação da cobertura do dossel de *Lolium cynosuroides* nas medidas pós pastejo.

Em outra proposta de um coletor de dados embarcado em veículo, Legg e Bradley (2019) propõem o uso de uma matriz de receptores ultrassônicos e um emissor de sinal em baixa frequência, que penetra por todo o dossel forrageiro, sendo recebido pelo arranjo de receptores em diferentes momentos, relativos ao perfil do dossel. Desta forma é possível estimar a densidade do dossel a partir da distribuição dos pontos pelo perfil, e a altura do dossel, utilizando apenas os dados referentes a camada superior do conjunto de pontos. Os autores também propõem que a altura do dossel seja representada utilizando como base os pontos que atingem o solo, e não mais a altura do sensor em relação ao solo, uma vez que a mesma pode sofrer alterações conforme o movimento e as variações na superfície do terreno. Os autores encontraram  $R^2 = 0,80$  para o uso de um modelo que integra altura e densidade do perfil em pastagens de *Festuca arundinacea*, propondo as equações referentes às calibrações para quaisquer tipos de plantas forrageiras.

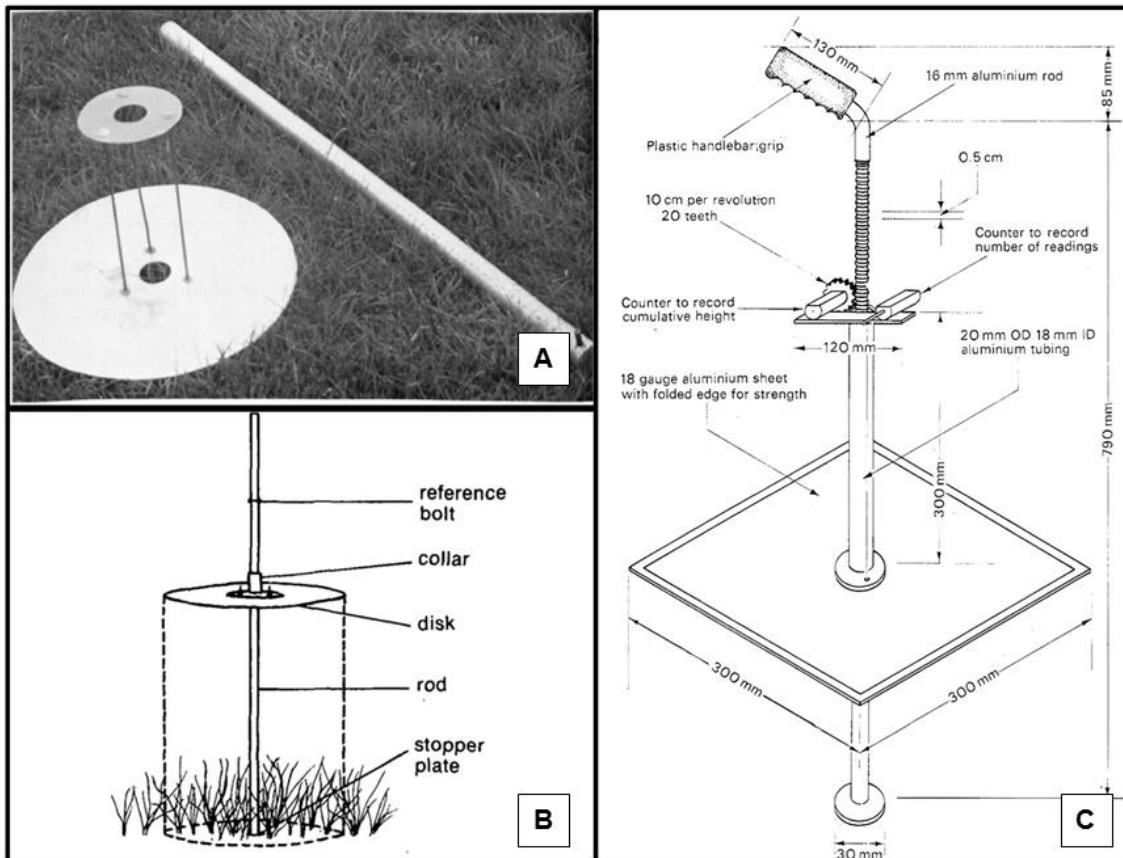
#### **2.1.4.3. Altura comprimida do dossel forrageiro**

A variável altura comprimida do dossel vem sendo estudada há pelo menos 40 anos. Ela consiste na medida de altura do dossel submetido a uma certa pressão, integrando valores de altura e densidade. Com base nisso, Phillips e Clarke (1971) avaliaram a relação entre a altura do dossel sob pressão de um disco metálico de aproximadamente 1 kg e a massa de forragem de trevo, encontrando resultados significativamente melhores que as

estimativas visuais para os mesmos pontos de calibração. O disco era posicionado sobre uma estrutura metálica tipo tripé, e uma régua graduada era posicionada sobre o tripé, medindo a altura de um bastão acoplado ao disco.

Em 1976, Castle descreve um instrumento composto por um bastão graduado e dois discos de metal rígidos ligados por uma estrutura metálica, um sobre o outro, de maneira que o conjunto dos dois discos deslize verticalmente pelo bastão (Figura 5A). Um pino é posicionado na parte inferior do bastão, desta forma os discos se limitam a percorrer o bastão até a base, e quando o bastão é levantado pelo operador o disco também é. A medida se dá quando o disco inferior toca o dossel, e o bastão é empurrado até tocar o solo. Neste momento é lida a altura pelo bastão graduado até o topo do dossel comprimido pelo disco. Esta técnica facilita o caminhamento para realização de medidas de altura do dossel forrageiro, pois é necessária apenas uma mão para movimentação do equipamento. Segundo o autor, esta técnica é vantajosa em comparação às sondas de capacitância presentes na época, por apresentar resultados satisfatórios de correlação com biomassa, e pela facilidade com que os produtores e pesquisadores poderiam utilizar o equipamento. O método ficou conhecido como “Rising Plate Meter” (RPM).

Bransby et al. (1977) argumentaram que a área do disco poderia influenciar na correlação, positiva ou negativamente. Com isso, os autores testaram o uso de discos com diâmetros diferentes e pesos de 1 a 4 kg, todos a partir do mesmo material, alterando apenas a área de contato com o dossel e não a pressão exercida, de 5 kg m<sup>-2</sup>. O experimento foi realizado em pastos de *Festuca arundinacea* apresentando R<sup>2</sup> variando entre 0,62-0,88, mas não encontrando diferença significativa nas calibrações para os diferentes diâmetros a 1% de significância. Os autores concluíram que os métodos de calibração para cada peso podem ser igualmente significativos, excluindo pesos extremos, uma vez que a medida deve integrar altura e densidade, e discos muito leves não respondem bem à densidade do dossel, enquanto discos muito pesados não respondem bem à sua altura.



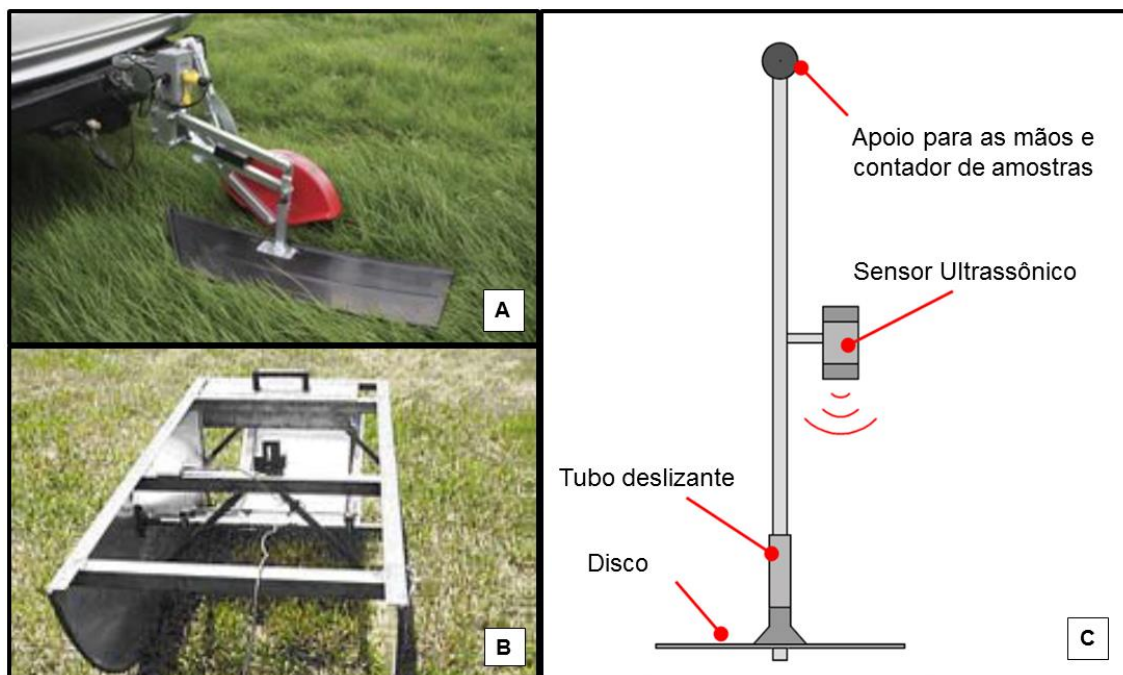
**Figura 5.** Propostas de medidor de disco ascendente para medidas de altura comprimida do dossel forrageiro. A. Disco medidor de altura comprimida do dossel forrageiro com bastão graduado (Castle, 1976); B. Disco medidor de altura comprimida do dossel forrageiro com basta graduado (Bransby et al., 1979); C. Disco medidor de altura comprimida do dossel forrageiro com contador automático acoplado em bastão dentado (Earle e MvGowan, 1979).

Rayburn e Rayburn (1998) propõem uma metodologia para construção e calibração de um medidor caseiro de baixo custo, o qual é baseado no medidor de prato ascendente proposto por Castle (1976). A metodologia consiste basicamente em um quadrado acrílico de 460 mm de lado e 5,6 mm de diâmetro, com densidade de aproximadamente 6,6 kg m<sup>2</sup> com uma perfuração no centro onde passa um bastão graduado. O acrílico é então movimentado por cordas pelo operador que deposita o mesmo sobre o dossel a cada medida. Os autores encontraram R<sup>2</sup> de 0,52 para a maior amplitude de pontos de calibração, ressaltando a necessidade de realizar ao menos 20 pontos de calibração para uma reta de regressão significativa. Esta técnica ficou conhecida como Falling Plate Meter.

Earle e McGowan (1979), visando facilitar o processo de coleta de dados, propuseram em um método de medidas automático para a época, que consistia em dois contadores inseridos no equipamento (Figura 5C). Um contador é acionado pelo operador e conta quantas medidas foram realizadas, o outro é um contador de engrenagem, acoplado sobre o disco, e o bastão graduado dá lugar a um bastão denteado, que funciona como uma

cremalheira para o contador de engrenagem acoplado ao disco. Assim não existe a necessidade de anotar os valores para cada medida. Ao final de várias medidas se divide os dados do contador de engrenagem pelo número de medidas do contador manual do operador, resultando no número de cliques (voltas da engrenagem) médio para as medidas realizadas. Isso facilita a coleta de um grande número de medidas, representando melhor a massa de forragem pela área e é utilizado até os dias de hoje nos equipamentos comerciais.

Algumas alterações comerciais recentes podem ser encontradas na literatura. Uma delas é descrita por McSweeney et al. (2019), que altera o processamento dos dados, mas não o princípio de funcionamento do equipamento (Figura 6). Os autores propõem medidas de altura do prato realizadas por um sensor ultrassônico, o qual encaminha os dados diretamente para o smartphone do operador, onde estão inseridos os dados de sua área (Figura 6B). Desta forma pode realizar os cálculos de oferta de forragem, número de animais e área ideal da faixa de pastejo automaticamente pelo aplicativo associado ao equipamento, o qual também salva um histórico da área a partir das últimas medidas.



**Figura 6.** Propostas de automatização na coleta de dados de altura comprimida do dossel. A) Medidor de altura comprimida deslizante “Rapid Pasture Meter” (Grasstec, 2017); B) Medidor de altura comprimida deslizante “Forage Sled” (Moyer e Schrock, 2007); C) Medidor de disco ascendente com coleta de dados por meio de sensor ultrassônico (McSweeney et al.,2019).

Outra alteração foi proposta por Moyer e Schrock (2007), onde os autores propõem a facilitação do processo de coleta de dados por meio de um equipamento de arrasto,

composto por um trenó que sustenta uma placa de polietileno de alta densidade presa por um eixo giratório, onde é conectado um sensor de ângulo associado a um acelerômetro, responsáveis por indicar a inclinação da placa (Figura 6B). Segundo os autores, a pressão exercida pela placa é igual à pressão proposta por Bransby et al. (1977), de  $5 \text{ kg m}^{-2}$ . Os dados de inclinação são associados a localização por meio de um receptor GNSS, obtendo os pontos de altura comprimida para cinco pontos a cada um segundo. Os autores encontraram  $R^2=0,72$  para pastos de *Festuca arundinacea*.

A empresa Grasstec (Crewe, Inglaterra) também propôs algo similar ao desenvolvido por Moyer e Schorrock (2007), com um equipamento denominado “Rapid Pasture Mater” (Grasstec, 2017). O equipamento de arrasto é similar a uma das hastes de um trenó e um sistema hidráulico pressiona a pastagem (Figura 6A). Em tese, a movimentação desse sistema hidráulico se correlaciona com a biomassa da pastagem, mas não se encontra literatura a respeito.

#### **2.1.4.4. Estimativas visuais e visão computacional**

Outra estratégia muito usada tanto no manejo quanto na pesquisa é aquela baseada em estimativas visuais. Essa técnica consiste no treinamento de um observador com as variações de biomassa em uma área, que o permitam estimar a biomassa proporcional à entrada dos animais ou quantificar a biomassa a qualquer momento através de amostragens conduzidas (Mannetje, 2000). Esta técnica ainda é utilizada no manejo (Barros, 2019) e é menos indicada para pesquisa pois deve ser realizada sempre por um mesmo observador, devido ao erro associado ao observador (Aiken, bransby, 1992). Esta técnica se baseia na capacidade humana de reconhecimento de padrões, e com isso alguns trabalhos buscam substituir a necessidade de um observador por imagens coletadas a partir de câmeras, onde o processamento dessas imagens tenta reconhecer padrões na distribuição de biomassa ou estrutura tridimensional do dossel (Lu e He, 2017; Insua et al., 2019; Rueda-Ayala et al., 2019; Franco et al., 2021).

As aplicações da visão computacional em análise de imagem podem ser divididas entre reconhecimento, análise de movimento, reconstrução 3D e restauração de imagens (Ballard & Brown, 1992; Huang, 1996). Estes processamentos requerem uma base computacional de programação que basicamente realiza a divisão das imagens em várias regiões menores, os pixels, e identifica, por meio de métodos de análise de dados as diferenças entre esses pixels, de modo a estabelecer e reconhecer padrões de interesse presentes nessas imagens, para que assim possam ser quantificados (Huang, 1996).

Para uso na agricultura, em especial avaliação de pastagens, são utilizados os processos de reconhecimento, para quantificações de componentes da imagem (Jauregui, 2019; Seiferth, 2020; Michez et al., 2020; Franco et al., 2021), e reconstrução 3D, em fotogrametria (Batistoti et al., 2019; Rueda-Ayala et al., 2019). A fotogrametria consiste no uso de imagens sequenciais para estimativas de posicionamento relativo, podendo determinar distâncias, ângulos, tamanhos, formas e volumes (Temba, 2000). Batistoti et al. (2019) avaliaram o uso de imagens aéreas obtidas com uso de veículo aéreo não tripulado (RPA) para estimativas de altura e biomassa em *Panicum maximum* cv. BRS Tamani na região do Cerrado brasileiro. Os autores encontraram  $R^2=0,80$  entre altura do dossel obtida por fotogrametria e altura mensurada a campo e  $R^2=0,74$  entre volume do dossel medido por fotogrametria e biomassa real em parcelas experimentais de 9m<sup>2</sup>.

Outra técnica utilizada para estimar posicionamento em imagens é a reconstrução a partir de imagens RGB-D, as quais combinam sensores de imageamento RGB e de profundidade “D”, apresentando resultados similares ao procedimento de fotogrametria (Santos e Khoshelham, 2015). Rueda-Ayala et al. (2019) utilizaram câmeras com sensoriamento de profundidade em correlações com altura, volume e biomassa acima do solo em campos de pastagens biodiversas na Noruega, encontrando  $R^2$  entre 0,18 e 0,88 entre a altura estimada e biomassa real do dossel para as espécies estudadas e  $R^2=0,80$  entre altura estimada e altura real do dossel. Os autores ressaltam a especificidade dos modelos para o conjunto de imagens e espécies estudadas.

O processamento de imagens também é realizado na separação e quantificação dos componentes presentes na imagem, que pode ser usado para reconhecimento de padrões, como espécies de plantas a partir de suas folhas (Borges, 2013) ou para cálculos de algum atributo em específico, como cobertura do dossel e sua proporção de verde dentro de uma imagem. Jauregui et al. (2019) avaliaram o uso do aplicativo Canopeo® (Patrignani & Ochsner 2015) para estimativas de massa de forragem e interceptação luminosa a partir da porcentagem de cobertura verde do dossel forrageiro em alfafa, na Argentina. Os autores encontraram valores significativos nas correlações com acúmulo de biomassa ( $R^2=0,77$ ) e interceptação luminosa ( $R^2=0,83$ ) e descreveram a limitação do uso do aplicativo para diferenciação entre as espécies infestantes e as espécies do estudo.

Ainda, com identificação da cobertura verde do dossel, Reti (2016) propõe o software “adubapasto”, que indica o manejo de adubação de pastagens a partir de imagens e dados inseridos pelo produtor. Mancin (2017) propõe o treinamento de uma rede neural artificial, com dados de entrada de câmeras RGB para a quantificação dos teores de nitrogênio de *Brachiaria decumbens* cv. Basilisk a partir da cobertura de verde do dossel.



#### 2.1.4.5. Índices de vegetação

A avaliação da reflectância do espectro eletromagnético pode ser usada tanto nas bandas do visível, como apresentado nos trabalhos referentes a cobertura de verde do dossel, quanto nos demais comprimentos de onda, em especial o infravermelho próximo. O comportamento característico das porções do espectro pode ser relacionado com respostas da população de plantas, como biomassa, por exemplo, e responder a condições da lavoura em um determinado momento. Os cálculos relativos a essas porções, a fim de compreender respostas na reflectância das plantas, são conhecidos como índices de vegetação (Molin et al., 2015).

Os índices de vegetação são originados a partir de medidas indiretas e não destrutivas. Assim como medidas de altura e capacitância do dossel forrageiro, o uso de índices de vegetação em pastagens é realizado utilizando sensores proximais embarcados em veículos aéreos ou terrestres, ou sensores orbitais, embarcados em satélites. Esses sensores podem ser desde câmeras convencionais (RGB) até câmeras multi e hiperespectrais, passando pelos sensores ópticos, os quais processam a informação baseada em comprimentos de onda específicos refletidos por um objeto qualquer, sem a necessidade de formar imagens para posterior análise (Shellberg, 2008; Bernardi, 2014; Molin et al., 2015).

Alguns índices de vegetação são usados para estimativas do teor de nutrientes nas plantas, em especial de nitrogênio. Bazame (2018) e Corrêdo (2019) validaram o uso de sensores espectrais da banda do infravermelho próximo para adubação nitrogenada em taxa variada para pastos de *Urochloa brizantha* cv. xaraés, tanto em parcelas experimentais quanto em áreas pastejadas. Sensores ópticos ativos comerciais, como Greenseeker® (Trimble Agriculture; Sunnyvale, EUA) e Crop Circle® (Holland Scientific; Lincoln, EUA), são utilizados para medições de concentração de nitrogênio em pastagens e correlações com massa de forragem e grau de degradação (Flynn et al., 2008; Trotter et al., 2010).

Com o uso de sensoriamento remoto orbital, Hill et al. (2004) propõem o fornecimento de estimativas de acúmulo de forragem a produtores australianos. Tal proposta foi inovadora e poderia representar avanços significativos no manejo de pastagens. No entanto, esse processamento de dados orbitais geralmente é descrito para estimativas do grau de degradação em pastagens, uma vez que o uso dos índices de vegetação é restrito a resolução espacial das imagens, as quais podem não representar bem um piquete ou integrar áreas pastejadas em diferentes momentos, resultando em baixa acurácia de correlações com aspectos biofísicos das pastagens (Schellberg, 2008; Murphy et al., 2021).

Reinermann et al. (2020) reúnem extensa revisão sobre uso de sensoriamento remoto em pastagens. Os autores quantificam diversos trabalhos que relacionaram índices de vegetação com biomassa a partir do uso de processamentos de inteligência artificial, encontrando valores de  $R^2$  entre 0,04 e 0,97, onde a maioria se encontra com valores entre 0,60 e 0,80 e os valores acima de 0,80 associados a usos muito específicos e em condições controladas para treinamento dos modelos. Os autores também indicam o uso do índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) em mais de 62% dos artigos revisados, representando a maior importância entre os índices de vegetação para estimativas de biomassa ou grau de degradação em pastagens.

O uso do NDVI por sua vez é limitado, pois plantas com alto vigor vegetativo fazem com que o índice atinja um ponto de saturação, quando não varia proporcionalmente ao aumento da biomassa (Molin et al., 2015). Assim, alguns estudos buscam integrar os valores de NDVI com outras variáveis biométricas das plantas forrageiras, como por exemplo a altura. Schaefer e Lamb (2016) aumentaram o poder de predição de biomassa de  $R^2=0,56$  para  $R^2=0,76$  ao usarem os valores de altura do dossel em conjunto com NDVI. Anderson et al. (2017) também uniram dados de altura e NDVI em correlações com biomassa, aumentando o valor de  $R^2$  de 0,51 para 0,64.

Moeckel et al. (2017) utilizaram uma variação do NDVI, o índice de vegetação por diferença normalizada de banda estreita (NDSI) em conjunto com a altura do dossel obtida através de sensores ultrassônicos para estimativas de massa de forragem de *Lolium cynosuroides* na Alemanha, melhorando as estimativas quando adicionada a variável altura aos índices de vegetação de  $R^2$  de 0,63, 0,72, 0,43 e 0,55 para  $R^2$  de 0,88, 0,80, 0,66 e 0,72 respectivamente para as quatro datas de coleta de dados.

#### **2.1.4.6. Perspectivas para o monitoramento de plantas forrageiras**

Em medidas conjuntas de índices de vegetação, altura comprimida do dossel e porcentagem de cobertura de superfície, Ryan (2019) descreve uma estrutura móvel usada para coleta de dados de culturas de gramíneas em experimentação agrícola na Austrália. O equipamento é tracionado manualmente e conta com um sensor óptico ativo para medidas de índices de vegetação, uma câmera para estimativas de cobertura de superfície pelo software Canopeo® e um medidor de altura comprimida projetado para medidas em tempo real.,

Benet et al. (2016) avaliam o uso conjunto de câmeras RGB, sensor de distância de feixe único e sensor LiDAR para deslocamento autônomo de um robô coletor de dados na

cultura de uva, e o mesmo é capaz de responder a obstáculos e caminhar sobre pastagens cultivadas nas entrelinhas da cultura. Manderson e Hunt (2013) propuseram um veículo autônomo baseado no equipamento C-Dax para a coleta de dados de altura de pastagem a partir de rotas pré definidas e sensores de obstáculos. O equipamento pode realizar medidas de uma área de 2 ha a cada 5 horas.

Gobor et al. (2015) propuseram um robô para deslocamento autônomo em pastagens, na Alemanha. O sistema proposto realiza medições de qualidade da forragem e coleta de material morto de pastagens para posterior cobertura de solo exposto. Seiferth (2020) também propõe um veículo autônomo para coleta de dados de pastagens, elencando todas as propostas anteriores em um veículo para coleta de dados de altura de pastagens, cobertura de solo exposto, semeadura de cultivares, avaliação da qualidade e manutenção de adubação.

Também existem propostas relativas a sensores fixos posicionados ao longo das áreas de pastagem, que coletam dados continuamente e são integrados em softwares responsáveis pelo processamento desses dados em conjunto. Silva (2014) avaliou o uso de sensores espaçados pela área de pastagem, capazes de medir a interceptação luminosa, de forma a realizar um monitoramento das condições da pastagem e propor assim um manejo mais assertivo. Milsom et al. (2019) também avaliaram o uso de sensores estacionários para auxílio no manejo, os quais correlacionam altura do dossel, índice de vegetação e umidade do solo com massa de forragem, fornecendo os dados por meio de uma interface digital ao produtor.

Como visto, técnicas que combinam mais de uma característica biométrica das plantas forrageiras para estimativas de massa de forragem, são mais atraentes que os atributos medidos de maneira independente (Shaefer e Lamb, 2016; Moeckel et al., 2017). Além disso, a coleta de um grande volume de dados permite que estimativas mais exatas sejam realizadas (Murphy et al., 2021). Desta forma, o uso de dados de diversas características biométricas e em grande volume podem representar os próximos passos do desenvolvimento de estratégias de monitoramento de pastagens. Contudo, estas estratégias podem ser aplicadas com maior facilidade nos casos de produção de feno ou silagem, em que o animal não afeta a área de cultivo. O desafio está em estabelecer o padrão de coleta destes dados com a inserção dos animais, que interferem de maneira direta no processo de desfolha (Rook et al., 2004; Bernardi, 2014).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Local e período dos experimentos

Os experimentos foram realizados em áreas de pastejo rotativo presentes na Universidade de São Paulo, campus “Luiz de Queiroz” em Piracicaba, SP. Durante o verão (dezembro-março) de 2020-2021 foram realizadas coletas de dados em pastos de capim sempre-verde, cameroon e tifton-85. Os dados foram referentes a mensuração de altura do dossel forrageiro a partir de sensores de distância de maneira pontual e de esteira de borracha de baixa densidade. As coletas de dados foram realizadas no período noturno devido a interferência da radiação solar em um dos sensores utilizados. Todos os piquetes são normalmente submetidos a pastejo rotativo de vacas leiteiras e manejados com base na altura do dossel forrageiro.

Durante a primavera (Setembro-Dezembro) de 2021 foram realizadas coletas de dados em pasto de capim coast-cross referentes à validação de esteiras de borracha realizando diferentes pressões sobre o dossel forrageiro em medidas de altura comprimida e também o uso de sensores de distância em faixas de coleta de dados para medidas de altura do dossel forrageiro. Os piquetes de coast-cross são submetidos a pastejo rotativo de ovinos. Também no mesmo período foram realizadas as coletas de altura do dossel em pastos de capim sempre-verde, cameroon e tifton-85 referentes a estimativa do número mínimo de pontos amostrais de altura do dossel que representam a média de uma faixa de pasto.

Os procedimentos de escolha dos pontos de calibração foram distintos para os experimentos em que foram realizadas coletas de biomassa. As coletas realizadas nos pastos de capim sempre-verde, cameroon e tifton-85 foram baseadas em distâncias fixas dentro do piquete, buscando entender como seriam representados os dados coletados por sensores acoplados a uma cerca móvel. E as coletas realizadas em pastos de coast-cross foram baseadas em pontos de calibração selecionados, buscando a maior variação de biomassa dentro do piquete.

## 3.2. Material vegetal utilizado

### 3.2.1. *Cynodon dactylon* cv. coast-cross

O capim coast-cross é uma planta do gênero *Cynodon*, espécie *C. dactylon* (L.) Pers. A cultivar tem origem na América do Norte, e por ser um híbrido estéril, possui propagação vegetativa. Além disso é uma planta com hábito de crescimento prostrado, não rizomatosa e com estolões longos, delgados e glabros. Possui boa resistência ao pisoteio e pastejo devido ao seu meristema apical próximo ao solo, sendo também indicada para produção de feno devido à boa qualidade nutricional. Possui lâminas foliares estreitas e planas, com largura entre 2 a 4 mm e comprimento entre 30 a 40 mm (Leite e Machado, 1999). Recomenda-se boa fertilidade do solo e saturação por bases a partir de 60%. Tem capacidade de produção de matéria seca de em torno de 17 Mg ha<sup>-1</sup>ano<sup>-1</sup>. A altura ideal pré-pastejo depende do sistema de produção escolhido, podendo variar entre 0,2 e 0,4 m, com boa resistência à baixa altura de resíduo (0,05 m). Contudo, recomenda-se altura de resíduo igual a 40% da altura de entrada dos animais, quando em pastejo rotativo (Leite e Machado, 1999; Mezzalira et al., 2014).

### 3.2.2. *Cynodon dactylon* cv. tifton-85

A cultivar Tifton-85 também é um híbrido do gênero *Cynodon* (*Cynodon* spp.), similar ao capim coast-cross possui propagação vegetativa, é rizomatosa e estolonífera, com estolões em grande número e boa capacidade de propagação, de coloração verde intensa e levemente arroxeados. Seus colmos são alongados, mais espessos e com folhas mais largas, apresentando alto vigor vegetativo em comparação com outros híbridos do mesmo gênero, podendo atingir produtividade superior a 20 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (Burton, 2001). Devido ao seu meristema ser próximo ao solo e ter boa capacidade de propagação, é resistente a pastejo e pisoteio, sendo também indicada para fenação devido à sua qualidade nutricional. Tem bom desenvolvimento em climas mais amenos, com temperaturas entre 16 e 27 °C e recomenda-se cultivo em áreas com boa fertilidade dos solos (Fonseca e Martuscello, 2010). Em pastejo rotativo recomenda-se a entrada dos animais no momento em que o dossel atingir entre 0,25 a 0,30 m e saída entre 0,10 a 0,15 m, podendo ser rebaixada até 0,05 m em casos de fenação e sobressemeadura de inverno (Pereira et al., 2011).

### **3.2.3. *Megathyrsus maximus* cv. sempre-verde**

A cultivar sempre verde pertence ao gênero *Megathyrsus*, espécie *Megathyrsus maximus*, que tem como característica principal sua alta produção de biomassa e vigor vegetativo. Possuem hábito de crescimento cespitoso, geralmente formando touceiras. A cultivar é pouco difundida no Brasil e é considerada uma adaptação do capim colonião (*Megathyrsus maximus* Jaqc.) às adversidades edafoclimáticas. Essas adaptações se dão principalmente em sua resistência a seca, devido ao acúmulo de reservas em bulbos sob as touceiras. É também uma planta de porte menor, com folhas mais estreitas e colmos mais finos em comparação ao capim colonião, além de apresentar boa resistência ao alumínio presente no solo e boa adaptação a solos com fertilidade média. Sua propagação é reprodutiva e apresenta florescimento principal no início da estação seca (Jank et al., 2010). Para pastejo rotativo é recomendada a entrada dos animais quando o dossel atinge em média 0,8 m, podendo ser rebaixado até 0,4 m (Cavalcante, 2018).

### **3.2.4. *Pennisetum purpureum* cv. cameroon**

A cultivar cameroon pertence ao gênero *Pennisetum*, espécie *Pennisetum purpureum*, e tem como principal característica a alta produtividade de biomassa. São plantas de porte alto, podendo atingir até 5,0 m, muito usadas em capineiras e para produção de silagem (Fonseca, 2010). A cultivar cameroon é utilizada principalmente na formação de capineiras, sendo utilizada também em pastejo em áreas de alta intensificação pecuária. Pode atingir 3,0 m de altura, tem crescimento ereto com colmos espessos e folhas largas, e forma touceiras densas. Devido ao baixo vigor das sementes, o principal método de propagação utilizado é o vegetativo (Pereira, 1993). Recomenda-se altura de entrada dos animais em pastejo rotativo quando o dossel atinge em média 1,0 m, e altura de saída entre 0,4 a 0,5 m (Nascimento Jr. e Silva, 2008).

## **3.3. Sensores utilizados**

### **3.3.1. Sensor ultrassônico**

O sensor ultrassônico Hc-Sr04 (OSEPP Electronics, Canadá) é utilizado para mensuração de distâncias a partir da tecnologia Sonar (Sound Navigation and Ranging). Uma onda sonora é emitida pelo sensor e ecoada por um objeto, retornando ao sensor, e a

diferença de tempo entre a emissão e a recepção da onda multiplicada pela velocidade do som, resulta em duas vezes a distância entre o sensor e o objeto. Tal técnica é conhecida como Tempo de Voo ou Time of Flight (ToF) e está presente tanto em sensores que utilizam ondas sonoras quanto feixes de luz para medidas de distância. O sensor apresenta boa exatidão em medidas entre 0,02 m e 4,00 m, sendo que sua operação não é afetada pela luz solar mas pode sofrer interferência em materiais isolantes acústicos. Possui funcionamento por corrente direta, com tensão igual a 5 V e corrente igual a 15 mA, operando de maneira digital, sem variação de tensão proporcional à distância. Trabalha na frequência de onda de 40 Hz e tem um ângulo de medição igual a 15°. Suas dimensões são de 0,045 m x 0,020 m x 0,015 m (Cytron Technologies; ElecFreaks, s.d.).

### **3.3.2. Sensor LiDAR**

O sensor TFmini (Seeed Studio, China) é um LiDAR de feixe único. A tecnologia LiDAR é um tipo de ToF com maior exatidão e baseado na emissão e recepção de um ou vários feixes de luz. O “tempo de voo” mensurado é o do fóton emitido e recebido pelo sensor, além de informações de intensidade do sinal e ângulo de posicionamento, este último em equipamentos de vários feixes de luz. O sensor LiDAR possui um ângulo de visão de 2,3°, ou seja, uma área de 0,04 m de diâmetro é medida com o sensor a uma distância de 1,00 m do alvo. Opera em distâncias entre 0,03 m e 12,00 m em condições normais. Em ambientes externos de iluminação solar até 70.000 lux e objetos com refletividade abaixo de 10%, sua distância efetiva é reduzida a 5,00 m. Em condições extremas, com intensidade luminosa até 100.000 lux a distância efetiva de medidas é de 3,00 m. Seu funcionamento é digital, sem variação de tensão proporcionalmente às distâncias mensuradas. Trabalha com comprimento de onda de 850 nm e frequência normal de 100 Hz. Possui funcionamento por corrente direta e tensão igual a 5 V, com potência igual a 0,6 W e corrente igual a 120 mA. Em medidas de 0,03 a 6,00 m possui acurácia de 1%, em medidas de 6 a 12 m esse valor é elevado a 2%. Pode operar em temperaturas entre -20° C a 60° C e possui dimensões de 0,042 m x 0,015 m x 0,016 m (Benewake, s.d.).

### **3.3.3. Sensor de distância a laser**

O sensor de distância laser VL53L0X (STMicroelectronics, Suíça) é um sensor de distância do tipo ToF e se baseia na emissão de um feixe de luz de comprimento de onda específico, que retorna ao sensor após ser refletido por um objeto. Com isso, é calculada a

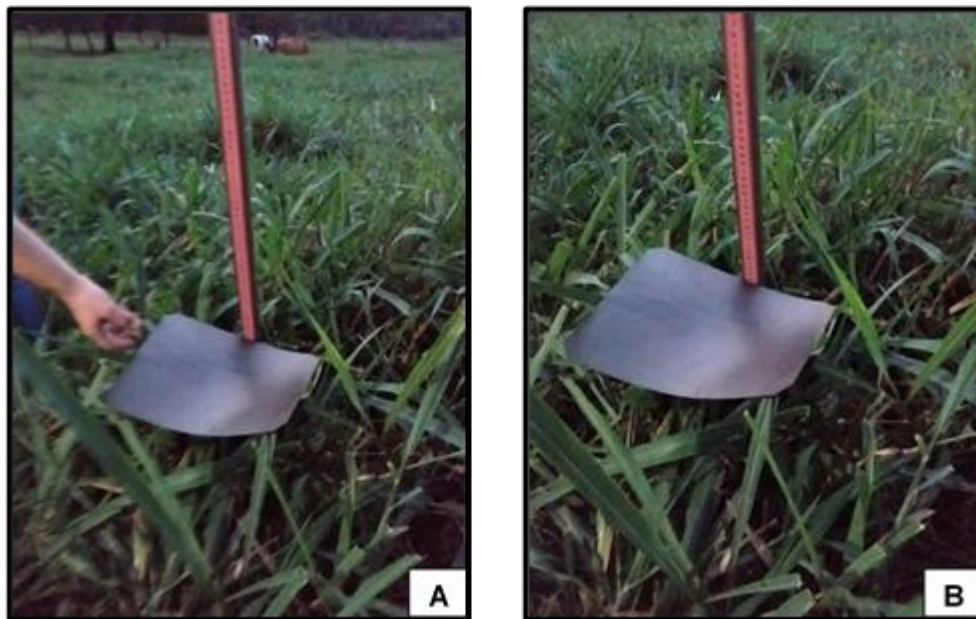
distância do sensor até o objeto a partir da constante de velocidade da luz no vácuo e do tempo em que o feixe de luz leva da emissão até a recepção pelo sensor. O sensor VL53L0X é capaz de medir distâncias de até 2,0 m com acurácia de até 1% em ambientes controlados e em modo de programação para medidas de precisão. Em ambientes externos ou programação de alta frequência de dados a acurácia é de 5 %. Opera entre 2,6 e 5 V, de forma analógica, com apenas uma saída de tensão que varia proporcionalmente à distância mensurada. O feixe de luz emitido é na faixa dos 940 nm e o ângulo de visão do sensor é de 25°, ou seja, uma área de 0,44 m de diâmetro é medida com o sensor a uma distância de 1,0 m do alvo. Sua operação pode ser afetada em medidas ao ar livre, durante o dia, devido à grande incidência de radiação solar e consequente reflectância dos objetos. Pode trabalhar em temperaturas entre -20 °C e 70 °C e possui dimensões de 0,025 m x 0,012 m x 0,003 m (STMicroelectronics, 2018).

#### **3.4. Determinação do número mínimo de pontos amostrais de altura do dossel forrageiro em pastos de capim tifton-85, cameroon e sempre-verde**

Os valores de altura do dossel forrageiro foram coletados com uso de folha plástica e bastão graduado. Para cada ponto a folha foi depositada sobre o dossel e com o bastão graduado mediu-se a altura da mesma até o solo (Figura 7).

Para cada uma das cultivares estudadas foram realizadas duas repetições de 50 medidas equidistantes em 0,5m. Os dados foram analisados levando em consideração o desvio padrão da população de pontos para estimativas do erro amostral em porcentagem, calculado dividindo-se o desvio padrão pela média para 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 100 repetições (Altman e Bland, 2005). O número calculado é referente a uma faixa de distância igual a 50 m contando as duas repetições. Logo, o número mínimo de pontos amostrais de altura do dossel é referente a esta distância e equivalente a uma área de 25 m<sup>2</sup>. Os dados foram analisados utilizando o software Excel 2016 (Microsoft, Washington, EUA) e representam o número mínimo de pontos amostrais correspondente ao erro proporcional assumido.





**Figura 7.** Método de medida de altura do dossel com uso de folha plástica e bastão graduado. A) folha plástica depositada sobre o dossel forrageiro; B) altura do dossel demarcada pelo bastão graduado.

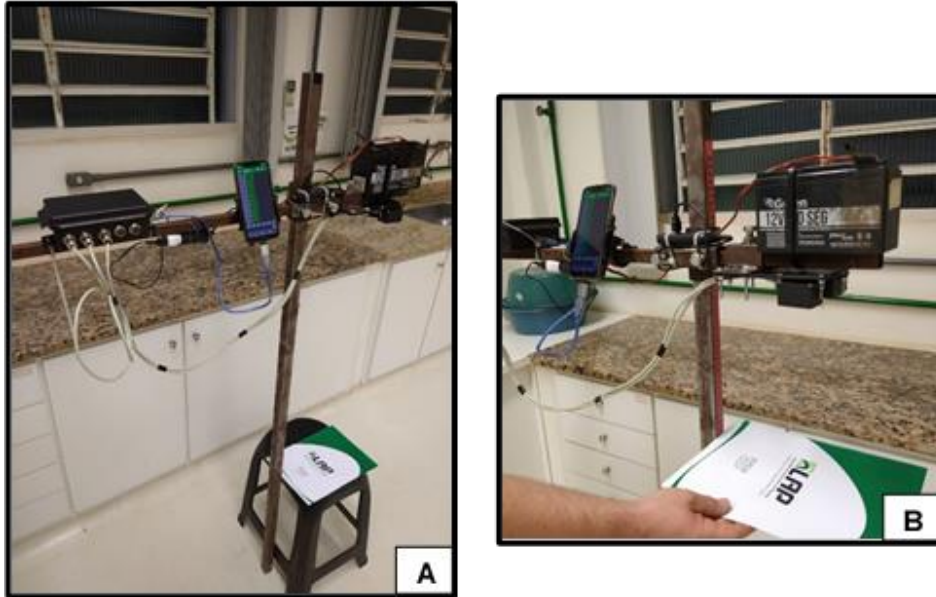
### **3.5. Uso de sensores de distância de maneira pontual para correlação entre altura e biomassa de tifton 85, cameroon e sempre-verde**

Uma estrutura metálica foi desenvolvida para que as medidas de altura do dossel com uso de sensores de distância e pelo método tradicional fossem realizadas no mesmo ponto. Desta forma os sensores foram posicionados perpendicularmente a uma haste de metal contendo uma fita métrica vertical, que percorria toda sua extensão (Figura 8).

Um microcontrolador Arduíno Uno (Smart Projects, Itália) foi programado para coletar os dados dos sensores LiDAR, sonar e laser, em uma frequência de 10 Hz. O microcontrolador foi conectado a um aparelho celular por comunicação serial e os dados foram salvos utilizando o aplicativo Serial USB Terminal (Kai Morich, plataforma Android). O processamento dos dados foi realizado utilizando o software Excel 2016 (Microsoft, Washington, EUA) e a filtragem foi realizada excluindo-se os valores maiores que a altura do sensor em relação ao solo e valores menores que zero. Em cada ponto foram realizadas três medidas de altura do dossel pelos sensores em uma distância de aproximadamente 0,15 m, sendo que para cada medida foram coletados em média 100 dados. A média dos dados das três medidas representou a média da altura do dossel naquele ponto.

Os sensores foram validados em laboratório para medidas de altura (Figura 8). A estrutura metálica era posicionada verticalmente e os dados eram coletados a cada 0,05 m com uso de uma folha de papel de superfície plana. Após a subtração dos valores de

distância entre os sensores e a folha de papel, e dos sensores com o solo, foi gerada uma reta de regressão entre a altura obtida pelos sensores e altura real.



**Figura 8.** Estrutura metálica utilizada para a coleta dos dados; B) Validação dos sensores para medidas de altura com uso de folha de papel.

Foram realizadas coletas em pontos de distância fixa de 3,0 m em uma reta imaginária dentro de cada piquete. Para cada cultivar foram realizadas três coletas de 10 pontos cada, sempre em um mesmo piquete e no momento próximo à entrada dos animais. A altura do dossel medida pelos sensores foi comparada com a altura do dossel medida pelo método tradicional utilizando regressão linear simples. Também foi realizada a regressão linear entre os valores de altura do dossel obtida pelos sensores e pelo método tradicional e biomassa seca das forragens. Os resultados foram comparados usando coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE).

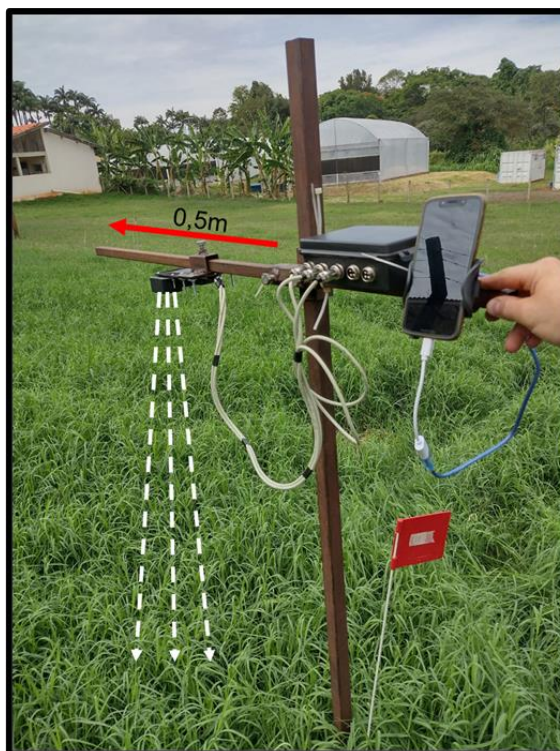
Para cada ponto, todo o material vegetal foi cortado com uso de uma foice em uma área igual a 0,25 m<sup>2</sup>. O material foi depositado em sacos de pano previamente pesados e identificados para mensuração de peso verde, e posteriormente seco em estufa de ventilação forçada à temperatura de 65 °C por 72 h para mensuração do peso seco.

### **3.6. Uso de sensores de distância para coleta de dados sobre o dossel e correlação com altura e biomassa de capim coast-cross**

Utilizando a mesma estrutura metálica anteriormente descrita, foram realizadas 30 coletas de altura em pastos de *C. dactylon* cultivar coast cross submetidos a pastejo rotativo. Foram realizadas duas coletas de 15 pontos em um intervalo de três dias. Os pontos coletados foram classificados em amplitudes de “1” a “5”, sendo “1” locais de menor biomassa aparente e “5” locais com maior biomassa aparente. Em um total de seis pontos coletados para cada amplitude.

Um microcontrolador Arduíno Uno foi programado para coletar os dados dos sensores LiDAR e sonar em uma frequência de 100 Hz. O microcontrolador foi conectado ao celular por comunicação serial e os dados foram salvos utilizando o aplicativo Serial USB Terminal. O processamento dos dados foi realizado utilizando o software Excel 2016 e a filtragem foi realizada excluindo-se os valores maiores que a altura do sensor em relação ao solo e valores menores que zero.

Os sensores foram deslizados pela haste metálica da plataforma em uma distância de 0,5 m sobre cada ponto (Figura 9), resultando em uma média de 1500 dados para uma faixa de dossel. A média dos dados após a filtragem representou a altura do dossel.



**Figura 9.** Esquemática do movimento realizado para coleta dos dados pelos sensores em uma faixa de 0,5 m sobre o dossel forrageiro.

No mesmo local da coleta dos dados pelos sensores foi realizada a medida de altura do dossel pelo método tradicional em três pontos sequenciais. Para cada ponto, todo o material vegetal foi cortado com uso de uma foice em uma área igual a 0,25 m<sup>2</sup>. O material foi depositado em sacos de pano previamente pesados e identificados para mensuração de peso verde, e posteriormente seco em estufa de ventilação forçada em uma temperatura de 65 °C por 72 h para mensuração do peso seco.

### **3.7. Uso de esteiras de borracha para medidas de altura comprimida de capim *coast-cross***

Quatro esteiras de borracha (B1-B4) foram avaliadas para medidas de altura comprimida do dossel forrageiro em pastos de capim *coast-cross* (Figura 10). As pressões exercidas pelas esteiras sobre o dossel forrageiro são de: B1= 0,75 kg m<sup>-2</sup>; B2= 2,5 kg m<sup>-2</sup>; B3= 5,0 kg m<sup>-2</sup>; B4= 7,5 kg m<sup>-2</sup>. B1 apresenta superfície rugosa sobre uma malha de tecido emborrachado que permite a passagem de ar e água, sendo esta a face deslizada sobre o dossel, suas dimensões são de 0,43 m x 1 m x 0,006 m e é composta por cloreto de polivinilo (PVC) 94% e malha tecida, 6%. As demais esteiras (B2-B4) apresentam faces lisas, sem malha tecida interna e são compostas por butadieno estireno (SBR), com largura

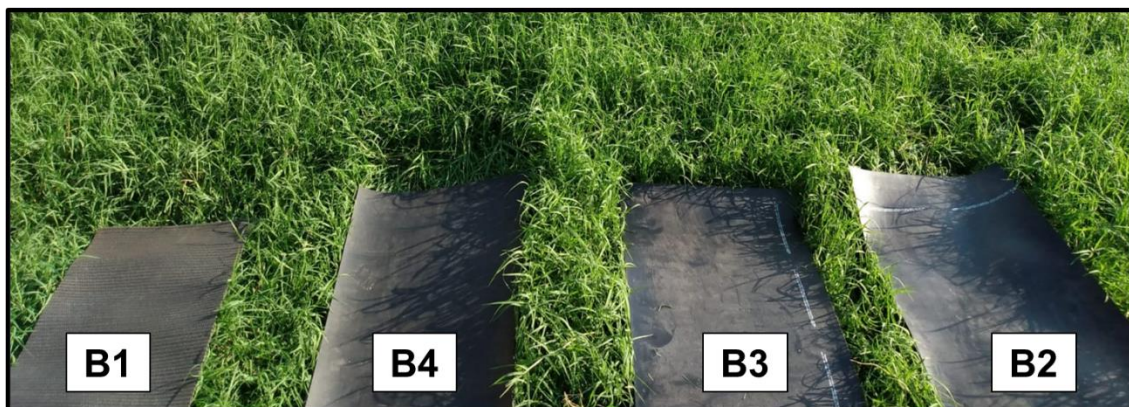
igual a 0,5 m e comprimento de 1,0 m, variando em espessura entre si de 0,0016 m, 0,0032 e 0,0048 m respectivamente para B2, B3 e B4.

Para cada ponto de coleta foram deslizadas as quatro esteiras, em ordem crescente de pressão, e foram mensurados os valores de altura comprimida do dossel para cada esteira (Figura 11). A altura do dossel medida pelas esteiras foi comparada com a biomassa seca das forragens com uso de regressão linear simples. Os resultados foram comparados usando coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE).

Anteriormente às medidas sobre esteira de borracha foi realizada a medida de altura do dossel pelo método tradicional em três pontos sequenciais. Para cada ponto, todo o material vegetal foi cortado com uso de uma foice em uma área igual a 0,25 m<sup>2</sup>, sendo depositado em sacos de pano previamente pesados e identificados para mensuração de peso verde, e posteriormente seco em estufa de ventilação forçada à 65° C por 72 h para a obtenção do peso seco.



**Figura 10.** Altura medida sobre esteira de borracha deslizada sobre o dossel.



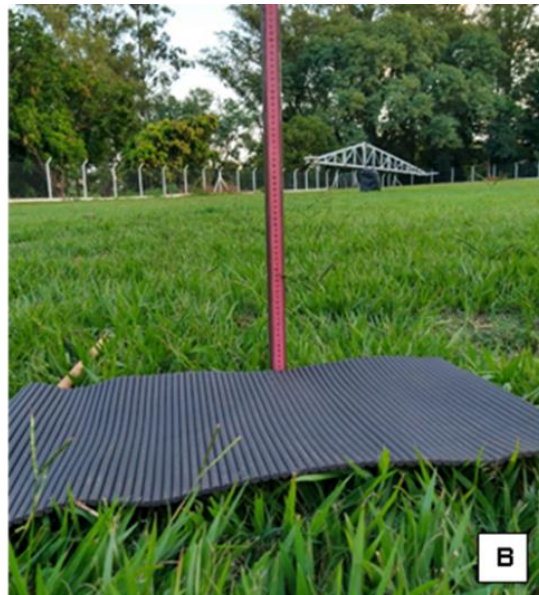
**Figura 11.** Esteiras de borracha de diferentes densidades realizando pressão sobre o dossel forrageiro. Pressão exercida sobre o dossel: B1= 0,75 kg m<sup>2</sup>; B2=2,5 kg m<sup>2</sup>; B3= 5 kg m<sup>2</sup>; B4=.7,5kg m<sup>2</sup>.

### **3.8. Uso de esteira de borracha de baixa densidade para medidas de altura de plantas de *Cynodon dactylon* cv. coast-cross**

Uma esteira de borracha que realizou pressão igual a 0,75 kg m<sup>2</sup> (B1) foi validada para medidas de altura do dossel forrageiro em pastos de capim coast-cross. Para cada ponto de coleta, a esteira foi deslizada e o valor de altura do dossel sobre a esteira foi mensurado, bem como a altura pelo método tradicional (Figura 12). Foram realizadas coletas em pontos de distância fixa de 3,0 m em uma reta imaginária dentro de cada piquete. Para cada cultivar foram realizadas três coletas de 10 pontos cada, sempre em um mesmo piquete e no momento próximo à entrada dos animais.

Anteriormente às medidas sobre esteira de borracha foi realizada a medida de altura do dossel pelo método tradicional em três pontos sequenciais. A altura do dossel medida pela esteira de borracha foi comparada com a altura do dossel medida pelo método tradicional utilizando regressão linear simples. Também foi realizada a regressão linear entre os valores de altura do dossel obtida pela esteira de borracha e pelo método tradicional e biomassa seca das forragens. Os resultados foram comparados usando coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) e Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE).

Para cada ponto todo o material vegetal foi cortado com uso de uma foice em uma área igual a 0,25 m<sup>2</sup>, sendo depositado em sacos de pano previamente pesados e identificados para mensuração de peso verde, e posteriormente seco em estufa de ventilação forçada em uma temperatura de 65 °C por 72 h para a obtenção do peso seco.



A) medida da altura do dossel com uso de folha; B) medida da altura do dossel com uso de uma esteira borracha de baixa densidade deslizada sobre o dossel forrageiro.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Número mínimo de pontos amostrais de altura do dossel forrageiro em pastos de capim tifton-85, cameroon e sempre-verde

A Figura 13 representa o erro amostral proporcional ao número de repetições para pontos de altura do dossel forrageiro em uma faixa de pastagem para as cultivares tifton-85, cameroon e sempre-verde. Os resultados apresentam um erro proporcional à média menor para a cultivar sempre-verde e valores muito próximos para as cultivares tifton-85 e cameroon. Pode-se afirmar que para todas as cultivares o número de repetições necessárias para que o erro fique abaixo de 10% da média é inferior a 10, sendo que, para a cultivar sempre-verde o número de 6 repetições já representou erro inferior a 10%, enquanto para o capim sempre-verde e cameroon esse número foi de 7 repetições.

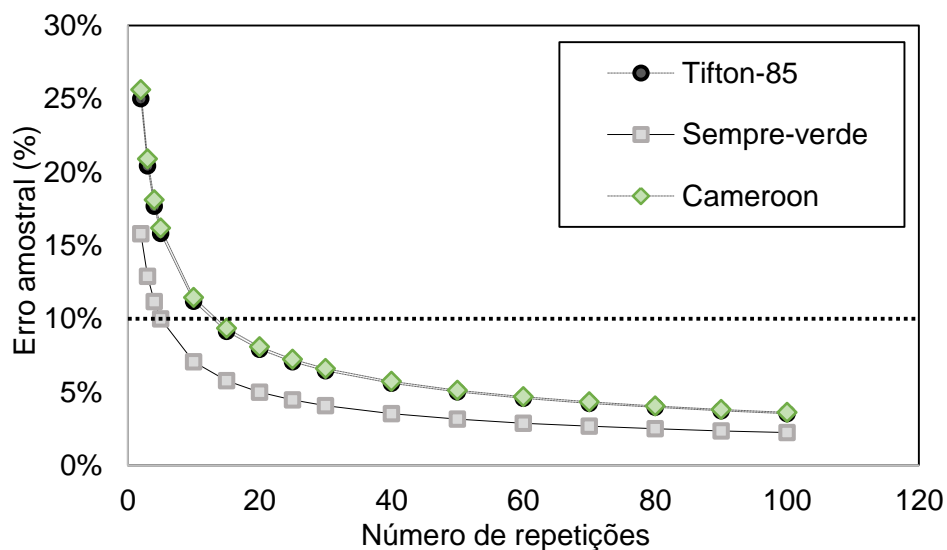


Figura 12. Número de repetições e erro amostral calculados para as três cultivares estudadas

Considerando que a área total amostrada foi de 25 m<sup>2</sup> o valor de 7 repetições equivale a aproximadamente 3,5 m<sup>2</sup> por ponto, os quais apresentam uma resolução maior em comparação com os valores encontrados na literatura. Silva e Cunha (2003) realizaram 20 medidas em unidades experimentais de 400 m<sup>2</sup> em pastos de *Cynodon* spp. a fim de estimar a média da altura do dossel, ou seja, 20 m<sup>2</sup> por ponto. Marciano et al. (2017) avaliaram dois métodos de medidas de altura em um sistema silvipastoril com pastos de capim marandu (*Urochloa brizantha*), utilizando 60 medidas de altura, de maneira



sistematizada, para cada unidade experimental de 20.000 m<sup>2</sup>, representando cerca de 300 m<sup>2</sup> por ponto. Dennis et al. (2015) utilizaram o equipamento C-dax® para confecção de um mapa de biomassa do dossel forrageiro. As medidas coletadas pelo equipamento são medidas de altura do dossel, e posteriormente foram calculadas como biomassa. Os autores realizaram medidas coletando dados a cada 5 m em linhas espaçadas em 12,5 m, o que representa 62,5 m<sup>2</sup> por ponto. Essas medidas foram utilizadas como a maior densidade de pontos, sendo comparada com medias espaçadas em 25 m e 50 m.

#### **4.2. Sensores de distância de maneira pontual para correlação com altura e biomassa em pastos de capim tifton-85, cameroon e sempre-verde**

A validação dos sensores em laboratório com uso de folha de papel para os três sensores avaliados é apresentada na Figura 14. O sonar apresentou os melhores resultados, com RMSE igual a 0,006 m, em comparação com RMSE igual a 0,026 m para os demais sensores. Os resultados indicam que os sensores podem ser utilizados para medidas de distância em objetos de face plana, assumindo um erro médio de estimativa de 0,026 m para os sensores LiDAR e laser e de 0,006 para o sensor sonar.

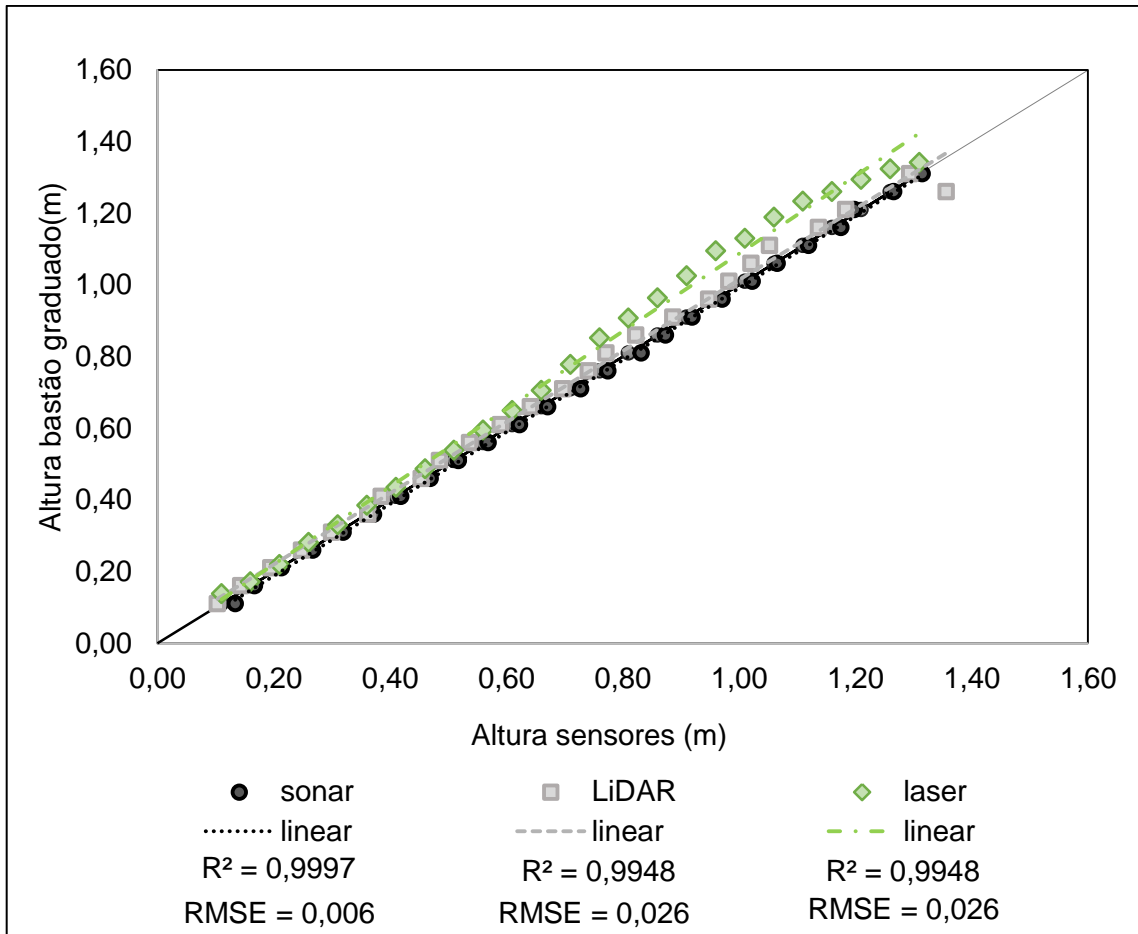


Figura 13. Regressão linear entre altura real e altura medida pelos três sensores testados sonar, LiDAR e laser.

Para a regressão realizada entre as medidas de altura do dossel pelos sensores em comparação com medidas pelo método tradicional, os valores de  $R^2$  foram menores que os encontrados na validação em laboratório (Tabela 1). O sensor sonar foi o que apresentou os piores resultados de  $R^2$  e RMSE para as três cultivares estudadas, enquanto o sensor de distância laser foi o que apresentou os melhores resultados, ou seja, foi o sensor que atingiu os valores mais próximos aos de altura do dossel medidos pelo método tradicional. Contudo, com valores muito próximos ao sensor LiDAR (Tabela 2).

**Tabela 1.** Valores calculados para as regressões lineares entre altura do dossel obtida pelo método tradicional e altura obtida pelos sensores de distância para as cultivares *Cynodon dactylon* cv. Tifton 85; *Pennisetum purpureum* cv. Cameroon e *Panicum maximum* cv. Sempre-verde.

| <b>Cultivar</b> | <b>Sensor</b> | <b>R<sup>2</sup></b> | <b>RMSE (m)</b> |
|-----------------|---------------|----------------------|-----------------|
| Cameroon        | sonar         | 0,58                 | 0,12            |
|                 | LiDAR         | 0,72                 | 0,10            |
|                 | laser         | 0,86                 | 0,07            |
| Tifton          | sonar         | 0,78                 | 0,04            |
|                 | LiDAR         | 0,79                 | 0,04            |
|                 | laser         | 0,83                 | 0,04            |
| Sempre Verde    | sonar         | 0,32                 | 0,12            |
|                 | LiDAR         | 0,59                 | 0,09            |
|                 | laser         | 0,59                 | 0,09            |

Os dados são compatíveis aos encontrados por Wang et al. (2017) para pastagens nativas da região de Hulumber, Mongólia, que encontraram R<sup>2</sup> de 0,58 e RMSE de 0,04 m em medidas realizadas a partir de sensor LiDAR acoplado a RPA. Ali et al. (2017) encontraram R<sup>2</sup> de 0,55 entre altura de pastagens nativas na Irlanda, medidas por sensores orbitais e as alturas reais medidas em campo. Santos (2019) não encontrou relações significativas entre altura de plantas de milho e um sensor de distância baseado em microondas de rádio, com R<sup>2</sup> abaixo de 0,1, assumindo a variação do dossel como principal fator de erro nas medidas realizadas. Contudo, os valores encontrados não podem ser utilizados para estimativas de altura média do dossel forrageiro, uma vez que é uma medida indireta de segunda ordem, não representando com confiança a altura real do dossel forrageiro.

Para as regressões entre massa seca de forragem e altura do dossel estimada pelos sensores e pelo método tradicional (Tabela 2), os valores de altura obtidos pelo método tradicional apresentaram maiores valores de R<sup>2</sup> para Tifton-85 e Cameroon e pelos sensores LiDAR e laser para o capim sempre-verde. Para os valores de RMSE, o sensor laser apresenta os menores valores para os capins sempre-verde e Cameroon e o sensor LiDAR apresenta menor valor de erro médio para o capim Tifton-85.

**Tabela 2.** Valores calculados para as regressões lineares entre massa seca de forragem ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) e altura do dossel (m) medido com régua graduada e com uso de sensores de distância para as cultivares *Cynodon dactylon* cv. Tifton 85; *Pennisetum purpureum* cv. Cameroon e *Panicum maximum* cv. Sempre-verde.

| <b>Cultivar</b>     | <b>Sensor</b>  | <b>R<sup>2</sup></b> | <b>RMSE<br/>(<math>\text{kg ha}^{-1}</math>)</b> |
|---------------------|----------------|----------------------|--|
| <b>Tifton</b>       | folha plástica | 0,58                 | 1494,0   |
|                     | sonar          | 0,46                 | 1432,9   |
|                     | LiDAR          | 0,49                 | 1390,4   |
|                     | laser          | 0,44                 | 1452,9   |
| <b>Cameroon</b>     | folha plástica | 0,34                 | 3088,6   |
|                     | sonar          | 0,24                 | 3335,9   |
|                     | LiDAR          | 0,22                 | 3368,5   |
|                     | laser          | 0,34                 | 3088,5   |
| <b>Sempre-verde</b> | folha plástica | 0,38                 | 2487,7   |
|                     | sonar          | 0,29                 | 2675,0   |
|                     | LiDAR          | 0,41                 | 2432,2   |
|                     | laser          | 0,41                 | 2426,4   |

Os dados são condizentes aos encontrados por Wang et al. (2017) utilizando LiDAR, com  $R^2 = 0,34$  e por Milson et al. (2019) utilizando sensores laser com tecnologia Tof e coletando dados de maneira pontual, atingindo  $R^2 = 0,39$  e Moeckel et al., utilizando sonar, atingindo valores de  $R^2 < 0,4$  em alguns dos períodos avaliados. Os valores obtidos com o uso dos sensores são similares aos valores obtidos pelo método tradicional de mensuração da altura do dossel forrageiro, representando um potencial uso em estimativas de massa de forragem para as três cultivares avaliadas.

Os dados apresentados referem-se à média dos dados obtidos pelos sensores para cada ponto, sem análises mais específicas quanto ao conjunto de dados. Contudo, alguns autores propõem que a modelagem dos dados possa melhorar as estimativas. Utilizando sonar, Legg e Brandlay (2019) calcularam a altura do dossel substituindo a altura fixa do sensor pelo nível do solo, o qual foi estimado a partir da média dos pontos que atingiram o solo. Desta forma, a variação da altura do sensor não interfere na análise dos dados, melhorando a estimativa de  $R^2 = 0,56$  e  $\text{RMSE} = 342 \text{ kg ha}^{-1}$ , para  $R^2 = 0,75$  e  $\text{RMSE} = 272 \text{ kg ha}^{-1}$ . Com uso de LiDAR, Schulze-Bruninghoff et al. (2019) encontraram os melhores resultados na modelagem dos dados referentes a cobertura de superfície, a qual utiliza apenas os dados refletidos pelas camadas superiores do dossel, podendo estimar seu volume a partir disso e encontrando correlações entre altura e biomassa de até  $R^2 = 0,54$ .

### 4.3. Sensores de distância para coleta de dados e correlação com altura e biomassa de capim coast-cross

Para a coleta de dados dos sensores sonar e LiDAR em deslocamento de 0,5 m sobre a amostra, os valores de regressão entre altura obtida pelos sensores e altura obtida pelo método tradicional foram próximos para os dois sensores (Figura 15), com o sonar apresentando melhores coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e menor RMSE em comparação com o sensor LiDAR (Figura 3). É possível observar que os sensores medem a altura em uma região inferior do dossel quando comparados com a folha plástica utilizada nas medidas pelo método tradicional.

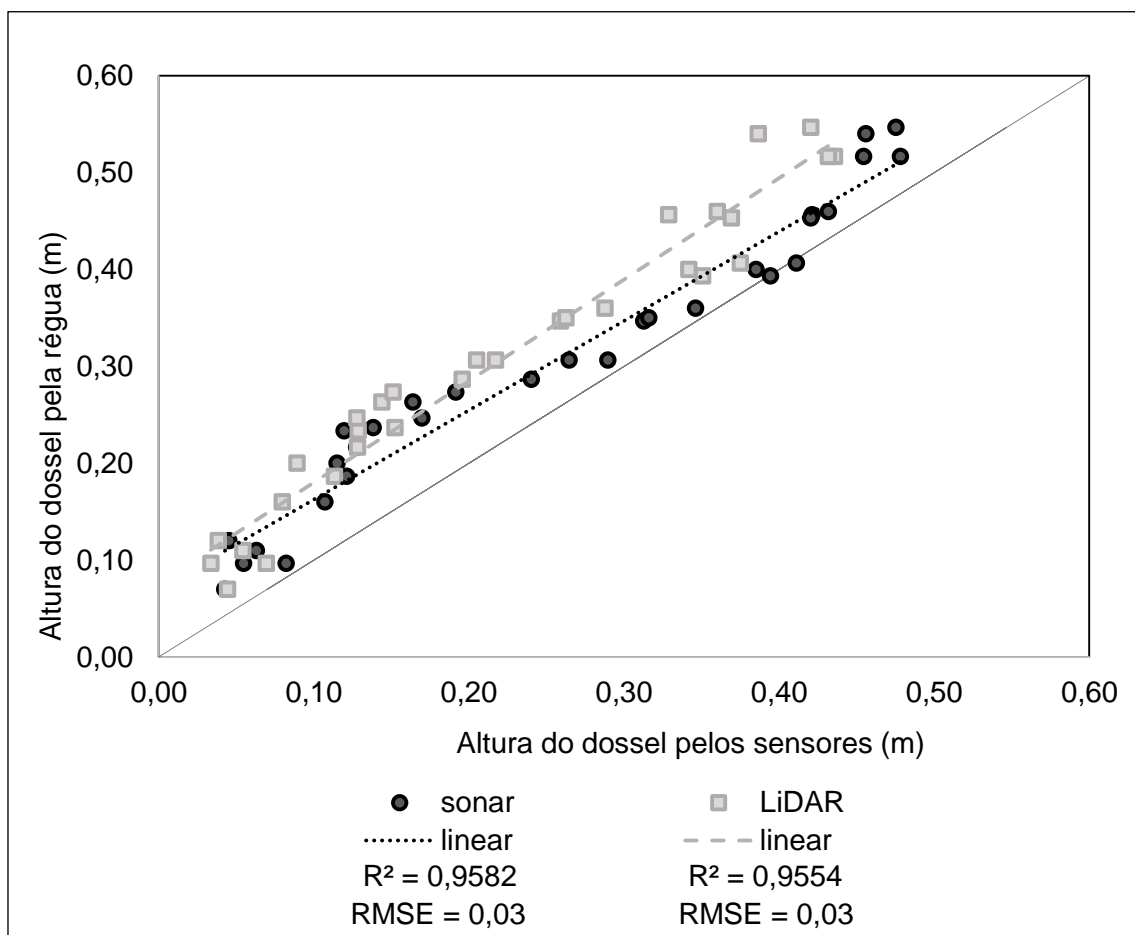
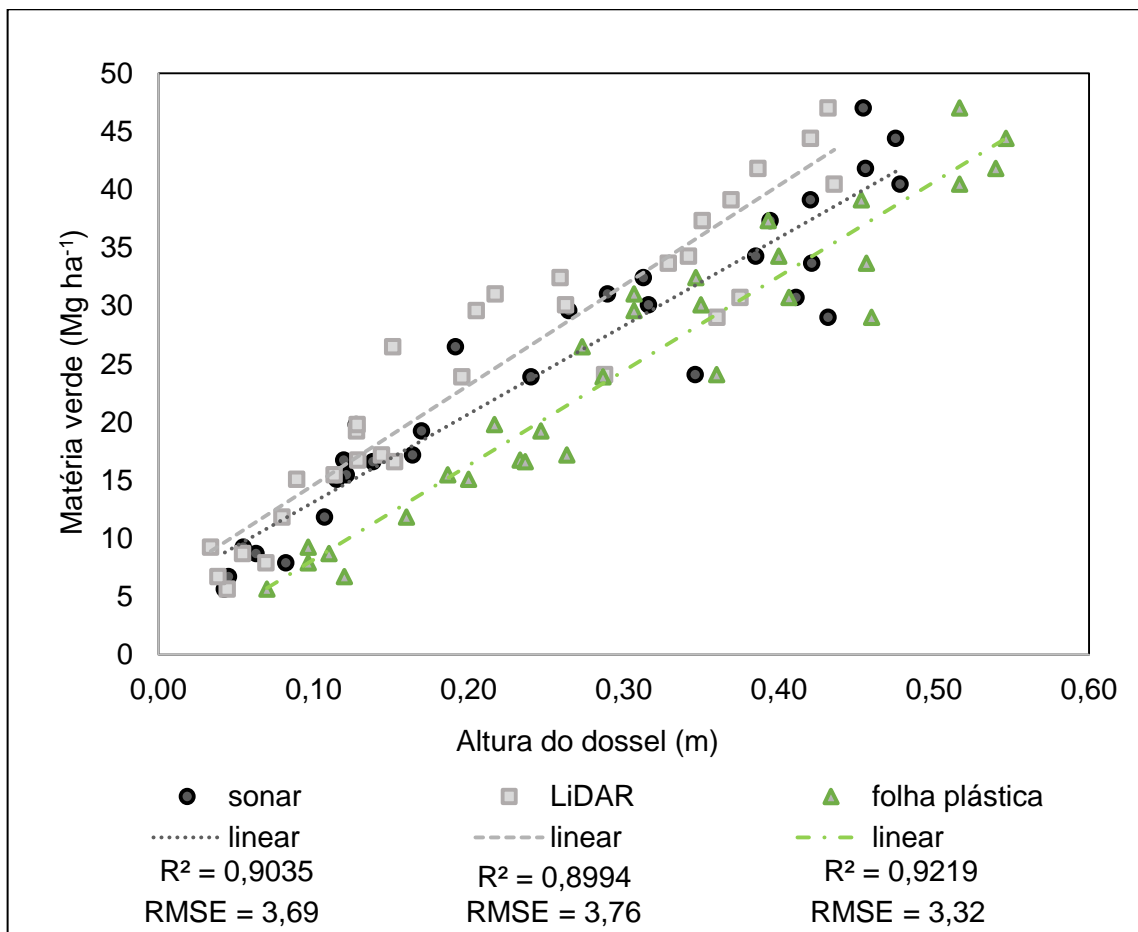


Figura 14. Regressão linear entre os valores de altura obtidos pelo método tradicional e os valores obtidos pelos sensores em pastos de capim coast-cross.

Os valores encontrados são superiores aos melhores valores observados na literatura com uso de sensoriamento proximal para estimativas de altura do dossel forrageiro. Obanawa et al. (2020) obtiveram valores de  $R^2 = 0,93$  com uso de LiDAR de varredura em pastos de azevém-italiano (*Lolium multiflorum*) no Japão, utilizando resolução

espacial de 0,02 m para o modelo de cobertura de superfície e estimando a altura do dossel a partir da subtração entre o modelo de cobertura de superfície do dossel e o modelo do terreno, obtido pós corte de forragem. Grüner et al. (2019) encontraram valores de até  $R^2=0,84$  utilizando fotogrametria para estimativa de altura de plantas em pastos consorciados de leguminosas de clima temperado, na Alemanha.

Para a regressão realizada entre a biomassa verde de capim coast-cross, os parâmetros para os dois sensores são muito similares, sendo o sonar o que apresenta os menores resultados de RMSE. Contudo, para os parâmetros da regressão realizada entre os valores de matéria seca e altura obtida pelos sensores, o sensor LiDAR foi o que apresentou os melhores resultados, mas ainda assim muito próximos aos resultados obtidos pelo sonar (Figuras 16, 17).



**Figura 15.** Regressão linear realizada entre os valores de altura do dossel forrageiro obtidos pelos sensores e matéria verde de forragem em pastos de capim coast-cross.

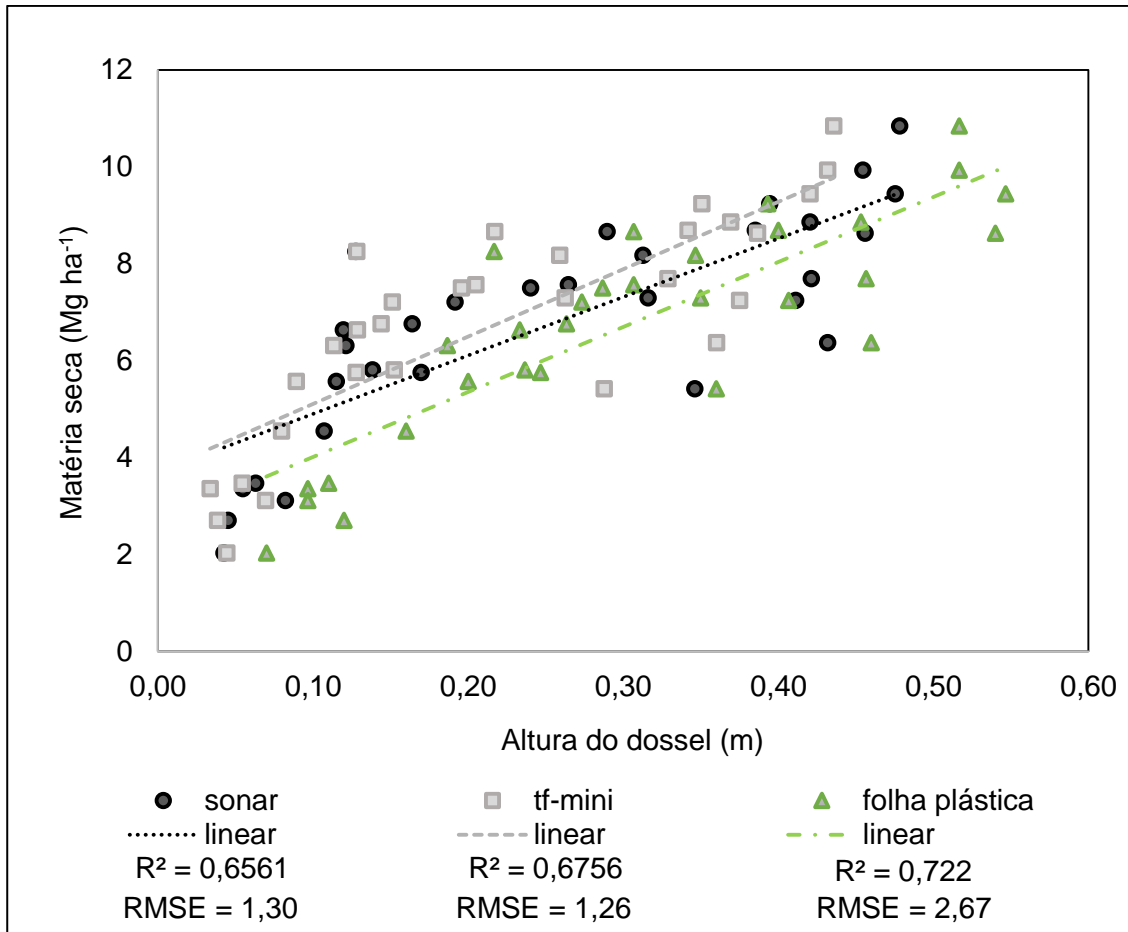


Figura 16. Regressão linear realizada entre os valores de altura do dossel forrageiro obtidos pelos sensores e matéria seca de forragem em pastos de capim coast-cross.

A correlação com matéria verde das plantas, obtida pelos dois sensores, foi superior a encontrada por Schaefer and Lamb (2016), com  $R^2=0,76$ , utilizando sensor LiDAR de varredura e valores de índices de vegetação por diferença normalizada em correlação com matéria verde de pastos de *Festuca arundinacea* na Austrália. Em correlações com matéria seca os valores são condizentes com os encontrados por Legg e Brandley (2019), de  $R^2=0,60$  para o uso de sonar em medidas de altura do dossel em comparação com biomassa de *Festuca arundinacea* na Nova Zelândia.

Ghajar e Tracy (2021) reúnem diversos trabalhos relacionados ao uso de sensores proximais para medidas indiretas em plantas forrageiras. Segundo os autores, o uso de LiDAR geralmente representa valores mais precisos em comparação com sensores ultrassônicos, o que não foi observado para a metodologia proposta neste experimento. Pode-se observar também que os valores encontrados para os sensores são muito próximos dos valores encontrados para as medidas com uso de folha plástica, ressaltando que os sensores têm boa correlação com altura e biomassa em pastos de capim coast-cross.

#### 4.4. Esteiras de borracha para medidas de altura comprimida de capim coast-cross

A Figura 18 é referente a regressão linear realizada entre os valores de altura do dossel e altura comprimida do dossel, a qual foi obtida utilizando cada uma das quatro esteiras de borracha que realizaram pressão sobre o dossel forrageiro de capim coast-cross. Pode-se observar que as esteiras realizaram a compressão do dossel de maneira crescente, sobretudo para os pontos em que a altura do dossel foi maior.

Os resultados corroboram com o observado por Philips e Clarke (1971), onde o aumento da pressão sobre o dossel é proporcional à redução da altura comprimida do mesmo. Moore et al. (1987) observaram que a densidade do dossel de gramíneas é variável conforme sua altura, sobretudo em gramíneas tropicais. Isso explica a crescente diferença da altura comprimida pelas esteiras de borracha conforme a altura do dossel aumenta.

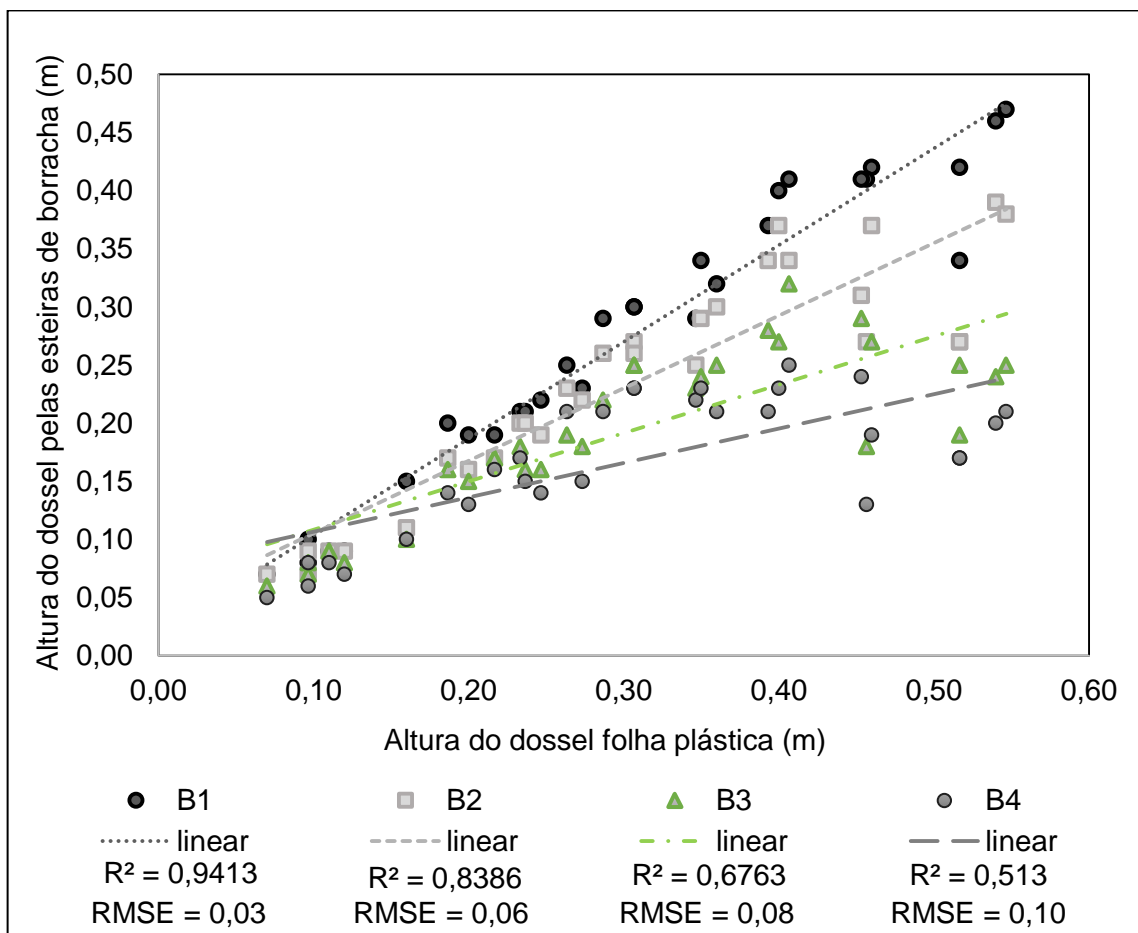


Figura 17. Regressão linear realizada entre a altura do dossel e altura comprimida do dossel pelas quatro esteiras de borracha, as quais realizam pressão igual à: B1= 0,75 kg m<sup>2</sup>; B2= 2,5 kg m<sup>2</sup>; B3 = 5,0 kg m<sup>2</sup> e B4= 7,5 kg m<sup>2</sup>.



Para a regressão linear realizada entre biomassa verde e altura comprimida do dossel forrageiro é possível observar que a pressão exercida sobre o dossel foi inversamente proporcional ao aumento do coeficiente de determinação, ou seja, quanto menor a pressão exercida melhores foram os valores de  $R^2$  e RMSE para a regressão. Na regressão realizada entre matéria seca de forragem e altura comprimida do dossel, as esteiras de densidade igual a  $2,5 \text{ kg m}^{-2}$  e  $5,0 \text{ kg m}^{-2}$  apresentaram valores similares de  $R^2$  e RMSE, mas ainda menores que os valores para a menor pressão exercida ( $B1= 0,75 \text{ kg m}^{-2}$ ). As Figuras 19 e 20 apresentam a reta de regressão para matéria verde e seca, respectivamente, para as quatro esteiras de borracha utilizadas.

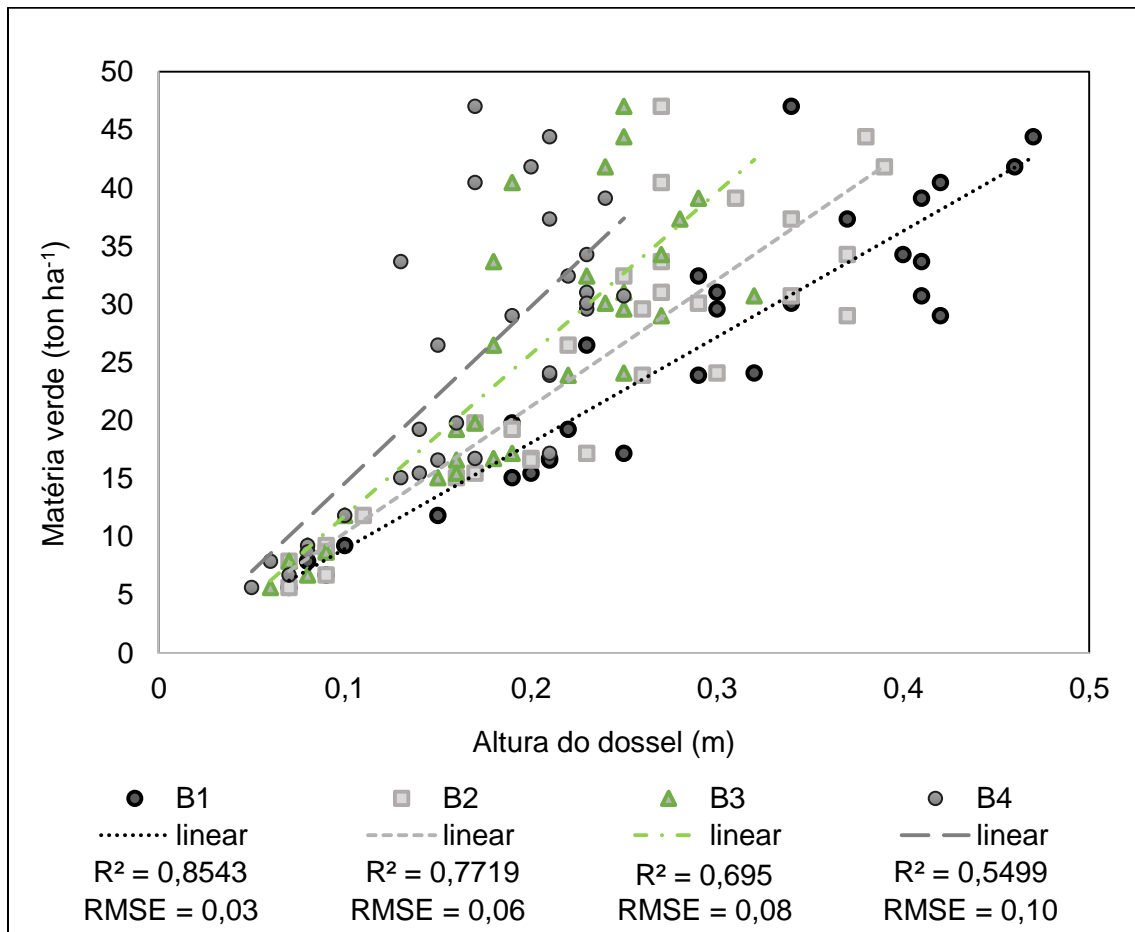


Figura 18. Regressão linear realizada entre a altura comprimida do dossel pelas quatro esteiras de borracha e massa verde de forragem. A pressão exercida pelas esteiras sobre o dossel é igual à: B1 = ; B2 =  $2,5 \text{ kg m}^{-2}$ ; B3 =  $5 \text{ kg m}^{-2}$  e B4 =  $7,5 \text{ kg m}^{-2}$ .

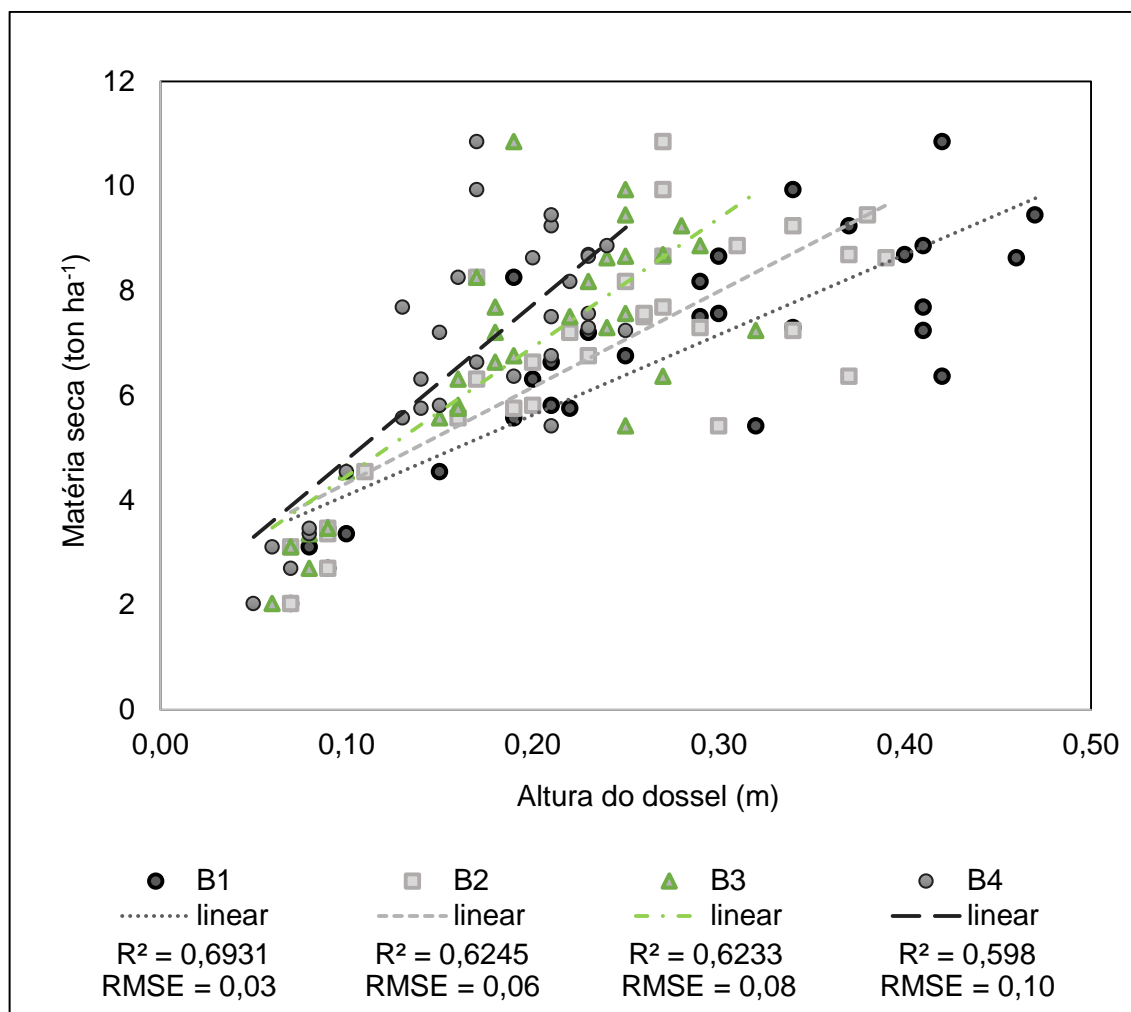


Figura 19. Regressão linear realizada entre a altura comprimida do dossel pelas quatro esteiras de borracha e massa seca de forragem. A pressão exercida pelas esteiras sobre o dossel é igual à: B1=0,75 kg m<sup>2</sup>; B2= 2,5 kg m<sup>2</sup>; B3 = 5 kg m<sup>2</sup> e B4= 7,5 kg m<sup>2</sup>.

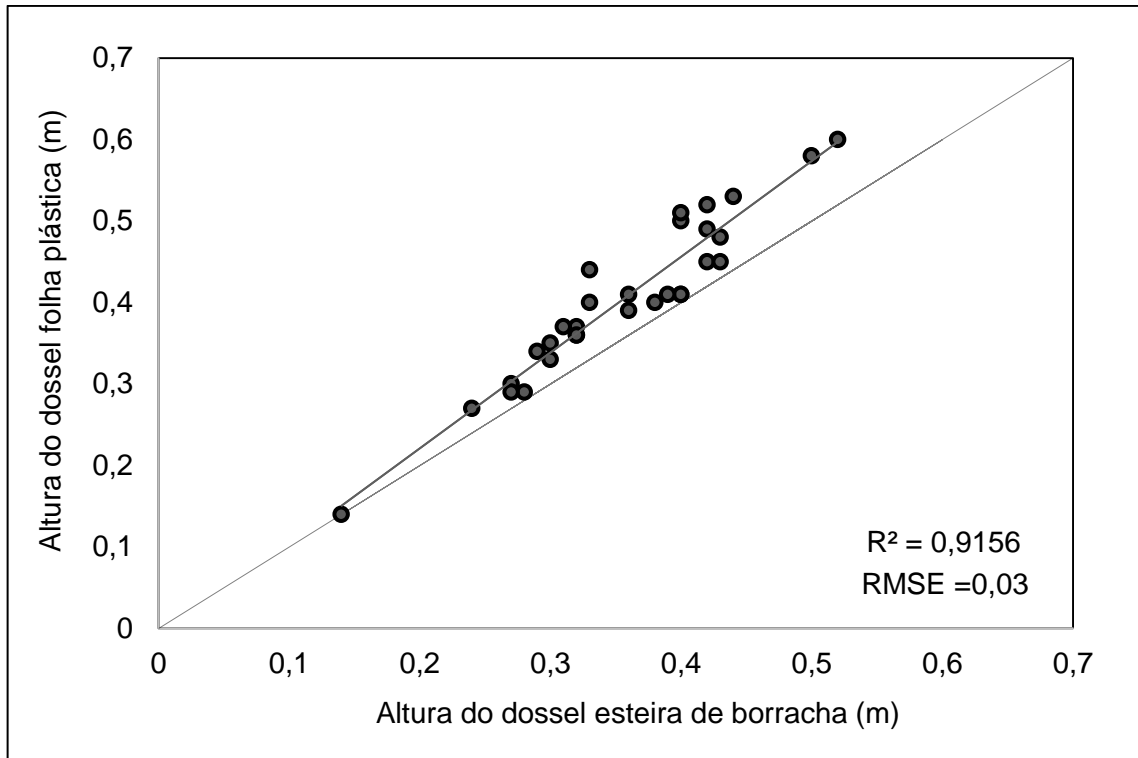
Os resultados são condizentes com os encontrados por Silva e Cunha (2003) com o uso de RPM na correlação com biomassa em pastos de coast-cross. Para as análises realizadas na primavera os autores encontraram R<sup>2</sup>= 0,49 com o uso de RPM e R<sup>2</sup>= 0,40 em medidas de altura pelo método tradicional. Para o experimento realizado a altura foi um melhor estimador de biomassa em comparação com a altura comprimida por todas as esteiras de borracha, fato que pode variar conforme o método de calibração ou época do ano utilizados, entendendo que medidas indiretas de biomassa devem ser calibradas constantemente para representação mais fiel da realidade (Pedreira, 2002).

Contudo, o experimento buscou investigar a interação entre diferentes pressões laterais sobre o dossel e a biomassa presente, observando relação similar ao uso de medidores de altura comprimida do dossel já utilizados, como o RPM. Novos experimentos podem ser realizados utilizando esteira de borracha de pressão padronizada ou variável em comparações, ou em conjunto com RPM e outros métodos tradicionais de medidas indiretas

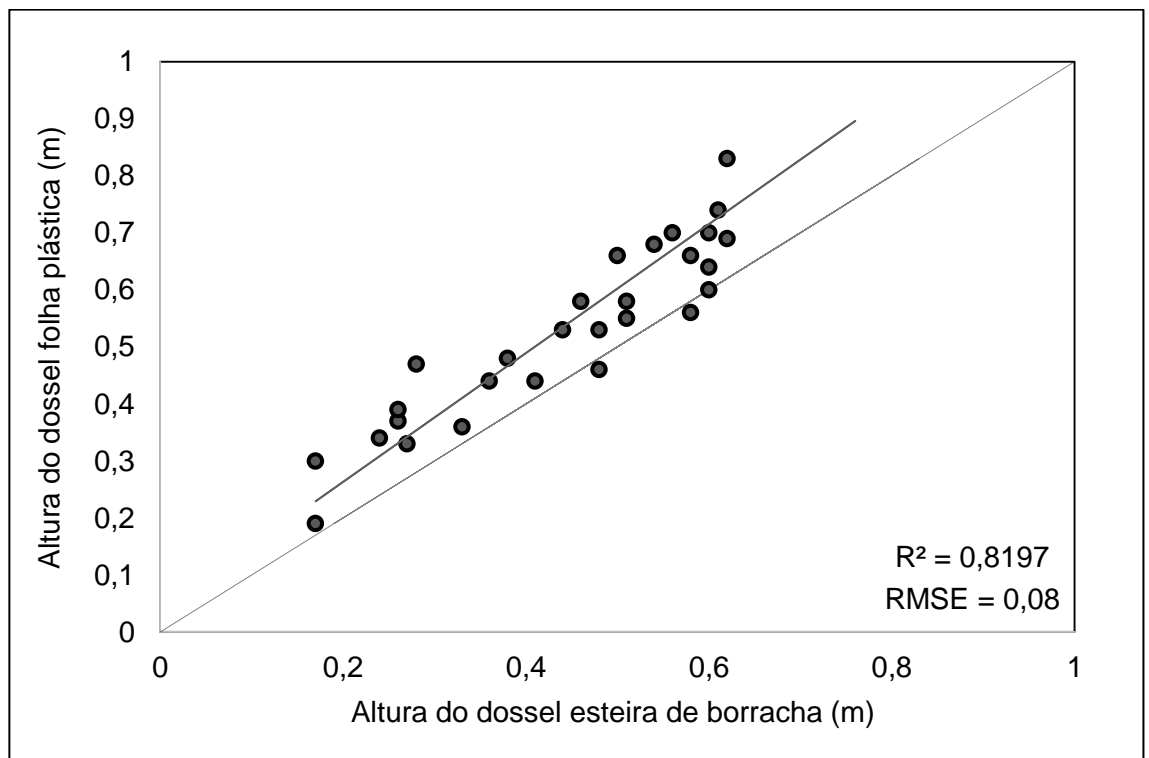
de biomassa, sobretudo em pastagens tropicais de colmos rígidos e de crescimento cespitoso, as quais ainda apresentam limitações para medidas indiretas de massa de forragem (Franco et al.,2021).

#### **4.5. Esteira de borracha de baixa densidade para medidas de altura de plantas em pastos de capim tifton-85, cameroon e sempre-verde**

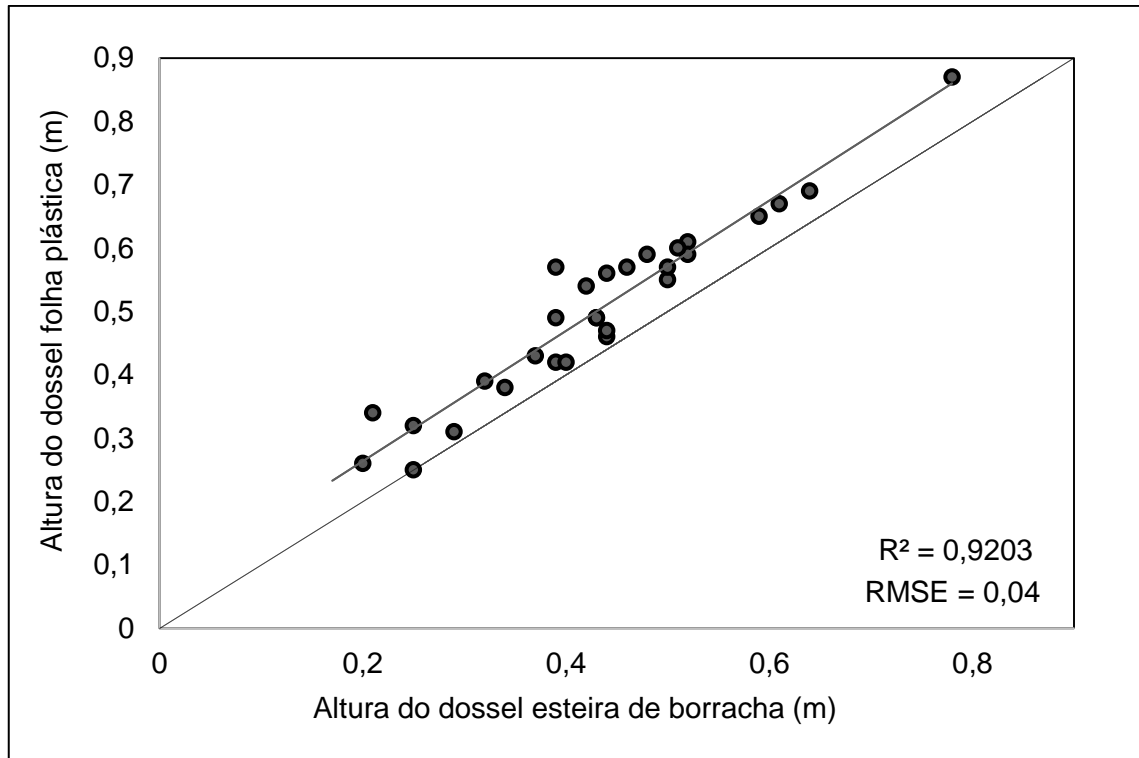
Os parâmetros da regressão linear realizada entre as medidas de altura pelo método tradicional e altura com uso de esteira de borracha de baixa densidade são apresentados nas figuras 21, 22 e 23. Os valores de  $R^2$  foram melhores para tifton-85 e sempre-verde, sendo tifton-85 o que apresentou os menores valores de RMSE. O capim cameroon foi o que apresentou os piores valores de  $R^2$  e RMSE. As figuras 24, 25 e 26 apresentam os resultados das regressões lineares entre a biomassa seca de forragem e as medidas de altura do dossel pelo método tradicional (bastão graduado e folha plástica) e com uso da esteira de borracha. Todos os parâmetros calculados são muito próximos, sendo  $R^2$  maiores para o uso de esteira de borracha para Cameroon e sempre-verde e menor para tifton-85. Os valores de RMSE foram menores para as medidas pelo método tradicional nos capins tifton-85 e cameroon e menor para o capim sempre-verde.



**Figura 20.** Valores calculados de coeficiente de regressão ( $R^2$ ) e Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) para a regressão linear realizada entre os valores de altura do dossel forrageiro obtida pelo método tradicional em comparação com uso de esteira de borracha de baixa densidade em pastos de tifton-85.

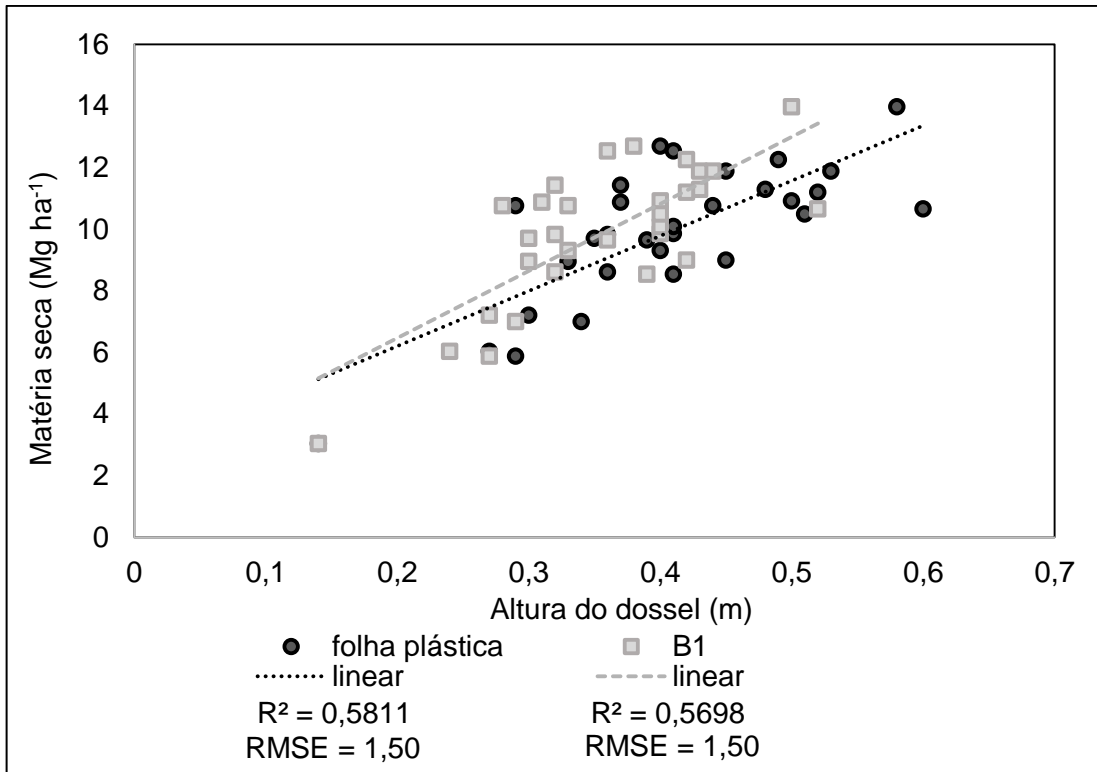


**Figura 21.** Valores calculados de coeficiente de regressão ( $R^2$ ) e Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) para a regressão linear realizada entre os valores de altura do dossel forrageiro obtida pelo método tradicional em comparação com uso de esteira de borracha de baixa densidade em pastos de cameroon.

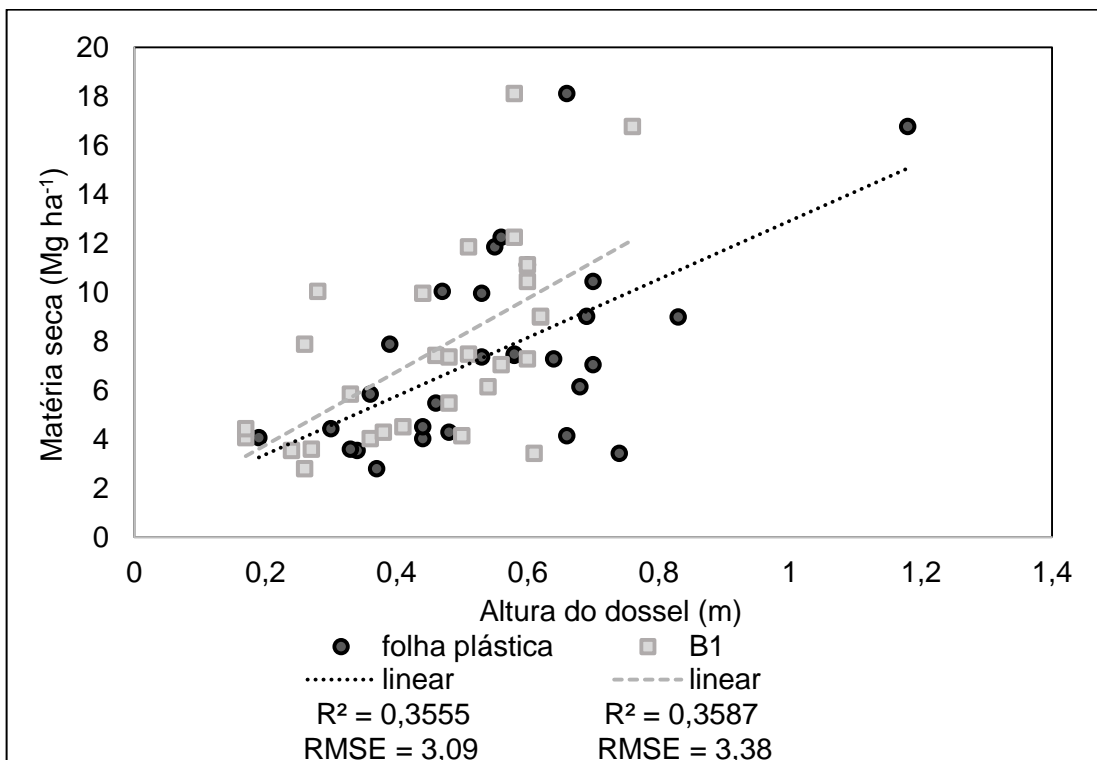


**Figura 22.** Valores calculados de coeficiente de regressão ( $R^2$ ) e Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) para a regressão linear realizada entre os valores de altura do dossel forrageiro obtida pelo método tradicional em comparação com uso de esteira de borracha de baixa densidade em pastos de sempre-verde.

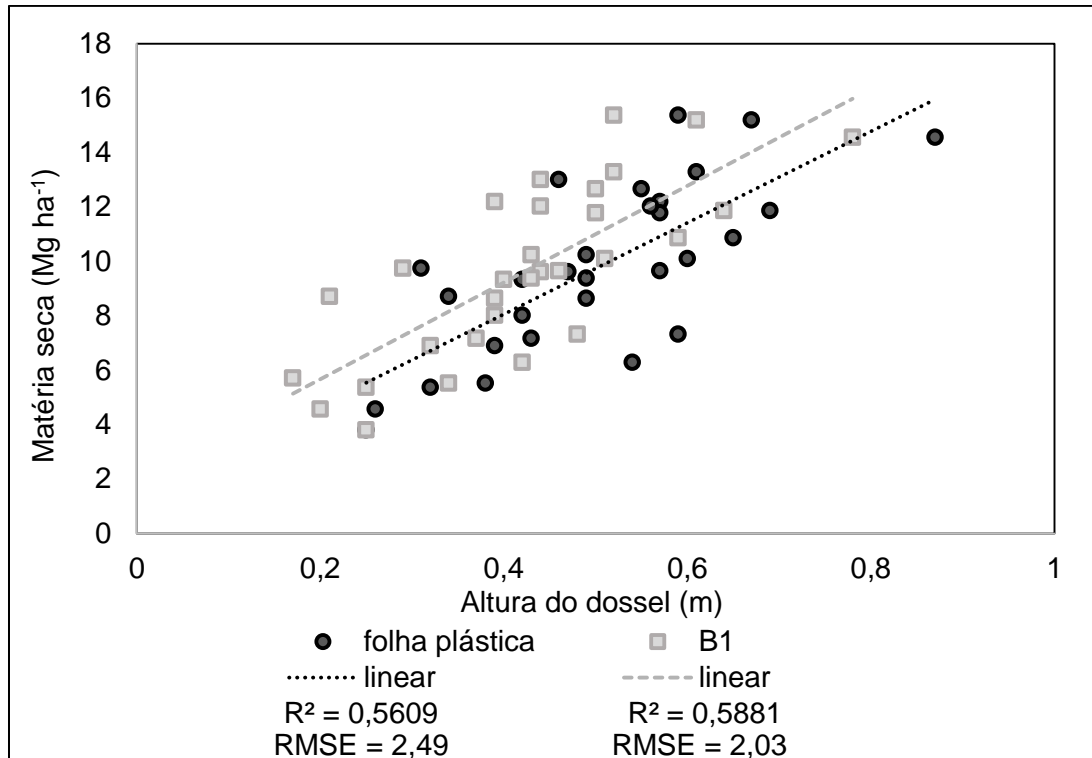
O uso de esteira de borracha para medidas indiretas de altura do dossel forrageiro pode ser comparado com o uso de sensores de distância para a mesma finalidade, uma vez que em ambos os casos é estimada a altura do dossel forrageiro e comparada com a altura real do dossel. Os resultados do experimento apresentam valores similares aos melhores resultados obtidos com o uso de sensores. Gruner et al. (2019), com valores de até  $R^2 = 0,84$  utilizando fotogrametria para estimativa de altura de plantas em pastos consorciados de leguminosas temperadas, e Obanawa et al. (2020), com valores de  $R^2 = 0,93$  com uso de LiDAR de varredura em pastos de azevém-italiano (*Lolium multiflorum*) no Japão.



**Figura 23.** Valores calculados de coeficiente de correlação ( $R^2$ ) e Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) para as regressões lineares realizadas entre os valores de altura do dossel forrageiro obtida pelo método tradicional e com uso de esteira de borracha de baixa densidade em comparação com massa seca de forragem de tifton-85.



**Figura 24.** Valores calculados de coeficiente de correlação ( $R^2$ ) e Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) para as regressões lineares realizadas entre os valores de altura do dossel forrageiro obtida pelo método tradicional e com uso de esteira de borracha de baixa densidade em comparação com massa seca de forragem de cameroon.



**Figura 25.** Valores calculados de coeficiente de correlação ( $R^2$ ) e Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) para as regressões lineares realizadas entre os valores de altura do dossel forrageiro obtida pelo método tradicional e com uso de esteira de borracha de baixa densidade em comparação com massa seca de forragem de sempre-verde.

Para correlação com biomassa em todas as forrageiras estudadas a altura do dossel com uso de esteira de borracha apresentou resultados muito próximos aos resultados obtidos pelo método tradicional (Figuras 24, 25 e 26). Como discutido por Bransby et al. (1977), tal resultado pode ser explicado pelo fato de que quanto menor a pressão exercida sobre o dossel forrageiro maior é sua relação com a altura de plantas, sendo menos afetada pela densidade do dossel.

#### 4.6. Análise do conjunto dos resultados

Os resultados obtidos se referem a técnicas de monitoramento de variáveis de pastagens, passíveis de serem inseridas em um sistema de cercas móveis. Foram estudadas duas variáveis biométricas de plantas forrageiras, sendo elas altura do dossel forrageiro, (tópicos 4.2, 4.3 e 4.5) e altura comprimida, (tópico 4.4), além de uma análise para obtenção do número mínimo de sensores necessários para representar a média de altura de uma faixa de dossel (tópico 4.1).

Observou-se ser necessária a representação de uma área mínima de 3,5 m<sup>2</sup> para a obtenção de um erro inferior a 10% na média dos valores de altura do dossel, para todas as

cultivares avaliadas. Foram avaliadas três estratégias para coleta de dados de altura do dossel: sensores de distância coletando dados pontualmente sobre o dossel (tópico 4.2); sensores de distância coletando dados em um deslocamento sobre o dossel (tópico 4.3) e esteira de borracha de baixa densidade, a qual é deslizada sobre o dossel, expressando sua altura (tópico 4.5). Em todos os experimentos foram utilizadas medidas de altura pelo método tradicional de régua e folha plástica como comparativo, tanto para avaliar a assertividade dos valores de altura do dossel quanto para comparações entre as estimativas de biomassa, obtidas por regressões lineares. Para todos os experimentos foi possível estimar a biomassa de forma semelhante ao uso da altura pelo método tradicional. Contudo, para medidas de altura, apenas o uso de sensores coletando dados pontuais sobre o dossel não representou suficientemente a altura real obtida pelo método convencional. Desta forma, os resultados indicam que todas as estratégias podem ser calibradas para correlações com biomassa, mas apenas o uso de esteira de borracha e sensores coletando dados em deslocamento podem ser usados para estimar a altura do dossel forrageiro, para as cultivares estudadas.

Avaliou-se o efeito de esteiras de borracha realizando diferentes pressões sobre o dossel forrageiro em estimativas de biomassa a partir da altura comprimida do dossel (tópico 4.4.), como uma análise inicial da viabilidade do seu uso acoplada a uma cerca móvel ou qualquer equipamento móvel, facilitando o processo de coleta de dados de altura comprimida do dossel. A esteira que realizou a menor pressão sobre o dossel apresentou a melhor correlação com biomassa verde e seca. No entanto, para o caso do experimento, a altura do dossel foi um bom estimador de biomassa, a qual é melhor representada por menores pressões sobre o dossel (Bransby et al., 1977). As demais esteiras realizaram compressão do dossel proporcional e com diferenças crescentes com a altura do dossel. Com isso, pode-se entender que o uso de esteiras de borracha pode ser usado em medidas de altura comprimida do dossel, necessitando calibrações específicas para diferentes cultivares, além de comparações com o uso de RPM, método tradicional utilizado para este tipo de medidas.





## 5. CONCLUSÕES

A partir dos experimentos propostos e seus respectivos resultados foi possível concluir que um conjunto de sensores de distância pode ser acoplado a uma cerca móvel, coletando dados necessários para comandar seu deslocamento. Assumindo um erro inferior a 10%, é necessário um sensor para representar a altura média do dossel referente à área de 3,5 m<sup>2</sup>. Os sensores LiDAR e sonar podem coletar dados de altura diretamente da superfície do dossel, caso o método utilizado seja coletando dados em um deslocamento linear, ou sobre uma esteira de borracha de baixa densidade deslizada sobre o dossel. Caso o método utilizado seja a coleta de dados pontualmente sobre o dossel, não é possível estimar com assertividade a altura real utilizando os sensores de distância estudados. Calibrações para estimativa de biomassa também podem ser realizadas utilizando sensores de distância LiDAR, laser e sonar.

O uso de esteira de borracha de diferentes densidades, deslizada sobre o dossel forrageiro, realiza pressões proporcionais à altura comprimida do dossel em pastos de capim coast-cross, e pode ser correlacionada com massa de forragem. No entanto, necessita de calibrações específicas para diferentes cultivares, além de comparações com o uso de RPM.



## REFERÊNCIAS

- ABIEC– Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carne. Perfil da Pecuária no Brasil. Relatório anual 2019.
- AGROPECUÁRIO, IBGE Censo Agropecuário. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/bda/acervo/acervo2.asp?e=v&p=CA&z=t&o=11>>. 2017. Acesso em: 10/11/2019.
- Aiken, G.E. & Bransby, D.I. Observer variability for disk meter measurements of forage mass. *Agronomy Journal* 84:603-605. 1992.
- Aine, H. E. Wireless control of animals. U.S. patent 5,121,711. 7 p. 16 jun. 1992.
- Ali, I., Barrett, B., Cawkwell, F., Green, S., Dwyer, E., & Neumann, M. Application of repeat-pass TerraSAR-X staring spotlight interferometric coherence to monitor pasture biophysical parameters: limitations and sensitivity analysis. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017.
- Altman, D. G., & Bland, J. M. Standard deviations and standard errors. *Bmj*, v.331 nº 7521, p. 903. 2005
- Anderson, D.M., Hale, C.S. Animal control system using global positioning and instrumental animal conditioning. U.S. patent 6,232,880 B1. 18 p. 15 mai. 2001.
- Andersson, K., Trotter, M., Robson, A., Schneider, D., Frizell, L., Saint, A. & Blore, C. Estimating pasture biomass with active optical sensors. *Advances in Animal Biosciences*, v. 8, n. 2, p. 754-757, 2017.
- Ballard, D. H.; Brown, C. M. *Computer vision*, 1982. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1982.
- Barros, G. P. P. D. Estratégias de manejo de campos nativos do Uruguai e suas contribuições para o aumento do potencial produtivo. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 30p. 2019.
- Batistoti, J., Marcato Junior, J., Ítavo, L., Matsubara, E., Gomes, E., Oliveira, B., Dias, A. Estimating pasture biomass and canopy height in Brazilian Savanna using UAV photogrammetry. *Remote Sensing*, v. 11, n. 20, p. 2447, 2019.
- Bazame, H. C. Adubação Nitrogenada À Taxa Variada Em Capim Xaraés Com Base Em Sensores Espectrais. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa. 2018.
- Benet, B.; Rousseau, V.; Lenain, R. Fusion between a color camera and a TOF camera to improve traversability of agricultural vehicles. In: *Conférence CIGR-AGENG. The 6th International Workshop Applications of Computer Image Analysis and Spectroscopy in Agriculture*. p. 8 p. 2016

- Benvenuti, M. A., Barber, D. G., Mayer, D. G., Ison, K., Colman, M. V., & Findsen, C. Comparison between a laser sensor and mechanical tools to estimate pasture mass in strata of kikuyu (*Pennisetum clandestinum*) pastures. *Animal Feed Science and Technology*, v. 249, p. 31-36, 2019.
- Bernardi, A. C. De C.; Perez, Naylor B. Agricultura de precisão em pastagens. Embrapa Pecuária Sul-Capítulo em livro científico (ALICE), 2014.
- Bhattacharya, T., Karmakar, C., Wilkin, T., & Loke, S. Behaviour-based Intelligent Power Management of the eShepherd Virtual Fencing Collar for Cattle. In: *Proceedings of the 2018 ACM International Joint Conference and International Symposium on Pervasive and Ubiquitous Computing and Wearable Computers*. p. 13-16. 2018.
- Borges, T. H. Sistema de classificação de plantas por meio de suas folhas usando uma arquitetura híbrida composta por algoritmos genéticos e rede neural artificial. 2013.
- Bransby, D. I., Matches, A. G., & Krause, G. F. Disk meter for rapid estimation of herbage yield in grazing trials 1. *Agronomy Journal*, 69(3), 393-396. 1977.
- Brose, P.W. Animal training and restraining system. U.S. patent 4,898,120. 11 pp. 06 fev. 1990.
- Burton, G. W. Tifton 85 bermudagrass—early history of its creation, selection, and evaluation. *Crop science*, v. 41, n. 1, p. 5-6, 2001.
- Butler, Z., Corke, P., Peterson, R., & Rus, D. Virtual fences for controlling cows. In: *IEEE International Conference on Robotics and Automation. Proceedings. ICRA'04*. IEEE, p. 4429-4436. 2004.
- Campbell, D. L., Lea, J. M., Farrer, W. J., Haynes, S. J., & Lee, C. Tech-savvy beef cattle? How heifers respond to moving virtual fence lines. *Animals*, v. 7, n. 9, p. 72, 2017.
- Campbell, D. L., Ouzman, J., Mowat, D., Lea, J. M., Lee, C., & Llewellyn, R. S. Virtual fencing technology excludes beef cattle from an environmentally sensitive area. *Animals*, v. 10, n. 6, p. 1069, 2020.
- Castle, M. E. A simple disc instrument for estimating herbage yield. *Grass and Forage Science*, v. 31, n. 1, p. 37-40, 1976.
- Cavalcante, F. S. Frequência de colheita em pastos de *Megathyrsus maximus* cv. Sempre-Verde. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Federal de Viçosa. 2018.
- Clark, D. A., & Kanneganti, V. R. Grazing management systems for dairy cattle. *Grass for dairy cattle.*, p. 311-334, 1998.
- Colaço, A. F., Molin, J. P., Rosell-Polo, J. R., & Escolà, A. Application of light detection and ranging and ultrasonic sensors to high-throughput phenotyping and precision horticulture: current status and challenges. *Horticulture research*, v. 5, n. 1, p. 1-11, 2018.

- Corrêdo, L. de P., Pinto, F. D. A. de C., Queiroz, D. S., Valente, D. S. M., & de Melo Villar, F. M. Nitrogen variable rate in pastures using optical sensors. Seminário: Ciências Agrárias, v. 40, n. 6Supl2, p. 2917-2932, 2019.
- Costa, J. A. A. da; De Queiroz, H. P. Régua de Manejo de Pastagens: edição revisada. Embrapa Gado de Corte-Comunicado Técnico (INFOTECA-E), 2017.
- Currie, P. O.; Hilken, T. O. & White, R. S. Evaluation of a Single Probe Capacitance Meter for Estimating Herbage Yield. *Journal of Range Management* 40(6), November: 537-541. 1987.
- Dennis, S. J., Taylor, A. L., O'Neill, K., Clarke-Hill, W., Dynes, R. A., Cox, N. e Jowett, T. W. D. Pasture yield mapping: why & how. *Journal of New Zealand Grasslands*, p. 41-46, 2015.
- DIAS-FILHO, M. B. Diagnóstico das pastagens no Brasil. Embrapa Amazônia Oriental- Documentos (INFOTECA-E), 2014. Disponível em: <http://bit.ly/1v0USg3>.
- Earle, D. F., & McGowan, A. A. Evaluation and calibration of an automated rising plate meter for estimating dry matter yield of pasture. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 19(98), 337-343. 1979.
- Fay, P.K., McElligott, V.T., Havstad, K. Containment of free-ranging goats using pulsed-radio-wave-activated shock collars. *Applied Animal Behaviour Science*, v. 23, n. 1-2, p. 165-171, 1989.
- Flynn, E.S.; Dougherty, C.T.; Wendroth, O. Assessment of pasture biomass with normalised difference vegetation index from active ground-based sensors. *Agronomy Journal*, v.100, p.114-121, 2008.
- Fone, N., 2007 Lely unveils new voyager robotic fencer for automated grazing control. *Farmers Weekly Interactive*. Acessado em 10/02/2020 em: <https://www.fwi.co.uk/livestock/dairy/lely-unveils-new-voyager-robotic-fencer-for-automated-grazing-control>.
- Fonseca, D. M.; Martuscello, J. A. (Ed.). Plantas forrageiras. 1. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2010.
- Franco, V. R., Andrade, R. G., Hott, M. C., da Fonseca, L. G., Paciullo, D. S. C., & GOMIDE, C. D. M. Resultados preliminares: soluções mobile para estimativa de parâmetros biofísicos aplicados ao monitoramento e manejo de pastagens. In: Embrapa Gado de Leite-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: WORKSHOP DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA EMBRAPA GADO DE LEITE, 25., 2021, Juiz de Fora. Anais... Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2021. p., 2021.
- Fricke, T., Richter, F., & Wachendorf, M. Assessment of forage mass from grassland swards by height measurement using an ultrasonic sensor. *Computers and electronics in agriculture*, v. 79, n. 2, p. 142-152, 2011.

- Fulkerson, W.J. University of Sydney, Camden, NSW Australia. (dados não publicados, 2007)
- Ghajar, S.; Tracy, B. Proximal Sensing in Grasslands and Pastures. *Agriculture*, v. 11, n. 8, p. 740, 2021
- Gobor, Z.; Cariou, C.; Seiferth, B.; Thurner, S.; Feucker, W.; Tessier, C.; Tekin, B.; Berducat, M. Advanced pasture management through innovative robotic pasture maintenance. In *Proceedings of the IROS Workshop Agri-Food Robot, Hambourg, Alemanha*. 2015.
- Grasstec Group. Rapid Pasture Meter Grasstec. Youtube, 19 fev. 2017. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=bhiOJPTAOZU>. Acesso em 25 fev. 2020.
- Handcock, R. N., Gobbett, D. L., González, L. A., Bishop-Hurley, G. J., & McGavin, S. L. A pilot project combining multispectral proximal sensors and digital cameras for monitoring tropical pastures. *Biogeosciences*, v. 13, n. 16, p. 4673-4695, 2016.
- Hill, M.J.; Donald, G.E.; Hyder, M.W.; Smith, R.C.G. Estimation of pasture growth rate in the south west of Western Australia from AVHRR NDVI and climate data. *Remote Sensing of the Environment*, v.93, p.528-545, 2004.
- Hirata, M. Quantifying spatial heterogeneity in herbage mass and consumption in pastures. *Rangeland Ecology & Management/Journal of Range Management Archives*, v. 53, n. 3, p. 315-321, 2000.
- HUANG, T. *Computer vision: Evolution and promise*. Cern, 1996.
- Insua, J. R.; Utsumi, S. A.; Basso, B. Estimation of spatial and temporal variability of pasture growth and digestibility in grazing rotations coupling unmanned aerial vehicle (UAV) with crop simulation models. *PloS one*, v. 14, n. 3, p. e0212773, 2019.
- Jank, L.; Martustello, J. A.; Euclides, V. P. B.; Valle, C. B.; Resende, R. M. S. *Panicum maximum*. p. 166-196. In: Fonseca, D. M.; Martuscello, J. A. (Ed.). *Plantas forrageiras*. 1. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2010.
- Jáuregui, J. M., Delbino, F. G., Bonvini, M. I. B., & Berhongaray, G. Determining yield of forage crops using the Canopeo mobile phone app. *Journal of New Zealand Grasslands*, v. 81, p. 41-46, 2019.
- Legg, M.; Bradley, S. Ultrasonic Proximal Sensing of Pasture Biomass. *Remote Sensing*, v. 11, n. 20, p. 2459, 2019.
- Lely Group. Automatic grazing system Frontal Grazing: the innovative way. *Boletim técnico*. Masslluis, Holanda. 8p. 2007.
- Lu, B., e He, Y. Species classification using Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-acquired high spatial resolution imagery in a heterogeneous grassland. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 128, p. 73-85, 2017.

- Mancin, W. R., Virgílio, A. A., Oliveira, M. E. D., Pereira, L. E. T., & Tech, A. R. B. Desenvolvimento de software usando processamento digital de imagem e redes neurais para determinação do status de nitrogênio em *Brachiaria Brizantha*. Anais, 2017.
- Manderson, A.; Hunt, C. Introducing the Agri-Rover: An Autonomous on-the-go sensing rover for science and farming. In: Proceedings of the 26th Annual Farmed Landscapes Research Centre Workshop, Palmerston North Nova Zelândia. 2013.
- Mannetje, L. Measuring biomass of grassland vegetation. p. 151-177. In: Mannetje, L. & Jones, R.M. (eds.) Field and laboratory methods for grassland and animal production research. 2000.
- Marciano, R. B., Gomes, F. J., Tschope, G. L., Pedreira, C., & Pedreira, B. Métodos para mensuração da altura em capim-marandu sob pastejo em lotação contínua e taxa de lotação variável em sistemas integrados. In: Embrapa Agrossilvipastoril-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: SIMPOSIO MATOGROSSENSE DE BOVINOCULTURA DE CORTE, 4., 2017, Cuiabá. Anais... Cuiabá: SIMBOV, 2017. Não paginado., 2017.
- Markus, S. B., Bailey, D. W., & Jensen, D. Comparison of electric fence and a simulated fenceless control system on cattle movements. *Livestock Science*, v. 170, p. 203-209, 2014.
- Marseillan, J. Movable fence to control cattle pasturage. U.S. Patent n. 3,972,307, 3 ago. 1976.
- Marsh, R.E., 1999. Fenceless animal control system using GPS location information. U.S. patent 5,868,100. 9 fev. 1999.
- McSweeney, D., Coughlan, N. E., Cuthbert, R. N., Halton, P., & Ivanov, S. Micro-sonic sensor technology enables enhanced grass height measurement by a Rising Plate Meter. *Information Processing in Agriculture*, 6(2), 279-284. 2019.
- Michez, A., Philippe, L., David, K., Sébastien, D., Christian, D., & Bindelle, J. Can Low-Cost Unmanned Aerial Systems Describe the Forage Quality Heterogeneity? Insight from a Timothy Pasture Case Study in Southern Belgium. *Remote Sensing*, v. 12, n. 10, p. 1650, 2020.
- Miller, C. L., Miller, W. A., Minn, B. Mobile Fence. US Patent n. 2,766,016, 9 out. 1956.
- Milsom, A. J., Bell, O., Bailey, K., Brown, S. C., Barton, R. A., Moreno Garcia, C. A., ... & Eady, C. C. Assessing the ability of a stationary pasture height sensing device to estimate pasture growth and biomass. *Journal of New Zealand Grasslands*, v. 81, p. 61-68, 2019.
- Moeckel, T., Safari, H., Reddersen, B., Fricke, T., & Wachendorf, M. Fusion of ultrasonic and spectral sensor data for improving the estimation of biomass in grasslands with heterogeneous sward structure. *Remote Sensing*, v. 9, n. 1, p. 98, 2017.



- Molin, J. P., Dias, C. T. D. S., & Carbonera, L. Estudos com penetrometria: Novos equipamentos e amostragem correta. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 16, n. 5, p. 584-590, 2012.
- Molin, J. P.; Do Amaral, L. R.; Colaço, A. Agricultura de precisão. Oficina de Textos, 2015.
- Moore, J.E.; Sollenberger, L.E.; Morantes, G.A. & Beede, P.T. Canopy structure of *Aeschynomene americana* - *Hemarthria altissima* pastures and ingestive behavior of cattle. p. 93-114. In: Horn, F.P.; Hodgson, J.; Mott, J.J. & Brougham, R.W. (eds.) *Grazing-lands research at the plant-animal interface*. Winrock International, Morrilton, Arkansas, EUA. 1987.
- Moyer, J. L.; Schrock, M. D. Automating measurement of forage mass in pasture. *Forage & Grazinglands*, v. 5, n. 1, p. 1-6, 2007.
- Murphy, D. J., Murphy, M. D., O'Brien, B., & O'Donovan, M. A Review of Precision Technologies for Optimising Pasture Measurement on Irish Grassland. *Agriculture*, v. 11, n. 7, p. 600, 2021.
- Nascimento Jr., D.; Silva, S. C. Da. [Http://www.jcmaschietto.com.br/index.php?link=artigos&sublink=artigo\\_48](http://www.jcmaschietto.com.br/index.php?link=artigos&sublink=artigo_48). In: A altura é que controla a entrada dos animais no pasto. 2008. Disponível em: [http://www.jcmaschietto.com.br/index.php?link=artigos&sublink=artigo\\_48](http://www.jcmaschietto.com.br/index.php?link=artigos&sublink=artigo_48). Acesso em: 15 fev. 2022.
- Naves, L. de P., da Silva, P. F. P., & da Silva Fonseca, L. Criação alternativa de codornas europeias em aviário móvel. *Revista de Ciências Agrárias Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, v. 60, n. 4, p. 366-369, 2017.
- Oliveira, A. R. A., da Silva Pinto, P., de Jesus Silva, C., & Santos, N. B. Construção do Aviário Móvel como Alternativa de Produção de Galinhas" Caipiras. In: I ENCONTRO DE SABERES. 2018.
- Patrignani A, Ochsner TE. Canopeo: A powerful new tool for measuring fractional green canopy cover. *Agronomy Journal*. 2015
- Paula Neto, J. J. de; Alexandrino, E.; dos Santos, A. C.; de Oliveira Mendes Filho, G.; da Silva, D. P. & Melo, J. C. Distribuição espacial da altura do dossel e efeito sobre a cobertura do solo em pastos mantidos em lotação contínua. *Bioscience Journal*, v. 30, 2014.
- Peck, R.M. Method and apparatus for controlling an animal. U.S. patent 3,753,421, 6 pp. 21 ago. 1973.
- Pedreira, C. G. S. Avanços metodológicos na avaliação de pastagens. *Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia*, v. 39, p. 100-150, 2002.
- Pereira A. V. Escolha de variedades de capim elefante. In: *Simposio sobre Manejo da Pastagem*, Piracicaba; Fealq, Anais; p 47-62. 1993.

- Pereira, O. G., Rovetta, R., Ribeiro, K. G., Santos, M. E. R., Fonseca, D. M. D., & Cecon, P. R. Características morfológicas e estruturais do capim-tifton 85 sob doses de nitrogênio e alturas de corte. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 40, n. 9, p. 1870-1878, 2011.
- Peterson, R. G. Carga animal e intensidade de pastoreio. In: SÃO PAULO, Departamento de produção animal. *Fundamentos de manejo de pastagens*. São Paulo, p. 109-12. 1961.
- Phillips, D. S. M., e Clarke, S. E. The calibration of a weighted disc against pasture dry matter yield. In: *Proceedings of the New Zealand Grassland Association*. p. 68-75. 1971.
- Poncio, C. Cerca Elétrica Voadora. Youtube, 10 abr. 2011. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=63BijBop4EA&t=29s>. Acesso em 25 fev 2020.
- Rayburn, E. B., & Rayburn, S. B. A standardized plate meter for estimating pasture mass in on-farm research trials. *Agronomy Journal*, 90(2), 238-241. 1998.
- Reinermann, S., Asam, S., & Kuenzer, C. Remote sensing of grassland production and management—A review. *Remote Sensing*, v. 12, n. 12, p. 1949, 2020.
- RETI, J. Embrapa faz registro de software para garantir bom funcionamento e acesso gratuito. 2016. Disponível em < <http://www.cppse.embrapa.br/embrapa-faz-registro-desoftware-para-garantir-bom-funcionamento-e-acesso-gratuito> > Acesso em 01/11/2019.
- Revolutionising Grazing. Freshgraze, 2019. Disponível em: <<http://freshgraze.ie/home.html#header>>. Acesso em: 25 fev. 2020.
- Rook, A. J., Harvey, A., Parsons, A. J., Orr, R. J., & Rutter, S. M. Bite dimensions and grazing movements by sheep and cattle grazing homogeneous perennial ryegrass swards. *Applied Animal Behaviour Science*, v. 88, n. 3-4, p. 227-242, 2004.
- Rueda-Ayala, V. P., Peña, J. M., Höglind, M., Bengochea-Guevara, J. M., & Andújar, D. Comparing UAV-based technologies and RGB-D reconstruction methods for plant height and biomass monitoring on grass ley. *Sensors*, v. 19, n. 3, p. 535, 2019.
- Ryan, K. (ed.). The 'Mikemobile'; a non-destructive method of measuring crop and pasture height and biomass. Department of Primary Industries and Regional Development. 2019. Disponível em: <https://www.agric.wa.gov.au/frost/mikemobile-non-destructive-method-measuring-crop-and-pasture-height-and-biomass>. Acesso em: 10 jul. 2021.
- Safari, H., Fricke, T., Reddersen, B., Möckel, T., e Wachendorf, M. Comparing mobile and static assessment of biomass in heterogeneous grassland with a multi-sensor system. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, v. 5, n. 2, p. 301-312, 2016.
- Sanderson, M. A., Rotz, C. A., Fultz, S. W., & Rayburn, E. B. Estimating forage mass with a commercial capacitance meter, rising plate meter, and pasture ruler. 2001.
- Santos, D. R. D., & Khoshelham, K. Mapeamento 3d de ambientes internos usando dados RGB-D. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 21, p. 442-464, 2015.

- Sbrissia, A. F.; Silva, S. C. Da. O ecossistema de pastagens e a produção animal. Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia, v. 38, p. 731-754, 2001.
- Schaare, P. N. Improved Pasture meter. Titular: Australian Patent Office. Procurador: Griffith Hack. AU n. 2005264788 B2. Depósito: 16 jul. 2004. Concessão: 18 jul. 2005.
- Schaefer, M. T.; Lamb, David W. A combination of plant NDVI and LiDAR measurements improve the estimation of pasture biomass in tall fescue (*Festuca arundinacea* var. Fletcher). *Remote Sensing*, v. 8, n. 2, p. 109, 2016.
- Schellberg, J.; Hill, M. J.; Gerhards, R.; Rothmund, M.; Braun, M. Precision agriculture on grassland: Applications, perspectives and constraints. *European Journal of Agronomy*, v. 29, p. 59-71, 2008.
- Schellberg, J.; Hill, M.J.; Gerhards, R.; Rothmund, M.; Braun, M. Precision agriculture on grassland: Applications, perspectives and constraints. *European Journal of Agronomy*, v.29, p.59-71, 2008.
- Schulze-Brüninghoff, D., Hensgen, F., Wachendorf, M., & Astor, T. Methods for LiDAR-based estimation of extensive grassland biomass. *Computers and electronics in agriculture*, v. 156, p. 693-699, 2019.
- Schwager, M., Anderson, D.M., Butler, Z., Rus, D. Robust classification of animal tracking data. *Computers and Electronics in Agriculture* 56, 46–59. 2007.
- Scot Consultoria. Você já viu o sistema de pastejo de vacas leiteiras com “cerca elétrica voadora”? 02 set. 2014. Disponível em: <https://www.scotconsultoria.com.br/noticias/artigos/36138/voce-ja-viu-o-sistema-de-pastejo-de-vacas-leiteiras-com-%E2%80%9Ccerca-eletrica-voadora%E2%80%9D>. Acesso em: 25 fev 2020.
- Seiferth, B. Development of a system for selective pasture care by an autonomous mobile machine. Springer Berlin Heidelberg, 2020.
- Serrano, J. M., Peça, J. O., Palma, P., Silva, J. R., & Carvalho, M. Calibração e validação de um medidor de capacitância num projecto de agricultura de precisão em pastagens. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 32, n. 2, p. 85-96, 2009.
- Silva, S. C. Da & Pedreira, C. G. S. Fatores condicionantes e predisponentes da produção animal a pasto. In: Peixoto, A. M.; de Moura, J. C. & de Faria, V. P. Eds. Anais do 13<sup>o</sup> Simpósio sobre Manejo da Pastagem. Tema: Produção de Bovinos a Pasto. FEALQ, Piracicaba, SP, 97-122, 352p.1996.
- Silva, S. C. da, Passanezi, M. M., Carnevalli, R. A., Pedreira, C. G. S., & Fagundes, J. L. Bases para o estabelecimento do manejo de *Cynodon* sp. Simpósio sobre manejo da pastagem, v. 15, p. 129-150, 1998.

- Silva, S. C. Da; Cunha, W. F. da. Métodos indiretos para estimar a massa de forragem em pastos de *Cynodon* spp. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 38, n. 8, p. 981-989, 2003.
- Silva, S. C. Da; Júnior, D. Do N. Avanços na pesquisa com plantas forrageiras tropicais em pastagens: características morfofisiológicas e manejo do pastejo. *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 36, p. 122-138, 2007.
- Sollenberger, L.E. & Burns, J.C. Canopy characteristics, ingestive behavior, and herbage intake in cultivated tropical grasslands. p. 321-327. In: *International Grassland Congress*, 19., 2001. São Pedro, SP. *Proceedings...* Piracicaba: FEALQ. STOBBS, T.H. 1975. Factors limiting the nutritional value of grazed. 2001.
- Temba, P. *Fundamentos da fotogrametria*. Belo Horizonte: UFMG, 2000
- Trotter, M.G.; Lamb, D.W.; Donald, G.E.; Schneider, D.A. Evaluating an active optical sensor for quantifying and mapping green herbage mass and growth in a perennial grass pasture. *Crop and Pasture Science*, v.61, p.389-398, 2010.
- Umstatter, C. The evolution of virtual fences: a review. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 75, n. 1, p. 10-22, 2011
- Veloso, A. L. de C. Trator de galinhas associado à produção de alface. *Dissertação de Mestrado*. Montes Claros, MG: ICA/UFMG, 2010.
- Volesky, J. D. et al., A comparison of frontal, continuous, and rotation grazing systems. *Rangeland Ecology & Management/Journal of Range Management Archives*, v. 47, n. 3, p. 210-214, 1994.
- Volesky, J. D. Frontal grazing: Forage harvesting of the future?. *Rangelands Archives*, v. 12, n. 3, p. 177-181, 1990.
- Wang, D., Xin, X., Shao, Q., Brolly, M., Zhu, Z., & Chen, J. Modeling aboveground biomass in Hulunber grassland ecosystem by using unmanned aerial vehicle discrete lidar. *Sensors*, v. 17, n. 1, p. 180, 2017
- Weinstein, L. D. Electronic assembly for restricting animals to defined areas. U.S. patent 5,067,441. 14 pp., 26 nov. 1991.
- Yule. I. J., Lawrence, H. G., & Murray, R. I. *Pasture Yield Measurement With The C-Dax Pasturemeter*. 2010.



## **ANEXO. TERMO DE REVELAÇÃO DA CRIAÇÃO SUBMETIDO À AUSPIN**

### **A - Cerca móvel para criação de animais em pastagens**

#### **B - Descrição do campo da invenção**

A invenção descrita se refere a uma estrutura acoplada a cercas elétricas rurais, capaz de realizar a movimentação destas cercas. A movimentação permite que a pastagem seja disponibilizada aos animais de maneira gradual, conforme o movimento das cercas no entorno dos animais ocorre. A estrutura consiste em módulos de torres metálicas com rodados e sistema de tração independentes, as quais podem ser interligadas usando como base os fios eletrificados. A estrutura interligada pode realizar movimentação circular ou linear, dependendo de um centro fixo ou cercas laterais fixas, respectivamente. A alimentação de energia das torres é realizada por meio de um fio elétrico junto aos fios da cerca, o qual leva corrente elétrica para todas as torres. A movimentação das torres para manutenção do alinhamento e tensionamento dos fios da cerca é realizada por meio de sensores nas torres que reconhecem e emitem sinais ao sistema de tração para realização de movimento sincronizado, também de maneira independente. O sistema permite movimentações pré programadas ou que respondam a algum parâmetro associado à disponibilidade de pastagem, devidamente quantificada por sensores dedicados acoplados às torres.

#### **C- Descrição do estado da arte**

Quanto mais otimizado for o manejo, visando maior produtividade animal, maior será a necessidade de infraestrutura de divisão dos pastos e mão de obra, tanto para manutenção das cercas, bebedouros e cochos, quanto para a movimentação dos animais entre os piquetes. Mesmo que de maneira tímida, com poucos estudos a respeito, algumas propostas para automação deste manejo podem ser encontradas na literatura e no mercado, visando reduzir a mão de obra e aumentar a eficiência do processo de pastejo.

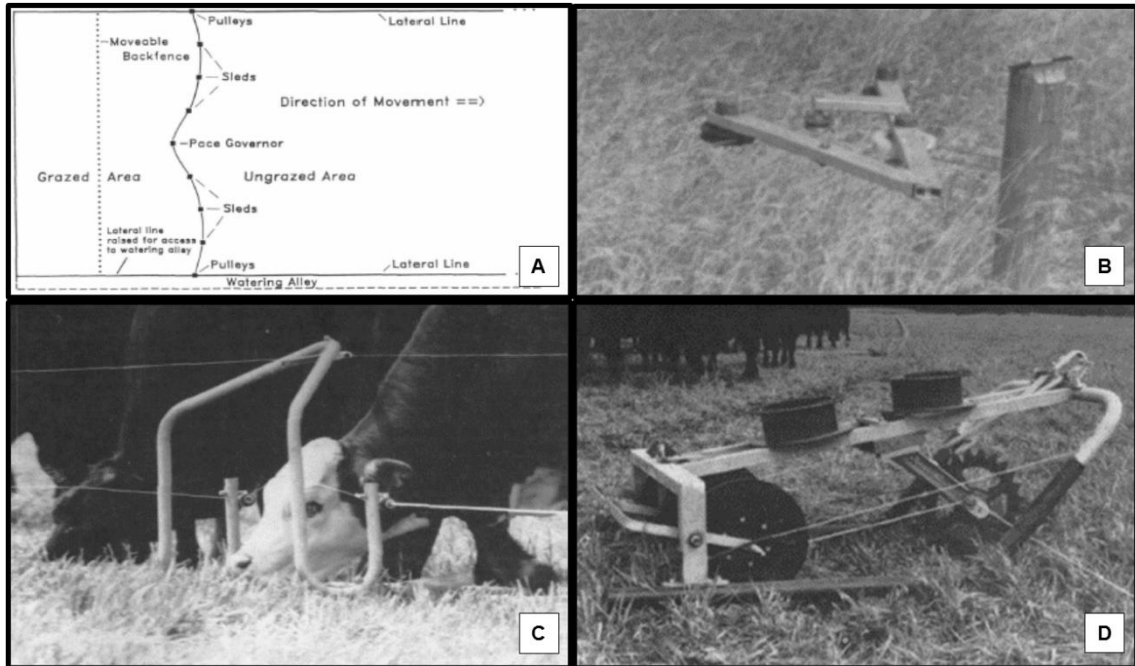
Os primeiros registros de automação desse processo, com uso de tração animal para movimentação das cercas dentro de piquetes, similar ao pastejo em faixas, são do início da década de 1990 (Volesky, 1990). Contudo, a primeira patente encontrada é de meados do século XX. Nela, Miler et al. (1956) propõem uma estrutura metálica que delimita a área de um piquete, com rodados de madeira ou borracha por toda sua dimensão. O formato retangular ou quadrado dessa estrutura se encaixa de modo a ser arrastado por trator sem

deformações na área interna do piquete. Não existem fios elétricos ou farpados para controle dos animais, apenas grades metálicas por toda a extensão do piquete móvel.

Uma variação desta ideia pode ser observada em piquetes móveis para animais menores, como em criação de galinhas em aviários móveis (Oliveira et al., 2018; Naves et al., 2017; Veloso, 2010) movidos por uma fonte de potência externa, como trator ou quadriciclo. Esta estratégia não tem sido explorada para animais maiores, como cabras, gado de corte e leite.

Volesky (1990) propôs e avaliou uma estratégia de manejo que ficou conhecido como “pastejo frontal”, baseando-se em uma patente de Marseillán (1976). O sistema (Figura 1) é baseado estritamente na demanda de alimento pelos animais, onde uma cerca móvel disponibiliza pastagem nova ao gado de maneira gradual. Os animais realizam a movimentação da cerca pelo processo de pastejo, sempre pastejando algo à sua frente, imediatamente após “empurrar” a cerca, por isso denominado pastejo frontal (Figura 1A).

O sistema consiste em cercas laterais fixas e uma cerca móvel transversal. Estruturas metálicas tipo trenó sustentam os fios e se movem sobre a pastagem ao serem empurradas pelo gado em pastejo (Figura 1C). Uma estrutura metálica mais robusta, também em formato de trenó é posicionada ao centro da cerca móvel para manter o tensionamento mínimo nos fios (Figura 1D). Essa estrutura pode ser tracionada por um trator para adequar a linearidade e realizar a movimentação da cerca, quando necessário, além de possibilitar a regulação da tensão nos fios da cerca, uma vez que o gado poderia pastejar de maneira não linear, empurrando apenas uma parte da cerca. Um arranjo de polias mantém a cerca transversal móvel ligada às cercas laterais fixas (Figura 1A).



**Figura 1.** Sistema de pastejo frontal proposto por Volesky (1990) A) Esquema de funcionamento para o sistema de pastejo frontal B) Equipamento de junção entre as cercas fixas laterais e a cerca móvel. Mourão de cerca com estrutura que proporciona a passagem do equipamento; C) Animal pastejando e forçando a movimentação de uma das estruturas metálicas de sustentação tipo trenó; D) Estrutura metálica reguladora de tensão dos fios, localizada ao centro da cerca móvel.

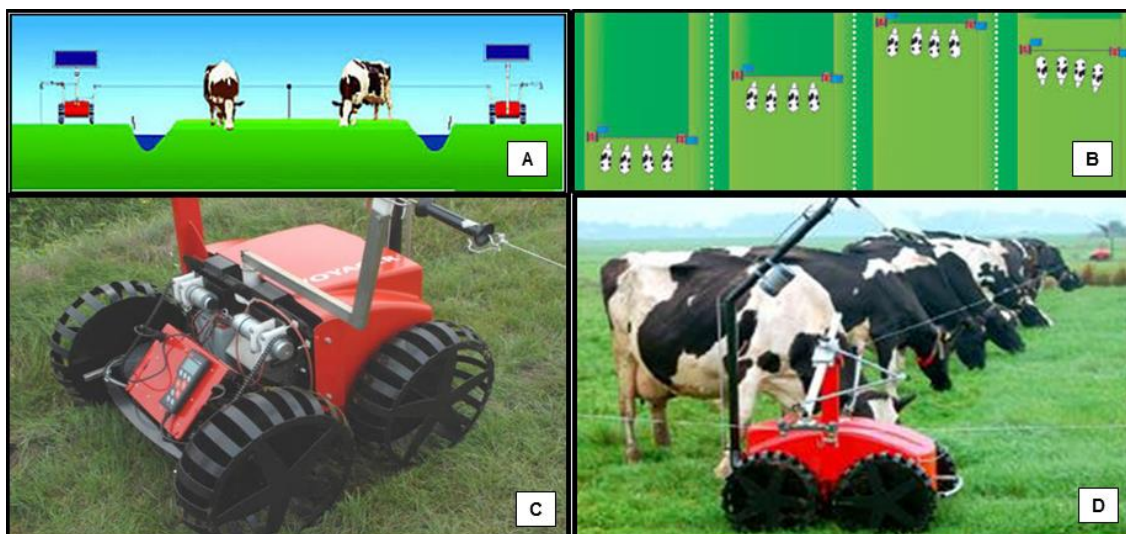
Seu uso não foi disseminado, e dentre as razões pode se considerar a dificuldade de adoção de novas tecnologias por parte de produtores de gado (Dias Filho, 2014), prováveis dificuldades no seu funcionamento efetivo e praticidade em fazendas comerciais. Volesky (1994) indica que o sistema não apresentou resultados satisfatórios em relação ao ganho de peso por área, como esperado, uma vez que o gado perderia menos pastagens por pisoteio e consumiria mais devido a seu aspecto competitivo. No entanto, isso não foi observado, provavelmente devido a uma desfolha muito leniente pelos animais, encurtando o ciclo da forrageira, que perde valor nutricional por características estruturais da população de plantas em subpastejo (Peterson, 1961; Volesky, 1994).

Sbrissia e Silva (2001) destacam o manejo de pastejo como sendo apenas uma das características a serem levadas em conta no sistema de produção animal a pasto, uma vez que o mesmo é influenciado por diversos outros fatores que interagem entre si, onde mudanças em quaisquer fatores do sistema individualmente podem não demonstrar ganhos significativos no resultado final. Com isso, pode se entender que para a realidade dos estudos acerca de pastejo frontal no início da década de 1990, a disponibilidade de pastagens de maneira irrestrita pelos animais não era vantajosa. É similar a um pastejo contínuo com alta oferta de forragem, o que favorece o ganho de peso por animal, mas desfavorece o ganho de peso por área, entendendo então a necessidade de um controle sobre a oferta de forragem na demanda animal (Silva & Pedreira, 1996).



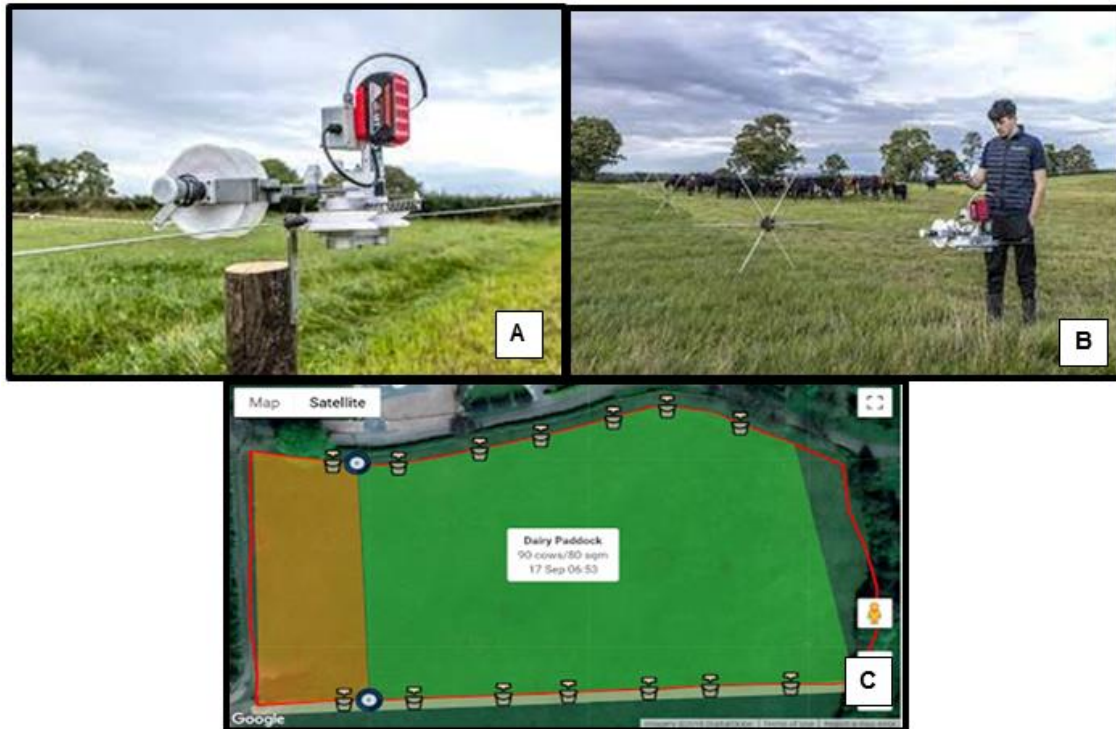
Com os avanços em estudos sobre pastejo rotacionado, juntamente com os avanços em automação de sistemas, em 2007 a empresa Lely propôs um equipamento automatizado para o manejo de pastejo (Figura 2), com maior controle sobre a oferta de forragem ao rebanho e com menos demanda de mão de obra quando comparado aos sistemas de pastejo rotacionado (Lely, 2007). Esta automação seria realizada por dois robôs capazes de movimentar cercas elétricas em um sistema similar ao pastejo em faixas (Figura 2D), onde a área do piquete é subdividida em áreas menores. Neste caso, os robôs movimentam a cerca de maneira linear, disponibilizando áreas com pastagens mais novas aos animais (Fone, 2007).

O controle do consumo animal seria baseado na programação prévia do deslocamento da cerca pela área de pastagem, com intervalos de tempo e distância de deslocamento definidas a partir dos dados de área disponível por dia. Seu acionamento é elétrico, alimentado por painéis solares e baterias, com tensão de 12v e corrente 110 Ah (Figura 2C). Os fios são mantidos esticados por meio de um sistema motorizado de rolo em um dos robôs e a comunicação entre os robôs é realizada via bluetooth. Ao que se pode entender sobre o equipamento, a disponibilidade de água aos animais seria realizada através de canais disponíveis ou escavados nas faixas em que o gado pasteja (Figura 2A). O custo de aquisição do equipamento em 2007 era de € 35.000,00 e sua adoção não avançou, sendo logo descontinuado. Dentre os motivos pode-se analisar seu baixo benefício/custo se comparado a um sistema de pastejo em faixas de operação manual ou até mesmo a um pastejo rotacionado convencional, além das dificuldades de uso em áreas declivosas ou com deformidades entre as faixas.



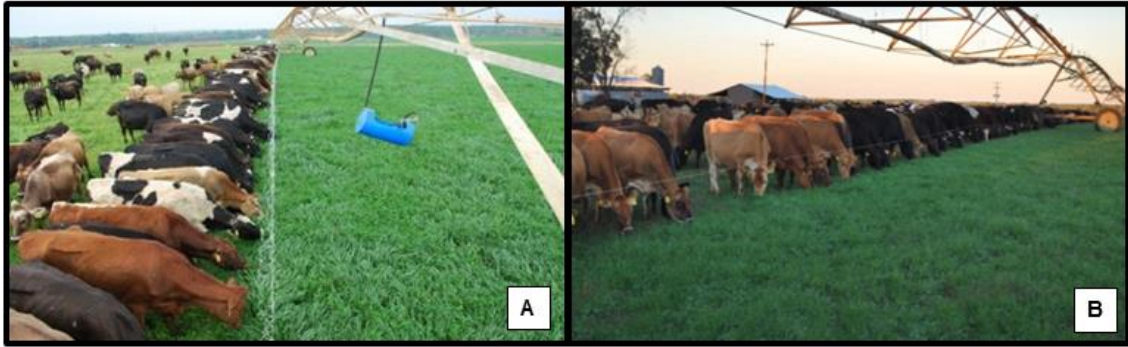
**Figura 2.** Robô para movimentação das faixas de pastejo de maneira automática proposto pela empresa Lely (2007). A) Esquemática dos córregos utilizados como bebedouro; B) Esquema do processo de pastejo proposto com o uso do equipamento Lely Voyage); C) Sistema de tração e display de programação do robo Lely Voyager; D) Vista lateral do sistema em funcionamento.

Em 2018, dois estudantes neozelandeses da Universidade de Dublin (UCD), na Irlanda, desenvolveram um equipamento acoplado a cerca elétrica, utilizando-a como guia, também com o mesmo princípio de manejo do pastejo em faixas (Figura 3). O equipamento foi desenvolvido a partir do manejo utilizado nas propriedades da região de Delvin, na Nova Zelândia, e ainda se encontra em processo de desenvolvimento, como produto principal da startup “Freshgraze”. O sistema, similar ao proposto pela empresa Lely (Lely, 2007), é acoplado aos fios das cercas laterais do piquete, utilizando-as como guia (Figura 3A). Um conjunto de três polias pressiona o fio elétrico e se desloca sobre ele. Um sistema de rolo motorizado é responsável por manter o fio transversal tensionado e sustentar os equipamentos na posição horizontal. O sistema pode ser manejado remotamente a partir de um aplicativo de celular (Figura 3C), o qual é comercializado juntamente com o equipamento (Freshgraze, 2019). É inspirado nos sistemas leiteiros intensivos com uso de pastejo em faixa de operação manual, bastante presente na região em que foi desenvolvido. Os únicos testes conhecidos são os divulgados pela empresa em seu site oficial e redes sociais.



**Figura 3.** Robô para movimentação das faixas de pastejo de maneira automática proposto pela empresa Freshgraze (2019). *A)* Equipamento acoplado a cerca lateral e fixação usada nos mourões permitindo o caminhamento; *B)* Imagem promocional do equipamento, mostrando uma visão lateral de seu funcionamento e o controle remoto por meio de smartphone; *C)* Tela de visualização do posicionamento da cerca móvel do software desenvolvido pela empresa.

Em áreas maiores e com o mesmo princípio de funcionamento, mas sem ter sido identificados estudos a respeito, alguns produtores utilizam pivô central de irrigação como suporte para cerca móvel (Figura 4), de modo a fixar fios elétricos no comprimento do pivô (Scot, 2014). Após a rega, o pivô retorna ao piquete em que o gado se encontra, realizando uma movimentação gradual e disponibilizando a forragem aos animais. Entre as torres de sustentação do pivô é posicionado um fio eletrificado, o qual impede a passagem do gado. O fio é suspenso durante a irrigação da área total e na passagem sobre as cercas que delimitam os piquetes. Não são encontrados estudos relacionados aos custos e eficiência desse sistema.

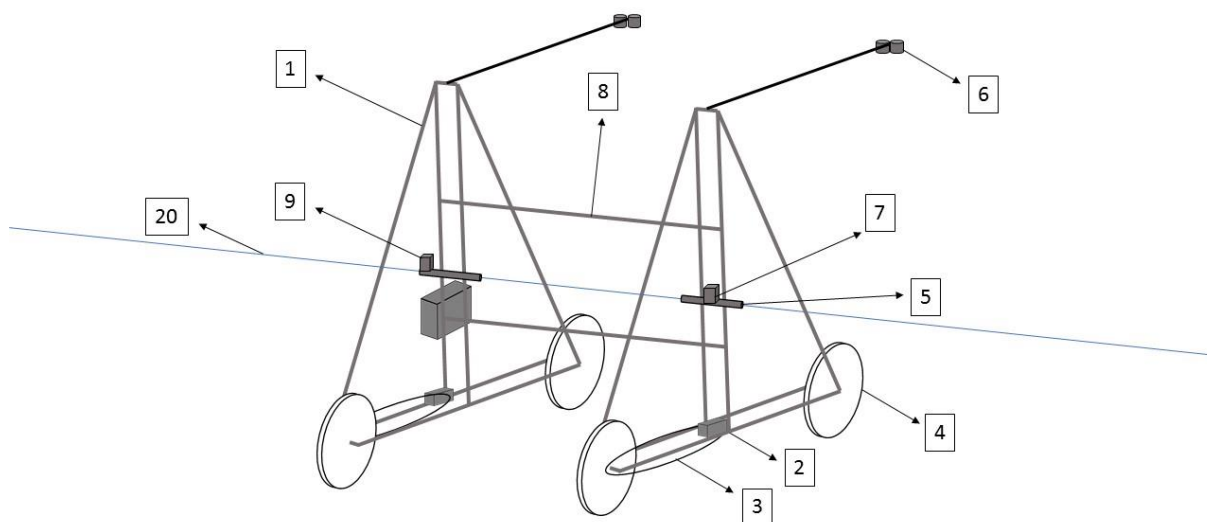


**Figura 4.** Sistema de pastejo em faixas baseado na movimentação de pivô central de irrigação (Poncio, 2011). A) Vista lateral de um pivô de irrigação contendo um fio elétrico acoplado e o gado pastejando em seu limite; B) Vista frontal de um pivô de irrigação contendo um fio elétrico acoplado e o gado pastejando em seu limite.

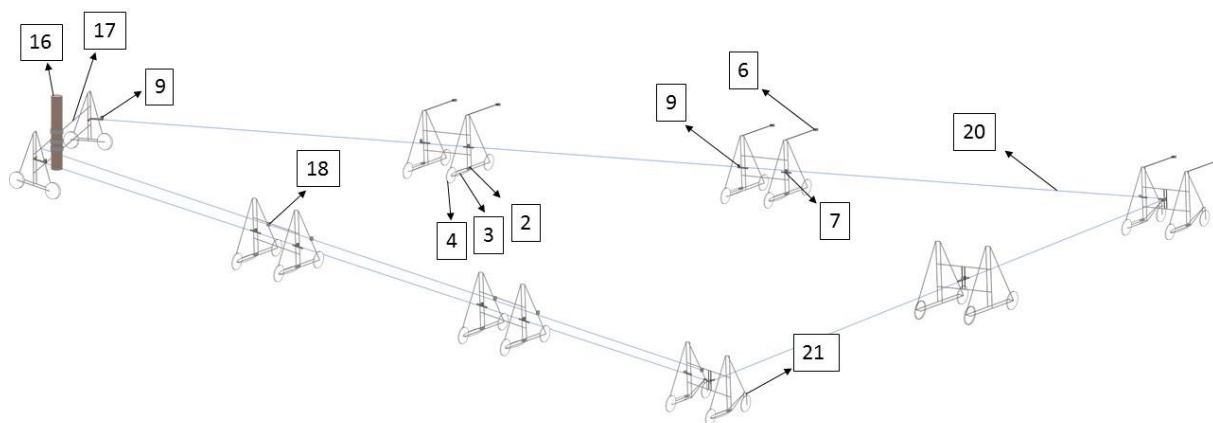
#### D - Sumário

Nenhum dos equipamentos apresentados foi proposto ou testado para forrageiras tropicais. Sistemas de escalas maiores e pastagens de porte alto ocasionariam grande elevação dos custos ou inviabilização do deslocamento. Com isso, a proposta descrita neste documento é referente a um equipamento capaz de realizar a movimentação de uma cerca elétrica em sistemas pecuários baseados em forrageiras tropicais. O sistema proposto apresenta vantagens econômicas ao aumento linear das cercas, por não necessitar de uma estrutura fixa em toda sua dimensão. Junto a isso, também é proposto o sistema de manejo no qual o deslocamento se baseará, o qual permite que quaisquer outros equipamentos similares que realizem a movimentação de cercas poderão fazer uso deste sistema de manejo.

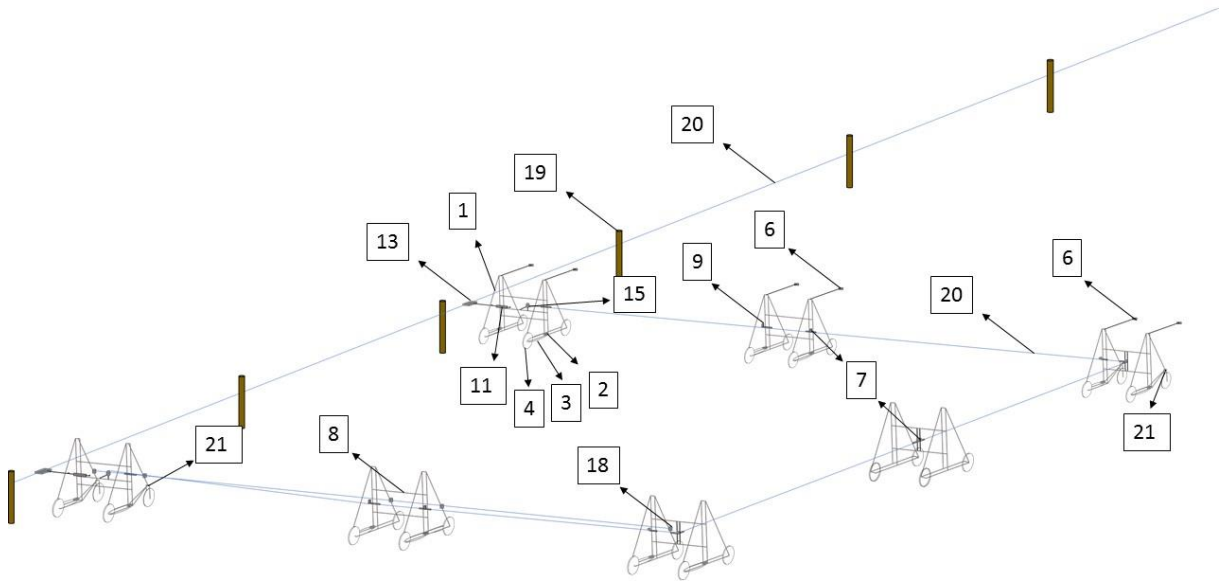
## E - Breve descrição das figuras



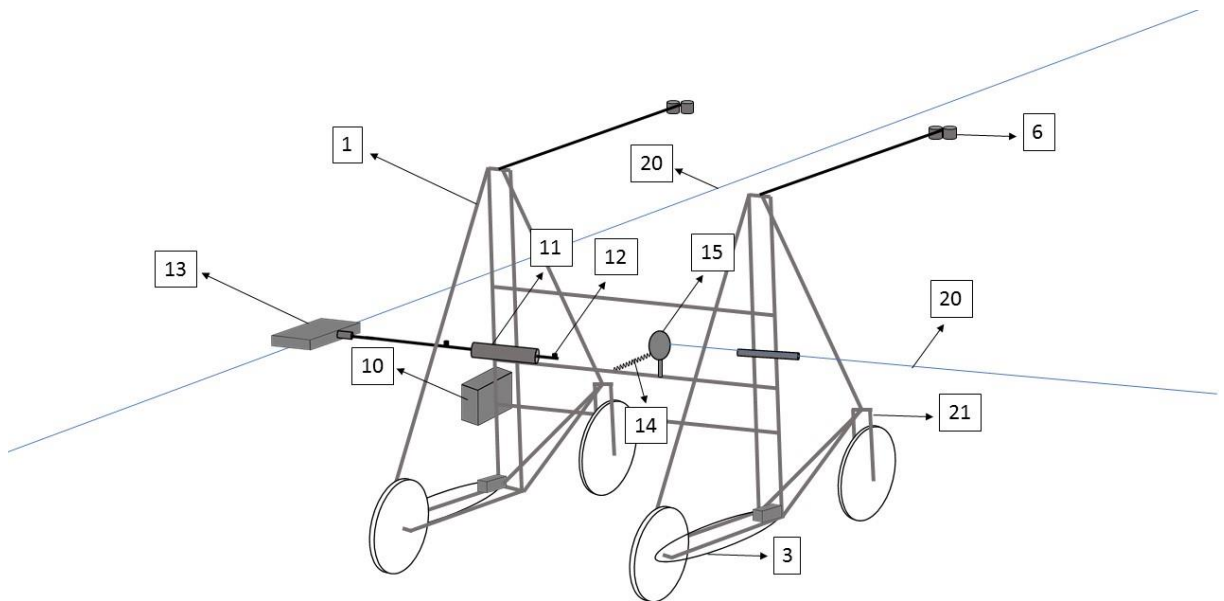
**Figura 1.** Módulo principal de movimentação da cerca. Ilustração de um fio elétrico ao centro e sensores acoplados.



**Figura 2.** Esquematização de sistema circular de cerca móvel formado a partir do conjunto de módulos interligados por um fio eletrificado e um centro fixo.



**Figura 3.** Esquemática de sistema linear de deslocamento formado a partir do conjunto de módulos interligados por um fio eletrificado e uma ou duas cercas laterais fixas.



**Figura 4.** Primeiro módulo de junção entre a estrutura fixa lateral e a cerca móvel perpendicular em sistema de deslocamento linear.

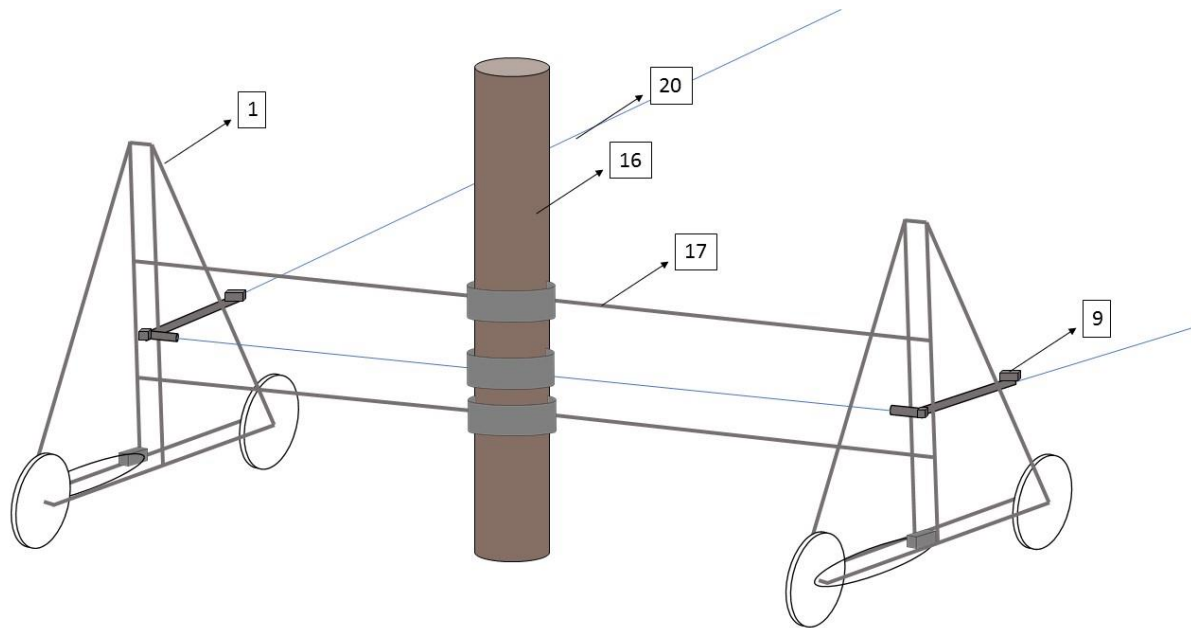


Figura 5. Centro fixo do sistema de deslocamento circular.

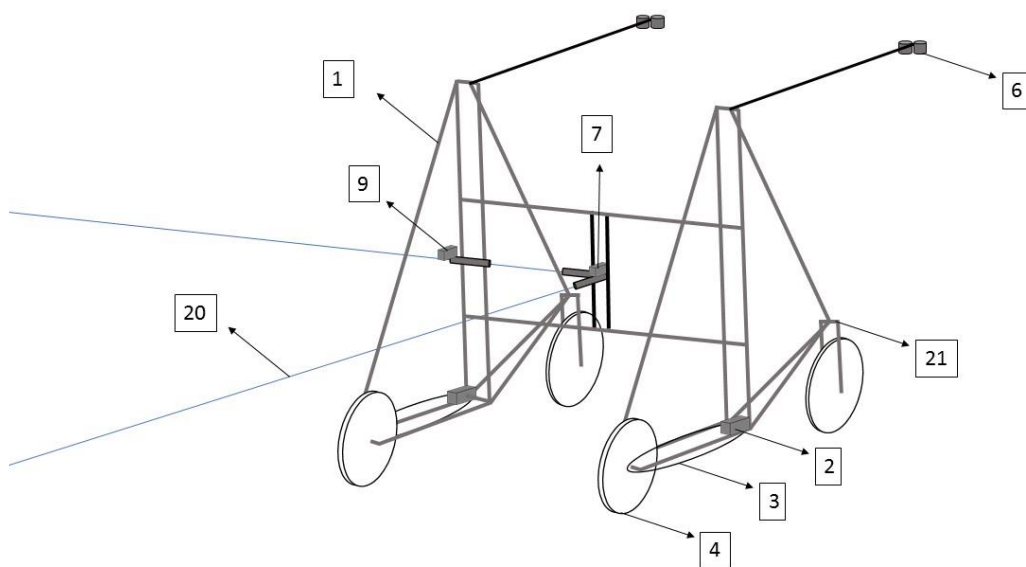


Figura 6. Módulo de vértice frontal em sistemas circulares e lineares com apenas uma cerca fixa.

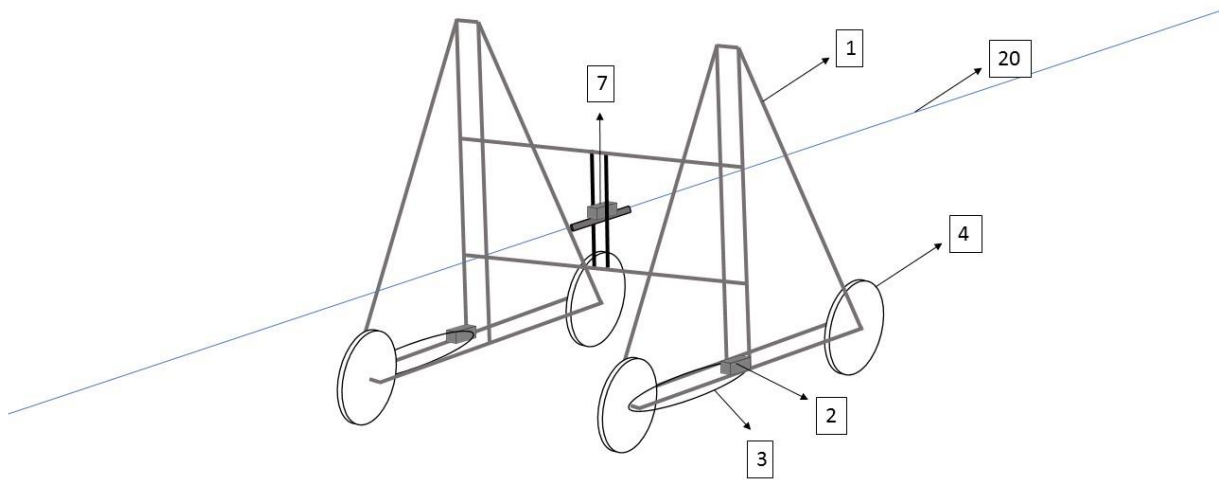


Figura 7. Módulo acoplado a extremidade do conjunto de cerca móvel.

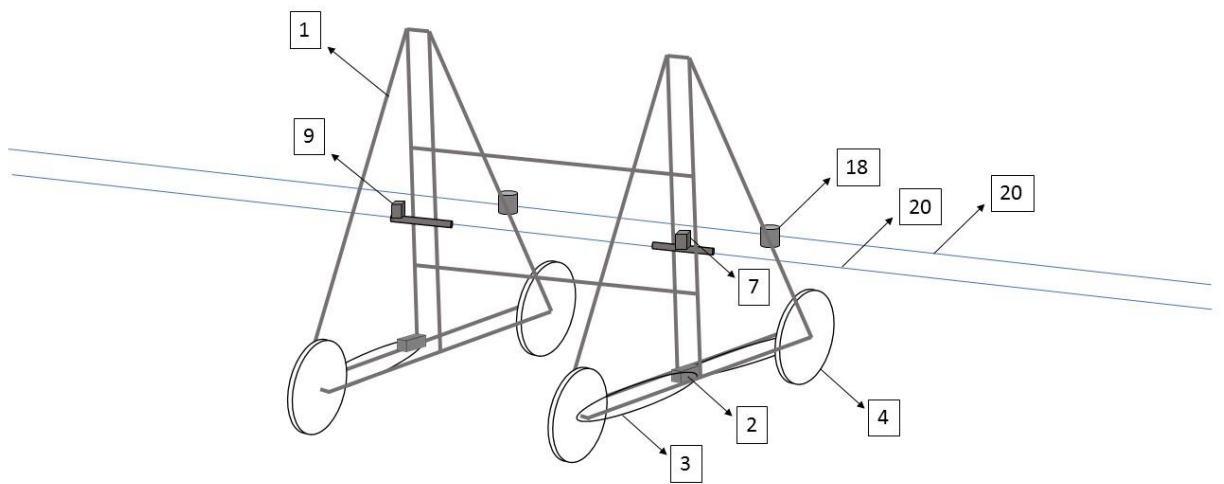


Figura 8. Módulo central da parte traseira dos conjuntos de cerca móvel.



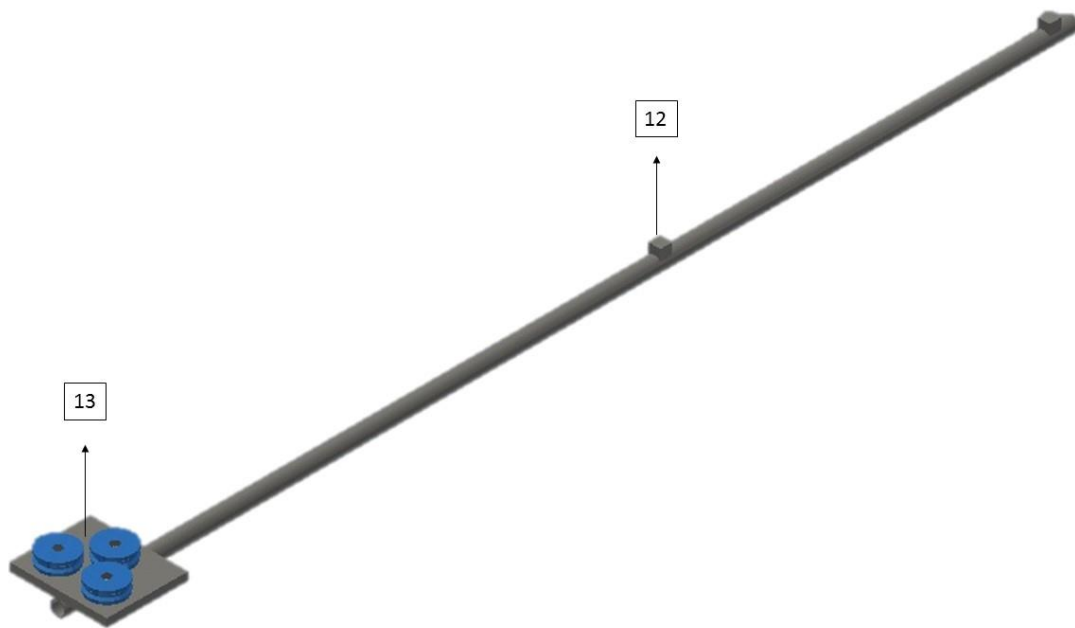


Figura 9. Conector entre a cerca lateral fixa e o primeiro módulo do conjunto de cerca móvel em sistema de deslocamento linear.

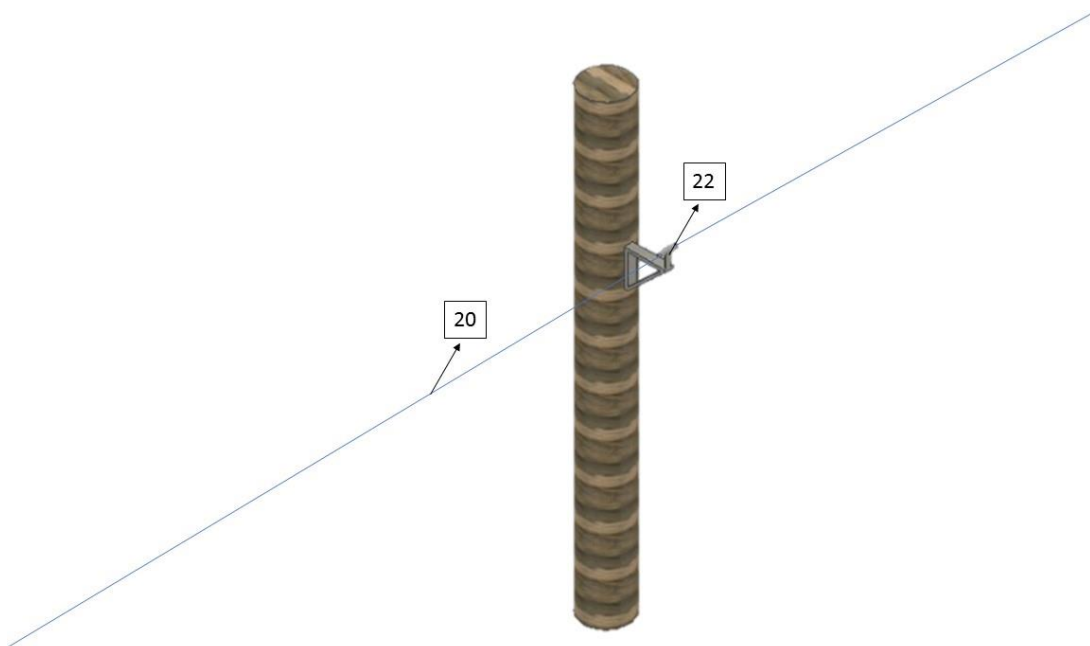


Figura 10. Suporte para o fio eletrificado em sistema de caminhamento linear.

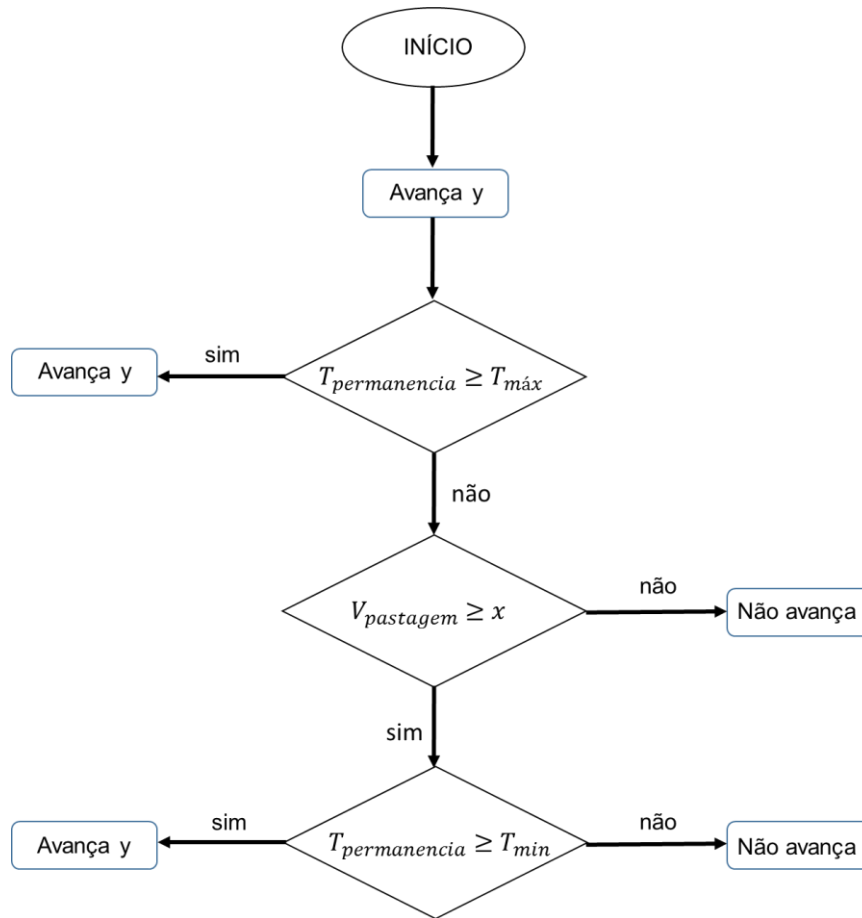


Figura 11. Fluxograma de processo de movimentação automática de cercas móveis baseada em variáveis das pastagens.

## F - Descrição detalhada da invenção

### Equipamento mecânico

A Figura 1 apresenta o módulo principal de movimentação, o qual corresponde à estrutura metálica **1** com sistemas de tração **2, 3** independentes entre si. Essas estruturas serão unidas por meio de fios eletrificados **20**, os quais são responsáveis por delimitar a área em que os animais devem permanecer.

A função das estruturas metálicas **1** é de sustentar os fios **20** e mantê-los tensionados. Cada estrutura é composta por um conjunto de quatro rodas **4** e dois motores elétricos **2** com chave de reversão, possibilitando rotação em dois sentidos. As rodas são dispostas em dois conjuntos de duas rodas, uma a frente da outra, paralelos entre si, e cada motor **2** é ligado a um desses conjuntos por meio de correntes **3**, fazendo com que a estrutura possa se movimentar linearmente. Se houver necessidade de movimentação circular, para realização de curvas, desvio de obstáculos e alinhamento automático dos fios, a estrutura deverá conter tração apenas nas rodas traseiras, também com motores independentes **2**, e substituir as rodas dianteiras por rodízios giratórios **21**.

Cada conjunto de duas rodas é interligado por uma estrutura metálica triangular **1**, de altura 1,2m em relação ao solo, e duas dessas estruturas são interligadas paralelamente por meio de duas hastes metálicas **8** para formação de um módulo. No centro do triângulo existe um tubo emborrachado para apoio dos fios eletrificados **5**, relativos ao número de fios escolhido e suas correspondentes alturas. O conjunto desses módulos forma a cerca móvel, que é responsável por delimitar uma área aos animais. Para realizar essa movimentação o conjunto dos módulos deve usar como guia cercas laterais fixas **19** para o caso de um sistema contínuo, como apresentado na Figura 2; ou um centro fixo **16** em que o centro de um módulo é fixado **17**, para o caso de um sistema circular (Figura 3), formando um piquete em formato triangular que circunscreve um ponto fixo.

A transmissão da energia para os fios eletrificados se dá da cerca lateral fixa **19**, ou ponto central fixo **16**, para os fios móveis da cerca transversal através de contato entre suas extremidades. Para o sistema com cercas laterais fixas (Figura 2) a transmissão é realizada por um conjunto de três polias metálicas, ligadas entre si por uma estrutura metálica **13** que é acoplada ao módulo da cerca móvel por meio de um sistema de tubos **11** e travas **12**, que permite a movimentação lateral da estrutura, mas não sua movimentação vertical. o fio eletrificado **20** é fixado a cerca lateral por meio da estrutura **22** (Figura 10), permitindo a passagem do conjunto de polias **13** por entre os mourões. Nos sistemas circulares essa transmissão de energia é realizada no ponto fixo central **16** (Figura 5) onde um anel metálico é eletrificado e realiza o contato com os fios da cerca.

A alimentação de energia para os sensores e atuadores presentes nos módulos será realizada por fios elétricos. A fonte de alimentação será externa ou baseada em placas solares e baterias localizadas em algum ponto na cerca lateral fixa ou centro fixo. A manutenção da força de tração nos fios é necessária caso a distância entre as cercas laterais seja variada ao longo de sua extensão. Em sistemas circulares essa distância não varia, não necessitando de mecanismo para realizar a tração. Contudo, caso seja necessária a correção da tração nos fios, um mecanismo de rolo esticador **15** será acoplado à extremidade da cerca. O mesmo é composto por um motor, um rolo de polietileno com extremidades compatíveis à engrenagem do motor, uma estrutura metálica, para fixação do conjunto no módulo da cerca móvel e uma célula de carga ligada a um interruptor para acionamento do motor.

O sistema de rolo será fixo no módulo da cerca móvel a partir de uma dobradiça, a qual permite o movimento horizontal do conjunto de rolo. Uma mola **14** de metal com um sensor de carga é fixada de maneira que o conjunto se mantenha na posição vertical, realizando pressão sobre a chapa proporcional à tensão dos fios. Desta maneira a tensão

desejada pode ser inserida na central de comando e a mesma aciona o interruptor do rolo para estiramento e afrouxamento do fio com finalidade da manutenção da tensão sobre a célula de carga.

Para que os módulos se mantenham à mesma distância durante a movimentação da cerca será acoplado um sensor óptico reflexivo **7**, responsável por acionar os motores independentemente, de modo a se manter em um local demarcado por duas fitas pretas e uma branca intercalada. Nos casos de rodas fixas o sensor apenas indica à central de comando que ocorreu o desalinhamento. Já nos módulos de extremidades, compostos com rodízios giratórios nos rodados dianteiros e tração traseira, o sensor ativa o motor proporcional ao deslocamento linear da fita branca, caso o movimento resulte no deslocamento da fita para a esquerda o motor direito é acionado no sentido horário e o esquerdo no sentido anti-horário, e vice-versa. Quando o sensor se mantém sob a fita branca, ambos podem ser acionados para avanço do módulo.

O contato do fio elétrico com o pasto acarreta perda de carga do sistema elétrico. Com a movimentação da cerca sobre uma pastagem cespitosa (de crescimento ereto) esse contato será maior, uma vez que os fios estariam em contato direto e realizando pressão sobre a estrutura vertical da população de plantas, à medida que se movimenta. Desta forma, é fixado um fio não eletrificado na parte inferior da cerca transversal, onde ocorre o contato com o dossel forrageiro, visando a menor perda de carga.

### Eletrônica embarcada

Para realização do deslocamento automático é necessária uma central de comando **10**, localizada no primeiro módulo, a qual deve contar com um microprocessador, responsável por receber os dados dos sensores; acionar os rodados; identificar falhas no funcionamento, acusar as falhas por meio de sinais sonoros e luminosos e enviar as falhas a um dispositivo conectado à nuvem, quando possível. Esse sistema também deve permitir salvar todos os dados em um data logger. Os dados deverão ser salvos em períodos de tempo pré-determinados, contendo colunas referentes à hora; dia; posição dos módulos; variável da pastagem medida por cada sensor (quando o sistema contar com esses sensores); tipos de falhas, sendo elas falhas nos motores, no alinhamento, nos sensores, nos atuadores e na tensão da cerca eletrificada.

O posicionamento será dado por meio de um receptor GNSS acoplado a central de processamento. A central de processamento deve contar também com um temporizador, o qual informa os limites de tempo ao microprocessador, realizando ou não o acionamento dos rodados.

Serão inseridos os valores de metros lineares de deslocamento no ciclo de pastejo e deslocamento diário a serem percorridos, baseados nos cálculos apresentados no tópico “Dimensionamento da área disponível por metro linear de deslocamento”. A central de processamento então converte esses valores em tempo máximo e mínimo de permanência na faixa e tempo de acionamento dos rodados para cada faixa de deslocamento. As faixas de deslocamento serão determinadas por quantas vezes serão disponibilizadas novas áreas ao rebanho, também a critério do planejamento do sistema.

Visando evitar os impulsos elétricos causados pelo deslocamento da cerca aos animais que estiverem nas extremidades traseiras da faixa, será adicionado um fio não eletrificado entre os módulos, na parte interior da faixa pastejada. Este fio estará mais próximo dos animais que os fios eletrificados e será ligado a interruptores **18**, os quais interrompem o funcionamento dos motores nos casos em que algum animal esteja impedindo o deslocamento da cerca traseira.

Nos casos de manejo baseado em variável da pastagem, os sensores **6** usados devem ser acoplados a parte exterior da cerca dianteira (Figura 1), realizando as medidas relativas à variável que corresponda a resposta da planta forrageira observada. Por exemplo, caso a variável utilizada seja a altura do dossel, os sensores **6** devem quantificar os valores de altura do dossel imediatamente à frente da cerca dianteira, enviando esses dados para a central de processamento, que usa como base um parâmetro inserido nela, neste caso altura de entrada, para informar se o deslocamento deve ou não ser iniciado, com base no fluxograma apresentado na Figura 11.

Para manejo baseado no deslocamento de período e área fixos esses sensores não serão necessários, realizando o deslocamento apenas baseado nos dados inseridos na central de processamento. Neste caso o deslocamento será comandado apenas pelo temporizador.

O funcionamento do primeiro módulo **1**, presente na extremidade das cercas, resulta no desalinhamento entre os módulos, este desalinhamento causa o acionamento de sensores de fim de curso **9** ligados ao próximo módulo, esses sensores realizam o acionamento dos motores **2** do rodado **4** deste módulo, que por consequência resulta no desalinhamento para o próximo módulo, e assim até que o alinhamento do conjunto dos módulos esteja concluído.

### Dimensionamento da área disponível nos sistemas baseados em cercas móveis

Entende-se que os cálculos de dimensionamento de pastejo rotacionado possam ser adequados a sistemas de cercas móveis. Com isso o modelo proposto relaciona variáveis já conhecidas e obtidas com base em revisão bibliográfica e dados edafoclimáticos locais, resultando na disponibilidade de forragem a ser fornecida durante um ciclo da forrageira em questão. Tomando como base a orçamentação forrageira para um lote de animais é possível quantificar qual a demanda de forragem, e com isso a área necessária para suprir essa demanda durante o período desejado, calculando a massa de forragem disponível para cada kg de peso vivo animal. Essa área é uma relação direta entre a distância de deslocamento da cerca, consumo animal e produção do pasto.

Em sistemas de pastejo rotativo convencionais esse cálculo é utilizado para estimar a área de cada piquete baseando-se na área disponível ou no lote de animais desejado. Em sistemas que possibilitem a alteração da área dos piquetes a variável área do piquete não necessariamente é fixa, e pode responder ao lote de animais, a época do ano e ao manejo das plantas forrageiras da área. Com isso a área disponibilizada aos animais pode ser quantificada e utilizada como variável para estabelecer o manejo do lote de animais de modo a otimizar a demanda e a oferta de forragem durante o ano. Desta forma, o dimensionamento da área total deve levar em conta a largura da faixa, no caso de módulos retangulares, ou o perímetro circular percorrido, no caso de módulos circulares. Como o resultado desejado se dá em hectares, a equação que resulta em metros lineares de deslocamento correspondentes à uma área definida seria função direta da largura, em sistemas lineares, e do raio, em sistemas circulares.

Assim é possível calcular a área total necessária para o sistema desejado, onde a equação pode ser usada como uma função constante ou variar conforme as características do local, como sazonalidade, por exemplo. A movimentação da cerca pode ser programada com os dados obtidos para área total da faixa pela divisão entre os metros totais a serem percorridos em um ciclo e o número de dias desse ciclo, resultando nos metros lineares a serem percorridos pela faixa por dia, seja ele constante ou variável.

### Manejo de pastejo baseado em respostas das plantas forrageiras

A partir do que já foi apresentado, o manejo de pastejo pode ser realizado automaticamente pelas cercas móveis da mesma maneira como é realizado de forma manual, assumindo assim períodos fixos de pastejo e deslocamento pré-definido na orçamentação forrageira. Para deslocamento em períodos fixos é necessário um sistema de

temporizador e um microprocessador para acionamento dos rodados a partir dos sinais recebidos. Esses sinais podem ser apenas do temporizador, ou do conjunto entre o temporizador e sensores de presença, que detectam a presença dos animais nas proximidades da cerca traseira, evitando estresse pelo impulso elétrico relativo ao deslocamento dos fios da cerca sobre os animais próximos. Estas especificidades estão descritas de maneira mais ampla no tópico referente à mecânica proposta para um sistema de cercas móveis.

Outra possibilidade é o deslocamento baseado em alguma resposta da planta forrageira, onde a mudança das faixas é comandada principalmente pelo desenvolvimento dos pastos, apresentado na Figura 11. Neste caso, são necessários dados referentes a essa resposta, coletados a partir de sensores acoplados a cercas, equipamentos que realizam monitoramento constante das pastagens, dados de sensoriamento remoto ou até mesmo dados coletados pelos próprios produtores, usando as técnicas convencionais. Fazendo uso destes dados, somados a orçamentação forrageira para cercas móveis, descrita no tópico anterior, é possível realizar o manejo automático de cercas móveis, o qual pode ser utilizado em qualquer sistema que utilize esse tipo de tecnologia.

Para isso, é necessário calcular a área utilizada pelo lote de animais na etapa de orçamentação forrageira, levando em consideração todo o sistema de produção. Baseando-se nesta área e nos períodos estimados de ciclo de pastejo é possível quantificar os tempos máximos e mínimos de permanência nas faixas, de área conhecida. Com isso também é possível estimar a área máxima de deslocamento diário, correspondente a oferta de forragem para aquele lote de animais. Os demais processos são comandados pela variável da pastagem, representada pela massa de forragem, altura do dossel forrageiro, interceptação luminosa ou qualquer outra variável de influência no manejo. A figura 11 apresenta o fluxograma necessário para movimentação automática de cercas móveis baseadas em variáveis biométricas das pastagens.

Onde as variáveis de tempo ( $T_{max}$  e  $T_{min}$ ) são os tempos de permanência no piquete móvel, calculados a partir da demanda de forragem do lote de animais; a variável "y" é referente à distância a ser percorrida pelas cercas, a qual é obtida através de sua relação com área disponibilizada. A variável "x" é a resposta da planta forrageira a ser levada em conta no manejo escolhido, a qual pode ser obtida das mais variadas formas, mas deve seguir as regras estabelecidas no planejamento para servir como a base para o manejo. Desta forma, os dados referentes à resposta usada no manejo são inseridos na programação do equipamento, junto com os parâmetros pré-estabelecidos no momento do planejamento do sistema.

G – Entidade Tecnológica

**(X) Processo ou Método, (X) Produto, ( ) Sistema, ( ) Uso e/ou ( ) Outro.**