

Índice global de produtividade e qualidade das pastagens: Avaliação de sensores na perspetiva da Agricultura de Precisão

Global index of pasture productivity and quality: Sensors evaluation from a Precision Agriculture perspective

João Serrano^{1,*} e Francisco J. Moral²

¹ MED—Mediterranean Institute for Agriculture, Environment and Development and CHANGE—Global Change and Sustainability Institute, Universidade de Évora, Portugal

² Departamento de Expresión Gráfica, Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Extremadura, Avenida de Elvas s/n, 06006 Badajoz, Spain

(*E-mail: jms@uevora.pt)

<https://doi.org/10.19084/rca.41431>

Recebido/received: 2025.04.23

Aceite/accepted: 2025.06.16

RESUMO

Este estudo avaliou dois sensores próximos complementares, um medidor de prato ascendente (“Rising Plate Meter”, RPM) e um sensor ótico ativo (“Active Optical Sensor”, AOS) para obter a disponibilidade de proteína bruta (PB) da pastagem em kg ha⁻¹. Este indicador inclui a produtividade, aferida pela altura comprimida (H_{RPM}), e a qualidade, aferida pelo índice de vegetação de diferença normalizada (“Normalized Difference Vegetation Index”, NDVI), medida pelo AOS. O trabalho experimental foi desenvolvido numa pastagem de sequeiro biodiversa e consistiu em medições dos sensores, seguidas da recolha de amostras de pastagem realizadas durante o ciclo vegetativo de 2023/2024. Estas amostras foram submetidas a análises laboratoriais para determinar a matéria seca (MS) e a PB da pastagem. As medições dos sensores e os valores das determinações laboratoriais foram usados para desenvolver modelos de estimativa. As melhores correlações entre a PB (kg ha⁻¹) e o índice de produtividade e qualidade da pastagem ($IPQP = H_{RPM} \times NDVI$) foram obtidas nas fases iniciais do ciclo vegetativo da pastagem (Outono: $R^2 = 0,86$; e Inverno: $R^2 = 0,74$). Os resultados deste estudo mostram o interesse em alargar a base de dados a outros tipos de pastagem e o potencial para o desenvolvimento de ferramentas para apoio à monitorização da evolução da pastagem e à tomada de decisões de gestão do pastoreio (encabeçamentos, suplementação ou rotação de animais entre parques).

Palavras-chave: pastagens de sequeiro, proteína bruta, prato compressor ascendente (RPM), sensor ótico ativo (AOS), NDVI

ABSTRACT

This study evaluated two complementary electronic sensors: a rising plate meter (RPM) and an active optical sensor (AOS) to obtain the pasture crude protein (CP) in kg ha⁻¹. This indicator integrates pasture dry matter availability (dry matter (DM) in kg ha⁻¹) measured by RPM, and pasture quality (measured by AOS). The experimental work was carried out on a dryland biodiverse and consisted of sensor measurements, followed by the collection of pasture samples in the vegetative cycle of 2023/2024. These samples were subjected to laboratory reference analysis to determine pasture DM and CP. Sensor measurements (compressed height (H_{RPM}) in the case of RPM, and normalized difference vegetation index (NDVI) in the case of AOS) and the results of reference laboratory analysis were used to develop prediction models. The best correlations between CP (kg ha⁻¹) and pasture productivity and quality index (“PPQI = $H_{RPM} \times NDVI$ ”) were obtained in the initial and intermediate phases of the cycle (autumn: $R^2 = 0.86$; and Winter; $R^2 = 0.74$). The results of this study show not only the importance of extending the database to other pasture types in order to enhance the process of feed supplement determination, but also the potential for the research and development of proximal and remote sensing tools to support pasture monitoring and animal production management (stocking rates, supplementation or rotation of animals between parks).

Keywords: dryland pastures, crude protein, rising plate meter (RPM), active optical sensor (AOS), NDVI

INTRODUÇÃO

Nos sistemas de pecuária extensiva da Península Ibérica, as pastagens são a principal fonte de alimentação dos ruminantes, especialmente dos ovinos e bovinos de carne (Efe Serrano, 2006). A disponibilidade de pastagem, expressa em termos de matéria seca por unidade de área (MS, em kg ha⁻¹), e a qualidade da pastagem, expressa em termos de proteína bruta (PB, em %), são dois parâmetros fundamentais para os decisores nos sistemas de produção animal, nomeadamente nas estratégias de pastoreio em termos de gestão do encabeçamento, suplementação ou rotação de animais entre parques de pastoreio (Chapa *et al.*, 2023).

Medições ou estimativas frequentes e exatas da disponibilidade e da qualidade das pastagens são fundamentais para otimizar as decisões de gestão (Murphy *et al.*, 2021a). Existe um potencial significativo para melhorar a informação através de tecnologias de agricultura de precisão (AP). No entanto, a aplicação de tecnologias às pastagens é um desafio de grande complexidade, especialmente devido à elevada diversidade e variação espacial, acentuada por forte dinâmica temporal (Schellberg *et al.*, 2008).

Existem muitos estudos publicados nos últimos vinte anos sobre a avaliação de tecnologias para estimar e monitorizar a disponibilidade das pastagens (Sanderson *et al.*, 2001; Serrano *et al.*, 2018; Cárdenas *et al.*, 2020; Lawson *et al.*, 2022; Chapa *et al.*, 2023), alguns dos quais utilizam sensores próximos ou de contacto. O medidor de prato ascendente (RPM) é o sensor mais utilizado em vários países, como o Chile e a Nova Zelândia (Cárdenas *et al.*, 2020), a Austrália (Gargiulo *et al.*, 2020; Lawson *et al.*, 2022), ou a Irlanda (O'Donovan *et al.*, 2002; Murphy *et al.*, 2021a). O RPM regista uma medida combinada da altura e da densidade da pastagem, designada por altura comprimida (H_{RPM}), utilizando um disco ligado a um bastão graduado (Murphy *et al.*, 2021a) e, com base nessa medição, estima a MS (Palma-Molina *et al.*, 2023). O fabricante deste equipamento (RPM “Jenquip EC20”), por exemplo, propõe uma equação genérica (anual) (Equação (1)), ajustável à evolução do ciclo vegetativo (variação sazonal) numa base mensal (Gargiulo *et al.*, 2020). Estão disponíveis comercialmente equipamentos com tecnologia sem fios de curto alcance

(“Bluetooth”), a qual permite transferir dados do medidor para o telemóvel. Esta tecnologia simplifica e automatiza a recolha de dados, podendo associar-se a ferramentas de apoio à decisão de gestão baseadas na internet (Palma-Molina *et al.*, 2023).

$$MS = H_{RPM} \times 140 + 500 \quad (1)$$

Onde MS é a produtividade em termos de matéria seca (em kg ha⁻¹) e H_{RPM} é a altura comprimida (em cm) medida pelo RPM.

De acordo com Murphy *et al.* (2021b), os parâmetros importantes para avaliar a qualidade da pastagem em sistemas de pastoreio são a MS, a digestibilidade da matéria seca, a energia metabolizável, a digestibilidade da matéria orgânica, a PB e os hidratos de carbono solúveis em água. Para Lugassi *et al.* (2019), a composição química, o teor de água e a concentração de nutrientes são amplamente utilizados como indicadores do valor nutritivo das pastagens. O teor de PB e de fibra em detergente neutro (NDF) destacam-se entre os parâmetros químicos mais comuns para efeitos de avaliação da qualidade das pastagens (Lugassi *et al.*, 2019; Serrano *et al.*, 2021a). Um elevado teor de PB e um baixo teor de fibra são características de pastagens de elevada qualidade (Lugassi *et al.*, 2019; Fernández-Habas *et al.*, 2021; Serrano *et al.*, 2021a).

Os métodos convencionais de medição para a determinação da qualidade das pastagens requerem o corte de amostras de pastagem e o seu processamento em laboratório, com custos elevados e podendo demorar vários dias a concluir (Murphy *et al.*, 2021a), o que pode limitar a oportunidade de intervir (Fernández-Habas *et al.*, 2021). A necessidade de reduzir o custo e o tempo associado a estas determinações laboratoriais levou ao desenvolvimento de muitos estudos para avaliar tecnologias que permitam a estimativa rápida da qualidade das pastagens. As tecnologias mais comuns baseiam-se na espectroscopia de infravermelhos próximos (NIRS) ou em sensores óticos.

A aplicação da espectroscopia NIR em pastagens teve lugar tanto em determinações convencionais em laboratório, com equipamento de bancada e pré-processamento físico das amostras (Danieli

et al., 2004; Parrini *et al.*, 2019; Serrano *et al.*, 2020, 2021b), como em determinações *in situ* (no campo) e não destrutivas, com espectrómetros NIR portáteis (“Micro-NIR”) (Berzaghi *et al.*, 2021; Feng *et al.*, 2023; Tacoma-Forgal *et al.*, 2024). Este equipamento NIR (de bancada ou portátil) é, no entanto, dispendioso e requer uma análise complexa de dados multivariados e de modelação (quimiometria) (Murphy *et al.*, 2021b), inacessível aos agricultores como meio de apoio à produção animal extensiva (Serrano *et al.*, 2020; 2021b).

O acesso à informação sobre a qualidade das pastagens através de sensores óticos hiperespectrais e multiespectrais tem sido muito desenvolvido na última década através da deteção remota (DR) suportada por plataformas instaladas principalmente em veículos aéreos não tripulados (drones) (Karunaratne *et al.*, 2020) e satélites (Punalekar *et al.*, 2021). Estes avanços baseados em DR podem oferecer a cartografia das pastagens de alta a moderada resolução e previsão altamente precisa da qualidade das pastagens, mas apresentam algumas limitações. A frequente ocorrência de nuvens (Lawson *et al.*, 2022) durante o período vegetativo das pastagens de sequeiro na região Mediterrânica (outono, inverno e primavera) e a predominância de sistemas agro-silvo-pastoris, onde as pastagens se desenvolvem sob copas de árvores (Montado de sobreiros e azinheiras, em particular na região do Alentejo, Sul de Portugal), abrem boas perspetivas para sensores próximos ou de contacto, que ultrapassam as dificuldades inerentes à utilização de abordagens de DR (Serrano *et al.*, 2018).

Estão disponíveis tecnologias comerciais de espectros óticos para a medição terrestre da qualidade das pastagens (por exemplo, “GreenSeeker” ou “OptRx”). Estes sensores óticos portáteis são mais acessíveis em termos de custos de aquisição e têm resultados mais fáceis de utilizar do que os sensores NIR portáteis. Os sensores óticos obtêm índices de vegetação através do cálculo do rácio de diferentes espectros de luz (Legg & Bradley, 2020). O NDVI (índice de vegetação por diferença normalizada) é um dos índices mais comuns (Legg & Bradley, 2020; Murphy *et al.*, 2021b; Lawson *et al.*, 2022). O NDVI estima a qualidade da vegetação com base no rácio dos comprimentos de onda da luz vermelha e NIR (Murphy *et al.*, 2021b). O sensor multiespectral “OptRx” (Ag Leader, Ames, IA, EUA), por

exemplo, emite radiação numa frequência modulada e recebe de volta a radiação nos diferentes canais. Com este sensor, é possível obter as seguintes bandas de radiação: (i) Vermelho (670 nm); (ii) Red Edge (728 nm); e (iii) NIR (775 nm). O NDVI pode ser calculado com as bandas Red e NIR, utilizando a Equação (2).

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{RED}}{\text{NIR} + \text{RED}} \quad (2)$$

O NDVI é sensível a alterações na maturação das plantas, fator determinante das alterações na concentração de nutrientes e fortemente correlacionado com a PB das pastagens (correlação positiva) e com o NDF (correlação negativa) (Reddy *et al.*, 2004). O estudo de Serrano *et al.* (2018), efetuado em pastagens no ecossistema do Montado, no Sul de Portugal, mostrou o potencial do sensor “OptRx” com um forte coeficiente de determinação ($R^2 = 0,75$) entre o NDVI e a PB.

A disponibilidade de pastagem é normalmente expressa em termos de kg de MS por unidade de área (MS, em kg ha^{-1}), e a qualidade da pastagem, por exemplo, em termos de teor de PB, é normalmente expressa em percentagem de MS (PB, em % MS). Como já foi referido, estes são dois parâmetros fundamentais para os decisores nos sistemas de produção animal. A disponibilidade e a qualidade das pastagens são parâmetros que apresentam um padrão específico ao longo do ciclo vegetativo das pastagens de sequeiro em condições de clima Mediterrânico, embora com variações interanuais, em função da distribuição da precipitação: (i) a MS tende a aumentar desde as primeiras chuvas (geralmente em setembro/outubro) até ao pico da produção outonal (geralmente em novembro ou início de dezembro); a PB é geralmente máxima nesta fase, quando as plantas são jovens (25-30%, dependendo do tipo de pastagem); (ii) entre meados de dezembro e meados de fevereiro, segue-se um período de relativa dormência vegetativa, que corresponde a um crescimento reduzido das pastagens; a PB tende a diminuir nesta fase; (iii) a partir de março e até meados ou final de maio, o aumento gradual da temperatura do ar, desde que acompanhado de precipitação, conduz a um pico exuberante de produção das pastagens (pico de produção primaveril); nesta fase, a PB apresenta

uma quebra mais notória, podendo atingir 10-12% da MS; iv) quando as temperaturas elevadas são acompanhadas de reduzida ocorrência de precipitação, o que acontece frequentemente entre o final de maio e o início de junho, a pastagem seca abruptamente, perdendo disponibilidade (MS) e, fundamentalmente, qualidade; a PB atinge valores mínimos de cerca de 5-6% da MS. No entanto, este padrão varia de ano para ano, devido às irregularidades climáticas.

É neste cenário complexo de imprevisibilidade que o agricultor tem de gerir a carga biótica (encabeçamento) e a alimentação dos animais, pelo que a disponibilidade de ferramentas que permitam o acesso rápido a informação relevante é fundamental para garantir a sustentabilidade económica e ambiental destes sistemas de produção extensivos. Uma boa compreensão da dinâmica do ciclo de crescimento das pastagens, da acumulação de biomassa e do valor nutricional é essencial para a sua gestão eficiente (Cárdenas *et al.*, 2020).

Com base neste pressuposto, este estudo avaliou dois sensores complementares, o medidor de prato ascendente (RPM) e um sensor ótico ativo (AOS), para obter um indicador global, PB em kg ha⁻¹, que integra simultaneamente duas dimensões essenciais, a disponibilidade da pastagem (relacionada com a altura comprimida medida pelo RPM) e a qualidade da pastagem (relacionada com o NDVI medido pelo sensor ótico).

MATERIAL E MÉTODOS

Campo experimental

As determinações (medições com os sensores e recolha de amostras de pastagem) foram efetuadas durante o período vegetativo de 2023/2024 na parcela “Eco-SPAA” (Figura 1), na Herdade da Mitra (Universidade de Évora; 38°53,10 N; 8°01,10 W). Trata-se de uma pastagem de sequeiro plurianual e biodiversa (mistura de várias espécies botânicas: leguminosas, gramíneas, compostas e outras espécies espontâneas), pastoreada por ovinos e integrada no ecossistema Montado (sob azinheiras), melhorada pela aplicação regular (aproximadamente de 2 em 2 anos desde 2015) de calcário dolomítico. Neste campo, constituído por 4 parques

de pastoreio, foram georreferenciadas 48 áreas de amostragem (12 em cada parque), no âmbito de um estudo, iniciado em 2021, sobre sistemas de pastoreio de ovinos (contínuo versus diferido). As áreas de amostragem foram definidas por um especialista em botânica, de acordo com a composição florística da pastagem na estação de crescimento anterior (Carreira *et al.*, 2022).

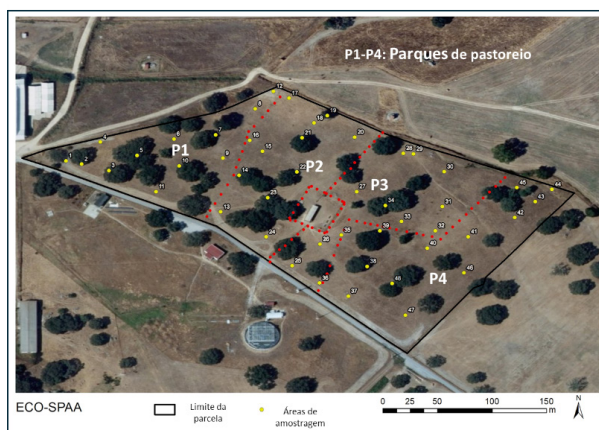


Figura 1 - Parcela experimental “Eco-SPAA” e respetivas áreas de amostragem, na Herdade da Mitra.

A composição florística é representativa das pastagens de sequeiro típicas da região, onde predominam as espécies *Erodium mochatum*, *Diptotaxis catholica*, *Trifolium repens* e outras espécies espontâneas nativas ou adaptadas ao clima da região. A evolução da pastagem nestas condições de sequeiro

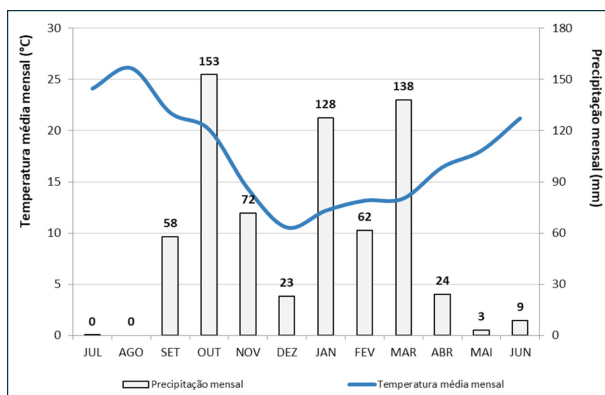


Figura 2 - Temperatura média mensal e precipitação mensal da estação meteorológica de Évora entre julho de 2023 e junho de 2024.

é determinada pela distribuição da precipitação e da temperatura, e condicionada pelo pastoreio. A Figura 2 apresenta os dados de temperatura e precipitação (temperatura média mensal e precipitação) da estação meteorológica de Évora (a cerca de 10 km da herdade da Mitra) entre julho de 2023 e junho de 2024.

Equipamento utilizado

Neste trabalho, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Um medidor de prato ascendente (RPM), “Jenquip EC20 (Jenquip, 21 Darragh Road, Feilding, New Zealand; Figura 3a) para medir a altura comprimida da pastagem (H_{RPM});
- Um sensor ótico próximo ativo “OptRx” fabricado pela Ag Leader (2202 South Riverside Drive, Ames, IA 50010, EUA; Figura 3b);
- Um recetor Trimble GNSS, GeoExplorer série 6000, modelo 88951, com precisão submétrica (GmbH, Am Prime Parc 11, 65479 Raunheim, Alemanha; Figura 3c);
- Aros metálicos de 0,50 m por 0,50 m para delimitar as áreas de amostragem de pastagem;
- Tesouras elétricas portáteis e sacos de plástico para guardar as amostras de pastagem.

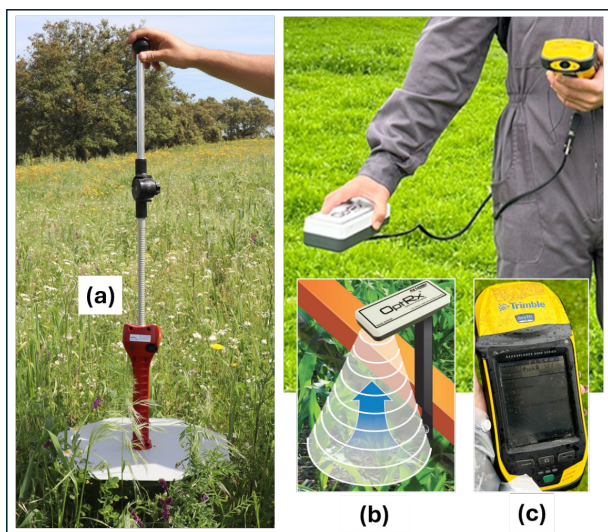


Figura 3 - Medidor de prato ascendente (RPM) (a); sensor ótico próximo (b); recetor GNSS (c)

Medições, recolha de amostras de pastagem e determinações laboratoriais

As medições foram efetuadas entre dezembro de 2023 e maio de 2024. As medições com os sensores e a recolha das amostras de pastagem nas 48 áreas de amostragem foram realizadas em 3 datas: I-06 de dezembro de 2023 (outono), II-29 de fevereiro de 2024 (inverno), e III-10 de maio de 2024 (primavera).

Foi usado o seguinte procedimento sequencial:

- Um operador efetuou medições dentro da área de amostragem com o sensor “OptRx” (associado ao recetor GNSS da Trimble), colocado a cerca de 0,5 m acima da pastagem. Os valores de NDVI foram registados durante um período de 2 minutos, pelo que, em média, em cada data de amostragem, foram efetuadas 120 medições de NDVI (uma por segundo).
- Depois do operador do sensor ótico ter terminado a medição em cada área de amostragem, um segundo operador colocou três aros de amostragem (0,5 m × 0,5 m) e efetuou uma medição da altura comprimida (H_{RPM}) com o sensor RPM dentro de cada aro.
- Um terceiro operador, após as medições com os sensores, procedeu ao corte da pastagem em cada área de subamostragem (de cada um dos 3 aros). A pastagem foi cortada até 1-2 cm acima do nível do solo, simulando o corte realizado por ovinos em pastoreio e permitindo o recrescimento do material vegetal remanescente. A biomassa cortada foi recolhida num saco de plástico, identificado com o respetivo código da zona de amostragem.

Em cada data, estas 48 amostras compósitas de pastagem foram transportadas para o laboratório onde foram pesadas, secas numa estufa e pesadas novamente para obter, respetivamente, a disponibilidade de pastagem em termos de massa de matéria verde (MV) e de massa de matéria seca (MS) por unidade de área, em kg ha⁻¹, e o teor de humidade (em percentagem). As amostras depois de secas foram analisadas para determinar o teor de PB da pastagem (em % da MS) utilizando métodos de referência (AOAC, 2005).

Análise de dados

Os dados obtidos em cada data foram organizados numa folha de cálculo Excel para determinar parâmetros de estatística descritiva (média, desvio padrão e intervalo de variação).

A proteína bruta (PB), expressa em kg ha^{-1} , foi calculada para cada área de amostragem usando a Equação (3):

$$\text{PB (kg ha}^{-1}\text{)} = \text{MS (kg ha}^{-1}\text{)} \times \text{PB (\%)/100} \quad (3)$$

O índice de produtividade e qualidade das pastagens (IPQP) foi calculado com base na Equação (4):

$$\text{IPQP} = \text{H}_{\text{RPM}} \text{ (mm)} \times \text{NDVI} \quad (4)$$

A análise de regressão foi utilizada para avaliar a relação entre as variáveis IPQPI vs PB (em kg ha^{-1}). O coeficiente de determinação (R^2) permitiu avaliar a qualidade dos modelos de regressão. Foi também utilizado o “Coeficiente de Correlação de Concordância de Lin” (conhecido como CCL) como medida da precisão e exatidão de cada modelo. O CCL, ao contrário do coeficiente de correlação

de Pearson (que apenas avalia as relações lineares e tem em conta a precisão, ou seja, a forma como os valores se correlacionam), tem em conta a dispersão (desvio-padrão) e a exatidão, ou seja, a proximidade entre os valores previstos e os valores observados em termos das respetivas médias. Consequentemente, o CCL fornece uma informação mais abrangente da concordância global do modelo de estimativa (Lin e Torbeck, 1998). Em cada análise foi selecionado o modelo (linear ou quadrático) que apresentou, simultaneamente, R^2 e CCL mais elevados.

A informação georreferenciada recolhida no campo “Eco-SPAA” nas 3 datas (I, II e III) foi processada com recurso ao software SIG ARCGIS v. 10.5. A análise geoestatística com a extensão “Geostatistical Analyst” foi utilizada para obter os respetivos mapas representando a variabilidade espacial das variáveis de interesse no campo experimental.

RESULTADOS

A base de dados deste trabalho encontra-se resumida no Quadro 1. A variabilidade espacial dos vários parâmetros da pastagem medidos por sensores (H_{RPM} , NDVI), calculados a partir destes (IPQP) ou obtidos por análise laboratorial (MV, MS, Hum. e PB) reflete-se no elevado CV, especialmente da MV,

Quadro 1 - Estatística descritiva (média, desvio padrão e intervalo de variação) dos parâmetros da pastagem

Data		I- 06/12/2023		II- 29/02/2024		III- 10/05/2024	
Parâmetro da pastagem	n	Média ± DP (CV, %)	Inter. Var.	Média ± DP (CV, %)	Inter. Var.	Média ± DP (CV, %)	Inter. Var.
MV (kg ha^{-1})	48	6254 ± 4274 (68,3)	1423–21090	13256 ± 7054 (53,2)	3867–27917	8245 ± 4759 (57,7)	2580–25037
MS (kg ha^{-1})	48	571 ± 257 (45,0)	237–1703	1834 ± 745 (40,6)	580–3460	2353 ± 1108 (47,1)	933–5400
Hum, (%)	48	89,0 ± 3,3 (3,7)	79,7–93,4	84,6 ± 3,2 (3,8)	75,2–90,5	69,9 ± 6,9 (9,8)	51,9–80,2
PB (%)	48	24,3 ± 5,3 (21,7)	13,5–34,8	16,4 ± 3,6 (21,9)	9,0–23,5	11,3 ± 1,8 (15,7)	8,1–15,4
PB (kg ha^{-1})	48	140,6 ± 75,7 (53,9)	38,8–386,1	305,0 ± 153,3 (50,2)	74,0–626,6	260,6 ± 119,4 (45,8)	108,2–650,7
NDVI	2880	0,817 ± 0,057 (7,0)	0,663–0,898	0,762 ± 0,058 (7,6)	0,605–0,840	0,537 ± 0,098 (18,2)	0,313–0,765
H_{RPM} (mm)	144	53,1 ± 35,4 (66,7)	14,0–232,0	103,6 ± 55,3 (53,4)	22,0–244,0	77,8 ± 42,2 (54,2)	22,0–240,0
IPQP	144	44,8 ± 25,1 (56,1)	13,7–108,4	79,2 ± 38,3 (48,4)	21,2–154,5	41,3 ± 20,9 (50,6)	9,1–95,0

n – Número de medições; DP – Desvio padrão; CV – Coeficiente de variação; Inter. Var. – Intervalo de variação; MV – Matéria verde; MS – Matéria seca; Hum. – Teor de humidade da pastagem; PB – Proteína bruta; NDVI – Índice de vegetação de diferença normalizada; H_{RPM} – Altura comprimida, medida pelo prato ascendente; IPQP – Índice de produtividade e qualidade da pastagem.

da MS, da altura comprimida (H_{RPM}), da PB (em kg ha^{-1}) e do IPQP, da ordem dos 40-70%. Por outro lado, a variabilidade temporal (entre datas de medição) é também muito significativa, com a MS média a aumentar de 571 kg ha^{-1} em dezembro, para 1834 kg ha^{-1} em fevereiro e 2353 kg ha^{-1} em maio, enquanto a Hum. e a PB da pastagem apresentam uma evolução inversa (Hum.: 89%, 85% e 70%; PB: 24%, 16% e 11%; respetivamente, em dezembro, fevereiro e maio).

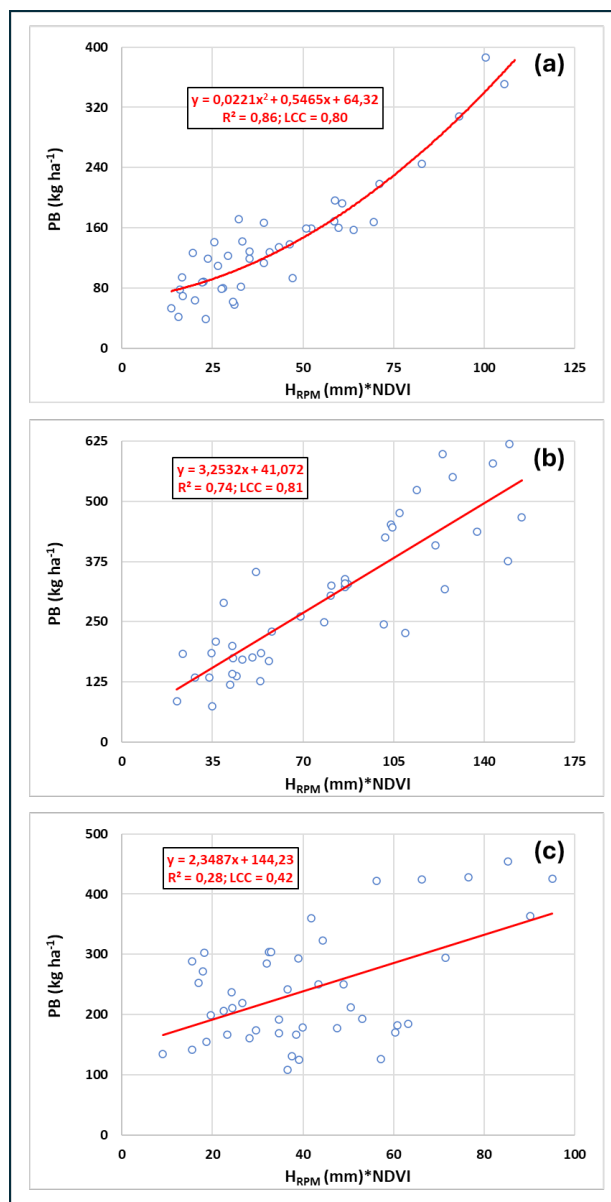


Figura 4 - Relação entre a PB da pastagem (em kg ha^{-1}) e o IPQP (=HRPM \times NDVI), em dezembro de 2023 (a), em fevereiro de 2024 (b) e em maio de 2024 (c).

A evolução da disponibilidade e qualidade das pastagens ao longo do ciclo vegetativo é determinada pelas condições meteorológicas (especialmente temperatura e precipitação) e condicionada pelo manejo do pastoreio (contínuo, diferido, encabeçamento, entre outros aspetos). A Figura 2 mostra uma distribuição relativamente equilibrada da precipitação no outono e inverno, o que proporcionou condições para uma elevada produtividade das pastagens.

Na relação entre variáveis, a utilização do IPQP, que combina a componente altura e a componente qualidade da pastagem, mostrou forte correlação na estimativa da PB em termos de kg ha^{-1} (Figura 4), especialmente na fase inicial (outono; R^2 de 0,86) e na fase intermédia (inverno; R^2 de 0,74) do ciclo vegetativo da pastagem. O IPQP e a PB representam simultaneamente a disponibilidade e a qualidade da pastagem.

A associação de um recetor GNSS a sensores de proximidade ou de contacto permite a

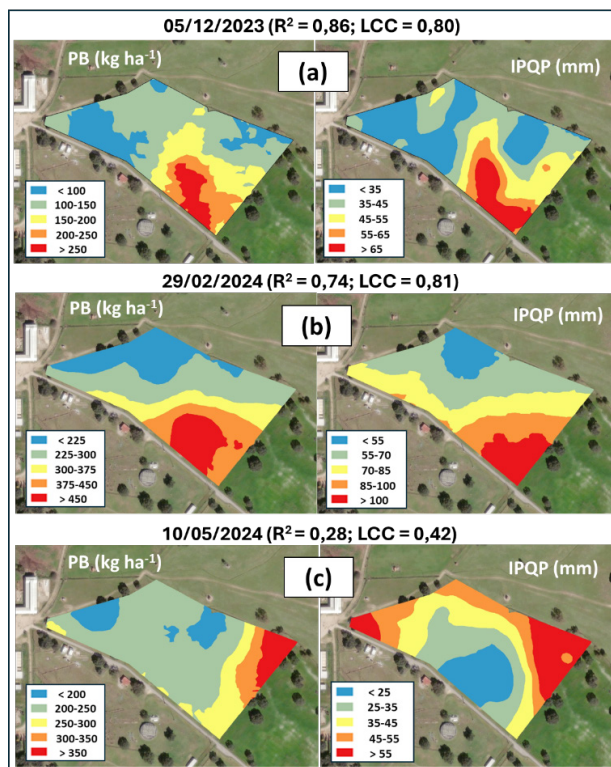


Figura 5 - Mapas da PB (em kg ha^{-1}) e do IPQI (=HRPM \times NDVI), em dezembro de 2023 (a), em fevereiro de 2024 (b) e em maio de 2024 (c).

georreferenciação da informação de campo. Esta georreferenciação permite a representação em forma de mapa do padrão espacial dos parâmetros da pastagem. A Figura 5 mostra os mapas que relacionam a PB com o IPQP. Estes mapas captam não só a variabilidade espacial, mas também a evolução temporal da relação entre parâmetros. É ainda evidente que os padrões de variabilidade são mais corretamente captados nas fases inicial (outono) e intermédia (inverno) do ciclo vegetativo da pastagem, com uma quebra significativa na fase final (primavera).

DISCUSSÃO

A variabilidade espacial da produtividade e da qualidade é um padrão comum nas pastagens de sequeiro integradas no ecossistema do Montado (Efe Serrano, 2006). Para além da biodiversidade de espécies e famílias botânicas, a presença de árvores e de animais em pastoreio acentua esta variabilidade (Schellberg *et al.*, 2008). Esta variabilidade deve-se a uma série de fatores, incluindo o solo, o ambiente, as alterações sazonais na morfologia da pastagem e a gestão do pastoreio (por exemplo, taxas de encabeçamento, pastoreio seletivo, etc.) (Murphy *et al.*, 2021b). No nosso estudo, a variabilidade espacial é ainda promovida pela gestão logística do campo experimental no contexto de um projeto de investigação sobre pastoreio de ovinos e correção do pH do solo. O campo foi dividido em quatro parques (P1 a P4, Figura 1) de, aproximadamente, 1 ha cada, com dois tratamentos: (i) aplicação versus não aplicação de calcário dolomítico; e (ii) duas intensidades de pastoreio diferentes (taxas de encabeçamento de 1 CN ha⁻¹ e 2 CN ha⁻¹). Cada um destes fatores tem um impacto significativo na pastagem (Efe Serrano, 2006).

A heterogeneidade aumenta a dificuldade para monitorizar a produtividade e a qualidade da pastagem e exige um grande número de amostras para captar esta variação espacial. Murphy *et al.* (2021b) sugerem que os locais de amostragem devem ser selecionados aleatoriamente e espacialmente equilibrados. Para efeitos do presente trabalho, o esquema de amostragem foi estabelecido com a georreferenciação de 48 pontos de amostragem (12 em cada um dos quatro parques de pastoreio), definidos por um perito botânico de acordo com

a composição florística da pastagem na estação de crescimento anterior. Estes pontos foram mantidos em todas as datas de amostragem das pastagens (outono, inverno e primavera). A fim de minimizar o erro associado às medições de campo (Murphy *et al.*, 2021b), a equipa de amostragem no terreno foi também mantida durante todo o período experimental.

Nas pastagens de sequeiro, a evolução da disponibilidade e da qualidade ao longo do ciclo vegetativo (dinâmica temporal) é determinada pelas condições meteorológicas e condicionada pela gestão do pastoreio (Efe Serrano, 2006). No ano agrícola em estudo (2023/2024) a precipitação ocorreu de forma homogénea durante os meses de outono e inverno (cerca de 300 mm de precipitação acumulada no outono - entre setembro e dezembro, e também no inverno - entre dezembro e março; Figura 2), o que garantiu quer o primeiro pico de produção no final do outono, quer o máximo de produção acumulada na primavera, fases que determinam em muito o potencial produtivo da pastagem (Efe Serrano, 2006). Neste estudo, as medições das pastagens foram efetuadas entre dezembro e maio para garantir a representatividade destas fases determinantes do ciclo vegetativo das pastagens.

A abordagem de estimativa baseada na disponibilidade de pastagem (por exemplo, kg de MS ha⁻¹) ou na qualidade (PB, em %) pode ser considerada incompleta. Na prática, o ideal seria uma abordagem que integrasse simultaneamente as duas componentes (disponibilidade e qualidade). Para o efeito, neste estudo, o RPM foi utilizado para estimar a dimensão disponibilidade (MS) com base na altura comprimida (HRPM), e o sensor ótico “OptRx” foi utilizado para estimar a dimensão qualidade (PB) através do cálculo do NDVI. Vários estudos mostraram uma forte correlação entre o NDVI e a PB (Serrano *et al.*, 2018; Pullanagari *et al.*, 2012). Por exemplo, Pullanagari *et al.* (2012) obtiveram um R² entre 0,65 e 0,83 em pastagens na Nova Zelândia.

O IPQP, obtido do produto entre o H_{RPM} e o NDVI (Equação (4)), mostrou uma precisão muito interessante na estimativa da PB em termos de kg ha⁻¹, especialmente na fase inicial (outono; R² = 0,86; LCC = 0,80) e na fase intermédia (inverno; R² = 0,74; LCC = 0,81) do ciclo vegetativo da pastagem. Este índice representa simultaneamente a disponibilidade e

a qualidade da pastagem, daí o seu potencial prático para utilização na gestão do pastoreio e suplementação em sistemas extensivos de produção animal (Serrano *et al.*, 2024). Existe potencial para aumentar a produção de pastagem de uma forma sustentável através de uma medição mais precisa da quantidade e qualidade da pastagem (Murphy *et al.*, 2021b).

Tendo como referência o trabalho recente de revisão de Murphy *et al.* (2021b) sobre tecnologias de precisão para a otimização do manejo das pastagens, verifica-se que a avaliação de tecnologias para este efeito tem sido mais intensiva em países com forte vocação para a produção animal, como a Austrália, Nova Zelândia, EUA e, na Europa, a Irlanda, não havendo qualquer referência a trabalhos realizados na Península Ibérica. Relativamente à utilização simultânea dos sensores RPM e “OptRx”, não existe publicado nenhum trabalho científico em que estes equipamentos tenham sido testados em pastagens de sequeiro na região Mediterrânica. Por conseguinte, não existem dados que permitam enquadrar os resultados deste estudo, nomeadamente a relação entre o IPQP e a PB em kg ha⁻¹.

A Figura 5 mostra os mapas que relacionam a PB com o IPQP. Estes mapas captam não só a variabilidade espacial, mas também a sua evolução temporal. Os padrões de variabilidade são captados com maior exatidão nas fases inicial (outono) e intermédia (inverno) do ciclo vegetativo da pastagem, com uma quebra significativa na fase final (primavera). A maior precisão obtida nas fases iniciais do ciclo vegetativo pode ajudar o agricultor a decidir quando parar a suplementação alimentar que ocorre durante todo o período de verão (período sem precipitação e, portanto, sem disponibilidade de pasto). Esta representação espacial reforça o interesse na integração de sensores de medição de pastagens com recetores GNSS, uma abordagem que contribui para a interpretação e gestão da variabilidade espacial das pastagens e do pastoreio, permitindo aos agricultores tomar decisões rápidas e mais informadas (Chapa *et al.*, 2023).

Este estudo foi efetuado apenas durante um ciclo vegetativo da pastagem e envolveu um tipo de pastagem, embora representativa das misturas (gramíneas, leguminosas e outras) de pastagens

de sequeiro típicas do Montado. É, por isso, fundamental alargar o estudo a mais pastagens, com diferentes características e ao longo de vários ciclos de crescimento das pastagens, para obter mais detalhes e significância sobre os efeitos sazonais (Murphy *et al.*, 2021c).

Para além do interesse em mais estudos de calibração/validação destes sensores na gama diversificada de pastagens heterogéneas que são características da região, este trabalho abre perspectivas para estudos que potenciem estas tecnologias próximas associando-as à DR, permitindo aos agricultores monitorizar grandes áreas e determinar em tempo real a disponibilidade e a qualidade das pastagens *in situ*, e de forma expedita, com pouca ou nenhuma mão de obra (Pullanagari *et al.*, 2012) para apoiar a tomada de decisões dos agricultores.

CONCLUSÕES

Nos sistemas de produção animal extensiva, as pastagens são a base da alimentação dos ruminantes. Nestes sistemas, a disponibilidade e a qualidade das pastagens são dois parâmetros fundamentais para a tomada de decisões e gestão das pastagens e do pastoreio. O potencial de uma abordagem complementar de multisensores, um RPM (Jenquip EC20), que mede a altura comprimida (H_{RPM}), e um sensor ótico ativo (OptRx), que mede o NDVI, é demonstrado neste estudo para a obtenção de um índice (IPQP) que integra simultaneamente a produtividade e a qualidade da pastagem, expressa em termos de kg de PB ha⁻¹.

A melhor correlação entre a PB (em kg ha⁻¹), medida por análises laboratoriais de referência, e o IPQP foi obtida nas fases iniciais da estação de crescimento (outono: $R^2 = 0,86$; $LCC = 0,80$; e inverno: $R^2 = 0,74$; $LCC = 0,81$), o que pode ajudar os agricultores a decidir quando parar a suplementação alimentar que ocorre durante todo o período de verão.

Este é o primeiro trabalho científico publicado que apresenta um parâmetro que integra simultaneamente a produtividade e a qualidade da pastagem, obtido de forma expedita, no campo, a partir de sensores. A informação em causa constitui um desenvolvimento que permitirá tomadas de decisão,

por exemplo em termos de suplementação dos animais, praticamente em tempo real.

A sazonalidade associada às pastagens de sequeiro afetou decisivamente a precisão da estimativa, tendendo a diminuir drasticamente no final do ciclo vegetativo das pastagens, o que justifica a realização de estudos a longo prazo para recolher mais informações sobre os efeitos sazonais. Estes estudos, para além de incluírem outros tipos de pastagens (composição florística), poderão também substituir os sensores próximos por deteção remota (imagens de satélite), tornando a monitorização das pastagens um processo mais prático e fácil de operar.

A sensibilização para os benefícios da utilização na exploração de tecnologias de AP para a medição frequente e exata da disponibilidade e qualidade das pastagens é uma das principais estratégias

para garantir a sustentabilidade económica e ambiental destes sistemas de produção extensivos.

Este é um estudo exploratório, contudo os resultados abrem boas perspectivas para o envolvimento de ferramentas de análise mais robustas, baseadas em inteligência artificial, que permitam avaliar como diferentes variáveis (espécie botânica, teor de humidade, de proteína ou de fibra, por exemplo) podem influenciar os modelos de estimativa.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado por Fundos Nacionais através da FCT (Fundação para a Ciência e a Tecnologia) no âmbito do Projeto UIDB/05183 e pelo projeto “SUMO— Sustentabilidade do Montado” (ref. PRR-C05-i03-I000066-LA 6.2).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AOAC (2005) - *AOAC Official Methods of Analysis of AOAC International*, 18th ed.; AOAC International: Arlington, VA, USA.
- Berzaghi, P.; Cherney, J.H. & Casler, M.D. (2021) - Prediction performance of portable near infrared reflectance instruments using preprocessed dried, ground forage samples. *Computers and Electronic in Agriculture*, vol. 182, art. 106013. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106013>
- Cárdenas, J.; Balocchi, O. & Calvache, I. (2020) - Calibration of the rising plate meter for mixed pastures of Ryegrass (*Lolium perenne* L.) and Kikuyo (*Cenchrus clandestinus*). *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences*, vol. 36, n. 3, p. 216–223. <http://dx.doi.org/10.29393/chjaas36-20crjc30020>
- Carreira, E.; Serrano, J.; Gomes, C.J.P.; Shahidian, S.; Paniágua, L.L.; Pilirito, A.; Castro, J.; Carvalho, M. & Pereira, A. (2022). Effect of sheep grazing, stocking rates and dolomitic limestone application on the floristic composition of a permanent dryland pasture, in the Montado agroforestry system of southern Portugal. *Animals*, vol. 12, n. 19, art. 2506. <https://doi.org/10.3390/ani12192506>
- Chapa, J.M.; Pichlbauer, B.; Bobal, M.; Guse, C.; Drillich, M. & Iwersen, M. (2023) - Field evaluation of a rising plate meter to estimate herbage mass in Austrian pastures. *Sensors*, vol. 23, n. 17, art. 7477. <https://doi.org/10.3390/s23177477>
- Danieli, P.P.; Carlini, P.; Bernabucci, U. & Ronchi, B. (2004) - Quality evaluation of regional forage resources by means of near infrared reflectance spectroscopy. *Italian Journal of Animal Science*, vol. 3, n. 4, p. 363–376. <https://doi.org/10.4081/ijas.2004.363>
- Efe Serrano, J. (2006) - *Pastures in Alentejo: Technical Basis for Characterization, Grazing and Improvement*. Universidade de Évora—ICAM, Ed.; Gráfica Eborense: Évora, Portugal, pp. 165–178.
- Feng, X.; Cherney, J.H.; Cherney, D.J.R. & Digman, M.F. (2023) - Practical considerations for using the NeoSpectra-Scanner handheld near-infrared reflectance spectrometer to predict the nutritive value of undried ensiled forage. *Sensors*, vol. 23, n. 4, art. 1750. <https://doi.org/10.3390/s23041750>
- Fernández-Habas, J.; Moreno, A.M.G.; Hidalgo-Fernández, M.A.T.; Leal-Murillo, J.R.; Oar, B.A.; Gómez-Giráldez, P.J.; González Dugo, M.P. & Fernández-Rebollo, P. (2021) - Investigating the potential of Sentinel-2 configuration to predict the quality of Mediterranean permanent grasslands in open woodlands. *Science of The Total Environment*, vol. 791, art. 148101. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148101>
- Gargiulo, J.; Clark, C.; Lyons, N.; Veyrac, G.; Beale, P. & Garcia, S. (2020) - Spatial and temporal pasture biomass estimation integrating electronic plate meter, Planet CubeSats and Sentinel-2 satellite data. *Remote Sensing*, vol. 12, n. 19, art. 3222. <https://doi.org/10.3390/rs12193222>
- Karunaratne, S.; Thomson, A.; Morse-McNabb, E.; Wijesingha, J.; Stayches, D.; Copland, A. & Jacobs, J. (2020) - The Fusion of spectral and structural datasets derived from an airborne multispectral sensor for estimation of pasture dry matter yield at paddock scale with time. *Remote Sensing*, vol. 12, n. 12, art. 2017. <https://doi.org/10.3390/rs12122017>
- Lawson, A.R.; Giri, K.; Thomson, A.L.; Karunaratne, S.B.; Smith, K.F.; Jacobs, J.L. & Morse-McNabb, E.M. (2022) - Multi-site calibration and validation of a wide-angle ultrasonic sensor and precise GPS to estimate pasture mass at the paddock scale. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 195, art. 106786. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.106786>
- Legg, M. & Bradley, S. (2020) - Ultrasonic arrays for remote sensing of pasture biomass. *Remote Sensing*, vol. 12, n. 1, art. 111. <https://doi.org/10.3390/rs12010111>
- Lin, L. & Torbeck, L.D. (1998) - Coefficient of accuracy and concordance correlation coefficient: New statistics for methods comparison. *PDA Journal of Pharmaceutical Science and Technology*, vol. 52, n. 2, p. 55–59.
- Lugassi, R.; Zaady, E.; Goldshleger, N.; Shoshany, M. & Chudnovsky, A. (2019) - Spatial and temporal monitoring of pasture ecological quality: Sentinel-2-based estimation of crude protein and neutral detergent fiber contents. *Remote Sensing*, vol. 11, n. 7, art. 799. <https://doi.org/10.3390/rs11070799>
- Murphy, D.J.; Shine, P.; O'Brien, B.; O'Donovan, M. & Murphy, M.D. (2021b) - Utilising grassland management and climate data for more accurate prediction of herbage mass using the rising plate meter. *Precision Agriculture*, vol. 22, n. 1, p. 1189–1216. <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09778-4>

- Murphy, D.J.; Murphy, M.D.; O'Brien, B. & O'Donovan, M. (2021c) - A review of precision technologies for optimising pasture measurement on Irish grassland. *Agriculture*, vol. 11, n. 7, art. 600. <https://doi.org/10.3390/agriculture11070600>
- Murphy, D.J.; O'Brien, B.; Hennessy, D.; Hurley, M. & Murphy, M.D. (2021a) - Evaluation of the precision of the rising plate meter for measuring compressed sward height on heterogeneous grassland swards. *Precision Agriculture*, vol. 22, n. 3, p. 922–946. <https://doi.org/10.1007/s11119-020-09765-9>
- O'Donovan, M.; Dillon, P.; Rath, M. & Stakelum, G. (2002) - A comparison of four methods of herbage mass estimation. *Irish Journal of Agricultural and Food Research*, vol. 41, n. 1, p. 17–27.
- Palma-Molina, P.; Hennessy, T.; Dillon, E.; Onakuse, S.; Moran, B. & Shalloo, L. (2023) - Evaluating the effects of grass management technologies on the physical, environmental, and financial performance of Irish pasture-based dairy farms. *Journal of Dairy Science*, vol. 106, n. 9, p. 6249–6262. <https://doi.org/10.3168/jds.2022-23111>
- Parrini, S.; Acciaoli, A.; Franci, O.; Pugliese, C. & Bozzi, R. (2019) - Near infrared spectroscopy technology for prediction of chemical composition of natural fresh pastures. *Journal of Applied Animal Research*, vol. 47, n. 1, p. 514–520. <https://doi.org/10.1080/09712119.2019.1675669>
- Pullanagari, R.R.; Yule, I.J.; Tuohy, M.P.; Hedley, M.J.; Dynes, R.A. & King, W.M. (2012) - Proximal sensing of the seasonal variability of pasture nutritive value using multispectral radiometry. *Grass and Forage Science*, vol. 68, n. 1, p. 110–119. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2012.00877.x>
- Punalekar, S.M.; Thomson, A.; Verhoef, A.; Humphries, D.J. & Reynolds, C.K. (2021) - Assessing suitability of Sentinel-2 bands for monitoring of nutrient concentration of pastures with a range of species compositions. *Agronomy*, vol. 11, n. 8, art. 1661. <https://doi.org/10.3390/agronomy11081661>
- Reddy, A.R.; Chaitanya, K.V. & Vivekanandan, M. (2004) - Drought-induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants. *Journal of Plant Physiology*, vol. 161, n. 11, p. 1189–1202. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2004.01.013>
- Sanderson, M.A.; Rotz, C.A.; Fultz, S.W. & Rayburn, E.B. (2001) - Estimating forage mass with a commercial capacitance meter, rising plate meter, and pasture ruler. *Agronomy Journal*, vol. 93, p. 1281–1286.
- Schellberg, J.; Hill, M.J.; Gerhards, R.; Rothmund, M. & Braun, M. (2008) - Precision agriculture on grassland: Applications, perspectives and constraints. *European Journal of Agronomy*, vol. 29, n. 2–3, p. 59–71. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2008.05.005>
- Serrano, J.; Shahidian, S. & da Silva, J.M. (2018) - Monitoring seasonal pasture quality degradation in the Mediterranean montado ecosystem: Proximal versus remote sensing. *Water*, vol. 10, n. 10, art. 1422. <https://doi.org/10.3390/w10101422>
- Serrano, J.; Shahidian, S.; Marques da Silva, J.; Paixão, L.; Carreira, E.; Carmona-Cabezas, R.; Nogales-Bueno, J. & Rato, A.E. (2020) - Evaluation of near infrared spectroscopy (NIRS) and remote sensing (RS) for estimating pasture quality in Mediterranean Montado ecosystem. *Applied Sciences*, vol. 10, n. 13, art. 4463. <https://doi.org/10.3390/app10134463>
- Serrano, J.; Shahidian, S.; Paixão, L.; Marques da Silva, J.; Morais, T.; Teixeira, R. & Domingos, T. (2021a) - Spatiotemporal patterns of pasture quality based on NDVI time-series in Mediterranean Montado ecosystem. *Remote Sensing*, vol. 13, n. 19, art. 3820. <https://doi.org/10.3390/rs13193820>
- Serrano, J.; Shahidian, S.; Carapau, Â. & Rato, A.E. (2021b) - Near-infrared spectroscopy (NIRS) and optical sensors for estimating protein and fiber in dryland Mediterranean pastures. *AgriEngineering*, vol. 3, n. 1, p. 73–91. <https://doi.org/10.3390/agriengineering3010005>
- Serrano, J.; Shahidian, S.; Paixão, L.; Marques da Silva, J. & Paniágua, L.L. (2024) - Pasture quality assessment through NDVI obtained by Remote Sensing: A validation study in the Mediterranean silvo-pastoral ecosystem. *Agriculture*, vol. 14, n. 8, art. 1350. <https://doi.org/10.3390/agriculture14081350>
- Tacoma-Fogal, R.; Boggess, M.; Cherney, J.H.; Digman, M. & Cherney, D.J.R. (2024) - Predicting grass proportion in fresh alfalfa: Grass mixtures using a hand-held near-infrared spectrometer. *Crop Science*, vol. 64, n. 4, p. 2336–2344. <https://doi.org/10.1002/csc.21254>