



RAUL MORAIS DOS
SANTOS
CITAB – Centro
de Investigação
em Tecnologias
Agroambientais e
Biológicas, Universidade
de Trás-os-Montes e
Alto Douro
rmoraes@utad.pt

O PAPEL DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E DA MONITORIZAÇÃO INTELIGENTE NA VITICULTURA DE PRECISÃO

As tecnologias de aquisição de dados no contexto da agricultura de precisão, sejam de proximidade, utilizando sensores no campo, ou remotas, como aquelas que recorrem a sensores transportados por veículos aéreos, já atingiram um nível de maturidade suficiente para que o esforço de investigação se concentre atualmente na extração de conhecimento e na forma como este pode transformar práticas agrícolas diversas em práticas mais sustentáveis e ecologicamente responsáveis. O uso de modelos matemáticos e de técnicas de inteligência artificial tem registado um crescimento significativo na extração de métricas, parâmetros de desempenho das culturas, deteção de anomalias, entre outros, tornando-se indispensável para o gestor agrícola moderno. Neste artigo, apresenta-se uma visão prática sobre como estas tecnologias têm sido aplicadas na viticultura de precisão, explorando várias vertentes tecnológicas e recorrendo a modelos matemáticos e a inteligência artificial para atingir metas de sustentabilidade ambiental, ecológica e económica.

1. TRANSIÇÕES DIGITAIS NA VITICULTURA DE PRECISÃO

Uma análise dos termos indexantes das publicações sobre viticultura de precisão na base de dados SCOPUS revela a forte componente tecnológica deste conceito, que deriva diretamente da agricultura de precisão (ou *smart farming*, agricultura inteligente, entre outros termos frequentemente usados na literatura). Quando aplicada à cultura da vinha, a viticultura de precisão foca-se na gestão da planta, compreendendo as causas de variabilidades, espaciais e temporais, e atuando para as minimizar. Numa visão ideal, este conceito permitiria monitorizar cada planta individualmente e fornecer-lhe as condições ideais para o seu desenvolvimento. No entanto, esta abordagem perso-

nalizada é muitas vezes impraticável, dados a dimensão do terreno e o número de plantas, além dos custos associados. Assim, é comum e desejável o uso de modelos matemáticos que compreendam as métricas de desenvolvimento das plantas e que produzam mapas para ajustar as práticas de cultivo, visando alcançar o objetivo final: plantas saudáveis, produção maximizada, viabilidade económica e sustentabilidade ambiental.

Consequentemente, é comum encontrar termos como tecnologia, variabilidade, sensores, processamento de imagem, sensores hiperespectrais, deteção remota, drones, servidores, sensores de campo, comunicações, robótica, *Big Data*, internet das coisas, e gestão de processos entre os termos indexantes das publicações científicas.

Nas últimas décadas, assistiu-se a um crescimento exponencial de tecnologias que recolhem dados, processam-nos e produzem informações relevantes para a gestão das práticas agrícolas. No atual estado de desenvolvimento tecnológico, o foco está agora no processamento de dados, com a introdução de conceitos como *Big Data*, *Data Lake*, e decisões baseadas em dados massivamente produzidos, que requerem tratamento adequado e oportuno. Paralelamente, modelos de previsão utilizam estes dados para treino através de técnicas de inteligência artificial (IA), como a aprendizagem supervisionada e a não supervisionada, entre outras.

Esta vasta gama de ferramentas tecnológicas tem incentivado um aumento significativo das tecnologias de monitorização do solo, tanto na superfície como abaixo dela, utilizando sensores óticos e de radar. A computação, que antes era centralizada ou baseada na nuvem, tem sido direcionada para dispositivos que já processam dados localmente, no contexto de *Edge/Fog Computing*, isto é, processamento distribuído. Nesse paradigma, as comunicações desempenham um papel crucial, trazendo preocupações de cibersegurança, ciber-resiliência e autenticidade dos dados produzidos, cada vez mais, por dispositivos IoT (*Internet of Things*). Estes dados geram longas séries temporais que constituem verdadeiros "lagos de dados", cujo processamento analítico com técnicas convencionais já não faz sentido, o que promoveu o surgimento de técnicas de IA para essas tarefas. Com o volume crescente de dados e as várias técnicas de IA disponíveis, surgem modelos que tentam descrever o comportamento da vinha, abrangendo doenças, ciclos vegetativos, fenologia, stresses hídricos, entre outros fatores, todos influenciados pelas alterações climáticas que modificam o contexto dos dados e das previsões.

Estamos na era dos modelos matemáticos descritivos e preditivos que tentam simular o comportamento das plantas, utilizando o conceito de gêmeo digital (*Digital Twin*), cujo grande objetivo é a virtualização da vinha. Assim, entramos numa era de sistemas de apoio à decisão baseados em dados, num conceito de "inteligência da cultura", onde todos os dados, heterogêneos por definição, competem entre si para definir, com a maior precisão possível, o comportamento da cultura, bem como prever os passos seguintes. Se o panorama da monitorização pode parecer avassalador, o cenário de atuação é igualmente desafiador. Além das tecnologias VRT (tecnologias de taxa variável) conhecidas das últimas duas ou três décadas, o trabalho colaborativo realizado por robôs que operam 24

horas por dia, sete dias por semana, com mapas de prescrição gerados em tempo real tende a ser cada vez mais elétrico, numa perspetiva de descarbonização.

Atualmente, todas estas ferramentas tecnológicas permitem uma ampla gama de aplicações, que estão em fase de disseminação e adoção por aqueles que investiram e agora colhem os frutos. Estas aplicações incluem pulverização de precisão, irrigação inteligente, tratamento preventivo de pragas e doenças, operações culturais autónomas, mapeamento de zonas para vindima seletiva, gestão eficiente e adaptação das práticas às alterações climáticas, sempre com uma abordagem de valorização de resíduos, reutilização de água e aumento dos índices de sustentabilidade. Naturalmente, este processamento intensivo de dados requer o uso de modelos que vão desde a validação dos dados até à extração de conhecimento, com o objetivo de otimizar a gestão dos processos agrícolas.

2. O PAPEL DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NO GREEN DEAL

O Pacto Ecológico Europeu, conhecido como *Green Deal*, estabelece uma série de metas ambiciosas para transformar a economia da União Europeia numa economia sustentável, neutra em carbono e eficiente na utilização de recursos. Entre os objetivos principais estão a redução das emissões de gases com efeito de estufa, a preservação da biodiversidade, a transição para uma economia circular e a promoção de sistemas alimentares sustentáveis. A IA desempenha um papel crucial na concretização destas metas, especialmente no contexto da agricultura e, em particular, na viticultura de precisão.

A IA tem vindo a ser integrada em ferramentas avançadas que utilizam algoritmos de aprendizagem automática (*machine learning*) e técnicas de análise de dados para prever zonas de stress hídrico, identificar necessidades de rega, detetar pragas e doenças de forma precoce e analisar dados de imagens hiperespectrais para a gestão do solo e a identificação de assinaturas espectrais de doenças. Estas aplicações contribuem para uma gestão mais inteligente dos recursos, reduzindo o uso de água, fertilizantes e pesticidas, em conformidade com os objetivos do *Green Deal*.

Exemplos concretos da aplicação da IA na viticultura de precisão incluem o desenvolvimento de modelos preditivos para a gestão do stress hídrico nas vinhas. Utilizando dados meteorológicos, imagens de satélite e sensores colocados nas plantas, a IA pode prever situações de stress hídrico e recomendar estratégias de rega mais eficientes. Esta abordagem não só promove a conservação

da água, um recurso cada vez mais escasso, como também assegura que as vinhas se mantêm saudáveis e produtivas, contribuindo para a resiliência climática e a sustentabilidade económica dos produtores. De forma semelhante, são utilizados dados históricos para treinar modelos que melhoram o combate a pragas e doenças, permitindo o uso reduzido de químicos, e para criar mapas que identificam variabilidades no solo, promovendo práticas de cultivo adaptativas que fomentam a regeneração do solo e a proteção da biodiversidade. Ao reduzir a necessidade de práticas agrícolas intensivas e incentivar a agricultura biológica, a IA apoia diretamente as metas do *Green Deal* relativas à sustentabilidade ambiental.

Além disso, um dos grandes focos do uso da IA está nos melhores planeamento e adaptação às alterações climáticas, antecipando o impacto de fenómenos climáticos extremos e ajudando os viticultores a ajustar as suas práticas de forma proativa. Esta capacidade de antecipação e adaptação é essencial para mitigar os riscos climáticos e promover a resiliência das vinhas face às alterações climáticas, alinhando-se com a visão do *Green Deal* de um sistema agrícola mais sustentável e preparado para o futuro.

Assim, a IA desempenha um papel fundamental na concretização dos objetivos do *Green Deal* no setor vitivinícola. Ao promover a eficiência no uso de recursos, reduzir o impacto ambiental e aumentar a resiliência da viticultura, a IA torna-se uma aliada poderosa na transição para uma agricultura mais verde e sustentável, em linha com os compromissos ambientais da União Europeia.

3. DADOS, INFORMAÇÃO E CONHECIMENTO EXTRAÍDOS DO TERRENO

Na viticultura de precisão, o uso de dados é essencial para a gestão eficaz e sustentável das vinhas. A obtenção de dados diretamente do terreno – através de sensores de campo, drones, imagens de satélite e outros dispositivos de monitorização – permite uma compreensão detalhada e em tempo real das condições das vinhas. No entanto, a mera recolha de dados não é suficiente; é necessário transformá-los em informação útil e, posteriormente, em conhecimento que apoie a tomada de decisões informadas.

Os dados recolhidos no terreno podem incluir uma variedade muito heterogênea de parâmetros, tais como temperatura, humidade relativa do ar, teor de água do solo, radiação solar, precipitação, velocidade do vento, fluxo de seiva, níveis de nutrientes, vigor das plantas, presença de pragas e doenças, entre outros. Sensores no solo e em drones captam informações em várias escalas espa-

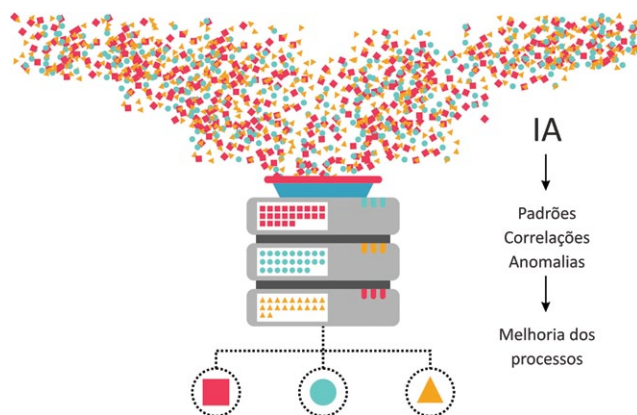


Figura 1. O uso de IA na identificação de correlações, classificação de padrões e detecção de anomalias contidos em dados em bruto recolhidos por sensores heterogêneos.

ciais e temporais, proporcionando um retrato dinâmico e abrangente da vinha. Imagens aéreas obtidas por sensores hiperespectrais e multiespectrais, por exemplo, ou mesmo de radar (GPR – *Ground Penetrating Radar*) podem ser utilizadas para detetar variações na saúde das plantas e identificar doenças numa fase inicial, permitindo uma resposta rápida e eficiente, assim como perceber as causas de variabilidade no seu desenvolvimento, sabendo qual a morfologia do terreno onde se encontram.

Uma vez recolhidos, estes dados brutos são processados utilizando técnicas avançadas de análise de dados e IA (ver figura 1). Algoritmos de *machine learning* são aplicados para identificar padrões e tendências que não são imediatamente visíveis através de métodos tradicionais. Por exemplo, ao analisar séries temporais de dados meteorológicos, os modelos preditivos podem antecipar situações de stress hídrico, permitindo ajustes proativos nas estratégias de rega. Da mesma forma, algoritmos de reconhecimento de padrões podem ser utilizados para detetar sinais precoces de infestação por pragas ou de doenças, possibilitando intervenções preventivas mais eficazes e reduzindo o uso de fitofármacos.

A transformação de dados em informação e, finalmente, em conhecimento útil é um processo que requer uma infraestrutura robusta para armazenamento e processamento de grandes volumes de dados, frequentemente referidos como *Big Data*. Plataformas de gestão de dados agrícolas, que integram informação proveniente de diferentes fontes (como sensores de campo, dados meteorológicos, imagens de satélite, etc.), permitem aos viticultores visualizar e analisar dados de forma integrada, facilitando

uma tomada de decisão mais informada e baseada em dados reais. As figuras 2 e 3 ilustram um dos muitos exemplos de recolha de dados que visam a tomada de decisão onde modelos matemáticos são usados quer para validar os dados de entrada quer para extrair tendências que, com o apoio de IA, geram alertas de stress hídrico. Neste caso, dispositivos IoT de baixo custo são usados para recolher dados de teor de água no solo, temperatura e humidade relativa do ar, precipitação, entre outros, que enviam para uma plataforma que processa esses dados e devolve propostas de atuação ao gestor da exploração.

O conhecimento extraído do terreno vai além da sim-

ples monitorização. Ele inclui a capacidade de desenvolver modelos de simulação que replicam o comportamento da vinha sob diferentes cenários climáticos e de gestão. Este conceito emergente de gémeo digital permite aos viticultores testar virtualmente diferentes estratégias de cultivo, gestão de pragas e irrigação, antes de as aplicar no terreno, reduzindo assim o risco e melhorando a eficiência das operações. Este será, de facto, um grande tema de investigação para o futuro próximo. A IA, ao converter dados brutos em *insights* valiosos, torna-se assim um pilar fundamental da viticultura moderna, guiando os produtores para práticas mais inteligentes, eficientes e sustentáveis.



Figura 2. Aquisição de dados numa vinha do Palácio de Mateus no âmbito do projeto PRIMA/DATI (Digital Agriculture Technologies for Irrigation Efficiency), <https://datiproject.eu>, que visa a recolha de dados para estabelecer melhores estratégias de rega.



Figura 3. Exemplo de séries temporais de dados numéricos obtidos de uma vinha.

4. O VINEINSPECTOR COMO FERRAMENTA IOT DE RECOLHA DE DADOS INTELIGENTE

A evolução na aquisição de dados na viticultura tem passado de métodos tradicionais, como a recolha de dados de sensores numéricos simples e imagens de satélite, para soluções mais avançadas que incorporam processamento dedicado. Atualmente, a integração de dispositivos de baixo custo com tecnologias de IA e computação de borda (*Edge Computing*) permite a extração de informações diretamente no ponto de interesse. Estes sistemas modernos não só facilitam a aquisição e processamento imediato de dados complexos, como também oferecem uma análise detalhada e em tempo real, tornando possível a monitorização precisa e a tomada de decisões informadas sem a necessidade de intervenções dispendiosas ou demoradas. O sistema

VineInspector [1] foi concebido para este objetivo: recolher imagens e extrair delas *insights* valiosos, e em tempo real.

O VineInspector é um sistema autónomo, de baixo custo e fácil de instalar, concebido para operar em campo aberto. É composto por um computador de placa única (SBC – *Single Board Computer*) e várias câmaras RGB¹, integrando um conjunto de sensores de imagem que possibilitam a monitorização contínua e a avaliação da condição fitossanitária das vinhas. Este sistema é capaz de detetar e classificar automaticamente atributos distintos nas imagens adquiridas periodicamente, utilizando abordagens de IA. Tal capacidade é crucial para práticas de monitorização de proximidade inteligentes que procuram replicar a observação visual direta realizada por viticultores experientes. As figuras 4 e 5 mostram a materialização conceptual impressa

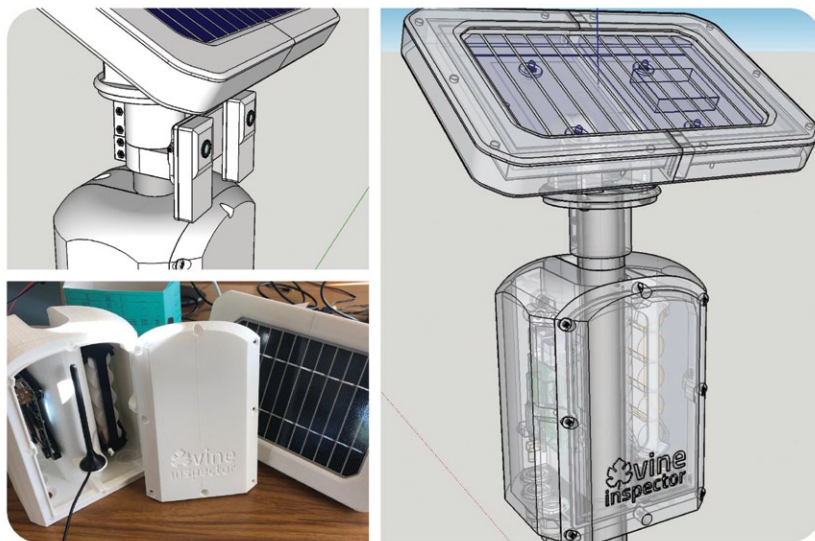


Figura 4. O conceito VineInspector: um dispositivo IoT de baixo custo que usa imagem para extrair *insights* valiosos e em tempo real.



Figura 5. O VineInspector é utilizado para contar insetos (traça da uva), remotamente e em tempo real, e estimar o nível económico de ataque (NEA), fronteira a partir do qual se deve aplicar um tratamento.



Figura 8. Imagens utilizadas para treino do modelo de IA (lado esquerdo) e respectivos resultados de classificação (lado direito), mostrando a efetividade do modelo treinado na classificação de pampas, relativamente ao seu tamanho.

o VineInspector permite realizar práticas agrícolas de forma mais eficiente, substituindo a necessidade de observações frequentes no local por especialistas. Esta evolução tecnológica minimiza o impacto nas práticas culturais e reduz a necessidade de recursos humanos intensivos, ao mesmo tempo que melhora a precisão e a oportunidade das intervenções contra pragas e doenças. O VineInspector representa assim o passo lógico e significativo na evolução dos sistemas de monitorização de proximidade, alinhando-se perfeitamente com as necessidades da viticultura de precisão e com os objetivos mais amplos de práticas agrícolas sustentáveis.

5. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

A evolução dos processos de aquisição e processamento de dados tem transformado significativamente diversos setores, destacando-se também na agricultura e na viticultura de precisão. Como discutido, a integração de sensores numéricos simples com tecnologias avançadas, como Internet das Coisas, IA e *Edge Computing*, tem proporcionado uma revolução na forma como os dados são adquiridos, processados e analisados, procurando sempre a extração de *insights* que possam promover práticas mais sustentáveis, e exemplifica a aplicação direta e prática de conceitos matemáticos complexos.

O uso de sensores numéricos e de imagens de satélite, que antes eram processos separados e muitas vezes dispendiosos, é hoje realizado de forma integrada, com redundância e a um custo muito inferior. O advento de tecnologias de baixo custo, combinado com a capacidade de processamento em tempo real no ponto de recolha dos dados, tem permitido uma análise mais rápida das condições ambientais e do estado das culturas. Esta transformação não só melhora a eficiência das práticas agrícolas e vitícolas, mas também contribui para a sustentabilidade ao otimizar o uso de recursos e reduzir desperdícios.

Além disso, o processamento dedicado e a aplicação de IA têm permitido uma compreensão mais aprofundada dos dados recolhidos. Algoritmos de *machine learning*, como redes neurais e árvores de decisão, são baseados em modelos matemáticos que envolvem teoria dos grafos, otimização e análise estatística. As técnicas de análise preditiva ajudam a identificar padrões e prever eventos

¹ Sistema de cores R – Red, G – Green, B – Blue.

² Regra prática utilizada para determinar o momento ideal para aplicação de fungicidas no controlo do míldio da videira. Assim que a temperatura média das últimas 24 horas atingir os 10° C, tiver ocorrido uma acumulação de precipitação de 10 mm nas últimas 24 horas, e as videiras apresentarem pampas com cerca de 10 cm, o risco de infeção por míldio é elevado, sendo recomendada a primeira pulverização.

futuros, como a ocorrência de doenças ou a necessidade de rega, com um nível de precisão que seria impossível de alcançar com métodos tradicionais. Além disso, o processamento distribuído e a análise em tempo real envolvem a resolução de problemas matemáticos relacionados com a eficiência dos algoritmos e a gestão de grandes volumes de dados. Modelos matemáticos são utilizados para otimizar o desempenho dos algoritmos de processamento e para garantir que os sistemas possam operar de maneira eficiente sob restrições de tempo e de recursos.

Em jeito de conclusão, a integração de tecnologias emergentes na aquisição e no processamento de dados representa um marco na evolução das práticas agrícolas. A capacidade de utilizar sensores avançados, imagens de satélite e técnicas de processamento em tempo real com IA tem transformado a forma como os dados são utilizados para tomar decisões informadas e estratégicas.

O impacto positivo desta revolução é visível não apenas na eficiência e na precisão das práticas agrícolas, mas também na sustentabilidade e na capacidade de resposta às mudanças climáticas e aos desafios ambientais. As tecnologias de baixo custo têm democratizado o acesso a ferramentas de alta tecnologia, permitindo que pequenos e médios produtores também beneficiem dessas inovações.

No entanto, é crucial que os desenvolvimentos futuros continuem a focar-se na acessibilidade e na integração dessas tecnologias, garantindo que todos os tomadores e beneficiários destas tecnologias (*stakeholders*) possam aproveitar ao máximo os benefícios oferecidos. A colaboração entre matemáticos, engenheiros e profissionais do setor agrícola será essencial para maximizar o impacto positivo dessas inovações e para enfrentar os desafios emergentes no campo da agricultura e a viticultura de precisão, e aproveitar ao máximo as oportunidades oferecidas pelas tecnologias avançadas.

A evolução das tecnologias de aquisição e processamento de dados promete um futuro mais inteligente e sustentável para a agricultura, com decisões mais rápidas e informadas. A matemática é fundamental tanto para a tecnologia atual quanto para o desenvolvimento futuro, oferecendo técnicas avançadas que impulsionam a inovação e a eficiência. Assim, uma base matemática sólida é crucial para a evolução contínua das práticas agrícolas e para a criação de um setor mais sustentável.

REFERÊNCIAS

- [1] Mendes, J.; Peres, E.; Neves dos Santos, F.; Silva, N.; Silva, R.; Sousa, J. J.; Cortez, I.; Morais, R. "VineInspector: The Vineyard Assistant". *Agriculture* **2022**, 12, 730. <https://doi.org/10.3390/agriculture12050730>

SOBRE O AUTOR

Raul Morais dos Santos é professor catedrático no Departamento de Engenharia da Escola de Ciências e Tecnologia da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro (UTAD). As suas áreas de investigação estão centradas em dispositivos embebidos, redes de sensores sem fios, Internet das Coisas no contexto de agricultura de precisão, IA e plataformas de integração de dados. É investigador do Centro de Investigação e Tecnologias Agroambientais e Biológicas (CITAB) e coordena a Agenda Mobilizadora Vine & Wine do PRR na UTAD.

Secção coordenada pela PT-MATHS-IN, Rede Portuguesa de Matemática para a Indústria e Inovação pt-maths-in@spm.pt