

Desenvolvimento de sistema embarcado de coleta de dados para geração de mapas de produtividade

Development of an embedded system of data collection for generation of productivity maps

Paula Leticia Souza de Moura¹, Leticia dos Santos², Glaucio José Gomes³, Luciano Gebler⁴, Ricardo Sobjak⁵, Paulo Cesar Tonin⁶, Kelyn Schenatto⁷, Claudio Leones Bazzi⁸

¹ Estudante, Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Medianeira (PR), Brasil, paulamoura@alunos.utfpr.edu.br

² Estudante, Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Medianeira (PR), Brasil, leticinha.santos@hotmail.com

³ Pós-Doutorando, Departamento de Ciência da Computação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Medianeira (PR), Brasil, glauciogames@hotmail.com

⁴ Pesquisador, Embrapa Uva & Vinho, Estação Experimental de Fruticultura de Clima Temperado (EFCT), Vacaria (RS), Brasil, luciano.gebler@embrapa.br

⁵ Professor, Departamento de Ciência da Computação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Medianeira (PR), Brasil, ricardosobjak@utfpr.edu.br

⁶ Professor, Departamento de Ciência da Computação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Medianeira (PR), Brasil, pctonin@utfpr.edu.br

⁷ Professor, Departamento de Ciência da Computação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Medianeira (PR), Brasil, kschenatto@utfpr.edu.br

⁸ Professor, Departamento de Ciência da Computação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Medianeira (PR), Brasil, bazzi@utfpr.edu.br

RESUMO

Dada a expansão na utilização de áreas para agricultura, surge a necessidade de implantar estratégias eficientes em relação ao manejo do solo e da produtividade, devido às extensas áreas cultivadas. Nesse sentido, a agricultura de precisão oferece importantes ferramentas para detalhar e tratar áreas cultivadas com suas intrínsecas diferenças, isto é, gerenciar os insumos agrícolas pontualmente, de forma a atender as necessidades de diferentes culturas. Assim, a geoestatística possui um papel extremamente importante, permitindo o estudo da variabilidade espacial de uma determinada área por meio da coleta de dados e utilização de modelos matemáticos apropriados, podendo incluir o sistema de informações geográficas. A coleta desses dados, entretanto, no contexto de áreas de cultivo extensas, é um desafio que pode ser superado com auxílio de dispositivos eletrônicos de georreferenciamento, sistemas de armazenamento e leitura de informações, com objetivo de mapear a produtividade. Portanto, o presente trabalho se dedica ao desenvolvimento de um sistema/dispositivo embarcado na sacola de colheita do trabalhador que possibilita a coleta e armazenagem de dados de interesse, para análise geoestatística. O dispositivo eletrônico desenvolvido possui um receptor de sinal de sistema de posicionamento global, que coleta as coordenadas geográficas, um leitor de radiofrequência e um sistema de armazenamento dos dados em um cartão de memória micro SD, módulos interligados por meio de uma placa de circuito impresso e controlados por um módulo ESP32, no qual o software que implementa a leitura e o controle dos sinais foi realizado pelo IDE do Arduíno. O ESP32 possui tecnologia BLE ou *Bluetooth Smart*, favorecendo a redução de custos de transferência de dados, além do armazenamento em cartão micro SD. O equipamento foi previamente avaliado em testes de bancada e em experimentos de campo realizados sobre duas áreas de cultivo de maçãs. Os resultados da primeira fase experimental mostraram que o protótipo apresenta alta eficiência na coleta de dados de mobilidade, informando o posicionamento dos coletores e a identificação das caixas onde os frutos foram descarregados. Os dados coletados pelo protótipo, quando transferidos para o software FruitMap, permitiram construir mapas de produtividade. Contudo novos testes devem ser realizados no futuro em outras culturas, bem como o dispositivo

<https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000080>

 Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença *Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives*, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.

deve se tornar mais robusto, permitindo uma maior durabilidade frente a impactos sofridos no campo. Esse trabalho enfatiza a tendência de novas tecnologias de baixo custo para o cultivo de culturas colhidas manualmente, as quais vão permitir nos próximos anos uma maior geração de dados durante a colheita, impactando positivamente uma melhor tomada de decisão, para maximizar a produtividade de diferentes culturas energéticas e alimentares.

Palavras-chave: agricultura de precisão; sistema embarcado; geoestatística; produtividade.

ABSTRACT

Given the expansion in the use of areas for agriculture, there is a need to implement efficient strategies in relation to soil management and productivity, due to the extensive cultivated areas. Therefore, precision agriculture offers important tools for detailing and treating cultivated areas with their intrinsic differences, that is, managing agricultural inputs punctually, to meet the needs of different cultures. Geostatistics has an extremely important role, allowing the study of the spatial variability of a given area through data collection and use of appropriate mathematical models, which may include the geographic information system. The collection of these data, however, in the context of extensive areas of cultivation, are challenges that can be overcome with the aid of electronic devices for georeferencing, systems for storing and reading information, to map productivity. The present work aims to develop a device system embedded in the worker's collection bag that enables the collection and storage of data of interest for geostatistical analysis. The electronic device developed has a global positioning system signal receiver, which collects geographic coordinates, a radiofrequency reader, and a data storage system on a micro SD card. These modules were interconnected through a printed circuit board and were controlled through an ESP32 module, in which the software that implements the reading and control of the signals was performed by the Arduino IDE. The ESP32 has BLE or Bluetooth Smart technology, favoring the reduction of data transfer costs in addition to storage on a micro SD card. The equipment was previously evaluated in bench tests and in field experiments carried out in two apple growing areas. The results of the first experimental phase showed that the prototype presents high efficiency in collecting mobility data, informing the positioning of the collectors and the identification of the boxes where the fruits were unloaded. The data collected by the prototype when transferred to the FruitMap Software allowed the construction of productivity maps. However, new tests must be carried out in the future in other cultures, as well as the device must become more robust, allowing greater durability on the impacts suffered in the field. This work emphasizes the trend of new low-cost technologies for the cultivation of manually harvested crops, which will allow in the coming years a greater generation of data during the harvest that will positively impact on a better decision making to maximize the productivity of different energy crops and food.

Keywords: precision agriculture; embedded system; geostatistics; sustainability

1 INTRODUÇÃO

Devido ao aumento da população, a demanda por produtos vegetais aumentou e como em muitos países praticamente não há possibilidade de crescimento da área cultivada, a necessidade de aumentar a produção está diretamente relacionada ao uso intensivo de tecnologias e diferentes formas de manejo, mais adequados e que possibilitem a redução dos impactos ambientais causados ao meio ambiente (Fukase; Martin, 2020; Saath; Fachinello, 2018; van Dijk et al., 2021). Nesse sentido, o crescente desenvolvimento de sistemas agrícolas comerciais desempenha um papel importante no crescimento econômico brasileiro, resultando em um complexo desafio de escalar as culturas energéticas e alimentares de forma sustentável, garantindo um crescimento a longo prazo (Azevedo Junior; Rodrigues; Silva, 2022; Martinelli et al., 2010; Pellegrina, 2022). Assim, se faz necessário, resgatar a percepção da capacidade de identificar diferenças no solo e no relevo das áreas cultivadas em pequenas propriedades rurais nas quais as atividades agrícolas de ciclo curto ou semiperenes são realizadas de for-

ma manual, necessitando de tratamentos distintos. As transformações no cenário agrário, especialmente na expansão evidente de áreas destinadas à lavoura, lançam o desafio de adequar o manejo da não uniformidade a essas pequenas áreas de cultivo, visando a otimização da produtividade nas atividades de campo.

Para otimizar a sustentabilidade no campo, mitigando os impactos ambientais e maximizando a lucratividade, a agricultura de precisão (AP) oferece inúmeras decisões (corretas) por unidade de área de terra e por unidade de tempo, com benefício líquido associado (Cobbenhagen et al., 2021). Dessa maneira, entre os diversos aportes tecnológicos, a geoestatística inserida na AP trata do estudo da variabilidade espacial de uma determinada área por meio da coleta de dados e utilização de modelos matemáticos apropriados (Mulla, 2012). Assim, as coletas de dados de produtividade em áreas de cultivo extensas podem ser exploradas combinando dispositivos eletrônicos de georreferenciamento e sistemas de armazenamento e leitura de informações com o objetivo de mapear a produtividade (Bazzi et al., 2022; Betzek et al., 2019;

Dall’Agnol et al., 2020). Considerando que a eletrônica embarcada é amplamente aplicada a máquinas agrícolas (Abbasi et al., 2022; Boursianis et al., 2022), a quantidade de empresas brasileiras que de fato incorporam essa ferramenta de tecnologia da informação não é expressiva no mercado destinado a pequenos processos manuais de atividade agrícola. Nesse cenário nosso aporte à literatura apresenta o desenvolvimento de um sistema embarcado que permite realizar a coleta de dados de operações de colheitas manuais, a fim de gerar mapas de produtividade para o cultivo de diferentes culturas alimentares e energéticas.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O dispositivo eletrônico desenvolvido conforme o esquema apresentado na Figura 1 possui um receptor de sinal Global Position System (GPS) que coleta as coordenadas geográficas, um leitor Radio-Frequency Identification (RFID) e um sistema de armazenamento dos dados em cartão de memória micro SD.

Esses módulos foram interligados por meio de uma placa de circuito impresso (PCI), sendo controlados por um módulo ESP32 administrado por software que implementa a leitura e controle dos sinais por meio da IDE do Arduino. O ESP32 possui tecnologia *Bluetooth* já incorporada ao módulo, o que permite outra forma de transmissão de dados além do armazenamento em cartão micro SD.

Como o sistema inicialmente foi avaliado para testes em campo, a alimentação do hardware foi feita com duas baterias recarregáveis Íon de lítio Li-Ion, modelo 18650 de 4,2 V, com capacidade de carga de

9800 mAh cada, ligadas em paralelo para aumentar a autonomia do equipamento (Figura 1). Entretanto, a soma das capacidades individuais das baterias, que é conveniente para aumentar o tempo de funcionamento do dispositivo em campo, acarreta na necessidade reduzir a tensão de saída da ligação paralela para alimentar a PCI, que tem todos os módulos dependentes de alimentação em 3,3 V. Foi escolhido adicionar um diodo 1N4007, que, além de proporcionar a queda de 0,7 V de tensão, também auxilia na proteção do circuito da PCI, evitando correntes reversas em possível troca de polaridade na fonte de alimentação. Assim, a tensão de saída do circuito de alimentação foi alterada de 4,2 V para 3,3 V. Essa escolha se deve a baixa eficiência de conversão dos circuitos integrado (CI) 1117 normalmente utilizados para essa finalidade, evitando perdas desnecessárias de potência na adequação da tensão de alimentação da PCI. Isso interfere diretamente na eficiência energética do sistema como um todo, que não dissipará tanta potência na forma de calor, possibilitando maior tempo de autonomia do dispositivo.

Além disso, para proporcionar a recarga segura do equipamento, foram adicionados módulos TP4054, responsáveis por regular o carregamento das baterias, evitando a carga acima da capacidade nominal das baterias, que a longo prazo diminui sua vida útil. Essa proteção é imprescindível, visto que as baterias são sensíveis ao manuseio incorreto e correspondem também ao maior custo financeiro do sistema. Por fim, para garantir a conexão correta da fonte de carregamento, foi adicionado um conector Jack P4, que será coberto com borracha de vedação removível, de forma a proteger o

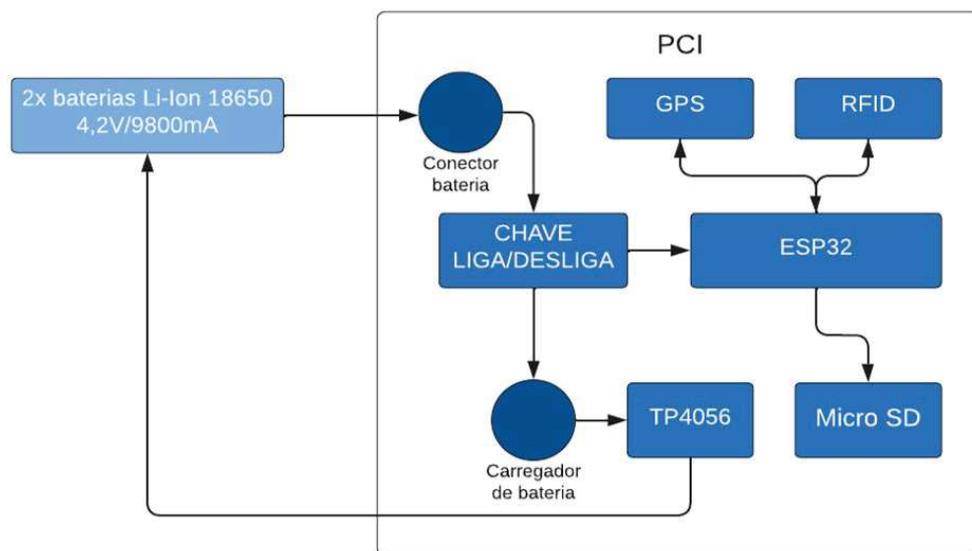


Figura 1. Esquema de diagrama de blocos do equipamento desenvolvido.

equipamento de umidade e poeira, uma vez que o equipamento ficará exposto ao ar livre em campo.

O circuito do protótipo foi desenvolvido em software ECAD (*Electronic Computer-Aided Design*) dedicado para projetar estruturas eletrônicas, conforme ilustra a Figura 2. Esse arquivo guia o desenho da placa de circuito impresso (Figura 2a). Um layout para a PCI do sistema embarcado pode ser observado na Figura 2b. A projeção das trilhas (Figura 2c) pode ser vista em uma das faces da PCI, que foi gravada em uma CNC (*Computer Numeric Control*) de circuitos impressos em uma placa de fibra de vidro cobreada.

O layout foi projetado para confecção em placa de fibra de vidro com revestimento em cobre dupla face. Isso reduz as medidas totais da PCI e possibilita o enclausuramento da eletrônica embarcada em uma caixa patola de modelo PBR-100 (Figura 3). Desse modo, o projeto ganha proporções relativamente pequenas,

que não atrapalham o trabalho dos funcionários que utilizarão o dispositivo durante a colheita.

A fixação do protótipo desenvolvido nas sacolas de colheita foi realizada por meio de uma presilha fixadora de cinto de segurança, comumente utilizada para ajustar os cintos de segurança automotivos para crianças. Essa presilha (Figura 3a) possui medidas adequadas para atender as dimensões do modelo de caixa (Figura 3b) nesse projeto. Isso possibilita o enclausuramento da eletrônica embarcada em uma caixa patola, garantindo a proteção do circuito contra umidade, poeira e impactos causados pelo usuário no momento da coleta de frutas. A confecção do projeto final apresentou um custo total de aproximadamente R\$ 303,19 (podendo variar conforme cotação realizada em julho de 2022).

Por fim, um circuito para teste em bancada foi executado para certificar o funcionamento da integração

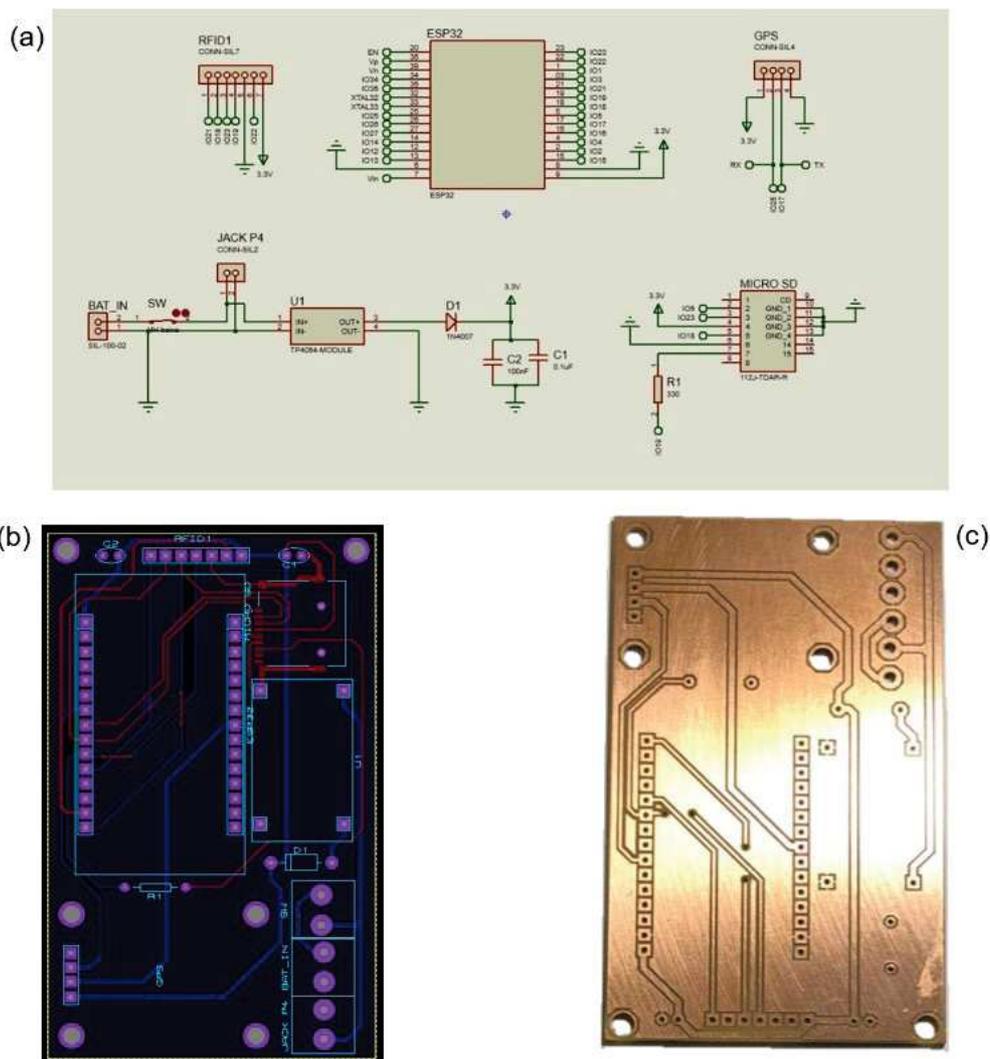


Figura 2. (a) Circuito esquemático para a PCI do sistema embarcado; (b) Layout para a PCI do sistema embarcado; (c) Foto de um lado da PCI do sistema embarcado.

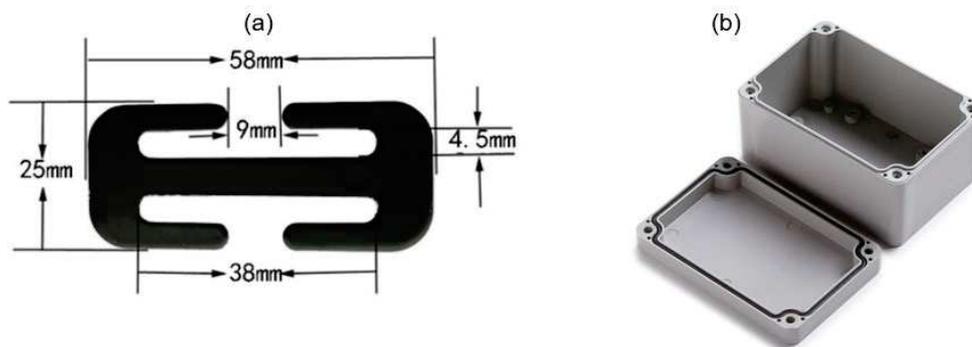


Figura 3. (a) Presilha fixadora de cinto de segurança; (b) Caixa patola modelo PBR-100.

do hardware com o código elaborado no ambiente de desenvolvimento Arduino IDE para o ESP32, como mostrado na Figura 4.

Nessa etapa todos os componentes eletrônicos foram avaliados para quantificar todos os problemas referentes a anomalias que poderiam ocorrer em campo experimental e a duração da alimentação de energia para o ótimo funcionamento do sistema. Em seguida foi realizada a montagem final do protótipo, sendo o mesmo replicado para eventuais testes em condições de trabalho.

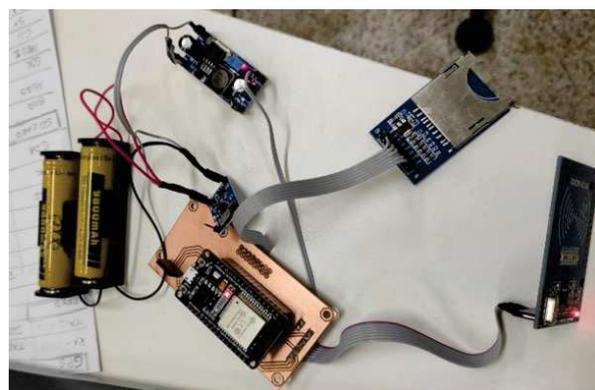


Figura 4. Circuito de teste em bancada de laboratório.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

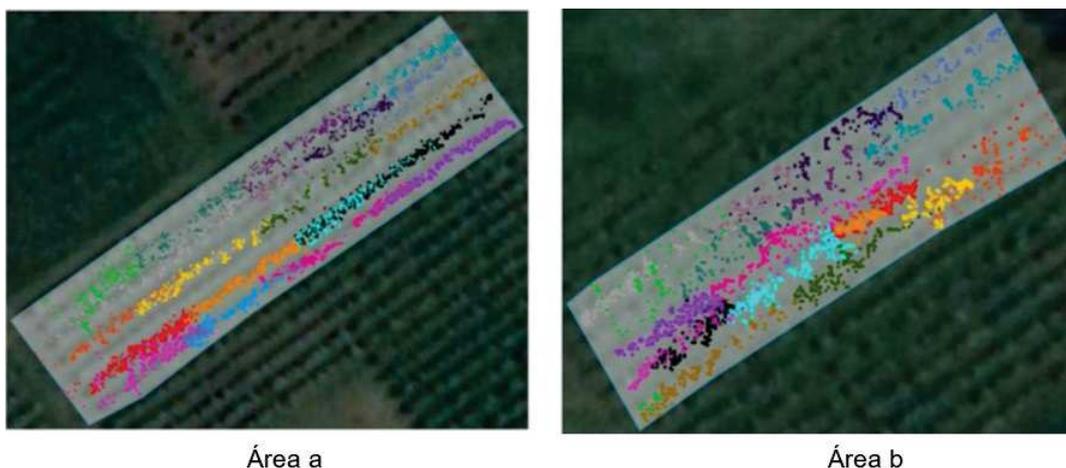
Para os testes preliminares de campo em condições de operação os protótipos (dispositivo desenvolvido) apresentavam um número de identificação e foram acoplados a sacolas de coleta de maçãs utilizadas por funcionários (conforme descrito no item anterior), que realizam a colheita manual dos frutos. Os frutos colhidos foram descarregados em caixas previamente identificadas a partir de um cartão RFID, com seu respectivo número. No momento da descarga feita pelo funcionário, o módulo RFID do equipamento presente na sacola recebe o sinal do cartão RFID acoplado à caixa. Assim, um registro em arquivo de texto armazena os dados no cartão de memória micro SD, permitindo posteriormente a identificação do número da caixa e quantidade de descarregamentos feitos nela. O receptor GPS também fornece leitura do posicionamento (latitude e longitude) do funcionário em intervalos de tempo determinados, bem como a data e hora corrente no momento da coleta. Esses dados foram importados para um sistema de armazenamento e utilizados para geração de mapas temáticos de produtividade.

A análise geoestatística em sua essência contém como característica principal o semivariograma. Nesse sentido, a AgDataBox API processa as representações

gráficas, sendo que a primeira envolveu os 12 (doze) melhores modelos que foram selecionados durante as comparações efetuadas pela API (exponencial, esférico e gaussiano) (Bazzi et al., 2019). O sistema apresenta uma tabela contendo todos os registros das análises realizadas, sendo as informações (código, modelo e método, contendo os valores de ICE, de contribuição, de alcance, erro médio, desvio padrão e o valor da ISI) armazenadas e processadas requisitando-se a API para a interpolação de dados pelo método de krigagem ordinária (KRI) (Chilès; Desassis, 2018; Wackernagel, 1995).

Testes experimentais foram realizados em Vacaria, RS, Brasil, em duas áreas de cultivo de maçã. Após a etapa de colheita e processamento dos dados coletados no campo, foi possível gerar um layout geográfico dos dados obtidos por meio do sistema embarcado, conforme mostra a Figura 5.

Cada ponto colorido representa uma posição obtida pelo aparelho no momento em que a colheita estava sendo realizada em relação ao bin central que está recebendo as frutas da sacola de colheita instrumentada naquele momento. As diferentes cores representam que os dispositivos deixam de reconhecer o bin



Área a

Área b

Figura 5. Representação gráfica dos mapas de mobilidade dos colhedores referente à colheita ocorrida nos dias 16 a 17 de janeiro de 2020 no talhão. Cada cor observada nas áreas A e B indica o grupo de dados centralizados em um mesmo bin de colheita e sua nuvem de pontos, que demonstra a mobilidade e localização das sacolas de colheita de maçã contendo o dispositivo eletrônico. Mudança de cores indica que o dispositivo detectou que passou a contribuir com o bin seguinte no pomar.

Fonte: (Bazzi et al., 2022).

1	ID_EQUIPAMENTO	ID_CAIXA	DATA	HORA	LONGITUDE	LATITUDE
2	0004	00000	17/01/2020	10:40:23	-50.881943	-28.515100
3	0004	00000	17/01/2020	10:40:28	-50.881874	-28.515156
4	0004	00000	17/01/2020	10:40:31	-50.881874	-28.515156
5	0004	00000	17/01/2020	10:40:34	-50.881874	-28.515156
6	0004	00001	17/01/2020	10:40:36	-50.881874	-28.515156
7	0004	00000	17/01/2020	10:40:39	-50.881874	-28.515156
8	0004	00000	17/01/2020	10:40:42	-50.881889	-28.515165
9	0004	00000	17/01/2020	10:40:45	-50.881889	-28.515186
10	0004	00000	17/01/2020	10:40:48	-50.881889	-28.515186
11	0004	00002	17/01/2020	10:40:50	-50.881748	-28.515207

Figura 6. Conjunto de dados coletados pelo sistema, sendo ID_equipamento o número do dispositivo embarcado na sacola; ID caixa é o número do bin que está recebendo a fruta da daquela sacola; Data e hora são setadas para coleta de dados a cada 5 segundos; Longitude e latitude em UTM.

Fonte: Bazzi et al., 2022.

inicialmente receptor das frutas quando as sacolas passam a ser contribuintes dos demais bins de colheita, pois ao se aproximarem dos bins instrumentados, o código identificador é alterado no banco de dados. Observa-se que existe na imagem uma sobreposição de pontos, esse efeito ocorre devido à quantidade de funcionários transportando o sistema embarcado em uma mesma linha de colheita, devido ao processo de colheita simultânea realizada por inúmeros funcionários. Todavia, em trabalhos futuros, o sistema deve ser otimizado para minimizar esse problema e permitir maior visibilidade da mobilidade sobre a área processada, permitindo a melhor identificação de pontos com sobreposição.

O sistema desenvolvido fazendo uso de tecnologias computacionais é capaz de armazenar os dados de colheita de culturas perenes (Figura 6), coletados por meio de um dispositivo eletrônico de rastreamen-

to, e executar diferentes métodos de interpolação que podem representar e estimar a produtividade de uma determinada área (Figura 7). O cálculo da estimativa da produtividade é executado a partir de um conjunto de dados que representam uma amostra referente aos dados de colheita. Por meio da integração do sistema com a AgDataBox API foi possível realizar análises geoestatísticas dos dados, bem como a geração de mapas de produtividade, fazendo uso de métodos tradicionais como a KRI (Bazzi et al., 2019, 2022),

Na Figura 6 são apresentados, da esquerda para a direita, os mapas de pontos amostrais e o mapa de produtividade interpolado pelo método (KRI). O mapa temático gerado possui uma legenda e é dividido em uma escala de três classes de cores diferentes, para representar o intervalo de valores relacionados. Essa informação torna-se importante por facilitar a interpretação das informações coletadas pelo usuá-

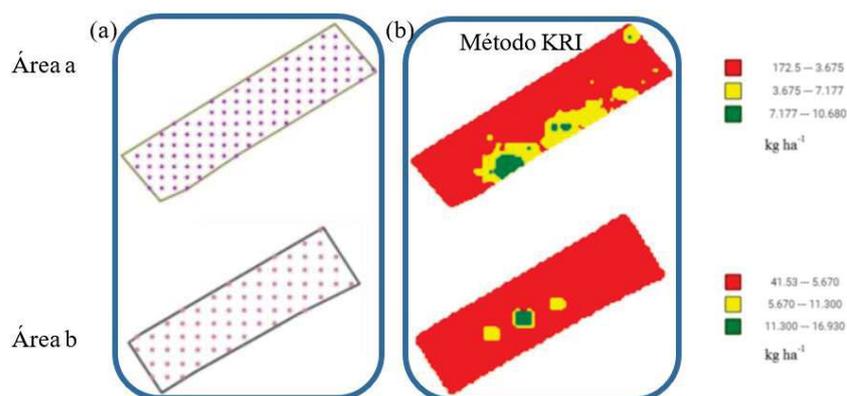


Figura 7. (a) Representação gráfica dos mapas de pontos amostrais; (b) Representação gráfica dos mapas de produtividade interpolados pelo método de krigagem ordinária, referente à colheita ocorrida nos dias 16 a 17 de janeiro de 2020 no talhão
Fonte: Bazzi et al., 2022.

rio do sistema. Dessa forma, os pontos de maior e menor produtividade podem ser analisados para a otimização da produção de diferentes culturas. Contudo, foi demonstrado em um recente trabalho utilizando a primeira fase do dispositivo desenvolvido o uso de dois métodos para gerar o mapa de produtividade, demonstrando que a maior precisão para a formação das imagens temáticas é altamente dependente dos conjuntos de dados espaciais coletados (Bazzi et al., 2022). Mesmo assim, observando-se o mapa de produtividade (Figura 6b), notamos que as áreas de maior produtividade (representada na cor verde) curiosamente se encontram em posições de maior sobreposição identificadas pelo protótipo desenvolvido (ver Figura 5), sugerindo que, além do método, a quantidade de pontos amostrais e a precisão do equipamento que realiza a coleta de dados são extremamente importantes para dar maior robustez e qualidade do tratamento das informações coletadas em campo.

Nessa primeira fase de desenvolvimento do protótipo identificou-se a dificuldade de transferir os dados in loco uma vez que eles eram armazenados em um micro SD. Para contornar essa lacuna, a solução foi realizar a comunicação via Bluetooth, que ocorre no atual dispositivo de forma satisfatória, sem a necessidade de desmontar ou abrir o equipamento para resgatar os dados coletados. Testes de resistência a impacto necessitam ser realizados, assim como da maior duração de autonomia de energia, uma vez que o mesmo dispositivo deve ser capaz de fornecer as informações na colheita sem manutenção ou reparo para trocas de baterias. Trabalhos futuros dedicados no aprimoramento do protótipo tendem a estudar a eficiência na maior precisão da coleta e transferência de dados, dessa forma, testes com maior duração em campo para outras culturas irão potencializar o uso e identificar novos desafios que possam reduzir o tem-

po nas estratégias de colheita e produção, visando a sustentabilidade do ecossistema.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse estudo inicial desenvolveu-se um sistema embarcado que possibilita a coleta e armazenagem de dados de interesse de produtividade, para análise de geoestatística. O sistema embarcado desenvolvido permite realizar coleta e armazenamento de dados que serão utilizados, posteriormente, para a construção de mapas temáticos por meio do uso do AgDataBox API. Isso foi possível por meio dos mecanismos de georreferenciamento e identificação das caixas que recebem a colheita de maçãs. Além disso, o planejamento do hardware para a especificação de longa autonomia possibilitará o uso do equipamento em campo com previsão de duração de carga das baterias por 24 h. Espera-se, assim, facilitar o procedimento de colheita dos frutos em campo sem interrupção do trabalho.

Observou-se que para aumentar a eficiência do projeto a comunicação sem fio BLE (*Bluetooth Low Energie*) do ESP32 se faz necessária, sendo essa utilizada na rotina de programação. Isso permite que o protótipo entre em modo de economia de energia (*sleep*), fazendo com que o sistema possa ficar desativado por um determinado tempo. Essa tecnologia foi desenvolvida para auxiliar aplicações que necessitam enviar poucas informações e economizar energia, alinhando-se à proposta desse projeto de desenvolvimento.

Testes de campo previamente realizados mostraram que o dispositivo possui boa reprodutibilidade e alta eficiência no fornecimento de dados de mobilidade. Contudo, para maximizar o dispositivo, pretende-se em pesquisas futuras desenvolver modelos capazes de identificar quais regiões da área cultivada são

mais produtivas, de modo a melhorar o manejo de insumos e recursos humanos no talhão. Assim, identificamos por meio do desenvolvimento desse sistema que as inovações tecnológicas no campo possibilitam aumentar a produtividade e auxiliam o monitoramento da colheita manual em tempo real, gerando novas tomadas de decisão com maior velocidade no campo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao Parque Tecnológico Itaipu – FPTI/BR pelo aporte financeiro e a concessão de bolsas de estudo. E à Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Medianeira pelo suporte referente à pesquisa desenvolvida.

REFERÊNCIAS

- Abbasi, R.; Martinez, P.; Ahmad, R. The digitization of agricultural industry – a systematic literature review on agriculture 4.0. **Smart Agricultural Technology**, v. 2, p. 100042, 2022. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100042>.
- AZEVEDO JUNIOR, W. C.; Rodrigues, M.; Silva, D. C. C. Does agricultural efficiency contribute to slowdown of deforestation in the Brazilian Legal Amazon? **Journal for Nature Conservation**, v. 65, p. 126092, 2022. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jnc.2021.126092>.
- Bazzi, C. L.; JASSE, E. P.; MAGALHÃES, P. S. G.; MICHELON, G. K.; SOUZA, E. G.; SCHENATTO, K.; SOBJAK, R. AgDataBox API – Integration of data and software in precision agriculture. **SoftwareX**, v. 10, p. 100327, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.softx.2019.100327>.
- Bazzi, C. L.; MARTINS, M. R.; CORDEIRO, B. E.; GEBLER, L.; SOUZA, E. G.; SCHENATTO, K.; PAULA FILHO, P. L.; SOBJAK, R. Yield map generation of perennial crops for fresh consumption. **Precision Agriculture**, v. 23, n. 2, p. 698-711, 2022. DOI: <http://doi.org/10.1007/s11119-021-09855-2>.
- Betzek, N. M.; SOUZA, E. G.; BAZZI, C. L.; SCHENATTO, K.; GAVIOLI, A.; MAGALHÃES, P. S. G. Computational routines for the automatic selection of the best parameters used by interpolation methods to create thematic maps. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 157, p. 49-62, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.004>.
- Boursianis, A. D.; PAPADOPOULOU, M. S.; DIAMANTOULAKIS, P.; LIOPA-TSAKALIDI, A.; BAROUCHAS, P.; SALAHAS, G.; KARAGIANNIDIS, G.; WAN, S.; GOUDOS, S. K. Internet of Things (IoT) and Agricultural Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in smart farming: a comprehensive review. **Internet of Things**, v. 18, p. 100187, 2022. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100187>.
- Chilès, J.-P.; Desassis, N. Fifty years of kriging, In: DAYA SAGAR, B. S.; CHENG, Q.; AGTERBERG, F. (eds.). **Handbook of mathematical geosciences: fifty years of IAMG**. Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 589-612. DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-319-78999-6_29.
- Cobbenhagen, A. T. J. R.; ANTUNES, D. J.; VAN DE MOLENGRAFT, M. J. G.; HEEMELS, W. P. M. H. Opportunities for control engineering in arable precision agriculture. **Annual Reviews in Control**, v. 51, p. 47-55, 2021. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2021.01.001>.
- Dall'Agnol, R. W.; MICHELON, G. K.; BAZZI, C. L.; MAGALHÃES, P. S. G.; SOUZA, E. G.; BETZEK, N. M.; SOBJAK, R. Web applications for spatial analyses and thematic map generation. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 172, p. 105374, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105374>.
- Fukase, E.; Martin, W. Economic growth, convergence, and world food demand and supply. **World Development**, Oxford, v. 132, p. 104954, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.worlddev.2020.104954>.
- Martinelli, L. A.; NAYLOR, R.; VITOUSEK, P. M.; MOUTINHO, P. Agriculture in Brazil: impacts, costs, and opportunities for a sustainable future. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 2, n. 5-6, p. 431-438, 2010. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.cosust.2010.09.008>.
- Mulla, D. J. Modeling and mapping soil spatial and temporal variability. In: LIN, H. (ed.). **Hydropedology**. Boston: Academic Press, 2012. chap. 20, p. 637-664. DOI: <http://doi.org/10.1016/B978-0-12-386941-8.00020-4>.
- Pellegrina, H. S. Trade, productivity, and the spatial organization of agriculture: Evidence from Brazil. **Journal of Development Economics**, v. 156, p. 102816, 2022. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2021.102816>.
- Saath, K. C. O.; Fachinello, A. L. Crescimento da demanda mundial de alimentos e restrições do fator terra no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 56, n. 2, p. 195-212, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1590/1234-56781806-94790560201>.
- Van Dijk, M.; MORLEY, T.; RAU, M. L.; SAGHAI, Y. A meta-analysis of projected global food demand and population at risk of hunger for the period 2010-2050. **Nature Food**, v. 2, n. 7, p. 494-501, 2021. DOI: <http://doi.org/10.1038/s43016-021-00322-9>.
- Wackernagel, H. Ordinary kriging, In: WACKERNAGEL, H. (ed.). **Multivariate geostatistics: an introduction with applications**. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1995. p. 74-81. DOI: http://doi.org/10.1007/978-3-662-03098-1_11.