

DESEMPENHO DO PACOTE DE PLANEJAMENTO DE TRAJETÓRIAS FIELDS2COVER EM TALHÕES IRREGULARES E IDENTIFICAÇÃO DE POSSÍVEIS MELHORIAS

ENZO FABRÍCIO CASCIELLO¹, JOSÉ PAULO MOLIN²

¹ Eng^o Agrônomo, Produtor Rural, ESALQ, USP, Piracicaba – SP

² Eng^o Agrícola, Professor Titular do Departamento de Eng. de Biosistemas, ESALQ, USP, Piracicaba – SP.

Apresentado no
Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão e Digital- ConBAP 2024
Ribeirão Preto, RS, 02 a 04 de julho de 2024

RESUMO: Este trabalho investiga o desempenho do Fields2Cover, uma biblioteca de código aberto voltada ao planejamento de trajetórias para cobertura (CPP) em ambientes agrícolas. Embora existam numerosas abordagens automatizadas em CPP para veículos agrícolas em superfícies planas, a literatura carece de soluções com código aberto que permitam análise e adição de novas funcionalidades. O objetivo deste trabalho foi analisar as limitações do Fields2Cover em talhões irregulares e declivosos, comuns especialmente no centro-sul do Brasil, já que a biblioteca em questão gera apenas percursos retilíneos e não apresenta funções de análise tridimensional do terreno. As simulações foram comparadas à geração de linhas de tráfego *in-situ* por consultores, demonstradas em mapas com sobreposições entre os dois padrões de trajetórias. Os resultados demonstram que o algoritmo enfrenta problemas na interpretação de linhas de perímetro em talhões recortados, e consequentemente apresenta dificuldades em gerar percursos que se adaptem a esta realidade. As divergências com trajetórias controle podem ser minimizadas interagindo com o ângulo das linhas de tráfego simuladas, porém gerando percursos que fogem dos limites do talhão. Futuras investigações focando em agregar melhorias ao Fields2Cover, especificamente na leitura de perímetros recortados que permitam o ajuste no ângulo do percurso, ou que habilitem modelagem tridimensional do terreno, podem ser caminhos para tornar esta biblioteca mais robusta, abrangente e usável.

PALAVRAS-CHAVES: Tráfego controlado, planejamento de trajetórias, software aberto

PERFORMANCE OF THE FIELDS2COVER PATH PLANNING LIBRARY ON UNEVEN FIELDS AND IDENTIFICATION OF POSSIBLE IMPROVEMENTS

ABSTRACT: This study investigates the performance of Fields2Cover, an open-source library for coverage path planning (CPP) in agricultural environments. While there are numerous automated CPP approaches for agricultural vehicles on flat surfaces, open-source solutions that allow for analysis and the addition of new functionalities are lacking in the literature. The goal of this work was to analyze the limitations of Fields2Cover on uneven and sloping fields, prevalent mostly in the mid-south region of Brazil, given that the program generates straight paths only and lacks functions for three-dimensional terrain analysis. Simulations were compared to in-situ traffic line generation by consultants, demonstrated on maps with overlays between the two trajectory patterns. The results

show that the algorithm struggles with interpreting perimeter lines on fragmented fields, consequently facing difficulties in generating paths that adapt to this reality. Divergences with control trajectories can be minimized by interacting with the angle of the simulated traffic lines, yet doing so generates paths that deviate from the field limits. Future investigations focusing on adding improvements to Fields2Cover, specifically in reading fragmented perimeters that allow for adjusting the path angle, or that enable three-dimensional terrain modeling, can be avenues to making this library more robust, comprehensive, and usable.

KEYWORDS: Controlled traffic, trajectory planning, open-source software

INTRODUÇÃO: Os constantes avanços em tecnificação e exigência por sustentabilidade na agricultura requerem maior controle das operações mecanizadas realizadas em campo (Blackmore, 2003). Uma das chaves para a eficácia da mecanização da agricultura é a capacidade de planejar trajetórias de cobertura, que garantam o atendimento completo das lavouras (Choset, 2001). Devido à crescente adoção de veículos semiautônomos e equipamentos de alta precisão no setor agrícola, a necessidade de estabelecer estratégias eficientes de controle de tráfego para prevenir colisões, otimizar a eficiência operacional e prevenir o amassamento da cultura em área total é clara (Pedersen, 2018). Trabalhos realizados que buscaram entender os motivos causadores de baixa eficiência operacional de veículos agrícolas em talhões irregulares, resultando em lucratividades baixas ou negativas, destacam diferentes fatores para cada cultura, como manobras de cabeceira em canaviais e áreas de sobreposição de aplicação em culturas de algodão (Spekken, 2015). Fatores como inclinação, que afetam na capacidade de manobra dos veículos, também afetam a qualidade do solo e sua susceptibilidade à erosão. Estudos seguintes (Spekken et al., 2016) buscaram unir o planejamento de rotas para veículos agrícolas em áreas de declive com as curvas de nível, visando reduzir perdas de solo por erosão por meio da otimização das linhas de tráfego. O Fields2Cover (F2C), proposto por Mier, Valente e de Bruin (2023), utiliza aspectos da decomposição por células e representa um avanço considerável no campo do planejamento de trajetória para cobertura (CPP – *coverage path planning*) para a agricultura, no sentido que é um software de arquitetura modular e de código aberto. Os programas publicados e disponíveis até então não revelavam seu código fonte, limitando sua aplicação à entidade desenvolvedora. O design modular permite a adição de novas funcionalidades à biblioteca, expandindo em cima de funções já programadas. Sua abordagem baseada na decomposição de campos agrícolas em células, seguida pela determinação de uma rota ótima para a cobertura, oferece uma solução prática e eficiente para a tarefa de planejamento de trajetórias. No entanto, este algoritmo foi projetado e testado principalmente para cenários agrícolas de terrenos planos, deixando questões não respondidas sobre a sua eficácia em terrenos declivosos. Como a biblioteca em questão foi construída no cenário holandês, testada e calibrada em terrenos locais, planos e com bordas pouco recortadas, espera-se observar divergências quando utilizada em talhões agrícolas brasileiros caracterizados por sua declividade e geometrias complexas.

O objetivo do presente trabalho é compreender as funcionalidades, identificar limitações e sugerir áreas de melhora à biblioteca Fields2Cover, para que sua proposta de CPP seja condizente em áreas declivosas e com talhões caracterizados por polígonos irregulares. A análise do algoritmo, tendo em vista a característica tridimensional das áreas agrícolas, será quanto ao entendimento dos dados de saída quanto à geração de linhas de tráfego, com foco na perpendicularidade relativa ao declive.

MATERIAL E MÉTODO: Inicia-se por descompactar o repositório disponibilizado na [página do GitHub](#) dedicada ao programa, na aba ‘Code’ e ‘Download ZIP’, encontra-se a pasta ‘src’ (*source code*), contendo o código fonte do algoritmo. O usuário deve inserir parâmetros do veículo e o perímetro do talhão, via arquivo xml, para então dar início ao gerador de áreas de cabeceira, seguido da criação de percursos ao longo do talhão,

definição da ordem e direção destes percursos e então a junção das rotas por meio das manobras de cabeceira, dando lugar à trajetória a ser seguida pelo veículo.

O programa foi desenhado e testado com o robô AgBot 5.115T2, de proporções muito distintas das máquinas e implementos utilizados no Brasil. Com raio de giro de apenas 2,1 m, se aproxima apenas a pulverizadores e distribuidores de sólidos autopropelidos com sistema de esterço também no rodado traseiro. Entretanto, o programa dispõe de um tipo de curva (Reeds-Shepp) que permite ré, se adaptando melhor a implementos acoplados ou máquinas autopropelidas. Também é possível alterar o raio de giro na customização dos parâmetros da máquina, modificando o tipo de manobra e área destinada a ela.

Para utilizar a biblioteca do F2C através do terminal, em Python, deve-se importar um arquivo .xml de estrutura idêntica ao [arquivo teste](#) utilizado na biblioteca. Este arquivo deve conter coordenadas que descrevam o perímetro do polígono do talhão que se deseja realizar a simulação de trajetórias. Outros formatos de arquivo não são suportados pelo pacote, então conversões podem ser necessárias.

Uma vez importado o arquivo .xml customizado, é necessária a inserção dos dados da máquina/implemento (Figura 1).

```
robot = f2c.Robot(2.0, 6.0);
robot.setMinRadius(2.0);
const_hl = f2c.HG_Const_gen()
no_hl = const_hl.generateHeadlands(field.field, 3.0 * robot.robot_width)
```

Figura 1. Especificações a serem inseridas (Fonte: [Tutorial Fields2Cover](#))

A primeira linha atribui, respectivamente, os valores de largura efetiva e largura de trabalho da máquina/implemento. A segunda linha se refere ao raio mínimo de giro da máquina, e a quarta linha atribui a largura da área de cabeceira, neste caso multiplicando a largura efetiva da máquina por 3, porém com possibilidade de ser customizada a um valor fixo.

Os dados de saída após execução do F2C são pontos com coordenadas do sistema geográfico SRC EPSG:4326 (WGS 84), apresentadas em uma coluna na barra do terminal. Os dados de latitude e longitude, separados por vírgula, representam as linhas das trajetórias criadas pelo programa. Este tipo de resultado torna a visualização dos dados difícil quando se busca entender a relação das trajetórias de tráfego com o talhão trabalhado. Nota-se que não é possível interagir com o tipo de trajetória criada, apenas com os parâmetros de máquina/implemento e largura de áreas destinadas a manobras de cabeceira internas ao talhão. O modelo possui uma função que busca a melhor trajetória automaticamente, de modo a minimizar as distâncias e evitar sobreposições, impossibilitando a interação por parte do usuário na orientação dos percursos.

Para alterar e interagir com os parâmetros de planejamento de trajetórias do F2C, os autores apontam que a biblioteca é compatível com a interface gráfica ROS 1 e ROS 2 (Robot Operating System), utilizada para muitas funções no meio da robótica. Entretanto, as instruções fornecidas para realizar esta compatibilização são escassas. Há informações sobre como compilar a interface, porém não sobre como usá-la ou exportar os dados gerados de talhões do F2C. No presente trabalho, foi feita a [instalação](#) do sistema ROS 1, e então foram adquiridas todas as dependências necessárias por meio da interação por barra de comando, onde os itens remanescentes necessários são indicados na mensagem de erro do terminal. Especial atenção deve ser dada ao download de cerca de 500MB do visualizador 3D rviz, que é o sistema gráfico em si, dado o tamanho do pacote. De modo geral, as mensagens de erro não são claras sobre os itens restantes e como prosseguir com a compilação. Uma vez instalada e funcional, deve-se utilizar o comando **roslaunch fields2cover_ros view_field.launch** para realizar uma demonstração.

Obtiveram-se talhões específicos do município de Dois Irmãos do Tocantins, TO, disponíveis com dados de linhas de tráfego gerados por consultores com conhecimento local da área. Como o objetivo da investigação é analisar o desempenho do pacote Fields2Cover em terrenos irregulares, a região do oeste tocantinense foi escolhida dado o seu relevo acidentado e talhões recortados.

O equipamento utilizado na operação de semeadura projetada por consultoria, considerada controle, é uma semeadora de 15 linhas e espaçamento de 0,45 m entre linhas, possuindo 6,75 m de largura efetiva. Como as linhas de tráfegos controle foram projetadas para permanecerem em uma mesma cota, o desnível dentro de um

mesmo percurso de sementeira é considerado negligível. O percurso trafegável ininterrupto de maior extensão possui 1990 m e o de menor extensão é de 17 m. A área total dos talhões considerados é de 544 ha, sendo a cota máxima de 220 m e a mínima de 195 m.

Conforme descrito anteriormente, o raio de giro do AgBot utilizado para calibrar o programa possui capacidade de manobra distinta de um conjunto trator e sementeira de arrasto, como foi o caso nos talhões analisados. Uma vez que as linhas de tráfego controle não possuem a previsão de tráfego referente às manobras de cabeceira, este comparativo não é feito. Se contrastam, então, os percursos internos ao talhão que tem como objetivo a cobertura da área cultivada na operação de sementeira.

A Figura 2 traz um mapa dos talhões utilizados neste estudo para realização dos comparativos.

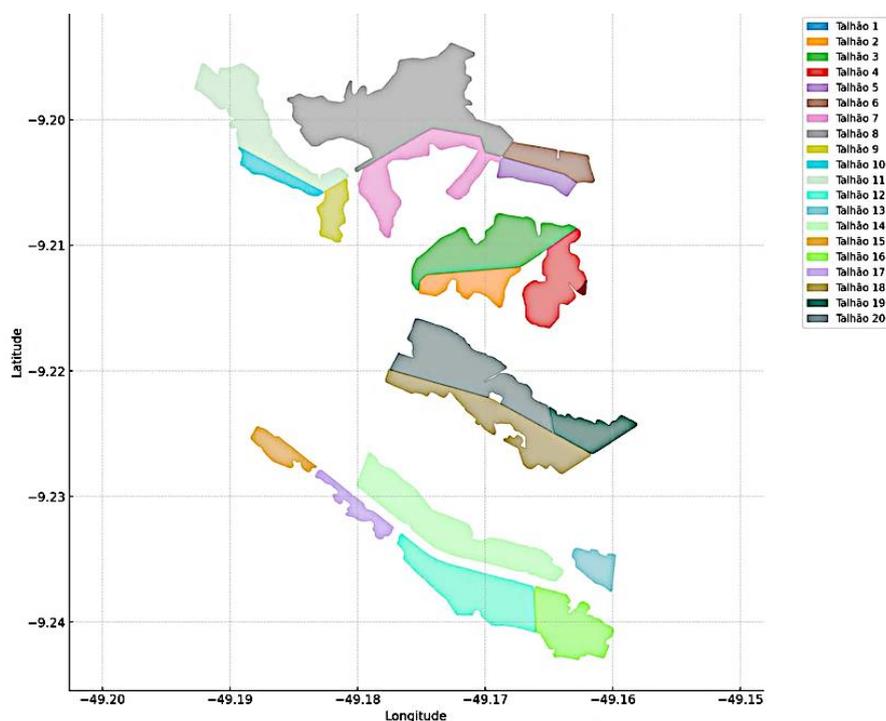


Figura 2. Disposição dos talhões utilizados no estudo

As funcionalidades do programa utilizadas para compará-lo com as linhas de tráfego estabelecidas *in-situ* foram quanto à capacidade de customização permitida, especificamente para que as linhas de tráfego se mantenham o mais perpendicular possível à pendente de inclinação. Este critério foi assumido uma vez que o pacote não suporta arquivos que descrevam a declividade do terreno, como tampouco o arquivo de saída gerado. Além disso, a função de otimização para maior comprimento do percurso e minimização de áreas de sobreposição foram testadas, para realização de interpretação do grau de semelhança atingido com os percursos pré-estabelecidos. De maneira a visualizar a relação entre os dados de saída da biblioteca Fields2Cover, foi realizada uma exportação das listas de coordenadas e conversão à arquivos CSV (Comma-separated values / valores separados por vírgulas), contendo uma única coluna, em que cada linha representa um ponto. Estes arquivos foram processados para representar graficamente as linhas de trajetória geradas pelo programa, e então sobrepostas às linhas de tráfego controle, de modo a se ter um mapa que permita uma fácil visualização das divergências.

A interface ROS, com o plugin rqt instalado (conforme [guia de instalação](#)), permite uma interação com as rotas geradas em que é possível alterar o ângulo das linhas de tráfego. Também é possível alterar os parâmetros da máquina/implemento, como a largura operacional, largura da área de arremate e raio mínimo de giro, e observar em tempo real as alterações realizadas no mapa da trajetória. Entretanto, os dados de saída deste software se limitam a arquivos *rviz*, sendo apenas uma demonstração gráfica sem geração dos dados das

trajetórias de tráfego criadas. Desta maneira, apenas foi possível obter-se imagens demonstrativas da interação com a interface.

RESULTADOS E DISCUSSÃO: A junção de pontos das coordenadas de saída do programa, formando a trajetória de cobertura dos talhões com o Fields2Cover então sobrepostos às linhas de tráfego controle, estabelecidas previamente por meio de análise altimétrica do terreno para tráfego em nível, são apresentadas nos mapas da Figura 3, como exemplos. São destacadas as diferenças entre o controle e as linhas de tráfego obtidas a partir do Fields2Cover.

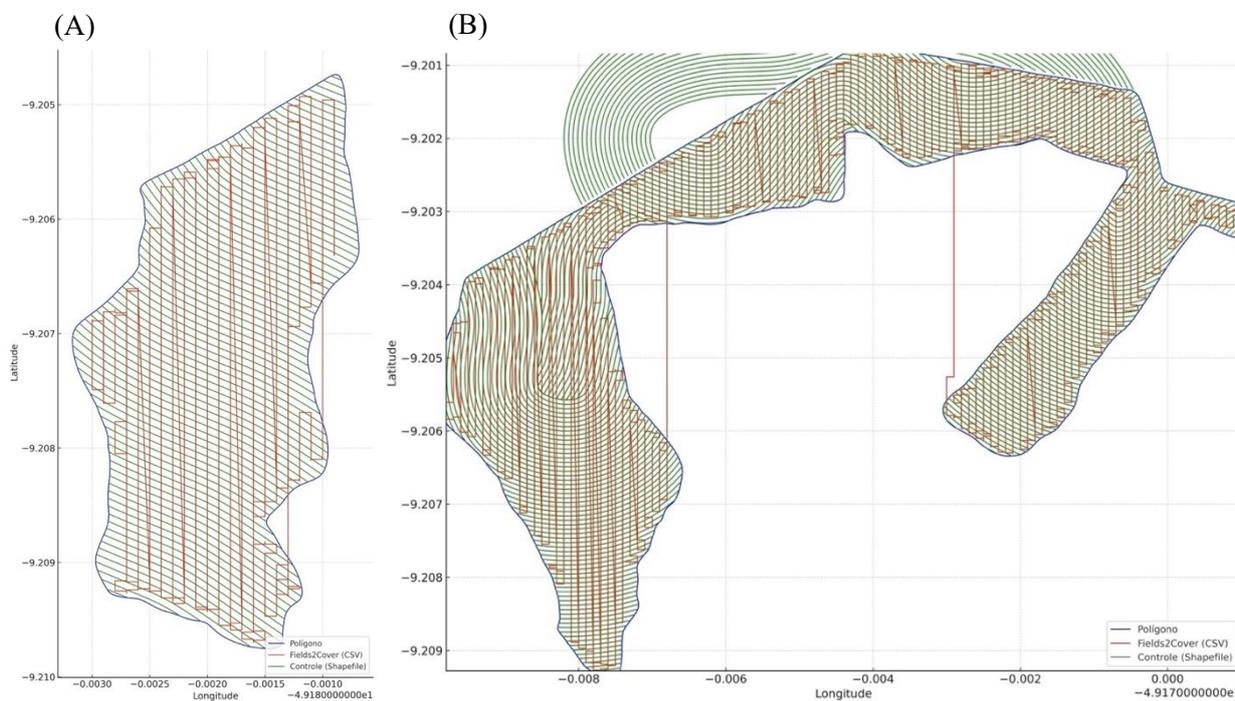


Figura 3. Mapas de talhões com sobreposições das trajetórias Controle e Fields2Cover. (A) Talhão 7, (B) Talhão 9

O caráter retilíneo das rotas do F2C decorre da funcionalidade do programa em buscar a menor distância entre os pontos opostos no perímetro do polígono. Isto pode garantir a minimização do deslocamento da máquina, porém não considera o propósito de se assemelhar à declividade do terreno em superfícies irregulares. Spekken et al. (2016) encontraram que em certos casos, linhas de tráfego retilíneas se assemelharam às que seguiam cotas de altitude quanto à minimização do potencial erosivo hídrico, e poderiam em alguns casos serem consideradas como opções mais viáveis, ao reduzir custos operacionais. Não obstante, isto ocorre em terrenos com pouca variação de declividade, quando as linhas de tráfego retilíneas se assemelham às linhas em nível. Para tomar proveito de tais cenários, deveria ser possível ajustar a orientação (ou ângulo de entrada no talhão) das linhas de tráfego, buscando semelhança com as cotas do terreno. A biblioteca estudada, porém, não apresenta tal funcionalidade, contando uma função responsável por buscar a orientação dos percursos automaticamente, sempre paralelos, que minimizem a quantidade de manobras de cabeceira e a somatória da distância total dos percursos. Isto resulta em uma grande limitação para sua aplicação em talhões declivosos.

Observa-se também que as manobras de cabeceira estão representadas por ângulos retos. Estas manobras não são factíveis de se realizar com veículos agrícolas e se encontram mal posicionadas, comprometendo a cobertura efetiva do talhão. Se identifica também a presença de linhas de tráfego fora dos limites do polígono do talhão, assim como quebra do paralelismo e, em alguns casos, cruzamento entre as linhas. Quando comparado ao controle, se observa uma divergência grande acerca da orientação das linhas. Nos casos abordados, as linhas de tráfego estabelecidas como controle variam de sentido conforme as cotas, raramente se assemelhando ao aspecto retilíneo.

A Figura 4 apresenta casos de percursos sugeridos pelo Fields2Cover com o ângulo de linhas de tráfego padrão do programa.

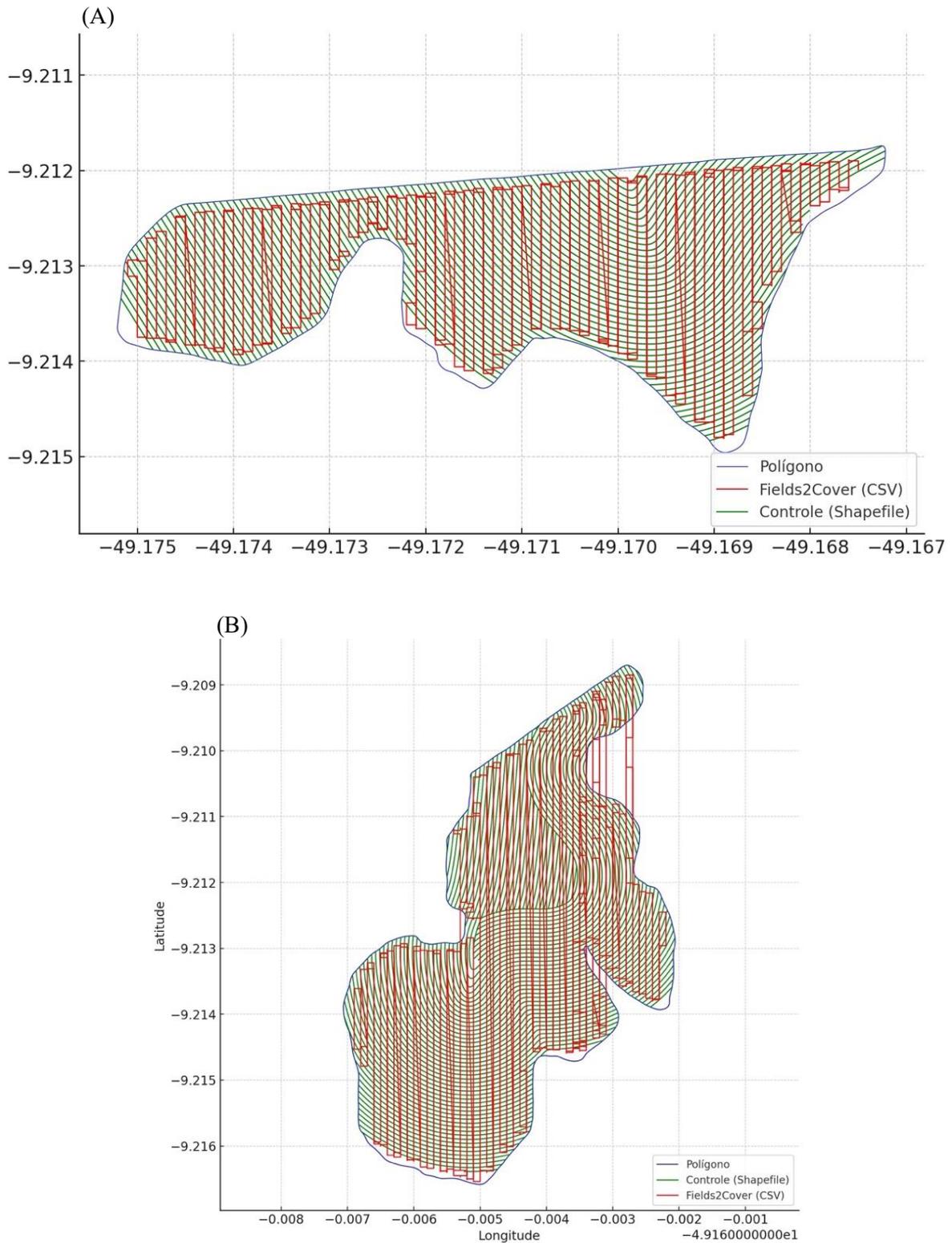


Figura 4. Mapas de talhões com sobreposições das trajetórias Controle e Fields2Cover. (A) Talhão 2, (B) Talhão 4

A Figura 5 traz o talhão da Figura 4(B) com os ângulos das linhas de tráfego modificados por meio da interface gráfica ROS, com o plugin *rqt reconfigure*.

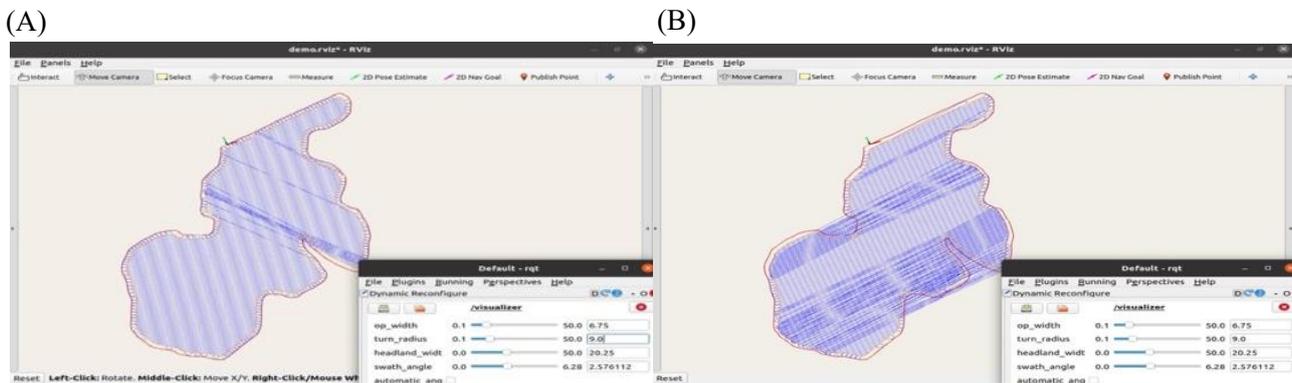


Figura 5. Talhão 4 com ângulos das linhas de tráfego customizados. (A) Evitando cruzar bordaduras côncavas, (B) Cruzando bordaduras côncavas

A modificação do ângulo das linhas de tráfego da Figura 5 teve como critério a orientação dos percursos de tráfego relativos à concavidade do polígono do talhão, de maneira a evitar o cruzamento destas bordas côncavas, como na Figura 5(A), ou não, como na Figura 5(B). Esta diferença de orientação das linhas de tráfego poderia ocorrer em função da declividade do terreno, em que se busca perpendicularidade com a declividade, e observa-se que o programa não respeita as bordaduras dos talhões quando estas são côncavas.

A presença de linhas de tráfego fora do perímetro do talhão também é evidenciada na demonstração via interface ROS na Figura 6. É possível visualizar alterações no raio de giro das manobras de cabeceira, além de ocorrerem linhas de tráfego em maior densidade, particularmente na mesma seção das linhas que fogem o perímetro do talhão. Pode-se observar como alterações nos ângulos de tráfego geram efeitos indesejados nas linhas, fazendo-as fugir do perímetro do polígono e ocorrerem em menor distância umas das outras. Na Figura 6, ambas as orientações dos percursos de tráfego sobressaem o perímetro do talhão, porém em locais distintos.

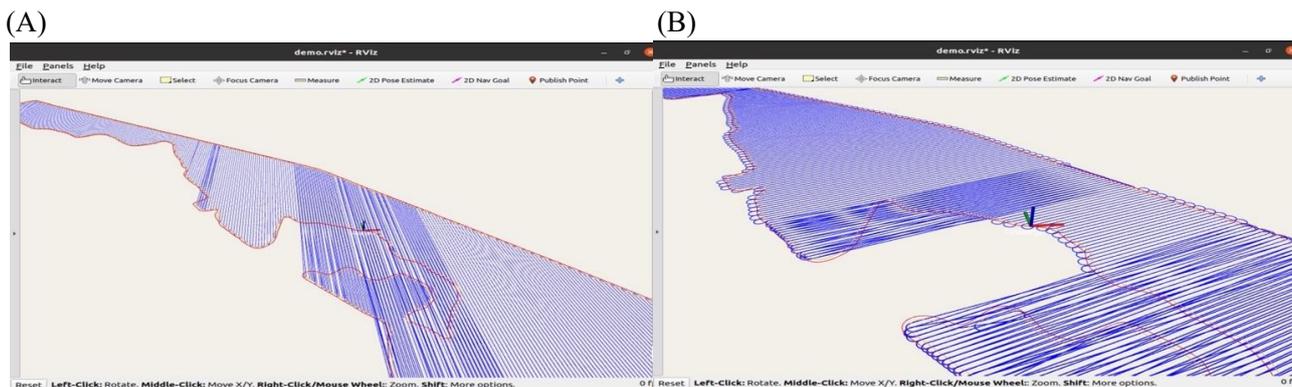


Figura 6. Talhão 18 com ângulos das linhas de tráfego customizados. (A) Transversal ao lado reto do polígono, (B) Perpendicular ao lado reto do polígono

Assim, contrastando as trajetórias de tráfego geradas pelo Fields2Cover com o projeto controle, constata-se que a maior limitação está na incapacidade de customização do ângulo das linhas de tráfego sem que o programa desrespeite o perímetro do talhão estabelecido. Utilizando como critério a maior semelhança com tráfego perpendicular à declividade, esta funcionalidade permitiria um tráfego retilíneo, sem ser totalmente em nível, porém sendo capaz de minimizar erosões de origem hídrica.

Sendo a biblioteca do Fields2Cover publicada no início de 2023, carecem análises críticas sobre sua funcionalidade em talhões declivosos que sirvam como parâmetro para comparar os resultados obtidos mediante esta investigação. O trabalho que apresenta funcionalidades de interesse a serem incorporadas no Fields2Cover é o de Spekken et al. (2016), criando algoritmos que leem o perfil tridimensional do terreno e hibridizam as cotas em linhas trafegáveis para máquinas agrícolas.

A contribuição de Nilsson e Zhou (2020) se assemelhou à abordagem do Fields2Cover, sendo relatada pelos autores como funcional em talhões de geometria complexa. Recortes nos talhões representaram dificuldades

para o F2C, como observado nas figuras ilustrando a mudança de ângulo de tráfego na interface ROS. Portanto, estratégias utilizadas por estes autores poderiam contribuir com o programa este analisado com respeito ao planejamento de trajetórias em talhões recortados, especificamente as funcionalidades que impedem as linhas de tráfego de fugirem do perímetro do talhão.

CONCLUSÃO: O Fields2Cover é uma biblioteca de código aberto destinada ao planejamento de trajetórias de veículos agrícolas, especialmente útil em terrenos regulares e planos. Enfrenta limitações na geração de trajetórias curvas e reconhecimento de concavidades no perímetro de talhões. Há oportunidades para aprimorar o Fields2Cover, como melhorar sua interpretação de bordaduras irregulares, permitir ajustes nos ângulos das trajetórias em relação à declividade ou incorporar modelagem tridimensional do terreno. Tais funcionalidades poderiam permitir acesso mais amplo e aberto ao planejamento de tráfego controlado na agricultura, promovendo benefícios agrônômicos, logísticos e econômicos.

REFERÊNCIAS:

BLACKMORE, S. Robotic agriculture – the future of agricultural mechanisation? In: 5TH EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 2005.

CHOSSET, H. Coverage for robotics – A survey of recent results. **Annals of Mathematics and Artificial Intelligence**, v. 3, n.1-4, p.113-126, 2001.

MIER, G; VALENTE, J; DE BRUIN, S. Fields2Cover: An open-source coverage path planning library for unmanned agricultural vehicles. **IEEE Robotics and Automation Letters**, v. 8, n. 4, 2023.

NILSSON, R. S.; ZHOU, K. Method and benchmarking framework for coverage path planning in arable farming. **Biosystems Engineering**, v. 198, p. 248-265, 2020.

SPEKKEN, M., DE BRUIN, S., MOLIN, J. P., & SPAROVEK, G. Planning machine paths and row crop patterns on steep surfaces to minimize soil erosion. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 124, p. 194–210, 2016.

SPEKKEN, M. **Creating optimized machine working patterns on agricultural fields**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015. doi:10.11606/T.11.2015.tde-22092015-112051.