

## FERRAMENTAS PARA SISTEMATIZAÇÃO DE PERCURSOS DE MÁQUINAS AGRÍCOLAS SOBRE RELEVO DECLIVOSO

Mark Spekken<sup>1</sup>, Sytze de Bruin<sup>2</sup>, José Paulo Molin<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Doutorando em Eng. de Sistemas Agrícolas, Universidade de São Paulo - ESALQ, Piracicaba, (19) 3447 8509, mspekken@usp.br

<sup>2</sup> Professor doutor, Environmental Science department, Wageningen University, Holanda, +31 317 481830, sytze.debruin@wur.nl

<sup>3</sup> Professor doutor, depto. de Engenharia de Biosistemas, Universidade de São Paulo - ESALQ, Piracicaba, (19) 3447 8502, jpmolin@usp.br

Apresentado no  
Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão - ConBAP 2014  
14 a 17 de setembro de 2014 - São Pedro - SP, Brasil

**RESUMO:** Com a adoção de sistemas de orientação para máquinas agrícolas, um número de trabalhos foram propostos visando o pré-planejamento dos padrões de trabalho de máquinas agrícolas no campo para redução de impactos econômico-ambientais. Porém poucos trabalhos focaram na obtenção de trajetos de máquina curvos respeitando limitações de declive. Neste contexto, três limitações devem ser consideradas: perpendicularidade ao declive, trafegabilidade ao longo da cobertura de área e minimização do tempo não produtivo. Este trabalho considera estas limitações propondo um sistema de três etapas para obtenção de trajetos adequados. As etapas são aqui descritas, sendo duas destas etapas compostas por algoritmos-aplicativos implementando um número de ferramentas que permite modelar curvas de nível em referências trafegáveis e avaliar quantitativamente os impactos de erosão hídrica sobre um terreno, possibilitando a criação rápida de cenários sustentáveis. Estas ferramentas são exemplificadas em um estudo de caso que estima a redução de mais de metade da perda de solo em dois cenários distintos.

**PALAVRAS-CHAVE:** eficiência de máquinas, conservação de solo, sistema de direção automática, modelagem espacial.

## TOOLS FOR PATH PLANNING OF AGRICULTURAL MACHINES ON STEEP TERRAINS

**ABSTRACT:** : With the adoption of guidance systems for agricultural machinery, a number of methods have been proposed aiming a pre-planning of the working patterns of machinery on fields to reduce economic and environmental impacts. So far, few research efforts have addressed curved machine tracks on sloping terrain. In this paper, three objectives are considered: squareness of the angle with the slope direction, steerability of tracks and minimization of non-productive time. This work describes a system of three steps along with a set of tools to obtain suitable tracks. The steps are here described being two of these composed by application-algorithms implementing a number of tools to model contours in steerable references and also to evaluate quantitatively the soil loss by water runoff upon a terrain, allowing fast retrieval of sustainable scenarios. The tools are demonstrated in a case study exemplified that retrieve a savings of more than half of the soil loss by erosion in two distinct scenarios.

**KEYWORDS:** machine efficiency, soil conservation, automatic steering, spatial modelling.

## INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento e melhoramento em sistemas de orientação para direcionamento, pilotos automáticos e robótica um maior esforço foi direcionado em trabalhos de pré-planejamento de percursos (Keicher e Seufert, 2000; Cariou et al., 2010). A obtenção automatizada de percursos para tráfego de máquinas sobre talhões agrícolas (do inglês “path planning”) tem sido alvo de um número de trabalhos visando otimização de seu tempo produtivo (Jin and Tang, 2010; Hameed et al., 2010), controle de tráfego para redução de área compactada de solo (Bochtis et al., 2012), cobertura otimizada de área pelos equipamentos agrícolas (Palmer et al. 2003; Bruin et al. 2009) e otimizações combinadas de manobras e abastecimento (Spekken e Bruin, 2013). Enquanto maior parte dos esforços de otimização visou percursos retilíneos em terrenos planos, um menor esforço foi dedicado a percursos curvos (Oksanen and Visala, 2009) e considerando declive (Jin and Tang, 2011). A criação de percursos em declive enfrenta as limitações de conservação de solo por perpendicularidade ao declive, otimização de tempo produtivo e trafegabilidade ao longo de todo talhão. Jin and Tang (2011) desenvolveram um algoritmo de criação e avaliação de percursos a partir do modelo de elevação digital do terreno, combinando estes aspectos a partir da definição de curvas-linha-referência e computando seu total impacto. Os autores implementaram métodos quantitativos para mensurar perda de solo por erosão hídrica utilizando a metodologia RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation), considerando práticas de cultivo em perpendicularidade ao declive como prática conservacionista. Rainere et al. (2002) também faz uso desta metodologia para perda de solo em transectos dentro de bacias hidrográficas, porém utilizando o fator corrigido de comprimento para o declive como proposto por Wischmeyer e Smith (1978). Enquanto estratégias de pura automação na criação de percursos em terrenos declivosos mostram limitações no número de opções e satisfação do usuário final, este trabalho propõe o uso de três etapas para a criação destes trajetos, usando ferramentas existentes e propondo novas ferramentas para obtenção de referências ótimas de percursos trafegáveis e implementado métodos consagrados para obtenção quantitativa de perdas de solo.

## MATERIAL E MÉTODOS

O modelo conceitual aqui usado para a obtenção de trajetos eficientes e sustentáveis é dado pelo fluxograma na Figura 1.

Com base na Figura 1, este trabalho as fases da criação e avaliação de trajetos são descritas:

### **Fase 1: Obtenção de curvas referência**

Utilizando-se de dados georeferenciados obtidos de campo (piloto automático, distribuição a taxa variada, mapas de colheita, etc), a altimetria armazenada como atributo é extraída e submetida a interpolação obtendo-se o modelo de elevação digital (MED). Neste trabalho utilizou-se o software Vesper 1.6 (Minasny et al, 2002) para interpolação. Os dados interpolados foram submetidos a extração das linhas de nível (countour lines) utilizando-se o software QGIS Valmiera.

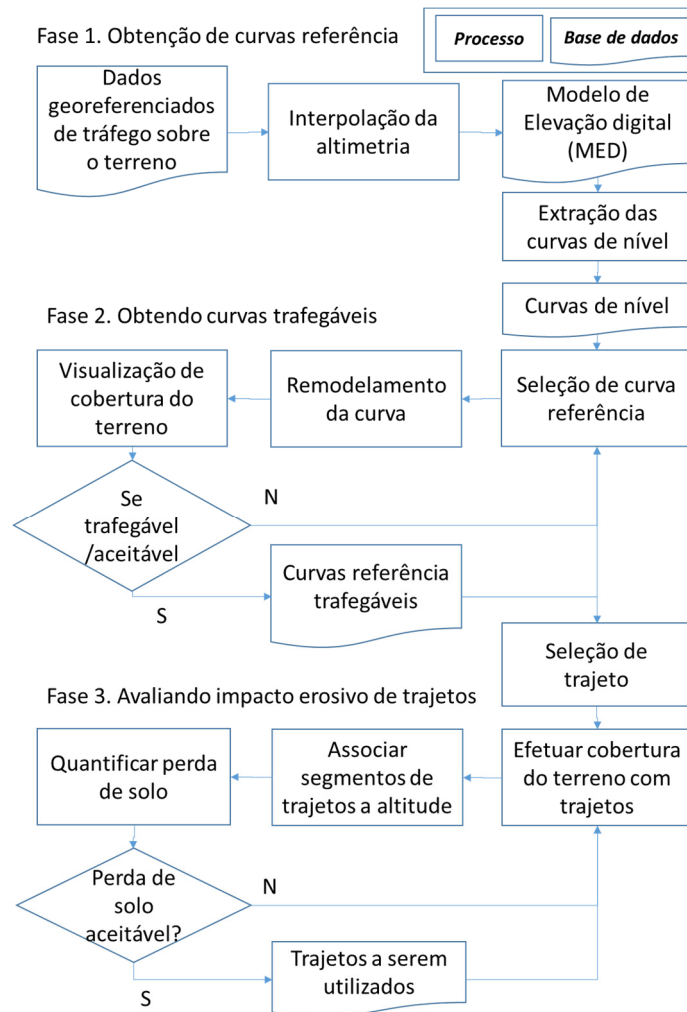


FIGURA 1. Modelo conceitual da criação de trajetos sobre superfícies declivosas.

Um estudo de caso (Figura 2), de uma região de produção canvieira em Pradópolis-SP é aqui apresentado para exemplificar as fases e ferramentas propostas. Figura “a” são pontos georeferenciados (de elevação conhecida) coletados por receptor GNSS embarcado em um veículo agrícola trafegando sobre o solo; “b” é o resultado da interpolação dos pontos de elevação originando o MED; e “c” são as linhas de nível (mesma cota) obtidas do MED e cada 2 metros de elevação.

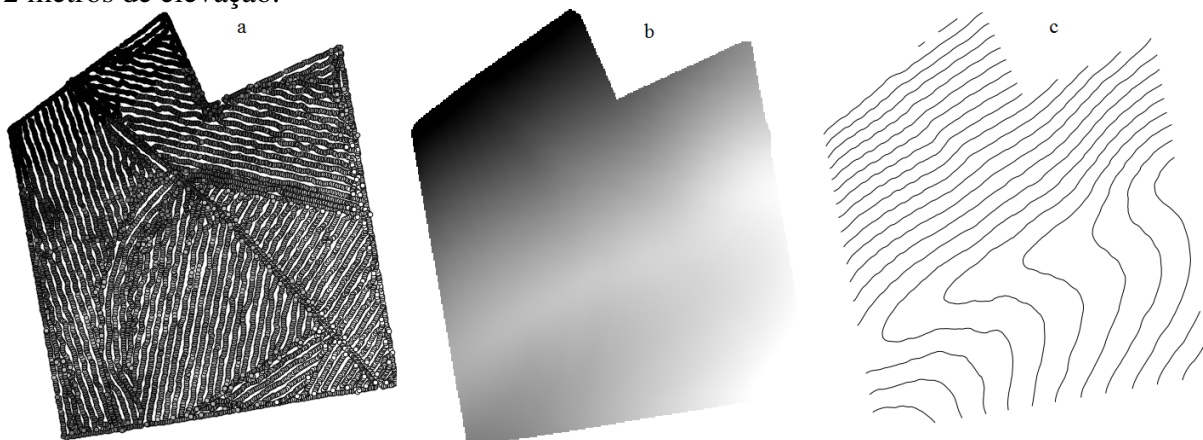


FIGURA 2. Sub-etapas para obtenção de linhas de nível.

As linhas de nível obtidas pela Figura 2, apesar de serem uma base apropriada para criação dos percursos, não garante referências adequadas de trafegabilidade, contendo ruído (pequenos desvios) de trajetória e linhas referência com demasiada convergência para criação de passadas paralelas de máquina.

### **Fase 2: Obtendo curvas trafegáveis**

Nesta fase, um modelo-aplicativo foi desenvolvido permitindo a seleção distinta das curvas extraídas do MED e submetendo estas a um número de ferramentas de modelagem:

**Simplificação:** que remove pequenos ruídos da linha referência tornando-a mais retilínea.

**Suavização:** envolve a diminuição da curvatura de uma linha cuja convergência das passadas adjacentes podem levar a linhas com dobra sobre si mesmas.

**Spline:** capaz de criar, sobre uma curva com vértices abruptos, um formato mais encurvado e trafegável.

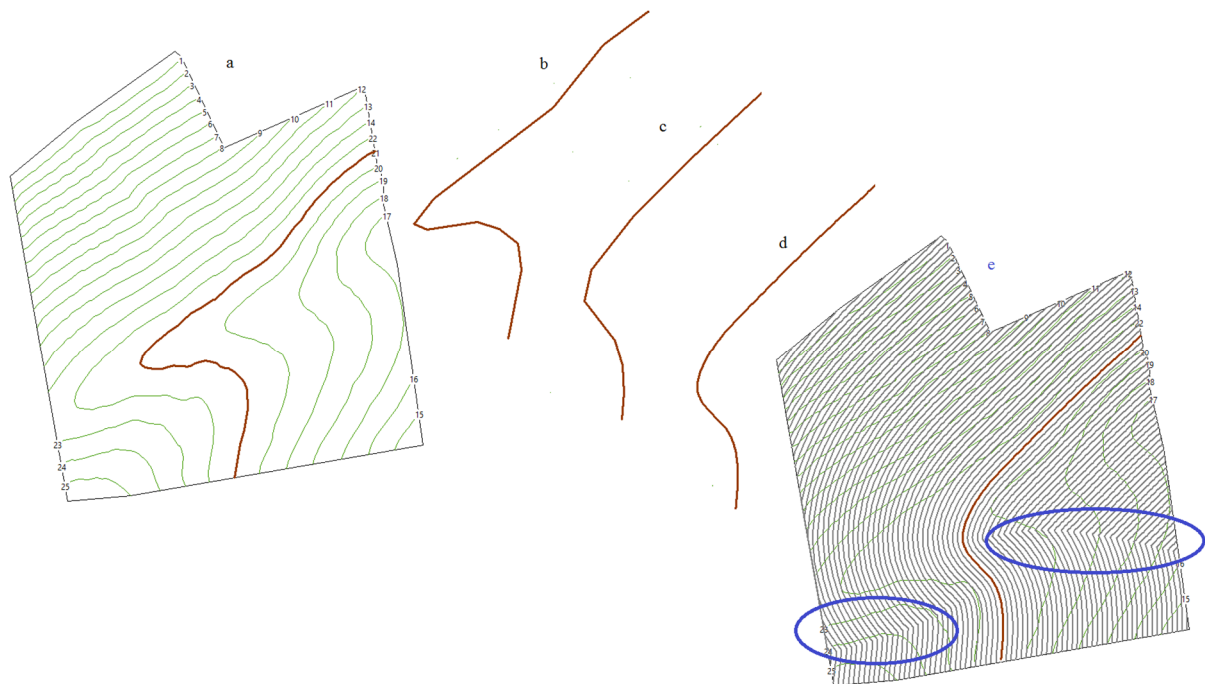
**Hibridização:** Permite que uma nova curva referência seja obtida exatamente em meio a duas curvas não paralelas.

**Deslocamento gradiente:** permite que os vértice que compõem uma curva sejam deslocados a distâncias gradativamente maiores criando uma curva gradiente. Esse processo é desejável para se obter percursos ou terraços em desnível controlado.

**Visualização de cobertura do terreno:** O terreno é recoberto com passadas paralelas para se observar a disposição destas sobre as linhas de nível e também para possíveis problemas de trafegabilidade; além de disponibilizar o número de passadas necessárias para cobertura do terreno.

Estas ferramentas foram incorporadas em um aplicativo desenvolvido em ambiente free-Pascal (Lazarus 1.2) que permite ao final a exportação de um número de cenários de curvas referência adequadas à trafegabilidade para serem avaliados quanto ao seu impacto erosivo.

A partir destas referências, ferramentas de modelagem de curvas são aplicados levando a obtenção de uma trajetória mais suavizada na Figura 3.



**FIGURA 3.** Etapas de modelagem de uma curva de nível referencial em uma referência de trafegabilidade sobre o terreno.

Na Figura 3, em “a” uma referência de nível é selecionada e submetida a três ferramentas de modelagem: simplificação (“b”), suavização (“c”) e spline (“d”) originando uma referência mais trafegável para uma máquina. Porém, ao observar o recobrimento do terreno com passadas paralelas (“e”), observa-se a obtenção de regiões com dobras abruptas na linha de tráfego (dentro das elipses azuis), imediatamente mostrando a necessidade de um remodelamento da mesma linha referência ou a escolha de outra curva de nível. Ao efetuar o recobrimento do terreno, é informado o número de passadas necessárias para tal (neste caso são 133 passadas de 18 metros de largura).

### Fase 3. Avaliando sustentabilidade de trajetos

Nesta etapa as referências são extraídas por um outro modelo-aplicativo que novamente cria as passadas nas definições dadas pelo etapa anterior, subdividindo o talhão se necessário. Na criação das passadas recobrimo o talhão, pela localização dos vértices que compõe os trajetos, é extraída a altimetria correspondente a cada vértice (do MED). Dois parâmetros são, então, obtidos espacialmente: o declive entre segmentos dos trajeto e o comprimento do declive dentro do trajeto (soma de segmentos com mesma direção de declive). Ambas estas informações já proporcionam base para estimar a direção do fluxo de água e os pontos de encontro de fluxo que podem transbordar dentro de uma certa região do talhão.

A estimativa de perda de solo por erosão hídrica é calculado a partir da RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation), como sugerido por Renard et al. (1997), adaptado ao sistema internacional de unidades (SI) sendo:

$$A = R * K * LS * C * P \quad [1]$$

Onde:

$A$  é a perda de solo em  $Mg \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ;

$R$  é o fator de precipitação aqui calculado usando a metodologia de Lombardi e Moldenhauer (1992);

$K$ . é o fator de erodibilidade para um tipo específico de solo, a ser fornecido pelo usuário;

$LS$  é o fator de declividade, incluindo comprimento (Length) e intensidade de declive (Slope)

$C$  é o fator de manejo de cobertura, trata-se de uma correção necessária para reduzir a perda de solo de uma solo preparado e descoberto ( $C=1$ ) para um solo contendo uma cobertura vegetal ( $C<1$ ).

$P$  é o fator conservacionista de suporte, como prática de contornos, plantio em faixas ou terraceamento; em comparação a um solo descoberto em declive ( $P = 1$ ).

Neste trabalho, visa-se obter a intensidade de perda de solo ao longo da fileira de implantação da cultura, ou seja, tomando-se o corrimento da água ao longo do declive da fileira, e não da área.

O valor de  $LS$  é calculado usando os métodos propostos por Wischmeyer e Smith (1978). O valor do do comprimento do declive ( $L$ ) é calculado para o cada segmento  $i$ .

$$L_i = \left( \frac{i}{22.13} \right)^m \quad [2]$$

A variável  $m$  é determinada a partir de uma avaliação feita por todo o comprimento do declive, dado pela intensidade do declive ( $\sigma$ ) para todo seu comprimento e computado por:  $m = 10\sigma$ , com limites inferiores e superiores de  $m$  ajustados para 0,3 a 0,5. A intensidade de declive é calculado para cada segmento  $i$  individualmente.

$$S_i = 65.41 \frac{\sigma_i^2}{1 + \sigma_i^2} + 4.56 \frac{\sigma_i}{\sqrt{1 + \sigma_i^2}} + 0.065 \quad [3]$$

Um fator de correção ( $P$ ) é multiplicado a cada  $S_i$ , baseado na posição em que o segmento se encontra no declive, se intensificando a medida que o declive se alonga.

$$P_i = \frac{i^{m+1} - (i-1)^{m+1}}{i^{m+1}} \quad [4]$$

O fator  $LS$  para cada segmento é dado então por:

$$LS_i = L_i S_i P_i \quad [5]$$

Cada segmento que compõe o percurso tem seu próprio  $LS$  calculado e multiplicado pelos fatores  $R$ ,  $K$ ,  $C$  e  $P$ , possibilitando estimar quantitativamente a erosão hídrica dentro de um cenário de percursos.

Uma estimativa final de perda de solo para todo um talhão é calculada a partir da média ponderada de  $A$  em relação ao comprimento para todos os segmentos dentro de um talhão. Este é dado por:

$$PMSS = \frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n A_i * L_i}{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n L_i} \quad [6]$$

Sendo:

$PMSS$  – perda média de solo para uma superfície;

$j$  - identificação de um trajeto paralelo criado;

$m$  - número total de trajetos dentro de um talhão;

$i$  – identificação de um segmento que compões o trajeto;

$n$  – número total de segmentos dentro de um trajeto;

$A_i$  – estimativa RUSLE de perda de solo para o segmento;

$L_i$  – comprimento do segmento;

A Figura 4 exhibe exemplos de impacto erosivo a partir de um cenário computado, é possível observar:

- em ‘a’ sequências de passadas de máquina são criadas de acordo com as referências de percurso propostas para cada sub-talhão.
- em ‘b’ a fração superior do talhão é recoberta com segmentos em formatos de flecha apontando a direção do fluxo de água, sendo que as duas cores (verde e azul) evidenciam duas distintas direções de fluxo de água sobre a mesma fileira de plantio, neste caso quando dois longos comprimentos de fluxo opostos (sob certo declive) se encontram há um potencial de acúmulo de água e é possível que a água transborde para fora da fileira em direção do declive. Na parte inferior do talhão é mostrado o efeito do declive ao



longo dos trajetos, onde o vermelho mais intenso identifica todos os segmentos do trajeto com declive superior.

- em 'c' é a perda estimada de solo pela RUSLE (em  $\text{Mg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ ) onde as faixas mais intensas (em vermelho) representam uma perda de solo superior.

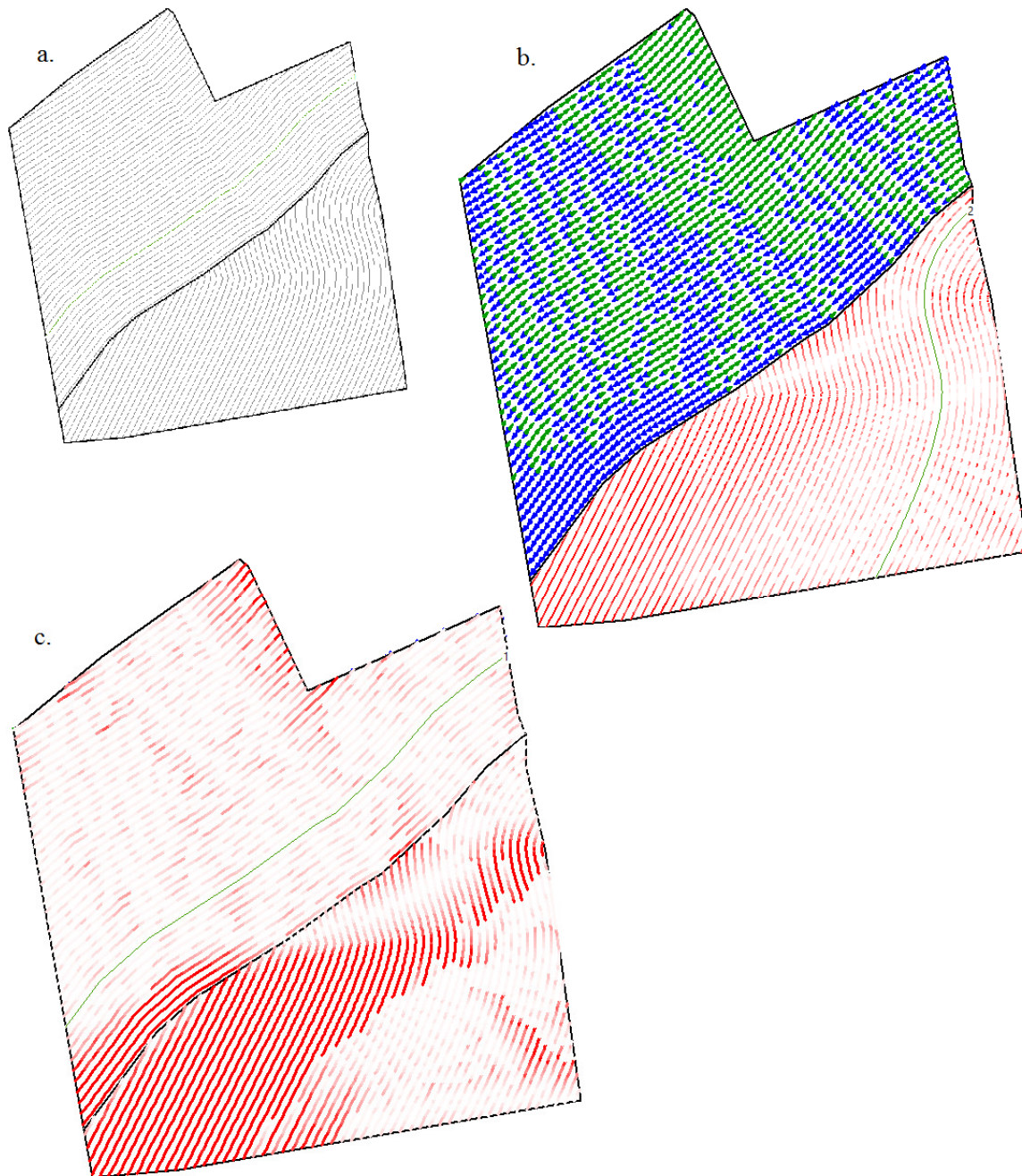


FIGURA 4. Disposição visual de resultados encontrados pelo modelo de obtenção de impacto erosivo para um dado cenário criado.

## ANÁLISE DE ESTUDO DE CASO E DISCUSSÃO

Dentro de um talhão, dois cenários principais (Figura 5: 'a' e 'b') foram criados utilizando as ferramentas da fase dois e submetidos a avaliação pelo algoritmo-aplicativo da fase três. Os percursos de máquina seguem a orientação de fileiras de cana-de-açúcar, onde a perda de solo

por erosão hídrica é considerada ao longo destes. No cenário 'b' houve subdivisão do talhão, e três opções de percurso de orientação similar foram sugeridos como padrão de passadas para um dos sub-talhões.

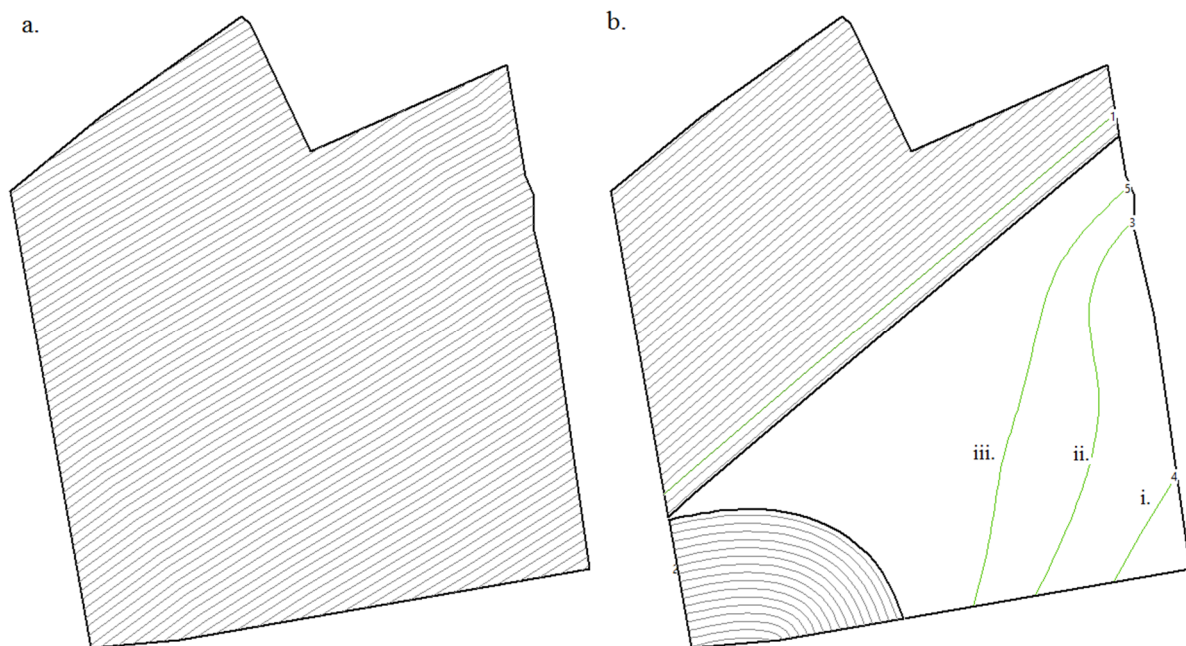


FIGURA 5. Cenários utilizados para avaliação do potencial erosivo dos percursos.

Na Figura 5b, as opções de percurso 'i' e 'ii' são modeladas a partir de uma das referências de nível do talhão. A opção 'iii' é uma linha híbrida obtida de duas linhas extremas situadas dentro da sub-área. Para avaliação da perda de solo, foram utilizados.

Fator R: precipitação anual de 1300mm (média aproximada das normais meteorológicas para o estado de São Paulo) um uma precipitação mensal de 250mm (comum para o mês de janeiro) – (1785.06).

Fator K: Latossolo Vermelho Amarelo Distrofíco A moderado textura argilosa - (0,0112);

Fator C: Cana-de-acucar - (0.3);

Fator P: Solo descoberto – (1);

Os percursos criados dentro destes talhões são exibidos na Figura 6 com seus respectivos impactos em número de manobras e perda de solo. Para identificação espacial no aplicativo, foi determinado que o limite para vermelho mais intenso representa perdas de solo acima de  $10 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ .

O uso de um único padrão de percurso leva a um menor número de fileiras (como geralmente é esperado), mas o uso dos métodos aqui propostos permite mensurar o impacto quantitativo da perda de solo (neste caso uma perda média de  $33.28 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ ) para toda a área.

O tempo de processamento para obtenção de percursos em um sub-talhão e seu equivalente impacto erosivo é instantâneo, possibilitando rápido estudo de cenários construídos e orientando modificações para obtenção de cenários mais eficientes e/ou conservacionistas.

Observa-se que a sub-divisão do talhão levou a um incremento no número de fileiras de cana-de-açúcar (39,1%), mas reduziu a perda média de solo significativamente.



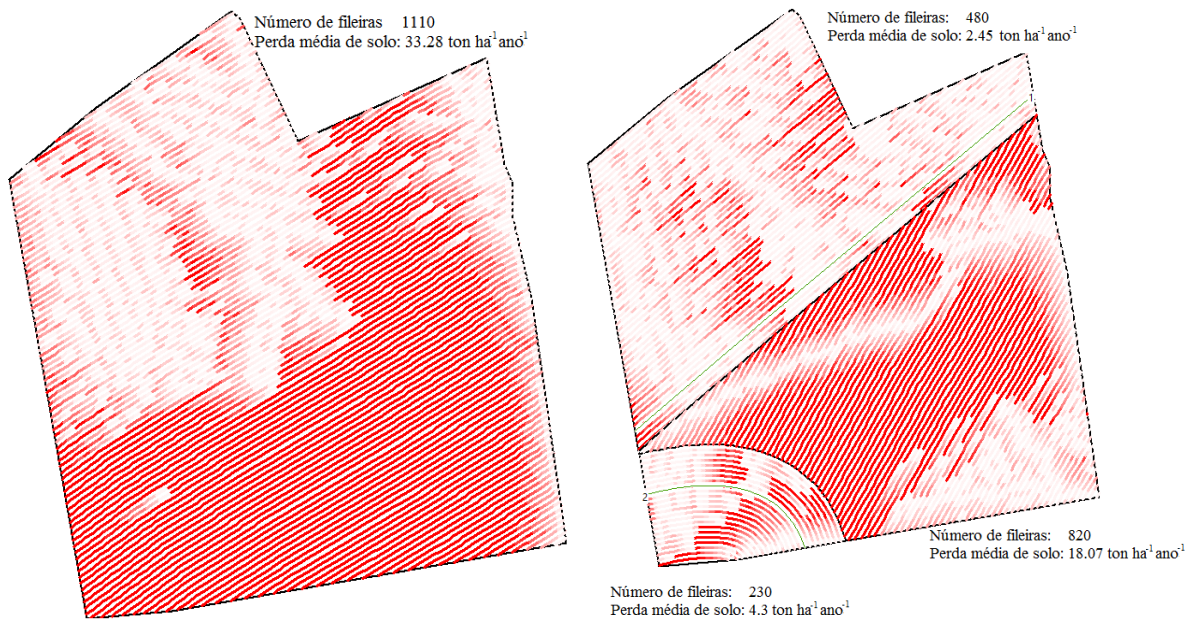


FIGURA 6. Resultados obtidos pelo modelo para perda de solo no talhão e em sub-areas entre os dois cenários propostos.

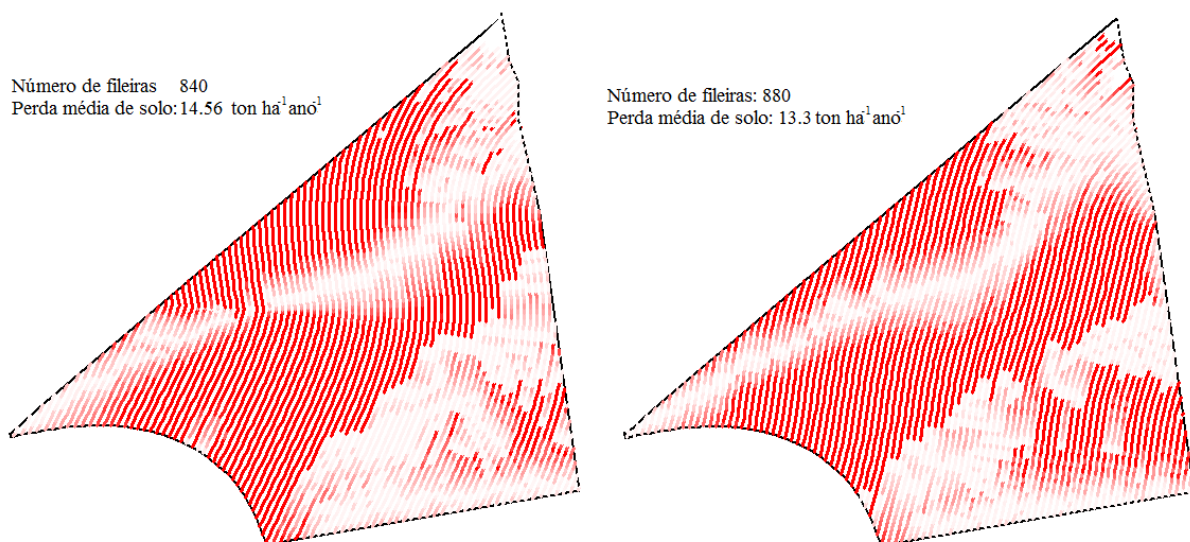


FIGURA 7. Resultados obtidos pelo modelo para perda de solo no talhão e em sub-areas utilizando outras opções de percurso.

Na Figura 7 pode-se observar também a influência de pequenas mudanças de referência de passadas nos impactos de eficiência e erosivos. O uso de linha híbrida ('iii' na Figura 3b) tem, em geral, apresentado resultados satisfatórios na definição de um percurso dentro de uma área ou sub-área para redução do potencial erosivo.

Aspectos adicionais devem ser implementados para obtenção de um custo final de passadas e para comparação entre trajetos já existentes em campo com relação a propor novos trajetos.

As ferramentas aqui criadas visam auxiliar e permitir quantificação de aspectos erosivos no trabalho de sistematização atualmente empregado principalmente na cultura da cana-de-açúcar.

### CONCLUSÕES:

Este trabalho visou propor um modelo para a obtenção de trajetos trafegáveis sobre uma superfície declivosa oriundos da modelagem espacial de curvas de nível obtidas da área. O

modelo faz uso de ferramentas que: geometricamente ajustam uma linha curva em um trajeto suavizado; além de possibilitar que algumas opções de sistematização conservacionista sejam rapidamente obtidos, como a criação de referências gradiente sobre o terreno e obtenção de linhas híbridas. A visualização antecipada do recobrimento do terreno com trajetos permite rapidamente observar se referências de tráfego são adequadas num escopo visual. A avaliação de trajetos com relação a aspectos de perda de solo foi aqui também porposto para se quantificar impacto erosivo ao longo de passadas de máquina/fileiras de plantio. Para um estudo de caso inseridos no modelo, um número de cenários foram testados onde se observou decréscimo de perda de solo em menos da metade pelo uso de um padrão simples de percurso para mais padrões de cobertura de terreno.

## REFERÊNCIAS

- BOCHTIS, D.D.; SØRENSEN, C.G.; GREEN, O. **A DSS for planning of soil-sensitive field operations**. Decision Support Systems, nº 53(1) p. 66-75, 2012.
- BRUIN, S. de; LERINK, P.; KLOMPE, A.; WAL, T. van der; HEIJTING, S. **Spatial optimisation of cropped swaths and field margins using GIS**. Computers and electronics in agriculture. Nº 68(2), p. 185-190, 2009.
- HAMEED, I. A.; BOCHTIS, D. D.; SØRENSEN, C. G.; NØREMARK, M. **Automated generation of guidance lines for operational field planning**. Biosystems engineering, nº 107(4), p. 294-306, 2010.
- JIN, J.; TANG, L. **Optimal coverage path planning for arable farming on 2D surfaces**. Transactions of the ASABE, nº 53(1), p. 283, 2010.
- JIN, J.; TANG, L. **Coverage path planning on three-dimensional terrain for arable farming**. Journal of Field Robotics, nº 28(3), p. 424-440, 2011.
- LOMBARDI NETO, F.; MOLDENHAUER, W.C. 1992. **Erosividade da chuva: sua distribuição e relação com perdas de solo em Campinas (SP)**. Bragantia 51 (2), 189–196.
- MINASNY, B.; A. B. MCBRATNEY; B. M. WHELAN. 2002. **Vesper, version 1.6**. Australian Centre for Precision Agriculture. The University of Sidney.
- OKSANEN, T.; VISALA, A. **Coverage path planning algorithms for agricultural field machines**. Journal of Field Robotics, nº 26(8), p. 651-668, 2009.
- PALMER, R. J.; WILD, D.; RUNTZ, K. **Improving the efficiency of field operations**. Biosystems engineering, nº 84(3), p. 283-288, 2003.
- RENARD, K.G.; FOSTER, G.R.; WEESIES, D.K.; TODER, D.C. (Coord.). 1997. **Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)**. Agricultural Handbook 703. US Department of Agriculture, 404pp.
- RANIERI, S. B. L.; DE JONG VAN LIER, Q.; SPAROVEK, G.; FLANAGAN, D. C. 2002. **Erosion database interface (EDI): a computer program for georeferenced application of erosion prediction models**. Computers & geosciences, 28(5), 661-668.
- SPEKKEN, M.; BRUIN, S. de. 2013. **Optimized routing on agricultural fields by minimizing maneuvering and servicing time**. Precision Agriculture, nº 14(2), p. 224-244.
- WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. 1978. **Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning**. Agricultural Handbook 537. US Department of Agriculture, Washington, DC, 58pp.