

## FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS (*Made in Brazil*) PARA PREDIÇÃO DA COMPACTAÇÃO DO SOLO INDUZIDA PELO TRÁFEGO AGRÍCOLA

RENATO P. DE LIMA<sup>1</sup>, MAURÍCIO R. CHERUBIN<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Pós-doutorando em Ciência do Solo, ESALQ/USP, Piracicaba-SP, renato\_agro\_@hotmail.com

<sup>2</sup>Engenheiro Agrônomo, Professor Associado, ESALQ/USP, Piracicaba-SP.

Apresentado no  
LII Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2023  
18 a 21 de outubro de 2023 – Ribeirão Preto - SP, Brasil

**RESUMO:** A compactação do solo é um dos maiores problemas de limitações físicas para o desenvolvimento das raízes. Redução da infiltração, do sistema poroso e aumento do processo erosivo e resistência do solo à penetração são comumente observados em função da compactação de solos agrícolas. Embora haja uma série de fatores responsáveis pela compactação do solo, o tráfego de máquinas é aquele de maior relevância, principalmente pelo aumento da massa das máquinas nas últimas décadas. Modelos teóricos descrevem o processo de compactação de solos agrícolas de em três etapas: i) primeiro, o contato pneu-solo é caracterizado; ii) a propagação de tensões do solo, a partir da superfície, é calculada; iii) a deformação do solo em função das tensões propagadas é estimada. Esses modelos são discutidos na literatura desde 1950, mas foi com o avanço dos computadores e dos algoritmos, que esses modelos ganharam aplicações práticas. No mundo, há uma série de modelos disponíveis (SoilFlex, Terranimo®, TASC e SoilFlex-LLWR, cuja aplicação e a disponibilidade ainda dependem da interface computacional. No Brasil, os modelos PredComp e COMPSOHMA trazem abordagem similares, mas com recursos computacionais prontamente disponíveis para simulações de risco de compactação. O PredComp, com uma abordagem mais científica e completa do ponto de vista teórico, e o COMPSOHMA, mais objetivo e prático, facilitando a aplicação e interpretação dos usuários. A popularização desses modelos como ferramenta de campo ainda depende de conhecimento teórico sobre física e mecânica dos solos, assim como da disseminação no meio acadêmico e técnico. Os modelos foram registrados no INPI (Instituto Nacional da Propriedade Industrial), e estão disponíveis em: PredComp (<https://appsoilphysics.shinyapps.io/PredComp/>) e COMPSOHMA (<https://testbeta.shinyapps.io/compsohma/>).

**PALAVRAS-CHAVE:** tensões no solo, deformação do solo, maquinário agrícola

### COMPUTATIONAL TOOLS (*Made in Brazil*) FOR PREDICTING SOIL COMPACTION INDUCED BY AGRICULTURAL FIELD TRAFFIC

**ABSTRACT:** Soil compaction is one of the greatest problems causing physical limitations for root development. Reduction of infiltration, of the porous system and increase of the erosive process and penetration resistance are commonly observed due to the compaction of agricultural soils. Although there are a number of factors responsible for soil compaction, machine traffic is the most relevant, mainly due to the increase in the mass of machines in recent decades. Theoretical models describe the compaction process of agricultural soils in three steps: i) first, the tire-soil contact is characterized; ii) the propagation of soil stresses from the surface is calculated; iii) soil deformation as a function of propagated stresses is estimated. These models have been discussed in the literature since the 1950s, but it was with the advancement of computers and algorithms that these models gained practical applications.

Worldwide, there are a number of models available (SoilFlex, Terranimo®, TASC, SoilFlex-LLWR, whose application and availability still depend on the computational interface. In Brazil, the PredComp and COMPSOHMA models bring a similar approach, but with readily available computational resources for simulations of compaction risk. PredComp, with a more scientific and complete approach from a theoretical point of view, and COMPSOHMA, more objective and practical, facilitating the application and interpretation of users. The popularization of these models as a field tool still depends on of theoretical knowledge about physics and soil mechanics, as well as dissemination in the academic and technical environment. The models PredComp and COMPSOHMA were registered at the INPI (National Institute of Industrial Property), and are available at: PredComp (<https://appsoilphysics.shinyapps.io/PredComp/>) and COMPSOHMA (<https://testbeta.shinyapps.io/compsohma/>).

**KEYWORDS:** soil stress, soil deformation, machinery

**INTRODUÇÃO:** A compactação do solo é um dos maiores problemas de limitações físicas para o desenvolvimento das raízes. Redução da infiltração, do sistema poroso e aumento do processo erosivo e resistência do solo à penetração são comumente observados em função da compactação de solos agrícolas. Embora haja uma série de fatores responsáveis pela compactação do solo, o tráfego de máquinas é aquele de maior relevância, principalmente pelo aumento da massa das máquinas nas últimas décadas. Modelos teóricos descrevem o processo de compactação de solos agrícolas de em três etapas: i) primeiro, o contato pneu-solo é caracterizado; ii) a propagação de tensões do solo, a partir da superfície, é calculada; iii) a deformação do solo em função das tensões propagadas é estimada. Esses modelos são discutidos na literatura desde 1950, mas foi com o avanço dos computadores e dos algoritmos, que esses modelos ganharam aplicações práticas. Modelos como o SoilFlex (KELLER et al., 2007), Terranimo® (STETTLER et al., 2014), TASC (DISERENS et al., 2014), SoilFlex-LLWR (KELLER et al., 2015) e PredComp (LIMA et al., 2021) já podem ser facilmente acessados via interfaces computacionais. No Brasil, há dois modelos com abordagens similares aos modelos disponíveis mundialmente: PredComp (em referência ao termo predição da compactação) e COMPSOHMA (em referência do grupo de estudo SOHMA). O PredComp contempla uma abordagem mais teórica, e requer do usuário parâmetros de máquina e de solo, cuja aplicação é mais voltada para academia. O COMPSOHMA, vem com uma interface mais prática, onde é realizada uma personalização dos cenários de simulação (máquina e solo) de acordo com a demanda, e facilitando a aplicação do modelo pelo usuário, uma vez que requer conhecimentos mínimos de física e mecânica do solo. Nesse contexto, o objetivo desse trabalho é apresentar as funcionalidades e aplicações dos modelos PredComp e COMPSOHMA.

**MATERIAL E MÉTODOS:** A estrutura dos modelos de compactação pode ser descrita em três principais etapas: i) primeiro, a área de contato e transmissão de tensões sobre a área de contato são descritas; ii) segundo, a propagação de tensões é calculada; e iii) por fim, a deformação do solo é obtida, ou a compactação é estimada com base na capacidade de suporte de carga do solo (LIMA et al., 2021). No caso do PredComp, o modelo é capaz de calcular a área de contato pneu-solo, a transmissão de tensões, o risco de compactação do solo ou a deformação do solo. No COMPSOHMA, apenas a transmissão de tensão e o risco de tensão são calculados. Em ambos os modelos, a área de contato é calculada pelo modelo de Keller (2007), e quer a carga por roda, a pressão de insuflagem, a pressão de insuflagem recomendada, o diâmetro da roda e a largura do pneu. No PredComp, é necessário que o

usuário forneça essas informações, enquanto no COMPSOHMA, essa informação é personalizada, sem requerer no usuário. A transmissão de tensão, em ambos os modelos, é calculada de acordo com o modelo de Boussinesq (1885). No PredComp e no COMPSOHMA, o usuário vai receber como output uma avaliação do risco de compactação. Entretanto, no PredComp, é possível obter a variação de densidade do solo esperada, conforme descrito por Lima et al. (2021). O PredComp e o COMPSOHMA foram escrito em linguagem R, fazendo uso do pacote R Shiny para implementação da interface computacional reativa.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Na Figura 1, verifica-se a interface personalizada para cultura da cana-de-açúcar do modelo COMPSOHMA. No modelo, o usuário deve escolher o tipo de máquina para avaliação, a fase da cultura, o teor de argila e a umidade do solo, colocada de forma qualitativa. O resultado é uma avaliação do risco de compactação baseado nos conceitos de capacidade de suporte de carga. No COMPSOHMA, a transmissão de tensões e o risco de compactação são avaliados até 1,0 m de profundidade, sendo o usuário capaz de personalizar as camadas do solo. Na avaliação de risco, é usada um gradiente de risco, que é maior, quanto maior for o nível de tensão em relação a capacidade de suporte de carga do solo, estimada em função do teor de argila e da umidade do solo, assim como em função da fase da cultura de cana-de-açúcar.

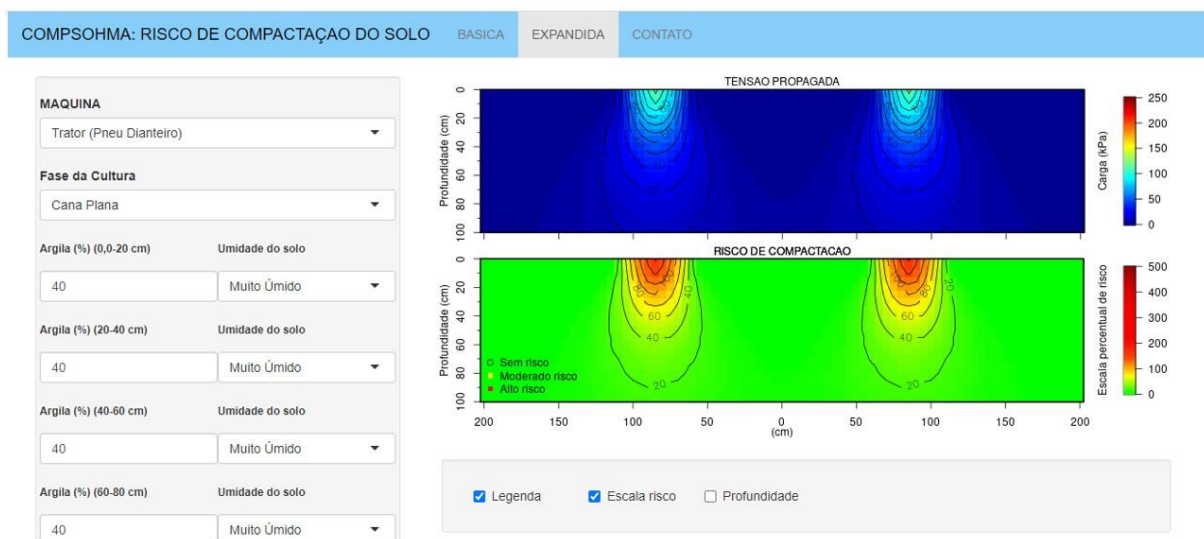
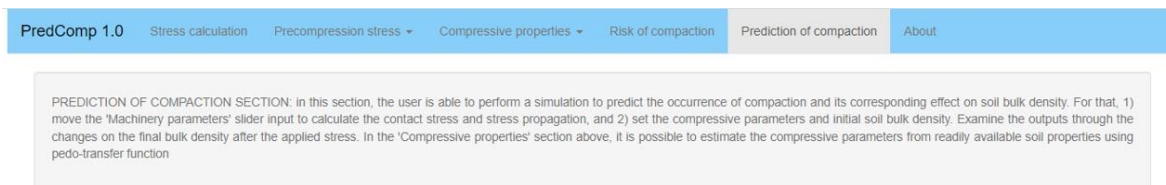


FIGURA 1. Interface computacional do modelo COMPSOHMA, personalizado para cultura da cana-de-açúcar.

Na Figura 2, observa-se a interface computacional do modelo PredComp. Há seções do modelo onde o usuário pode calcular individualmente a área de contato e a propagação de tensões, ou o risco de compactação, ou a deformação do solo, em uma estimativa mais próxima do nível de variação de volume de poros induzida pela compactação. Na Figura 2, verifica-se a interface de input do cálculo de deformação do solo, que além de requerer do usuário parâmetros de máquina (carga por roda, pressão de insuflagem, pressão de insuflagem recomendada, diâmetro da roda e largura do pneu), requer também parâmetros compressivos do solo, que são aqueles medidos em ensaios de compressibilidade do solo em cenários de variação granulométrica, de umidade, matéria orgânica, e uma série de outros fatores físicos que governam a compressibilidade. Para detalhes teóricos dos inputs, consultar Lima et al. (2021).



### Prediction of soil compaction

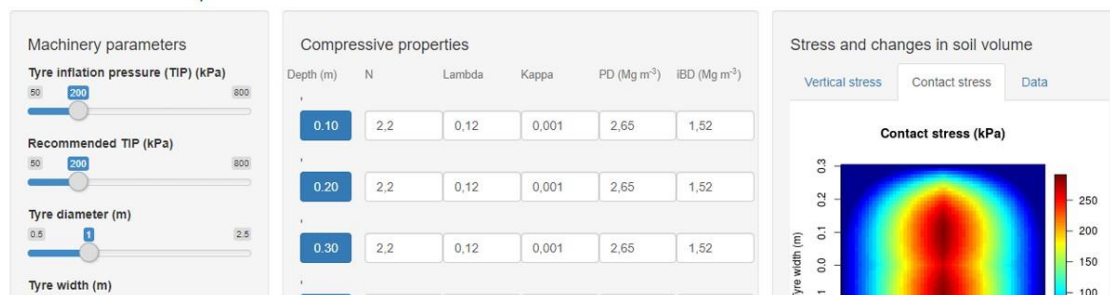


Figura 2. Interface computacional do modelo PredComp, que requer conhecimentos em física e mecânica do solo.

**CONCLUSÕES:** Embora haja uma série de modelos disponíveis internacionalmente, o desenvolvimento de tecnologia brasileira pode tornar a aplicação dos modelos mais realistas. Os modelos foram registrados no INPI (Instituto Nacional da Propriedade Industrial), e estão disponíveis em: PredComp (<https://appsoilphysics.shinyapps.io/PredComp/>) e COMPSOHMA (<https://testbeta.shinyapps.io/compsohma/>).

**AGRADECIMENTOS:** Renato Paiva de Lima agradece a FAPESP pelo suporte financeiro e bolsa de pós-doutorado (#2020/15783-4) e ao CNPq pela Bolsa de Produtividade em Pesquisa (316751/2021-9).

### REFERÊNCIAS:

- BOUSSINESQ J. **Application des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques**. Paris: Gauthier-Villars. 1885.
- DISERENS, E.; BATTIATO, A.; SARTORI, L. **Soil compaction, Soil Shearing and Fuel Consumption: TASC V3.0—A Practical Tool for Decision-Making in Farming**. In: International Conference of Agricultural Engineering; 2014; Zürich ETH, Switzerland; 2014. p.6-10.
- KELLER, T.; DEFOSSEZ P.; WEISSKOPF P.; ARVIDSSON J.; RICHARD G. SoilFlex: a model for prediction of soil stresses and soil compaction due to agricultural field traffic including a synthesis of analytical approaches. **Soil and Tillage Research**, v.93 p.391-411, 2007.
- KELLER T.; SILVA A.P.; TORMENA C.A.; GIAROLA, N.F.B.; CAVALIERI, K.M.V.; STETTLER, M.; ARVIDSSON, J. SoilFlex-LLWR: linking a soil compaction model with the least limiting water range concept. **Soil Use and Management**, v.31, p.3212329, 2015.
- LIMA, R.P.; DA SILVA, A.R.; DA SILVA, Á.P. Soilphysics: An R package for simulation of soil compaction induced by agricultural field traffic. **Soil and Tillage Research**, v.206, 104824, 2021.
- STETTLER, M.; KELLER, T.; WEISSKOPF, P.; LAMANDÉ M.; LASSEN P.; SCHJØNNING P. Terranimo® – a web-based tool for evaluating soil compaction. **Landtechnik**, v.69, p.132-137, 2014.