



## Avaliação dos sistemas de manejo na qualidade física do solo: atributos tradicionais e novos parâmetros

Karina de Vares Rossetti <sup>1\*</sup> e José Frederico Centurion <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, Departamento de Solos e Adubos. Jaboticabal, SP - Brasil

\* Autor Correspondente: kvrossetti@gmail.com

Recebido: 26/05/2023; Aceito: 20/07/2023.

**Resumo:** Diante da escassez de recursos para avaliar a estrutura do solo por meio de atributos físicos tradicionais, há a opção de ajustá-los aos modelos matemáticos. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito dos sistemas de manejo na qualidade física do solo, por meio de atributos físicos tradicionais e de novos parâmetros, após a compactação induzida por tratores em um Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) e em um Latossolo Vermelho Eutroférrico (LVef), cultivados com milho. O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados, com cinco tratamentos, três camadas (0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m) e quatro repetições, para cada classe de solo. Os tratamentos foram: SC= preparo convencional sem compactação adicional; C24 e C44= duas e quatro passadas do trator de 4 Mg, respectivamente; C210 e C410= duas e quatro passadas do trator de 10 Mg, respectivamente. As variáveis avaliadas foram: densidade do solo, porosidade do solo, capacidade de campo relativa, difusividade relativa de ar (D/Do), tortuosidade dos poros (Tort), altura, diâmetro e produtividade da cultura do milho. As compactações na sua maioria não diferiram entre si em relação à macroporosidade do solo. Constatou-se uma predominância de maiores Tort no LVd, para os tratamentos com compactação em detrimento ao SC (0-0,10 m). A D/Do e a Tort, foram parâmetros viáveis para avaliar a qualidade física em LVd e LVef.

**Palavras-chave:** Grau de compactação; máquina agrícola; atributos do solo.

## Assessment the effects of different management systems through soil physical quality: traditional attributes and the new parameters

**Abstract:** In the face of the scarcity of resources to obtain, soil structural through traditional soil physical attributes, there is the option to adjust them to mathematical models. This way, this work aimed to evaluate the effects of different management systems through soil physical quality, through traditional physical attributes and the new parameters, after compression induced by agricultural machinery traffic in Oxisols – Haplustox (LVd) and an Eutruxox (LVef), grown with corn. The experiment was conducted in a randomized block, with five treatments, three soil layers (0-0.10, 0.10-0.20 and 0.20-0.30 m) and four replications for each soil class. The treatments were: SC= conventional tillage without additional compression; C24 and C44= two and four passes of a 4 Mg tractor, respectively; C210 and C410= two and four passes of a 10 Mg tractor, respectively. The variables evaluated were: bulk density, soil porosity, relative field capacity, relative gas diffusivity (D/Do), pore tortuosity (T<sub>ort</sub>), height variable, diameter and yield of the maize crop. The most compactations did not differ each other in relation to the soil macroporosity. A predominance of higher values of T<sub>ort</sub> were observed in LVd, to compaction treatments to the detriment of SC (0-0.10 m). D/Do and T<sub>ort</sub> were viable parameters to evaluate physical quality in LVd and LVef.

**Key-words:** Degree of compaction; agricultural Machinery; soil attributes.

### 1. INTRODUÇÃO

A crescente mecanização agrícola associada ao aumento da capacidade operacional das máquinas e da intensidade de tráfego inadequado, podem causar alterações prejudiciais à estrutura do solo e ao crescimento das plantas. Dessa forma, a compactação do solo é mencionada como uma das principais causas da degradação dos

solos agrícolas, a qual implica na diminuição da capacidade produtiva, o que é devido ao seu uso intensivo e indiscriminado.

De acordo com a FAO (2015), aproximadamente 33% dos solos do mundo estão degradados. Um exemplo desse fato é a compactação do solo, que ameaça a sua qualidade e a produção agrícola. Por isso, a identificação do comportamento compressivo do solo é fundamental e útil para a prevenção e avaliação da sua compactação (IMHOFF et al., 2016; KELLER et al., 2013).

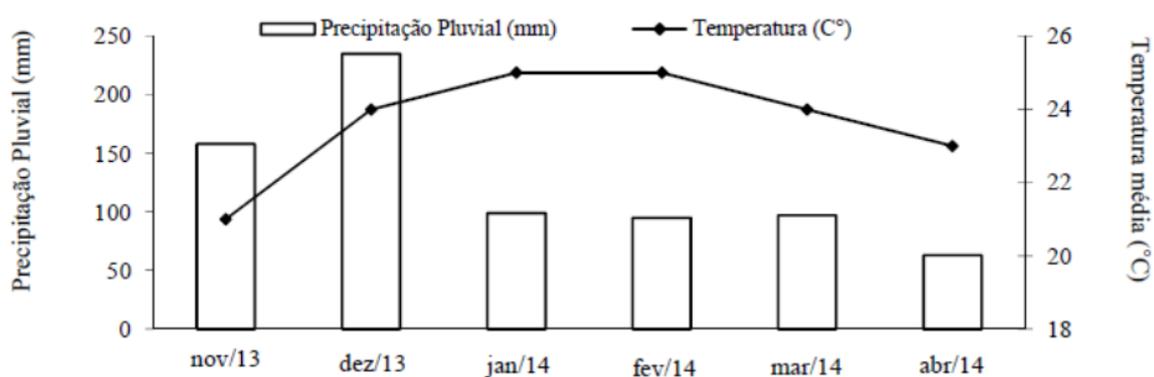
Alterações na geometria do sistema poroso tem sido reportado como uma consequência persistente da compactação do solo (ETANA et al., 2013). A opção para tentar reverter esse processo temporariamente pode ser a escarificação mecânica (NUNES et al., 2014), que aumenta a porosidade do solo, consequentemente promove o decréscimo da densidade do solo e favorece o desenvolvimento radicular na camada superficial. Entretanto, esse benefício pode desaparecer em 18 meses, dependendo da textura, do clima e do manejo da cultura.

Como o cultivo inadequado do solo altera os atributos físicos em relação ao solo não cultivado, surge à necessidade de se quantificar e qualificar as condições estruturais do solo. Por isso, é cada vez mais viável ajustar os atributos físicos de rápida e fácil determinação como: textura, matéria orgânica, densidade do solo, volume total de poros entre outros, para a determinação de um novo parâmetro por meio de modelos matemáticos. Portanto, é uma alternativa para geração de informações técnicas diante da escassez de recursos humanos e financeiros para a obtenção de parâmetros de solo (ROSSETTI et al., 2021).

Assim, o objetivo geral deste trabalho foi avaliar o efeito dos sistemas de manejo na qualidade física do solo, por meio de atributos físicos tradicionais e de novos parâmetro. Dessa maneira, como objetivos específicos o intuito foi verificar quais novos parâmetros oriundos de modelos matemáticos podem ser utilizados para avaliar a qualidade física do solo e também verificar como os atributos físicos alteram as variáveis da cultura do milho, após a compactação induzida por tratores em um Latossolo Vermelho Distrófico e em um Latossolo Vermelho Eutroférico.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado em Jaboticabal, SP, que pertence as coordenadas geográficas de 21°14'05" S, 48°17'09" W, com altitude de 615 m. O clima da região, de acordo com a classificação climática de Köppen, é do tipo Cwa, com verão quente e inverno seco, precipitação pluvial média anual de 1.428 mm e temperatura média de 21 °C (Figura 1).



**Figura 1** – Precipitação pluvial acumulada e temperatura média mensal durante o período de desenvolvimento da cultura de milho (2013/14).

Os solos foram classificados conforme Santos et al. (2018) em Latossolo Vermelho Distrófico, típico, textura média, A moderado, caulínítico-hipoférrico (LVd), cujo material de origem derivou-se principalmente de arenitos do Grupo Bauru nas porções mais elevadas e planas, e Latossolo Vermelho Eutroférico, típico, textura argilosa, A moderado, caulínítico-oxidado (LVef), originado principalmente dos produtos da alteração dos basaltos (Formação Serra Geral) subjacentes aos arenitos. Os solos apresentaram, na camada de 0-0,20 m, 348 e 560 g kg<sup>-1</sup> de argila, 598 e 240 g kg<sup>-1</sup> de areia, 54 e 200 g kg<sup>-1</sup> de silte e 2,89 e 2,74 Mg m<sup>-3</sup> de densidade de partículas (TEIXEIRA, 2017), respectivamente, no LVd e LVef.

Antes da instalação dos experimentos, foi realizado o preparo convencional do solo a 0,30 m de profundidade, por meio da gradagem de disco média de 18 discos de 660 mm (26<sup>o</sup>); grade leve off-set, modelo: ATCR, com sete discos em cada seção (duas), com discos de 0,61 m e distância entre discos de 0,23 m.

O delineamento experimental foi o de blocos casualizados, com cinco tratamentos e quatro repetições. Os efeitos aleatorizados às parcelas foram: solo preparado no sistema convencional e sem tráfego adicional de trator (SC); duas (C24) e quatro (C44) passadas do trator de 4 Mg, respectivamente; duas (C210) e quatro (C410) passadas do trator de 10 Mg. A compactação do solo foi então realizada por meio da passagem dos rodados desses tratores, perfazendo toda a superfície das parcelas, de forma que os pneus comprimissem áreas paralelas entre si. Dessa forma, o número de vezes que os tratores trafegaram variou conforme o tratamento; o tráfego foi sobreposto ao anterior, de forma que toda área de cada parcela fosse trafegada com número igual de vezes.

Os tratamentos foram estabelecidos em novembro de 2013, quando o solo possuía um conteúdo de água próximo da capacidade de campo de 0,12 a 0,22 kg kg<sup>-1</sup> para o LVd e LVef, respectivamente na camada de 0-0,20 m (TEIXEIRA, 2017). Para estabelecer os tratamentos SC e C24, utilizou-se o trator de 56 kW (70 cv), com pressão de inflação nos pneus dianteiros R1 de 83 kPa e nos pneus traseiros (R1 18.4-30) com 96 kPa, tração 4 x 2 e massa de 4 Mg, com distribuição de 30% da massa total nas rodas diagonais dianteiras e 70% nas rodas radiais traseiras. Para os tratamentos C210 e C410 foram utilizados uma pá carregadora de 105 kW (143 cv), tração 4 x 4, pneus 17.5 R 25, radial (L-3), massa de 10 Mg, com a concha vazia. As operações foram realizadas em velocidade ≤ 5 km h<sup>-1</sup>, com pneus calibrados e em bom estado de conservação.

A semeadura do milho (híbrido simples Maximus) foi efetuada em dezembro de 2013, utilizando-se uma semeadora-adubadora de plantio direto com cinco linhas. O mecanismo sulcador do solo da semeadora foi retirado para não eliminar os possíveis efeitos negativos da compactação, sendo utilizado somente o disco de corte do dosador de sementes. A densidade de semeadura foi de cinco a seis sementes por metro linear, com espaçamento entrelinhas de 0,90 m. As parcelas experimentais foram constituídas de cinco linhas de semeadura com 6 m de comprimento, considerando-se área útil da parcela as três linhas centrais, desprezando-se 1,5 m de cada extremidade, totalizando cada área útil da parcela com 5,4 m<sup>2</sup>.

A adubação na semeadura foi baseada nos dados presentes na Tabela 1 e consistiu da aplicação de 250 kg ha<sup>-1</sup> da formulação N-P-K (8-28-16) e 30 kg ha<sup>-1</sup> de sulfato de zinco para a obtenção da produtividade esperada de 6 a 8 Mg ha<sup>-1</sup>, para a cultura do milho segundo a recomendação de Raij et al. (2001). A adubação de cobertura foi realizada no estádio V6 da cultura com 250 kg ha<sup>-1</sup> da formulação N-P-K (30-0-10) em superfície, ao lado da linha de semeadura, com a mesma semeadora-adubadora utilizada na semeadura. Para os tratamentos culturais utilizou-se o trator de 77 kw (105 cv), tração 4 x 2 TDA (tração dianteira auxiliar) e massa de 7 Mg, com pressão de inflação de 95 kPa nos pneus dianteiros (14.9- 24R1) e 110 kPa nos traseiros (19.4-34 R1), com distribuição de 40 % da massa total nas rodas radiais dianteiras e 60% nas rodas radiais traseiras.

**Tabela 1** – Características químicas do Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) e do Latossolo Vermelho Eutroférico (LVef) na camada de 0-0,20 m, antes da implantação do experimento.

Solo	pH CaCl <sub>2</sub>	MO g dm <sup>-3</sup>	Presina mg dm <sup>-3</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	H+Al	SB	CTC	V
				-----mmolc dm <sup>-3</sup> -----						
LVd	5,6	14	40	2,0	21	17	20	40	60	67
LVef	4,9	24	61	2,7	30	12	27	45	72	62

MO: matéria orgânica do solo; SB: soma de bases; CTC: capacidade de troca de cátions; V: saturação por bases.

Para a determinação dos atributos físicos, foram coletadas, em janeiro de 2014, em cada parcela, amostras indeformadas na entrelinha da cultura com cilindros de 53,18 10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup> (0,032 m de altura e 0,046 m de diâmetro). As amostras foram saturadas por 24h e submetidas às câmaras de Richards em -0,01 MPa. Ao atingirem o equilíbrio, foram pesadas e na sequência as amostras foram secas em estufa a 105 °C, durante 24h, para determinação da densidade do solo (Ds). A microporosidade (micro) foi determinada por secagem e a macroporosidade (macro) foi calculada como sendo a diferença entre a porosidade total e a microporosidade (TEIXEIRA, 2017).

A capacidade de campo relativa (CCR) expressa a capacidade relativa do solo em armazenar água e ar com base no volume total de poros (representado por  $\theta_s$ ) (REYNOLDS et al., 2009), obtida da Equação 1:

$$CCR = \frac{\theta_{cc}}{\theta_s} \quad (1)$$

Em que: CCR = capacidade de campo relativa (adimensional);  $\theta_{cc}$  = capacidade de campo ( $m^3 m^{-3}$ ) submetidos ao potencial de água de -0,01 MPa, e  $\theta_s$  = conteúdo de água no solo no estado de saturação ( $m^3 m^{-3}$ ).

A difusividade relativa de ar foi estimada como proposta por Millington & Quirk (1961) e usado por Lima et al. (2021), levando o volume de vazios para o potencial de água de -0,01 MPa e o volume de porosidade total foi calculado para cada amostra (Equação 2):

$$\frac{D}{D_o} = \frac{E^{10/3}}{PT^2} \quad (2)$$

Em que:  $D/D_o$  = difusividade relativa (adimensional);  $E$  = volume de vazios ( $m^3 m^{-3}$ );  $PT$  = porosidade total ( $m^3 m^{-3}$ ).

A tortuosidade dos poros ( $T_{ort}$ , adimensional) foi estimada com os dados da  $PT$  de acordo com Yu & Li (2004) (Equação 3):

$$T_{ort} = 0,5 * (1 + (0,5 * \sqrt{1 - PT})) + \frac{\sqrt{1 - (\sqrt{1 - PT})^2 + (\frac{1 - PT}{4})}}{1 - (\sqrt{1 - PT})} \quad (3)$$

Em que:  $PT$  = porosidade total ( $m^3 m^{-3}$ ).

No estádio R6 da cultura do milho, foi determinada a altura das plantas entre o solo e a inserção da base do pendão enquanto o diâmetro do colmo foi determinado utilizando-se a média de duas leituras do segundo internódio do colmo por meio do paquímetro digital. Utilizaram-se 10 plantas/área útil da parcela. A produtividade de grãos de milho foi obtida extrapolando-se a produção de grãos da área útil da parcela para 1 ha, ajustando-se a umidade dos grãos para 13%.

Os resultados obtidos foram então submetidos à análise de variância pelo software Assisat versão 7.7 beta (SILVA, 2016) e quando significativas às médias foram comparadas pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A observação relatada por Freddi et al. (2009), de que o tráfego de tratores modifica a macroporosidade apenas na camada superficial (0-0,20 m), não pode ser retratada neste estudo. Uma vez que, a macroporosidade no LVd foi semelhante para todos os tratamentos na camada de 0,10-0,20 m (Tabela 2). Essa não diferença de macroporosidade entre todos os tratamentos, também foi averiguado no LVef para as camadas de 0-0,10, 0,10-0,20 e 0,10-0,20 m (Tabela 3).

Constatou-se em ambos os solos, valores de macroporosidade  $> 0,10 m^3 m^{-3}$ , que é o mínimo necessário para as trocas líquidas e gasosas entre o ambiente externo e o solo, e crítico para o crescimento das raízes da maioria das culturas (REICHERT et al., 2007). Neste aspecto, uma exceção foi notada para o C410 na camada de 0-0,10 m ( $0,075 m^3 m^{-3}$ ) para o LVd. Neste estudo, pode-se afirmar que a macroporosidade está em uma faixa de 0,123 a  $0,246 m^3 m^{-3}$  para p LVd e de 0,189 a  $0,436 m^3 m^{-3}$  para o LVef, excluindo a exceção mencionada anteriormente.

Neste sentido, o volume de macroporos entre  $0,09-0,13 m^3 m^{-3}$  é considerado ideal para o desenvolvimento das culturas de acordo com Reynolds et al. (2009).

A massa de 4 ou 10 Mg aliada a duas e quatro passadas de tratores não influenciou a macroporosidade no LVef. Resultado semelhante foi reportado por Soracco et al. (2015) para a macroporosidade, porosidade total e  $D_s$  do Argissolo (0-0,15 m) em comparação aos tratamentos sem tráfego de máquinas agrícola, com três e cinco passadas do trator de 3,8 Mg. Conforme esses autores, o efeito do tráfego de máquinas não proporcionou uma energia de compactação muito extrema e por isso as alterações dessas variáveis não persistiram depois de dois anos. Discordando desses resultados Bergamin et al. (2010), afirmaram que a aplicação de maior número de passadas do trator nas camadas de 0-0,05 e 0,05-0,10 m, acarretou a redução da macro no PDC4 e PDC6 (plantio direto com compactação adicional por tráfego de trator de 5Mg em quatro e seis passadas, respectivamente), em 26 e 44%, respectivamente, quando comparados ao tratamento PD (plantio direto com compactação adicional).

**Tabela 2** – Densidade do solo, Macroporosidade e Microporosidade em Latossolo Vermelho Distrófico (LVd), sob diferentes intensidades de compressão e camadas

Camada (m)	Compressão				
	SC	C24	C44	C210	C410
LVd					
Densidade do solo ( $Mg\ m^{-3}$ )					
0-0,10	1,43 C	1,72 AB	1,66 BC	1,74 AB	1,94 A
	F= 8,15**		CV(%)= 7,60		
0,10-0,20	1,62 B	1,84 AB	1,97 A	1,78 AB	1,77 AB
	F= 4,21*		CV(%)= 7,01		
0,20-0,30	1,67 B	1,79 A	1,77 A	1,75 AB	1,73 AB
	F= 5,58**		CV(%)= 8,12		
Macroporosidade do solo ( $m^3\ m^{-3}$ )					
0-0,10	0,246 A	0,192 AB	0,212 A	0,138 AB	0,075 B
	F= 5,73**		CV(%)= 32,35		
0,10-0,20	0,178 A	0,137 A	0,168 A	0,133 A	0,170 A
	F= 0,82 <sup>ns</sup>		CV(%)= 31,50		
0,20-0,30	0,136 BC	0,197 AB	0,123 C	0,206 A	0,185 ABC
	F= 5,96**		CV(%)= 18,17		
Microporosidade do solo ( $m^3\ m^{-3}$ )					
0-0,10	0,206 A	0,207 A	0,177 A	0,214 A	0,256 A
	F= 1,63 <sup>ns</sup>		CV(%)= 20,97		
0,10-0,20	0,219 A	0,194 A	0,167 A	0,198 A	0,173 A
	F= 0,88 <sup>ns</sup>		CV(%)= 23,28		
0,20-0,30	0,229 AB	0,190 BC	0,245 A	0,149 C	0,157 C
	F= 13,26**		CV(%)= 12,04		

SC: sem compactação, C24 e C44: duas e quatro passadas do trator de 4 Mg, respectivamente, C210 e C410: duas e quatro passadas do trator de 10 Mg, respectivamente. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). <sup>ns</sup>= não significativo; \*significativo ( $p < 0,05$ ) e \*\* significativo ( $p < 0,01$ ).

**Tabela 3** – Densidade do solo, Macroporosidade e Microporosidade em Latossolo Vermelho Eutroférico (LVef), sob diferentes intensidades de compressão e camadas.

Camada (m)	Compressão				
	SC	C24	C44	C210	C410
LVef					
Densidade do solo ( $Mg\ m^{-3}$ )					
0-0,10	1,29 B	1,48 AB	1,67 A	1,56 A	1,63 A
	F= 11,51**		CV(%)= 5,80		
0,10-0,20	1,38 B	1,55 A	1,61 A	1,56 A	1,54 A
	F= 6,34**		CV(%)= 4,51		
0,20-0,30	1,47 B	1,51 AB	1,55 AB	1,60A	1,60A
	F= 3,88*		CV(%)= 3,63		
Macroporosidade do solo ( $m^3\ m^{-3}$ )					
0-0,10	0,312 A	0,222 A	0,261 A	0,268 A	0,192 A
	F= 1,62 <sup>ns</sup>		CV(%)= 28,73		
0,10-0,20	0,361 A	0,372 A	0,317 A	0,355 A	0,436 A
	F= 2,21 <sup>ns</sup>		CV(%)= 15,79		
0,20-0,30	0,297 A	0,241 A	0,243 A	0,189 A	0,221 A
	F= 1,03 <sup>ns</sup>		CV(%)= 32,68		
Microporosidade do solo ( $m^3\ m^{-3}$ )					
0-0,10	0,361 A	0,372 A	0,317 A	0,355 A	0,436 A
	F= 2,21 <sup>ns</sup>		CV(%)= 15,79		
0,10-0,20	0,347 A	0,426 A	0,405 A	0,389 A	0,366 A
	F= 1,20 <sup>ns</sup>		CV(%)= 14,73		
0,20-0,30	0,341 A	0,357 A	0,341 A	0,394 A	0,366 A
	F= 0,35 <sup>ns</sup>		CV(%)= 20,75		

SC: sem compactação, C24 e C44: duas e quatro passadas do trator de 4 Mg, respectivamente, C210 e C410: duas e quatro passadas do trator de 10 Mg, respectivamente. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ). <sup>ns</sup>= não significativo; \*significativo ( $p < 0,05$ ) e \*\* significativo ( $p < 0,01$ ).

Verificou-se que a microporosidade na sua quase totalidade em ambos os solos, não foi sensível às modificações causadas pelo tráfego dos tratores e nem ao preparo convencional. Esse comportamento pode ser justificado por causa da forte influência da microporosidade do solo com a textura e o teor de matéria orgânica. As características intrínsecas de cada classe de solo estão altamente relacionadas à microporosidade do solo; e para que se tenha qualquer possível alteração na granulometria e no teor de matéria orgânica do solo é necessário em período de longa duração. Porém, pode-se constatar alteração da microporosidade no LVd induzidas por tratores como o C24, C210 e C410, que foram semelhantes entre si e inferiores ao C44. Dessa maneira, esse resultado contraria as justificativas acima mencionadas sobre a influência da microporosidade do solo. Contudo, os autores consideram um resultado de pequena proporção em comparação a predominância dos demais tratamentos e camadas analisadas.

A Ds do SC no LVd foi inferior ao C24, C210 e C410 na camada de 0-0,10 m, ao C44 na camada de 0,10-0,20 m e aos tratamentos C24 e C44 para a camada de 0,20-0,30 m. Segundo Vogelmann et al. (2012), o tráfego adicional com uma pá carregadora (10 Mg) em semeadura direta por 13 anos elevou a Ds do Argissolo Vermelho- Amarelo em relação ao sistema de semeadura direta na camada de 0-0,10 m (respectivamente 1,68 e 1,56 Mg m<sup>-3</sup>). Nota-se, também, que no LVef a Ds no SC foi inferior: na camada de 0-0,10 m para o C44, C210 e C410; às compressões estudadas na camada de 0,10-0,20 m; para os tratamentos C24, C44, C210 e C410 e para os tratamentos C210 e C410 na camada de 0,20-0,30 m. Essas alterações observadas em ambos os solos se devem, segundo Silva et al. (2012), ao efeito benéfico temporário da escarificação em reduzir a Ds no solo. Foi estabelecido por esses autores, que após seis meses de SC a Ds passou a ter um acréscimo em 20% e que tal comportamento estável ocorreu por mais um ano, tendendo a um estado de estabilização.

Resultado semelhante também foi constatado por Seki et al. (2015). Esses autores verificaram que 11 meses após o preparo do Nitossolo Vermelho distroférrico, cultivado por 10 anos em sistema de plantio direto, não havia a persistência do efeito da escarificação. Neste estudo, devido provavelmente ao alto teor de argila, os valores da Ds nos tratamentos com compressões no LVef estão acima do valor crítico de 1,44 Mg m<sup>-3</sup>, como mencionado por Reichert et al. (2009). Todavia, no LVd a Ds situou-se acima do crítico de 1,63 Mg m<sup>-3</sup> nos tratamentos com compactação induzida. Exceção para ambos os solos ocorreu para o tratamento SC para as camadas de 0-0,10 m e de 0,10-0,20 m.

A estimativa da difusividade relativa de ar ( $D/D_o$ ) no LVd (Tabela 4) e no LVef (Tabela 5) foi influenciada pelos tratamentos apenas na camada de 0-0,10 m. Nesse caso, a  $D/D_o$  foi superior no SC (0-0,10 m) em comparação aos tratamentos com compressão. Esse mesmo comportamento não foi observado para a macroporosidade no LVef, concordando com Kuncoro et al. (2014). Para esses autores, o decréscimo da  $D/D_o$  ocorre com o nível de compactação devido ao tráfego de tratores agrícolas, o qual pode ser suficientemente atribuído a redução do volume de vazios, que é um indicativo da redução do volume de macroporos.

Resultado semelhante da redução da  $D/D_o$  pela compactação, também tem sido reportado por Berisso et al. (2012) depois das repetidas passadas por um trator de carga de 10,4 Mg em um solo franco-argilo-arenosa. Grable & Siemer (1968) e também Pulido-Moncada & Munkholm (2019) reportaram que  $D/D_o < 0,005$  pode ser limitante para o desenvolvimento das raízes de milho. Notou-se essa condição, somente no LVd para todos os tratamentos e para o LVef somente não ocorreram para o C44 (0-0,10 m) e para o C410 (0,20-0,30 m).

Operações de preparo podem destruir os poros contínuos, assim a tortuosidade dos poros ( $T_{ort}$ ) pode ser usada como um indicador dos impactos prejudiciais da funcionalidade do solo: o alto valor de  $T_{ort}$ , indica o baixo fluxo de ar e água. Galdos et al. (2019) verificaram que o alto  $T_{ort}$  conduz à uma maior descontinuidade de poros, o qual reduz o fluxo de ar e água no solo. Constatou-se no LVd, uma predominância de maiores valores de  $T_{ort}$  para os tratamentos com compactação em relação ao SC (0-0,10 m). Situação semelhante de  $T_{ort}$  também foi observado no LVef para as camadas de 0-0,10 m e 0,10-0,20m.

Esses resultados estão em concordância com Pulido-Moncada & Munkholm (2019), os quais relataram que até 0,30 m de profundidade, o solo de textura franco-arenosa com compactações com quatro a cinco passadas de um trator de 3 Mg e de 8 Mg exibiram valores significativamente superior  $T_{ort}$  relação ao tratamento sem compactação. Os solos com manejo de compactação induzida (C24, C44, C210 e C410), apresentam uma quebra na estrutura do solo e no sistema poroso o que causa um decréscimo na conectividade dos poros sendo assim prejudicial ao crescimento das raízes em profundidade.

Os tratamentos não forneceram diferença significativa em relação à capacidade de campo relativa (CCR), para o LVd em todas as camadas avaliadas e no LVef para as profundidades de 0-0,10 m e 0,20-0,30 m (Tabelas 4 e 5). Sendo, que os valores de CCR ficaram abaixo do valor crítico de 0,70 (exceção do C410 na camada de 0-0,10 m no LVd e para o C24 na camada de 0,10-0,20 m em LVef). Segundo Reynolds et al. (2009), quando a CCR for superior a 0,70 pode causar uma redução na aeração da rizosfera. Conforme Weninger et al. (2019), os valores de CCR de

0,724-0,900 podem impedir o sistema de aeração da rizosfera das culturas agrícolas e afetam a produtividade das culturas.

**Tabela 4** – Valores médios de capacidade de campo relativa (CCR), difusividade relativa de ar (D/D<sub>0</sub>), tortuosidade dos poros (T<sub>ort</sub>) Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) sob diferentes intensidades de compressão e camadas.

Camada (m)	Compressão				
	SC	C24	C44	C210	C410
	LVd				
	CCR				
0-0,10	0,46 A	0,52 A	0,46 A	0,61 A	0,71 A
	F= 2,35 <sup>ns</sup>			CV(%)= 25,05	
0,10-0,20	0,55 A	0,58 A	0,49 A	0,61 A	0,48 A
	F= 0,66 <sup>ns</sup>			CV(%)= 24,82	
0,20-0,30	0,63 A	0,55 A	0,59 A	0,42 A	0,52 A
	F= 2,16 <sup>ns</sup>			CV(%)= 19,87	
	D/D <sub>0</sub>				
0-0,10	0,003 A	0,001 B	0,002 B	0,001 B	0,001 B
	F= 14,50 <sup>**</sup>			CV(%)= 24,98	
0,10-0,20	0,001 A	0,001 A	0,001 A	0,001 A	0,001 A
	F= 1,71 <sup>ns</sup>			CV(%)= 29,70	
0,20-0,30	0,001 A	0,001 A	0,001 A	0,001 A	0,001 A
	F= 1,00 <sup>ns</sup>			CV(%)= 21,29	
	Tort				
0-0,10	2,55 C	2,88 B	2,89 B	3,08 AB	3,27 A
	F= 15,69 <sup>**</sup>			CV(%)= 6,40	
0,10-0,20	2,79 B	3,21 A	3,24 A	3,19 A	3,03 AB
	F= 6,16 <sup>**</sup>			CV(%)= 7,84	
0,20-0,30	2,94 A	3,07 A	2,92 A	3,00 A	3,04 A
	F= 0,96 <sup>ns</sup>			CV(%)= 7,14	

SC: sem compactação, C24 e C44: duas e quatro passadas do trator de 4 Mg, respectivamente, C210 e C410: duas e quatro passadas do trator de 10 Mg, respectivamente. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (p < 0,05). <sup>ns</sup>= não significativo e <sup>\*\*</sup> significativo (p < 0,01).

**Tabela 5** – Valores médios de capacidade de campo relativa (CCR), difusividade relativa de ar (D/D<sub>0</sub>), tortuosidade dos poros (T<sub>ort</sub>) Latossolo Vermelho Eutrófico (LVef) sob diferentes intensidades de compressão e camadas.

Camada (m)	Compressão				
	SC	C24	C44	C210	C410
	LVef				
	CCR				
0-0,10	0,54 A	0,63 A	0,55 A	0,57 A	0,68 A
	F= 1,24 <sup>ns</sup>			CV(%)= 17,72	
0,10-0,20	0,52 B	0,72 A	0,68 AB	0,64 AB	0,60 AB
	F= 2,87 <sup>ns</sup>			CV(%)= 14,64	
0,20-0,30	0,53 A	0,59 A	0,62 A	0,67 A	0,61 A
	F= 0,60 <sup>ns</sup>			CV(%)= 21,09	
	D/D <sub>0</sub>				
0-0,10	0,011 A	0,005 B	0,004 B	0,006 B	0,006 B
	F= 14,01 <sup>**</sup>			CV(%)= 21,00	
0,10-0,20	0,010 A	0,005 A	0,006 A	0,006 A	0,005 A
	F= 53,22 <sup>**</sup>			CV(%)= 9,85	
0,20-0,30	0,008 A	0,005 A	0,005 A	0,005 A	0,004 A
	F= 6,66 <sup>**</sup>			CV(%)= 17,86	
	Tort				
0-0,10	2,05 B	2,27 A	2,31 A	2,25 A	2,24 A
	F= 7,25 <sup>**</sup>			CV(%)= 7,34	
0,10-0,20	2,06 B	2,29 A	2,25 A	2,24 A	2,26 A
	F= 24,75 <sup>**</sup>			CV(%)= 6,50	
0,20-0,30	2,15 B	2,26 AB	2,27 AB	2,30 AB	2,40 A
	F= 2,50 <sup>ns</sup>			CV(%)= 5,08	

SC: sem compactação, C24 e C44: duas e quatro passadas do trator de 4 Mg, respectivamente, C210 e C410: duas e quatro passadas do trator de 10 Mg, respectivamente. Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (p < 0,05). <sup>ns</sup>= não significativo e <sup>\*\*</sup> significativo (p < 0,01).

O tratamento SC no LVd apresentou produtividade de milho (Tabela 6) semelhante aos tratamentos C24, C44, C210 e C410. Pode-se afirmar que as alterações promovidas na estrutura deste solo não prejudicaram a produtividade de milho. Percebe-se que a produtividade de milho no LVef, assim como ocorreu no LVd não apresentou diferença entre os tratamentos. Apesar das modificações apresentadas para a Ds, elas também não influenciaram negativamente na produtividade de milho em ambos os solos.

**Tabela 6** – Produtividade, altura de milho e diâmetro do colmo em Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) e para o Latossolo Vermelho Eutroférico (LVef), sob diferentes intensidades de compressão.

Tratamento	Produtividade	Altura	Diâmetro	Produtividade	Altura	Diâmetro
	Mg ha <sup>-1</sup>	m	mm	Mg ha <sup>-1</sup>	m	mm
	-----LVd-----			-----LVef-----		
SC	4,13 a	1,99 a	18,51 a	6,91 a	2,09 a	20,57 a
C24	5,72 a	1,78 b	20,78 a	6,90 a	1,86 b	19,12 a
C44	5,25 a	1,69 bc	19,24 a	6,21 a	1,76 bc	19,27 a
C210	3,65 a	1,56 c	18,93 a	7,26 a	1,85 b	19,97 a
C410	3,77 a	1,35 d	17,96 a	6,75 a	1,67 c	19,27 a
F	3,07 <sup>ns</sup>	21,13 <sup>**</sup>	1,98 <sup>ns</sup>	0,39 <sup>ns</sup>	28,74 <sup>**</sup>	0,81 <sup>ns</sup>
CV (%)	23,50	5,49	7,90	18,08	3,16	6,97

SC: sem compactação, C24 e C44: duas e quatro passadas do trator de 4 Mg, respectivamente, C210 e C410: duas e quatro passadas do trator de 10 Mg, respectivamente. Médias seguidas da mesma letra, no sentido vertical, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ )<sup>(1)</sup>Variação referente aos tratamentos (parcelas). <sup>(2)</sup> Variação referente às camadas (subparcelas). <sup>ns</sup>= não significativo; e <sup>\*\*</sup> significativo ( $p < 0,01$ ).

Ressalta-se a ocorrência de condições meteorológicas favoráveis decorrentes da precipitação pluviométrica durante o ciclo da cultura (Figura 1). Quando se observa os valores absolutos, a produtividade de milho no LVef apresentou uma maior expressão do que no LVd. Esse fato, deve-se aos maiores teores de MO (Tabela 1) e de argila no LVef que favoreceram a maior adsorção de água. Conforme Girardello et al. (2014), o crescimento de uma cultura agrícola é sensível as alterações ocorridas na qualidade física do solo, todavia este estudo contraria esta afirmação, uma vez que não constatou-se redução na produtividade de milho.

Tendo em consideração o diâmetro do colmo não houve diferença estatística entre os tratamentos em ambos os solos. Os menores valores de altura de milho, foram verificados no C410 no LVd e para a área no LVef em C44 e C410, sendo o C44 semelhante aos C24 e C210. Portanto, há um indicativo de que as plantas que receberam determinadas compactações adicionais (referente ao número de passadas e das massas dos tratores) encontraram limitações somente para crescer e não para a produtividade de milho. Os altos valores de  $T_{ort}$  não foram suficientes para afetar significativamente a produtividade do milho, provavelmente foi devido ao vasto sistema radicular que pode ter explorado um grande volume de solo.

#### 4. CONCLUSÕES

A difusividade relativa de ar e a tortuosidade dos poros, foram parâmetros viáveis para avaliar a qualidade física em LVd e LVef.

Os altos valores da tortuosidade dos poros, não foram suficientes para afetar a produtividade do milho.

As alterações nos atributos físicos causadas por duas a quatro passadas de um trator de 4 Mg ou de 10 Mg em LVd e LVef, não foram limitantes para a produtividade de milho.

#### 5. AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudo ao primeiro autor.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BERGAMIN, A.C.; VITORINO, A.C.T.; FRANCHINI, J.C.; SOUZA, C.M.A.; SOUZA, F.R. Compactação de um Latossolo Vermelho distrófico e suas relações com o crescimento radicular do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, n.3, p.681-691, 2010. DOI: [doi.org/10.1590/S0100-06832010000300009](https://doi.org/10.1590/S0100-06832010000300009)
- BERISSO, F.E.; SCHJONNING, P.; KELLER, T.; LAMANDÉ, M.; ETANA, A.; DE JONGE, L.W.; IVERSEN, B.V.; ARVIDSSON, J.; FORKMAN, J. Persistent effects of subsoil compaction on pore size distribution and

- gas transport in loamy soil. **Soil & Tillage Research**, v.122, n.6, p.42-51, 2012. DOI: [doi.org/10.1016/j.still.2012.02.005](https://doi.org/10.1016/j.still.2012.02.005)
- ETANA, A.; LARSBOR, M.; KELLER, T.; ARVIDSSON, J.; SCHJONNING, P.; FORKMAN, J.; JARVIS, N. Persistent subsoil compaction and its effects on preferential flow patterns in a loamy till soil. **Geoderma**, v.192, n.1, p.430-436, 2013. DOI: [doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.08.015](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.08.015)
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). **Status of the world's soil resources**. Roma: Intergovernmental Technical Panel on Soils, 2015. 648p. Disponível em <<http://www.fao.org/publications/>>. Acesso em: 10 jan. 2022.
- FREDDI, O.S.; CENTURION, J.F.; DUARTE, A.P.; PERES, F.S.C. Compactação do solo e produção de cultivares de milho em Latossolo Vermelho. II-Intervalo hídrico ótimo e sistema radicular. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, n.4, p.805-818, 2009. DOI: [doi.org/10.1590/S0100-06832009000400006](https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000400006)
- GALDOS, M.V.; PIRES, L.F.; COOPER, H.V.; CALONEGO, J.C.; ROSOLEM, C.A.; MOONEY, S.J. Assessing the long term effects of zero-tillage on the macroporosity of Brazilian soils using x-ray computed tomography. **Geoderma**, v.337, n.11, p.1126-1135, 2019. DOI: [doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.11.031](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.11.031)
- GIRARDELLO, V.C.; AMADO, T.J.C.; SANTI, A.L.; CHERUBIN, M.R.; KUNZ, J.; TEIXEIRA, T. de G. Resistência à penetração, eficiência de escarificadores mecânicos e produtividade da soja em Latossolo argiloso manejado sob plantio direto de longa duração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.38, n.4, p.1234-1244, 2014. DOI: [doi.org/10.1590/S0100-06832014000400020](https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000400020)
- GRABLE, A.R.; SIEMER, E.G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. **Soil Science Society American Journal**, v.32, n.3, p.180-186, 1968. DOI: [doi.org/10.2136/sssaj1968.03615995003200020011x](https://doi.org/10.2136/sssaj1968.03615995003200020011x)
- IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; GHIBERTO, P.J.; TORMENA, C.A.; PILATTI, M.A.; LIBARDI, P.L. Physical quality indicators and mechanical behavior of agricultural soils of Argentina. **Plos One**, v.11, n.4, e0153827, 2016. DOI: [doi.org/10.1371/journal.pone.0153827](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0153827)
- KELLER, T.; LAMANDÉ, M.; PETH, S.; BERLI, M.; DELENNE, J.Y.; BAUMGARTEN, W.; RABEL, W.; RADJAI, F.; RAJCHENBACH, J.; SELVADURAI, A.P.S.; OR, D. An interdisciplinary approach towards improved understanding of soil deformation during compaction. **Soil & Tillage Research**, v.128, n.4, p.61-80, 2013. DOI: [doi.org/10.1016/j.still.2012.10.004](https://doi.org/10.1016/j.still.2012.10.004)
- KUNCORO, P.H.; KOGA, K.; SATTI, N.; MUTO, Y. A study on the effect of compaction on transport properties of soil gas and water. II: Soil pore structure indices. **Soil & Tillage Research**, v.143, n.11, p.172-179, 2014. DOI: [doi.org/10.1016/j.still.2014.01.008](https://doi.org/10.1016/j.still.2014.01.008)
- LIMA, R.P.; ROLIM, M.M. DA C.; DANTAS, D.; DA SILVA, A.R.; MENDONÇA, E.A.S. Compressive properties and least limiting water range of plough layer and plough pan in sugarcane fields. **Soil Use & Management**, v.37, n.3, p.1-12, 2021. DOI: [doi.org/10.1111/sum.12601](https://doi.org/10.1111/sum.12601)
- MILLINGTON, R.J.; QUIRK, J.P. Permeability of porous solids. **Transactions of the Faraday Society**, v.57, n.6, p.1200-1207, 1961. DOI: [doi.org/10.1039/TF9615701200](https://doi.org/10.1039/TF9615701200)
- NUNES, M.R.; PAULETTO, E.A.; DENARDIN, J.E.; FAGANELLO, A.; PINTO, L.F.S.; SCHEUNEMANN, T. Persistência dos efeitos da escarificação sobre a compactação de Nitossolo sob plantio direto em região subtropical úmida. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.19, n.7, p.531-539, 2014. DOI: [doi.org/10.1590/S0100-204X2014000700005](https://doi.org/10.1590/S0100-204X2014000700005)
- PULIDO-MONCADA, M.; MUNKHOLM, L.J. Limiting water range: a case study for compacted subsoils. **Soil Science Society American Journal**, v.83, n.8, p.98-992, 2019. DOI: [doi.org/10.2136/sssaj2019.01.0023](https://doi.org/10.2136/sssaj2019.01.0023)
- RAIJ, B. VAN.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285p.
- REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: Identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C.A.; SILVA, L.S.; REICHERT, J.M. **Tópicos em ciência do solo**. 5. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 49-134.
- REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; HORN, R.; HAAKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil & Tillage Research**, v.102, n.3, p.242-254, 2009. DOI: [doi.org/10.1016/j.still.2008.07.002](https://doi.org/10.1016/j.still.2008.07.002)
- REYNOLDS, W.D.; DRURY, C.F.; TAN, C.S.; FOX, C.A.; YANG, X.M. Use of indicators and pore volume function characteristics to quantify soil physical quality. **Geoderma**, v.152, n.3-4, p.252-263, 2009. DOI: [doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.06.009](https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.06.009)
- ROSSETTI, K.V.; CENTURION, J.F. Structural quality indicators in compacted oxisols grown with corn. **Revista de Agricultura Neotropical**, v.7, n.4, p.29-39, 2021. DOI: [doi.org/10.32404/rean.v7i4.5092](https://doi.org/10.32404/rean.v7i4.5092)

- SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.; OLIVEIRA, V.A.; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A.; ARAUJO FILHO, J.C.; OLIVEIRA, J.B.; CUNHA, T.J.F. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 586p.
- SEKI, A.S.; SEKI, F.G.; JASPER, S.P.; SILVA, P.R.A.; BENEZ, S.H. Efeitos de práticas de compactação do solo em área sob sistema plantio direto. **Revista Ciência Agronômica**, v.46, n.3, p.460-468, 2015. DOI: [doi.org/10.5935/1806-6690.20150027](https://doi.org/10.5935/1806-6690.20150027)
- SILVA, F.A.S.; AZEVEDO, C.A.A. The Assisat Software Version 7.7 and its use in the analysis of experimental data. **African Journal of Agricultural Research**, v.39, n.11, p.3733-3740, 2016. DOI: [doi.org/10.5897/AJAR2016.11522](https://doi.org/10.5897/AJAR2016.11522)
- SILVA, S.G.C.; SILVA, A.P. DA; GIAROLA, N.F.B.; TORMENA, C.A.; SÁ, J.C.M. Temporary effect of chiseling on the compaction of a Rhodic Hapludox under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.36, n.2, p.547-555, 2012. DOI: [doi.org/10.1590/S0100-06832012000200024](https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000200024)
- SORACCO, C.G.; LOZANO, L.A.; VILLARREAL, R.; PALANCAR, T.C.; COLLAZZO, D.J.; SARLI, G.O.; FILGUEIRA, R.R. Effects of compaction due to machinery traffic on soil pore configuration. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.39, n.2, p.408-415, 2015. DOI: [doi.org/10.1590/01000683rbc20140359](https://doi.org/10.1590/01000683rbc20140359)
- TEIXEIRA, Y.; DONAGEMMA, G.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W.; **Manual de Métodos de Análises de Solo**. Brasília DF. Embrapa. 2017. 574p. Disponível em <<https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1085209/manual-de-metodos-de-analise-de-solo/>>. Acesso em: 15 fev. 2021.
- VOGELMANN, E.S.; MENTGES, M.I.; REICHERT, J.M.; ROSA, D.P. DA; BARROS, C.A.P. DE; REINERT, D.J. Compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo trafegado e escarificado. **Ciência Rural**, v.42, n.2, p.291-297, 2012. DOI: [doi.org/10.1590/S0103-84782012005000004](https://doi.org/10.1590/S0103-84782012005000004)
- WENINGER, T.; KREISELMEIER, J.; CHANDRASEKHAR, P.; JULICH, S.; FEGER, K.H.; SCHWARZEL, K.; BODNER, G.; SCHWEN, A. Effects of tillage intensity on pore system and physical quality of silt-textured soils detected by multiple methods. **Soil Research**, v.57, n.1, p.703-711, 2019. DOI: [doi.org/10.1071/SR18347](https://doi.org/10.1071/SR18347)
- YU, B.M.; LI, J.H. A geometry model for tortuosity of flow path in porous media. **Chinese Physics Letters**, v.21, n.8, p.1569-1571, 2004. DOI: [doi.org/10.1088/0256-307X/21/8/044](https://doi.org/10.1088/0256-307X/21/8/044)