

MODELAGEM DA DINÂMICA DA ÁGUA EM SISTEMAS DE PREPARO DE UM LATOSSOLO VERMELHO

*Modelling of soil water dynamics under tillage systems in a Rhodic Eutrudox*Moacir Tuzzin de Moraes^{1*}; Henrique Debiasi²; Julio Cezar Franchini²¹ Pós-Doutorando; Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, Brasil; e-mail: moacir.tuzzin@gmail.com (*autor para correspondência)² Pesquisador; Embrapa Soja, Londrina, Brasil; e-mail: henrique.debiasi@embrapa.br; julio.franchini@embrapa.br

Artigo enviado em 07/05/2017, aceito em 08/11/2017 e publicado em 10/04/2018.

Resumo – A dinâmica da água no solo é um dos principais fatores que determinam potencial produtivo das culturas agrícolas, sendo que uma importante ferramenta para modelagem do fluxo de água no solo é o modelo agrohidrológico *Soil Water Atmosphere Plant* (SWAP). Nesse sentido, objetivou-se utilizar o modelo SWAP na simulação da dinâmica da água em um Latossolo Vermelho Distroférico com sistemas de preparo do solo de longo prazo. O fluxo de água no solo foi simulado diariamente na camada de 0-50 cm em três sistemas de preparo do solo (plantio direto, preparo reduzido com escarificação anual e preparo convencional). Foram utilizados dados agrometeorológicos do período de 01/2001 a 11/2013 para fluxo de água no solo. A fração da água disponível foi influenciada pelo sistema de preparo do solo. O preparo convencional incrementou os períodos com baixa disponibilidade hídrica às culturas. Ao longo do tempo, houve adequada disponibilidade hídrica tanto no plantio direto quanto no preparo reduzido. No plantio direto ocorreram as menores taxas de escoamento superficial, favorecendo aumentos no armazenamento de água e drenagem profunda. O preparo convencional favoreceu o aumento das taxas de escoamento superficial e a redução da percolação profunda de água no solo, reduzindo a fração da água disponível e incrementando os dias com que o conteúdo de água do solo ficou abaixo da fração crítica de água disponível de 0,5. O modelo SWAP foi eficiente para simular o fluxo de água em sistemas de preparo neste Latossolo Vermelho. Sistemas conservacionistas de longo prazo preservam a estrutura do solo para a melhoria do fluxo de água.

Palavras-chave – modelo SWAP, sistema plantio direto, fluxo da água no solo.

Abstract – Soil water flux is the main factor that affect directly the crop productivity potential; thus, an important tool for modelling the soil water flux is the Soil Water Atmosphere Plant (SWAP) model. We aim use the SWAP model for modelling the water dynamics in a Rhodic Eutrudox under tillage systems on long term. Soil water flux from zero to 50 cm depth was simulated daily on three different soil tillage systems (no-tillage, minimum tillage with annual chiselling and conventional tillage). Agro-meteorological data from January 2001 to December 2013 were used for soil water flux. The fraction of plant-available water was affected by tillage system. Conventional tillage increased periods with low fraction of plant-available water. Throughout time, both no-tillage and minimum tillage showed suitable water availability. No-tillage showed smaller runoff rates, promoting the increase of water storage and deep percolation. Conventional tillage system increasing of runoff rates and reduction of deep percolation through soil, reducing soil fraction of plant-available water and increasing the number of days with fraction of plant-available water less than 0.5. SWAP model was efficient for modelling the soil water flux on tillage systems in a Rhodic Eutrudox. Long-term conservation systems are able to preserve the soil structure for improve water flux.

Key words – SWAP model, no-tillage, soil water flux.

INTRODUÇÃO

O sistema plantio direto (SPD) tem sido reconhecido como um importante sistema de manejo do solo para a sustentabilidade dos agroecossistemas. A expansão da área agrícola manejada sob SPD, cerca de 32 milhões de hectares, só foi possível em função do desenvolvimento continuado de soluções tecnológicas para superar as dificuldades relacionadas ao seu manejo,

bem como para aperfeiçoá-lo e adaptá-lo às diferentes regiões do país (MORAES, 2013).

A dinâmica da água no solo está diretamente relacionada à produção vegetal e, deste modo, a caracterização dos fatores que interferem no movimento de água no solo se torna imprescindível (ALVES et al., 2012). O balanço hídrico no solo com cultura agrícola pode ser definido como a contabilização das entradas e saídas de água num dado volume de solo, durante um

determinado período (LIBARDI, 2012). Assim, o conhecimento da dinâmica da água no perfil do solo em experimentos pode ser fundamental para o entendimento das interações do manejo do solo e da produtividade das culturas agrícolas. Neste sentido, a utilização de simulações numéricas, de fácil execução e baixo custo, pode facilitar a obtenção de resultados da dinâmica da água no solo (ALVES et al., 2012) melhorando o entendimento sobre as relações do sistema solo-planta-atmosfera.

Existem diversos modelos para simular as interações no sistema solo-planta-atmosfera. Um destes modelos é o *Soil Water Atmosphere Plant* (SWAP) (VAN DAM et al. 2008; KROES et al., 2008) que simula o fluxo de água e o crescimento de plantas no solo (KROES et al., 2008). Este modelo é fisicamente embasado e descreve o fluxo de água usando uma solução numérica da equação de Richards, unidimensional, vertical e transitório (VAN DAM et al., 2008). A equação de Richards é um modelo não-linear, com diferencial parcial, a qual possibilita descrição dos fluxos de água no perfil do solo como uma função do conteúdo volumétrico de água do solo ou gradientes do potencial da água no solo (BIGGS et al., 2008).

Neste sentido o estudo do fluxo de água associado com condições físicas dos solos pode favorecer o entendimento das alterações no sistema solo-planta-atmosfera, os quais são dependentes do manejo do solo adotado. Neste sentido, destaca-se o problema da compactação do solo que, além de aumentar sua resistência à penetração das raízes (MORAES, 2017) limita a profundidade e volume de solo explorado pelas raízes em busca de água e nutrientes (FRANCHINI et al., 2017), reduz a porosidade total, a macroporosidade, a aeração (MORAES et al., 2016a), interferindo diretamente na capacidade de infiltração de água e sua condutividade hidráulica (SILVA et al., 2009). Como reflexo, safras agrícolas tornam-se susceptíveis ao excesso ou deficiência hídrica, o que pode culminar em redução da produtividade das culturas (FRANCHINI et al., 2017; MORAES et al., 2017).

Em SPD, os espaços deixados pelas raízes das culturas produzem poros contínuos que facilitam o fluxo saturado de água (TORRES et al., 2011; MORAES et al. 2016b), favorecendo a aeração e o fluxo de água (DÖRNER et al., 2010). Ao contrário dos poros produzidos pela mobilização mecânica do solo, os bioporos são longos e contínuos e de alta efetividade para a transmissão de água e ar (OADES, 1993).

Neste sentido, objetivou-se avaliar a aplicação do modelo SWAP na simulação do movimento da água e a disponibilidade hídrica para as culturas em anos com diferentes condições de precipitação pluvial em Latossolo Vermelho Distroférico sob diferentes sistemas de preparo do solo de longo prazo.

MATERIAL E MÉTODOS

Experimento de campo

As medidas necessárias para a simulação da dinâmica da água no solo foram realizadas por Moraes et al. (2014, 2016a) em um experimento de longa duração, implantado em 1988 na Fazenda Experimental da Embrapa Soja, situada no município de Londrina/PR (23° 11' S, 51° 11' O e altitude de 620 m). Segundo a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Cfa (subtropical úmido, mesotérmico, com médias anuais de 20 °C de temperatura e 1.622 mm de precipitação pluvial). O solo da área de estudo é de origem basáltica, classificado no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) como Latossolo Vermelho Distroférico (SANTOS et al., 2013) com textura muito argilosa.

Neste estudo de modelagem da dinâmica da água no solo foram utilizados três sistemas de preparo do solo descritos em Moraes et al. (2014, 2016a): (i) sistema de preparo convencional utilizando grade pesada a uma profundidade média de 15 cm, seguida de grade leve antes de cada cultivo de inverno e verão (SPC); (ii) sistema de preparo mínimo com escarificação anual (SPM), o qual foi escarificado sempre antes da implantação das culturas de inverno, com escarificador montado tipo cruzador equipado com rolo destorroador e quatro hastes com ângulo de ataque de 45°, distanciadas 0,40 m, e profundidade média de trabalho de 30 cm; (iii) SPD contínuo, implantado em 1988 (SPD).

Na simulação da dinâmica da água no solo, foi considerado o modelo de produção baseado na sucessão trigo (*Triticum aestivum* L.) no inverno e soja (*Glycine max* (L.) Merr.) no verão. A produção média de massa seca da parte aérea das culturas nos sistemas de sucessão de culturas é de, aproximadamente, 5,3 Mg ha⁻¹ ano⁻¹. Os teores médios de carbono orgânico do solo, no ano agrícola de 2011/12, na camada de 0,0-0,10 m, foram de 18,9 g kg⁻¹ (SPC); 19,9 g kg⁻¹ (SPM) e 21,9 g kg⁻¹ (SPD) (MORAES et al., 2014).

Dados climáticos

Os dados climáticos de radiação, temperatura mínima, temperatura máxima, umidade relativa, velocidade do vento e precipitação diários foram obtidos da estação meteorológica da Embrapa Soja, durante o período de 01/2001 a 11/2013.

O modelo SWAP

O modelo SWAP (VAN DAM et al., 2008; KROES et al., 2008) é um modelo agrohidrológico unidimensional que pode simular o balanço hídrico em uma coluna vertical de solo (JIMÉNEZ et al., 2013). O embasamento físico do modelo SWAP é a equação de Richards, que resulta da combinação das equações de continuidade e de Darcy, tornando a equação (1) na sua versão mista que é utilizada no modelo.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial (K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right))}{\partial z} - S(h) \quad (1)$$

onde, θ é o conteúdo volumétrico de água do solo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), t é o tempo (d), K é a condutividade hidráulica do solo não saturado (cm d^{-1}), h é o potencial matricial (cm), z é a coordenada vertical (cm, negativa para baixo) e S é a lâmina de água absorvida pelas raízes das plantas, (cm^{-1}). Tendo em vista sua natureza hiperbólica e acentuada não-linearidade, a equação de Richards só pode ser resolvida numericamente. O modelo emprega um esquema dito implícito com linearização explícita, ou seja, as derivadas são estimadas no tempo ($t+1$) e as relações $K(h)$ e $S(h)$ no tempo (t) (LOUZADA et al., 2008).

Discretização do perfil, condições iniciais e de contorno

A discretização vertical do perfil, com espessura de 50 cm, adotada na solução numérica da equação de Richards foi estabelecida em 26 compartimentos, sendo os 20 mais superficiais de 1 cm de espessura e os 6 seguintes de 5 cm. Como condição de contorno inferior (base do compartimento 26) adotou-se fluxo (q) igual ao gravitacional, ou seja, $q=k(h)$. Essa condição, que assume o fluxo vertical na base igual à condutividade hidráulica (k) correspondente ao potencial matricial (h), procurando reproduzir condição de solo profundo sem presença de lençol freático e camadas de impedimento. As condições de contorno na superfície são continuamente atualizadas pelo modelo dependendo do que prevalece em cada interação, infiltração ou evaporação. As condições iniciais para cada simulação foram definidas com base na precipitação dos cinco dias antecedentes.

Evapotranspiração de referência e evapotranspiração potencial

Os valores diários de evapotranspiração de referência foram calculados pela equação de Priestley e Taylor (1972) modificada por Ritchie (RITCHIE, 1985), utilizando dados climáticos diários, coletados pela estação meteorológica, no período de janeiro de 2001 até novembro de 2013.

A evapotranspiração potencial da cultura foi determinada por meio do produto da evapotranspiração de referência por um coeficiente empírico. Esse coeficiente empírico foi admitido variável em função do estágio de desenvolvimento da cultura (KROES et al., 2008).

Evaporação

Todas as simulações foram conduzidas em sistema de sucessão de culturas, com presença da cultura de soja (verão) e de trigo (inverno). Os valores reais de evaporação (E_r) são definidos pelo modelo, com base na equação de Darcy, conforme Black (1969), a qual é aplicada entre o primeiro compartimento e a superfície, e seu resultado (ED) confrontado com os valores máximos

de evaporação (E_m). Se $ED \geq E_m$, então $E_r = E_m$; caso contrário, $E_r = ED$.

Relações umidade (θ) – condutividade hidráulica (K) – potencial matricial (h)

Os valores de θ , K e h são relacionados pelo modelo de van Genuchten-Mualem (MUALEM, 1976; VAN GENUCHTEN, 1980). O valor de conteúdo volumétrico residual (θ_{res}) foi considerado no potencial de -1500 kPa, e o parâmetro m foi considerado como dependente da relação $1-1/n$. Para ajuste dos parâmetros da curva de retenção de água foi usado o potencial matricial em centímetros de coluna de água.

Drenagem superficial

As condições de drenagem superficial são consideradas pelo modelo com base em um parâmetro definido em um arquivo de entrada, conforme Ines et al. (2001). Para isso, este parâmetro estabelece a lâmina que antecede o início do escoamento superficial (*ponding*) e, sempre que ocorrer uma lâmina excedente, ela será admitida como instantaneamente drenada.

Drenagem subsuperficial

O fluxo abaixo de 50 cm foi considerado como sendo livre e é estimado com o emprego da condição de Neumann (KROES et al., 2008), pois o nível do lençol freático é considerado profundo. O fluxo inferior é somente provocado pelo fluxo gravitacional e o gradiente de pressão é igual a zero.

Fração de água disponível

Os valores da capacidade de armazenamento de água disponível às plantas (CAD) foram calculados pela diferença entre o conteúdo volumétrico de água no solo entre o potencial matricial de -10 kPa e -1500 kPa, para as camadas de 0-10 cm, 10-20 cm e 20-50 cm. Os valores de fração de água disponível (FAD) foram obtidos diariamente pela razão entre a CAD atual (lâmina de água disponível às plantas no perfil do solo) e a CAD do solo, conforme Santos e Carlesso (1998).

Períodos simulados

Os períodos simulados correspondem ao mês de janeiro de 2001 até novembro de 2013, considerando o período anual para simulação dos valores dos componentes do balanço hídrico (drenagem profunda, interceptação vegetal, escoamento superficial, transpiração e evaporação).

A fração de água disponível (FAD) foi calculada diariamente, assim, realizou-se a contagem do número de dias em cada mês que ocorreu valores de FAD menores que 0,5 nas camadas de 0-10 cm, 10-20 cm e 20-50 cm. Para detalhar o efeito do regime hídrico nos sistemas de manejo e por consequência no desenvolvimento das culturas principais de verão, foi considerado o período de

novembro a março de cada ano, e realizado a contagem do número de dias que a FAD ficou abaixo de 0,5 nas camadas até 50 cm de profundidade.

Selecionou-se três safras agrícolas com distintos volumes de precipitação pluvial, com baixo (2003/04), médio (20010/11) e precipitação acima da média (2009/10) no período de novembro a março, e realizou-se o detalhamento do fluxo de água no perfil do solo até 50 cm de profundidade, com detalhamento a cada 1 cm até 20 cm e a cada 5 cm entre 20 e 50 cm. Para estas três safras agrícolas foi apresentado a precipitação pluvial e a FAD diária nas camadas de 0-10, 10-20 e 20-50 cm.

Atributos físicos

Os resultados acerca dos dados de densidade do solo (D_s), macroporosidade (Mac), microporosidade (Mic) (EMBRAPA, 1997) e condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) determinada no campo com permeâmetro de carga constante modelo IAC (VIEIRA et al., 2011), determinadas nos três sistemas de manejo do solo (SPC,

SPM e SPD), foram obtidos nos estudos desenvolvidos por Moraes et al. (2016a). Amostras indeformadas de solo, com 5 cm de diâmetro e altura, foram coletadas nas camadas de 0-10; 10-20 e 20-50 cm. A análise de condutividade hidráulica saturada no campo, foi realizada por meio de um permeâmetro modelo IAC, nas profundidades de 10 cm e de 20 cm. A curva de retenção de água foi ajustada com o modelo de van Genuchten (1980), e os parâmetros de ajuste do modelo são apresentados na Tabela 1.

Validação do modelo

Os testes de validação dos valores de conteúdo volumétrico de água no solo foram realizados com comparações dos valores simulados com os valores medidos no experimento de campo no dia 13 de abril de 2010 para as camadas de 0-10 cm e 10-20 cm, com conteúdo volumétrico de água no SPD (0,379 e 0,403 $m^3 m^{-3}$), SPC (0,306 e 0,365 $m^3 m^{-3}$) e SPM (0,331 e 0,372 $m^3 m^{-3}$).

Tabela 1. Parâmetros de ajuste da curva de retenção de água e atributos físicos do solo (densidade, macroporosidade e microporosidade) em função de sistemas de manejo em Latossolo Vermelho Distroférrico.

Parâmetro	0-10 cm			10-20 cm			20-50 cm		
	SPC	SPM	SPD	SPC	SPM	SPD	SPC	SPM	SPD
θ_r ($m^3 m^{-3}$)	0,261	0,271	0,287	0,325	0,310	0,320	0,325	0,310	0,305
θ_s ($m^3 m^{-3}$)	0,622	0,607	0,580	0,550	0,571	0,560	0,544	0,565	0,572
a	0,0203	0,0208	0,0137	0,0151	0,0167	0,0112	0,0078	0,0115	0,0081
n	1,5364	1,4780	1,4051	1,4757	0,2878	1,4085	1,4405	0,2743	1,3918
K_{sat} ($mm h^{-1}$)	10b	13ab	19a*	10b	13ab	19a	3b	8a	3b
D_s ($Mg m^{-3}$)	1,10b	1,14b	1,21a*	1,31a	1,25c	1,28b	1,32a	1,26b	1,24b
Mac ($m^3 m^{-3}$)	0,23a	0,21a	0,17b*	0,11b	0,15a	0,12b	0,08b	0,12a	0,12a
Mic ($m^3 m^{-3}$)	0,39b	0,40b	0,42a*	0,44a	0,42b	0,44a	0,46a	0,44b	0,45a

*Médias seguidas pela mesma letra, na mesma camada, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$); D_s : densidade do solo; Mac : macroporosidade; Mic : microporosidade. Fonte: Moraes et al. (2016a).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A modelagem da fração de água disponível nas camadas de 0-10 cm, 10-20 cm e 20-50 cm foram alteradas em função dos sistemas de manejo do solo (Figuras 1 e 2). Com exceção do ano de 2009 (Figuras 2a,b,c), em todos os demais anos, foi possível observar que o período de menor disponibilidade hídrica está localizado nos meses de agosto a setembro. Independente da regularidade de precipitação pluvial, o SPC apresentou menor fração de água disponível no solo em relação aos demais sistemas de manejo do solo (SPD e SPM). Este resultado indica que em todos os sistemas de manejo do solo há incrementos até valores semelhantes da fração de água disponível armazenada no solo, entretanto logo após a precipitação há reduções maiores no SPC e no SPM do que no SPD. Indicando assim que a fração de água disponível no SPD pode ser mantida por períodos maiores que em sistemas

com mobilização do solo. Neste sentido, essas diferenças entre o SPM e o SPD podem ser incrementadas nas camadas abaixo de 20 cm, principalmente, em períodos com reduções de precipitação pluvial, por exemplo, de março até julho de 2002 (Figura 1c).

O limite crítico da FAD de 0,5 foi atingido com maior frequência no SPC, principalmente nas camadas de 0-10 cm e 10-20 cm, em todos os anos de avaliações (Figuras 1, 2). Desta forma, nas camadas até 20 cm, o número de dias em que de FAD $< 0,5$ foi maior no SPC que nos demais manejos do solo (Figura 3). Entretanto, observa-se que na camada de 0-10 cm, no SPM houve maior quantidade de dias com FAD $< 0,5$ que no SPD, evidenciando novamente a maior disponibilidade hídrica no SPD que nos demais manejos do solo. Esta grande quantidade de dias com FAD $< 0,5$, em todos os manejos do solo, se dá principalmente pela reduzida precipitação pluviométrica no período de agosto e setembro, assim,

incrementa o período com baixa disponibilidade hídrica nos solos do Norte do Pará.

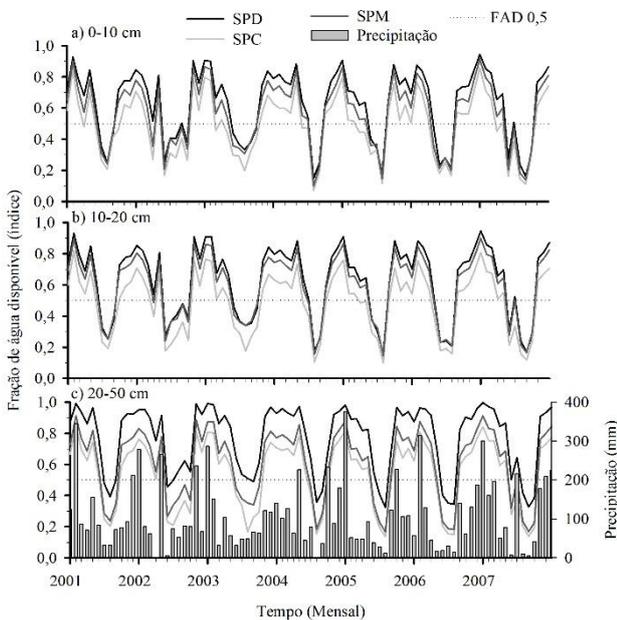


Figura 1. Modelagem da fração de água disponível mensal nas camadas de 0-10 cm (a), 10-20 cm (b) e 20-50 cm (c) de um Latossolo Vermelho Distroférico em função do manejo do solo, no período de 2001 a 2007.

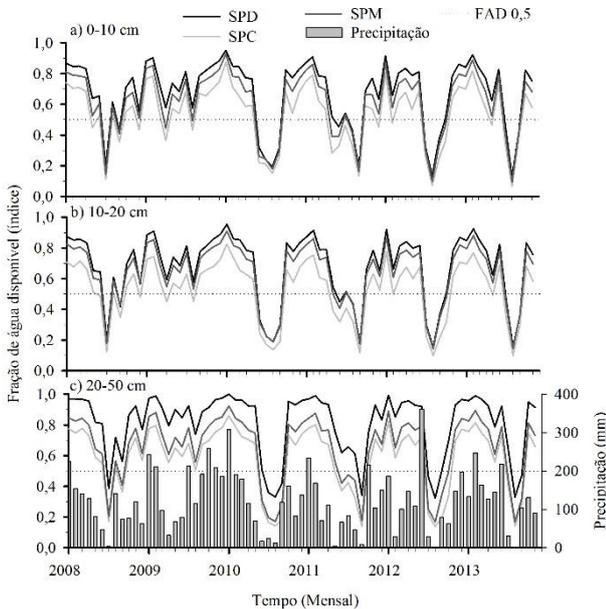


Figura 2. Modelagem da fração de água disponível mensal nas camadas de 0-10 cm (a), 10-20 cm (b) e 20-50 cm (c) de um Latossolo Vermelho Distroférico em função do manejo do solo, no período de 2008 a 2013.

Nos cultivos de verão, a semeadura da cultura de soja é realizada no final de outubro e, o período reprodutivo ocorre entre os meses de dezembro a fevereiro, período no qual a ocorrência de deficiências hídricas prejudica o desempenho produtivo da soja. Assim, durante ciclo de cultivo da soja (principal cultura),

de novembro a março, diferentemente do observado nos sistemas com revolvimento do solo, nas camadas de 0-10 cm e 10-20 cm do SPD a fração de água disponível, ficou abaixo dos valores de FAD de 0,5, somente em 5 safras agrícolas de 13 avaliadas (safra de verão de 2004, 2006, 2007, 2008 e 2011) (Figura 4). Entretanto, na camada de 0,20-0,50 m, somente no SPC houve dias com FAD menor que 0,5 no período de novembro a março de 2006, 2007 e 2008. Esse resultado mostra que no SPC há uma restrição hídrica não só nas camadas superficiais, mas também em profundidade no perfil do solo sob este preparo. Carlesso et al. (1997) sugerem o valor crítico de FAD de 0,6 como sendo o limite crítico para que não ocorra redução da área foliar das plantas, sendo que, em valores abaixo de 0,5, foi constatado senescência das plantas de sorgo. Considerando que a cultura do trigo é semeada no início de maio e atinge o período reprodutivo de espigamento e enchimento de grãos no mês de julho, observa-se que no SPC houve restrições hídricas ao pleno desenvolvimento da cultura em 8 (2002, 2003, 2005, 2006, 2007, 2008, 2010 e 2011) de 13 anos, ou seja, em 60% dos cultivos de inverno houve períodos com deficiência hídrica no SPC.

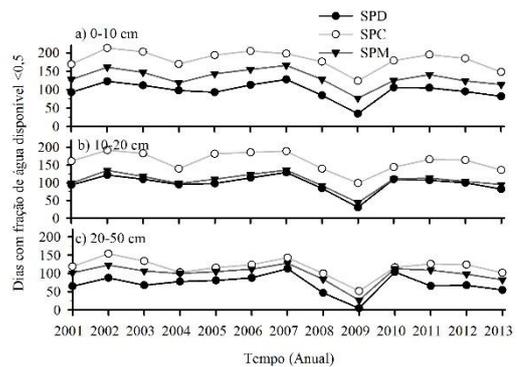


Figura 3. Contagem anual de dias com fração de água disponível menor de 0,5 em nas camadas de 0-10 cm (a), 10-20 cm (b) e 20-50 cm (c) de um Latossolo Vermelho Distroférico em função do manejo do solo, no período de 2001 a 2013.

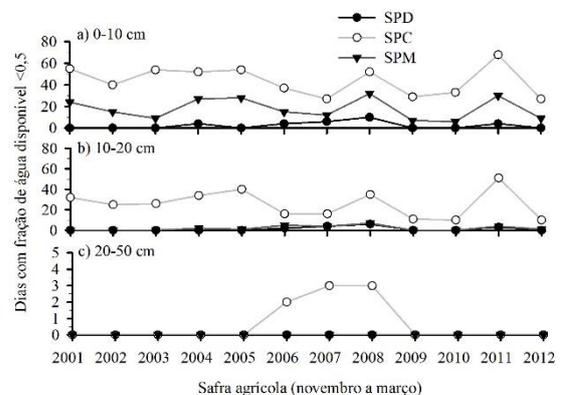


Figura 4. Contagem de dias no período da safra agrícola (novembro a março) com fração de água disponível menor de 0,5 em nas camadas de 0-10 cm (a), 10-20 cm (b) e 20-50 cm (c) de um Latossolo Vermelho Distroférico em função do manejo do solo, no período de 2001 a 2012.

Considerando todo o perfil do solo, no SPC, em 3 safras agrícolas de verão (2006, 2007 e 2008) houve períodos com deficiência hídrica em todo o perfil de solo até 50 cm, indicando que o potencial produtivo da soja no SPC, em 25 % dos anos agrícolas, pode ter sido reduzido, principalmente pela fração de água disponível no solo. Isso porque, em relação ao SPD e SPM, no SPC há alterações estruturais no perfil do solo, identificado pela densidade e microporosidade do solo (Tabela 1), favorecendo assim reduções do armazenamento de água no solo em SPC, principalmente pela alteração da continuidade dos poros (macro e microporosporos) no perfil do solo.

As validações dos valores simulados pela modelagem foram realizadas, nas camadas de 0-10 cm e 10-20 cm, com comparações com valores medidos no experimento de campo em abril de 2010 (Figura 5). Assim, o conteúdo volumétrico de água simulado foi semelhante aos valores medidos no campo. Indicando que o uso do modelo SWAP para simular o fluxo de água neste Latossolo Vermelho é apropriado.

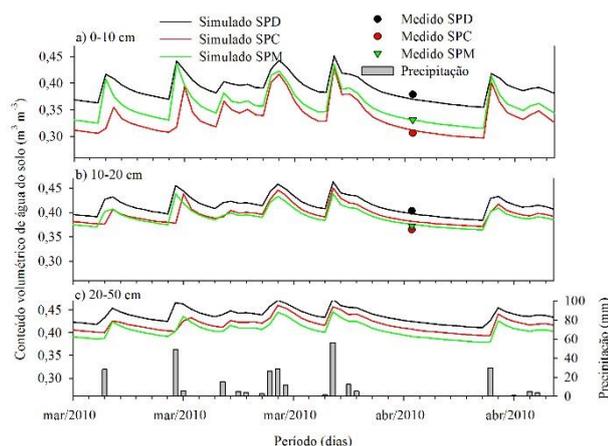


Figura 5. Validação do modelo SWAP com leituras do conteúdo volumétrico de água em sistemas de manejo de Latossolo Vermelho Distroférico nas camadas de 0-10 e 10-20 cm.

Os componentes do balanço hídrico indicam que houve efeito dos sistemas de manejo do solo na dinâmica da água, onde os componentes mais alterados foram a drenagem profunda, o escoamento superficial da água no solo e a evaporação da água na superfície do solo (Tabela 2). Em todos os anos avaliados, os maiores valores de drenagem profunda foram obtidos no SPD, possivelmente pela redução dos valores de escoamento superficial em relação aos demais sistemas. Entretanto, no SPD houve reduções, mas não a eliminação do escoamento superficial corroborando com os trabalhos de Merten et al. (2015), os quais demonstram que não há eliminação do escoamento superficial no SPD, e que são necessárias práticas adicionais de controle do escoamento superficial para evitar o transporte de poluentes para os mananciais hídricos. Esta drenagem profunda é importante para os fluxos ascendentes de água no solo, além de recargas das águas subterrâneas.

Tabela 2. Componentes do balanço hídrico em um Latossolo Vermelho Distroférico em função de sistemas de manejo do solo.

Manejo do solo	P	DP	IV	ES	T	E
	----- mm -----					
----- 2001 -----						
SPC		733	18	97	194	342
SPM	1384	745	18	87	192	342
SPD		764	18	55	198	349
----- 2002 -----						
SPC		730	15	85	183	277
SPM	1290	729	15	89	179	278
SPD		742	15	69	181	283
----- 2003 -----						
SPC		505	14	158	151	299
SPM	1127	515	14	155	148	295
SPD		651	14	110	152	299
----- 2004 -----						
SPC		833	17	40	157	274
SPM	1321	837	17	40	155	272
SPD		846	17	16	165	277
----- 2005 -----						
SPC		631	17	126	157	326
SPM	1257	636	17	122	155	327
SPD		736	17	85	160	323
----- 2006 -----						
SPC		578	14	122	138	293
SPM	1145	587	14	113	137	294
SPD		633	14	63	139	296
----- 2007 -----						
SPC		813	11	178	126	325
SPM	1453	822	11	172	123	325
SPD		847	11	134	132	329
----- 2008 -----						
SPC		659	20	68	197	308
SPM	1252	649	20	80	194	309
SPD		663	20	45	207	317
----- 2009 -----						
SPC		992	31	229	256	393
SPM	1901	995	31	222	256	397
SPD		1142	31	80	260	388
----- 2010 -----						
SPC		870	12	98	112	321
SPM	1413	867	12	102	111	321
SPD		888	12	55	116	342
----- 2011 -----						
SPC		600	17	159	196	289
SPM	1261	605	17	154	194	291
SPD		618	17	129	199	298
----- 2012 -----						
SPC		782	15	197	150	303
SPM	1447	818	15	163	147	304
SPD		867	15	105	153	307
----- 2013 -----						
SPC		860	23	86	140	276
SPM	1385*	873	23	78	138	273
SPD		910	23	38	141	273

*Período de janeiro a novembro de 2013. P: precipitação; DP: drenagem profunda; IV: interceptação vegetal; ES: escoamento superficial; T: transpiração; E: evaporação.

O escoamento superficial de água nos solos é o principal agente causador da erosão e, quando este processo está associado com o revolvimento do solo (SPC e SPM), poderá acelerar o processo de degradação dos solos, principalmente pela perda de solo juntamente com a água. No SPC, os valores de escoamento superficial foram de até aproximadamente 2,5 vezes maiores do que no SPD (ano de 2009) indicando que no SPC há problemas com infiltração da água no solo, relacionados a impedimentos físicos e ausência da continuidade dos poros ocasionados pelo processo de revolvimento do solo, conforme abordado anteriormente (Tabela 1). Em todos os anos avaliados os valores de escoamento superficial no SPM e foram similares aos observados no SPC, demonstrando assim a fragilidades de ambos os sistemas em relação ao excesso hídrico que não é infiltrado no solo.

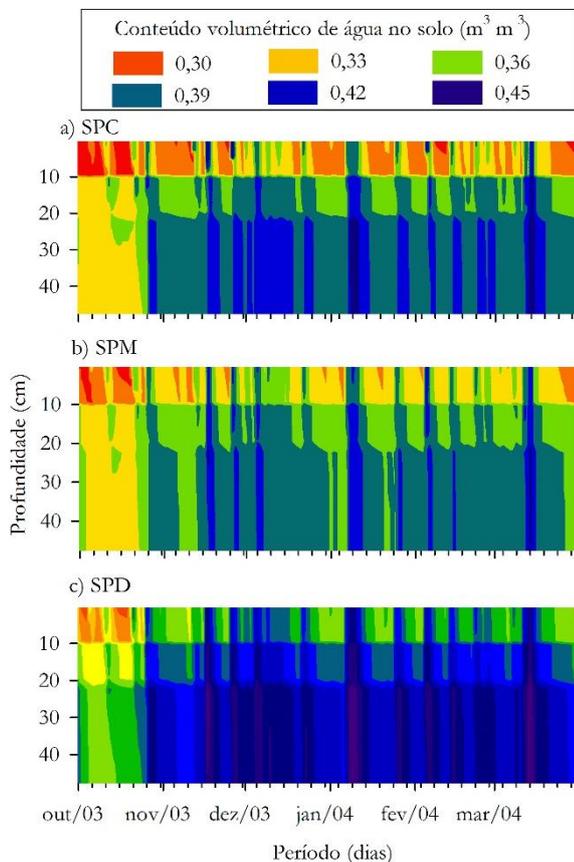


Figura 6. Modelagem do conteúdo volumétrico de água ($m^3 m^{-3}$) no perfil de 0-50 cm em um Latossolo Vermelho Distroférrico no sistema de preparo convencional (SPC) (a) e sistema de preparo mínimo escarificado a cada ano (SPM) (b) e no sistema plantio direto (SPD) (c), em período de baixa disponibilidade hídrica de outubro de 2003 a março de 2004.

O conteúdo volumétrico de água no perfil do solo foi alterado em função do manejo do solo, demonstrando a dinâmica da água no solo em função dos processos relacionados ao balanço hídrico. Para exemplificar os resultados do fluxo de água estão sendo apresentadas três situações distintas, com baixo, médio ou

alto volume de precipitação pluviométrica. Sendo que na safra agrícola de 2003/04 foi um período com baixo volume de precipitação (Figuras 6 e 7), na safra agrícola de 2010/11 foi observado volume médio de precipitação (Figuras 7 e 8) e na safra de 2009/10 houve alto volume de precipitação hídrica (Figuras 8 e 9).

Em ano com baixos volumes de precipitação pluvial, tal como na safra agrícola de 2003/04, com aproximadamente 549 mm (Figuras 6 e 7), observa-se que os maiores conteúdos volumétricos de água no solo foram observados no SPD (Figura 6c) e os menores ocorreram no SPM. Entretanto, quando se observada a FAD (Figura 7) foi possível observar que nas três camadas avaliadas as maiores disponibilidades hídricas ocorrem na seguinte ordem: SPD>SPM>SPC. Sendo que principalmente na camada de 10-20 cm, há pouca diferença entre o SPD e o SPM, entretanto, esta diferença foi incrementada na camada de 20-50 cm. De forma geral, no SPC houve incremento do número de dias com que a FAD ficou abaixo do limite de 0,5, principalmente nas camadas até 20 cm, demonstrando que as culturas neste sistema estão muito mais suscetíveis aos efeitos da deficiência hídrica.

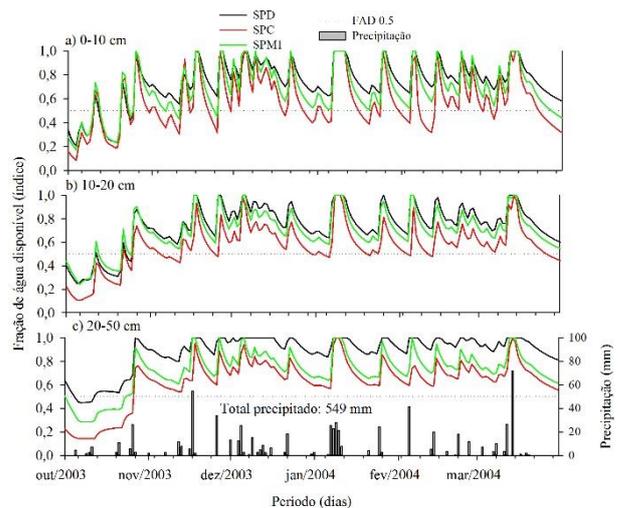


Figura 7. Modelagem da fração de água disponível nas camadas de 0-10 cm (a), 10-20 cm (b) e 20-50 cm (c) em ano agrícola com baixa disponibilidade hídrica, no período de outubro de 2003 a março de 2004.

Assim, a utilização de SPC favorece a degradação da estrutura do solo, causando rompimento dos poros contínuos entre a superfície do solo e as camadas abaixo de 10 cm, pois neste sistema de preparo, permanecem poros grandes na superfície do solo (0-10 cm), os quais são pouco eficientes para reter água no solo. Além disso, no SPC há redução dos macroporos e incremento dos poros com pequenos diâmetros nas camadas abaixo de 10 cm, o que possivelmente interrompe o fluxo de água no perfil do solo (Tabela 1). A utilização de sistemas de manejo que favoreçam a preservação da continuidade dos poros no perfil do solo favorece o fluxo ascendente de água, principalmente por capilaridade (AMER, 2012) e, assim, possibilita a redistribuição de água às plantas em períodos com escassez de precipitações pluviais (PREVEDELLO

et al., 2007). Além disso, a formação de poros contínuos possibilita que as raízes se aprofundem no solo por locais com baixa resistência ao crescimento (BENGOUGH, 2012), possibilitando extrair a água armazenada em camadas mais profundas no perfil do solo.

Em situação com precipitação pluvial normal, observada na safra agrícola de 2010/11, houve aproximadamente 769 mm no período de outubro de 2010 a março de 2011 (Figuras 8 e 9). Neste período, mesmo ocorrendo boa disponibilidade hídrica, na camada de 0-10 cm do SPC houve frequentes períodos com valores de FAD abaixo de 0,5 (Figura 9a), evidenciando uma rápida redução do conteúdo de água e que a retenção de água neste sistema não é eficiente para possibilitar adequada disponibilidade hídrica para as culturas mesmo em anos com boa regularidade de precipitação pluvial.

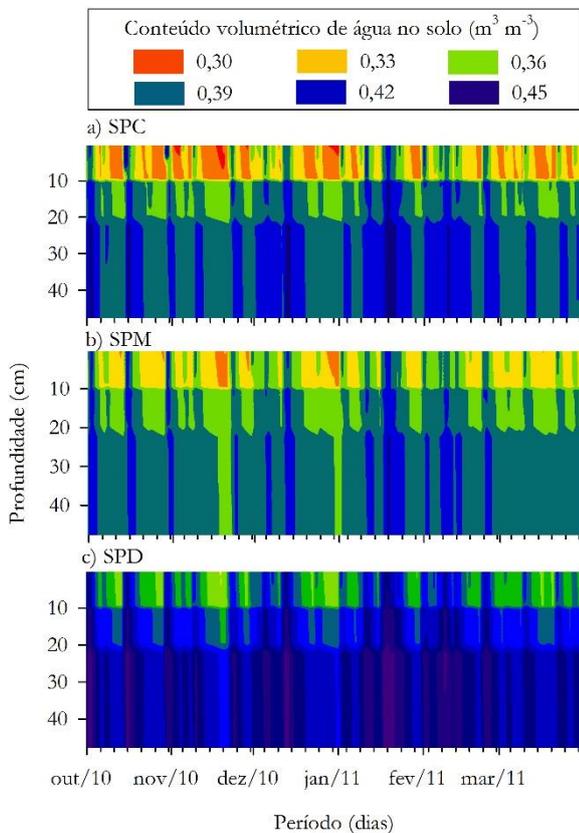


Figura 8. Modelagem do conteúdo volumétrico de água ($m^3 m^{-3}$) no perfil de 0-50 cm em um Latossolo Vermelho Distroférico no sistema de preparo convencional (SPC) (a) e sistema de preparo mínimo escarificado a cada ano (SPM) (b) e no sistema plantio direto (SPD) (c), em período de disponibilidade hídrica normal, de outubro de 2010 a março de 2011.

Na camada de 10-20 cm, houve adequada disponibilidade hídrica no SPD e no SPM, entretanto, os valores de FAD no SPC ficaram frequentemente próximos ao valor de FAD de 0,5 (Figura 9b). Já na camada de 20-50 cm, em ambos os sistemas houve adequada disponibilidade hídrica no solo, e caso as plantas consigam desenvolver o sistema radicular em

profundidade poderão conseguir compensar com a absorção de água de camadas mais profundas no perfil do solo. Entretanto, caso existam camadas com impedimento mecânico ao crescimento radicular acima, será pouco provável que as raízes das culturas conseguiriam se desenvolver e acessar água e nutrientes em profundidade no perfil do solo. Portanto, a presença de poros contínuos no perfil do solo, adequada disponibilidade hídrica e aeração do solo são pressupostos importantes para obter adequada produtividade das culturas mesmo em anos com boa disponibilidade hídrica.

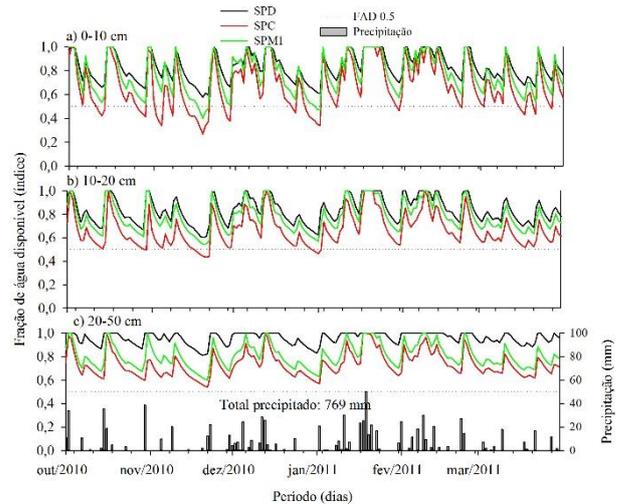


Figura 9. Modelagem da fração de água disponível nas camadas de 0-10 cm (a), 10-20 cm (b) e 20-50 cm (c) em ano agrícola com disponibilidade hídrica normal, no período de outubro de 2009 a março de 2010.

Na safra agrícola de 2009/10 foi possível observar uma adequada distribuição das precipitações pluviométricas, com médias acima do normal, classificado como alto volume de precipitação pluvial (Figura 11c), permitindo com que o conteúdo volumétrico de água do solo se mantivesse adequado no SPD e SPM ao longo de toda a safra agrícola (Figura 10). Entretanto, mesmo ocorrendo adequada distribuição pluviométrica no ano de 2009, na camada de 20-50 cm do SPC foi observado, nos meses de junho até outubro de 2009, reduções aos níveis críticos no conteúdo volumétrico de água do solo.

Neste período com elevados volumes de precipitação pluvial, foi observado que houve menores diferenças entre os sistemas de manejos, na camada de 0-10 cm, nos períodos imediatamente após as precipitações (Figura 11a). Entretanto, com o passar de poucos dias após a ocorrência das precipitações há reduções mais rápidas do conteúdo de água no SPC que nos outros manejos do solo. Assim, mesmo em anos com elevada disponibilidade hídrica, há diferenças entre os sistemas de manejos do solo na FAD. Indicando assim que pequenos períodos com ausência de precipitações, caso coincidam com períodos de maior demanda hídrica das culturas, estas poderão ter reduções no rendimento de grãos.

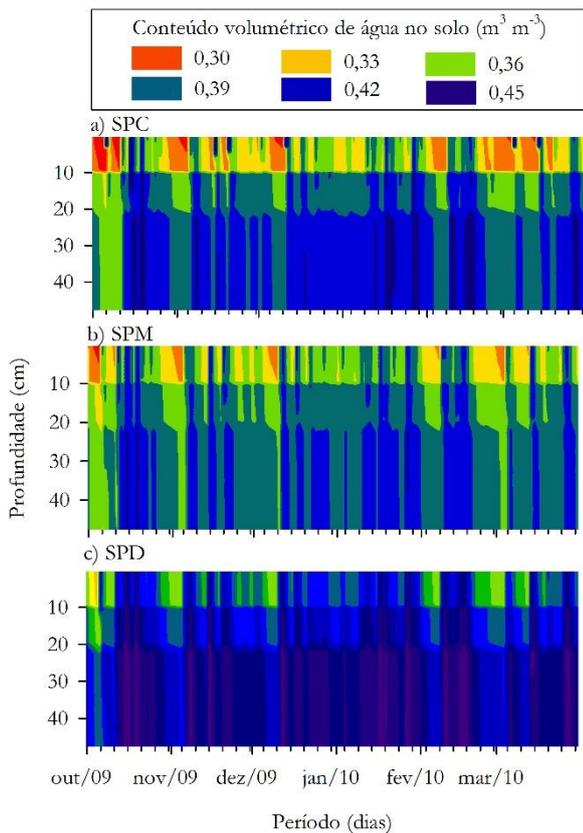


Figura 10. Modelagem do conteúdo volumétrico de água ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) no perfil de 0-50 cm em um Latossolo Vermelho Distroférico no sistema de preparo convencional (SPC) (a) e sistema de preparo mínimo escarificado a cada ano (SPM) (b) e no sistema plantio direto (SPD) (c), em período de alta disponibilidade hídrica de outubro de 2009 a março de 2010.

Assim, a alteração estrutural do solo entre as camadas analisadas é contrastante sendo possível identificar que o maior volume de água em todos os sistemas está armazenado nas camadas abaixo de 10 cm (Figura 10). Além disso, considerando que no SPC a retenção de água, nos primeiros 20 cm de profundidade, se dá em potenciais menos negativos, pode favorecer que os processos evaporativos sejam intensificados, reduzindo rapidamente a disponibilidade de água para as plantas.

No SPD, no ano de 2009, houve maior conteúdo volumétrico de água, em todas as camadas analisadas, em relação aos demais manejos do solo (SPM e SPC). Isso indica que a continuidade dos poros no perfil do solo favoreceu os processos de infiltração e de armazenamento de água neste sistema, possibilitando assim a ascensão da água no perfil do solo, principalmente em períodos com reduções do volume das precipitações pluviométricas.

Além disso, contrariamente aos sistemas com revolvimento do solo, no SPD houve um incremento na FAD com o aumento da profundidade. Assim, observa-se que nas camadas de 20-50 cm, há valores de FAD, em praticamente todo o ciclo de cultivo da safra de 2009/10, próximos de 1, indicando que o armazenamento de água esteve próximo do máximo neste período. No SPM, nestes períodos com elevada disponibilidade hídrica foi

capaz de superar o armazenamento de água observado no SPD, dados observados tanto pelo conteúdo volumétrico de água do solo quanto pela FAD. Assim, neste sistema com escarificação do solo foi possível identificar que o solo tem maior capacidade de armazenamento de que o SPC, mas não consegue ser tão eficiente quanto o SPD, fato atribuído a alteração na continuidade do espaço poroso do solo (Tabela 1), alterando os processos relacionados a dinâmica da água e dos gases no solo (MORAES et al., 2016a).

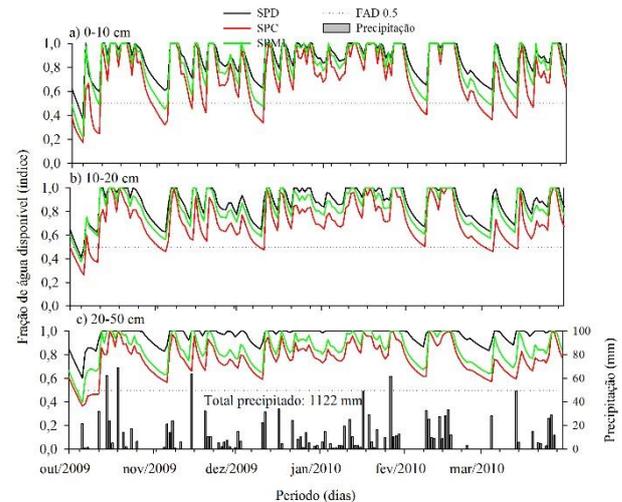


Figura 11. Modelagem da fração de água disponível nas camadas de 0-10 cm (a), 10-20 cm (b) e 20-50 cm (c) em ano agrícola com alta disponibilidade hídrica, no período de outubro de 2009 a março de 2010.

CONCLUSÕES

O modelo SWAP se mostra adequado em simular o fluxo de água no Latossolo Vermelho Distroférico, indicando que o uso do sistema de preparo convencional, favorece redução da disponibilidade hídrica e expõe as culturas a longos períodos de deficiência hídrica, com o conteúdo de água do solo abaixo do limite crítico estabelecido para a fração de água disponível as plantas de 0,5.

A modelagem do fluxo de água pelo modelo SWAP é eficiente para estabelecer diferenças no armazenamento de água em sistemas de manejo do solo em diferentes condições de precipitação pluvial.

O uso da modelagem do conteúdo volumétrico de água pelo modelo SWAP possibilita usar o conceito da fração de água disponível para identificar efeitos de sistemas de manejo do solo.

A simulação do movimento de água ao longo do perfil indica que o uso de sistemas conservacionistas ao longo do tempo, favorece o aumento do conteúdo de água disponível no solo.

REFERÊNCIAS

- ALVES, E.M.; NETTO, A.M.; ANTONINO, A.C.D.; LIMA, J.R.S.; SOUZA, E.S.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; CABRAL, J.J.S.P.; GONDIM, M.V.S. Simulação da dinâmica da água em solo cultivado com feijão caupi no Brejo Paraibano. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 17, p. 175-186, 2012.
- AMER, A.M. Water flow and conductivity into capillary and non-capillary pores of soils. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 12, p. 99-112, 2012.
- BENGOUGH, A.G. Root elongation is restricted by axial but not by radial pressures: so what happens in field soil? *Plant and soil*, v. 360, p. 15-18, 2012.
- BLACK, T.A.; GARDNER, W.R.; THURTELL, G.W. The prediction of evaporation, drainage, and soil water storage for a bare soil. *Soil Science Society of American Journal*, v. 33 p. 655-660, 1969.
- BIGGS, T.W.; MISHRA, P.K.; TURRAL, H. Evapotranspiration and regional probabilities of soil moisture stress in rainfed crops, southern India. *Agricultural and Forest Meteorology*. v. 148, p. 1585-1597, 2008.
- CARLESSO, R.; PEITER, M.X.; PETRY, M.T.; WOSCHICK, D. Resposta do sorgo granífero a déficits hídricos aplicados durante o ciclo de desenvolvimento da cultura. *Ciência Rural*, v. 27, p. 211-215, 1997.
- DÖRNER, J.; SANDOVAL, P.; DEC, D. The role of soil structure on the pore functionality of an Ultisol. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 10, p. 495-508, 2010.
- EMBRAPA-Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 3. ed. revista. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013. 412 p.
- INES, A.V.M.; DROOGERS, P.; MAKIN, I.W.; GUPTA, A. Crop growth, and soil water balance modeling to explore water management options. IWMI Working Paper 22. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute. 2001.
- FRANCHINI, J.C.; BALBINOT JUNIOR, A.A.; DEBIASI, H.; NEPUMOCENO, A.L. Root growth of soybean cultivars under different water availability conditions. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 38, p. 715-724, 2017.
- JIMÉNEZ, K.Q.; MELO, T.M.; LOUZADA, J.A. Uso de dados de precipitação obtidos por sensoriamento remoto em um modelo agro-hidrológico. *Irriga*, v. 18, p. 496-508, 2013.
- KROES, J.G.; VAN DAM, J.C.; GROENENDIJK, P.; HENDRIKS, R.F.A.; JACOBS, C.M.J. SWAP version 3.2. Theory description and user manual. Alterra, Wageningen, The Netherland. 2008. 262p.
- LIBARDI, P.L. Dinâmica da água no solo. 2ªed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2012, 341p.
- LOUZADA, J.A.; CAICEDO, N.; HELFER, F. Condições de drenagem relacionadas ao trânsito de máquinas em solo de várzea (RS-Brasil). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 12, p. 98-106, 2008.
- MERTEN, G.H.; ARAÚJO, A.G.; BISCAIA, R.C.M.; BARBOSA, G.M.C.; CONTE, O. No-till surface runoff and soil losses in Southern Brasil. *Soil and Tillage Research*, v. 152, p. 85-93. 2015.
- MORAES, M.T. Qualidade física do solo sob diferentes tempos de adoção e de escarificação do sistema plantio direto e sua relação com a rotação de culturas. 2013. 205 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.
- MORAES, M.T. Modelagem do crescimento radicular de milho e soja sujeito a estresses hídrico e mecânico em Latossolo. 2017, 122 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Faculdade de Agronomia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.
- MORAES, M.T.; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; FRANCHINI, J.C.; SILVA, V.R. Critical limits of soil penetration resistance in a Rhodic Eutrudox. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 37, p. 288-298, 2014.
- MORAES, M.T.; DEBIASI, H.; CARLESSO, R.; FRANCHINI, J.C.; SILVA, V.R.; LUZ, F.B. Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. *Soil and Tillage Research*. v. 155, p. 351-362, 2016a.
- MORAES, M.T.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J.C.; SILVA, V.R. Benefícios das plantas de cobertura sobre as propriedades físicas do solo. *In: Tiecher, T. Manejo e conservação do solo e da água em pequenas propriedades rurais no sul do Brasil: práticas alternativas de manejo visando a conservação do solo e da água. Porto Alegre, UFRGS, 2016b, cap. 3, p. 34-48.*
- MORAES, M.T.; DEBIASI, H.; FRANCHINI, J.C. Soybean and wheat response to cropping and tillage system after two decades in an Oxisol under subtropical climate in Brazil. *Scientia Agraria*, v. 18, n. 3, p. 146-153, 2017.
- MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, v. 12, p. 513-522, 1976.

OADES, J.M. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma*, v. 56, p. 377-400, 1993.

PRIESTLEY, C.H.B.; TAYLOR, R.J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. *Monthly Weather Review*, v. 100, p. 81-92, 1972.

PREVEDELLO, C.L.; MAGGIOTTO, S.R.; LOYOLA, J.M.T.; DIAS, N.L.; BEPPLER NETO, G. Balanço de água por aquisição automática de dados em cultura de trigo (*Triticum aestivum* L.). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 31, p. 1-8, 2007.

RITCHIE, J.T. A user-oriented model of the soil water balance in wheat. *In: Fry, E., Atkin, T. K. (Eds.), Wheat Growth and Modeling. NATO-ASI Series. Plenum Press, New York, 1985. p. 293-305.*

SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C.; OLIVEIRA, V.A.; LUBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A.; CUNHA, T.J.F.; OLIVEIRA, J.B. (ed.). *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 3. ed. rev. ampl. Brasília: Embrapa, 2013. 353 p.*

SANTOS, R.F.; CARLESSO, R. Déficit hídrico e os processos morfológicos e fisiológicos das plantas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 2, p. 287-294, 1998.

SILVA, V.R.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BORTOLUZZI, E.C. Soil water dynamics related to the degree of compaction of two Brazilian Oxisols under no-tillage. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 33, p. 1097-1104, 2009.

TORRES, J.L.R.; FABIAN, A.J.; PEREIRA, M.G. Alterações dos atributos físicos de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de manejo. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 35, p. 437-445, 2011.

VAN DAM, J.C.; GROENENDIJK, P.; HENDRIKS, R.F.A.; KROES, J.G. Advances of modeling water flow in variably saturated soils with SWAP. *Vadose Zone Journal*, v. 7, p. 640-653, 2008.

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of American Journal*, v. 44, p. 892-898, 1980.

VIEIRA, S.R.; NGAILO, J.A.; DECHEN, S.C.F.; SIQUEIRA, G.M. Characterizing the spatial variability of soil hydraulic properties of a poorly drained soil. *World Applied Sciences Journal*, v. 12, p. 732-741. 2011.