



DAVIDSON SILVA RIBEIRO

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO MOVIMENTO DO
HERBICIDA TRIFLURALINA EM SOLOS SUBMETIDOS A
DIFERENTES CENÁRIOS DE USO AGRÍCOLA**

**LAVRAS - MG
2021**

DAVIDSON SILVA RIBEIRO

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO MOVIMENTO DO HERBICIDA
TRIFLURALINA EM SOLOS SUBMETIDOS A DIFERENTES
CENÁRIOS DE USO AGRÍCOLA**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Agrícola, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Michael Silveira Thebaldi
Orientador

**LAVRAS – MG
2021**

DAVIDSON SILVA RIBEIRO

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DO MOVIMENTO DO HERBICIDA
TRIFLURALINA EM SOLOS SUBMETIDOS A DIFERENTES CENÁRIOS DE USO
AGRÍCOLA**

**MODELING AND SIMULATION OF TRIFLURALIN HERBICIDE MOVEMENT IN
SOILS SUBMITTED TO DIFFERENT SCENARIOS OF AGRICULTURAL USE**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Agrícola, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 03 de março de 2021

Dr. Michael Silveira Thebaldi UFLA

Dr. Adriano Valentim Diotto UFLA

Dr. Fábio Ponciano de Deus UFLA

Prof. Dr. Michael Silveira Thebaldi
Orientador

**LAVRAS – MG
2021**

RESUMO

De modo geral, todas as práticas de produção agrícola visam um sistema de produção economicamente viável e altamente produtivo, porém para isso é necessário que esse setor seja ambientalmente correto. Conhecer aspectos como a dinâmica de movimentação, impactos causados, concentração e tempo de permanência de um agroquímico no meio ambiente faz com que seu uso possa ser eficaz e consciente, e assim facilite com que esse nível de produção seja alcançado. Assim, este trabalho descreve a movimentação do herbicida Trifluralina (TFN) em dois solos de texturas diferentes, sob diferentes cenários de uso agrícola. A partir de parâmetros de transporte desse herbicida nestes solos e características físico-hídricas destes, foram realizadas simulações por meio da modelagem do meio físico utilizando o software Hydrus 2D. A metodologia empregada foi baseada em diferentes cenários, em que a avaliação da dinâmica de movimentação do soluto ocorreu sob regimes permanentes e transientes, em diferentes profundidades de perfil, com presença de condições atmosféricas, uso de irrigação por aspersão e por gotejamento e diferentes tempos de aplicações. Os resultados para cada diferente quesito apresentado em cada situação e em seus respectivos pontos de observação foram descritos graficamente, sendo que todos eles mostraram que a Trifluralina obtinha a tendência de ficar alojada próxima ao local onde foi aplicada, não ultrapassando uma camada superior à 5cm, mesmo em condições mais favoráveis como na presença de irrigação, que geram energia extra para a movimentação da solução no solo. Por fim, pôde ser concluído que a movimentação da TFN no solo é de baixa potencialidade, devido ao alto coeficiente de partição fase sólida do solo-água (K_d) deste produto, mesmo no solo arenoso, que possui baixa CTC.

Palavras-chave: Herbicida, movimento de contaminantes em meios porosos, quimigação, simulação numérica.

ABSTRACT

In general, all agricultural production practices aim at an economically viable and highly productive production system but for this, it is necessary that this sector is environmentally friendly. Knowing aspects such as the dynamics of movement, impacts caused, concentration and time of permanence of an agrochemical in the environment makes its use effective and conscious, and thus facilitates this level of production to be achieved. Thus, this work describes the movement of the herbicide Trifluralin (TFN) in two soils of different textures, under different scenarios of agricultural use. Based on transport parameters of this herbicide in these soils and physical-hydric characteristics of these, simulations were carried out by modeling the physical environment using the Hydrus 2D software. The methodology used was based on different scenarios, in which the evaluation of the dynamics of solute movement occurred under permanent and transient regimes, at different depths of profile, with the presence of atmospheric conditions, use of sprinkler and drip irrigation and different times of applications. The results for each different item presented in each situation and in their respective observation points were described graphically, all of which showed that Trifluralin obtained the tendency to stay close to the place where it was applied, not exceeding a layer greater than 5 cm, even in more favorable conditions such as the presence of irrigation, which generate extra energy for the movement of the solution in the soil. Finally, it could be concluded that the movement of TFN in the soil is of low potential, due to the high coefficient of solid phase partition of the soil-water (K_d) of this product, even in the sandy soil, which has low CTC.

Keywords: Herbicide, movement of contaminants in porous media, chemigation, numerical simulation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Apresentação da malha de elementos finitos do Cenário 1 e seus pontos de observações.....	22
Figura 2 - Apresentação da malha de elementos finitos do Cenário 2 e seus pontos de observações.....	23
Figura 3 - Descrição da malha do projeto 3 com sua representação geométrica	25
Figura 4 - Descrição da malha do projeto 3 com os pontos de observações	26
Figura 5 - Variação da umidade com o tempo no solo arenoso nos nós de observação definidos para o Cenário 1.....	27
Figura 6 - Variação da umidade com o tempo no solo argiloso nos nós de observação definidos para o Cenário 1 e solo argiloso.....	28
Figura 7 - Variação da concentração de TFN com o tempo no solo arenoso nos nós de observação definidos para o Cenário 1	29
Figura 8 - Variação da concentração de TFN com o tempo no solo argiloso nos nós de observação definidos para o Cenário 1.....	30
Figura 9 - Representação gráfica da distribuição da concentração de TFN no perfil de solo arenoso para o tempo final, referente ao Cenário 1.....	31
Figura 10 - Representação gráfica da distribuição da concentração de TFN no perfil de solo argiloso para o tempo final, referente ao Cenário 1.....	32
Figura 11 - Variação da umidade com o tempo no solo arenoso nos nós de observação definidos para o Cenário 2.....	33
Figura 12 - Variação da umidade com o tempo no solo argiloso nos nós de observação definidos para o Cenário 2.....	34
Figura 13 - Variação da concentração de TFN com o tempo no solo arenoso nos nós de observação definidos para o Cenário 2.....	34
Figura 14 - Variação da concentração de TFN com o tempo no solo argiloso nos nós de observação definidos para o Cenário 2.....	35
Figura 15 - Representação gráfica da distribuição da concentração de TFN no perfil de solo arenoso para o tempo final, referente ao Cenário 2.....	36
Figura 16 - Representação gráfica da distribuição da concentração de TFN no perfil de solo argiloso para o tempo final, referente ao Cenário 2.....	37
Figura 17 - Variação da umidade com o tempo no solo arenoso nos nós de observação definidos para o Cenário.....	38

Figura 18 - Variação da umidade com o tempo no solo argiloso nos nós de observação definidos para o Cenário 3.....	39
Figura 19 - Variação da concentração de TFN com o tempo no solo arenoso nos nós de observação definidos para o Cenário 3.....	39
Figura 20 - Variação da concentração de TFN com o tempo no solo argiloso nos nós de observação definidos para o Cenário 3.....	40
Figura 21 - Representação gráfica da distribuição da concentração de TFN no perfil de solo arenoso para o tempo final, referente ao Cenário 3.....	42
Figura 22 - Representação gráfica da distribuição da concentração de TFN no perfil de solo argiloso para o tempo final, referente ao Cenário 3.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades físico-hídricas dos solos utilizados para simulação e modelagem do movimento de Trifluralina em diferentes cenários.....	19
Tabela 2 – Profundidade dos nós de observação na geometria especificada para o Cenário 1....	22
Tabela 3 – Profundidade dos nós de observação na geometria especificada para o Cenário 2....	24
Tabela 4 – Distância dos nós de observação na geometria especificada para o Cenário 3	26

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1. Objetivos.....	10
1.1.1. Objetivo Geral.....	10
1.1.2. Objetivos específicos	10
2. REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1. Água no solo.....	12
2.2. Movimento de contaminantes no solo	12
2.3. Quimigação.....	14
2.4. Uso da Trifluralina no meio agrícola.....	15
2.5. O modelo computacional Hydrus	17
3. MATERIAL E MÉTODOS	19
3.1. Cenário 1 - Movimento de água e soluto em regime permanente em um perfil de solo de um metro	20
3.2. Cenário 2 - Movimento de água e soluto em regime transiente, induzido por condições de contorno atmosféricas, em um perfil de solo de um metro.....	23
3.3. Cenário 3 - Linha lateral de gotejamento subsuperficial, com aplicação de água e TFN duas vezes por semana.....	24
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
4.1. Cenário 1 - Movimento de água e soluto em regime permanente em um perfil de solo de um metro	27
4.2. Cenário 2 - Movimento de água e soluto em regime transiente, induzido por condições de contorno atmosféricas, em um perfil de solo de um metro.....	33
4.3. Cenário 3 - Linha lateral de gotejamento subsuperficial, com aplicação de água e TFN duas vezes por semana.....	37
5. CONCLUSÃO.....	43
REFERÊNCIAS	44

1. INTRODUÇÃO

A mobilidade de um produto fitossanitário no solo, especialmente herbicidas aplicados diretamente ao mesmo, via pulverização ou quimigação, depende de uma série de fatores ligados ao meio poroso, ao ambiente e às características do próprio produto químico. Para herbicidas, a dose aplicada, a solubilidade em água e as características químicas do produto que condicionam a adsorção da molécula às partículas do solo, causando a maior ou menor mobilidade do produto no perfil. O ambiente condiciona a movimentação do herbicida no solo por meio da temperatura e, principalmente, da quantidade de chuva ou irrigação após a aplicação do herbicida no solo. Para o solo faz-se relevante destacar a drenagem, a textura e o teor de matéria orgânica (capacidade de adsorção); desta forma, quanto maior seja a capacidade de adsorção de um solo, menor é a mobilidade do herbicida neste (CRUCIANI et al., 1996).

Dentre os herbicidas, a Trifluralina se apresenta como herbicida que controla de forma eficiente gramíneas e algumas espécies dicotiledôneas de sementes pequenas (RAIMONDI et al., 2010; SOFIATTI et al., 2012). Pertence ao grupo químico das dinitroanilinas (BYRD; MARKHAM; EMMERSON, 1995), possuindo como nome químico a, a, a-trifluoro-2,6-dinitro-N-N-dipropil-p-toluidina. Possui solubilidade em água de 0,221 ppm, indicando um produto altamente lipofílico (atração aos materiais lipídicos) e densidade igual a 1,36 g cm⁻³ (UNIVERSITY OF HERTFORDSHIRE, 2011), características que, de modo geral, indicam uma mobilidade muito restrita no solo, em função de sua baixa solubilidade em água e alta adsorção à fração argila ou à fração orgânica do solo (CHRISTOFFOLETI; OVEJERO, 2008).

Este herbicida, por estas características químicas, vem sendo utilizado para combater a intrusão radicular, problema que causa entupimento de emissores submetidos ao gotejamento subsuperficial e conseqüentemente redução da vazão de projeto, em diversas culturas, como o café e a cana-de-açúcar (LIMA, 2011; LIMA et al., 2012).

Assim, a partir do conhecimento das características físico-hídricas do solo, interação soluto solo, além do coeficiente de difusão química em água do soluto, o movimento deste pode ser simulado em vários cenários. Para tal, pode ser utilizado o software HYDRUS 2D, que simula o fluxo de água tridimensional simétrico axialmente, transporte de solutos e absorção de água e nutrientes pelas raízes com base em soluções numéricas como o uso da técnica de elementos finitos das equações de fluxo (SIMUNEK; SEJNA; VAN GENUCHTEN, 1999), oriundas da equação de Richards.

O HYDRUS permite a implementação de uma vasta gama de condições de contorno, limites irregulares e heterogeneidades do solo. O pacote é suportado por uma interface gráfica interativa com base em dados para o pré-processamento, geração da malha de cálculo, apresentação de resultados em gráficos, sendo, portanto, razoavelmente fácil de usar. Com esses atributos, o HYDRUS é uma boa ferramenta para analisar as características de projeto e gestão de sistemas de irrigação, fertirrigação (COTE et al., 2003) e quimigação.

Como outros defensivos agrícolas, a Trifluralina pode degradar-se, volatilizar-se ou pode ser adsorvida ao solo. Por possuir alto valor de Koc (coeficiente de partição responsável pela adsorção ao carbono orgânico) de aproximadamente 8765 mL g^{-1} (UNIVERSITY OF HERTFORDSHIRE, 2011), é altamente adsorvida ao solo, portanto, a quantidade de Trifluralina presente na fração orgânica do solo é relevantemente maior do que a remanescente na solução.

Apesar disso, sua movimentação pode se dar por processos de dispersão hidrodinâmica (que inclui a dispersão mecânica causada por diferenças de velocidades na frente de avanço) ou por difusão molecular, causada por gradientes de concentração e também por convecção, que é o movimento passivo do soluto com a água (VAN GENUCHTEN; WIERENGA, 1986).

A partir do exposto, faz-se interessante prever o comportamento da Trifluralina ao ser aplicada via água de irrigação ou mesmo sua movimentação, quando residente na solução do solo ou adsorvido a este a partir da entrada de água no solo via irrigação ou mesmo precipitação atmosférica na forma de chuva, de forma a apresentar à comunidade em geral os prováveis riscos ou implicações de sua aplicação em diferentes cenários práticos.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

Modelar e simular a movimentação do herbicida Trifluralina em diferentes cenários de uso agrícola em ambientes irrigados.

1.1.2. Objetivos específicos

- Obter na literatura os parâmetros de transporte da Trifluralina em diferentes solos com propriedades físico-hídricas determinadas;

- Modelar e simular diferentes cenários de aplicação e/ou movimentação de Trifluralina nos solos avaliados em situação de irrigação, utilizando o pacote Hydrus 2D; e
- Avaliar o resultado das simulações indicando potenciais riscos ou implicações de seu uso.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Água no solo

A dinâmica e quantificação da água na zona radicular de uma cultura são fatores essenciais para resultados satisfatórios em produtividade, já que estudos sobre o tema auxiliam em práticas de aperfeiçoamento de manejo no campo (CRUZ et al., 2005).

Dois fatores incluídos na infraestrutura do perfil do solo são de grande importância para quantificar a presença de água no solo. De início a estrutura, que define a organização das partículas do perfil. Em seguida a textura, indicando, por exemplo, a quantidade de argila, sendo essa porção relevante na força de retenção do solo devido a área de contato resultante do tamanho das aberturas dos poros (KLEIN et al., 2010).

De acordo com Beutler et al. (2002), um solo deve apresentar propriedades físicas como uma baixa densidade juntamente com elevada porosidade para se caracterizar como um solo de grande capacidade de retenção, quando se trata de grandes volumes de água. Já para baixas quantidades, a textura e superfície específica do solo quantificam a adsorção no local.

A infiltração de água é uma questão bem relevante no meio agrícola, já que cuidados devem ser tomados para que não haja lixiviação de nutrientes, aumento de pragas e doenças, redução de oxigênio do perfil e nem provoque um escoamento superficial direto. Com a eliminação da cobertura vegetal, a ação de gotas de chuva e enxurrada ficam mais intensas sobre a superfície podendo mudar assim a taxa infiltração desse solo através da variação na rugosidade e porosidade (PANACHUKI et al. 2011).

De acordo Sobrinho et al. (2003), “condições tais como: porosidade, umidade, atividade biológica, cobertura vegetal, rugosidade superficial e declividade do terreno, dentre outras, influem grandemente na infiltração da água no solo”.

Para um bom manejo de qualquer cultura vegetal é necessário boas práticas de conservação da água no solo para um eficiente suprimento hídrico das plantas. Dessa forma, Sá et al. (2005) afirmam que “O conteúdo de água do solo deve ser mantido entre certos limites superior e inferior específicos, em que a água disponível para a planta não é limitada, enquanto a lixiviação é prevenida”.

2.2. Movimento de contaminantes no solo

Para prever o comportamento do fluxo e transporte de contaminantes nos solos, se faz necessário ter o conhecimento de alguns parâmetros físicos e químicos, pois através dessas informações é possível obter um maior controle sobre a evolução da movimentação de qualquer contaminante de recursos hídricos subterrâneos (OLIVEIRA, 2009).

A elevada concentração de um material tóxico, acima do permitido, no meio aquoso é reconhecida como contaminação. O grau de contaminação dependerá do tempo e velocidade do material no perfil não saturado, em que, dependendo das características hidráulicas do solo esses dois parâmetros são alterados (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 1993).

A movimentação de agentes contaminantes se dá por forças gravitacionais, capilares, de dispersão, diluição e degradação, sendo essa dinâmica revelada através de ensaios geofísicos conduzidos no meio geológico (MOREIRA; AQUINO; DOURADO, 2006).

Alguns aspectos ajudam na análise do encaminhamento das moléculas contaminadoras das águas subterrâneas e do subsolo. O monitoramento de campo, análise por modelagem numérica e entendimento dos mecanismos de transporte são algumas das principais maneiras (OLIVEIRA, 2009).

O processo físico caracterizado como advecção se dá pelo movimento de poluentes através de um fluido que apresentam uma velocidade específica, transportando assim o contaminante pelo meio poroso (FAVERO; MUNIZ; SANTOS, 2007).

Outro mecanismo que se encaixa nos processos físicos é a dispersão, que representa a tendência ao espalhamento do contaminante pela trajetória percorrida. No percurso as moléculas tendem a se afastar, com velocidades diferentes, ocasionando a diluição da solução (SÁNCHEZ, 2011).

Incluído na dispersão do material, a difusão representa o movimento que ocorre em um meio mesmo sem fluxo de líquidos, movendo-o apenas devido ao gradiente de atividade de íons na solução (OLIVEIRA, 2001).

Em solos argilosos saturados os métodos de transporte físicos de advecção e difusão são os que melhor fazem o transporte de contaminantes. Porém, já nos aquíferos os maiores responsáveis são a advecção e a dispersão (NASCENTES, 2003).

Um dos fatores químicos que retém substâncias orgânicas através da matéria orgânica do solo é a sorção hidrofóbica (KNOP, 2007). Já a adsorção é de certa forma semelhante, porém, a retenção acontece devido a atração elétrica entre íons e cargas elétricas da superfície, sendo mais eficiente na retenção de metais do que substâncias orgânicas (ALMEIDA, 2016).

De acordo com Alcântara e Camargo (2001), nos modelos matemáticos de transporte de solutos a boa garantia de resultados dependem das variáveis de transporte envolvidas. A velocidade de avanço do material, o volume de poros e distância percorrida juntamente com características físicas e químicas do solo são fundamentais na estimativa da movimentação dos agentes poluidores.

Um dos softwares mais utilizados é o Hydrus, capaz de simular a movimentação de água, calor e solutos através do perfil do solo, em diferentes de condições iniciais de contorno e sendo bem coerente em relação a outros programas (CHAVES et al., 2016).

2.3. Quimigação

O processo de adição de químicos agrícolas em alguma cultura usando um sistema de irrigação e utilizando a água como meio de transporte é denominado quimigação. Os objetivos dessa prática em relação à irrigação convencional são basicamente adquirir maior eficiência na aplicação dos agroquímicos adicionados, aliado a uma economia financeira (RODRIGUES et al., 2017).

Para um manejo apropriado gerar alta uniformidade na aplicação, é recomendado a quimigação através de sistemas pressurizados como gotejo, pivô central e microaspersão. A pressurização no fluido pode ocasionar um regime de escoamento turbulento, criando assim maior contato entre moléculas de água e do sólido ou soluto líquido, gerando uma mistura mais homogênea (SANTOS et al., 2012).

A escolha correta dos ingredientes ativos, dose e número de aplicações fazem parte do manejo racional desses defensivos. Isso colabora para a preservação da fauna e flora da região, mantém a qualidade da água, do ar e dos alimentos de origem animal e vegetal e ajuda preservar a produtividade do solo (PENA; CRUZ; VON SPERLING, 2002).

Na aplicação direta sobre o solo se considera a importância da profundidade que o agroquímico atinge no perfil. Essa depende do tipo de solo, do volume de água aplicada e das propriedades dos produtos, como a volatilidade, solubilidade, adsorção à matéria orgânica e argila, meia vida (tempo para que ocorra a redução da concentração original de um pesticida pela metade) e fotossensibilidade (VIEIRA e SILVA da., 1998).

Dentro dos fenômenos de interação entre solo e solutos adicionados na água, a adsorção é imprescindível ser estudada já que ela é responsável pela contaminação residual do solo, em

que partículas do contaminante ficam retidas na matriz do solo e continuam a se difundir mesmo sem o fluxo de água (ALCÂNTARA, 2018).

Uma vez que os agroquímicos já se encontram no perfil a volatilidade do produto interfere diretamente, fazendo com que as moléculas vaporizem e sejam deslocadas para a atmosfera. Em uma condição de baixa umidade relativa do ar e alta temperatura a quimigação se torna desfavorável devido a maior volatilidade encontrada (CHRISTOFFOLETI et al., 2008).

Para adição de defensivos através de condutos de água de reduzidos diâmetros é importante que o soluto tenha boa solubilidade a fim de reduzir problemas de entupimentos por partículas sólidas. Sendo também fator importante na potencialidade de contaminação de recursos hídricos por representar a quantidade máxima que pode ser dissolvida em um volume de água (MARQUES, 2017).

Essa técnica se mostra vantajosa, graças a economia em mão de obra, alta uniformidade na aplicação, menor contato do operador ao produto, aplicação em qualquer estágio da cultura, redução de danos físicos provocados pelo tráfego de máquinas e por proporcionar um melhor uso do sistema de irrigação implantado (VIANA et al., 2002).

Contudo, é necessário que haja conhecimento sobre a dinâmica dos agroquímicos no solo a fim de realizar um manejo correto e eliminar ou reduzir o risco de contaminação ambiental (MACEDO, 2014).

2.4. Uso da Trifluralina no meio agrícola

O aumento na qualidade e produtividade de diversos tipos de culturas é visivelmente maior com a implementação de defensivos agrícolas, como herbicidas, fungicidas e inseticidas. O conhecimento extensivo desses compostos permite gerenciar seus comportamentos em diferentes perfis de solo e auxiliar na obtenção correta de dosagens para futuras aplicações (MONQUEIRO et al., 2012). Porém, o uso indiscriminado dessas substâncias pode comprometer a saúde da população consumidora dos produtos e a do meio ambiente. Desta forma o monitoramento intensivo através de estudos é interessante para cessar qualquer tipo de contaminação (FERNANDES, 2005).

De acordo com Theisen, Vidal e Fleck (1998) a Trifluralina é um herbicida pertencente ao grupo químico das dinitroanilinas, se trata de uma molécula neutra e não ionizável, não havendo alterações no processo de adsorção ao solo quando o pH é alterado.

Pensando na dinâmica desse herbicida no solo, algumas propriedades físico-químicas caracterizam esse composto como um contaminante de baixo risco para lençóis freáticos. Este possui baixa solubilidade em água $0,22 \text{ mg L}^{-1}$, densidade de $1,03 \text{ g cm}^{-3}$, meia vida de 180 dias e Koc com valor de 6400-14000 L kg^{-1} , se comparado com os herbicidas Bentazone e Propanil que apresentam meia vida de 14 e 2 dias e Koc de 34 e 239-800 L kg^{-1} respectivamente. Tem degradação rápida de até 98%, alta sorção e baixa mobilidade no solo, relatado por alguns parâmetros como um elevado valor no coeficiente de partição (Koc) que retrata a força de sorção do herbicida à matéria orgânica, junto ao coeficiente de partição octanol-água - $\text{Kow} = 117500$ ou $\log \text{Kow} = 5,07$ (FARIA, 2011; PRIMEL et al., 2005; PORTO et al., 2016).

O Banco de dados de propriedades de pesticidas (UNIVERSITY OF HERTFORDSHIRE, 2020) aborda outras propriedades físicas e químicas da Trifluralina. Dispõe de valores como, massa molecular de $335,28 \text{ g mol}^{-1}$, seu estado físico sólido cristalino de coloração amarelo-alaranjado, massa específica de $1,36 \text{ g ml}^{-1}$ e constante de Henry à 25°C de $10,2 \text{ Pa m}^3 \text{ mol}^{-1}$.

Estudos mostram que esse agroquímico é utilizado amplamente na agricultura para o controle do desenvolvimento de gramíneas anuais e algumas daninhas de folhas largas (MARCHI; MARCHI; GUIMARÃES, 2008).

Um dos procedimentos para a aplicação de Trifluralina no meio agrícola se dá por incorporação direta ao solo, tanto na pré-emergência quanto no pré-plantio. A finalidade da incorporação em fase de pré-emergência é amenizar o desenvolvimento de plantas daninhas auxiliando crescimento da cultura em um local incontaminado e sem interferências (SANTOS, 2012). Conforme Marchi, Marchi e Guimarães (2008) na fase de pré-plantio a adição do herbicida afeta o crescimento de raízes secundárias das daninhas, deixando-as curtas e grossas, gerando assim deficiência de nutrientes e conseqüentemente pouco desenvolvimento de seu sistema radicular.

Com o intuito de auxiliar produções agrícolas, a Trifluralina é uma aliada em sistema de irrigação por gotejamento subsuperficial. Para melhor eficiência de distribuição de água pelo sistema é necessário que as saídas dos emissores estejam livres de partículas de solo e raízes, nesse sentido, a presença de matéria orgânica e argila no solo próximo ao bocal do emissor faz com que esse herbicida seja altamente fixado no local e apresente a capacidade de interromper a formação de futuras células, na radícula e caulículo de plantas encontradas naquela extensão (DALRI et al., 2015).

Em relação à aplicabilidade desse herbicida, é comprovado em estudos que dosagens baixas de até 0,05 ml por gotejador são eficazes na prevenção à intrusão das raízes, sendo recomendadas doses de 0,2 a 0,25 ml num período espaçado de 5 a 6 meses (LIMA, 2014).

Tratando-se da degradação da Trifluralina quando adicionada ao solo, alguns fatores que afetam sua permanência são a fotólise, volatilização e a decomposição microbiana. Assim, dependendo da concentração e condições do solo e do clima, haverá prejuízos em culturas subsequentes devido ao efeito residual deixado, chamado *carryover* (LORENZON et al., 2016).

2.5. O modelo computacional Hydrus

A implementação de tecnologias como sistemas de software para simulações, controles automáticos para operações, sensores de coleta de dados, entre outros, vêm beneficiando o setor agrícola, gerando melhorias que proporcionam uma melhor produtividade (MELLO; CAIMI, 2008).

A busca por informações ainda não disponíveis e a antecipação de acontecimentos em diversos cenários são possíveis através de simulações computacionais que se baseiam em modelos matemáticos (FELTRIN; PAIVA; PAIVA, 2013).

Neste sentido, o modelo Hydrus consiste em um software de modelagem matemática que busca simular movimento da água, de solutos e do calor através do perfil do solo, em uma, duas ou três dimensões, sendo possível caracterizá-lo hidrodinamicamente de várias formas, quanto à retenção de água pelo solo e sua condutividade hidráulica (DIAS; SOARES, 2019).

Para analisar fluxo de água, fundamentos da equação de Richards são usados, tanto para solo saturado quanto não saturado. Conhecimentos da condutividade hidráulica e curvas de retenção são fundamentais nos cálculos em solos não saturados. Já para prever o comportamento de solutos no solo a equação de convecção – dispersão é indispensável (PINHO; MIRANDA, 2014; SILVA JUNIOR et al., 2013).

Parâmetros hidrológicos, como irrigação, precipitação, evaporação, armazenamento de água, absorção de água radicular, infiltração, comportamento hídrico na capilaridade, drenagem, recarga subterrânea e fluxos são simulados no software e os resultados auxiliam em um monitoramento completo dos eventos ocorridos no solo (ARRUDA, 2018).

De acordo com Macedo (2014), no software, para a simulação do avanço de contaminantes no solo, é feita a escolha do modelo de transporte de soluto para que, em seguida, sejam inseridos dados de entrada do solo, como densidade, dispersividade e difusividade

molecular em relação ao contaminante e por fim são selecionadas as condições de iniciais e de contorno do caso.

Como exemplo de utilização, o Hydrus é eficiente também quando aplicado em análise do desenvolvimento de bulbo úmido em sistema de gotejamento, visando um melhor gerenciamento da irrigação através de aplicação de pulsos corretos com lâminas ideais (MORILLO et al., 2015).

Os resultados da simulação apresentam o comportamento de fluxos no eixo vertical e horizontal, juntamente com gráficos em até três dimensões que relatam as concentrações, alcance e outras informações no decorrer do tempo (ŠIMŮNEK; VAN GENUCHTEN; ŠEJNA, 2012).

3. MATERIAL E MÉTODOS

Para realização das modelagens e posteriores simulações do movimento da Trifluralina (TFN) no solo, foram utilizados dados apresentados por Faria (2011) referentes ao movimento de água e do herbicida em dois solos: um de textura franco arenosa (77, 5 e 18 % de areia, silte e argila, respectivamente) e outro franco argilosa (25, 35 e 40% de areia, silte e argila, respectivamente).

Para as simulações, as propriedades físico-hídricas dos solos (Tabela 1) utilizados foram: os parâmetros da curva de retenção de água pelo solo, ajustadas pelo modelo de Mualem - van Genuchten (VAN GENUCHTEN, 1980), densidade do solo e condutividade hidráulica do solo saturado.

Tabela 1 – Propriedades físico-hídricas dos solos utilizados para simulação e modelagem do movimento de Trifluralina em diferentes cenários

Propriedade	Solo argiloso	Solo arenoso
Densidade de solo (mg cm^{-3})	1210	1480
Umidade residual ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	0,208	0,093
Umidade de saturação ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	0,734	0,626
α (1 cm^{-1})	0,02203637	0,02203505
n	2,182286	2,096998
Condutividade hidráulica do solo saturado (cm dia^{-1})	299,28	110,88
Tortuosidade	0,5	0,5

Fonte: Faria (2011)

Já quanto às propriedades relativas ao movimento de Trifluralina no solo, para a adsorção, foram modeladas e simuladas situações considerando o modelo matemático linear de adsorção de solutos ao solo, por meio do coeficiente de partição solo-água, Kd (6,25 cm^3/mg para o solo argiloso e 5,21 $\text{cm}^3 \text{mg}^{-1}$ para o arenoso), para um tempo de contato entre solo e soluções com TFN de 8 horas e concentrações de TFN de 0,1; 1; 10; 50; 100; 200 e 250 ppm necessárias para que fosse possível obter um valor médio desse coeficiente. Além disso, foi considerado um valor de difusividade da Trifluralina em água pura de 0.5327513 $\text{cm}^2 \text{dia}^{-1}$, dispersividade longitudinal de 2.21 cm para o solo argiloso e 3.97 cm no solo arenoso, para

uma concentração do princípio ativo do herbicida de 44,5 mg cm⁻³ (FARIA, 2011). A dispersividade foi calculada utilizando-se a Equação 1.

$$\lambda = \frac{D}{v} \quad (1)$$

em que:

λ = dispersividade do soluto, cm

D = coeficiente de dispersão hidrodinâmica (cm²/h)

v = velocidade real da água no solo (cm/h).

Os valores de D e v para a Trifluralina em cada um dos solos foram obtidos em Faria (2011). Já a difusividade do soluto em água pura foi calculada por meio da equação de Wilke-Chang, expressão empírica apresentada na Equação 2.

$$D_{cl} = \frac{7,4 \times 10^{-8} (\varphi_w^o \times m_w)^{0,5} T}{\mu_v V_c^{0,6}} \quad (2)$$

em que:

D_{cl} = Coeficiente de difusividade molar do pesticida em água (cm²/s)

T = temperatura absoluta (K)

φ_w^o = termo de associação para o solvente (2.6 para a água)

m_w = peso molecular da água (18 g/mol)

μ_v = viscosidade da água (8.9 x 10⁻¹ cp)

V_c = volume molar do pesticida (250,6 cm³/mol para a Trifluralina)

Para a modelagem e simulações foi utilizado o software HYDRUS 2D em sua versão 2.05.027 (SIMUNEK; SEJNA; VAN GENUCHTEN, 1999). Foram modelados três Cenários, descritos na sequência.

3.1. Cenário 1 - Movimento de água e soluto em regime permanente em um perfil de solo de um metro

A primeira modelagem numérica trata do exemplo mais simples, utilizando o Hydrus-2D, relativo à aplicação de água em um perfil de solo em regime permanente, para uma carga hidráulica de 50 mm aplicada durante um intervalo de tempo de uma hora, simulando uma irrigação com alta intensidade de aplicação de água por aspersão.

Inicialmente foram escolhidas as informações de geometria, representando o tipo de domínio e a unidade utilizada. Neste caso o modelo era baseado em análises em duas direções, eixos X e Y com unidades do perfil em centímetros.

No próximo passo, foram escolhidos na representação, fluxo de água juntamente com transporte padrão de solutos. A opção de solução inversa não foi selecionada, já que apenas seria necessária caso não houvesse as curvas de retenção de água dos tipos de solo. Nessa etapa do processo também foram desconsideradas o fluxo por absorção realizados pelas raízes e o transporte de calor.

As informações de tempo foram retratadas com a unidade em dias para um período recorrente de 1 hora de avaliação. Esse valor não foi adotado para o número de gravações de tempo variável de condições de contorno devido a ser um regime permanente. Na sequência foram estabelecidas 10 divisões de contagem para a informações de impressão do programa, com esse valor ficam registrados as ocorrências em formas de curvas no gráfico final para cada 6 minutos desse intervalo.

Em critérios de interação, foram mantidos os valores padrão, exceto no valor de números máximos de interações, em que se utilizou 10. Nessa etapa foi determinado carga de pressão como opção de condição inicial da simulação.

Com o intuito de representar os parâmetros hidráulicos do solo, foi selecionado o modelo de van Genuchten – Mualem, sem ocorrência de histerese do solo. Nos parâmetros relativos ao fluxo de água, utilizou-se os dados apresentados na Tabela 1, em função do solo definido no modelo.

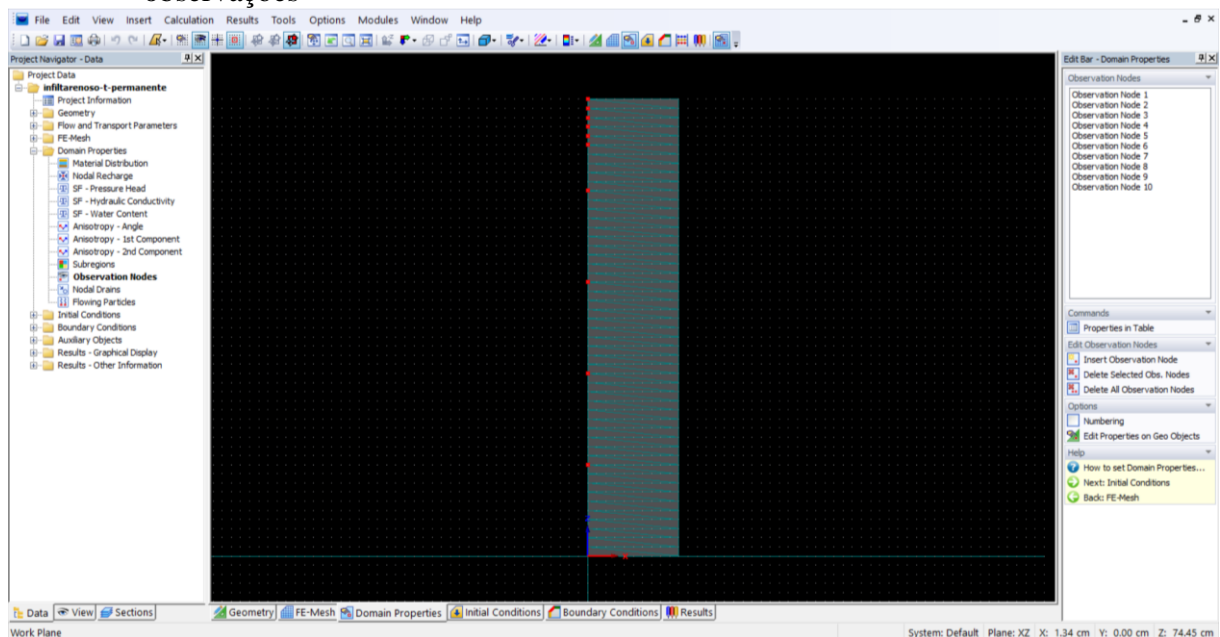
Posteriormente, foram escolhidos parâmetros do transporte de solutos. No software, as primeiras características necessárias foram suas unidades massa e sua condição inicial. A condição inicial do solo foi definida em termos de potencial matricial da água, sendo considerado um valor de -100 cm (10 kPa) para todo perfil, sendo um indicativo da capacidade de campo dos solos.

Como uma das partes finais antes do processamento, a malha de análise e as condições do desenho foram geradas. Realizaram-se os procedimentos com um refinamento de malha com

valor de 5 cm próximo a superfície superior, de forma a ser gerado um melhor detalhamento no específico local.

A geometria elaborada pode ser considerada simples, contendo apenas uma superfície retangular de 1 metro profundidade com 1 cm de largura do perfil. Foram adicionados 10 nós de observações ao longo do eixo y, no canto esquerdo (pontos vermelhos, mostrados na Figura 1).

Figura 1 - Apresentação da malha de elementos finitos do Cenário 1 e seus pontos de observações



Fonte: Do autor (2021)

Tabela 2 – Profundidade dos nós de observação na geometria especificada para o Cenário 1

Nó de observação	Profundidade a partir da superfície do solo (cm)
1	0
2	2
3	4
4	6
5	8
6	10
7	20
8	40
9	60
10	80

Fonte: Do autor (2021)

Além da condição de contorno de carga constante na superfície, estabeleceu-se drenagem livre na parte inferior e fluxo nulo nas laterais.

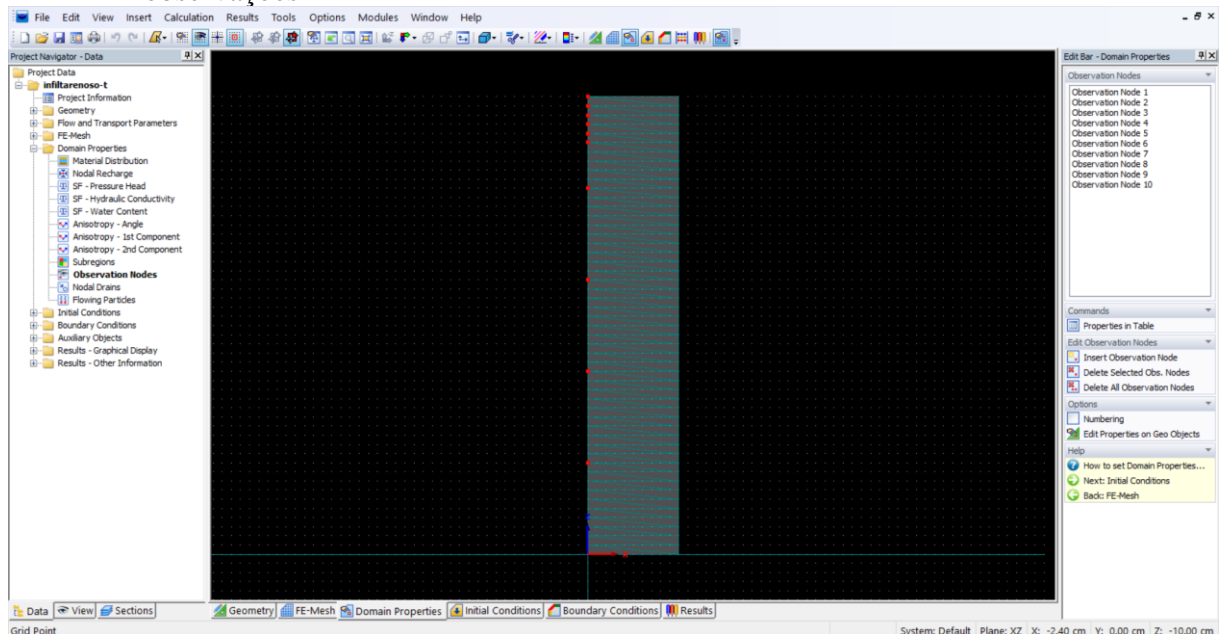
3.2. Cenário 2 - Movimento de água e soluto em regime transiente, induzido por condições de contorno atmosféricas, em um perfil de solo de um metro

Este possui construção igual ao Cenário 1, porém, ao invés de indução de regime permanente de infiltração, foi utilizada uma condição de contorno atmosférica na parte superior da geometria, simulando-se 365 dias de precipitação e evapotranspiração potencial, referentes ao ocorrido no município de Lavras em 2016, o que denota um regime transiente de movimento de água e solutos. Estes dados foram registrados na estação meteorológica de responsabilidade do INMET instalada no Campus da UFLA.

Com a consideração de um tempo de simulação de 365 dias, definiu-se um número total igual de gravações. A colocação dos nós de observações seguiu o mesmo esquema do Cenário 1 (Tabela 2).

A malha de elementos finitos relativa ao Cenário 2, pode ser vista na Figura 2.

Figura 2 - Apresentação da malha de elementos finitos do Cenário 2 e seus pontos de observações



Fonte: Do autor (2021)

Tabela 3 – Profundidade dos nós de observação na geometria especificada para o Cenário 2

Nó de observação	Profundidade a partir da superfície do solo (cm)
1	0
2	2
3	4
4	6
5	8
6	10
7	20
8	40
9	60
10	80

Fonte: Do autor (2021)

Neste Cenário, foi definida a aplicação de $44,5 \text{ mg cm}^{-3}$ de Trifluralina no primeiro dia de simulação, em um pulso de uma hora de duração.

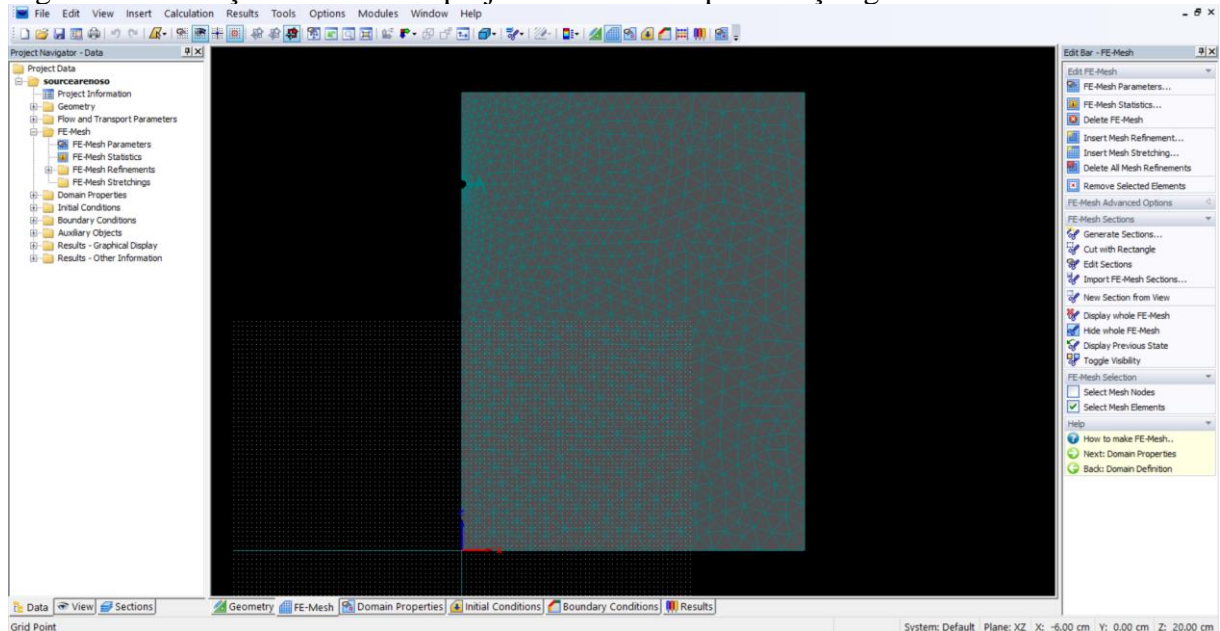
3.3. Cenário 3 - Linha lateral de gotejamento subsuperficial, com aplicação de água e TFN duas vezes por semana.

A modelagem Cenário 3 trata da aplicação de água juntamente com a Trifluralina (quimigação) através do sistema de irrigação, com gotejadores enterrados. Os passos seguidos no software para modelagem do processo foram os mesmos até a definição das informações de tempo. Foi usado um tempo final de 7 dias e 6 gravações de número de condições de contorno, com quantidades de gravações estabelecidas com o valor de 14, sendo assim registrado a situação de cada duas vezes ao dia, durante o tempo previsto de uma semana completa.

Este Cenário se refere a um regime transiente de aplicação de água, ou seja, uma condição de contorno de fluxo variável a partir da superfície modelada do gotejador. Foram determinadas aplicações no primeiro dia, com duração de 0,1 dia e, após 3,5 dias, mais uma aplicação de 0,1 dia, com fluxo de $-60 \text{ cm dia}^{-1} \text{ metro}^{-1}$, representando a intensidade de aplicação de água que geralmente ocorre por metro de tubos gotejadores. O valor negativo, por padrão do software, indica que a água entra no domínio, neste tipo de condição. A aplicação do soluto também foi definida para uma concentração de $44,5 \text{ mg cm}^{-3}$.

Quanto à geometria do domínio, a largura do perfil de solo foi de 75 cm e 100 cm de extensão na vertical, com o emissor alocado no canto esquerdo a uma profundidade de 20 cm (Figura 3).

Figura 3 - Descrição da malha do projeto 3 com sua representação geométrica

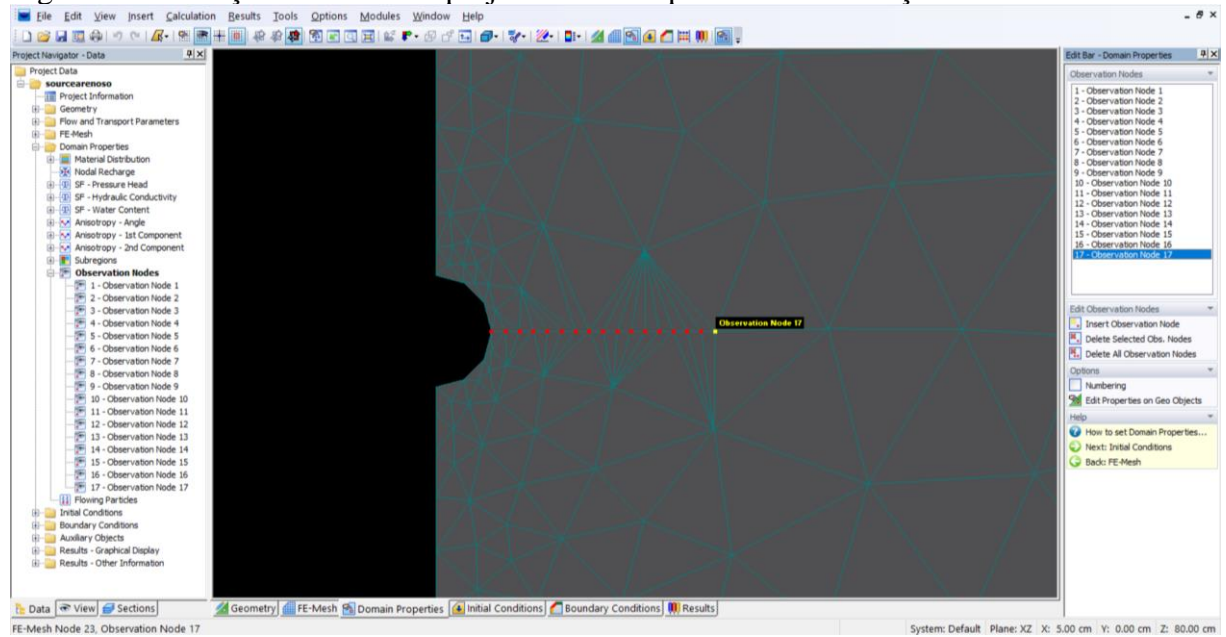


Fonte: Do autor (2021)

O refinamento de malha de elementos foi feito próximo ao gotejador com a adição de 17 pontos de observação incluídos na malha, todos próximos ao gotejador, a fim de se verificar o comportamento móvel da Trifluralina e da água.

A localização dos nós de observação é mostrada da Figura 4 e Tabela 4, usando-se como referência a parede do gotejador no eixo horizontal.

Figura 4 - Descrição da malha do projeto 3 com os pontos de observações



Fonte: Do autor (2021)

Tabela 4 – Distância dos nós de observação na geometria especificada para o Cenário 3

Nó de observação	Distância a partir da superfície do gotejador no eixo horizontal (cm)
1	0,00
2	0,25
3	0,50
4	0,75
5	1,00
6	1,25
7	1,50
8	1,75
9	2,00
10	2,25
11	2,50
12	2,75
13	3,00
14	3,25
15	3,50
16	3,75
17	4,00

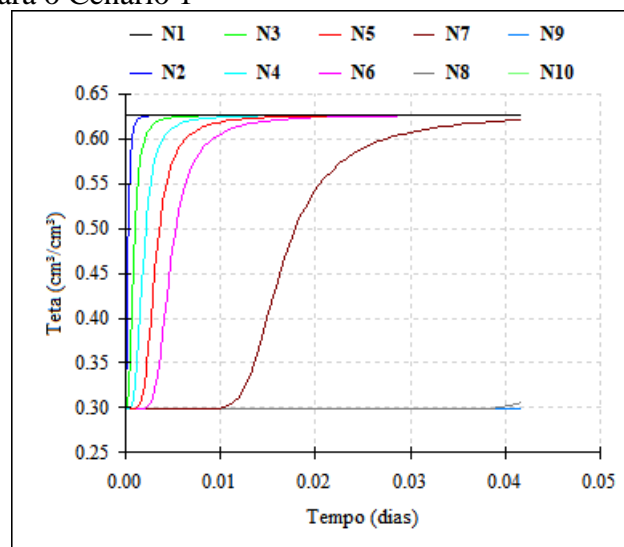
Fonte: Do autor (2021)

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Cenário 1 - Movimento de água e soluto em regime permanente em um perfil de solo de um metro

A variação da umidade com o tempo no solo arenoso, em cada um dos nós de observação definidos para o Cenário 1, pode ser vista na Figura 5.

Figura 5 - Variação da umidade com o tempo no solo arenoso nos nós de observação definidos para o Cenário 1



Fonte: Do autor (2021)

É possível notar que o nó 1 se manteve com a umidade sempre elevada, com valor próximo de $0,63 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, em razão da simulação da infiltração em regime permanente, sendo esta a umidade de saturação.

Imediatamente após a aplicação da solução, a umidade dos nós mais superficiais aumentam rapidamente até se estabilizarem na umidade máxima encontrada na superfície. Esses 6 primeiros nós estão compreendidos em uma camada de 10 cm de espessura.

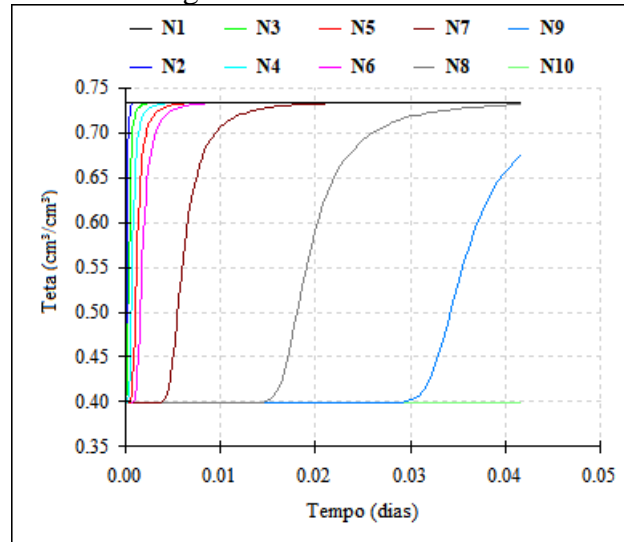
A partir do ponto 7, alocado numa profundidade de 20 cm, a umidade não aumentou tão rapidamente. Nesse nó o tempo gasto para ter a umidade máxima é de aproximadamente 45 minutos, o triplo de tempo dos outros nós superficiais.

Em nós abaixo de 40 cm já não foi notado uma elevação considerável de umidade, devido às propriedades físico-hídricas desse solo arenoso e em função da solução não chegar a essa profundidade no intervalo de tempo considerado na análise, assim, o teor de água neste

ponto se manteve mais baixo, com valor próximo a $0,30 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, definido como a umidade residual.

Na Figura 6, é possível observar a variação da umidade no solo argiloso para o primeiro Cenário, no período avaliado e de acordo com a definição dos nós de observação.

Figura 6 - Variação da umidade com o tempo no solo argiloso nos nós de observação definidos para o Cenário 1 e solo argiloso



Fonte: Do autor (2021)

Verifica-se que no solo argiloso a umidade de saturação teve um valor mais elevado que o solo arenoso (aproximadamente $0,73 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). De acordo com CARDUCCI et al. (2011) isso é devido a maior quantidade de partículas finas presentes no solo argiloso, que são responsáveis por incrementar maior energia de retenção de água. Além disso, assim como relataram REINERT e REICHERT (2006), em solos, quanto maior a quantidade de poros de tamanho reduzido, maior será a porosidade deste, o que leva a uma maior umidade de saturação.

Assim como no solo arenoso, em pontos do perfil até a profundidade de 0,1 m, tiveram umidade elevada até a saturação em um intervalo de tempo de 3 a 4 minutos, aproximadamente. Porém, verificou-se que a frente de umedecimento não atingiu profundidades abaixo de 0,8 m, no intervalo de tempo considerado.

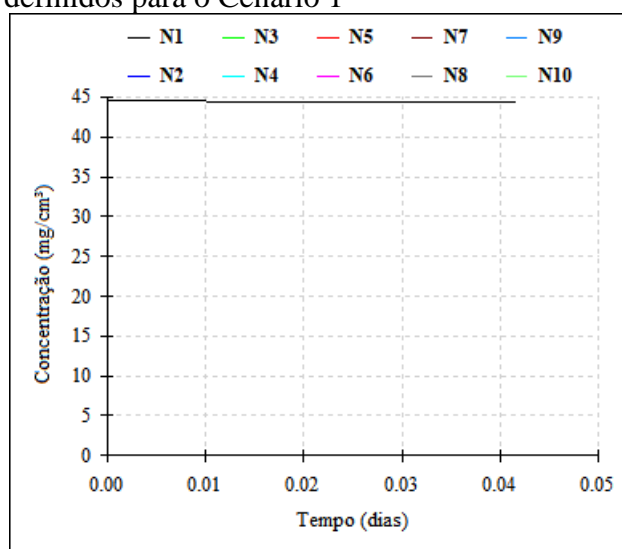
É verificado que os nós à 0,4 e 0,6 m de profundidade houve elevações de umidade, o que não ocorreu no solo arenoso devido à menor condutividade hidráulica em relação ao solo argiloso.

MESQUITA e MORAES (2004) explicam que o fluxo de água no solo é influenciado pela textura, estrutura, profundidade, forma do relevo e porosidade. Inclusive, é relatado que o processo de infiltração é determinado pela intensidade espacial, padrão espacial e continuidade

dos poros, sendo que geralmente, no solo arenoso o valor de porosidade total é menor, mesmo havendo a predominância de macroporos, podendo influenciar em uma menor condutividade hidráulica do solo não saturado e conseqüentemente menor movimentação de água pelo perfil.

A variação da concentração de TFN com o tempo no perfil de solo arenoso submetido à infiltração de solução em regime permanente, nos nós de observação é apresentada na Figura 7.

Figura 7 - Variação da concentração de TFN com o tempo no solo arenoso nos nós de observação definidos para o Cenário 1



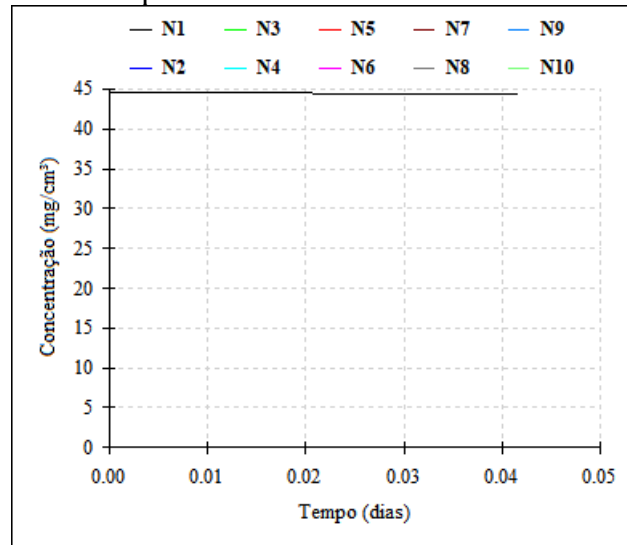
Fonte: Do autor (2021)

Com o passar do tempo, a concentração de Trifluralina se manteve praticamente constante no primeiro nó, colocado na superfície do solo, com um valor próximo ao aplicado de $44,5 \text{ mg cm}^{-3}$. Nos outros nós não foi verificada concentração de Trifluralina, isso em razão desta ter baixa mobilidade, como evidenciado pelos valores de K_d ($6,25 \text{ cm}^3 \text{ mg}^{-1}$ para o solo argiloso e $5,21 \text{ cm}^3 \text{ mg}^{-1}$ para o arenoso). Desta forma, no intervalo de tempo avaliado, foi possível verificar a presença de Trifluralina apenas aproximadamente nos dois primeiros centímetros do perfil do solo.

A ausência de TFN no ponto alocado a 2 cm de profundidade é esperado, já que de acordo com FARIA (2011) esse pesticida, em razão de sua baixa mobilidade, tende a se manter distribuído nos primeiros 15 cm de solo apenas.

A Figura 8 apresenta a variação da concentração de TFN com o tempo em diferentes nós de observação no perfil de solo argiloso.

Figura 8 - Variação da concentração de TFN com o tempo no solo argiloso nos nós de observação definidos para o Cenário 1

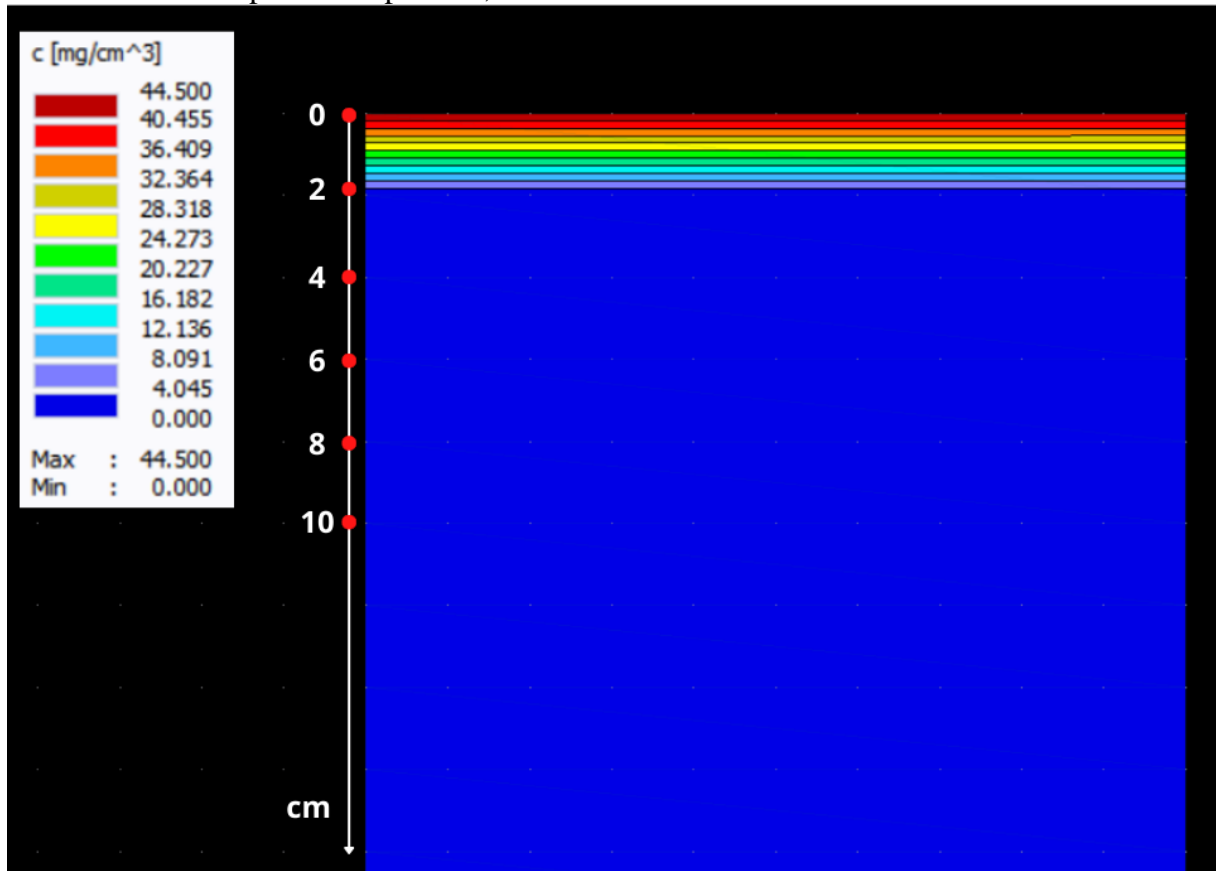


Fonte: Do autor (2021)

Observou-se comportamento similar da concentração de Trifluralina no perfil dos solos avaliados, com variação praticamente nula da concentração do fitossanitário na camada superficial não sendo verificada mobilidade a camadas inferiores no intervalo de tempo considerado, assim como visto para a Figura 7.

A distribuição final da Trifluralina do perfil do solo pode ser vista, graficamente, na Figura 9.

Figura 9 - Representação gráfica da distribuição da concentração de TFN no perfil de solo arenoso para o tempo final, referente ao Cenário 1

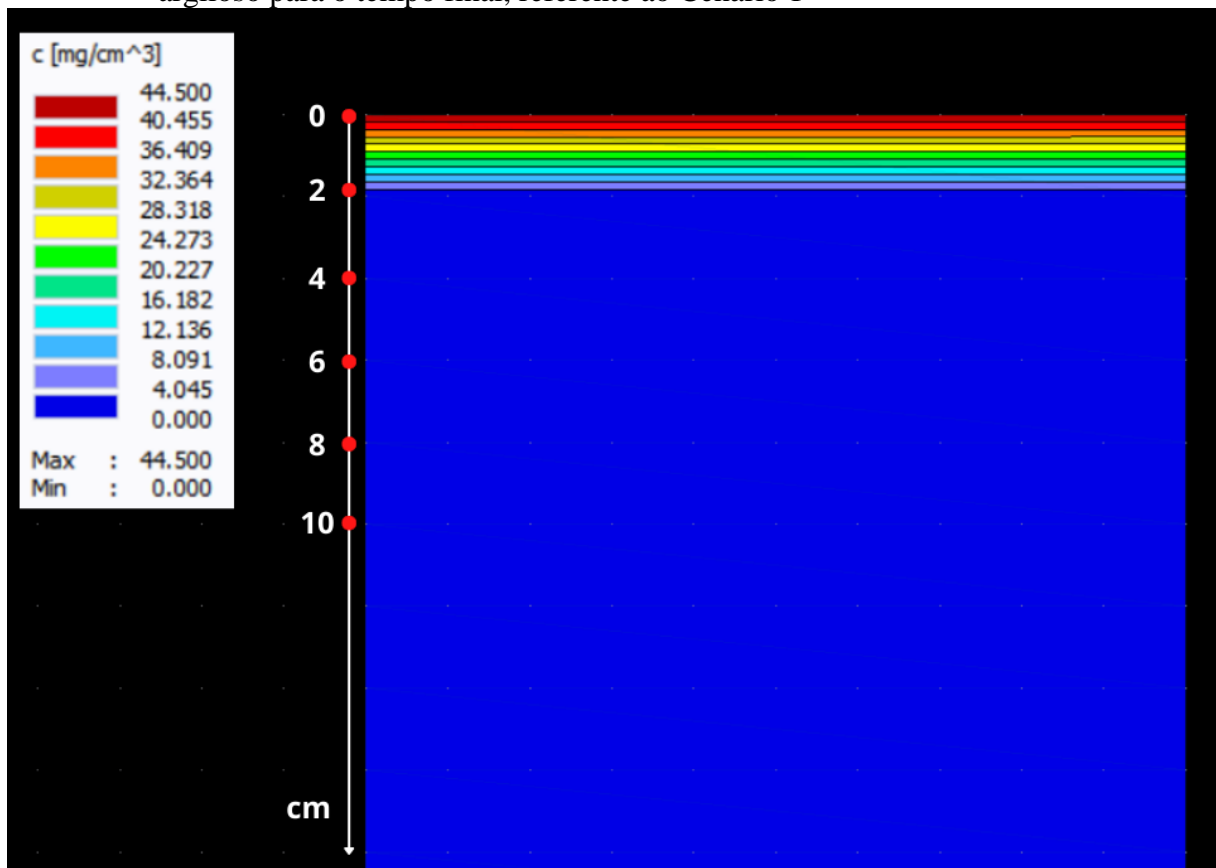


Fonte: Do autor (2021)

Verificou-se, portanto, que mesmo com a infiltração de solução de Trifluralina, as camadas inferiores do perfil do solo não foram atingidas pelo herbicida, devido às suas características de baixa solubilidade em água e alta adsorção aos colóides do solo, principalmente os orgânicos, assim como descrito por FERRI (2000), o que leva à dissolução da TFN, ficando esta retida à fase sólida do solo.

Na representação gráfica apresentada por meio da Figura 10 é possível observar a distribuição da TFN no solo.

Figura 10 - Representação gráfica da distribuição da concentração de TFN no perfil de solo argiloso para o tempo final, referente ao Cenário 1



Fonte: Do autor (2021)

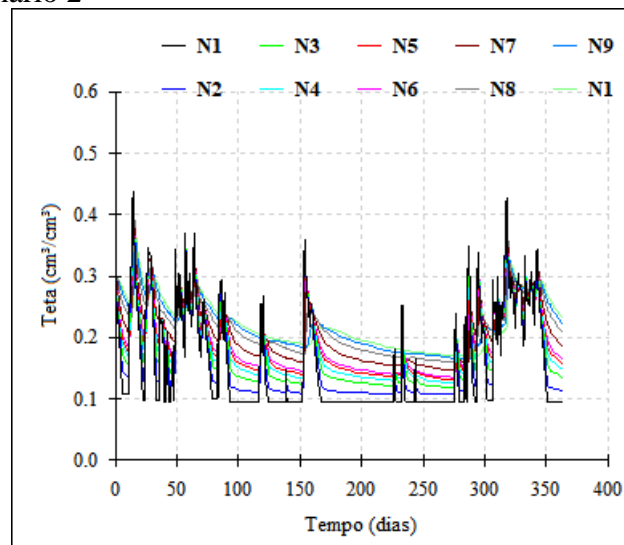
Corroborando com o apresentado na Figura 8, nota-se que, na representação gráfica final da concentração de Trifluralina no perfil do solo, o produto não se deslocou às camadas inferiores, devido à sua alta adsorção à fase sólida do meio poroso. É possível notar que a concentração do herbicida teve os mesmos resultados apresentados para o solo arenoso, estando presente apenas na camada mais superficial, com aproximadamente 2 cm de profundidade.

Mesmo o solo arenoso apresentando menor CTC (capacidade de troca catiônica responsável pelo aumento de ligações de moléculas aos colóides) e maior fluxo de água, não foi possível notar movimentação mais profunda de TFN em razão de suas propriedades que lhe conferem alta volatilização, alta retenção aos colóides e baixa solubilidade.

5.2. Cenário 2 - Movimento de água e soluto em regime transiente, induzido por condições de contorno atmosféricas, em um perfil de solo de um metro

Na Figura 11 pode-se ver a variação da umidade com o passar do tempo no solo arenoso em cada nó de observação, como estabelecido no Cenário 2.

Figura 11 - Variação da umidade com o tempo no solo arenoso nos nós de observação definidos para o Cenário 2

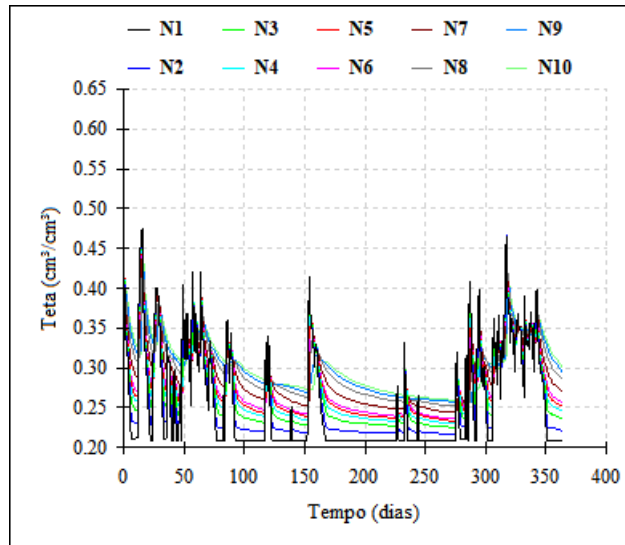


Fonte: Do autor (2021)

As elevações repentinas representam cada vez em que a precipitação pluvial ocorreu no município do estudo. Os primeiros nós expõem maiores variações devido a superfície receber maior volume de água. A taxa de redução da umidade menor nas camadas mais profundas é devido à pouca influência da evapotranspiração potencial nestas, o que implica a umidades com menor variabilidade com o passar do tempo.

Em cada nó de observação estipulado no Cenário 2 é possível visualizar na Figura 12 a variação da umidade com o tempo no solo argiloso.

Figura 12 - Variação da umidade com o tempo no solo argiloso nos nós de observação definidos para o Cenário 2



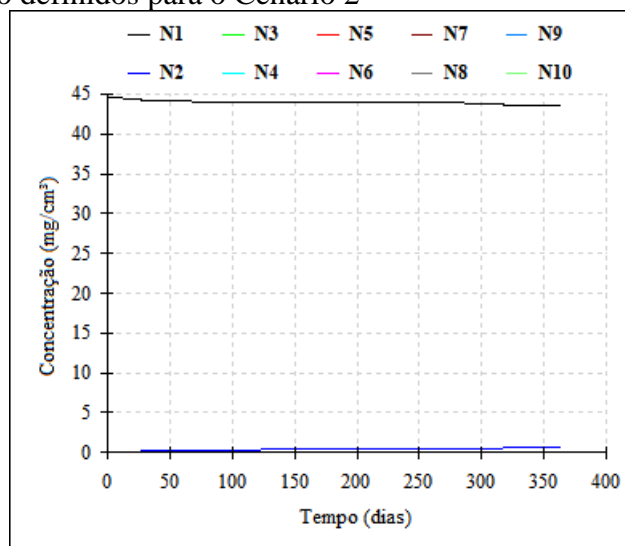
Fonte: Do autor (2021)

Em resumo, o teor de água se comportou semelhantemente ao observado para o solo arenoso, porém observou-se valores superiores de umidade ao longo do perfil de solo.

Segundo BUSKE (2013), um solo argiloso possui maior capacidade de reter água, tanto na capacidade de campo quanto no ponto de murcha permanente, em razão de possuírem maior quantidade de microporos e suas partículas apresentarem maior área superficial.

O comportamento da concentração de TFN no tempo para o solo arenoso sob condições de contorno atmosféricas e infiltração em regime transiente, pode ser visto na Figura 13.

Figura 13 - Variação da concentração de TFN no tempo para o solo arenoso nos nós de observação definidos para o Cenário 2



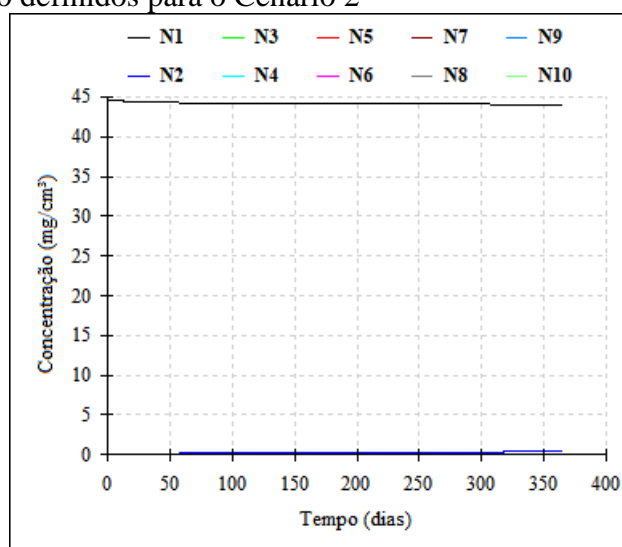
Fonte: Do autor (2021)

Com uma aplicação pontual de TFN no solo, apenas no primeiro dia, foi possível observar, que houve uma redução no teor de TFN presente ao longo dos 365 dias para o primeiro nó. Em estudos, FARIA (2016) relata que um herbicida com meia vida de 127 dias, como é o caso do Tembotrione, pode ter seu tempo de permanência no solo de até 342 dias. O valor da redução não foi tão expressivo durante esse intervalo devido a TFN ter uma meia vida em torno de 180 dias.

Uma leve porção do herbicida atingiu o nó de 2cm, que teve uma pequena elevação de $0,7 \text{ mg cm}^{-3}$ na concentração depois de aproximadamente 25 dias. Já em nós abaixo, esse valor foi nulo.

Na Figura 14 é possível visualizar a variação da concentração de TFN com o passar do tempo no perfil de solo argiloso, submetido a infiltração de solução em regime transiente sob condições de contorno atmosféricas nos nós de observação.

Figura 14 - Variação da concentração de TFN com o tempo no solo argiloso nos nós de observação definidos para o Cenário 2

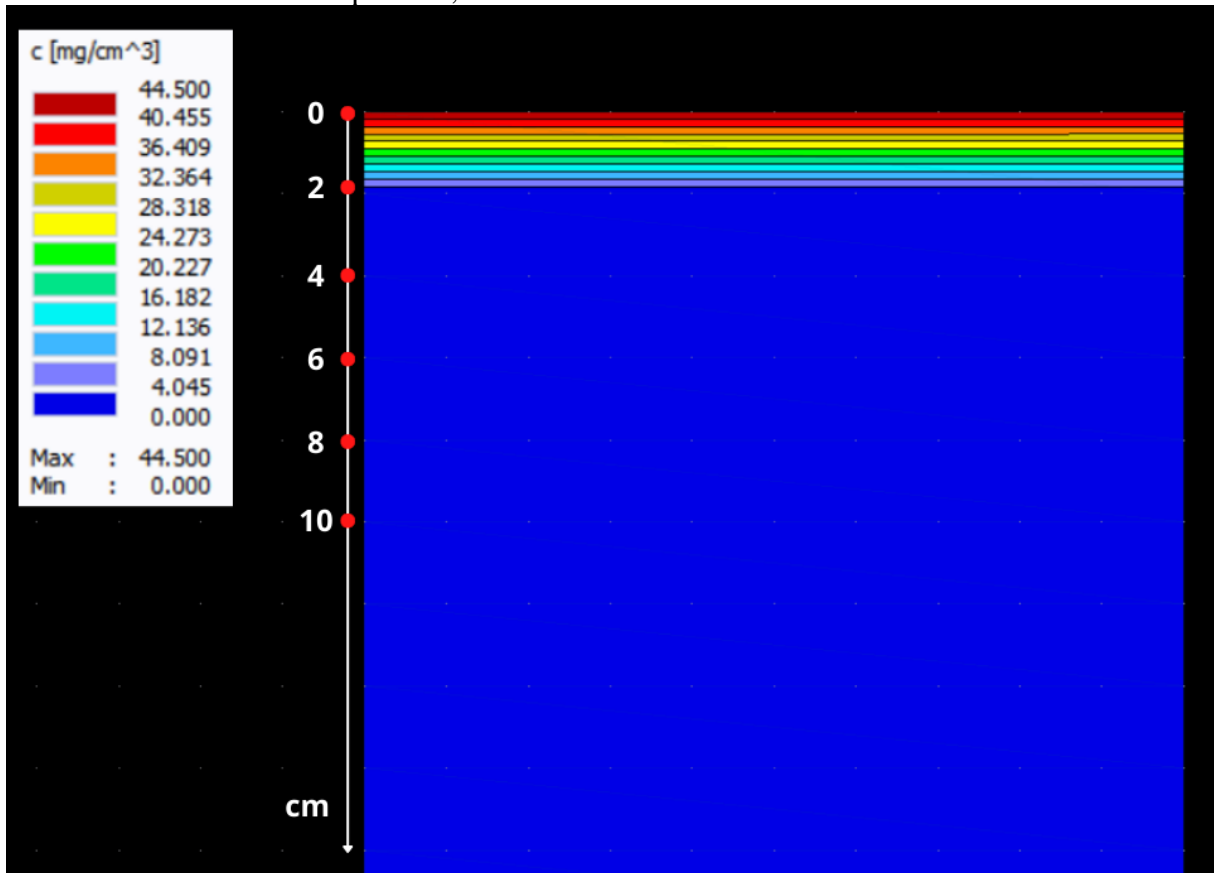


Fonte: Do autor (2021)

De maneira similar, a concentração de TFN no solo argiloso teve a mesma dinâmica de movimentação e permanência, com valores bem próximos aos observados no solo arenoso. Apenas uma diferença foi observada no segundo nó, em que se teve uma leve elevação da concentração do produto apenas 50 dias após a aplicação em decorrência do fluxo no solo argiloso ser mais lento durante o deslocamento miscível e pelo coeficiente de distribuição (K_d) ser maior nesse solo. MACEDO (2014) expõe o fato de que o coeficiente K_d é diretamente proporcional à quantidade de agroquímico adsorvido nas superfícies das partículas de solo.

Já na Figura 15 é possível observar a distribuição gráfica da TFN no perfil do solo.

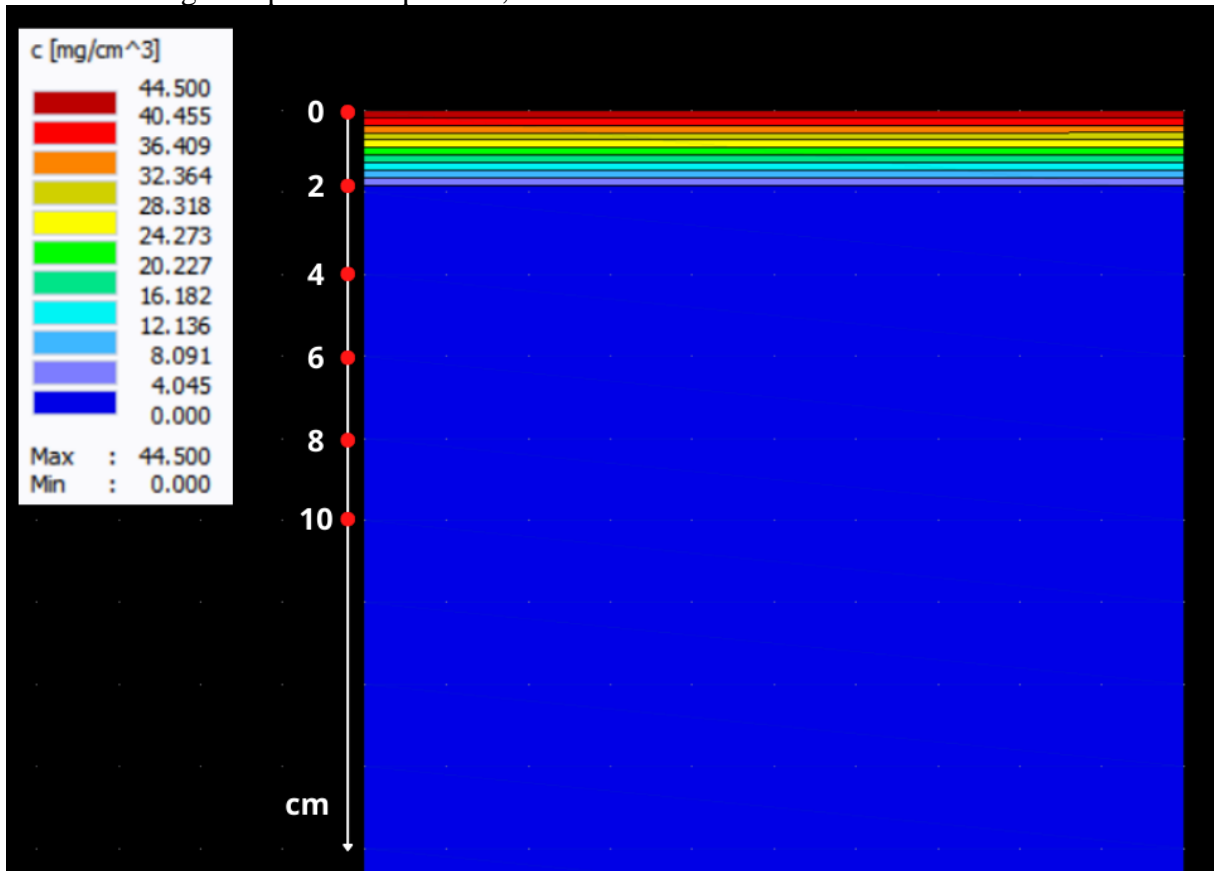
Figura 15 - Representação gráfica da distribuição da concentração de TFN no perfil de solo arenoso no tempo final, referente ao Cenário 2



Fonte: Do autor (2021)

Comprovando os resultados do primeiro Cenário, a TFN se manteve presente apenas na faixa superficial de 2cm de profundidade, mesmo sob condições atmosféricas com o regime transiente. Corroborando com o obtido, estudo de VIEIRA e SILVA da. (1998) aponta que em um solo de textura média, a TFN concentrou-se nos 2,5 cm superficiais do solo quando aplicada junto à uma lâmina de água de 33 mm. A distribuição da TFN no perfil do solo argiloso, para o tempo final de análise, pode ser vista na Figura 16.

Figura 16 - Representação gráfica da distribuição da concentração de TFN no perfil de solo argiloso para o tempo final, referente ao Cenário 2



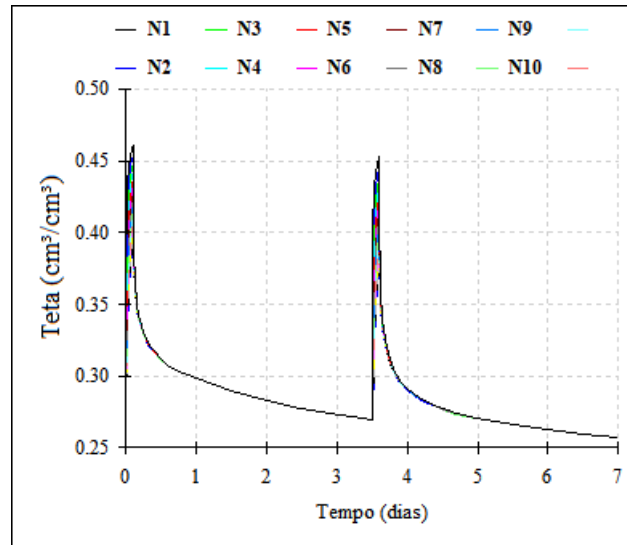
Fonte: Do autor (2021)

O comportamento do herbicida nesse solo de característica argilosa teve resultados semelhantes de movimentação quando comparados ao solo arenoso submetido ao mesmo Cenário e aos dois solos no Cenário 1. Esse fato comprova a baixa influência de fatores climáticos no seu deslocamento da Trifluralina em solos com texturas diferentes.

5.3. Cenário 3 - Linha lateral de gotejamento subsuperficial, com aplicação de água e TFN duas vezes por semana.

Para o solo arenoso, na Figura 17, é possível notar a variação de umidade no período de 7 dias para cada nó de observação do Cenário 3.

Figura 17 - Variação da umidade com o tempo no solo arenoso nos nós de observação definidos para o Cenário 3



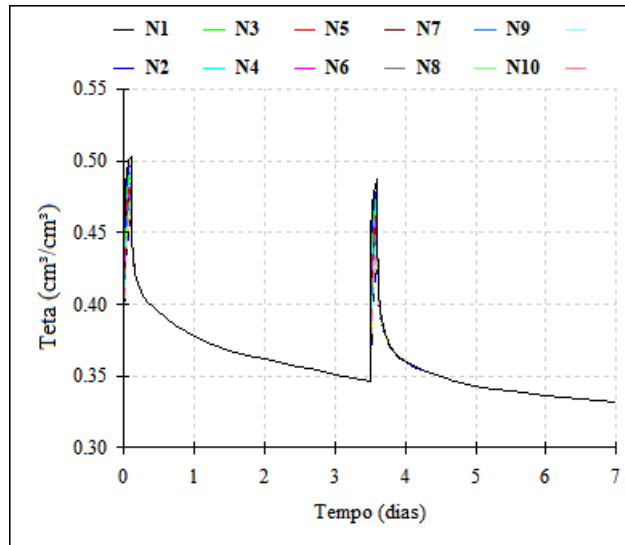
Fonte: Do autor (2021)

Esse comportamento demonstra um maior fluxo de água a partir do gotejador no momento inicial da aplicação e uma redução gradual ao passar dos dias, referente à redistribuição de água no solo.

FAGUNDES et al. (2012), explica que o potencial matricial é relativamente grande em relação ao potencial gravitacional quando o solo se encontra seco, o que leva à redistribuição de água, porém quando ocorre o umedecimento o potencial matricial é reduzido, ficando apenas o potencial gravitacional responsável pelo movimento de água.

A alteração do teor de água com o tempo do terceiro Cenário para o solo argiloso pode ser vista na Figura 18.

Figura 18 - Variação da umidade com o tempo no solo argiloso nos nós de observação definidos para o Cenário 3

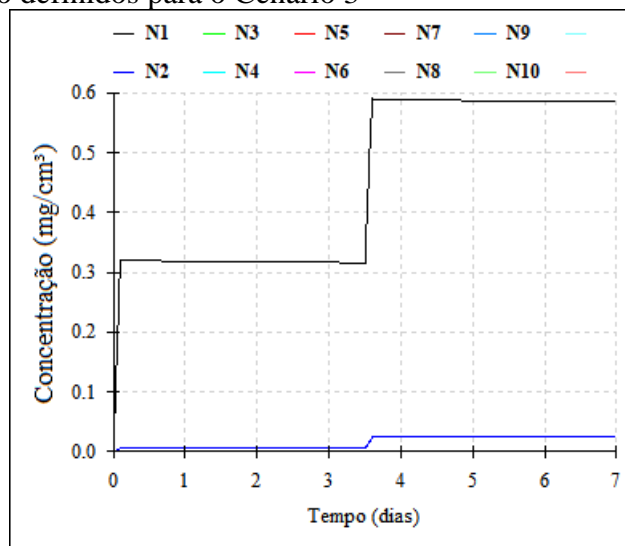


Fonte: Do autor (2021)

Devido ao seu volume maior de poros e maior capacidade de retenção de água, foram observados valores de umidade razoavelmente mais altos nos nós de observação, o que poderia refletir em uma movimentação da Trifluralina a nós mais distantes do gotejador, mesmo que nestes tenha sido verificado fluxo de água, assim como verificado para o solo arenoso sob o mesmo cenário de simulação.

No perfil de solo arenoso submetido a infiltração de solução em regime transiente sob as condições de contorno atmosféricas, mostrado pela Figura 19, tem-se a variação da concentração de TFN com o tempo em diferentes nós de observação.

Figura 19 - Variação da concentração de TFN com o tempo no solo arenoso nos nós de observação definidos para o Cenário 3



Fonte: Do autor (2021)

Conforme o esperado, foram observadas elevações de concentração nos momentos da aplicação do herbicida, sendo estas fracionadas em aproximadamente $0,3 \text{ mg cm}^{-3}$ no primeiro nó, por ser o nó mais próximo do gotejador. Somando com o fim das aplicações, uma concentração em torno de $0,6 \text{ mg cm}^{-3}$.

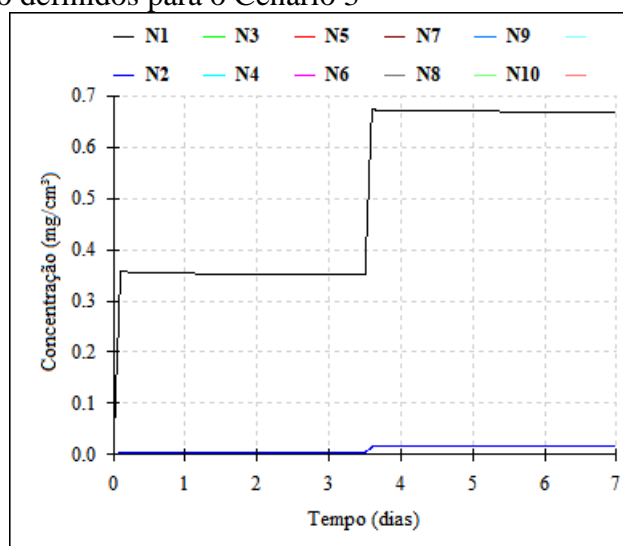
A aplicação da solução com concentração de $44,5 \text{ mg cm}^{-3}$ juntamente com aplicação de um fluxo de 60 cm dia^{-1} , fez com que fosse determinada, após a primeira aplicação, uma concentração de aproximadamente $0,3 \text{ mg cm}^{-3}$, baixa devido à diluição do produto no solo.

Ao analisar o gráfico é possível perceber que o segundo nó teve um comportamento de elevação de concentração semelhante, porém em valor absoluto menor, próximo de zero. Em outros pontos mais distantes não foi observada a presença do herbicida.

No ponto de vista da eficiência de prevenção a intrusão de raízes esse comportamento é favorável pois a cada aplicação uma parcela do herbicida é acumulado próximo a saída do emissor, não havendo deriva para outras regiões do solo, sendo assim não há contaminação ambiental e prejuízos a cultura.

Na Figura 20 é representado, para os nós de observação, a mudança de concentração de Trifluralina no decorrer do tempo em um solo argiloso, submetido à aplicação de solução por gotejamento subsuperficial duas vezes por semana.

Figura 20 - Variação da concentração de TFN com o tempo no solo argiloso nos nós de observação definidos para o Cenário 3



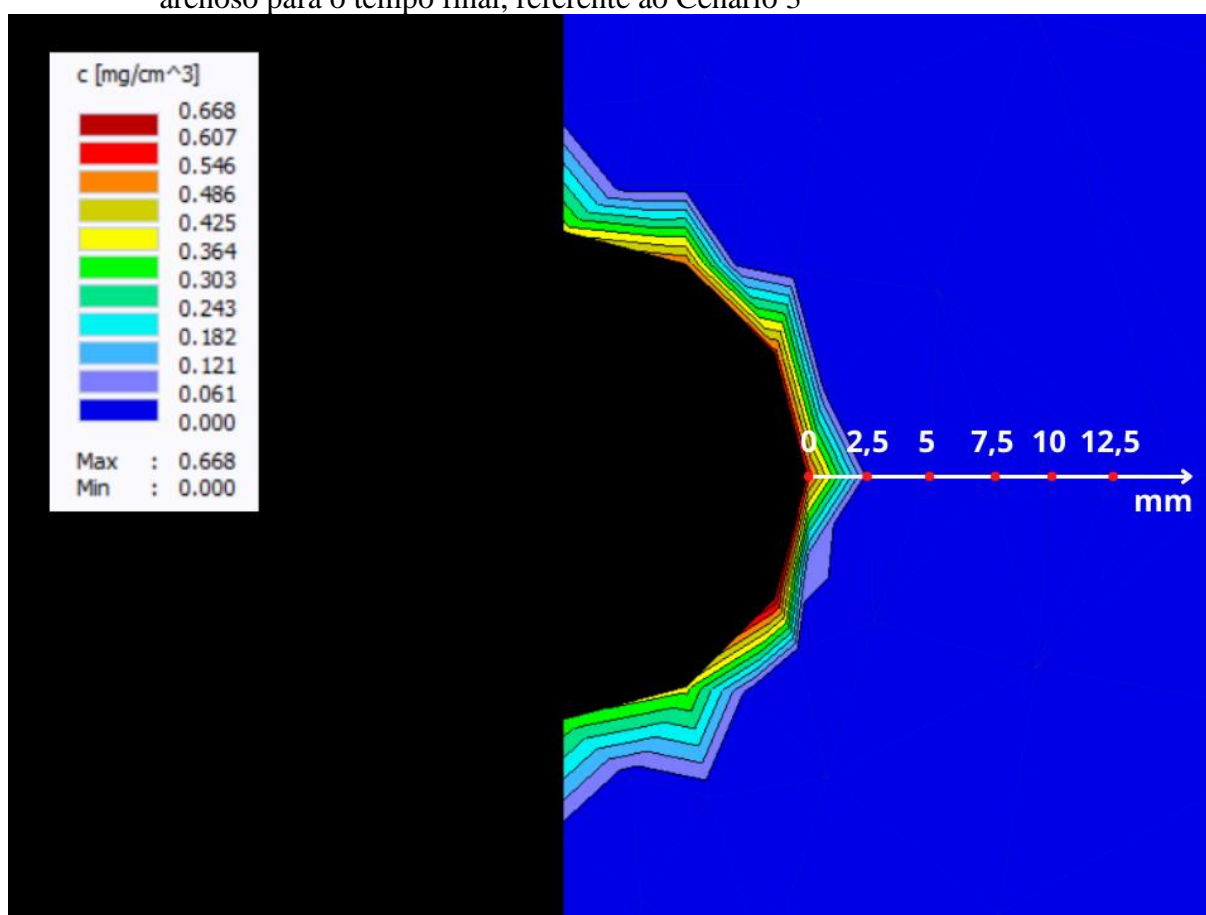
Fonte: Do autor (2021)

Para o solo argiloso, o comportamento da Trifluralina foi o mesmo e a diferença de concentração foi de aproximadamente $0,1 \text{ mg cm}^{-3}$ maior nos dois momentos de aplicação.

Assim como relatado por LIMA (2011), verificou-se que um solo com maior presença de argila tem maior capacidade de retenção desse herbicida.

A distribuição da TFN no perfil do solo no tempo final de aplicação encontra-se representada no gráfico da Figura 21.

Figura 21 - Representação gráfica da distribuição da concentração de TFN no perfil de solo arenoso para o tempo final, referente ao Cenário 3



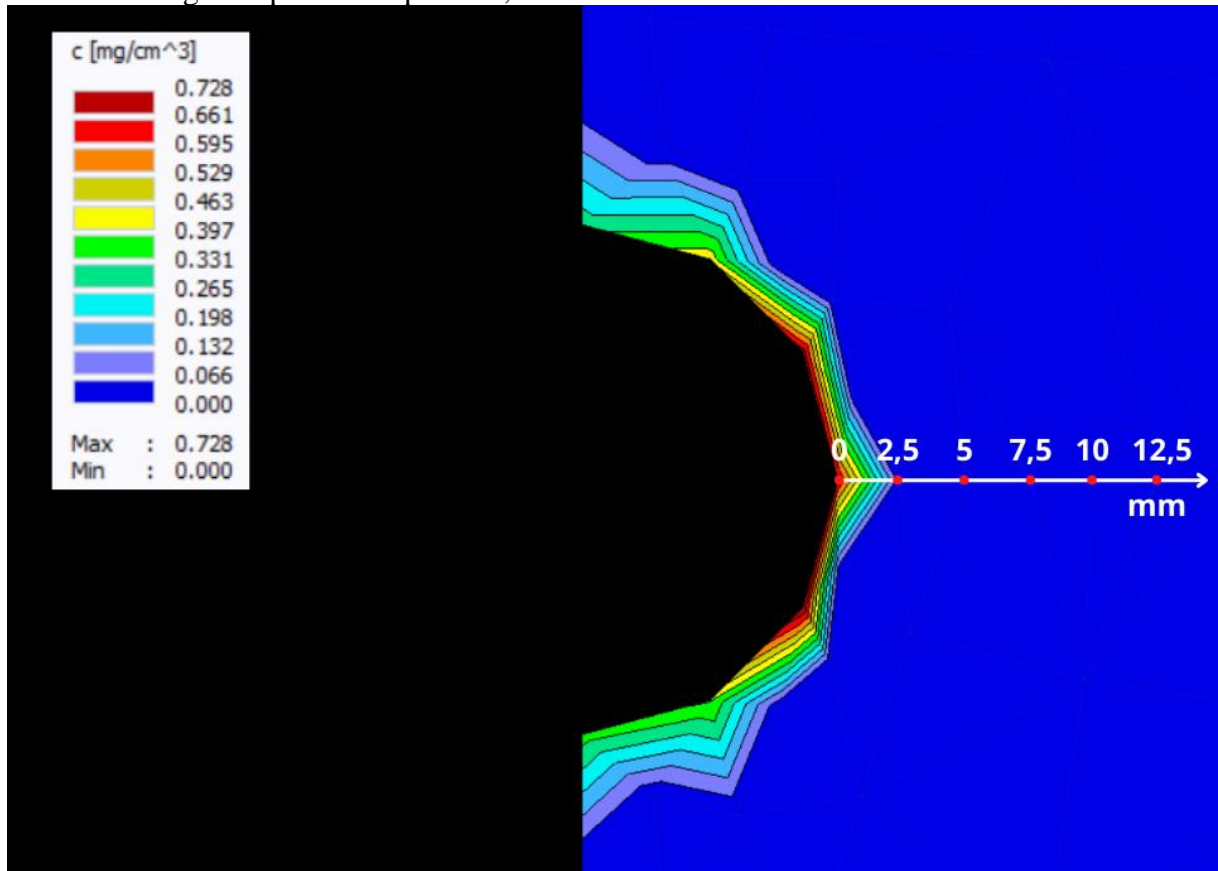
Fonte: Do autor (2021)

Na simulação não é possível notar concentrações além da distância de 2,5 mm fora do raio do gotejador, nem mesmo na região abaixo do gotejador isso aconteceu.

CRUCIANI et al. (1996) relata que mesmo na presença de fluxo de água, a TFN não tem um deslocamento considerável no perfil devido a sua baixa solubilidade e sua facilidade em ser adsorvida as partículas coloidais do solo.

A distribuição desse fitossanitário no perfil do solo no instante final do Cenário 3 solo argiloso, pode ser vista na Figura 22.

Figura 22 - Representação gráfica da distribuição da concentração de TFN no perfil de solo argiloso para o tempo final, referente ao Cenário 3



Fonte: Do autor (2021)

As regiões multicoloridas deste cenário podem ser consideradas semelhantes ao solo arenoso (Figura 21).

5. CONCLUSÃO

Os resultados encontrados para ambos os cenários mostraram que a Trifluralina possui a tendência de ficar alojada próxima ao local onde foi aplicada, mesmo em condições mais favoráveis como na presença de irrigação, que geram energia extra para a movimentação da solução no solo.

Nessas avaliações em diferentes solos e aspectos específicos de cada cenário, a Trifluralina mostrou-se ser um herbicida de baixo potencial de contaminação para culturas e principalmente reservas hídricas subterrâneas, tanto na aplicação superficial, quanto na subsuperficial por meio de gotejadores enterrados. Isso se dá ao fato de o fitossanitário apresentar propriedades físico-químicas que lhe conferem baixa mobilidade, como uma baixa solubilidade em meio aquoso e um alto coeficiente de partição fase sólida do solo-água (K_d), mesmo no solo arenoso, que possui baixa CTC.

Além dessas características usadas nas análises do software, foi possível notar através do estudo que o produto possui ainda outras propriedades que conferem a ele restrita mobilidade, como o valor elevado do coeficiente de partição no carbono orgânico (K_{oc}) e do coeficiente de partição octanol-água (K_{ow}) que são correspondentes ao poder de sorção do pesticida em matéria orgânica. O menor risco de poluição é justificado também em virtude da TFN ter alta persistência no solo, que faz com que não precise de constantes aplicações, e uma taxa de dessorção lenta, fazendo com que ela seja gradualmente liberada.

O uso do modelo computacional Hydrus 2D, teve coerência com os resultados de outros estudos citados nesse trabalho, indicando um bom potencial de uso e principalmente sendo útil para antecipar um comportamento de movimentação. Porém, é importante que sejam realizados trabalhos futuros que possam comparar as simulações feitas por meio do software com dados observados de experimentação, a fim de verificar a adequabilidade do modelo na simulação do movimento deste e outros herbicidas, além de contaminantes diversos no solo.

REFERÊNCIAS

- ALCÂNTARA, Dhara Vieira; **Estudo sobre adsorção não linear em solos lateríticos**. 2018. 79f. (Monografia de Projeto Final) – Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2018.
- ALCÂNTARA, M.A.K.; CAMARGO, O.A. Fator de retardamento e coeficiente de dispersão-difusão para crômio (III) em solos muito intemperizados, influenciados pelo pH, textura e matéria orgânica. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**. Viçosa-MG, vol. 25, núm. 1, p. 209-216. 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000100022>. Acesso em: 27 jul. 2020.
- ALMEIDA, Mario Sergio de Souza; **Estudo da resistência ao cisalhamento de um solo não saturado quando percolado por fluidos de diferentes constantes dielétricas**. 2016. 230f. Tese (Doutorado em Ciências, Energia e Ambiente) - Universidade Federal da Bahia, Bahia-BA, 2016.
- ARRUDA, Luiz Eduardo Vieira de; **Simulação pelo modelo Hydrus 2d da dinâmica de água e transporte de potássio em um cambissolo do semiárido potiguar**. 2018. 144f. Tese (Doutorado em manejo de solo e água) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró-RN, 2018.
- BUSKE, Taise Cristine; **Comportamento da umidade do solo determinada por métodos expeditos**. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria – RS. 2013.
- BEUTLER et al.; Retenção de água em dois tipos latossolos sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Jaboticabal-SP, vol. 26, p.829-834, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000300029>. Acesso em: 27 jul. 2020.
- CARDUCCI, C. A. et al.; Modelagem da curva de retenção de água de Latossolos utilizando a equação duplo van Genuchten. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**. vol. 35, p.77-86, 2011.
- CHAVES, H. M. L. et al.; Acurácia do modelo hydrus na predição da lixiviação de nitrato resultante da aplicação de lodo de esgoto tratado a solos de diferentes texturas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre-RS, v. 21, n. 1, p. 99-104, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.21168/rbrh.v21n1.p99-104>. Acesso em: 27 jul. 2020.

CHRISTOFFOLETI, P. J.; OVEJERO, R. F. L. **Comportamento dos herbicidas aplicados ao solo na cultura da cana-de-açúcar**. Piracicaba: CP 2, 2008.

COTE, C. M. et al. Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation. **Irrigation Science**, New York, v.22, n. 3/4, p.143-156, 2003.

CRUCIANI, D. E.; Comportamento de herbicida em solo de várzea com drenagem subterrânea. **Scientia agrícola**, Piracicaba -SP. v.53, n.2-3 p.316-323, 1996. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-90161996000200021>. Acesso em: 27 jul. 2020.

CRUZ, A. C. R. et al. Balanço de água no volume de solo explorado pelo sistema radicular de uma planta de citros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, vol. 29, núm. 1, p. 1-10. 2005.

DALRI A. B. et al.; O uso da Trifluralina no controle de intrusão radicular em gotejadores enterrados sob a cultura da cana-de-açúcar. **Irriga**, Botucatu-SP. n.1, p.82-91, 2015.

DIAS, A.S.; SOARES, W.A. Desempenho do modelo Hydrus-1D utilizando diferentes formas de caracterização hidrodinâmica. **Holos Environment**, Recife-PE, vol. 19, n.3, p.376-390, 2019.

FAGUNDES, E. A. A. et al.; Determinação da infiltração e velocidade de infiltração de água pelo método de infiltrômetro de anel em solo de cerrado no município de Rondonópolis-MT. **Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer**. Goiânia, v.8, N.14; p. 2012.

FARIA, Autieres Teixeira; **Sorção, dessorção, meia-vida e lixiviação do Tembotrione em solos com diferentes atributos**. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa -MG. 2016.

FARIA, Fábio Henrique de Souza; **Sorção e mobilidade da Trifluralina em dois solos do norte de Minas Gerais**. 2011. 174f. Tese (Doutorado em Engenharia de Água e Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG, 2011.

FAVERO, J. L.; MUNIZ, A. R.; SANTOS, R. P. B. Análise teórico experimental da dispersão de poluentes líquidos em solos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Caxias do Sul - RS, vol.12, n. 4, p.410-416, 2007.

FELTRIN, R. M.; PAIVA, J. B. D. de.; PAIVA, E. M. C. D. de. Dinâmica da água no solo simulada pelo modelo Hydrus-1D e medida a campo para as condições climáticas do sul do Brasil. Santa Maria-RS, 2013.

FERNANDES, Thaís Cristina Casimiro; **Investigação dos efeitos tóxicos, mutagenicos e genotóxicos do herbicida trifluralina, utilizando *Allium cepa* e *Oreochromis niloticus* como sistemas testes.** 2005. 211f. Tese (Mestrado em Ciências Biológicas) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro-SP, 2005.

FERRI, M. V. W. et al.; Atividade dos herbicidas Flumetsulam e Trifluralin em diferentes valores de pH e densidade do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria-RS, v. 30, n. 1, p. 11-15, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782000000100002>. Acesso em: 27 jul. 2020.

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Determinação do risco de contaminação das águas subterrâneas:** um método baseado em dados existentes. Boletim n.10. Instituto Geológico, São Paulo - SP, 1993.

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

KLEIN V.A. et al.; Textura do solo e a estimativa do teor de água no ponto de murcha permanente com psicrômetro. **Ciência Rural**, Santa Maria - RS, vol. 40, p. 1550-1556, núm. 7, 2010.

KNOP, Alexandre; **Estudo do comportamento de *liners* atacados por ácido sulfúrico.** 2007. 256f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil, Geotecnia e Meio Ambiente) – Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, Porto Alegre-RS, 2007.

LIMA, P. L. T.; **Aplicação de Trifluralina no controle da intrusão radicular de tubogotejadores enterrados sob lavoura cafeeira.** 2011. 58 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.

LIMA, P. L. T. et al.; Trifluralin leaching in soils cultivated with sugarcane irrigated by subsurface drip system. **Irriga**, Botucatu, v.17, n.1, p. 39-45, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.15809/irriga.2012v17n1p39>. Acesso em: 27 jul. 2020.

LIMA P. L. T. et al.; Doses e frequência de Trifluralina como inibidor de intrusão radicular no gotejamento enterrado em lavoura cafeeira. **Irriga**, Botucatu-SP. vol. 19, n.1, p.25-34, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.15809/irriga.2014v19n1p25>. Acesso em: 27 jul. 2020.

LORENZON, Juliano. et al.; Ação do herbicida Trifluralin na germinação e no desenvolvimento inicial de milho, sorgo e milheto. **Evidência**, Joaçaba-SC, vol.16, n.1, p.19-30, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.18593/eba.v16i1.8910>. Acesso em: 27 jul. 2020.

MACEDO, Letícia dos Santos; **Caracterização geoambiental e avaliação dos parâmetros que influenciam na mobilidade do HCH no meio poroso**. 2014. 169f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 2014.

MARCHI, G.; MARCHI, E. C. S; GUIMARÃES, T. G.; **Herbicidas: mecanismo de ação e uso**. 1ª ed. Planaltina-DF. Documento Embrapa Cerrados, 36f. 2008.

MARQUES, J. G. C.; **Proposições para o gerenciamento do uso de agrotóxicos utilizados na bacia hidrográfica do Natuba**. 2017. 126f. Dissertação (Mestrado - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia De Pernambuco. Recife-PE, 2017.

MELLO, B.A; CAIMI, L.L. Simulação na validação de sistemas computacionais para agricultura de precisão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande-PB, vol. 12, n.6, p.666-675, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662008000600015>. Acesso em: 27 jul. 2020.

MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O.; A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**. Santa Maria-RS. v.34, n.3, p.963-969, mai-jun, 2004.

MONQUEIRO P. A. et al.; Lixiviação de Saflufenacil e residual após períodos de seca. **Planta Daninha**. Viçosa-MG, vol. 30, n.2, p.415-423, 2012.

MOREIRA, C.A; AQUINO, W.F; DOURADO, J.C. Aplicação do método eletromagnético indutivo (em) no monitoramento de contaminantes em subsuperfície. **Revista Brasileira de Geofísica**. Rio Claro-SP, vol. 25, n.4, p.413-420, 2006.

MORILLO, J. G. et al. Diseño del pulso óptimo de Riego em el cultivo de fresa com el modelo numérico Hydrus 2D. CONGRESSO NACIONAL DE RIEGOS. 33.; 2015, Valencia – Espanha.

NASCENTES, Cleidimar Rejane; **Coefficiente de dispersão hidrodinâmica e fator de retardamento de metais pesados em solo residual compactado.** 2003. 131f. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2003.

OLIVEIRA, Ermelinda Maria Mota; **Fatores de retardamento e coeficientes de dispersão-difusão de fósforo, potássio e nitrogênio em cinco solos de Minas Gerais.** 2001. 67f. Tese (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2001.

OLIVEIRA, Jacqueline Barbosa de.; **Estudo paramétrico da contaminação no entorno de um Aterro Sanitário.** 2009. 85f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) – Universidade Federal da Bahia, Bahia-BA, 2009.

PANACHUKI, Elói. et al.; Perdas de solo e de água e infiltração de água em latossolo vermelho sob sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo.** Aquidauana-MS, vol. 35, p. 1777-1785, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000500032>. Acesso em: 27 jul. 2020.

PENA, M. F.; CRUZ, I.; VON SPERLING, E. Determinação residual de agrotóxico organofosforado em ambientes não alvo contaminados por exoderiva de quimigação. CONGRESSO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL,28.; 2002, Cancún – México.

PINHO, R. E. C de.; MIRANDA, J. H.; Avaliação do modelo Hydrus-1D na simulação do transporte de água e potássio em colunas preenchidas com solos tropicais. **Engenharia Agrícola.** Jaboticabal-SP, vol. 34, n.5, p.899-911, 2014.

PIRES, N.M. et al.; Adsorção e lixiviação de Trifluralin e Imazaquin em diferentes solos. **Revista Ceres.** Vol.44 (253). p. 300-314, 1997.

PORTO R. B. F. et al.; Eficácia do herbicida Trifluralina no controle de caruru-de-mancha (*Amaranthus viridis*,) na cultura do feijão. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia.** ISSN:1677-0293. n.28, 2015. Disponível em:

http://faef.revista.inf.br/imagens_arquivos/arquivos_destaque/tkTuVw3vNqCHL9p_2015-12-29-9-34-54.pdf. Acesso em: 27 jul 2020.

PRIMEL E. G. et al.; Poluição das águas por herbicidas utilizados no cultivo do arroz irrigado na região central do estado do Rio Grande do Sul, Brasil: Predição teórico e monitoramento. **Química Nova**, Rio Grande-RS, vol.28, n.4, p.605-609, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-40422005000400010>. Acesso em: 27 jul. 2020.

RAIMONDI, M. A. et al.; Atividade residual de herbicidas aplicados ao solo em relação ao controle de quatro espécies de *Amaranthus*. **Planta Daninha**, v.28, p.1073-1085, 2010.

REINERT, D. J.; REICHERT J. M.; **Propriedades físicas do solo**. Santa Maria- RS. Departamento de solos, UFSM. p 18. 2006.

RODRIGUES, A. M. G. et al. Uniformidade de distribuição de potássio sob diferentes taxas de injeção utilizando injetor venturi. INOVAGRI INTERNACIONAL MEETING, 4.; CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM, 26.; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SALINIDADE, 4.; 2017, [S.l.].

SÁ, N. S. A. de. et al. Comportamento da cultura do tomateiro sob diferentes tensões de água no solo em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande-PB, v.9, n.3, p.341-347, 2005. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/rbeaa/v9n3/v9n3a08.pdf>.

SANCHÉZ, Juan Fernando Díaz. **Modelagem multidimensional de transporte de contaminantes inorgânicos em solos tropicais lateríticos**. 2011. 250f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2011.

SANTOS, L. C. et al. Estudo comparativo da taxa de injeção em injetor do tipo venturi com e sem válvula de retenção. **Irriga**. Botucatu-SP, Edição Especial, p.145-154, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.15809/irriga.2012v1n01p145>. Acesso em: 27 jul. 2020.

SILVA JUNIOR, J.J. da. et al.; Determinação da condutividade hidráulica do solo utilizando o problema inverso do software Hydrus-1D. **Revista Agroambiente**. Boa Vista-RR, vol.7, n.3, p.242-251, 2013. Disponível em: <https://revista.ufr.br/agroambiente/article/view/1128/1179>. Acesso em: 27 jul. 2020.

SIMUNEK, J.; SEJNA, M.; GENUCHTEN, M. T. VAN. **HYDRUS-2D/MESHGEN-2D: Simulating water flow and solute transport in two-dimensional variably saturated media.** Golden: International Groundwater Modeling Centre, 1999.229 p.

ŠIMŮNEK, J.; VAN GENUCHTEN, M.T.; ŠEJNA, M. **Technical Manual Version 2.0: The Hydrus-2D software package for simulating water flow and solute transport in two dimensional variably saturated media, version 2.0, 2012.**

SOBRINHO et al. Infiltração de água no solo em sistemas de plantio direto e convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental.** Campina Grande-PB, v.7, n.2, p.191-196, 2003.

SOFIATTI, V. et al. **Pre and post emergence herbicides for weed control in castor crop.** Industrial Crops and Products. v. 37, p.235-237, 2012.

THEISEN, G.; VIDAL, R.A.; FLECK, N.G. Interação dos herbicidas Trifluralina e Flumetsulan com o pH do solo. **Pesticidas: Revista de Ecotoxicologia e Meio Ambiente.** Curitiba-PR, vol.8, p.67-76, 1998.

UNIVERSITY OF HERTFORDSHIRE. **PPDB: Pesticide Properties DataBase.** Disponível em: <https://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/en/>. Acesso em: 21 mar. 2019.

UNIVERSITY OF HERTFORDSHIRE. **PPDB: Pesticide Properties DataBase.** Disponível em: <http://sitem.herts.ac.uk/aeru/ppdb/en/Reports/667.htm>. Acesso em: 20 mar. 2020.

VAN GENUCHTEN, M. T.; WIERENGA, P. J. Solute dispersion coefficients and retardation factors. In: KLUTE, A. **Wisconsin: American Society of Agronomy. Soil Science Society of America: Methods of soil analysis: part 1 physical and mineralogical methods.** Madison, p.1025-1031. 1986.

VIANA P. A. et al. **Quimigação da cultura de milho.** (Embrapa Milho e Sorgo. Circular técnica, 18). Sete Lagoas-MG. Embrapa Milho e Sorgo. 2002.

VIEIRA, R. F.; SILVA, A. A. da. **Aplicação de defensivos via água de irrigação por aspersão.** VIEIRA, C.; PAULA JR., TJ; BORÉM, A. Feijão-aspectos gerais e cultura no Estado de Minas. Viçosa: UFV, 267-323, 1998.

