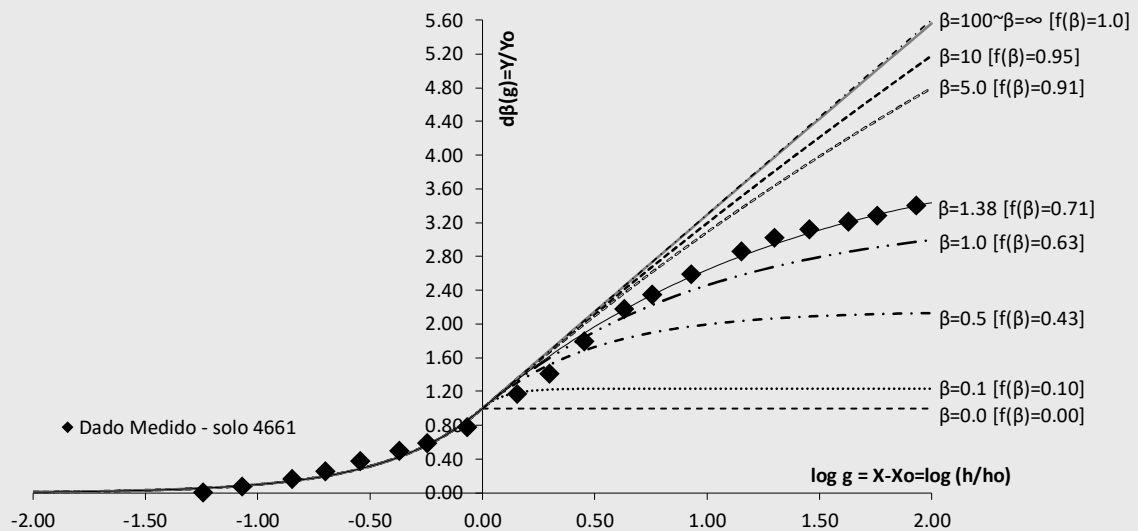


# Programa de Recursos Hídricos



## KUNSAT: Programa Computacional para Otimização dos Parâmetros da Curva de Condutividade Hidráulica Formulações Teóricas e Instruções de Uso

Dezembro, 2022

**MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA**

**Ministro de Estado**

Adolfo Sachsida

**Secretário de Geologia, Mineração e Transformação Mineral**

Lília Mascarenhas Sant Agostino

**SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM**

**DIRETORIA EXECUTIVA**

**Diretor-Presidente Interino**

Cassiano de Souza Alves

**Diretora de Hidrologia e Gestão Territorial**

Alice Silva de Castilho

**Diretor de Geologia e Recursos Minerais**

Marcio José Remédio

**Diretor de Infraestrutura Geocientífica**

Paulo Afonso Romano

**Diretor de Administração e Finanças**

Cassiano de Souza Alves

**COORDENAÇÃO TÉCNICA**

**Chefe do Departamento de Hidrologia**

Frederico Claudio Peixinho

**Chefe da Divisão de Hidrogeologia e Exploração**

João Alberto Diniz

**EQUIPE DE DESENVOLVIMENTO DO APLICATIVO**

Anderson Rodrigues Caetano

Marlon G. Lopes Alvarez

Marta Vasconcelos Ottoni

**MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA**  
**SECRETARIA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL**  
**SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM**  
DIRETORIA DE HIDROLOGIA E GESTÃO TERRITORIAL – DHT  
Departamento de Hidrologia  
Divisão de Hidrogeologia e Exploração

## **Programa de Recursos Hídricos**

AÇÃO LEVANTAMENTOS HIDROGEOLÓGICOS, ESTUDOS INTEGRADOS EM RECURSOS HÍDRICOS PARA  
GESTÃO E AMPLIAÇÃO DA OFERTA HÍDRICA

# **KUNSAT: Programa Computacional para Otimização dos Parâmetros da Curva de Condutividade Hidráulica Formulações Teóricas e Instruções de Uso**

### **AUTORES**

Marta Vasconcelos Ottoni  
Theophilo Benedicto Ottoni Filho

Rio de Janeiro  
Dezembro, 2022



## **REALIZAÇÃO**

Divisão de Hidrologia Exploratória

## **AUTORES**

Marta Vasconcelos Ottoni

Theophilo Benedicto Ottoni Filho

## **EQUIPE EXECUTORA**

Marta Vasconcelos Ottoni

Theophilo Benedicto Ottoni Filho

Anderson Rodrigues Caetano

Marlon G. Lopes Alvarez

## **NORMALIZAÇÃO BIBLIOGRÁFICA**

Gabriela Vieira Leitão

**FOTOS DA CAPA:** Foto extraídas da Figura 3 de Ottoni Filho *et al.* 2019.

### Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

O91k Ottoni, Marta Vasconcelos.  
KUNSAT: programa computacional para otimização dos parâmetros da curva de condutividade hidráulica: formulações teóricas e instruções de uso / Marta Vasconcelos Ottoni, Theophilo Benedicto Ottoni Filho. – Rio de Janeiro : Serviço Geológico do Brasil - CPRM, 2022.  
1 recurso eletrônico : PDF  
  
ISBN 978-65-5664-341-0  
  
Programa de Recursos Hídricos. Ação levantamentos hidrogeológicos, estudos integrados em recursos hídricos para gestão e ampliação da oferta hídrica.  
  
1. KUNSAT. 2. Condutividade hidráulica. 3. Solos. I. Ottoni Filho, Theophilo Benedicto. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Gabriela Vieira Leitão – CRB1 - 1995

Direitos desta edição: Serviço Geológico do Brasil – CPRM

Permitida a reprodução desta publicação desde que mencionada a fonte

Serviço Geológico do Brasil - CPRM

[www.cprm.gov.br](http://www.cprm.gov.br)

[seus@cprm.gov.br](mailto:seus@cprm.gov.br)

## RESUMO

---

Na ciência hidrológica dos solos é relevante a precisa representação matemática da curva de condutividade hidráulica relativa,  $K_r(h) = K(h)/K_s$ , onde  $h$  é a sucção e  $K_s$  é a condutividade hidráulica saturada do solo. O presente estudo apresentou uma expansão do modelo Dual de Gardner, designado como modelo GD (OTTONI FILHO *et al.*, 2019) de representação da curva  $K_r(h)$  e descreveu a aplicação do programa KUNSAT de otimização dos cinco parâmetros do modelo expandido, aqui designado como modelo Dual de Gardner Modificado, com a sigla MGD. O modelo MGD inclui em GD os relevantes efeitos decorrentes do fluxo rápido macroporoso junto à saturação, o que permite uma substancial melhoria na representação dos fluxos úmidos de baixa sucção da infiltração e drenagem nos terrenos. O código KUNSAT também avalia o desempenho do ajuste de MGD aos dados K-h da amostra do solo. KUNSAT foi testado com sucesso em 279 solos extraídos de três bases de dados. Em duas dessas bases (249 solos), o modelo MGD desse estudo mostrou-se em média ser 31% mais preciso que o popular modelo de Mualem-van Genuchten escrito na sua representação mais flexível.

## ABSTRACT

---

In the hydrological soil science, the precise mathematical representation of the relative hydraulic conductivity curve,  $K_r(h) = K(h)/K_s$ , where  $h$  is the suction and  $K_s$  is the saturated hydraulic conductivity of the soil, is relevant. The present study presents an expansion of Gardner's Dual model, designated as the GD model (OTTONI FILHO *et al.*, 2019) for representing the  $K_r(h)$  curve and described the application of the KUNSAT program for optimizing the five parameters of the expanded model, here designated as the Modified Dual Gardner model, with the acronym MGD. The MGD model includes in the GD model the relevant effects resulting from the fast macroporous flow close to saturation, which allows a substantial improvement in the representation of the low suction flows of infiltration and drainage in the soils. The KUNSAT code also evaluates the performance of the MGD to represent soil sample K-h data. KUNSAT was successfully tested on 279 soils extracted from three soil databases. In two of these databases (249 soils), the MGD model of this study proved to be on average 31% more accurate than the popular Mualem-van Genuchten model written in its most flexible representation.

## LISTA DE FIGURAS

---

Figura 1 - Exemplo típico [solo 4661 da base de dados UNSODA (Leij et al., 1996)] da representação bilogarítmica dos dados experimentais da curva $K_r(h)$ modelada pelo modelo GD. ....	12
Figura 2 – Janela principal do programa KUNSAT .....	15
Figura 3 – Planilhas de trabalho do KUNSAT (ksat é condutividade hidráulica saturada) .....	16
Figura 4 – Ativação do menu Desenvolvedor em Faixas de Opções da barra de ferramenta de planilhas do Microsoft Excel .....	16
Figura 5 – Execução do Programa KUNSAT .....	17
Figura 6 – Exemplos de entrada de dados de K-h em KUNSAT para a) uma única amostra de solo e para b) várias amostras de solo (ksat é condutividade hidráulica saturada). 18	
Figura 7 – Resultados apresentados nas planilhas de saída do arquivo KUNSAT_OUTPUT.xlsx do Programa KUNSAT .....	20
Figura 8 – Exemplo de mensagem de erro do Programa KUNSAT.....	20
Figura 9 – Planilha dos resultados do arquivo de saída Result_allsoils.xlsx .....	21
Figura 10 – Acesso aos módulos com as rotinas computacionais do Programa KUNSAT (ksat é condutividade hidráulica saturada). ....	22

## SUMÁRIO

---

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>MODELO DE GARDNER DUAL MODIFICADO (MGD)</b> .....	<b>10</b>
<b>2.1</b>	<b>Fundamentação teórica</b> .....	<b>10</b>
<b>2.2</b>	<b>Desenvolvimento do modelo MGD</b> .....	<b>13</b>
<b>2.3</b>	<b>Desempenho do modelo MGD</b> .....	<b>13</b>
<b>3</b>	<b>INSTRUÇÕES DE USO DO PROGRAMA KUNSAT</b> .....	<b>14</b>
<b>3.1</b>	<b>Execução do programa KUNSAT</b> .....	<b>14</b>
<b>3.2</b>	<b>Dados de entrada</b> .....	<b>17</b>
<b>3.3</b>	<b>Resultados gerados</b> .....	<b>18</b>
<b>3.4</b>	<b>Programa de otimização</b> .....	<b>21</b>
<b>3.5</b>	<b>Programa de otimização</b> .....	<b>21</b>
<b>3.6</b>	<b>Seleção dos dados de K-h para otimização dos parâmetros do modelo MGD</b>	<b>22</b>
<b>3.7</b>	<b>Tempo de execução e algumas recomendações</b> .....	<b>23</b>
<b>3.8</b>	<b>Teste do programa KUNSAT</b> .....	<b>23</b>
<b>3.9</b>	<b>Download KUNSAT</b> .....	<b>23</b>
<b>3.10</b>	<b>Contato para esclarecimento ou para notificação de erro</b> .....	<b>24</b>
<b>4</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>24</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>25</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Na modelagem matemática dos fluxos e transporte de massa na zona vadosa dos terrenos é fundamental a precisa determinação da curva de variação da condutividade hidráulica com a sucção,  $K(h)$ . Isso porque, pela Lei de Darcy, o fluxo é proporcional à condutividade hidráulica e porque também a condutividade hidráulica normalmente apresenta variação de várias ordens de grandeza com a variação da sucção e umidade do solo.

Em pesquisa recente desenvolvida pelo Departamento de Recursos Hídricos e Meio Ambiente da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) em parceria com o Departamento de Hidrologia do Serviço Geológico do Brasil (SGB) foi desenvolvido e avaliado um novo modelo de representação da curva de condutividade hidráulica relativa,  $K_r(h) = K(h)/K_s$ , assumindo-se conhecida a condutividade hidráulica saturada do solo ( $K_s$ ).

O novo modelo, com a notação MGD, é denominado Modelo Dual de Gardner Modificado. Ele se baseia no Modelo Dual de Gardner (modelo GD) de Ottoni Filho *et al.* (2019), que faz uma extensão logarítmica da clássica representação exponencial de Gardner, mas que aplica apenas na parcela de fluxo matricial do meio poroso. O novo modelo estende o modelo GD tornando-o aplicável também na parcela de fluxo macroporoso de baixas sucções, essa última tendo grande importância na representação dos fluxos úmidos de umedecimento e drenagem na zona vadosa (BEVEN; GERMANN, 2013; ZHANG *et al.*, 2018). Portanto, como os fluxos nos espaços macroporosos do solo são muito comuns e frequentemente preponderantes, espera-se que o modelo proposto contribua relevantemente na modelagem hidráulica e hidrológica dos terrenos.

Nesse sentido, as instituições parceiras, UFRJ e SGB, desenvolveram um código computacional, denominado KUNSAT, para realizar a otimização dos parâmetros do modelo MGD e calcular as estatísticas dos erros de ajuste em cada solo, relativamente a uma base de dados de K-h fornecida pelo usuário.

Neste documento é realizada uma breve descrição do modelo GD e os fundamentos que levaram a sua proposição e modificação para a versão MGD. Após isso, é então apresentado o programa KUNSAT e as instruções de uso.

## 2 MODELO DE GARDNER DUAL MODIFICADO (MGD)

### 2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Há um grande número de modelos para representação da curva de condutividade hidráulica relativa,  $K_r(h)$ , sendo possivelmente o de mais larga aplicação no cálculo de fluxos e transporte na zona vadosa (VERECKEN *et al.*, 2010), envolvendo faixas de sucções desde a saturação até o ponto de murcha ( $h = 15000$  cm), o modelo de Mualem-van Genuchten (MVG). Na sua forma mais flexível e precisa (VERECKEN *et al.*, 2010), o modelo MVG tem a seguinte representação:

$$K_r = K_{ro} S^L [1 - (1 - S^{n/(n-1)})^{(1-1/n)}]^2 \quad (1a)$$

$$S = S(h) = [1 + (\alpha h)^n]^{-(1-1/n)} \quad (1b)$$

$$S = [\theta(h) - \theta_r] / (\theta_s - \theta_r), \quad (1c)$$

onde  $S$  é a saturação efetiva,  $K_{ro}$  ( $0 < K_{ro} \leq 1$ ) e  $L$  (negativo, nulo ou positivo) são parâmetros adimensionais do solo de ajuste aos dados  $(h, K_r)$ , e  $\theta_s$ ,  $\theta_r$ ,  $n$  (os três adimensionais,  $n > 1$ ) e  $\alpha$  ( $\text{cm}^{-1}$ ) são parâmetros positivos do solo de ajuste aos dados de retenção de água em função da sucção -  $\theta(h)$  (a exceção é a umidade residual,  $\theta_r$ , que pode ser nula).

Outro modelo muito popular é o exponencial de Gardner, conforme eq.2, de grande simplicidade analítica e larga aplicação em fluxos de infiltração:

$$K_r(h) = e^{(-h/\lambda)}, \quad (2)$$

onde  $e$  é a constante de Neper e  $\lambda$  (cm), o comprimento capilar macroscópico (WHITE; SULLY, 1987), que é um parâmetro físico relacionado à sortividade do solo e condutividade hidráulica saturada ( $K_s$ ), de acordo com a teoria de infiltração (OTTONI FILHO *et al.*, 2019; VANDERVAERE, 2002; WHITE; SULLY, 1987).

A popularidade da eq.(2) se deve principalmente ao fato dela tornar possível a linearização da equação diferencial de Richards, tanto para fluxos permanentes e não permanentes (no último caso, com mais restrição) (ASSOULINE; OR, 2013; PHILIP, 1969; RUSSO, 1988; WARRICK, 1974). Isso possibilita a solução analítica de problemas envolvendo fluxos de infiltração, como, por exemplo, os que acontecem nos populares

infiltrômetros de anel e disco, bem como nos permeômetros (ANKENY *et al.*, 1991; REYNOLDS, 2008a, 2008b, 2008c; SMETTEM; CLOTHIER, 1989; WOODING, 1968), o que permite a determinação dos parâmetros hidrodinâmicos  $K_s$  e  $\lambda$  (eq.2), bem como de  $K(h)$  para os pequenos valores de  $h$  impostos nos infiltrômetros de disco.

A simplicidade da eq.(2) traz, entretanto, a desvantagem da sua faixa de aplicação ser restrita a intervalos de sucções próximas à saturação (COMMUNAR; FRIEDMAN, 2014; GARDNER, 1958; JARVIS; MESSING, 1995; LEIJ *et al.*, 1997). Ottoni Filho *et al.* (2019) confirmaram essa constatação da literatura ao averiguar que em 77 solos, a eq. (2) se aplicou adequadamente a partir da saturação, mas apenas em faixas de sucção que nunca superaram a sucção de 300 cm. Entretanto, essas faixas úmidas são as que mais influenciam os fluxos de infiltração, dando consistência à larga aplicabilidade da eq. (2) na infiltrometria e permeamtria.

Ottoni Filho *et al.* (2019), motivados em obter uma representação analítica simples para a depleção da curva de condutividade hidráulica em faixas mais largas de sucção, propuseram que, a partir de uma dada sucção  $h_o$ , denominada sucção de transição, a depleção exponencial da eq.(2) simplesmente mudasse de escala, passando da escala decimal para a logarítmica, tanto para  $K_r$  ( $K(h)/K_s$ ) como  $h$  (Figura 1). Isso constitui o fundamento do modelo Gardner Dual (GD) proposto por Ottoni Filho *et al.* (2019), correspondendo à seguinte extrapolação da equação exponencial de Gardner ( $\log = \log_{10}$ ):

$$K_r(h) = e^{(-h/\lambda)}, \quad h \leq h_o, \quad (3a)$$

$$\log K_r(h) = a + b e^{(-\log h/\beta)}, \quad h \geq h_o, \quad (3b)$$

onde  $\beta$  é um número positivo (adimensional), denominado coeficiente de depleção condutiva,  $a$  e  $b$  sendo constantes a serem determinadas de forma que  $K_r(h)$  seja contínua e suave em  $h_o$ .

O modelo GD foi testado por Ottoni Filho *et al.* (2019) em 153 solos da base de dados UNSODA (LEIJ *et al.*, 1996). Na metade deles (77), foi alta a qualidade de ajuste aos dados experimentais, similar à apresentada pela curva da Figura 1, com erro REMQ médio (REMQ - raiz quadrada do erro médio quadrático, em base logaritma) das amostras de 0.19, um resultado promissor (o mesmo erro médio foi de 0.52 para o

modelo Mualem-van Genhucten, eq.1). O decepcionante é que na outra metade das amostras (76 solos) houve uma triplicação dos erros de ajuste (REMQ médio de 0.57). Para justificar esse fato, os autores perceberam que no grupo de 76 amostras havia uma tendência dos dados experimentais da  $K_r(h)$  próximos à saturação não convergirem à origem dos eixos coordenados XY da Figura 1 (ou seja, para a saturação) assintoticamente ao eixo dos  $X = \log h$ .

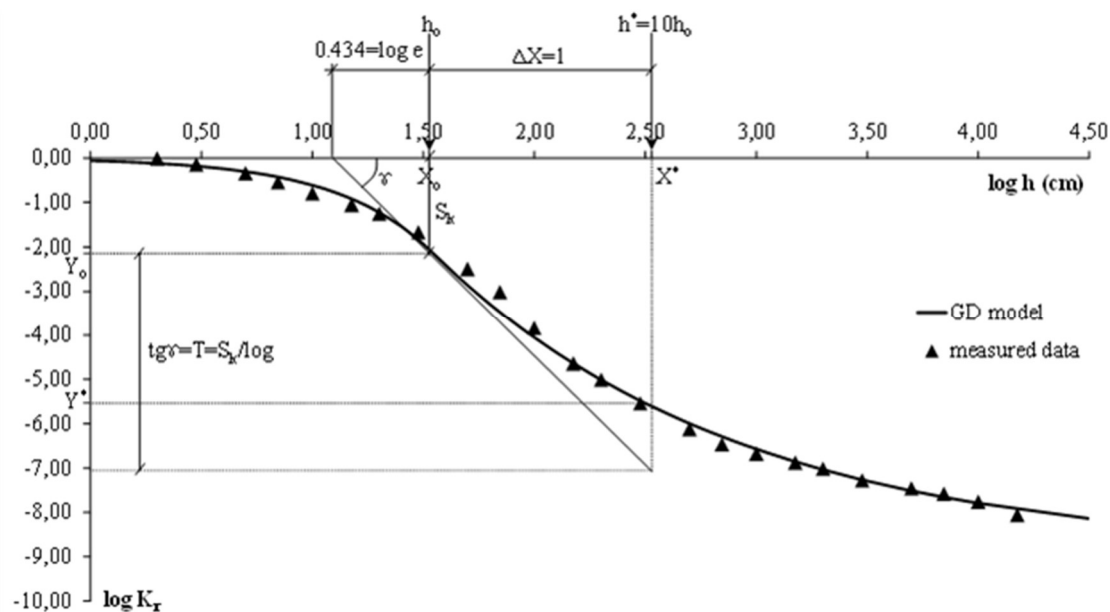


Figura 1 - Exemplo típico [solo 4661 da base de dados UNSODA (LEIJ *et al.*, 1996)] da representação bilogárptica dos dados experimentais da curva  $K_r(h)$  modelada pelo modelo GD. Nota-se claramente a tendência da inflexão dos dados no entorno da sucção  $h_0 = 35$  cm. Fonte: OTTONI FILHO *et al.* (2019).

Nos 76 solos de pior ajuste, pôde-se perceber com frequência uma tendência de depleção acentuada dos dados de  $K_r$  próximos à saturação, muitas vezes em mais de 2 ordens de grandeza num intervalo muito estreito de sucções (Fig. 7 de Ottoni Filho *et al.*, 2019), na faixa de 0-10 cm, o que é uma característica típica de solos que apresentam fluxos macroporosos (FM) (ou fluxos rápidos). Segundo Ottoni Filho *et al.* (2019), o fenômeno FM foi a causa principal da deteriorização da qualidade de ajuste do modelo GD.

Sendo assim, foi modificado o modelo GD de Ottoni Filho *et al.* (2019) para incorporar os efeitos de FM, tornando-o mais geral e preciso.

## 2.2 DESENVOLVIMENTO DO MODELO MGD

Baseado em Jarvis (2007), assumiu-se que quando os espaços da matriz porosa são suficientemente pequenos ( $h > 10$  cm) todo o fluxo é matricial, sendo irrelevante a contribuição dos espaços macroporosos. No caso de intervalo poroso muito úmido, com  $h \leq 10$  cm, o fluxo dual resultante, fluxo macroporoso combinado com fluxo matricial, foi modelado pela equação de potência de Jarvis (eq. 11 de Jarvis, 2008), que depende da sucção de entrada de ar ( $h_a$ ) do solo, o primeiro parâmetro do modelo MGD. O segundo parâmetro,  $M$ , denominado expoente de fluxo macroporoso, representa a relação:  $10^M = K_s/K_{sm}$ , onde  $K_{sm}$  é a condutividade hidráulica saturada de fluxo matricial ( $K_s > K_{sm}$ ). Quanto maior  $M$ , mais expressivo é o fluxo macroporoso. Os outros três parâmetros de MGD modelam a variação de  $K_r(h)$  quando  $h > 10$  cm, ou seja quando apenas o fluxo matricial for relevante. Esses parâmetros ( $h_o$ ,  $S_k$ ,  $\beta$ ) provêm do modelo GD e são relacionados ao ponto de inflexão principal da representação bilogarítmica de  $K_r(h)$ . O primeiro ( $h_o$ ) é a coordenada  $h$  da inflexão, denominado sucção de transição. O segundo ( $S_k$ ) é a coordenada  $\log K_r$  (em valor absoluto) da inflexão, diminuída do valor de  $M$ .  $S_k$  é denominado índice de depleção condutiva (quanto maior  $S_k$  mais depletiva é a curva). O terceiro parâmetro,  $f(\beta)$ , é a fração de linearização [ $f(\beta)$ ], um parâmetro de forma facilmente identificável da curva  $\log K_r(\log h)$  (quanto mais próximo de zero mais curvilínea é a curva na sua inflexão, quanto mais próximo de 1,0, mais retilínea) (vide figura da capa deste relatório). Portanto, o comportamento bilogarítmico de  $K_r(h)$  junto à sua inflexão principal define os três parâmetros de fluxo matricial da curva de condutividade hidráulica em MGD. Isso é vantajoso, tendo em vista a possibilidade de extrapolação da curva para valores de sucção superiores a sucção de transição,  $h_o$ .

## 2.3 DESEMPENHO DO MODELO MGD

O modelo MGD foi inicialmente avaliado em duas bases de dados, tendo como modelo de referência o modelo Mualem-van Genuchten (MVG) escrito da forma preconizada pela eq. 1, a forma mais flexível de otimização de MVG encontrada na literatura (VERECKEN *et al.*, 2010). As duas bases de dados foram o UNSODA (com 141 solos internacionais selecionados, SCHAAP *et al.*, 2000) e a base de dados Vereecken (com 108 solos belgas selecionados, Weynants *et al.*, 2009). Para 74% dos solos, com

amostras das duas bases de dados, MGD foi bem mais eficiente que o modelo de referência, pois, em média,  $REMQ_{MGD} = 0,19$  e  $REMQ_{MVG} = 0,40$ , uma redução de 53%. Nesse subconjunto de amostras, os dados experimentais também geralmente apresentaram boa aderência à curva otimizada por MGD ao longo de todo campo de sucções testado. Nos demais solos (26% do total) houve uma deteriorização da qualidade de ajuste de MGD, sendo ainda assim o modelo proposto mais eficiente que o modelo de referência na base UNSODA, mas menos eficiente na base Vereecken. Na totalidade dos solos das duas bases de dados os erros médios foram  $REMQ_{MGD} = 0,27$  e  $REMQ_{MVG} = 0,39$ .

Para informações mais detalhadas sobre a formulação analítica de MGD e seus resultados de desempenho aplicados às referidas bases de dados de solo, consultar o trabalho Ottoni Filho *et al.* (2022).

### **3 INSTRUÇÕES DE USO DO PROGRAMA KUNSAT**

O programa KUNSAT é uma rotina computacional desenvolvida em *visual basic* em interface com planilhas da Microsoft Excel. As instruções para execução desse programa, descritas na sua janela de execução, conforme Figura 2, estão em inglês, assim como os textos dos resultados nas planilhas de saída do programa. Isso foi feito para permitir maior abrangência de uso do programa. Toda documentação da programação do KUNSAT encontra-se na versão em português, mas pretende-se colocá-la, na versão em inglês, para ampliar edições futuras para uso de usuários externos internacionais.

#### **3.1 EXECUÇÃO DO PROGRAMA KUNSAT**

Para executar o programa KUNSAT basta clicar 2x no arquivo KUNSAT.xlsxm, o que abrirá uma janela, conforme apresentada na Figura 2:

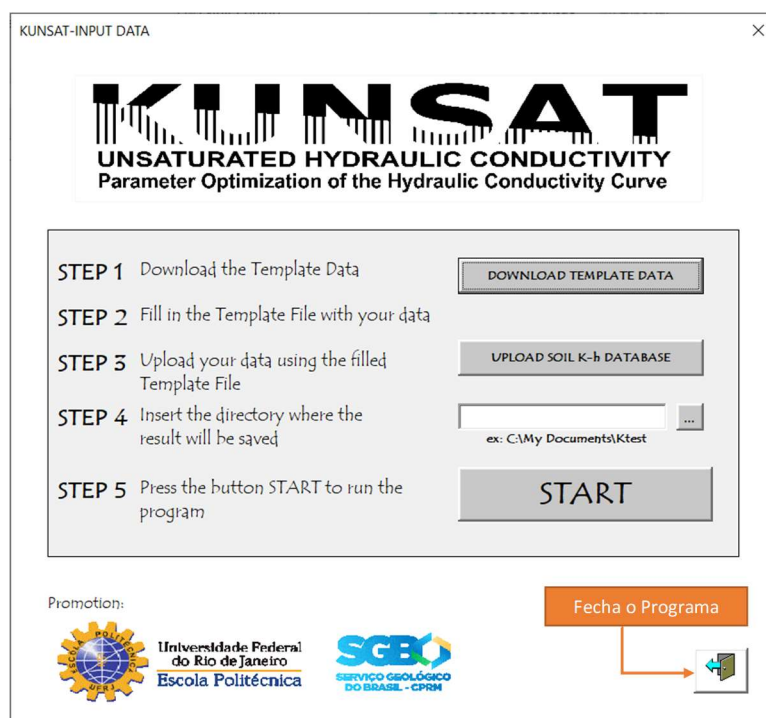


Figura 2 – Janela principal do programa KUNSAT

Os passos para execução do programa são descritos nessa janela.

Para sair do programa, clicar no botão que contém a figura de uma porta no canto inferior direito. Ativando esse botão, o programa KUNSAT será fechado.

Para os que tem familiaridade com *visual basic* e quiserem informar a base de dados de K-h diretamente na planilha do programa que recebe os dados de entrada do usuário, devem seguir os seguintes passos abaixo:

1 – Após abrir o arquivo KUNSAT.xlsx, aparecerá a janela principal do programa, conforme Figura 2. Caso isso não ocorra, habilitar o botão de macro que aparecerá no canto superior do arquivo aberto em Excel. Após isso, a janela principal de KUNSAT será ativada.

2 - Clicar no botão de fechar (X) no canto superior direito da janela da Figura 2. Essa ação fechará a janela principal do programa e habilitará suas planilhas de trabalho, conforme ilustradas na Figura 3;

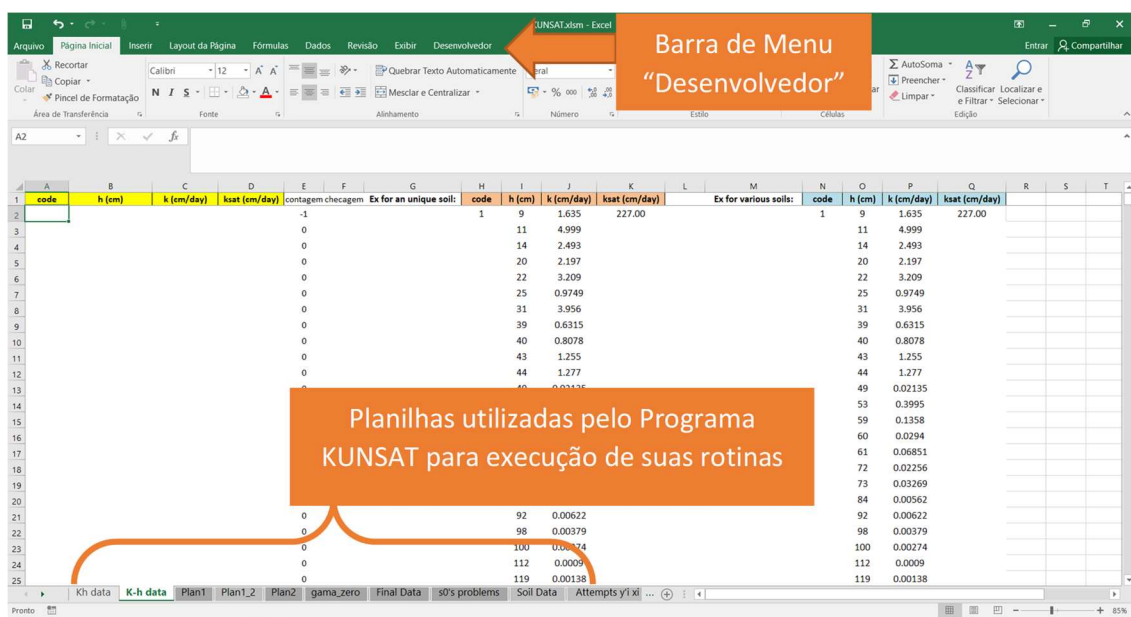


Figura 3 – Planilhas de trabalho do KUNSAT (ksat é condutividade hidráulica saturada)

3 – Se o menu Desenvolvedor da barra de ferramenta de planilhas da Microsoft Excel estiver habilitado, aparecerá uma janela similar à da Figura 3;

4 – Se o menu Desenvolvedor não estiver habilitado, clique com botão direito na barra de ferramenta da planilha Excel na opção Personalizar a Faixa de Opções; na janela ativa, clicar na opção Desenvolvedor como ilustrado na figura abaixo:

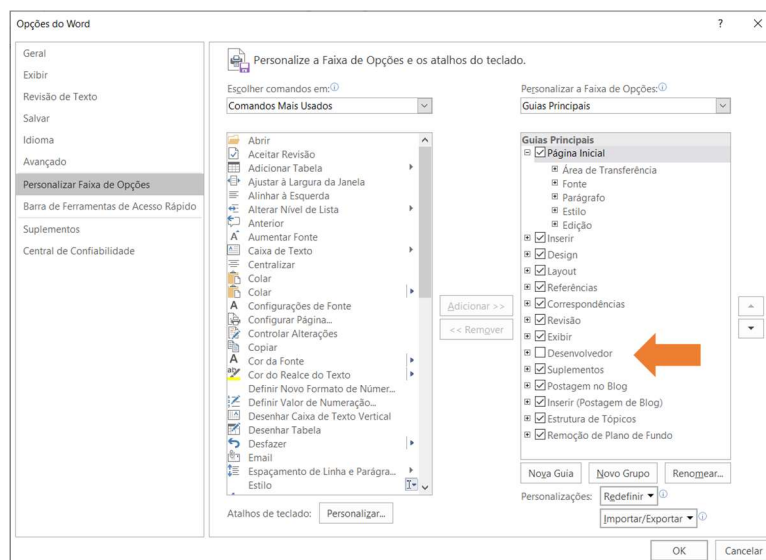



Figura 4 – Ativação do menu Desenvolvedor em Faixas de Opções da barra de ferramenta de planilhas do Microsoft Excel

5 – Para incluir os dados de K-h dos solos de interesse sem necessidade de importação dos dados pela janela principal do programa (STEPS 1 e 2 da Figura 2), basta



inserir os dados diretamente na planilha “K-h data”, seguindo o modelo de entrada de dados exibido nessa mesma planilha;

6 – Após a inclusão dos dados, ir no menu Desenvolvedor, clicar 2x no ícone *visual basic* e em seguida acesse a pasta Formulários. Clique 2x no formulário KUNSAT e a janela principal do programa ficará visível (Figura 5). Mandar executar o programa usando este botão  ;

7 – Execute apenas os STEPs 4 e 5

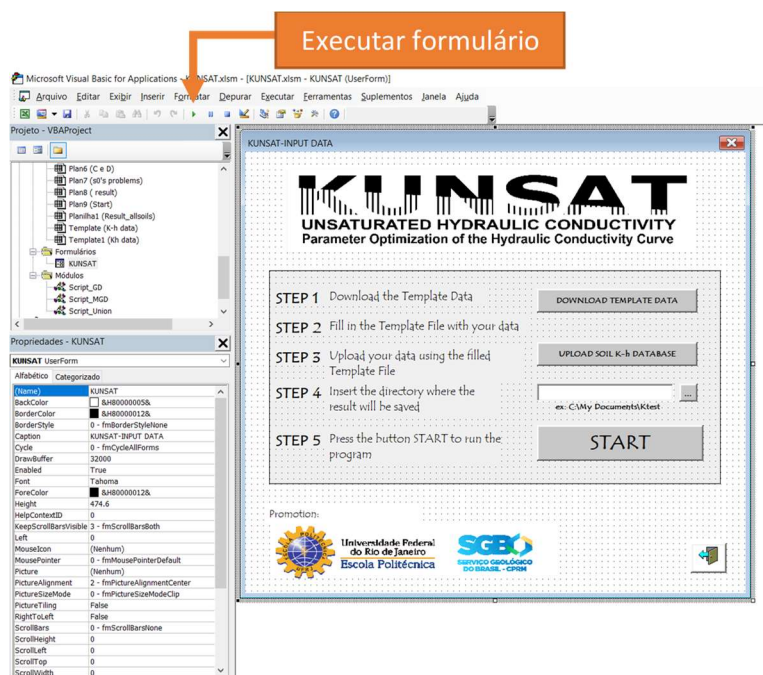


Figura 5 – Execução do Programa KUNSAT

### 3.2 DADOS DE ENTRADA

Os dados de entrada de K-h seguem um formato padrão, segundo exemplos apresentados na figura abaixo (Figura 6), considerando a entrada de apenas um único solo ou de vários ao mesmo tempo;

Os dados de K devem ser em cm/dia e a sucção h em cm. Deve ser incluído, obrigatoriamente, o dado de condutividade hidráulica saturada ( $K_s$ ) do solo

O código do solo deve ser sempre um valor numérico INTEIRO. Se o usuário informar o código como texto ou outra simbologia, o programa dará erro e não realizará a otimização dos parâmetros.

a) Exemplo de entrada de dado para um solo:				b) Exemplo de entrada de dado para mais de um solo:			
code	h (cm)	k (cm/day)	ksat (cm/day)	code	h (cm)	k (cm/day)	ksat (cm/day)
1	9	1.635	227.00	1	9	1.635	227.00
	11	4.999			11	4.999	
	14	2.493			14	2.493	
	20	2.197			20	2.197	
	22	3.209			22	3.209	
	25	0.9749			25	0.9749	
	31	3.956			31	3.956	
	39	0.6315			39	0.6315	
	40	0.8078			40	0.8078	
	43	1.255			43	1.255	
	44	1.277			44	1.277	
				2	14	0.08718	59.00
					18	0.0425	
					19	2.716	
					22	0.4211	
					30	0.1329	
					39	0.0576	
					45	0.2799	
					52	0.01462	
					54	0.07192	
					62	0.02441	
					71	0.02463	

Figura 6 – Exemplos de entrada de dados de K-h em KUNSAT para a) uma única amostra de solo e para b) várias amostras de solo (ksat é condutividade hidráulica saturada).

### 3.3 RESULTADOS GERADOS

Os resultados gerados pelo programa são os seguintes:

- a. **KUNSAT\_OUTPUT.xlsx** – Nesse arquivo encontram-se os resultados de ajuste do modelo MGD para os dados K-h de diferentes amostras de solos informados pelo usuário.

Nesse arquivo são apresentadas as seguintes informações:

1. os valores ajustados dos parâmetros do modelo MGD para a base de dados K-h e  $K_s$  informada pelo usuário;
2. os valores de RMSE (Root Mean Square Error) e ME (Mean Error, o erro médio) do ajuste (em base logaritimica). RMSE foi chamado anteriormente de REMQ que são as iniciais do texto em português de RMSE (raiz quadrada do erro médio quadrático). Daqui para frente usaremos a sigla RMSE para fazer referência a esse erro;
3. os erros médios ( $E_n$ ) para nove faixas de sucção ( $1 \leq n \leq 9$ ), conforme abaixo descritas, levando em conta que todos os erros são calculados para a variável log K:

Faixa de sucção (h)	En
$0 > h \geq 3.2$	E1
$3.2 > h \geq 10$	E2
$10 > h \geq 32$	E3
$32 > h \geq 100$	E4
$100 > h \geq 320$	E5
$320 > h \geq 1000$	E6
$1000 > h \geq 3200$	E7
$3200 > h \geq 10.000$	E8
$10.000 > h \geq 20.000$	E9

- Um gráfico com os pontos de observação de K-h e a curva ajustada;
- Os dados originais de K-h e os valores estimados segundo o modelo MGD para diferentes valores de sucção.
- Quando o programa KUNSAT não puder ser executado para um determinado solo, segundo os motivos apresentados na seção 3.5, a planilha de resultado do solo em questão conterá a mensagem de erro.

Na Figura 7 é ilustrado um exemplo dos resultados gerados de KUNSAT para um solo fictício nomeado 59. Na Figura 8 há uma ilustração de uma das mensagens de erro de um solo no qual não foi possível realizar a otimização dos parâmetros do modelo MGD.

No exemplo da Figura 7 são também ilustradas outras planilhas (ex: 79, 78...57), que referem-se aos resultados de ajustes do modelo MGD de outros solos de uma determinada base de dados K-h de entrada do Programa KUNSAT, utilizada como exemplo neste manual.

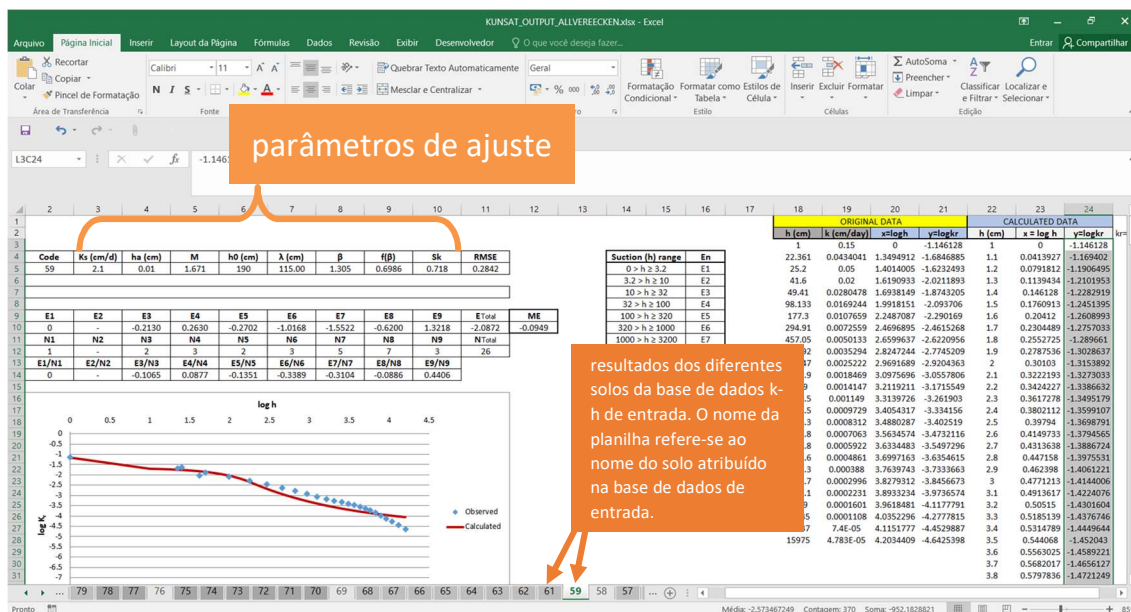


Figura 7 – Resultados apresentados nas planilhas de saída do arquivo KUNSAT\_OUTPUT.xlsx do Programa KUNSAT

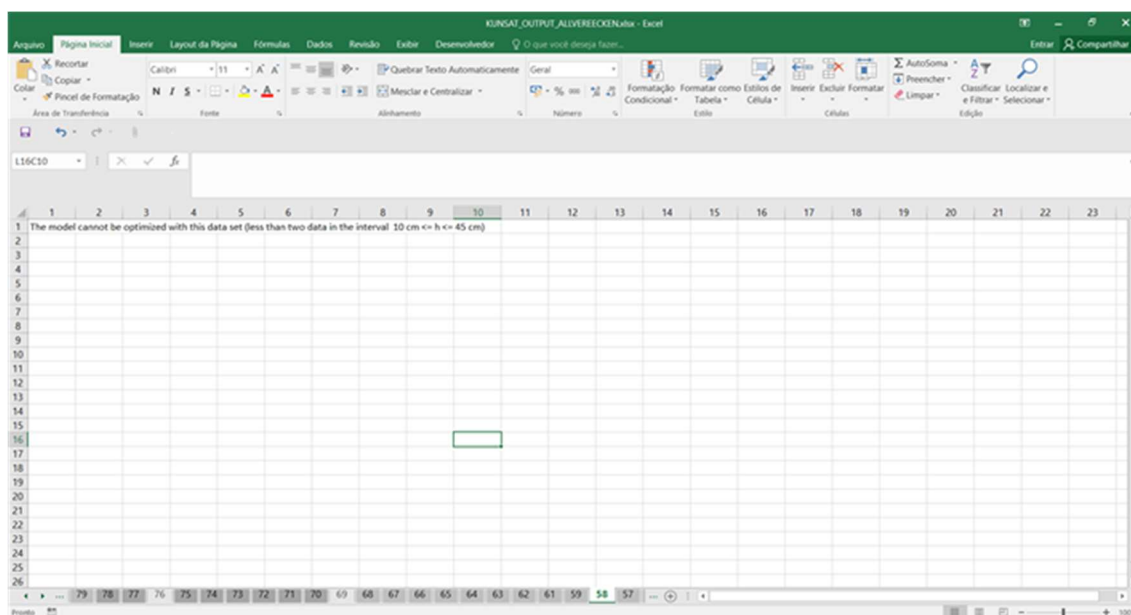


Figura 8 – Exemplo de mensagem de erro do Programa KUNSAT.

- b. **Result\_allsoils.xlsx** – Nesse arquivo concentram-se os mesmos resultados do arquivo anterior, com exceção dos gráficos e resultados da estimativa dos dados K-h, para todos os solos da base de dados de entrada (Figura 9) numa única planilha de saída de resultados.

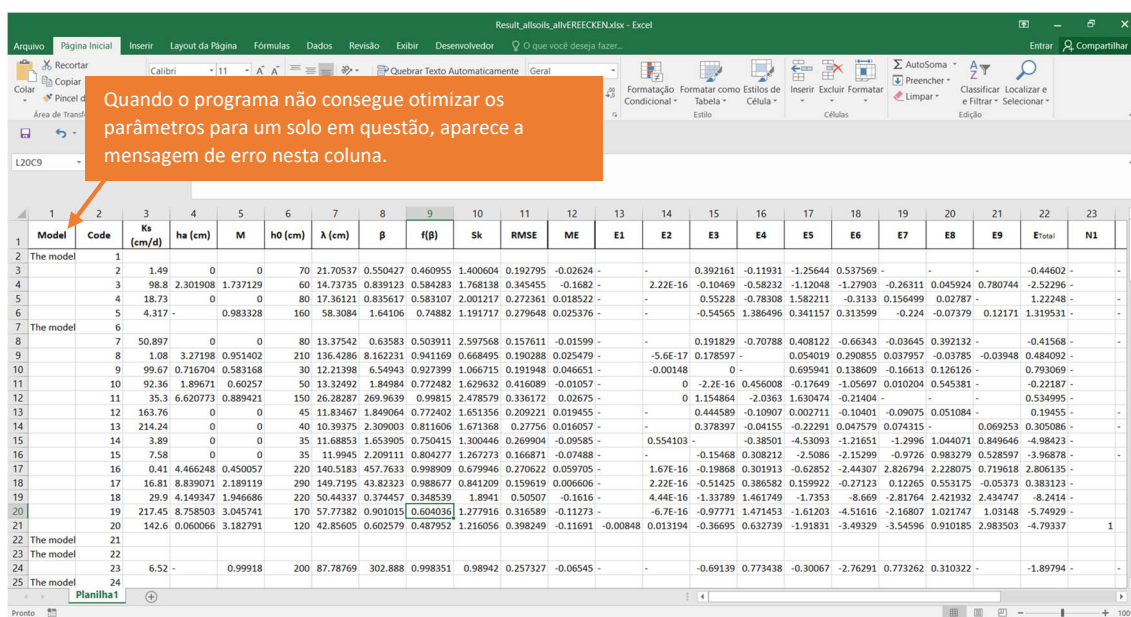


Figura 9 – Planilha dos resultados do arquivo de saída Result\_allsoils.xlsx

### 3.4 PROGRAMA DE OTIMIZAÇÃO

As linhas de comando do programa KUNSAT estão apresentadas em três módulos: **Script\_Union**, **Script\_GD**, **Script\_MGD** e podem ser acessadas na pasta Módulos da janela do *visual basic* ativada pelo acesso ao Menu Desenvolvedor da planilha da Microsoft Excel (Figura 10).

O programa principal encontra-se na sub-rotina **Programas\_Juncao** do módulo **Script\_Union**, a partir da qual outras sub-rotinas são chamadas, essas declaradas no próprio módulo **Script\_Union** ou nos outros dois módulos **Script\_GD** ou **Script\_MGD**.

O módulo **Script\_GD** contém as rotinas para otimização dos parâmetros do modelo quando o RMSE inicial do ajuste for menor que 0.32, nesse caso levando-se apenas em conta os efeitos do fluxo matricial. O módulo **Script\_MGD** leva em considerações outras rotinas de otimização quando o RMSE inicial for maior que 0.32, nesse caso considerando os efeitos dos fluxos no espaço macroporoso do solo.

### 3.5 PROGRAMA DE OTIMIZAÇÃO

O Modelo KUNSAT NÃO pode ser aplicado para as seguintes condições:

- O menor valor de h da base de dados K-h, em que  $K < K_s$ , for maior que 40 cm;
- O maior valor de h da base de dados K-h for menor ou igual a 100 cm;

- $K = K_s$  quando  $h \geq 10$  cm;
- Menos de dois dados de K-h no intervalo  $10 \text{ cm} \leq h \leq 45 \text{ cm}$
- Menos de quatro dados de K-h com  $h \geq 10$  cm

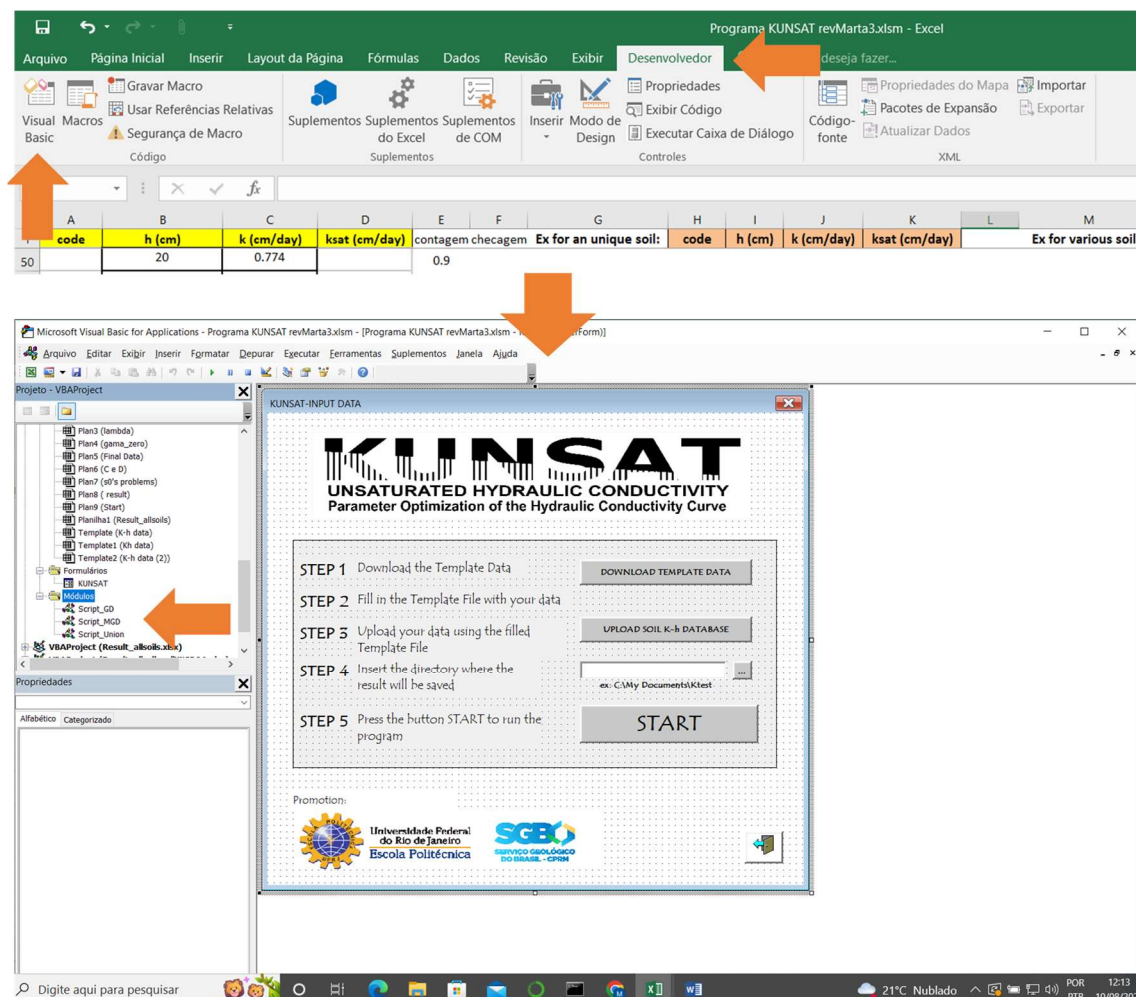


Figura 10 – Acesso aos módulos com as rotinas computacionais do Programa KUNSAT (ksat é condutividade hidráulica saturada).

### 3.6 SELEÇÃO DOS DADOS DE K-H PARA OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO MGD

Nem todos dados de K-h de um determinado solo são utilizados para otimização dos parâmetros do modelo MGD. A exclusão de alguns pares K-h é realizada para respeitar os pressupostos do algoritmo de otimização dos parâmetros. Seguem abaixo os casos de pares K h que não são utilizados pelo programa KUNSAT:

- $h < 1$  cm;
- $h > 20000$  cm;
- $K < 0$ ;

- $K > K_s$
- Par K-h que estiver em repetição;

Para os pares K-h em que h se repete para uma sequência de diferentes K, KUNSAT considera uma única realização de K-h tomando a média aritmética dos diferentes K.

### **3.7 TEMPO DE EXECUÇÃO E ALGUMAS RECOMENDAÇÕES**

O programa demanda normalmente de 1 min até 3 min para otimizar os parâmetros do Modelo MGD para apenas um solo, mas pode tomar até 8-10 min, caso os pares de entrada K-h fornecidos pelo usuário para um determinado solo for em número superior a 500.

Durante a execução do programa nenhuma planilha Excel poderá ser aberta ou manipulada. Assim, se o usuário quiser executar KUNSAT para um grande número de solos com vários pares de dados K-h, sugerimos deixar rodando o programa em outra máquina ou realizar a execução num período fora do expediente de trabalho. O programa pode tomar até 5h de execução para, por exemplo, 140 solos, numa média de 28 pares de dados K-h para cada solo.

### **3.8 TESTE DO PROGRAMA KUNSAT**

O programa KUNSAT foi inicialmente testado para duas bases de dados K-h [141 solos do UNSODA (LEIJ *et al.*, 1996), 108 solos do Vereecken (WEYNANTS *et al.*, 2009)], conforme especificado no item 2.3. Posteriormente foi feita outra aplicação envolvendo 30 solos da base de dados europeia HYPRES (WÖSTEN *et al.*, 1999). Em todos esses 279 casos o programa obteve êxito na otimização dos parâmetros de MGD desses solos.

### **3.9 DOWNLOAD KUNSAT**

O programa KUNSAT pode ser acessado por meio do link <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/23385>.



### 3.10 CONTATO PARA ESCLARECIMENTO OU PARA NOTIFICAÇÃO DE ERRO

Para maiores esclarecimentos sobre o programa e para notificação de qualquer erro que o usuário encontrar na execução de KUNSAT, entrar em contato com Marta Vasconcelos Ottoni por meio do email: [marta.ottoni@cprm.gov.br](mailto:marta.ottoni@cprm.gov.br).

## 4 CONCLUSÃO

O modelo Dual de Gardner (modelo GD) proposto por Ottoni Filho *et al.* (2019) para representação da curva de condutividade hidráulica relativa ( $K_r(h)$ ) foi aqui expandido para incluir os efeitos do fluxo macroporoso (FM) junto à saturação. Essa modificação de GD é muito necessária já que são comuns e relevantes na Natureza e nos estudos de engenharia os efeitos hidráulicos e hidrológicos decorrentes do umedecimento e drenagem dos solos que apresentam FM. O novo modelo recebeu a designação de modelo Dual de Gardner Modificado (modelo MGD) e partiu do pressuposto de que os efeitos FM só são relevantes na faixa  $h < 10$  cm, onde  $K_r(h)$  foi assumida como seguindo o modelo de Jarvis (2008). A partir de  $h > 10$  cm, se admitiu que apenas os efeitos de fluxo matricial preponderem e que  $K_r(h)$  deve seguir variando segundo o modelo GD.

Foi proposto um código computacional para otimização dos parâmetros de MGD, chamado KUNSAT, por meio da implementação de rotinas de *visual basic* em interface com planilhas da Microsoft Excel. Esse programa foi desenvolvido pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em parceria com o Serviço Geológico do Brasil e obteve êxito na otimização dos parâmetros de MGD para 279 solos de diferentes localidades do hemisfério norte do território mundial.

O Programa KUNSAT encontra-se disponível no link <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/23385>.



## REFERÊNCIAS

---

- ANKENY, M. D.; AHMED, M.; KASPAR, T. C., HORTON, R. Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity. **Soil Science Society America Journal**, v. 55, n. 2, p. 467-470, April 1991. DOI <https://doi.org/10.2136/sssaj1991.03615995005500020028x>. Disponível em: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaj1991.03615995005500020028x>. Acesso em: 26 dez. 2022.
- ASSOULINE, S.; OR, D. Conceptual and parametric representation of soil hydraulic properties: a review. **Vadose Zone Journal**, v. 12, n. 4, p. 1-20, Nov. 2013. DOI <https://doi.org/10.2136/vzj2013.07.0121>. Disponível em: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/vzj2013.07.0121>. Acesso em: 26 dez. 2022.
- BEVEN, K.; GERMANN, P. Macropores and water flow in soils revisited. **Water Resources Research**, v. 49, n. 6, p. 3071-3092, June 2013. DOI <https://doi.org/10.1002/wrcr.20156>. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/wrcr.20156>. Acesso em: 26 dez. 2022.
- COMMUNAR, G., FRIEDMAN, S. P. Determination of soil hydraulic parameters with cyclic irrigation tests. **Vadose Zone Journal**, v. 13, n. 4, p. 1-12, April 2014. DOI <https://doi.org/10.2136/vzj2013.09.0168>. Disponível em: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/vzj2013.09.0168>. Acesso em: 26 dez. 2023.
- GARDNER, W. R. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. **Soil Science**, v. 85, n. 4, p. 228-232, April 1958. DOI <https://doi.org/10.1097/00010694-195804000-00006>. Disponível em: [https://journals.lww.com/soilsci/Citation/1958/04000/SOME\\_STEADY\\_STATE\\_SOLUTIONS\\_OF\\_THE\\_UNSATURATED.6.aspx](https://journals.lww.com/soilsci/Citation/1958/04000/SOME_STEADY_STATE_SOLUTIONS_OF_THE_UNSATURATED.6.aspx). Acesso em: 26 dez. 2022.

JARVIS, N. J. Review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: principles, controlling factors and consequences for water quality.

**European Journal of Soil Science**, v. 58, n. 3, p. 523-546, June 2007. DOI

<https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2007.00915.x>. Disponível em:

<https://bsssjournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1365-2389.2007.00915.x>.

Acesso em: 26 dez. 2022.

JARVIS, N. J. Near-saturated hydraulic properties of macroporous soils. **Vadose Zone**

**Journal**, v. 7, n. 4, p. 1302-1310, Nov. 2008. DOI <https://doi.org/10.2136/vzj2008.0065>.

Disponível em: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2136/vzj2008.0065>.

Acesso em: 26 dez. 2022.

JARVIS, N. J.; MESSING, I. Near-saturated hydraulic conductivity in soils of contrasting texture as measured by tension infiltrometers. **Soil Science Society America Journal**, v. 59, n. 1, p. 27-34, p. 1995. DOI

<https://doi.org/10.2136/sssaj1995.03615995005900010004x>. Disponível em:

<https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaj1995.03615995005900010004x>. Acesso em: 26 dez. 2022.

LEIJ, F. J.; ALVES, W. J.; VAN GENUCHTEN, M. TH.; WILLIAMS, J. P. **The UNSODA unsaturated soil hydraulic database: user's manual: version 1.0**. Ohio: United States Environmental Protection Agency, 1996. EPA/600/R-96/095. Disponível em:

<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockey=30003HA3.txt>. Acesso em: 26 dez. 2022.

LEIJ, F. J.; RUSSEL, W. B.; LESCH, S. M. Closed-form expressions for water retention and conductivity data. **GroundWater**, v. 35, n. 5, p. 848-858, 1997. DOI

<https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1997.tb00153.x>. Disponível em:

[https://ngwa.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1745-6584.1997.tb00153.x?utm\\_cam=](https://ngwa.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1745-6584.1997.tb00153.x?utm_cam=). Acesso em: 26 dez. 2022.

OTTONI FILHO, T. B.; CAETANO, A. R.; OTTONI, M. V. 2022. Extension of the Gardner exponential equation to represent the hydraulic conductivity curve: Inclusion of macropore flow effects. 2022. No prelo.

OTTONI FILHO, T. B.; ALVAREZ, M. G. L.; OTTONI, M. V.; AMORIM, A. B. B. D. Extension of the Gardner exponential equation to represent the hydraulic conductivity curve. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**, v. 67, n. 4, p. 359-371, Nov. 2019. DOI <https://doi.org/10.2478/johh-2019-0015>. Disponível em: <https://sciendo.com/it/article/10.2478/johh-2019-0015>. Acesso em: 26 dez. 2022.

PHILIP J. R. Theory of infiltration. **Advances in Hydroscience**, v. 5, p. 215-296, 1969. DOI <https://doi.org/10.1016/B978-1-4831-9936-8.50010-6>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9781483199368500106>. Acesso em: 26 dez. 2022.

REYNOLDS, W.D. Saturated hydraulic properties: ring infiltrometer. *In*: CARTER, M. R.; GREGORICH, E. G. (ed.). **Soil sampling and methods of analysis**. 2nd. ed. Boca Raton: CRC Press, 2008a. p. 1043-1056.

REYNOLDS, W.D. Unsaturated hydraulic properties: field tension infiltrometer. *In*: CARTER, M. R.; GREGORICH, E. G. (ed.). **Soil sampling and methods of analysis**. 2nd. ed. Boca Raton: CRC Press, 2008b. p. 1107-1127.

REYNOLDS, W.D., 2008c. Saturated hydraulic properties: Well permeameter. *In*: CARTER, M. R.; GREGORICH, E. G. (ed.). **Soil sampling and methods of analysis**. 2nd. ed. Boca Raton: CRC Press, 2008c. p. 1025-1042.

RUSSO, D. Determining soil hydraulic properties by parameter estimation: On the selection of a model for the hydraulic properties. **Water Resources Research**, v. 24, n. 3, p. 453-459, Mar. 1988. DOI <https://doi.org/10.1029/WR024i003p00453>. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/WR024i003p00453>. Acesso em: 26 dez. 2022.

SCHAAP, M. G.; LEIJ, F. J. Improved prediction of unsaturated hydraulic conductivity with the Mualem-van Genuchten model. **Soil Science Society of America Journal**, v.

64, n. 3, p. 843-851, May 2000. DOI <https://doi.org/10.2136/sssaj2000.643843x>.

Disponível em:

<https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaj2000.643843x>. Acesso em: 27 dez. 2022.

SMETTEM, K.R. J.; CLOTHIER, B. E. Measuring unsaturated sorptivity and hydraulic conductivity using multiple disk permeameters. **European Journal of Soil Science**, v. 40, n. 3, p. 563-568, Sept. 1989. DOI <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1989.tb01297.x>. Disponível em:

<https://bsssajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2389.1989.tb01297.x>. Disponível em:

<https://bsssajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2389.1989.tb01297.x>. Acesso em: 27 dez. 2022.

VANDERVAERE, J.P., 2002. Unsaturated water transmission parameters obtained from infiltration: Three-dimensional infiltration using disk permeameters: Early-time observations. In: Dane, J.H., Topp, G.C. (Eds.): **Methods of Soil Analysis, Part 1, SSSA Book Ser. 4, Madison, WI.**

VERECKEN, H. J.; WEYNANTS, M.; JAVAUX, M.; PACHEPSKY, Y.; SHAAP, M. G.; VAN GENUCHTEN, M. Th. Using pedotransfer functions to estimate the van Genuchten-Mualem soil hydraulic properties: a review. **Vadose Zone Journal**, v. 9, n. 4, p. 1-26, Nov. 2010. DOI <https://doi.org/10.2136/vzj2010.0045>. Disponível em:

<https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2136/vzj2010.0045>. Acesso em: 27 dez. 2022.

WARRICK, A.W. Time-dependent linearized infiltration. I. Point sources. **Soil Science Society America Journal**, v. 38, n. 3, p. 383-386, May/June 1974. DOI

<https://doi.org/10.2136/sssaj1974.03615995003800030008x>. Disponível em:

<https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaj1974.03615995003800030008x>. Acesso em: 27 dez. 2022.

WEYNANTS, M.; VERECKEN, H. J.; JAVAUX, M. Revisiting Vereecken pedotransfer functions: introducing a closed-form hydraulic model. **Vadose Zone Journal**, v. 8, n. 1, p. 86-95, Feb. 2009. DOI <https://doi.org/10.2136/vzj2008.0062>. Disponível em:

<https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2136/vzj2008.0062>. Acesso em: 27 dez. 2022.

WHITE, I.; SULLY, M. J. Macroscopic and microscopic capillary length and time scales from field infiltration. **Water Resources Research**, v. 23, n. 8, p. 1514-1522, Aug. 1987. DOI <https://doi.org/10.1029/WR023i008p01514>. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/WR023i008p01514>. Acesso em: 27 dez. 2022.

WOODING, R. A. Steady infiltration from a shallow circular pond. **Water Resources Research**, v. 4, n. 6, p. 1259-1273, Dec. 1968. DOI <https://doi.org/10.1029/WR004i006p01259>. Acesso em: 27 dez. 2022.

WÖSTEN, J. H. M.; LILLY, A.; NEMES, A.; LE BAS, C. Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. **Geoderma**, v. 90, n. 3-4, p. 169-185, July 1999. DOI [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(98\)00132-3](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(98)00132-3). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706198001323>. Acesso em: 27 dez. 2022.

ZHANG, Y.; ZHANG, Z.; MA, Z.; CHEN, J.; AKBAR, J.; ZHANG, S.; CHE, C.; ZHANG, M.; CERDÀ, A. A review of preferential water flow in soil science. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 98, n. 4, p. 604-618, Dec. 2018. DOI <https://doi.org/10.1139/cjss-2018-0046>. Disponível em: <https://cdnsiencepub.com/doi/full/10.1139/cjss-2018-0046>. Acesso em: 27 dez. 2022.