



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE ENGENHARIA

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

# **SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO MUAGUIDE UTILIZANDO O MODELO SWAT (SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL)**

Autora: Naira Sancha Karyn Guissamulo

Supervisor: Doutor Nordino Martinho Muaievela

Maputo, Abril de 2022



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE ENGENHARIA

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA NA BACIA  
HIDROGRÁFICA DO RIO MUAGUIDE  
UTILIZANDO O MODELO SWAT (SOIL AND  
WATER ASSESSMENT TOOL)**

Autora: Naira Sancha Karyn Guissamulo

Supervisor: Doutor. Nordino Martinho Muaievela

Maputo, Abril de 2022



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

FACULDADE DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

TERMO DE ENTREGA DE RELATÓRIO DO TRABALHO DE LICENCIATURA

Declaro que o estudante Naira Sancha Karyn Guissamulo entregou no dia 25/04/2022 as 4 cópias do relatório do seu Trabalho de Licenciatura com a referência: \_\_\_\_\_ intitulado: Simulação Hidrológica Na Bacia Hidrográfica Do Rio Muaguide Utilizando O Modelo SWAT (Soil And Water Assessment Tool)

Maputo, 25 de Abril de 2022

O chefe da secretaria

---

## DEDICATÓRIA

“Aos meus pais Almeida Guissamulo e Suaiba Ussy Guissamulo que dedicaram parte de sua vida e esforço investindo na minha formação, ao meu melhor amigo por todo apoio dado durante a formação e a todos os professores que contribuíram para que eu chegasse à esta fase”.

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pela minha existência, força e saúde as quais foram essenciais para a realização desta obra.

Ao meu orientador Doutor Nordino Muaievela por aceitar conduzir o meu trabalho de pesquisa e por toda instrução necessária para o seu término.

A todos os professores que participaram da minha formação até ensino médio, vai o meu agradecimento pelo belo trabalho de formar simples seres humanos em grandes figuras da sociedade e por serem veículos de transmissão de conhecimentos para a sociedade.

Os meus agradecimentos se estendem aos meus professores universitários por toda exigência, persistência, conhecimento, disciplina e experiência que foram muito úteis para a realização deste trabalho, para minha capacitação profissional e formação acadêmica.

Aos meus queridos pais, por toda educação, rigidez ao impor disciplina, persistência perante minhas falhas, compreensão e respeito perante as minhas escolhas, pelo carinho, pelo amor, pela paciência, por todas lições de vida partilhados, pelo esforço e apoio em prol da minha formação.

Aos meus amigos, Horácio e Jorge pela ajuda e apoio perante minhas dificuldades durante a minha formação.

Aos colegas em geral, que partilharam conhecimentos ou material acadêmico que foram úteis à realização desta obra.

## ÍNDICE

<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	v
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	xi
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	xii
<b>RESUMO</b> .....	xiii
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1. Objectivos.....	2
1.2. Definição do Problema e Justificativa.....	2
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	3
2.1. Ciclo hidrológico .....	3
2.2. Bacia hidrográfica como elemento fundamental na avaliação de fenómenos hidrológicos .....	4
2.3. Modelos hidrológicos.....	4
2.4. Processos de calibração e validação de modelos hidrológicos.....	7
<b>3. CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO DE ESTUDO</b> .....	13
3.1. Localização .....	13
3.2. Modelo digital de elevação e hidrografia .....	14
3.3. Características meteorológicas e hidrométricas.....	15
3.4. Uso e ocupação do solo e tipos de solos .....	16
<b>4. METODOLOGIA</b> .....	18
4.1. Subdivisão da bacia hidrográfica.....	18
4.2. Base de dados .....	20
4.3. Unidades de resposta hidrológica (HRU's).....	21
4.4. Parâmetros de entrada para a simulação.....	23
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	24
5.1. Calibração .....	24

5.2.	Validação.....	27
5.3.	Simulação das variáveis hidrológicas.....	29
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>31</b>
<b>7.</b>	<b>RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>32</b>
<b>8.</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>33</b>
8.1.	Referências bibliográficas .....	33
8.2.	Bibliografia consultada .....	36
<b>9.</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>40</b>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\alpha_{gw}$	constante de recessão do escoamento de base (dias)
$\beta_{deep}$	Coeficiente de percolação da água para o aquífero confinado (adimensional)
$\beta_{rev}$	Coeficiente de ascensão da água à zona não saturada (adimensional)
$\delta_{gw}$	Tempo de atraso ou de drenagem das formações geológicas sobrepostas (dias)
$\Delta t$	Duração do intervalo de tempo (horas)
$\lambda$	Constante de proporcionalidade entre a abstração inicial e o parâmetro de retenção (adimensional)
$\phi_d$	Porosidade drenável do solo (adimensional)
ALPHA_BF	Constante de recessão do escoamento de base (dias)
ANSWERS	Areal Non-point Source Watershed Environment Response Simulation
aq <sub>dp</sub>	quantidade de água armazenada no aquífero confinado (mm)
aq <sub>sh</sub>	quantidade de água armazenada no aquífero freático (mm)
aqshthr,rvp	limite de nível de água do aquífero freático para ocorrência da ascensão de água à zona não saturada (mm)
ARS	Serviço de pesquisa agrícola do Texas
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer
BSVG	Barren or Sparsly Vegetated
CFSR	Climate forecast System Reanalysis
CN	Número de curva (adimensional)
CN1	Número de curva inicial para a condição de humidade I (adimensional)
CN2	Número de curva inicial para a condição de humidade II (adimensional)

CN3	Número de curva inicial para a condição de humidade III (adimensional)
CRDY	Dryland Cropland and Pasture
CRWO	Cropland/Woodland Mosaic
Crk	Volume total da rachadura para o perfil do solo (mm)
$crk_{ly=nn}$	Volume da rachadura para a camada mais profunda do solo (mm)
DEM	Modelo de elevação digital
$Depth_{ly=nn}$	Profundidade da camada de solo mais profunda (mm)
DNGRH	Direcção Nacional de Gestão de Recursos Hídricos
$E_0$	Evapotranspiração potencial (mm)
$E_a$	Evaporação Real (mm)
EPCO	Factor de compensação do consumo de água pelas plantas (adimensional)
EROS	Earth Resources observation and science
ESCO	Factor de compensação de evaporação de água do solo
EUA	Estados Unidos da América
FAO	Food and Agriculture Organization
$FC_{ly}$	humidade da camada do solo na capacidade de campo
$FC_{ly+1}$	humidade da camada do solo subjacente na capacidade de campo
FOBD	Deciduous Broadleaf Forest
FOEB	Evergreen Broadleaf Forest
FOMI	Mixed Forest
GIS	Geographic Information System
GW_DELAY	Intervalo de tempo para a recarga do aquífero (dias)
GW_RCHG	Recarga que entra no aquífero durante o intervalo de tempo (mm)

GW_REVAP	Coeficiente de ascensão da água à zona não saturada (adimensional)
GWQMN	Nível limite de água no aquífero raso para a ocorrência do fluxo de base (mm)
HRU	Unidade de Resposta hidrológica
HRU_SLP	Declividade média do HRU na subbacia (m/m)
I <sub>1</sub>	menor valor de entrada do parâmetro
I <sub>12</sub>	média dos valores de entrada do parâmetro
I <sub>2</sub>	maior valor de entrada do parâmetro
I <sub>a</sub>	Abstração inicial da precipitação (mm)
IGBP	International Geosphere Biosphere Programme
I-L-1b	Lithosols
IS	Índice de sensibilidade do modelo aos parâmetros de entrada
Ksat	Condutividade hidráulica saturada (mm/h)
Lf87-2-3b	Ferric Luvisols
Lhill	Comprimento da encosta (m)
MGB-IPH	Modelo Hidrológicos de Grandes bacias
NCEP	National Centers for Environment Prediction
NRCS	National Resource Conservation Service
NS	Coeficiente de Nash-Sutcliffe
OV_N	Coeficiente de Manning Strickler para o escoamento superficial (adimensional)
PBIAS	Erro do balanço de massas
Qgw	Fluxo de água subterrânea ou de base no canal principal (mm)

Qlat	Escoamento lateral (mm)
Qo	Caudal observado ou medido (m <sup>3</sup> /s)
Qs	Caudal simulado (m <sup>3</sup> /s)
Qsurf	Escoamento superficial directo (mm)
R <sub>1</sub>	Resultado obtido com o modelo para o menor valor de entrada
R <sub>12</sub>	Média dos resultados obtidos com o menor e o maior valor de entrada
R <sub>2</sub>	Resultado obtido com o modelo para o maior valor de entrada
R <sup>2</sup>	Coeficiente de determinação
RCHRG_DP	Coeficiente de percolação da água para o aquífero confinado (adimensional)
Rday	Precipitação diária (mm)
REVAP	Ascensão de água no aquífero à zona não saturada
REVAPMN	Profundidade limite da água no aquífero para ocorrência da ascensão da água à zona não saturada (mm)
RSR	Erro padrão relacionado ao desvio padrão dos dados observados
S	Parâmetro de retenção (mm)
SAC-SMA	Sacramento Soil Moisture Accounting
SAT <sub>ly+1</sub>	Quantidade de água na camada de solo subjacente quando completamente saturada (mm)
SAVA	Savanna
SCS	Soil Conservation Service
SHE	European Hydrological System
SHRB	Shrubland
SIG	Sistema de Informação Geográfica

Slp	Declividade media (adimensional)
SLSUBBSN	Comprimento médio da encosta (m)
SMAP	Soil Moisture Accounting Procedure
SOL_ACW	Armazenamento de água no solo (adimensional)
SOL_K	Condutividade hidráulica do solo saturado (mm/h)
SURLAG	Tempo de retardamento do escoamento superficial directo (dias)
SURQ	Escoamento superficial directo (mm)
SW <sub>0</sub>	Conteúdo inicial da água no solo diário (mm)
SW <sub>ly</sub>	Humidade da camada do solo (mm)
SW <sub>ly+1</sub>	Humidade da camada do solo subjacente (mm)
SW <sub>ly,excess</sub>	Volume de água drenável na camada do solo (mm)
SWAT	Soil and Water Assessment Tools
SWAT-CUP	SWAT Calibration and Uncertainty Programs
SWMM	Storm Water Management Model
SWt	Conteúdo final de água no solo (mm)
t	Unidade de tempo
TT <sub>perc</sub>	Tempo de duração da percolação (horas)
TOPMODEL	Topography-based hydrological System
TOPOG	Terrain Analysis Hydrologic Model
USBR	United States Bureau of Reclamation
USDA	United States Department of Agriculture
UTM	Universal Transverse Mercator
V1-3a	Vertisols

$W_{crk,btm}$	Quantidade de água que passou o limite inferior do perfil do solo devido ao fluxo de retorno (mm)
$W_{deep}$	Quantidade de água percolando do aquífero freático para o aquífero confinado (mm)
$W_{perc,ly}$	Quantidade de água que percola na camada do solo subjacente (mm)
$W_{pump,dp}$	Quantidade de água retirada do aquífero confinado por bombeamento profundo (mm)
$W_{pump,sh}$	Quantidade de água retirada do aquífero freático por bombeamento (mm)
$W_{rchrg}$	Recarga total que entra nos aquífero freático e confinado (mm)
$W_{rchrg,sh}$	Recarga que entra no aquífero freático (mm)
$W_{revap}$	Quantidade de água que ascende do aquífero freático à zona não saturada (mm)
$W_{revap,mx}$	Máxima quantidade de água do aquífero freático que penetrou na zona não saturada do solo (mm)
$W_{seep}$	Quantidade de água diária que entra na zona aeração a partir do perfil do solo (mm)
WATR	Water
WGEN	Weather Generation

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1. Esquemática do ciclo hidrológico. Fonte: (Frazão, 2017). .....	3
Figura 2-2. Corte transversal de uma bacia hidrográfica. Fonte: (Dias M. C., 2003). .	4
Figura 2-3. Classificação de modelos hidrológicos segundo Tucci (1998).....	5
Figura 3-1. Localização geográfica da bacia hidrográfica do Rio Muaguide.....	13
Figura 3-2. Modelo de elevação digital e hidrografia da bacia hidrográfica do Rio Muaguide.....	14
Figura 3-3. Disposição espacial das estações meteorológicas e hidrométricas. ....	16
Figura 3-4. Mapa de uso e ocupação do solo segundo EROS. ....	17
Figura 3-5. Mapa de solos classificado segundo FAO. ....	17
Figura 4-1. Subdivisão da bacia hidrográfica do rio Muaguide. ....	19
Figura 4-2. Procedimentos para a delimitação de bacias no modelo SWAT. ....	20
Figura 4-3. Processo de criação de HRU's no modelo. ....	22
Figura 5-1. Caudais da estação hidrométrica E-423 medidos e simulados. ....	26
Figura 5-2. Caudais da estação hidrométrica E-199 medidos e simulados. ....	28
Figura 5-3. Volumes médios anuais dos escoamentos superficiais directos das subbacias. ....	29
Figura 5-4. Volumes médios anuais dos escoamentos de base das subbacias. ....	30
Figura 5-5. Volumes médios anuais das recargas que entram nos aquíferos. ....	30
Figura 9-1. Distribuição vertical da água no solo e subsolo, mostrando as diversas zonas de umidade (modificado de Bear & Verruiojt, 1987, in Feitosa,2000). ....	45
Figura 9-2. Ilustração das diferentes componentes do escoamento subsuperficial.	45

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1. Parâmetros de maior influência em 64 estudos de bacias hidrográficas no SWAT. O número entre parentêses corresponde ao número de vezes que o parâmetro foi usado na calibração. fonte: (Arnold et al., 2012). .....	8
Tabela 2-2. Valores referências do critério de Nash-Sutcliffe. Fonte: (Molnar, 2011). .....	12
Tabela 4-1. Conversão classificação FAO em código SWAT. Soil_ID é a numeração dos solos no mapa. ....	21
Tabela 5-1. Valores obtidos para as funções objectivo no processo de calibração. ....	25
Tabela 5-2. Valores iniciais, finais e variação percentual dos parâmetros antes e após a calibração. ....	26
Tabela 5-3. Valores obtidos para as funções objectivo durante a validação.....	27
Tabela 9-1. Grupos hidrológicos e suas características. Adaptado do USBR (1977). .....	43
Tabela 9-2 – Descodificação dos acrónimos referentes ao uso e ocupação do solo da classificação IGBP Land cover. ....	51
Tabela 9-3. Características relativas a composição, textura e morfologia dos Vertisols de acordo com a FAO (2003). ....	51
Tabela 9-4. Características relativas a composição, textura e morfologia dos Lithosols de acordo com a FAO (2003). ....	52
Tabela 9-5. Características relativas a composição, textura e morfologia dos Ferric Luvisols de acordo com a FAO (2003). ....	53
Tabela 9-6. Propriedades das unidades de resposta hidrológica em cada subárea drenante. ....	58

## RESUMO

A simulação hidrológica surge da necessidade da compreensão dos fenómenos do ciclo hidrológico possibilitando a estimativa da disponibilidade hídrica assim como o impacto das alterações físiográficas e climáticas em bacias hidrográficas decorrentes de processos naturais ou desencadeados pela intervenção humana. A bacia hidrográfica do rio Muaguide alberga os territórios dos distritos de Pemba e Ancuabe e é de grande importância para a cidade de Pemba. O crescimento populacional e o desenvolvimento económico que ocorrem nessas regiões propiciam uma exploração crescente das reservas de água disponíveis, levando a necessidade de se estimar a disponibilidade hídrica. Porém, a fraca monitorização da bacia hidrográfica do rio Muaguide constitui uma barreira para esta estimativa. Neste contexto, objectivo do estudo centrou-se na simulação hidrológica na bacia hidrográfica do rio Muaguide utilizando o modelo SWAT visando a estimativa dos escoamentos superficial e subterrâneo. Os dados de entrada no modelo foram de uso e ocupação de solos da EROS, de tipo solos da FAO, elevação digital do terreno SRTM 90 e os dados das estações meteorológicas do CFRS, que permitiram a subdivisão da bacia hidrográfica em subáreas drenantes e unidades de resposta hidrológica assim como a simulação hidrológica. Para a calibração e validação do modelo foram utilizados dados referentes a escoamento superficial das estações hidrométricas E-423 e E-199 respectivamente e a avaliação foi feita mediante o uso de funções objectivo, nomeadamente, coeficiente de determinação ( $R^2$ ), erro padrão (RSR), Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) e Erro do balanço de massas (PBIAS). Os dados da estação hidrométrica E-423 cobrem o período entre 1982 a 1985 enquanto que os dados da estação hidrométrica E-199 cobrem o período entre os anos 1982 a 1987. Os valores das funções objectivos obtidos no processo de calibração e validação estão dentro de intervalos aceitáveis, portanto, considera-se a simulação como satisfatória. Com modelo SWAT validado, simulou-se o escoamento superficial directo, escoamento superficial base e a recarga total cujos os volumes em mm por unidade de área ao longo da bacia hidrográfica variam entre 31 a 78, 0 a 67 e 0 a 604 , respectivamente.

# 1. INTRODUÇÃO

A necessidade de compreender os fenómenos relacionados ao ciclo hidrológico levaram ao desenvolvimento de modelos hidrológicos. Modelos hidrológicos simulam as fases do ciclo hidrológico em uma bacia hidrográfica e constituem importante ferramenta para a análise do impacto das mudanças dos tipos de uso e de ocupação do solo nos escoamentos superficiais e subterrâneos (Pereira, 2013). Estes também podem ser utilizados para avaliar a disponibilidade de recursos hídricos em uma bacia para a satisfação de diferentes tipos de demandas.

Existem vários modelos hidrológicos tais como: SMAP, SWMM, SHE, TOPMODEL, MGB-IPH, SAC-SMA, ANSWERS, SWAT, entre outros. Dentre estes modelos destaca-se o modelo SWAT pela ampla utilização em todo o mundo (Gassmam et al., 2007).

O modelo hidrológico SWAT é gratuito e usa parâmetros físicos (tipo e uso do solo, cobertura vegetal, relevo da região em estudo, características hidro-meteorológicas, etc.) para a simulação das fases do ciclo hidrológico em bacias hidrográficas. Desde o seu desenvolvimento em 1998 (Arnold et al., 1998), o SWAT tem sido utilizado para simular o comportamento hidrológico de bacias hidrográficas em várias partes do mundo. Alguns desses trabalhos incluem o de Setegn et al (2008) que simularam o comportamento hidrológico na bacia do rio Tana, na Etiópia; Almeida et al (2018) que calibraram e validaram o modelo para a bacia do rio Mucuri, no Brasil e Cuceloglu et al (2017) que avaliaram a disponibilidade de recursos hídricos em Istambul, Turquia.

A bacia hidrográfica do rio Muaguide alberga os territórios dos distritos de Pemba e Ancuabe. O rio Muaguide é intermitente e os seus recursos hídricos são pouco monitorados, o que dificulta o planeamento para sua utilização nesses territórios a curto e médio prazo.

O presente trabalho simula as fases do ciclo hidrológico da bacia hidrográfica do rio Muaguide, dando ênfase aos escoamentos superficial e subterrâneo, recorrendo ao modelo SWAT. Desta forma, contribui-se para superar o défice de informações observadas com periodicidade adequada na análise da disponibilidade hídrica.

## **1.1. Objectivos**

### 1.1.1. Objectivo Geral

O presente trabalho tem como objectivo geral:

- Simular o escoamento subterrâneo e superficial na bacia hidrográfica do Rio Muaguide utilizando o Modelo SWAT para a estimativa da disponibilidade hídrica.

### 1.1.2. Objectivos específicos

- Definir as características fisiográficas da bacia hidrográfica do Rio Muaguide;
- Descrever as características hidro-meteorológicas da bacia hidrográfica do Rio Muaguide;
- Caracterizar o uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica do Rio Muaguide;
- Calibrar e validar o modelo de simulação hidrológica SWAT na bacia hidrográfica do rio Muaguide;
- Simular o escoamento superficial e subterrâneo na bacia hidrográfica do Rio Muaguide.

## **1.2. Definição do Problema e Justificativa**

A água é um recurso natural essencial à sobrevivência de todos os seres vivos e um elemento indispensável as actividades humanas. Portanto, os seres humanos, desde muito tempo sempre procuraram estar próximos das fontes água ou recorrer à diversos meios para transportá-la até aos locais de residência.

Nos últimos anos, a procura de água tem aumentado devido ao crescimento populacional e desenvolvimento económico, fomentando a exploração crescente das fontes de água superficiais. Este fenómeno, se pode observar na cidade de Pemba (cujas bacia hidrográfica mais próxima é a do Rio Muaguide), onde ambas as fontes de captação de água superficial e subterrânea estão em exploração.

Esse facto leva a seguinte questão: Como avaliar a disponibilidade de água para o suprimento das necessidades da população futura com ausência de séries históricas de caudais superficiais e subterrâneos?

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Ciclo hidrológico

Conforme Quintela (1996), o ciclo hidrológico é uma sequência fechada de fenômenos pelos quais a água passa no globo terrestre. Tais fenômenos podem ser observados na figura 2-1.

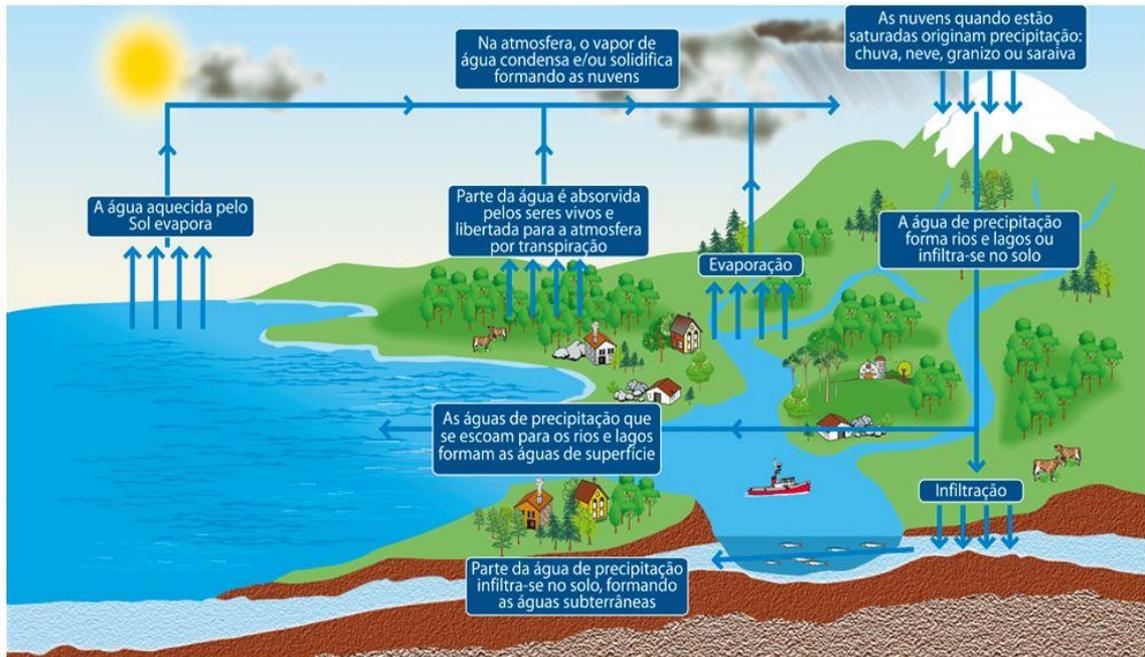


Figura 2-1. Esquemática do ciclo hidrológico. Fonte: (Frazão, 2017).

A energia necessária para a manutenção do ciclo hidrológico provém do sol. A água líquida é aquecida promovendo-se a sua evaporação para atmosfera. Sob certas condições o vapor de água na atmosfera condensa e ocorre a precipitação promovendo a volta da água a superfície da terra. Parte da água precipitada escoam superficialmente em direção ao oceano ou lagos e, outra parte infiltra no subsolo para formar água subterrânea que também pode escoar até atingir oceanos, lagos e rios. A energia solar também promove o movimento das massas de ar na atmosfera carregadas de vapor de um ponto para o outro.

## 2.2. Bacia hidrográfica como elemento fundamental na avaliação de fenômenos hidrológicos

Bacia hidrográfica de um rio é definida como um espaço limitado, perifericamente por pontos altos, tal que o escoamento superficial passa por única secção desse rio. A figura 2-2 mostra um corte transversal de uma bacia hidrográfica de um rio onde pode se observar os pontos altos.

Bacia hidrográfica de um rio é a unidade territorial para a gestão de recursos hídricos, porque, se regista a interação entre os recursos hídricos a montante e a jusante e não só, a representação do ciclo hidrológico mostra-se menos complexa quando se lida com bacias hidrográficas.

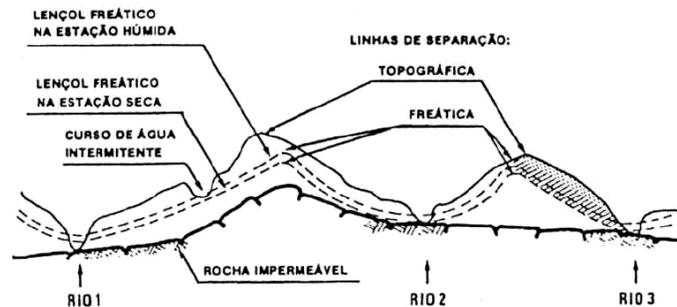


Figura 2-2. Corte transversal de uma bacia hidrográfica. Fonte: (Dias M. C., 2003).

## 2.3. Modelos hidrológicos

Modelos hidrológicos constituem a representação do ciclo hidrológico (precipitação, evaporação, infiltração e escoamentos superficial e subterrâneo) de uma região.

Modelos hidrológicos são utilizados para prever as consequências que ocorrem se registar-se alteração de algumas componentes do ciclo hidrológico nas restantes ou mesmo a quantificação de alguma componente quando todas as outras são conhecidas.

Devido a aspectos tais como a heterogeneidade física da bacia e dos processos envolvidos, têm sido desenvolvidos vários modelos hidrológicos. A diferença de tais

modelos está na discretização das propriedades que representam os fenômenos e os objetivos a serem alcançados (Souza L. R., 2012).

A figura 2-3 mostra a classificação dos modelos hidrológicos segundo Tucci (1998).

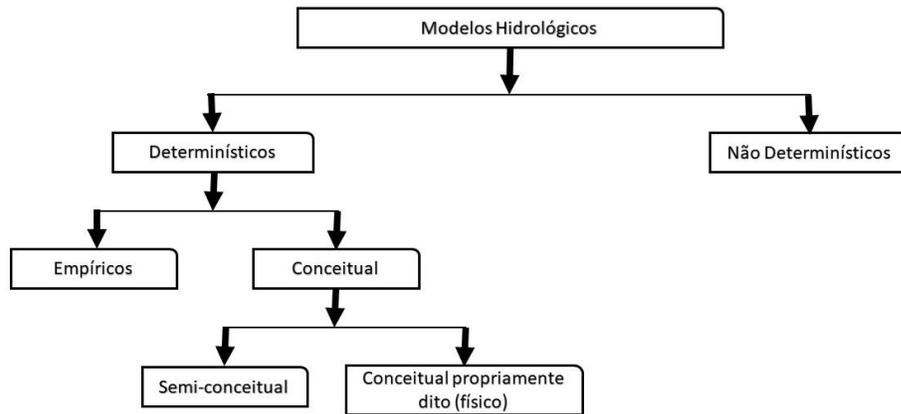


Figura 2-3. Classificação de modelos hidrológicos segundo Tucci (1998).

Os modelos não determinísticos são aqueles que consideram os conceitos de probabilidade na sua formulação (Rennó & Soares, 2000).

Os modelos empíricos usam relações entre as variáveis sem base nos princípios físicos. Nos modelos conceituais (físicos) são empregadas equações diferenciais na representação dos processos, utilizando parâmetros determinados com base física (Viola, 2008).

Nos modelos semi-conceituais, por sua vez, embora sejam aplicadas formulações que visem à descrição física dos processos, são empregados parâmetros calibráveis que, de certa forma, mantém o empirismo presente (Viola, 2008).

. Dentre os vários modelos hidrológicos existentes destacam-se os seguintes: SMAP (Soil Moisture Accounting Procedure), SWMM (Storm Water Management Model), SHE (European Hydrological System), TOPMODEL (Topography-based hydrological System), MGB-IPH (Modelo Hidrológicos de Grandes bacias), SAC-SMA (Sacramento Soil Moisture Accounting), ANSWERS (Areal Non-point Source Watershed Environment Response Simulation), TOPOG (Terrain Analysis Hydrologic Model) e SWAT (Soil and Water Assessment Tools).

### 2.3.1. Modelo Hidrológico SWAT

O modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) é um acrônimo para ferramenta de avaliação de solo e água, um modelo em escala de uma bacia hidrográfica desenvolvido pelo Dr. Jeff Arnold, do Serviço de pesquisa agrícola (ARS) do Texas, nos Estados Unidos da América (Neitsch et al., 2011).

O SWAT é um modelo semi-conceitual, o que significa que este tem uma base física e parâmetros calibráveis. Devido a este facto, Nietsch et al. (2011) e Arnold et al. (1998) apresentam as seguintes vantagens do modelo SWAT:

- O modelo pode simular bacias hidrográficas sem acompanhamento de dados;
- Pode quantificar o impacto relativo de dados alternativos de entrada (por exemplo: mudanças nas práticas de gestão, clima, vegetação, etc.) na qualidade da água ou em outras variáveis de interesse;
- É computacionalmente eficiente para operar em grandes bacias em um tempo razoável;
- Utiliza entradas prontamente disponíveis. Enquanto o modelo SWAT pode ser usado para estudar processos mais especializados, tal como o transporte de bactérias, os dados mínimos necessários para análise geralmente estão disponíveis nas agências governamentais;
- O modelo é de tempo contínuo e capaz de simular longos períodos para estimativa dos efeitos das mudanças na gestão;

Além disso, trata-se de um modelo de distribuição gratuita, já consagrado na comunidade científica (contando com mais de 30 anos de desenvolvimento científico), cuja documentação está organizada e disponibilizada em sítios de fácil acesso (Arguello, 2017).

O SWAT opera em passo de tempo diário e é capaz de simular 100 anos ou mais (Arnold et al., 1998).

No SWAT, a bacia hidrográfica é dividida em múltiplas subbacias hidrográficas ou subáreas drenantes, que então são subdivididas em unidades de resposta hidrológica. As

unidades de resposta hidrológica são regiões com uso e tipo do solo homogêneo e características topográficas também homogêneas. . Alternativamente, as subbacias podem ser consideradas também como unidades de resposta hidrológica (Arnold et al., 2005).

A equação governante no modelo SWAT é a do balanço hídrico ( equação 1).

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde: SW<sub>t</sub> é o conteúdo final de água no solo (mm); SW<sub>0</sub> é o conteúdo inicial da água no solo no dia i (mm); t é o tempo (dias); R<sub>day</sub> é a precipitação no dia i (mm); Q<sub>surf</sub> é o escoamento superficial por unidade de área no dia i (mm); E<sub>a</sub> é a evaporação no dia i (mm); W<sub>seep</sub> é a água que entra na zona aeração a partir do perfil do solo no dia i (mm); Q<sub>gw</sub> é o de fluxo de base no dia i (mm).

A simulação da bacia hidrográfica é separada na fase terrestre, que controla a quantidade de água, sedimento, nutriente e propagação de pesticidas para o canal principal em cada subbacia, e a fase de propagação ou roteamento, que é o movimento da água, sedimentos, etc., através da rede de canais da bacia hidrográfica até o escoamento (Arnold et al., 2005).

## **2.4. Processos de calibração e validação de modelos hidrológicos**

### **2.4.1. Análise de Sensibilidade do modelo**

Análise de sensibilidade consiste em auferir os resultados do modelo quando variam os seus parâmetros. Análise de sensibilidade permite identificar os parâmetros que mais influenciam nos resultados (Silva L. R., 2010).

O SWAT necessita de um grande número de parâmetros que caracterizam a fisiografia da bacia hidrográfica. Desta forma a precisão dos resultados obtidos depende muito da qualidade destes parâmetros. Segundo Lelis et al. (2012), não é possível verificar a sensibilidade de todos os parâmetros. A tabela 2-1 apresenta os parâmetros mais sensíveis que devem ser levadas em conta no processo de calibração segundo a opinião de outros autores.

Tabela 2-1. Parâmetros de maior influência em 64 estudos de bacias hidrográficas no SWAT. O número entre parênteses corresponde ao número de vezes que o parâmetro foi usado na calibração. fonte: (Arnold et al., 2012).

Process	Input Parameters									
Surface runoff	CN2 (36)	AWC (28)	ESCO (23)	EPCO (10)	SURLAG (22)	OV_N (8)				
Baseflow	GW_ALPHA (28)	GW_REVAP (18)	GW_DELAP (21)	GW_QWN (12)	REVAPMN (13)	RCHARG_DP (14)				
Snow	SFTMP (11)	SMFMN (14)	SMFMX (18)	SMTMP (13)	TIMP (7)	SNO50COV (4)	SNOCVMX (3)			
Sediment from channels	PRF (10)	APM (7)	SPEXP (10)	SPCON (11)	CH_EROD (6)	CH_COV (7)				
Sediment from landscape	USLE_P (7)	USLE_C (7)	USLE_K (7)	LAT_SED (1)	SLSOIL (2)	SLOPE (8)				
N from landscape	RCN (1)	UBN (3)	GWNO3 (2)	ERORGN (5)	NPERCO (11)	ANION_EXCL (2)				
P from landscape	PSP (5)	PHOSKD (6)	UBP (5)	PPERCO (8)	GWQMINP (1)	ERORGP (5)				
Pesticides	KOC (1)	HL_SOIL (1)	HL_FOL (1)	WSOL (1)	WOFFW (2)					
Subsurface tile	TDRAIN (1)	GDRAIN (2)	DEP_IMP (1)							
N and P from channels	BC1 (2)	BC2 (2)	BC3 (2)	BC4 (2)	RS4 (2)	RS5 (1)				
Plant growth	GSI (3)	HI (1)	BLAI (3)	PHU (1)	CN_YLD (1)					
Bacteria	BACTRDQ (1)	BACTMIX (1)	BCNST (1)	CFRT_KG (1)	WDPRCH (1)	WDPQ (1)				
Other	BIOMIX (4)	SOL_ROCK (1)	MSK_COL (1)	MSK_CO2 (2)	CBNINT (1)	SOL_BD (3)	ALPHA_BNR (1)	EVRCH (1)	SOL_ALB (2)	LAT_TTIME (1)

A análise de sensibilidade pode ser feita de duas formas: local, alterando os valores um de cada vez e global, permitindo que todos os valores dos parâmetros sejam alterados (Arnold et al., 2012).

A sensibilidade de um parâmetro geralmente depende do valor de outros parâmetros relacionados com este, portanto, o problema da análise local é o facto dos valores correctos dos parâmetros fixos não serem conhecidos. Para a análise global é necessário um grande número de simulações.

A análise de sensibilidade pode ser feita de forma manual ou automática.

McCuen e Snyder (1986) citado por Lelis (2011) apresenta uma forma de análise da sensibilidade variando cada parâmetro de entrada, individualmente, enquanto os outros são mantidos constantes e a quantificação do impacto de um intervalo de valores de um dado parâmetro sobre os resultados obtidos com o modelo é feita pela aplicação do índice de sensibilidade relativo (IS), determinado pela equação 2:

$$IS = \frac{\frac{R_1 - R_2}{R_{12}}}{\frac{I_1 - I_2}{I_{12}}} \quad (\text{Eq. 2})$$

Onde:

- IS – índice de sensibilidade do modelo aos parâmetros de entrada;
- $R_1$  – resultado obtido com o modelo para o menor valor de entrada;
- $R_2$  – resultado obtido com o modelo para o maior valor de entrada;
- $R_{12}$  – média dos resultados obtidos com o menor e o maior valor de entrada;
- $I_1$  – menor valor de entrada;
- $I_2$  – maior valor de entrada;
- $I_{12}$  – média dos valores de entrada.

Conforme McCuen e Snyder (1986) se maior forem os índices obtidos, mais sensível será o modelo ao parâmetro, contudo, os valores próximos a zero indicam que o modelo não apresenta sensibilidade ao parâmetro.

No entanto, para White e Chaubey (2005), existem algumas limitações ao uso deste índice para a avaliação dos parâmetros dentro de um modelo. Segundo os mesmos autores, estas limitações estão relacionadas ao pressuposto de linearidade e à falta de consideração de correlações entre os parâmetros.

No SWAT a análise de sensibilidade pode ser feita de forma automática pela ferramenta SWAT-CUP (*SWAT Calibration and Uncertainty Programs*). O SWAT-CUP é uma interface que permite conectar facilmente o SWAT com qualquer programa que efectua análise de sensibilidade ou calibração e validação do modelo (Abbaspour, 2015). .

A informação mais detalhada sobre o SWAT-CUP pode ser encontrada no seu manual de utilizador disponível em:

[https://swat.tamu.edu/media/114860/usermanual\\_swatcup.pdf](https://swat.tamu.edu/media/114860/usermanual_swatcup.pdf)

#### **2.4.2. Calibração e Validação**

Os modelos hidrológicos não são capazes de simular perfeitamente os complexos processos envolvidos na hidrologia devido a presença de erros de diversas origens. Portanto, é possível que os dados simulados apresentem diferenças em relação aos dados observados. Contudo, o processo de calibração terá como foco minimizar essas diferenças.

A calibração é o processo de ajuste dos parâmetros de um modelo à realidade da região em estudo, ou seja, esse procedimento visa encontrar os parâmetros que permitam

ao modelo representar a bacia hidrográfica de forma adequada, coerente com a realidade observada (SOUZA, 2015).

A calibração pode ser feita de duas formas:

a. Tentativa e erro

Esse é o método mais utilizado e usualmente recomendado. Implica um ajuste manual de parâmetros baseado no critério do investigador. A cada tentativa, o usuário analisa o ajuste das vazões mínimas, a forma do hidrograma calculado, o ajuste dos picos de cheias em termos de valor máximo, volume, forma e tempo de ocorrência (Tucci & Collischonn, 2003)..

b. Automática

No processo de calibração automática são empregados métodos matemáticos de otimização, sendo o mais frequente a minimização de uma função objetivo que mede o desvio entre as séries de vazão observada e simulada. O método consiste de um algoritmo que calcula diversas combinações de parâmetros, comparando os valores calculados até que o valor ótimo da função seja atingido (Viola, 2008).

A calibração automática pode ser feita no SWAT através da interface SWAT-CUP.

Finalizada a calibração do modelo, é necessário realizar a sua validação.

O procedimento de validação consiste em verificar o quanto os resultados previstos com o modelo, nas aplicações pretendidas, se aproximam da realidade observada (Pereira, 2013). A validação envolve a execução do modelo usando parâmetros que foram determinados durante o processo de calibração e a comparação das previsões com os dados observados não usados na calibração (Arnold et al., 2012).

Para a calibração e validação de um modelo deve-se separar uma série temporal de dados medidos em dois períodos, um para calibração e outro para validação, pois o modelo é rodado com os mesmos parâmetros de entrada para o período de validação e assim um ajuste é determinado (Arnold et al., 2000). Os dados são mais frequentemente divididos por períodos de tempo, garantindo cuidadosamente que os dados climáticos usados para a calibração e validação não sejam substancialmente diferentes, ou seja,

anos húmidos, moderados e secos ocorrem em ambos os períodos (Gan, T. Y. et al, 1997). Os dados também podem ser divididos espacialmente, com todos os dados disponíveis em um determinado local de monitoramento atribuídos à fase de calibração e correspondentemente realizando a validação em um ou mais medidores dentro da bacia hidrográfica (Arnold et al., 2000). Segundo o mesmo autor, os usuários do SWAT também podem usar parâmetros calibrados de uma bacia hidrográfica com condições climáticas, solos e de uso da terra aproximadamente semelhantes para a validação na bacia do estudo, ou vice-versa.

### 2.4.3. Função objectivo

Entende-se por função objetivo a representação matemática dos desvios (Viola, 2008). Tucci & Collischonn (2003) e Abbaspour (2015) propõem as seguintes funções objetivo na calibração e validação dos modelos hidrológicos:

- a) Relação entre os volumes calculados e observados (erro do balanço de massas)

$$PBIAS = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^n (Q_o - Q_s)}{\sum_{i=1}^n Q_o} \quad (\text{Eq. 3})$$

- b) Coeficiente de determinação

$$R^2 = \sqrt{\frac{[\sum_i (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)(Q_{s,i} - \bar{Q}_s)]^2}{\sum_i (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)^2 \sum_i (Q_{s,i} - \bar{Q}_s)^2}} \quad (\text{Eq. 4})$$

- c) Erro padrão relacionado ao desvio padrão dos dados observados

$$RSR = \sqrt{\frac{\sum_i (Q_o - Q_s)_i^2}{\sum_i (Q_o - \bar{Q}_o)^2}} \quad (\text{Eq. 5})$$

- d) Coeficiente de Nash-Sutcliffe

$$NS = 1 - \frac{\sum_i (Q_o - Q_s)_i^2}{\sum_i (Q_{o,i} - \bar{Q}_o)^2} \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde  $Q_o$  é a vazão observada ou medida no tempo  $t$ ,  $Q_s$  é a vazão simulada no tempo  $i$ ;  $n$  é o número de intervalos de tempo; e  $\sum$  indica o somatório entre  $i=1$  e  $i=n$ .

Na função a), o ajuste é perfeito quando  $PBIAS = 0$ . Portanto, no processo de calibração se deve tentar alcançar o valor mais baixo de  $PBIAS$ . Arnold et al (2012) sugerem que  $PBIAS \leq 20$  já oferece um bom ajuste.

A função b), coeficiente de determinação, pode variar de 0 a 1, onde 0 indica que não há correlação e 1 que há uma correlação perfeita entre os dados observados e simulados. Porém Arnold et al (2012) sugerem um bom ajuste quando  $R^2 \geq 0.6$ .

A função c), pode tomar valores desde 0 a  $+\infty$ , sendo que menores valores indicam um melhor ajuste.

Contudo, a função d) pode variar de  $-\infty$  a 1, sendo que um ajuste perfeito ocorre quando atinge o valor máximo. A qualidade de ajuste pode ser avaliada segundo a tabela 2-2.

Tabela 2-2. Valores referências do critério de Nash-Sutcliffe. Fonte: (Molnar, 2011).

<b>NS</b>	<b>Ajuste</b>
<b>&lt;0.2</b>	Insuficiente
<b>0.2-0.4</b>	Satisfatório
<b>0.4-0.6</b>	Bom
<b>0.6-0.8</b>	Muito Bom
<b>&gt;0.8</b>	Excelente

Estas funções procuram avaliar a qualidade do ajuste, sendo que as funções NS,  $R^2$  e RSR são mais sensíveis aos erros nas vazões máximas enquanto PBIAS é complementar e avalia o desvio geral do volume total calculado em relação ao observado (Tucci & Collischonn, 2003).

### 3. CARACTERIZAÇÃO DA REGIÃO DE ESTUDO

#### 3.1. Localização

A bacia hidrográfica do Rio Muaguide localiza-se na região norte de Moçambique, província de Cabo Delgado, ocupando os territórios dos distritos de Ancuabe e Pemba possuindo uma área de aproximadamente 1413.44 km<sup>2</sup>. O rio Principal da bacia é o rio Muaguide que nasce no distrito de Ancuabe e desagua no oceano Índico, sendo este, considerado um rio secundário na classificação dos rios de Moçambique. Este é um rio intermitente e tem como afluentes principais os rios Namutua, Upulo e Colué. Na figura 3-1 apresenta-se a localização da bacia do Muaguide.

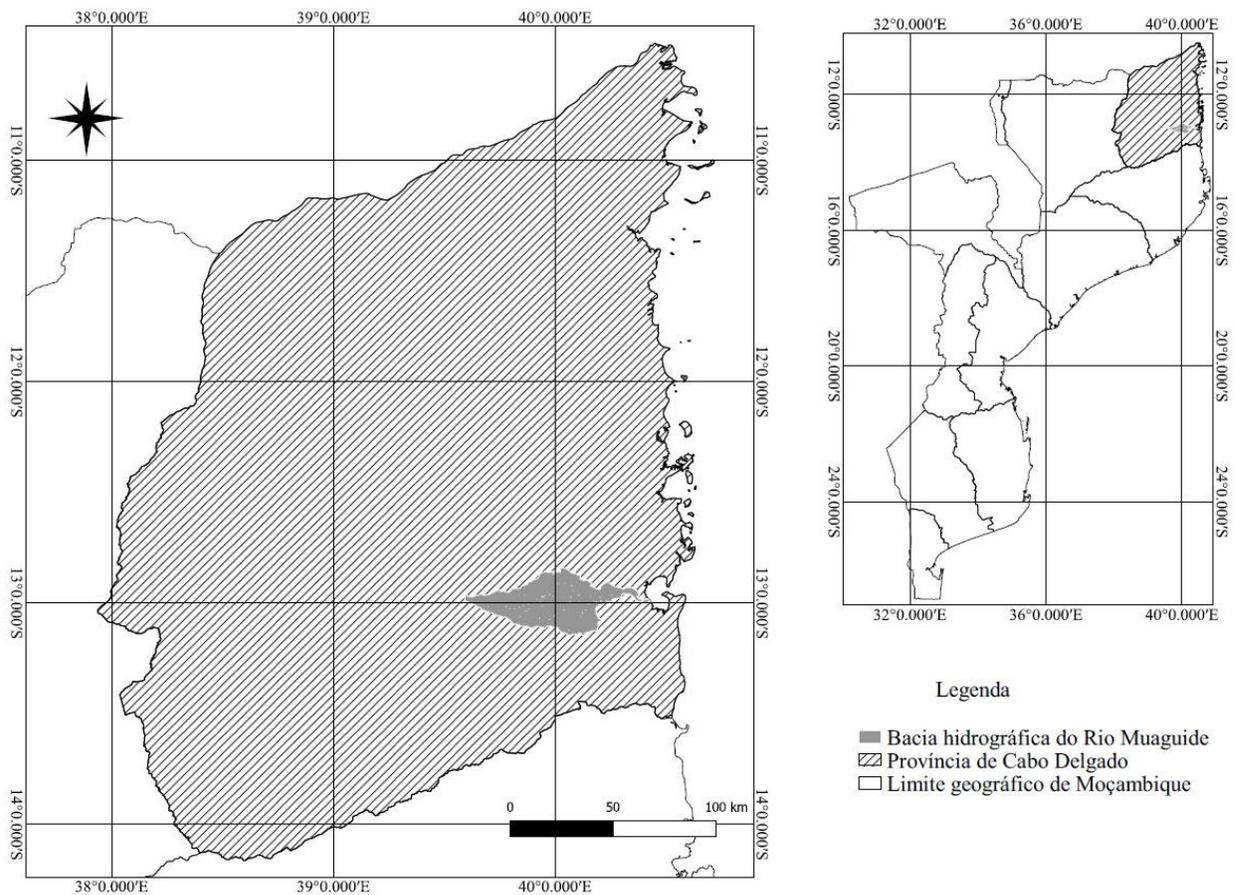


Figura 3-1. Localização geográfica da bacia hidrográfica do Rio Muaguide.

### 3.2. Modelo digital de elevação e hidrografia

O modelo de elevação digital (DEM) da área de estudo adoptado foi do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) com resolução de 90 m obtido no site Earth Explorer (<http://earthexplorer.usgs.gov>). A sua obtenção foi por meio de introdução de coordenadas da região de estudo, que resultaram num total de 8 DEMs variando de latitudes 12 a 14 Sul e longitudes 38 a 40 Este. Posteriormente fez-se a união dos DEMs, o recorte do DEM resultante tendo em conta os limites da bacia hidrográfica do Rio Muaguide e a sua reprojeção para o sistema de coordenadas UTM, como sugerido no manual do QSWAT3. Relativamente a hidrografia da bacia hidrográfica em estudo, esta foi fornecida pelo Centro Nacional de cartografia e teledetecção (CENACARTA) e está representada na figura 3-2 juntamente com o DEM e o contorno da bacia em estudo.

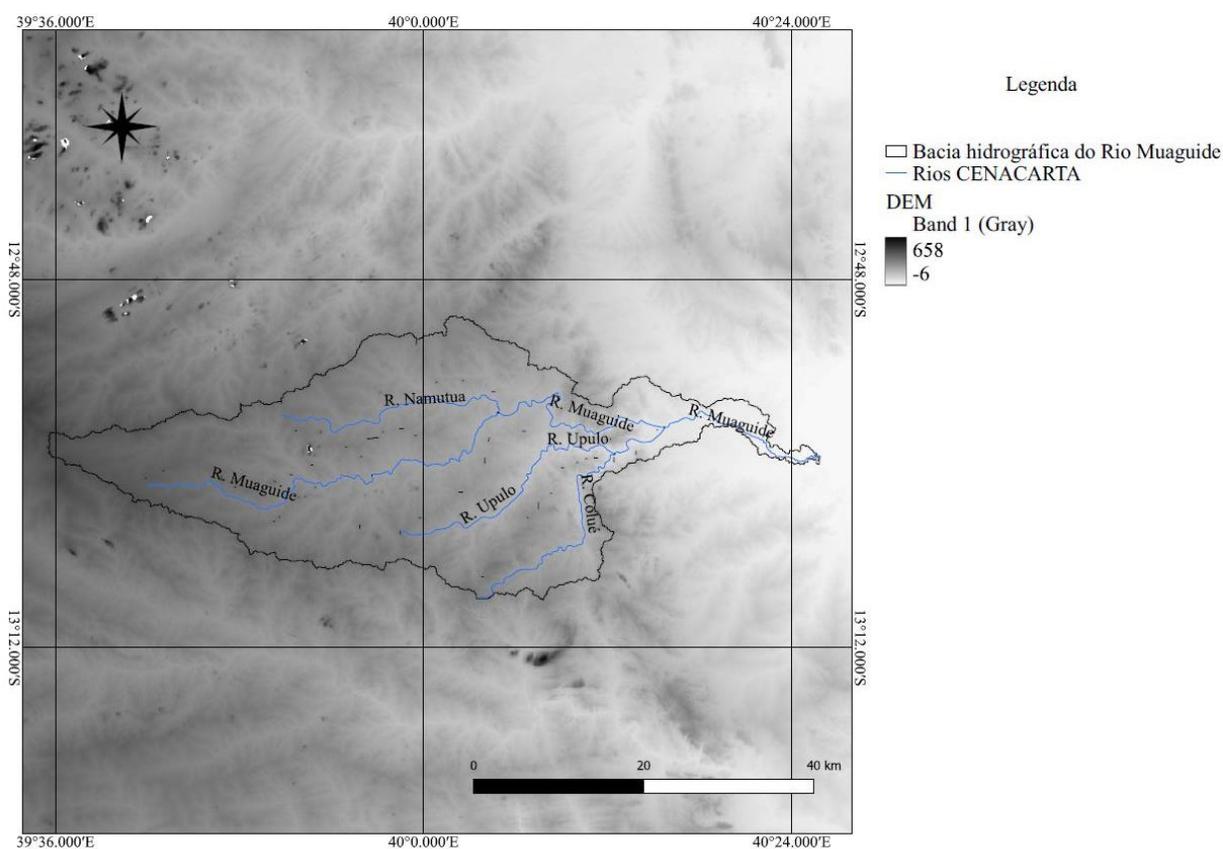


Figura 3-2. Modelo de elevação digital e hidrografia da bacia hidrográfica do Rio Muaguide.

### 3.3. Características meteorológicas e hidrométricas

O modelo permite o uso de dados medidos, assim como simulados de variáveis meteorológicas para a simulação das variáveis hidrológicas da bacia em estudo. Estas variáveis são: as temperaturas mínima e máxima, a radiação solar, a precipitação, a humidade relativa e a velocidade do vento. Adoptou-se para o trabalho em questão o uso de dados medidos e de um gerador climático (WGEN) para a simulação em caso de ausência de dados em certo período. Ambos dados são gerados pelo *Climate forecast system Reanalysis* (CFSR), desenvolvido pela National Centers for Environment Prediction (NCEP). O CFSR é um produto de reanálise de terceira geração, um sistema global de alto acoplamento atmosfera-oceano-terra-gelo marinho desenvolvido para fornecer a melhor estimativa do estado desses domínios acoplados ao longo do período de dados. Este modelo inclui um acoplamento do oceano-atmosfera durante a geração do campo de previsão de 6 horas, um modelo interativo de gelo marinho e assimilação de radiações de satélite (Saha et al., 2010).

Mais informação sobre o CFSR pode ser encontrada em: [https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/91/8/2010bams3001\\_1.xml](https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/91/8/2010bams3001_1.xml).

Os dados meteorológicos utilizados são diários, datados desde 1979 a 2014 (36 anos), cuja aquisição foi no site do SWAT, recorrendo ao seguinte URL: (<http://globalweather.tamu.edu/>). Entrando no referido site com as coordenadas da região foi possível obter dados de 9 estações meteorológicas representadas na figura 3-3. Os dados referentes ao gerador climático foram obtidos também no site do SWAT, recorrendo ao seguinte URL: [http://swat.tamu.edu/media/99082/cfsr\\_world.zip](http://swat.tamu.edu/media/99082/cfsr_world.zip).

Na figura 3-3 também estão representadas as 3 estações hidrométricas localizadas na bacia em estudo, cujos dados de vazão fornecidas pela Direção Nacional de Gestão de Recursos Hídricos (DNGRH) são necessários para a calibração e validação do modelo. Os dados de caudais destas estações são calculados pela curva de vazão através dos dados de níveis hidrométricos que são medidos directamente nestas estações.

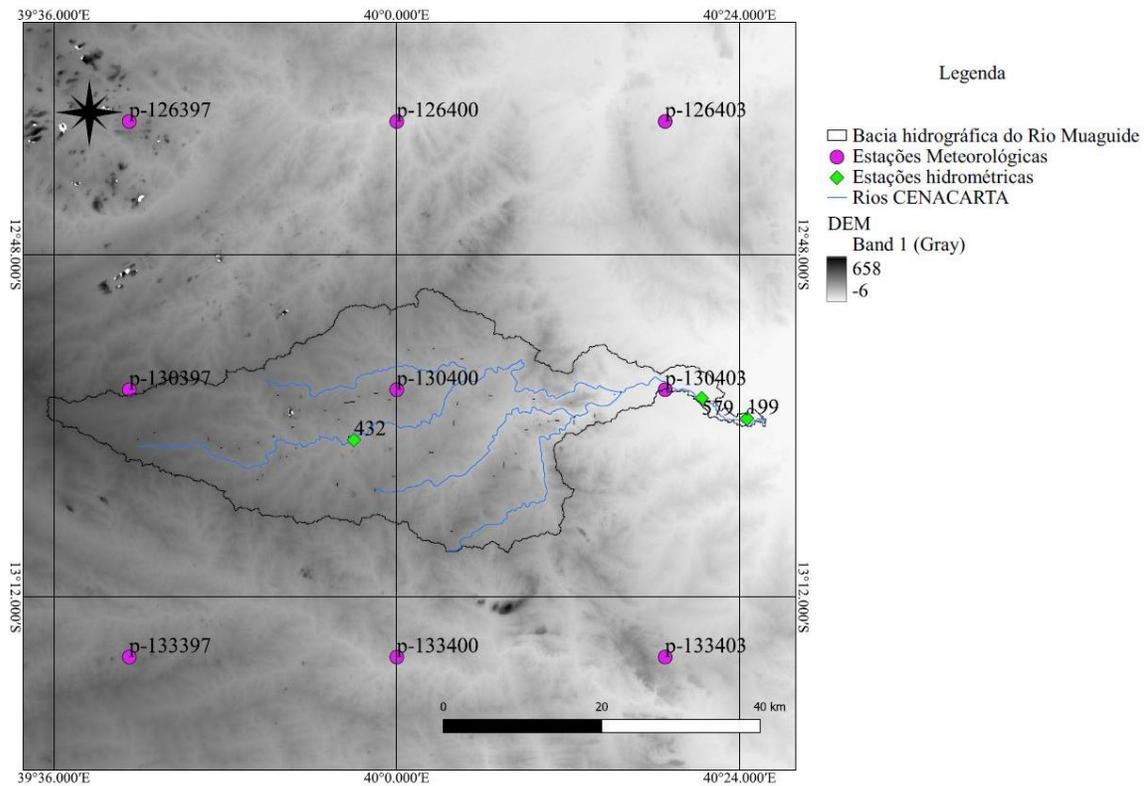


Figura 3-3. Disposição espacial das estações meteorológicas e hidrométricas.

### 3.4. Uso e ocupação do solo e tipos de solos

O mapa de uso e ocupação do solo foi derivado por EROS (*Earth Resources observation and science*) entre Abril de 1992 a Março de 1993 com resolução de 1 km AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) e classificação *IGBP Land Cover*, como mostrado na figura 3-4. Por conseguinte, o mapa referente aos tipos de solo utilizada foi derivada pela FAO (Food and Agriculture Organization) em 2003, seguindo a sua classificação, de acordo com a figura 3-5. Ambos mapas foram intersectados para a região em estudo. No anexo 9.2. pode se observar a tabela de descodificação dos acrónimos usados na classificação do uso e ocupação do solo e a tabela de caracterização dos solos.

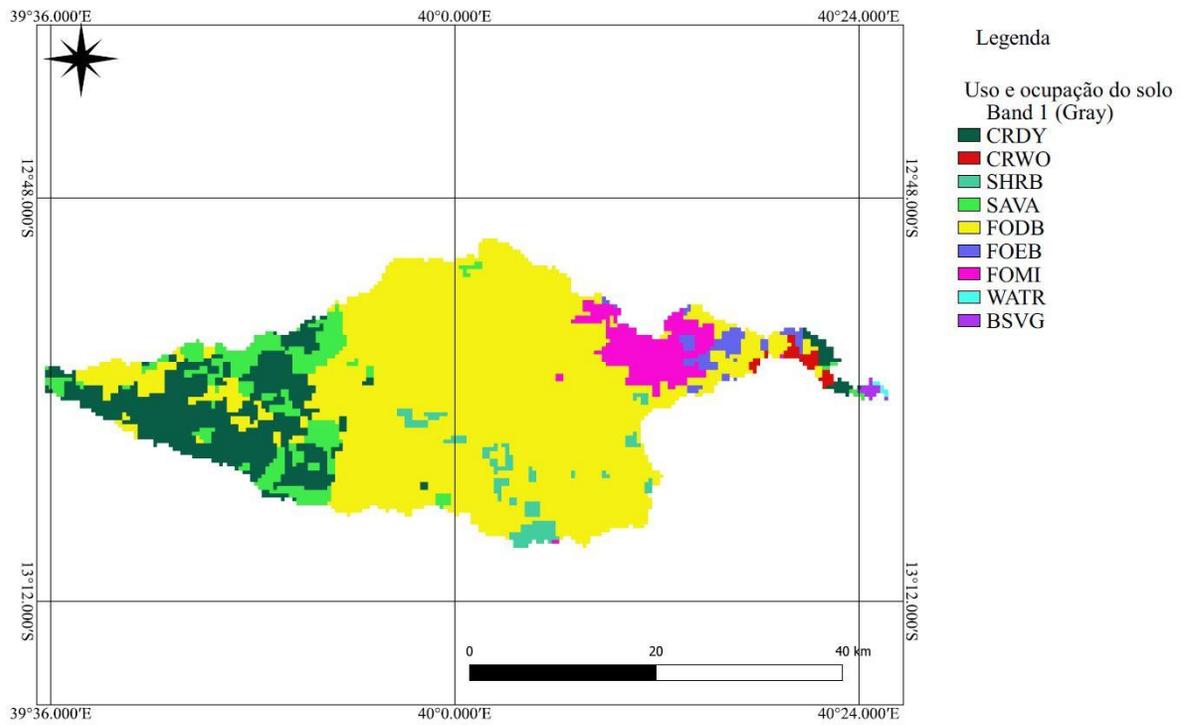


Figura 3-4. Mapa de uso e ocupação do solo segundo EROS.

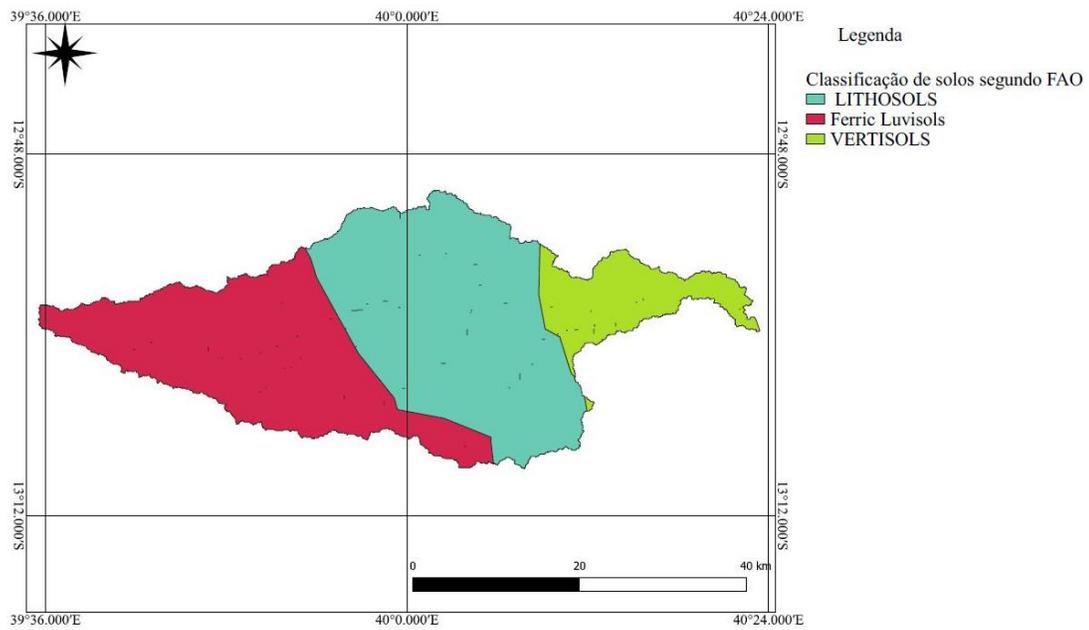


Figura 3-5. Mapa de solos classificado segundo FAO.

## 4. METODOLOGIA

### 4.1. Subdivisão da bacia hidrográfica

A subdivisão de bacias é necessária para a definição de variáveis hidrológicas de forma mais específica. Para cada curso de água é possível definir uma subárea drenante, considerando que a secção de saída é o ponto de confluência com outro curso de água. Esse ponto de confluência é denominado pelo modelo como “*outlet*” do curso de água. E, por conseguinte, o outlet correspondente ao rio principal, neste caso, o ponto de referência que define a bacia hidrográfica do curso principal se denominaria “*main outlet*”. Estes são os conceitos que o modelo usa para a delimitação das subáreas drenantes e da bacia hidrográfica.

O modelo permite ao usuário inserir uma bacia hidrográfica já delimitada assim como efectua a sua delimitação. Adoptou-se para o estudo em questão, a sua delimitação por meio do modelo, tendo-se seguido os passos seguintes:

- a) Selecção do modelo de elevação digital (DEM) da região em estudo e a adição do *shapefile* correspondente a hidrografia do rio Muaguide.
- b) Definição do ponto referência da bacia hidrográfica, denominado por *main outlet*, o qual foi desenhando diretamente sobre o mapa. Definiu-se apenas o “*main outlet*” pois os outros são considerados automaticamente. Foi necessário definir também a distância máxima (*snap threshold*) para que o *outlet* fosse considerado na delimitação da bacia.
- c) Definição da área limite de drenagem (*Define threshold*), ou seja, a área mínima necessária para formar um curso de fluxo. A adição da hidrografia do rio no mapa sobre o modelo de elevação digital permite que os cursos de água criados pelo modelo através da opção “*create streams*” sigam o percurso real dos rios. Porém, conforme o limite de área escolhido, alguns cursos de água, correspondentes a hidrografia, podem não ser criados pelo modelo. Portanto, a definição do limite foi realizada por meio de tentativas até que os cursos de água criados pelo modelo incorporassem todos os cursos de água adicionados.
- d) Delimitação da bacia hidrográfica (*Create watershed*).

- e) Uma vez feita o passo d), o modelo considera para cada curso de água singular uma subárea drenante associada, resultando um total de 639 subáreas drenantes. Com vista a reduzir este número, optou-se pela união das subáreas drenantes (merge subbasins) considerando-se os factores: existência de pontos de monitorização, afluentes do rio principal coincidentes com os da hidrografia assim como a necessidade de obter áreas de dimensão mais ou menos homogêneas.
- f) Obteve-se a bacia delimitada e subdividida em 14 subáreas drenantes devidamente enumeradas como representada na figura 4-1.

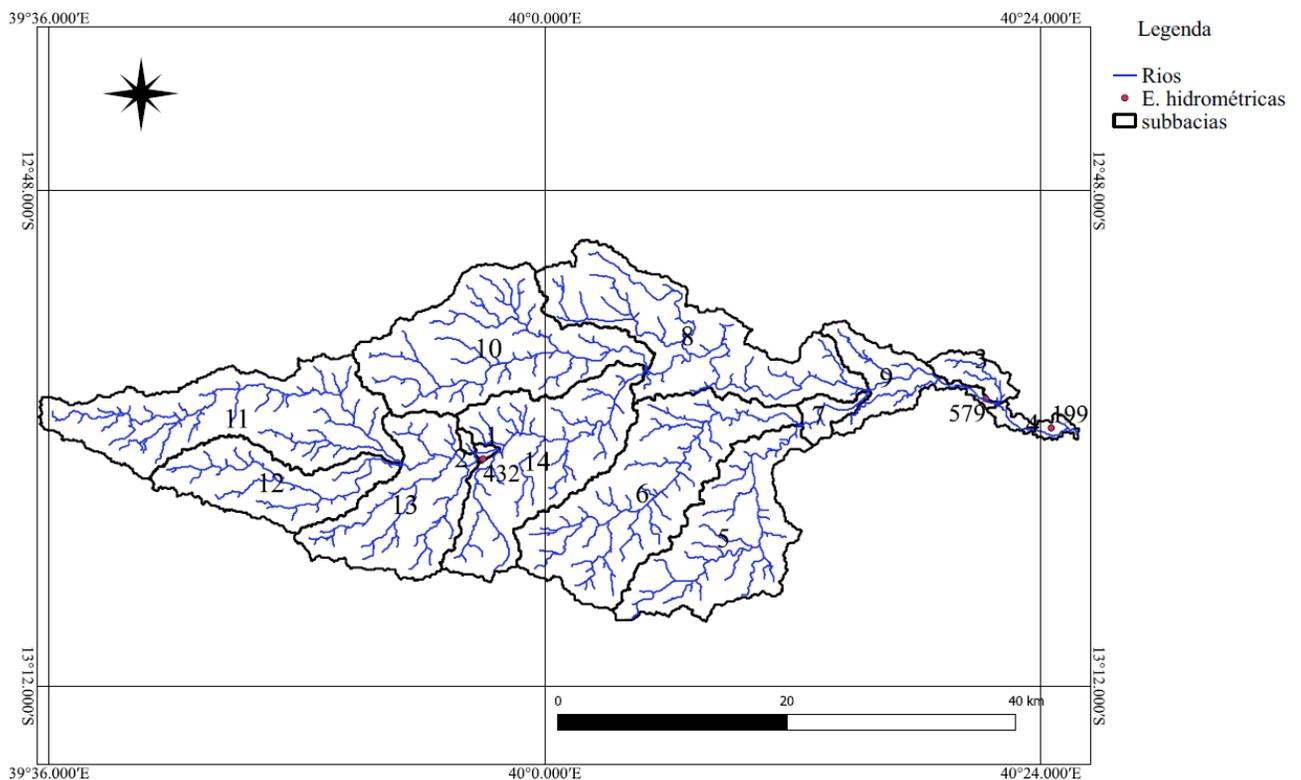


Figura 4-1. Subdivisão da bacia hidrográfica do rio Muaguide.

Como se pode observar na figura 4-1 é possível identificar os rios e subáreas drenantes associadas a cada estação hidrométrica. Este facto permite conhecer os caudais de entrada e saída da subáreas drenantes simulados pelo modelo e poder compará-lo ou calibrá-lo com os medidos.

Os passos descritos acima podem ser observados na figura 4-2. Nesta, pode-se verificar a área limite adoptada para a criação das subáreas drenantes assim como a distância máxima para a consideração do outlet como pertencente a bacia a delimitar.

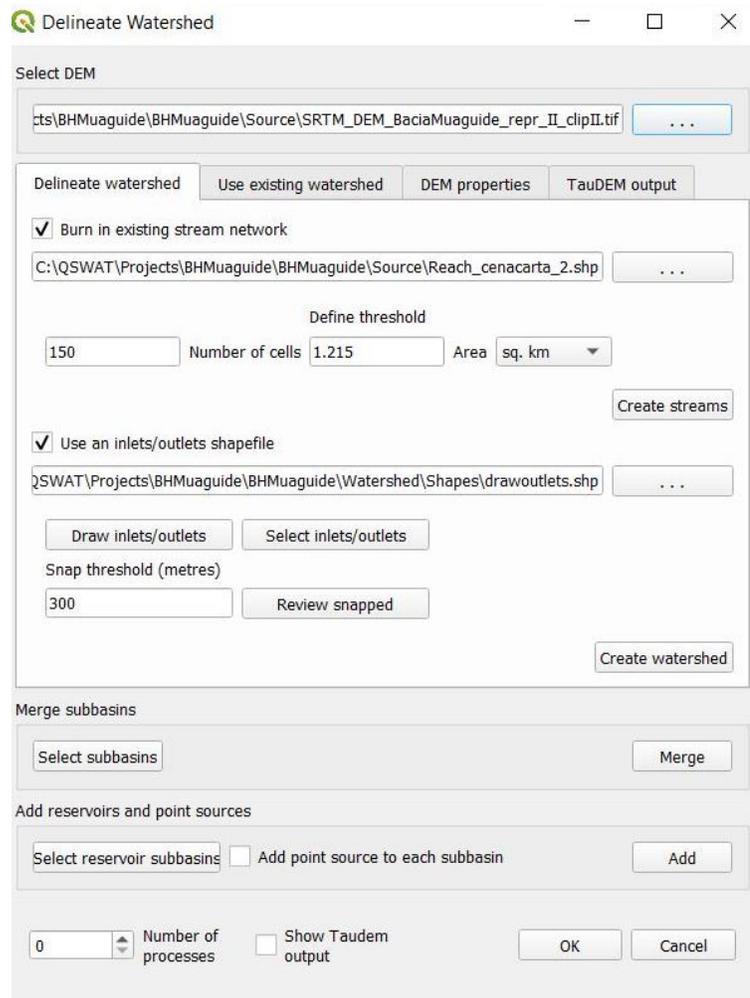


Figura 4-2. Procedimentos para a delimitação de bacias no modelo SWAT.

## 4.2. Base de dados

O modelo dispõe de várias bases de dados necessárias para o processo de simulação. Sempre que um novo projecto é criado, algumas delas são importadas para a pasta do projecto para que sejam acedidas durante passos antecedentes a simulação (delimitação da bacia hidrográfica e criação das unidades de respostas hidrológicas), assim como durante o processo de simulação. Esta base de dados contém diversa

informação, porém o usuário normalmente necessitará de 3 delas: a tabela de uso e ocupação de solos, as tabelas de codificação dos tipos de solo assim como das características dos solos (*usersoil*) e a tabela do gerador climático (*WGEN*). Porém, nem sempre essa base de dados contém a informação necessária, requerendo que o usuário importe as tabelas que usará no projecto que não estejam contidas nessa, respeitando a estrutura definida pelo modelo.

Para o projecto em questão, foi necessário importar as tabelas do gerador climático (*WGEN*) *CFRS World* e da caracterização de solos *usersoil*. A obtenção da primeira tabela foi especificada em 3.3. Por conseguinte, a tabela de caracterização de solos, *usersoil*, foi definida fazendo a equivalência entre os solos classificados pela FAO aos solos contidos na base de dados do modelo. Esta conversão está ilustrada na tabela 4-1.

Tabela 4-1. Conversão classificação FAO em código SWAT. Soil\_ID é a numeração dos solos no mapa.

Classificação FAO	Soil_ID	Código SWAT
Ferric Luvisols	78	Lf87-2-3b
LITHOSOLS	75	I-L-1b
VERTISOLS	127	V1-3a

### 4.3. Unidades de resposta hidrológica (HRU's)

Para além da subdivisão em subbacias e/ou subáreas drenantes, o modelo permite que cada subbacia ou subárea drenante seja também repartida em várias unidades denominadas HRU's.

Para definir HRU's, foi necessário importar para o modelo os mapas de uso e ocupação do solo (*landuse map*) e de classificação de solos (*soil map*). Para cada mapa, é necessário dispor de tabelas para que a classificação seja lida pelo modelo, ou seja, tabelas que convertam as diversas classificações em códigos legíveis pelo modelo. Para o uso e ocupação de solos adoptou-se a tabela *global landuse* disposta na base de dados do modelo e para a classificação de solos importou-se a tabela feita pelo usuário para converter a classificação FAO em códigos do SWAT "*Muaguide soil*".

Uma vez introduzidas as tabelas, adoptou-se a opção de ler a partir de mapas (*read from maps*) e habilitou-se a opção para gerar todos os HRU's (*Generate FullHRUs shapefile*) e leram-se os mapas (*read*). A opção de ler os mapas permite que os HRU's sejam criados. Foram criados no total 65 HRU's, tendo se optado por reduzir este número utilizando o critério de filtrar por solo, uso e ocupação de solos e declividade (*filter by landuse, soil, slope*) considerando uma percentagem da subárea drenante de 5%, tendo se criado deste modo, um shapefile denominado actual HRUs contendo um total de 48 HRU's, ou seja, apenas 48 HRU's têm solo, uso e ocupação de solo de áreas acima dos 5% das subárea drenante. Os HRU's criados estão representados no anexo 9.4. O processo de criação de HRU's está representada na figura 4-3.

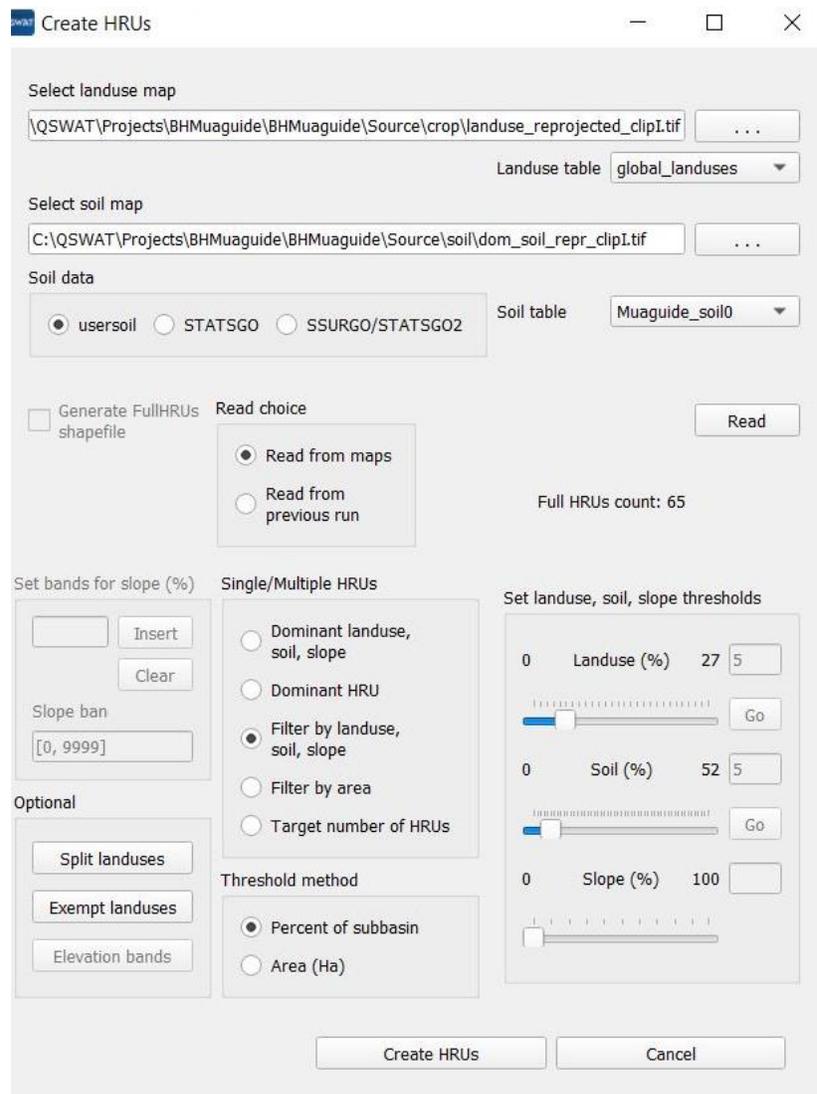


Figura 4-3. Processo de criação de HRU's no modelo.

#### **4.4. Parâmetros de entrada para a simulação**

Uma vez criados os HRU's, segue-se ao passo de simular as diversas variáveis hidrológicas. O processo inicia com a edição de variáveis meteorológicas, onde é decidido, se estas serão observadas ou simuladas. Uma vez que se dispunha de dados observados, adoptou-se a opção de usar os mesmos. Neste passo também é definida a base de dados do gerador climático WGEN, o qual foi adoptado o definido em 4.3.

Em seguida, são criadas as tabelas de entrada que contém todas as informações necessárias a simulação do ciclo hidrológico, sendo estas definidas na base de dados do modelo.

Por fim, define-se o período de simulação, a forma de retirada de dados simulados, o período de aquecimento do modelo e as tabelas extras a serem processadas. O período de simulação se refere a data de início e fim da simulação que no caso de se escolherem o uso de dados medidos, este deverá estar dentro do intervalo. A forma de retirada de dados consiste na escolha de dados diários, mensais ou anuais das diversas variáveis. As tabelas extras são tabelas opcionais que o modelo só processa se o usuário habilitar, exemplo é a tabela de qualidade água. O período de aquecimento é o período em que a simulação processará sem retirar os resultados. Este período será então considerado como “condições iniciais” do modelo. Para o projecto em questão, adoptou-se um período de aquecimento de 3 anos, ou seja, de 1979 a 1981, sendo as variáveis hidrológicas calculadas desde 1982 a 2014.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Calibração

Para calibrar o modelo é necessário dispor de dados observados de pelo menos uma variável simulada pelo modelo. No caso, a DNGRH apenas disponha de dados de caudal para as estações 199 (pertencente a subárea drenante 4) compreendidos no período de 1982 a 1987 e 423 (pertencente a subárea drenante 1) compreendidos no período de 1982 a 1985. Optou-se para a calibração do modelo os dados de vazão da estação 423 por possuir dados mais fiáveis e para a validação os dados da outra estação.

O método de calibração adoptada foi automática recorrendo ao programa computacional SWAT-CUP pela flexibilidade de testar vários valores em menos tempo. A escolha dos parâmetros a modificar no modelo para a calibração foi feita mediante a observação do gráfico de caudais medidos e simulados inicialmente e a sugestão de outros autores. Os parâmetros adoptados no processo de calibração são:

<i>Parâmetro</i>	<i>Descrição</i>
<i>CN2</i>	Número de curva inicial para a condição de humidade II (adimensional)
<i>SOL_ACW</i>	Armazenamento de água no solo (mm/mm)
<i>SOL_K</i>	Condutividade hidráulica do solo saturado (mm/h)
<i>ESCO</i>	Factor de compensação de evaporação de água do solo (adimensional)
<i>GW_DELAY</i>	Intervalo de tempo para a recarga do aquífero (dias)
<i>ALPHA_BF</i>	Constante de recessão do escoamento de base (dias)
<i>GWQMN</i>	Nível limite de água no aquífero raso para a ocorrência do fluxo de base (mm)
<i>REVAPMN</i>	Profundidade limite da água no aquífero para ocorrência da ascensão da água à zona não saturada (mm)
<i>GW_REVAP</i>	Coeficiente de ascensão da água à zona não saturada (adimensional)
<i>RCHRG_DP</i>	Coeficiente de percolação da água para o aquífero confinado (adimensional)
<i>HRU_SLP</i>	Declividade média do HRU na subbacia (m/m)

<i>SLSUBBSN</i>	Comprimento médio da encosta (m)
<i>EPCO</i>	Factor de compensação do consumo de água pelas plantas (adimensional)
<i>SURLAG</i>	Tempo de retardamento do escoamento superficial directo (dias)
<i>OV_N</i>	Coefficiente de Manning Strickler para o escoamento superficial (adimensional)

Adoptaram-se intervalos de valores iniciais para iniciar a calibração automática no SWAT-CUP, e efectuaram-se várias interações tendo em conta os limites máximo e mínimo dos parâmetros estipulados na base de dados do SWAT até que se obtive o melhor ajuste cujas funções objectivos estão representados na tabela 5-1.

Tabela 5-1. Valores obtidos para as funções objectivo no processo de calibração.

<b>Função- objectivo</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>NS</b>	<b>PBIAS</b>	<b>RSR</b>
<b>Valor obtido</b>	0.17	0.15	9.3	0.92

Como se pode observar, o melhor ajuste atingiu valores óptimos do PBIAS e do RSR por se aproximarem a zero e um resultado satisfatório do NS ( $NS \cong 0.2$ ). Este ajuste pode ser observado na figura 5-1 onde é ilustrada a relação entre os caudais medidos e simulados antes da calibração e após a calibração, o que corresponde ao melhor ajuste.

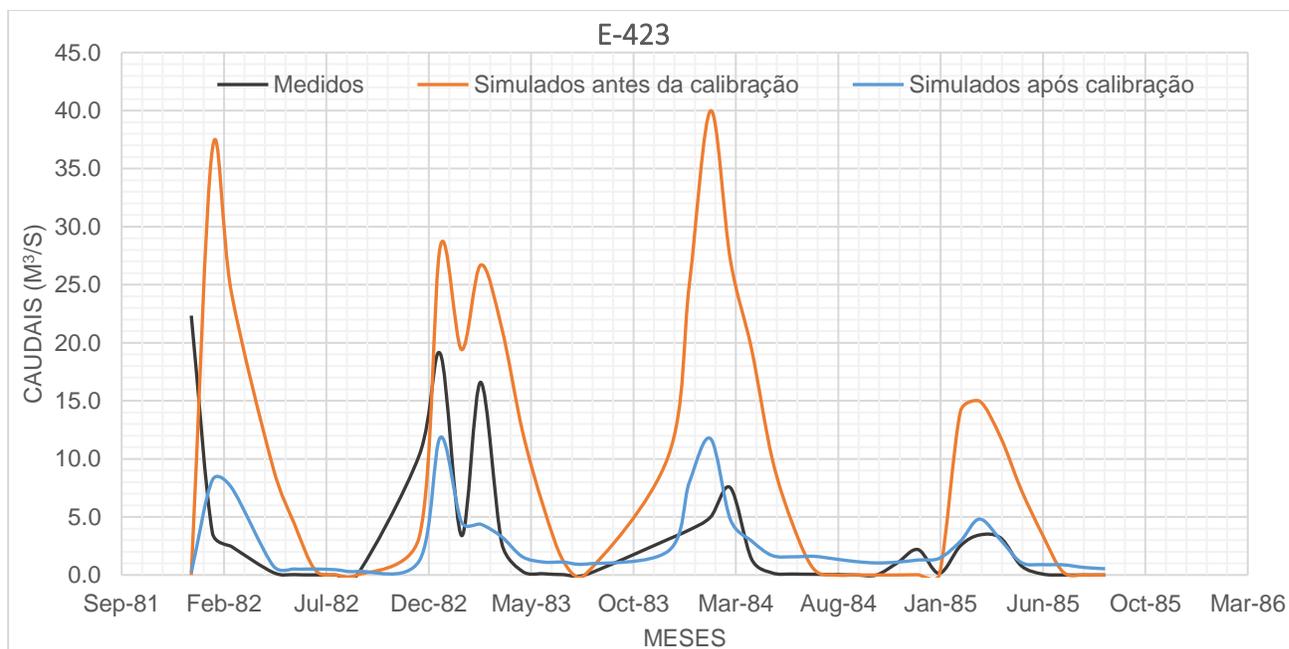


Figura 5-1. Caudais da estação hidrométrica E-423 medidos e simulados.

Os valores iniciais e finais dos parâmetros adoptados para a calibração do modelo estão ilustrados na tabela 5-2. A mesma tabela apresenta para os parâmetros variáveis espacialmente apenas a sua variação percentual, uma vez que o valor destes parâmetros na bacia não são constantes variando em função da declividade, tipo de solo e/ou uso e ocupação do solo, ou seja, específicos para cada unidade de resposta hidrológica.

Tabela 5-2. Valores iniciais, finais e variação percentual dos parâmetros antes e após a calibração.

Parâmetro	valor inicial	variação percentual	valor final
CN2 *	-	-20.87%	-
SOL_ACW *	-	93.89%	-
SOL_K *	-	89.64%	-
ESCO	0.95	-	1
GW_DELAY	31	-	311
ALPHA_BF	0.048	-	0.774
GWQMN	1000	-	997.46
REVAPMN	750	-	500
GW_REVAP	0.02	-	0.2
RCHRG_DP	0.05	-	0.21

HRU_SLP *	-	-7.80%	-
SLSUBBSN *	-	-85.85%	-
EPCO	1	-	1
SURLAG	4	-	2
OV_N *	-	282%	-

\* Parâmetro variável espacialmente em função da declividade, tipo de solo e uso e/ou ocupação do solo.

## 5.2. Validação

Após a calibração, procedeu-se a validação do modelo recorrendo aos dados de caudais da estação hidrométrica E-199. Com vista a avaliar a qualidade do ajuste, determinaram-se os valores das funções objectivos utilizados na calibração e obteveram-se os valores representados na tabela 5-3.

Tabela 5-3. Valores obtidos para as funções objectivo durante a validação.

<b>Função- objectivo</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>NS</b>	<b>PBIAS</b>	<b>RSR</b>
<b>Valor obtido</b>	0.66	-0.8	-78.9	1.36

Embora, se obtiveram valores satisfatórios das funções objectivos no processo de calibração, o mesmo não ocorreu no processo de validação. Porém, para esta estação, o coeficiente de determinação atingiu um valor óptimo ( $R^2 > 0.6$ ), demonstrando que há correlação entre os valores medidos e simulados. Esta relação pode ser observada na figura abaixo.

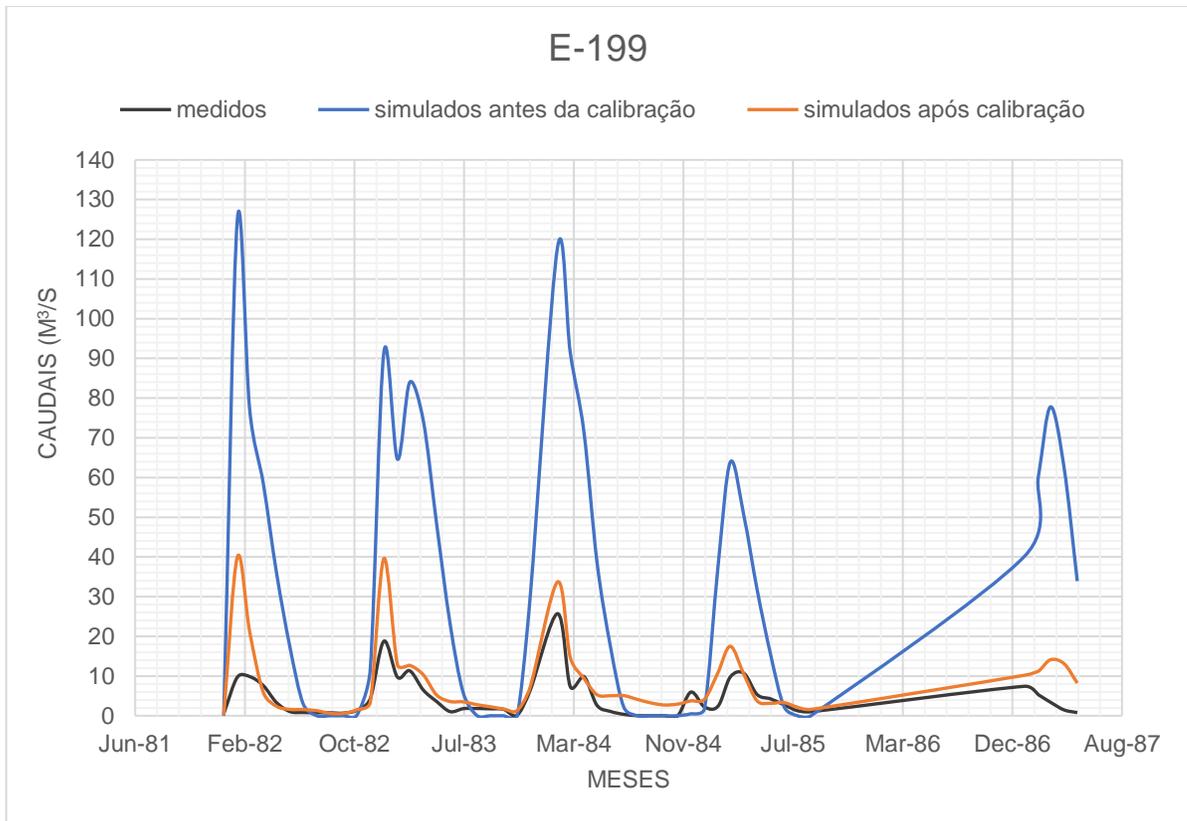


Figura 5-2. Caudais da estação hidrométrica E-199 medidos e simulados.

Como se pode observar na figura 5-2, o desfasamento considerável entre os caudais simulados e medidos ocorre nas zonas de pico. Tendo em conta que se obtiveram resultados satisfatórios no processo de calibração, este desfasamento pode se dever a duas hipóteses, nomeadamente, modelo ter superestimado a contribuição da precipitação do escoamento superficial nesta subárea drenante ou haver uma subestimação dos caudais medidos.

A primeira hipótese pode ser fundamentada considerando que as características fisiográficas desta subárea drenante referente ao escoamento superficial directo não se relacionam linearmente com as da subárea drenante utilizada na calibração ou mesmo pela possibilidade dos dados meteorológicos utilizados, por serem gerados por um produto de reanálise, não representarem com boa precisão o comportamento real da região em estudo. Outro argumento que sustentaria essa hipótese é a limitação do modelo em considerar a variação dos valores dos parâmetros em função do tempo, uma vez que os mapas de uso e ocupação do solo, tipo de solos e modelos de elevação digital terem sido gerados em épocas diferentes dos dados observados.

No entanto, a segunda hipótese pode ser considerada uma vez que as curvas de vazão utilizadas para a determinação dos caudais a partir de alturas hidrométricas registradas foram determinadas 10 anos antes do ano 1982. Este facto implica que alterações morfológicas dos rios ao longo desse período na secção de controle não foram consideradas.

### 5.3. Simulação das variáveis hidrológicas

O modelo permite a visualização de valores médios (diários, mensais ou anuais), máximos, mínimos e totais das variáveis hidrológicas em cada subárea drenante. As figuras 5-3, 5-4 e 5-5 mostram os valores produzidos por ano e por subárea drenante das variáveis escoamento superficial directo, escoamento superficial base e a recarga do aquífero (fracção da percolação que alimenta o aquífero), respectivamente. As equações que o modelo utiliza para o cálculo dessas variáveis estão apresentadas no anexo 9.1. Também foram obtidos os caudais médios mensais de cada subárea drenante dentro do período de simulação, os quais estão representados nos gráficos no anexo 9.3. Adiante apresentam-se os valores médios anuais das variáveis hidrológicas de interesse nas subáreas drenantes.

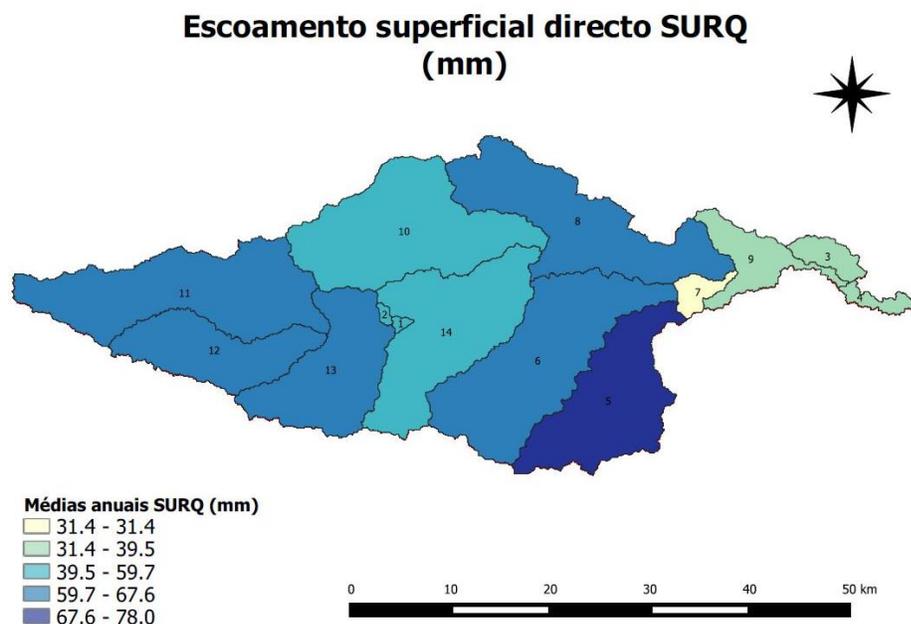


Figura 5-3. Volumes médios anuais dos escoamentos superficiais directos das subbacias.

### Escoamento de base GW\_Q (mm)

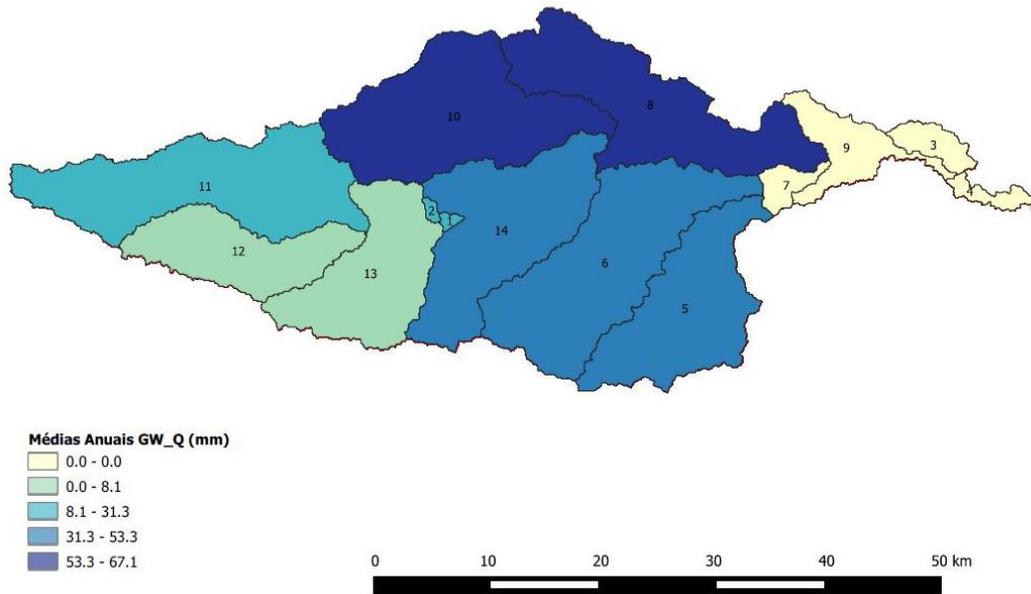


Figura 5-4. Volumes médios anuais dos escoamentos de base das subbacias.

### Recarga do aquífero GW\_RCHG (mm)

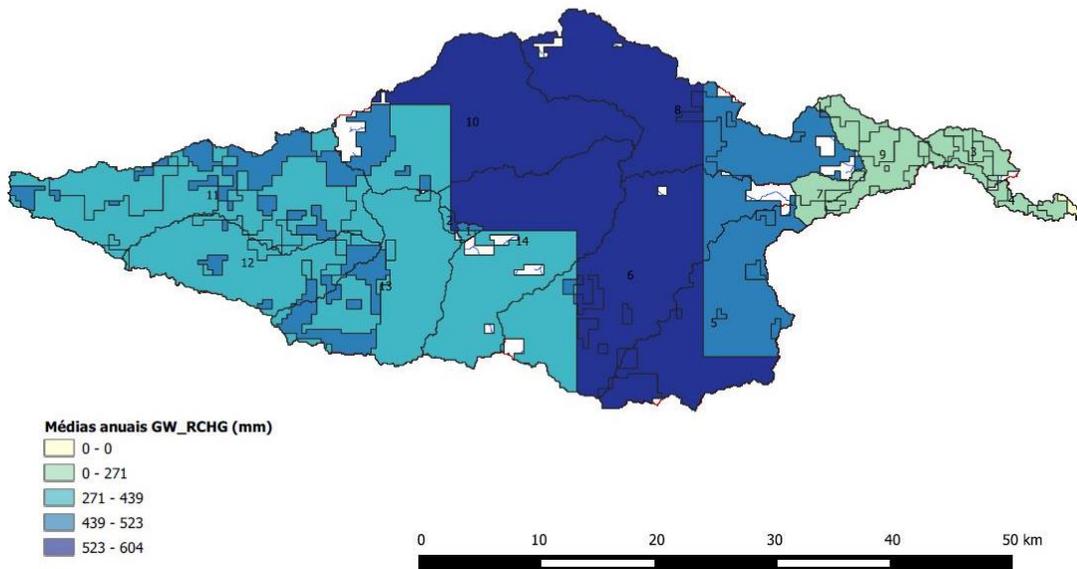


Figura 5-5. Volumes médios anuais das recargas que entram nos aquíferos.

## 6. CONCLUSÕES

A dificuldade na monitorização de bacias hidrográficas quer devido à escassez de recursos para aquisição de equipamentos, quer pela má qualidade das estradas que impede ao acesso aos pontos pode ser amenizada recorrendo à modelos hidrológicos tal como o SWAT.

O modelo hidrológico SWAT foi utilizado para simular as variáveis hidrológicas: escoamento superficial directo, escoamento de base e percolação para o aquífero na bacia hidrográfica do rio Muaguide.

A simulação foi mediante o uso de dados meteorológicos de um produto de reanálise global de alta resolução embora com baixa observação local. O modelo de elevação digital permitiu a geração de características fisiográficas relativos ao relevo e sistema de drenagem. Os mapas de uso e ocupação do solo e tipos de solo utilizados foram obtidos em fontes cuja classificação é global, o que facilitou a geração dos valores dos parâmetros utilizados no cálculo das variáveis hidrológicas. O uso e ocupação do solo FODB ocupa maior área da bacia hidrográfica do Rio Muaguide e o WATR a menor área enquanto que os diferentes tipos de solo distribuem-se de forma quase uniforme ao longo da bacia hidrográfica. Devido à escassez de dados observados, o modelo foi calibrado e validado através de dados de escoamento superficial nas estações E199 e E423. Os dados observados cobrem o período entre 1982 a 1987 e entre 1982 a 1985 respectivamente. Para a calibração foram usados dados da estação E423 e a validação foi conseguida através dos dados na estação E199. A simulação dos escoamentos superficial e subterrâneo foi feita com os valores dos parâmetros calibrados, levando, portanto, em consideração a realidade observada da região em estudo.

Pelos resultados óptimos obtidos depois do processo de calibração e validação referentes aos valores tomados pelas funções-objectivos utilizadas para a avaliação do modelo, considera-se a simulação hidrológica como satisfatória. Assim, o modelo pode ser utilizado para a geração de dados a serem usados para uma avaliação inicial da disponibilidade hídrica e ou compreender o impacto das alterações climáticas no comportamento da bacia através da mudança das variáveis meteorológicas

## 7. RECOMENDAÇÕES

Apesar dos resultados obtidos depois da calibração serem satisfatórios, melhores resultados poderiam ser alcançados para proporcionar estimativas mais úteis a aplicações em projectos de engenharia e diversos. Neste sentido, recomenda-se para investigações futuras as seguintes acções:

- Utilização de mapas de solos e uso e ocupação de terra com classificação mais detalhada e com informação dos solos de profundidade maiores que 1 metro;
- Uso de modelos de elevação digital de maior resolução e dados meteorológicos de outras fontes;
- Aumento do período de observação de dados para a calibração e validação;
- Consideração de outros parâmetros de calibração além dos considerados neste trabalho;
- Uso de mapas de uso e ocupação do solo, tipos de solo, modelos de elevação digital que comungam da mesma época temporal com as observações utilizadas no processo de calibração e validação.

## 8. BIBLIOGRAFIA

### 8.1. Referências bibliográficas

Abbaspour, K. C. (2015). *SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs*. Eawag. Obtido de [https://swat.tamu.edu/media/114860/usermanual\\_swatcup.pdf](https://swat.tamu.edu/media/114860/usermanual_swatcup.pdf)

Almeida et al. (2018). CALIBRATION AND VALIDATION OF THE SWAT HYDROLOGICAL MODEL FOR THE MUCURI RIVER BASIN. *Engenharia Agrícola*, 55-63.

Arguello, F. V. (2017). SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA DA BACIA DO RIO PARAITINGA PARA ANÁLISE DAS POTENCIAIS CAUSAS DO EVENTO EXTREMO DE CHEIA E DESASTRE OCORRIDO NA PASSAGEM DE ANO DE 2009/2010. Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre, INPE, São José dos Campos. Obtido de <<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34P/3ML4LJ2>>

Arnold et al. (1998). LARGE AREA HYDROLOGIC MODELING AND ASSESSMENTPART I: MODEL DEVELOPMENT. *JAWRA*, Vol. 34(n. 1), P. 73-87.

Arnold et al. (2000). Regional estimation of base flow and groundwater recharge in the Upper Mississippi river basin. *Journal of Hydrology*, Vol. 227, P. 21-40.

Arnold et al. (2012). *SWAT: MODEL USE, CALIBRATION, AND VALIDATION*. ASABE, Vol. 55(n. 4), P. 1491-1508.

Arnold, J. G., & Williams, J. R. (1995). *SWRRB - A watershed scale model for soil and water resources management*. SINGH, V. P. (Ed.) *Computer Models of Watershed Hydrology*. Highlands Ranch: Water Resources.

Baldissera, G. C. (2005). Aplicabilidade do Modelo de Simulação Hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para a Bacia Hidrográfica do Rio Cuiabá/MT. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente), Universidade Federal do Mato Grosso, Instituto de Ciências Exactas, Cuiabá.

Cuceloglu et al. (2017). Assessing the Water-Resources Potential of Istanbul by Using a Soil andWater Assessment Tool (SWAT) Hydrological Model. *Water*, 1-18.

Feitosa, F. (2000). Hidráulica de Poços. In Hidrogeologia Conceitos e Aplicações. LABIH-UFPE. Fortaleza: CPRM/REFO.

Frazão, W. (1 de Fevereiro de 2017). Ciclo Hidrológico. Obtido em 28 de Outubro de 2021, de Biologia: A ciência da vida: [https://wesleibio.blogspot.com/2016/10/ciclo-hidrologico\\_21.html](https://wesleibio.blogspot.com/2016/10/ciclo-hidrologico_21.html)

Gan, T. Y. et al. (1997). Effects of model complexity and structure, data quality, and objective functions complexity and structure, data quality, and objective functions. Journal of Hydrology, Vol. 192(n. 1), P. 81-103.

Gassmam et al. (2007). The Soil and Water Assessment Tool: historical development, applications, and future research directions. Transactions of the ASABE, Vol. 50, P. 1211-1250.

Hipólito, J. R., & Vaz, A. C. (2017). HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS (3 ed.). Lisboa: IST Press.

Lelis et al. (2012). Análise de Sensibilidade e Calibração do Modelo Swat Aplicado em Bacia Hidrográfica da Região Sudeste do Brasil. R. Bras. Ci. Solo(n. 36), P 623-634.

Lelis, T. A. (2011). Modelagem do Escoamento Superficial e Perda de solo na Bacia do Ribeirão São Bartolomeu, Zona da Mata de Minas Gerais, utilizando o Simulador SWAT. Tese para obtenção do título de Doctor Scientiae, Universidade Federal de Viçosa, Pós Graduação em Engenharia Civil, Viçosa.

Molnar, P. (2011). Calibration. Watershed Modelling SS 2011. Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management. Zürich: ETHZ.

Neitsch et al. (2011). Ferramentas de Avaliação de solo & Água. Relatório técnico No. 406, Texas A&M University System, Instituto de Recursos Hídricos do Texas, Texas. Obtido de <https://swat.tamu.edu/media/99193/swat2009-theory-portuguese.pdf>

Pereira, D. D. (2013). Simulação Hidrológica na Bacia Hidrográfica do Rio Pomba usando o Modelo SWAT. tese para obtenção do título Doctor Scientiae, Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, Viçosa.

Quintela, A. C. (1996). Hidrologia e Recursos Hídricos. Lisboa: Ist.

Saha et al. (2010). The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. BAMS - Bulletin of American Meteorological Society, P. 1015-1058

Setegn et al. (2008). Hydrological Modelling in the Lake Tana Basin, Ethiopia Using SWAT Model. The Open Hydrology Journal, 49-62.

Silva, L. R. (2010). Análise de incertezas e avaliação dos factores influentes no desempenho de modelos de simulação de bacias hidrográficas. Tese (Doutorado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos), Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Simmers et al. (1990). Groundwater Recharge: A Guide to Understanding and Estimating Natural Recharge. IAH International Contributions to Hydrogeology, 8, Taylor and Francis Balkema, Rotterdam.

Soil Conservation Service Engineering Division. (1986). Urban hydrology for small Watersheds. U.S. Department of Agriculture, Technical Release 55.

Souza, L. R. (2012). SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA E APLICAÇÃO DE UMA ANÁLISE MULTIVARIADA NO ESTUDO DE CHUVA-VAZÃO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Universidade Federal de Campina Grande, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Campina Grande.

SOUZA, V. A. (2015). Monitoramento hidrossedimentológico com suporte do modelo SWAT na Amazônia ocidental – bacia do rio Machadinho/RO. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Tucci, C. E. (1998). *Modelos Hidrológicos*. Porto Alegre: UFRGS/ABRH.

Tucci, C. E., & Collischonn, W. (Jul/Set de 2003). Ajuste Multiobjetivo dos Parâmetros de um Modelo Hidrológico. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol. 8(n. 3), 27-39.

USBR. (1977). Design of small dams. Denver.

Vaz, A. C. (2007). Hidrologia - Manual da Disciplina. Universidade Eduardo Mondlane, Departamento de Engenharia Civil, Maputo.

Viola, M. R. (2008). Simulação hidrológica na região Alto Rio Grande a montante do reservatório de Camargos/CEMIG. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Água e Solo), Universidade Federal de Lavras, Lavras.

White, K., & Chaubey, I. (2005). Sensitivity Analysis, Calibration and Validation for a Multisite and Multivariable SWAT Model. *JAWRA: Journal of American Water Resources Association*, 1077-1089. Obtido de <http://dx.doi.org/10.1111/j.1752-1688.2005.tb03786.x>

## **8.2. Bibliografia consultada**

Abbaspour et al. (2015). A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology*, 733-752.

Adriolo et al. (2008). Calibração do modelo SWAT para a produção e transporte de sedimentos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PEQUENAS E MÉDIAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS. 6. Belo Horizonte: Anais.

ALVES et al. (2017). APLICABILIDADE DO MÉTODO CN-SCS A UMA BACIA HIDROGRÁFICA REPRESENTATIVA DOS LATOSSOLOS NO SUL DE MG. Maceió: CONBEA.

Andrade et al. (2012). MODELOS HIDROLÓGICOS: CONCEITOS E APLICABILIDADES. *Revista de Ciências Ambientais*, vol. 6(n. 2), P. 35-47.

Cabrera, J. (s.d.). Calibración de Modelos Hidrológicos. Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil.

Câmara, G., & Monteiro, A. M. (2001). Conceitos básicos em ciência da geoinformação. In: *Introdução à ciência da geoinformação*,. São Paulo: INPE.

Cecílio, R. A. (2002). Aplicação da equação de Green-Ampt na modelagem da infiltração de água em latossolo vermelho-amarelo estratificado. tese para obtenção do título Magister Scientiae, Universidade Federal de Viçosa, Pos-Graduação em Engenharia Agrícola, Viçosa.

Chow et al. (1988). Applied Hydrology. (B. J. Clark, & J. Morriss, Edits.) Singapore: McGraw Hills.

Christofoletti, A. (1999). Modelagem de Sistemas Ambientais (1a ed.). Edgard Blucher Ltda.

Cunha et al. (out/dez de 2015). Avaliação da acurácia dos métodos do SCS para cálculo da precipitação efetiva e hidrogramas de cheia. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Vol. 20(n. 4), P. 837-848.

Dias, M. A. (2017). Estudo hidrológico da Ribeiria do Amparo. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil - Construções Civis), Instituto Politécnico da Leiria, Escola Superior de tecnologia e Gestão, Leiria.

Dias, M. C. (2003). Hidráulica Aplicada 2: Hidrologia, Hidrologia Urbana e Aproveitamentos Hidráulicos. Escola Superior de Tecnologia e de Gestão.

Machado et al. (2003). Simulação de escoamento em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol. 8, 147-155.

Magalhães et al. (2004). Manual de Abastecimento de Água . Monte Santo de Minas: Engenharia & Projectos.

Mathias et al. (out/Dez de 2013). Implicações Geomorfológicas das Alterações do Escoamento Superficial pela Urbanização: Análise dos Processos Erosivos na Bacia Hidrográfica do Córrego Tucunzinho (São Pedro — SP). RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Vol. 18(n. 4), P. 101-113.

Minoti, R. T. (2006). Abordagens Qualitativa e Quantitativa de Micro-Bacias Hidrográficas e Áreas Alagáveis de um Compartimento do Médio Mogi-Superior/SP. Dissertação (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental), Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo.

Moldan, B., & Cerny, J. (1994). Small catchments research. In: Biogeochemistry of small catchment: a tool for environmental research (pp. P. 1-29). Chichester: John Wiley & Sons.

Nunes et al. (2011). Estimativa de coeficientes de escoamento superficial na bacia hidrográfica do rio Atuba: Curitiba e região metropolitana – Paraná/ Brasil. UFPR, Departamento de Geologia. Curitiba: Boletim Paranaense de geociências.

Ocampo, O. L., & Vélez, J. J. (2014). Análisis comparativo de modelos hidrológicos de simulación continua en cuencas de alta montaña: caso del Río Chinchiná. Revista Ingenierías Universidad de Medellín, Vol. 13(n. 24), P. 44-58.

Oliveira, C. P. (2012). Plataforma de Análise e Simulação Hidrológica - PLASH. Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo.

OSTA, A. .. (1997). Influência da Urbanização no Comportamento Hidrológico de Bacias de Drenagem Município do Rio de Janeiro – RJ. In: VII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada e I Fórum Latino-Americano de Geografia - UFPR. Curitiba: Anais.

Rennó, C. D., & Soares, J. V. (2000). Modelos hidrológicos para gestão ambiental. Programa de Ciencia e Tecnologia para Gestão de Ecossistemas- Relatório técnico parcial. MCT/INPE.

SANTOS, L. C. (2010). ESTIMATIVA DE VAZÕES MÁXIMAS DE PROJETO POR MÉTODOS DETERMINÍSTICOS E PROBABILÍSTICOS. PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL, UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO, CENTRO TECNOLÓGICO, Vitória.

Saraiva et al. (2011). Simulação Hidrológica Mensal em Bacias Hidrográficas sem Monitoramento Fluviométrico. RBRH-Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Vol. 16(n. 1), P. 115-125.

Silva, L. (2007). Modelagem e Geoprocessamento na identificação de áreas com risco de inundação e erosão na bacia do Rio Cuiá - João Pessoa. Dissertação(Mestrado em Engenharia Urbana). João Pessoa: UFPB/CT.

Souza, W. V. (2016). APLICAÇÕES DO MODELO SWAT NO BRASIL:. trabalho final do curso, Universidade Federal de Juiz de Fora, Colegiado do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Juiz de Fora.

Srinivasan, R., & Arnold, J. G. (1994). Integration of the basin-scale water quality model with GIS. *Water Resources Bulletin*, Vol. 30(n. 3), P. 453-462. Obtido de <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/j.1752-1688.1994.tb033>

TODD, D. K. (1959). *Hidrologia de Águas Subterrâneas*. São Paulo: Edgar Blücher.

Tucci, C. E. (2005). *Modelos Hidrológicos* (2 ed.). Porto Alegre: UFRGS.

Vogel, R. M., & Fonnessey, N. M. (1994). Flow-duration curves. I: New Interpretation and Confidence Intervals. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 120(4), 485-504

## **9. ANEXOS**

- 9.1. Metodologia de cálculo do escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo;
- 9.2. Descodificação da classificação *IGBD land cover*;
- 9.3. Escoamentos médios mensais das subáreas drenantes;
- 9.4. Unidades de resposta hidrológica.

## 9.1. Metodologia de cálculo do escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo

### 9.1.1. Escoamento superficial

O modelo SWAT fornece dois métodos para estimar o escoamento superficial: o procedimento de número de curva SCS (SCS, 1972) e o método de infiltração Green & Ampt (1911). Porém a aplicação do último método requer dados de precipitação sub-diário fornecido pelo usuário (Neitsch et al., 2011). Não sendo possível obter dados de precipitação sub-diário, apenas se abordará o primeiro método.

O método do Número de Curva (CN) desenvolvido pelo U.S. *Department of Agriculture (USDA) Soil Conservation Service (SCS)* estabelece que a relação entre o volume de infiltração acumulada após o início do escoamento superficial e o volume de infiltração potencial é igual a relação entre o volume instantâneo de escoamento superficial e o volume total de precipitação. Deste pressuposto deriva a equação 7:

$$Q_{\text{surf}} = \frac{(R_{\text{day}} - I_a)^2}{R_{\text{day}} - I_a + S} \quad (\text{Eq. 7})$$

Onde:  $Q_{\text{surf}}$  é escoamento acumulado ou excesso de precipitação (mm);  $R_{\text{day}}$  é a precipitação para o dia (mm);  $I_a$  é a abstração inicial que inclui armazenamento superficial, interceptação e infiltração antes do escoamento (mm) e  $S$  é o parâmetro de retenção ou infiltração potencial (mm).

O escoamento superficial ocorre apenas quando  $R_{\text{day}} > I_a$ .

A relação entre  $I_a$  e  $S$  também é preconizada pelo método de SCS como:

$$I_a = \lambda S \quad (\text{Eq. 8})$$

sendo  $\lambda$  uma constante de proporcionalidade entre a abstração inicial da precipitação e o armazenamento potencial de água no solo. Originalmente, o método considera  $\lambda = 0.2$ . Levando em consideração esta relação é possível rescrever a equação 7 da seguinte forma:

$$Q_{\text{surf}} = \frac{(R_{\text{day}} - 0.2S)^2}{R_{\text{day}} + 0.8S} \quad (\text{Eq. 9})$$

Dada as dificuldades encontradas para se determinar o potencial máximo de retenção, o SCS (1972), adotou um índice denominado número da curva de escoamento, representado por CN, obtido em função da cobertura do solo pela vegetação, tipo de preparo e classe de solo. Este índice é relacionado com a retenção potencial máxima segundo a equação 10:

$$S = 25.4 \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (\text{Eq. 10})$$

O Número (CN) varia entre 0, para condutividade hidráulica infinita, e 100, para uma bacia totalmente impermeável (Mathias et al., 2013).

Segundo TUCCI et al. (1995), a aplicação do método do SCS consiste nas seguintes etapas:

- a) Determinação do grupo hidrológico do solo;
- b) Escolha das condições de saturação do solo;
- c) Determinação de valores de CN para a condição de umidade do solo desejada
- d) determinação do escoamento superficial pela equação 7.

#### I. Grupos hidrológicos dos solos

O serviço de Conservação de Recursos Naturais dos EUA (NRCS – Natural Resource Conservation Service, 1996)) define um grupo hidrológico como um grupo de solos com potencial de escoamento semelhante sob tempestade e condições de cobertura similares. O mesmo autor classifica os solos em quatro grupos hidrológicos com base em características de infiltração dos solos. Estas características são profundidade do lençol de água sazonalmente elevado, condutividade hidráulica saturada e profundidade a uma camada de baixa permeabilidade (Neitsch et al., 2011).

Os grupos hidrológicos considerados no método do SCS e suas características estão representados na tabela 9-1.

Tabela 9-1. Grupos hidrológicos e suas características. Adaptado do USBR (1977).

<b>Grupo hidrológico</b>	<b>Características</b>
A	Potencial mínimo de escoamento superficial e alta taxa de infiltração, inclui solos arenosos profundos com pouco silte e argila, e também muito permeável, apresenta taxa de infiltração de 8-12 mm/h.
B	A maior parte dos solos arenosos, menos profundo ou menos compacto que o grupo A, porém com uma infiltração média superior e menos permeável que o anterior, apresenta taxa de infiltração de 4-8 mm/h.
C	Solos pouco profundos que geram escoamento superficial acima da média e com infiltração inferior à média, com porcentagem considerável de argila, possui taxa de infiltração de aproximadamente 1 - 4 mm/h.
D	Solos pouco profundos, com infiltração muito baixa, gerando muito escoamento superficial, contendo mais argila do tipo 2:1.

## II. Condição antecedente da humidade do solo

O método de SCS define 3 condições de humidade antecedente:

- Condição de humidade antecedente I - solos secos: as chuvas, nos últimos cinco dias, não ultrapassaram 15 mm;
- Condição de humidade antecedente II - situação média na época das cheias: as chuvas, nos últimos cinco dias, totalizaram de 15 a 40 mm;
- Condição de humidade antecedente III - solo húmido (próximo da saturação): as chuvas, nos últimos cinco dias, foram superiores a 40 mm.

Os últimos cinco dias considerados no método do SCS são os cinco dias antecedentes ao dia da precipitação máxima analisada, em uma área a ser estudada (Nunes et al., 2011).

### III. Número da Curva do SCS

Como já referido anteriormente, o número da curva, CN, foi relacionado com as características das bacias hidrográficas que dizem respeito ao tipo de solos e respectivo uso e ao estado de humedecimento dos solos anteriormente às cheias (Hipólito & Vaz, 2017).

Os números de curva típicos para condição de humidade II estão listados nas tabelas 2:1-1, 2:1-2 e 2:1-3 do Soil Conservation Service Engineering Division (1986) para várias coberturas de terra e tipos de solo. Esses valores são adequados para uma inclinação de 5% (Neitsch et al., 2011).

Uma vez que o método do SCS fornece valores de CN apenas para condição de humidade II (CN<sub>2</sub>), os valores de CN para as condições de humidade I (CN<sub>1</sub>) e III (CN<sub>3</sub>) podem ser obtidas por meio das seguintes equações (Arnold & Williams, 1995):

$$CN_1 = CN_2 - \frac{20(100 - CN_2)}{100 - CN_2 + \exp[2.5333 - 0.0636(100 - CN_2)]} \quad (\text{Eq. 11})$$

$$CN_3 = CN_2 \times \exp[0.00673(100 - CN_2)] \quad (\text{Eq. 12})$$

Arnold e Williams (1995) também desenvolveram uma equação que ajusta o valor de CN<sub>2</sub> para diferentes declividades, superando a particularidade original (5%).

$$CN_{2_s} = \frac{CN_3 - CN_2}{3} [1 - 2 \exp(-13.86 \cdot slp)] + CN_2 \quad (\text{Eq. 13})$$

Onde: CN<sub>2s</sub> - representa o valor ajustado de CN<sub>2</sub> para diferentes declividades; CN<sub>3</sub> corresponde o CN na Condição de humidade III e slp - é a declividade média da bacia hidrográfica.

#### 9.1.2. Escoamento subsuperficial

A água que penetra no solo pode seguir diferentes percursos. A primeira possibilidade é desta ser absorvida pelo solo (ocupando os espaços vazios), pelas plantas ou por evaporação. A segunda é da mesma percolar para além da base do perfil do solo e abastecer os aquíferos. E a terceira possibilidade é da água que penetra no solo, se deslocar lateralmente no perfil e contribuir para o caudal do rio (Neitsch et al., 2011).

O solo é composto por 2 zonas distintas. A zona não saturada ou de aeração e a zona saturada. A zona de aeração é delimitada pela superfície do solo e o nível freático e a zona saturada fica abaixo do nível freático e tem como limite inferior uma camada impermeável. Estas zonas estão devidamente ilustradas na figura 9-1. O escoamento subsuperficial ocorre na zona de aeração e na zona saturada ocorre o escoamento subterrâneo, descrita em 9.1.3.

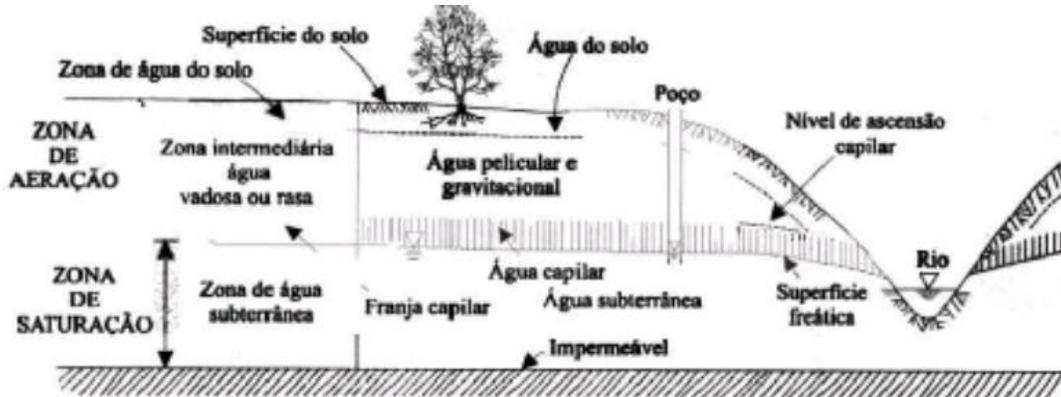


Figura 9-1. Distribuição vertical da água no solo e subsolo, mostrando as diversas zonas de umidade (modificado de Bear & Verruijot, 1987, in Feitosa,2000).

Pela descrição anterior, denota-se que a percolação e o escoamento lateral no perfil do solo ocorrem na zona de aeração, sendo portanto parcelas do escoamento subsuperficial. A figura 9-2 ilustra as diferentes componentes do escoamento subsuperficial.

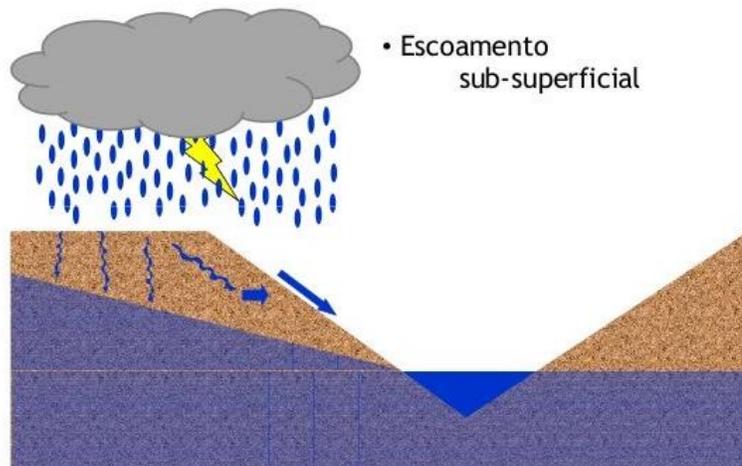


Figura 9-2. Ilustração das diferentes componentes do escoamento subsuperficial.

### 9.1.2.1. Percolação

O modelo SWAT calcula a percolação para cada camada de solo no perfil. O modelo considera a ocorrência da percolação se a água que infiltra exceder a capacidade de campo para a camada em questão e a camada inferior não estiver saturada. O modelo também exclui a ocorrência de percolação na camada quando esta estiver congelada.

O volume de água disponível para a percolação na camada do solo é calculada pela equação 14:

$$SW_{ly,excess} = SW_{ly} - FC_{ly} \quad (\text{Eq. 14})$$

Onde  $SW_{ly,excess}$  é o volume de água drenável na camada do solo em um determinado dia (mm),  $SW_{ly}$  é a humidade da camada do solo em um indicado dia (mm) e  $FC_{ly}$  é a humidade da camada do solo com uma capacidade de campo (mm).

O modelo calcula a quantidade de água que passa de uma camada para a sua subjacente utilizando-se a metodologia de rota de armazenamento. A equação usada para calcular a quantidade de água que percola na próxima camada é:

$$w_{perc,ly} = SW_{ly,excess} \cdot \left( 1 - \exp \left[ - \frac{\Delta t}{TT_{perc}} \right] \right) \quad (\text{Eq. 15})$$

Onde:  $w_{perc,ly}$  é a quantidade de água que percola na camada de solo subjacente em um determinado dia (mm),  $SW_{ly,excess}$  é o volume de água drenável na camada do solo em um determinado dia (mm),  $\Delta t$  é a duração do intervalo de tempo (horas) e  $TT_{perc}$  é o tempo de duração da percolação (horas).

Se a HRU tiver um lençol freático sazonal elevado, a percolação não será possível quando:

$$SW_{ly+1} \leq FC_{ly+1} + 0.5 \cdot (SAT_{ly+1} - FC_{ly+1}) \quad (\text{Eq. 16})$$

Onde  $SW_{ly+1}$  é a humidade da camada de solo subjacente (mm),  $FC_{ly+1}$  é a humidade da camada do solo subjacente na capacidade de campo (mm), e  $SAT_{ly+1}$  é a quantidade de água na camada de solo subjacente quando estiver completamente saturada (mm).

### 9.1.2.2. Escoamento lateral

O modelo SWAT incorpora um modelo de cálculo do escoamento lateral desenvolvido por Sloan et al (1983) e resumido por Sloan & Moore (1984). A equação desenvolvida para o seu cálculo é:

$$Q_{lat} = 0.024 \cdot \left( \frac{2 \cdot SW_{ly,excess} \cdot K_{sat} \cdot slp}{\phi_d \cdot L_{hill}} \right) \quad (\text{Eq. 17})$$

Em que  $Q_{lat}$  é o escoamento lateral ou parcela de água que infiltra no solo, escoando lateralmente e desagua no rio,  $SW_{ly,excess}$  é o volume drenável da água armazenada na zona saturada da inclinação por área unitária,  $K_{sat}$  é a condutividade hidráulica saturada (mm/h),  $\phi_d$  é a porosidade drenável do solo (mm/mm),  $L_{hill}$  é o comprimento da inclinação ou encosta (m) e  $slp$  é a declividade da camada do solo.

### 9.1.3. Escoamento Subterrâneo

Como referido anteriormente, o escoamento subterrâneo ocorre na zona saturada denominada aquífero. Assim, pode se definir um aquífero como uma unidade geológica saturada que alimenta nascentes, rios, lagos e oceanos e de que pode ser extraída água em quantidade suficiente através de poços e furos (Hipólito & Vaz, 2017). Normalmente consideram-se 4 tipos de aquífero: confinado ou profundo, semi-confinado, freático ou raso e suspenso (Vaz, 2007).

O modelo SWAT simula apenas dois tipos de aquíferos em cada subbacia: o aquífero freático e o aquífero confinado. O aquífero freático é uma formação geológica permeável e parcialmente saturada de água, limitada na base por uma camada impermeável, em que nível de água está à pressão atmosférica. O aquífero confinado é uma formação geológica permeável e completamente saturada de água, limitada no topo e na base por camadas impermeáveis, em que a pressão da água é superior à pressão atmosférica (Baldissera, 2005).

Para a estimação do volume de água armazenada nos aquíferos confinado e freático, o modelo recorre as seguintes equações de equilíbrio:

- a) Aquífero freático

$$aq_{sh,i} = aq_{sh,i-1} + w_{rchrq,sh} - Q_{gw} - w_{revap} - w_{pump,sh} \quad (\text{Eq. 18})$$

Em que:  $aq_{sh,i}$  é a quantidade de água armazenada no aquífero freático no dia  $i$  (mm),  $aq_{sh,i-1}$  é a quantidade de água armazenada no aquífero freático no dia  $i-1$  (mm),  $w_{rchrq,sh}$  é a quantidade de recarga que entra no aquífero freático no dia  $i$  (mm),  $Q_{gw}$  é o fluxo da água subterrânea ou de base no canal principal no dia  $i$  (mm),  $w_{revap}$  é a quantidade de água penetrando a zona do solo em resposta às deficiências hídricas no dia  $i$  (mm) e  $w_{pump,sh}$  é a quantidade de água retirada do aquífero raso por bombeamento no dia  $i$  (mm).

b) Aquífero confinado

$$aq_{dp,i} = aq_{dp,i-1} + w_{deep} - w_{pump,dp} \quad (\text{Eq. 19})$$

Em que  $aq_{dp,i}$  é a quantidade de água armazenada no aquífero confinado no dia  $i$  (mm),  $aq_{dp,i-1}$  é a quantidade de água armazenada no aquífero confinado no dia  $i-1$  (mm H<sub>2</sub>O),  $w_{deep}$  é a quantidade de água percolando do aquífero freático para o aquífero confinado no dia  $i$  (mm),  $w_{pump,dp}$  é a quantidade de água retirada do aquífero confinado por bombeamento profundo no dia  $i$  (mm).

### 9.1.3.1. Recarga

Simmers et al. (1990) define a recarga como o fluxo de água através da zona não saturada do solo, que alcança o nível freático e se adiciona ao reservatório de água subterrânea.

A recarga total, isto é, que alimenta ambos aquíferos é determinada pelo modelo SWAT pela equação 20.

$$w_{rchrq,i} = \left[1 - \exp\left(-\frac{1}{\delta_{gw}}\right)\right] \cdot w_{seep} + \exp\left[-\frac{1}{\delta_{gw}}\right] \cdot w_{rchrq,i-1} \quad (\text{Eq. 20})$$

Em que:  $w_{rchrq,i}$  é a quantidade de recarga penetrando o aquífero no dia  $i$  (mm),  $\delta_{gw}$  é o tempo de atraso ou de drenagem das formações geológicas sobrepostas (dias),  $w_{seep}$  é a quantidade total de água que sai da base do perfil do solo no dia  $i$  (mm), e  $w_{rchrq,i-1}$  é a quantidade de recarga que entra no aquífero no dia  $i-1$  (mm).

A quantidade total de água saindo da base do perfil do solo no dia  $i$  é calculada pela equação:

$$w_{seep} = w_{perc,ly=n} + w_{crkbtm} \quad (\text{Eq. 21})$$

Em que  $w_{seep}$  é a quantidade total de água que sai da base do perfil do solo no dia  $i$  (mm),  $w_{perc,ly=n}$  é a quantidade de água que percola da camada mais baixa,  $n$ , no perfil do solo no dia  $i$  (mm) e  $w_{crk,btm}$  é a quantidade de água que passou o limite inferior do perfil do solo devido ao fluxo de retorno no dia  $i$  (mm).

O fluxo de retorno é a movimentação vertical de água livre ao longo dos macroporos (rachaduras) do solo até o horizonte do solo não saturado. A vazão de retorno que passou da base do perfil do solo é calculada pela equação:

$$w_{crk,btm} = 0.5 \cdot crk \cdot \left( \frac{crk_{ly=nn}}{depth_{ly=nn}} \right) \quad (\text{Eq. 22})$$

Onde  $w_{crk,btm}$  é a quantidade de fluxo de água que ultrapassou o limite inferior do perfil do solo devido à uma vazão de retorno (mm),  $crk$  é o volume total da rachadura para o perfil do solo em um determinado dia (mm),  $crk_{ly=nn}$  é o volume da rachadura para a camada mais profunda do solo ( $ly=nn$ ) em um determinado dia indicado como profundidade (mm), e  $depth_{ly=nn}$  é a profundidade da camada de solo mais profunda ( $ly=nn$ ) (mm).

A quantidade de água que percola da camada mais baixa,  $n$ , do perfil do solo no dia  $i$  pode ser determinada pela equação 15.

Uma fração da recarga total que entra no aquífero freático é desviada para o aquífero confinado por percolação. Esta fração é determinada pela equação 23.

$$w_{deep} = \beta_{deep} \cdot w_{rchr} \quad (\text{Eq. 23})$$

Onde:  $w_{deep}$  é a quantidade de água movendo para dentro do aquífero confinado no dia  $i$  (mm),  $\beta_{deep}$  é o coeficiente de percolação do aquífero e  $w_{rchr}$  é a quantidade de recarga entrando em ambos os aquíferos no dia  $i$  (mm).

#### 9.1.3.2. Fluxo de base

A água que escoar no rio proveniente da contribuição dos aquíferos freáticos é denominada fluxo de base. O modelo calcula este fluxo se a quantidade de água

armazenada no aquífero exceder um valor limite especificado pelo usuário,  $aq_{shthr,q}$ . Neste caso, o fluxo de base é calculado pela equação:

$$Q_{gw} = Q_{gw,0} \cdot \exp(-\alpha_{gw} \cdot t) \quad (\text{Eq. 24})$$

Na qual  $Q_{gw}$  é o fluxo da água subterrânea para o canal principal no dia  $i$  (mm),  $Q_{gw,0}$  é o fluxo da água subterrânea para o canal principal no início da recessão (tempo  $t=0$ ),  $\alpha_{gw}$  é a constante de recessão do escoamento de base e  $t$  é o tempo decorrido desde o início da recessão (dias).

### 9.1.3.3. REVAP

O modelo considera a ascensão de água da zona saturada para zona não saturada do solo, quer devido a evaporação ou a absorção por raízes profundas de plantas como REVAP. O modelo considera a ocorrência deste fenómeno apenas quando a quantidade de água armazenada no aquífero raso exceder o valor limite especificado pelo usuário,  $aq_{shthr,rvp}$ .

A quantidade máxima de água que é removida do aquífero via REVAP em um determinado dia é:

$$w_{revap,mx} = \beta_{rev} \cdot E_0 \quad (\text{Eq. 25})$$

Em que  $W_{revap,mx}$  é a quantidade máxima de água que penetrou na zona do solo, em resposta às deficiências hídricas (mm),  $\beta_{rev}$  é o coeficiente REVAP, e  $E_0$  é a evapotranspiração em potencial para o dia (mm).

A quantidade real de REVAP que ocorrerá em um determinado dia é calculada:

$$\begin{cases} w_{revap} = 0 & \text{se } aq_{sh} \leq aq_{shthr,rvp} \\ w_{revap} = w_{revap,mx} - aq_{shthr} & \text{se } aq_{shthr} < aq_{sh} < (aq_{shthr,rvp} + w_{revap,mx}) \\ w_{revap} = w_{revap,mx} & \text{se } aq_{sh} \geq (aq_{shthr,rvp} + w_{revap,mx}) \end{cases} \quad (\text{Eq. 26})$$

Onde  $w_{revap}$  é a quantidade de água que penetrou a zona do solo em resposta às deficiências hídricas (mm),  $w_{revap,mx}$  é a quantidade máxima de água que penetrou a zona do solo em resposta às deficiências hídricas (mm),  $aq_{sh}$  é a quantidade de água armazenada no aquífero freático no início do dia  $i$  (mm) e  $aq_{shthr,rvp}$  é o limite de nível da água do aquífero freático para que seja possível ocorrer o REVAP (mm).

## 9.2. Descodificação da classificação IGBD land cover e caracterização dos solos

### 9.2.1. Uso e ocupação do solo

A tabela 9-2 apresenta a descodificação dos acrónimos usados na classificação IGBP land cover.

Tabela 9-2 – Descodificação dos acrónimos referentes ao uso e ocupação do solo da classificação IGBP Land cover.

Código	Extensão	Tradução
CRDY	Dryland cropland and pasture	Pastagens e terrenos agrícolas de sequeiro
CRWO	Cropland/woodland mosaïc	Mosaico de terras de cultivo/ florestas
SHRB	Shrubland	Arbustos
SAVA	Savanna	Savana
FOBD	Deciduous broadleaf forest	Floresta de folhas largas caducas
FOEB	Evergreen broadleaf forest	Floresta de folhas largas perenes
FOMI	Mixed forest	Floresta mista
WATR	Water	Água
BSVG	Barren or sparsly vegetated	Vegetação esparsa ou estéril

### 9.2.2. Caracterização dos solos

As tabelas 9-3, 9-4 e 9-5 apresentam as características dos solos encontrados na bacia do Rio Muaguide relativos a composição, textura e a morfologia da terra, representadas pelos símbolos na sua conotação.

- *Vertisols* (V1-3a)

Tabela 9-3. Características relativas a composição, textura e morfologia dos *Vertisols* de acordo com a FAO (2003).

Conotação	Designação	Descrição
V	Solo dominante	Vertissolo (100%)
1	Percentagem do solo dominante	Apresenta 100% do solo dominante

3	Textura fina/pesada	100% do solo apresenta textura fina
a	Declividade plana	A declividade da região ronda entre 0% a 8%

- *Lithosols* (I-L-1b)

Tabela 9-4. Características relativas a composição, textura e morfologia dos *Lithosols* de acordo com a FAO (2003).

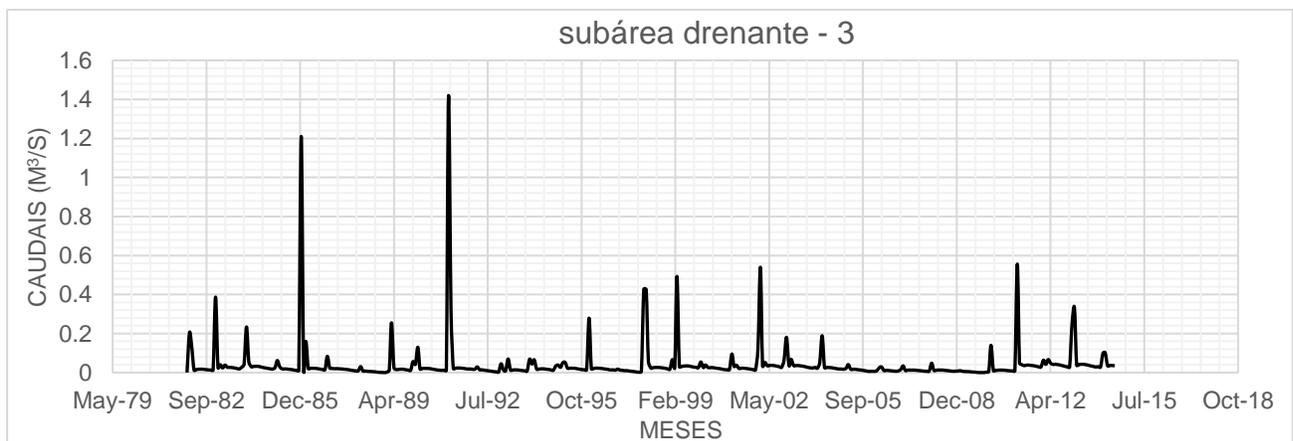
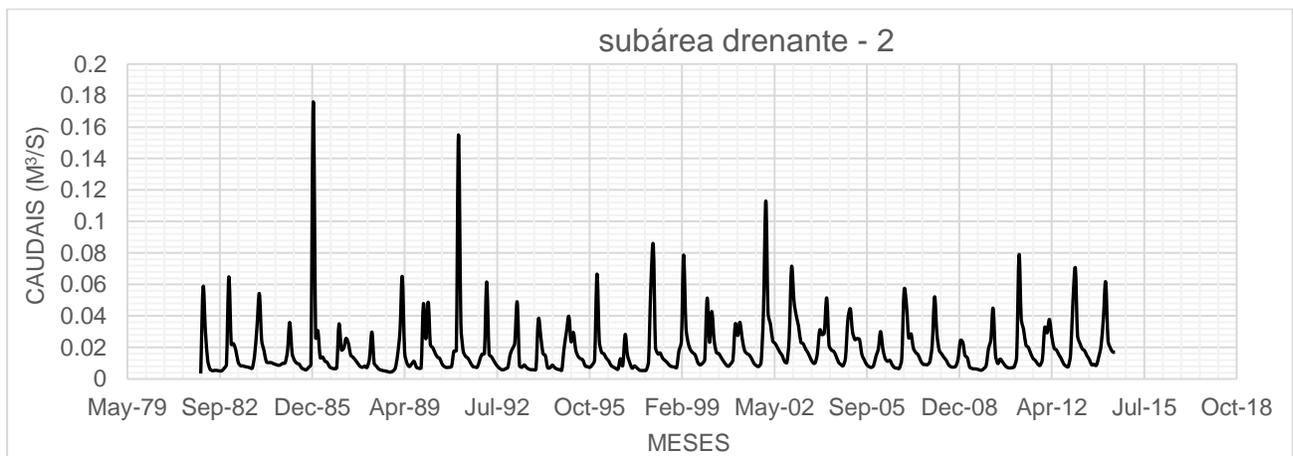
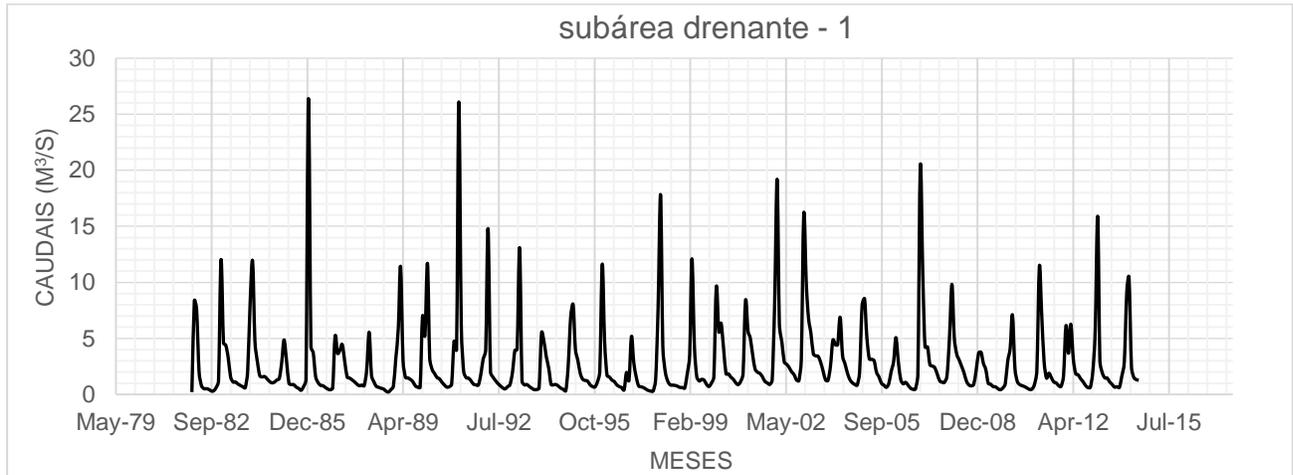
Conotação	Designação	Descrição
I	Solo dominante	litossolos
L	Solo associado	Apresenta 50% do solo dominante - litossolos (I) e 50% do solo associado – luvissois (L).
1	Textura grosseira	50% do solo apresenta textura grosseira e o resto textura média
b	Declividade ondulante	A declividade da região ronda entre 8% a 30%

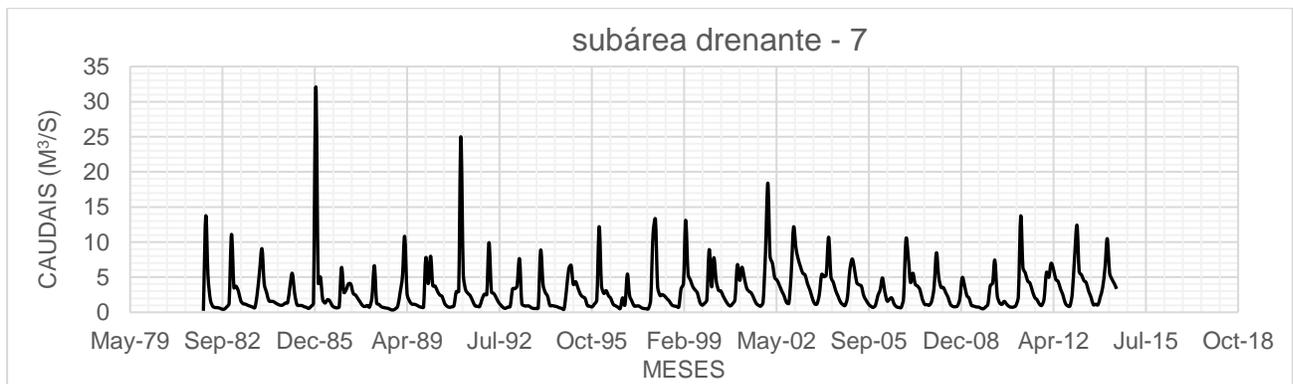
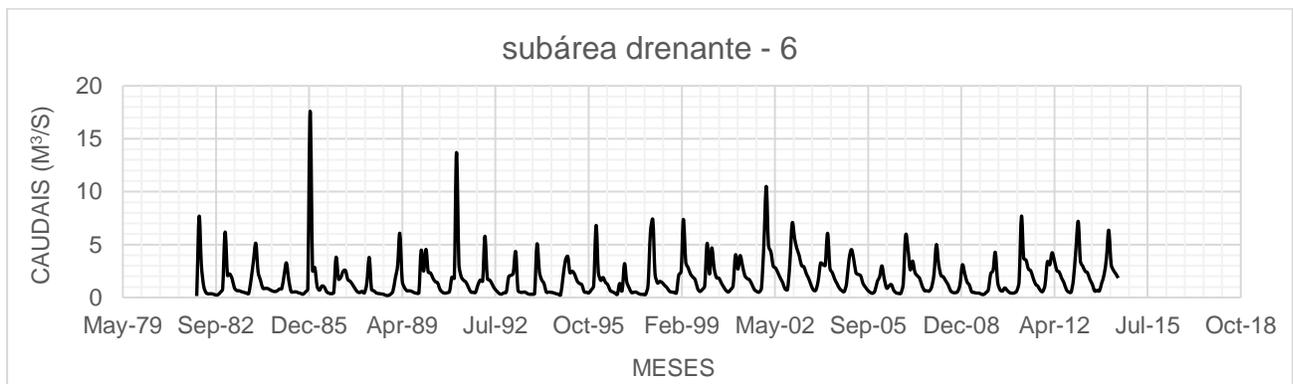
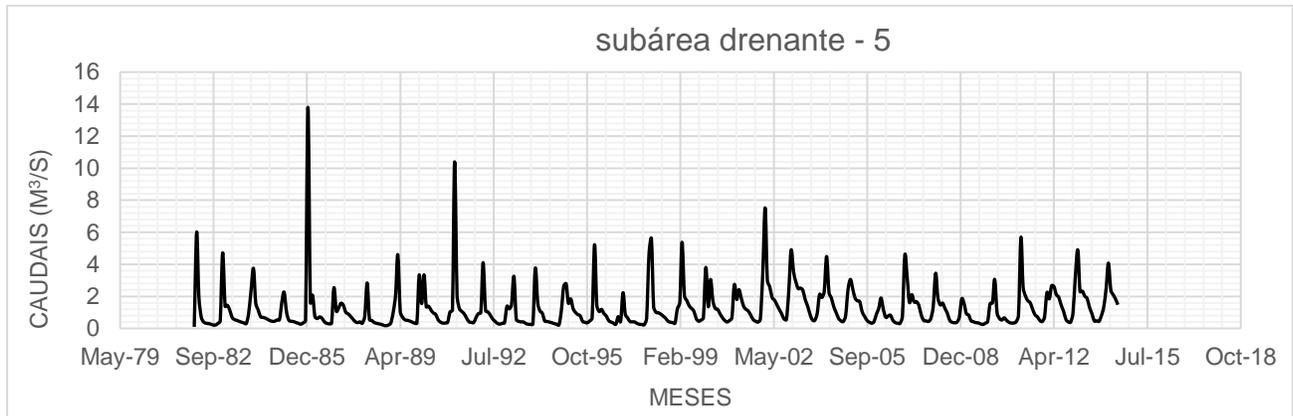
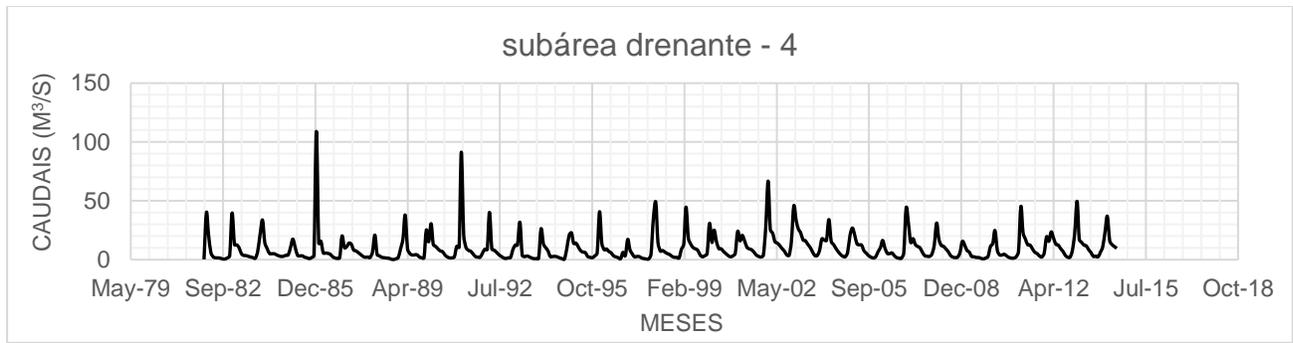
- *Ferric Luvisols* ( Lf87-2-3b)

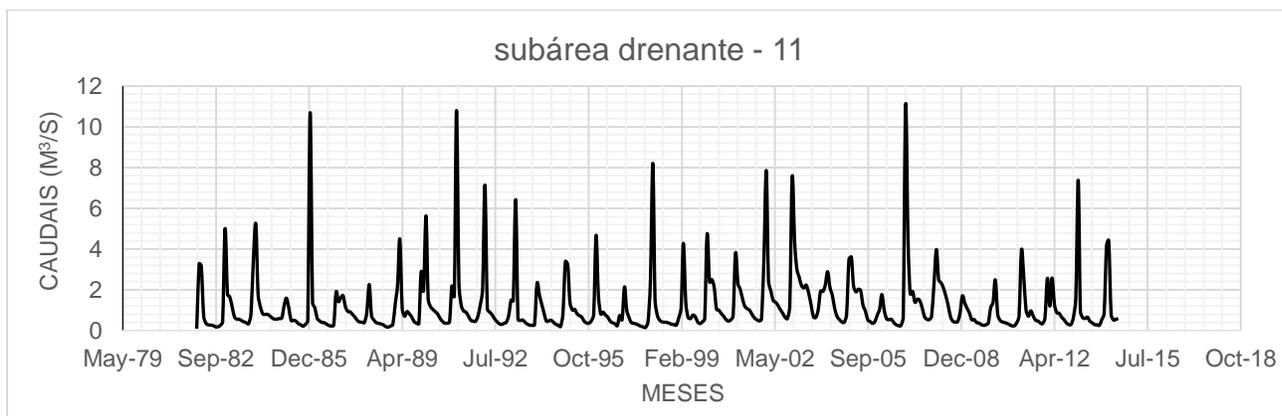
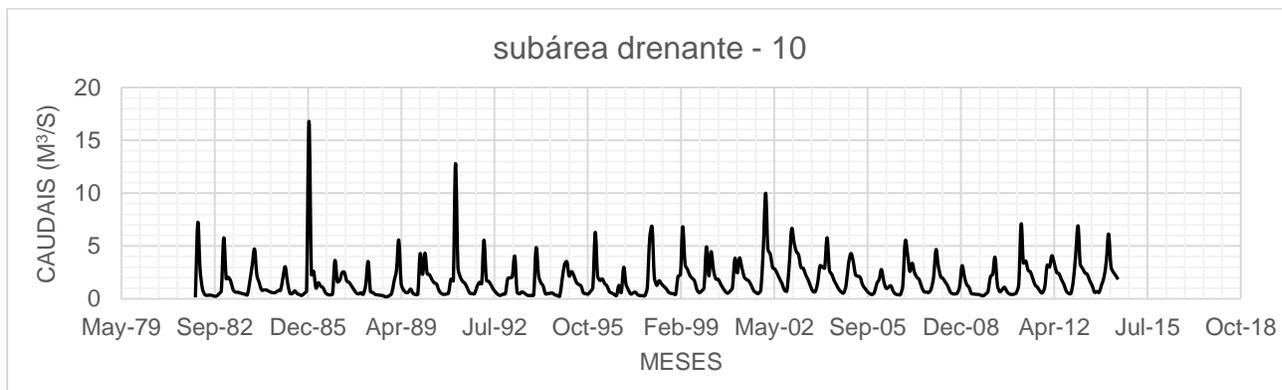
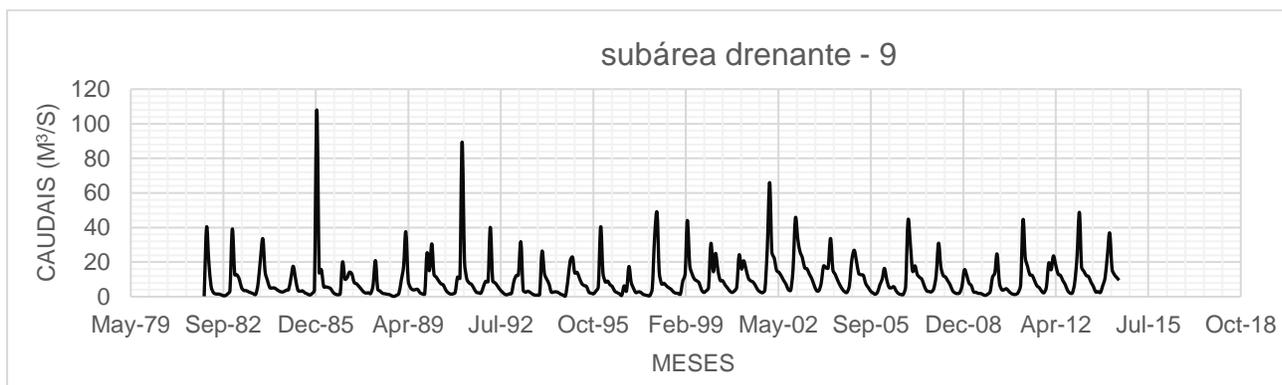
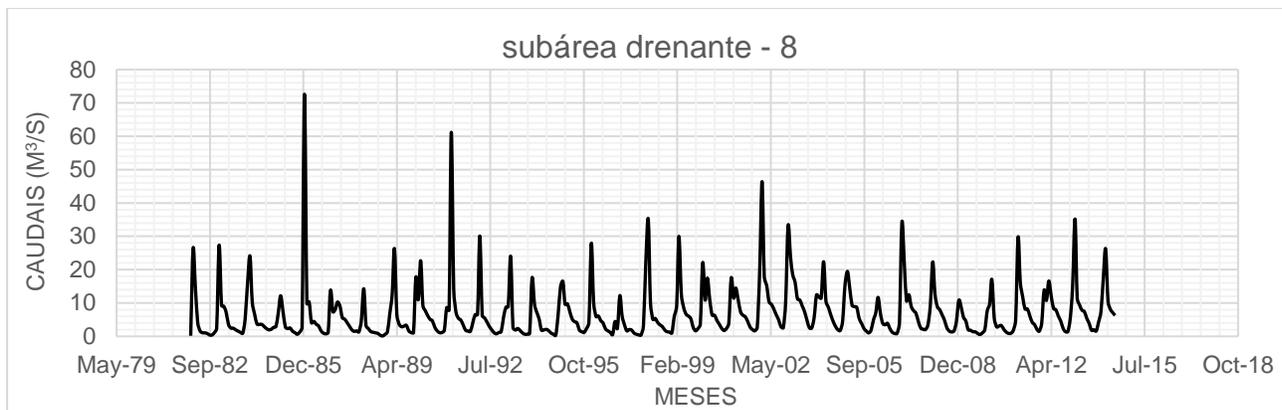
Tabela 9-5. Características relativas a composição, textura e morfologia dos Ferric Luvisols de acordo com a FAO (2003).

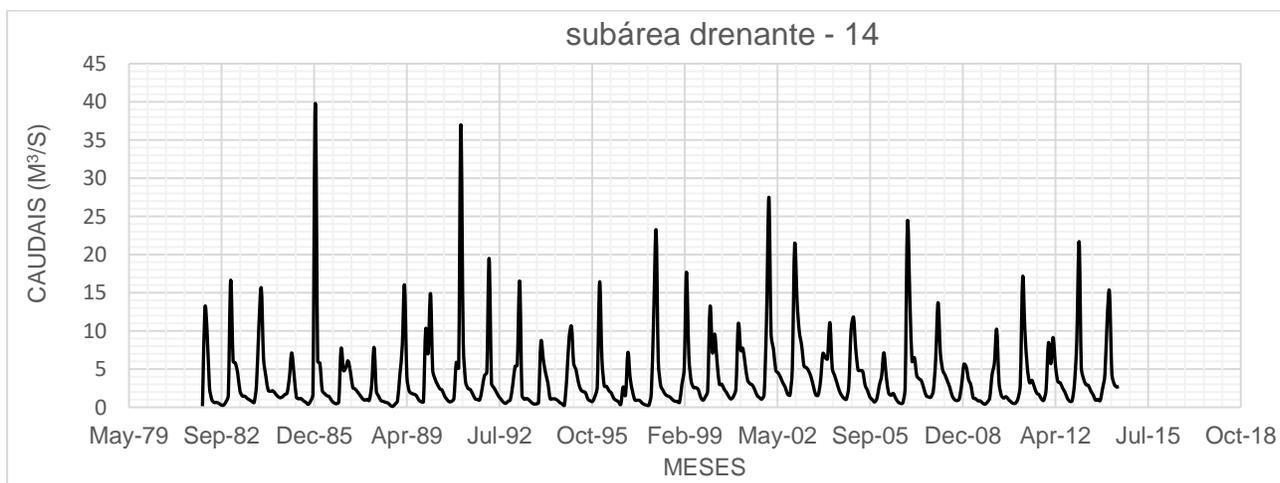
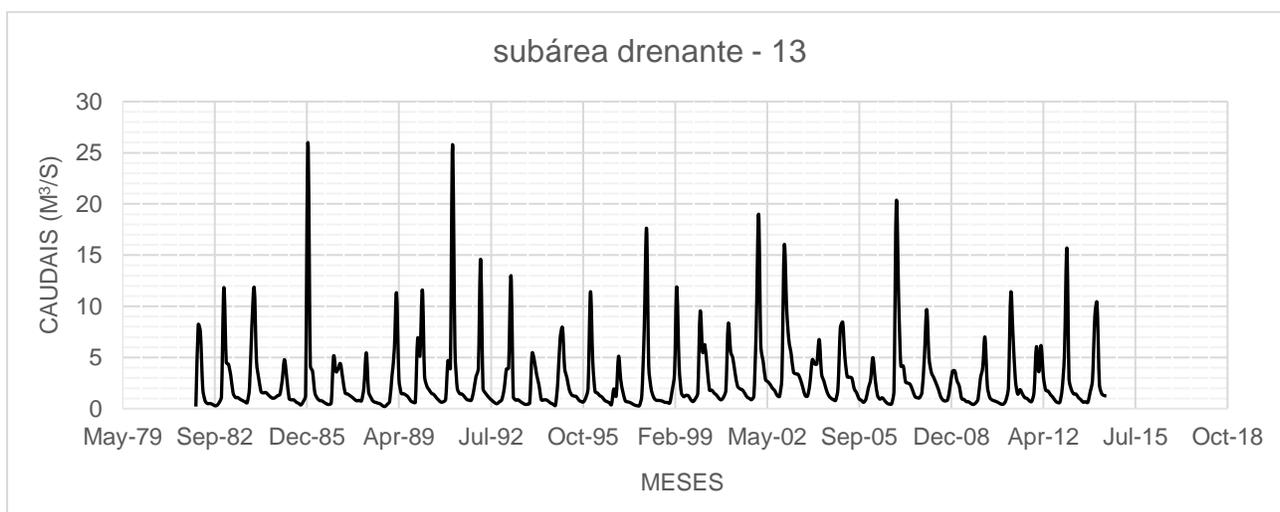
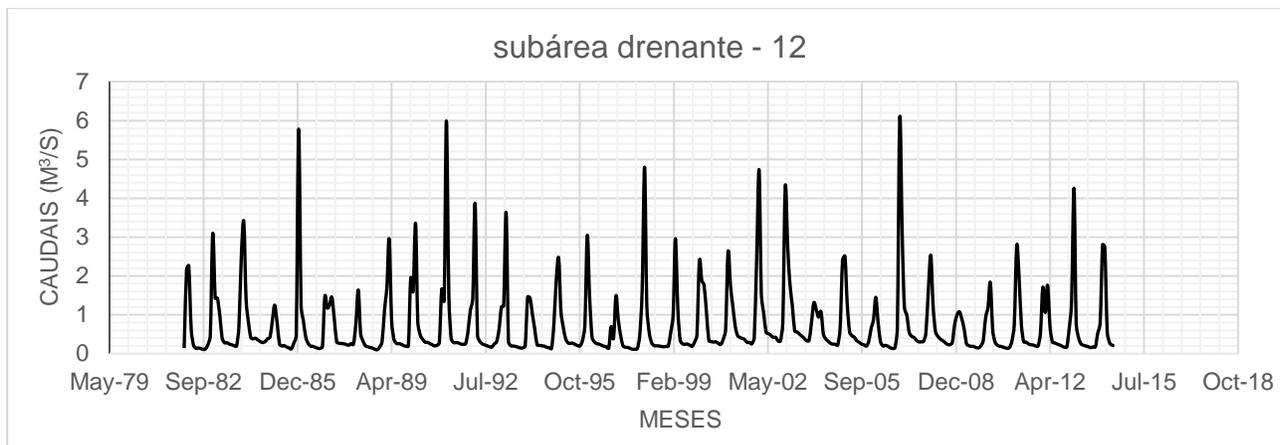
<b>Conotação</b>	<b>Designação</b>	<b>Descrição</b>
Lf	Solo dominante	Luvissóis férricos
87	Percentagem do solo dominante	Apresenta 70% do solo dominante - luvissóis Férricos (Lf) e 30% do solo associado – luvissóis Crómicos (Lc).
2	Textura média	65% do solo apresenta textura média
3	Textura pesada	35% do solo apresenta textura pesada
b	Declividade ondulante	A declividade da região ronda entre 8% a 30%

### 9.3. Escoamentos médios mensais das subáreas drenantes









#### 9.4. Unidades de Resposta Hidrológica (HRU's)

A tabela 9-6 apresenta as propriedades das unidades de resposta hidrológica (HRU's) de cada subárea drenante, nomeadamente, a subárea drenante a que este pertence, o uso de terra ou ocupação do solo, tipo de solo, a área em hectares e a percentagem deste em relação a subárea drenante.

Tabela 9-6. Propriedades das unidades de resposta hidrológica em cada subárea drenante.

HRU	Subárea drenante	Uso de terra	Tipo de solo	Area (ha)	% subárea drenante
01,01	1	FODB	I-L-1b	115.83	50.89
01,02	1	FODB	Lf87-2-3b	16.20	7.12
01,03	1	SHRB	Lf87-2-3b	95.58	41.99
02,01	2	FODB	Lf87-2-3b	147.42	64.54
02,01	2	FODB	I-L-1b	76.14	33.33
03,01	3	FOEB	V1-3a	298.89	15.49
03,02	3	CRDY	V1-3a	540.27	28.00
03,03	3	FODB	V1-3a	630.99	32.70
03,04	3	CRWO	V1-3a	387.99	20.11
04,01	4	SAVA	V1-3a	138.51	12.47
04,02	4	CRWO	V1-3a	196.02	17.65
04,03	4	CRDY	V1-3a	298.89	26.91
04,04	4	BSVG	V1-3a	304.56	27.43
04,05	4	WATR	V1-3a	140.94	12.69
05,01	5	FODB	V1-3a	6785.37	47.33
05,02	5	FODB	I-L-1b	5645.70	39.38
05,03	5	SHRB	V1-3a	491.67	3.43
05,04	5	SHRB	I-L-1b	1304.10	9.10
06,01	6	FODB	I-L-1b	12142.71	59.74
06,02	6	FODB	V1-3a	2071.98	10.19
06,03	6	FODB	Lf87-2-3b	4106.70	20.20
06,04	6	SHRB	I-L-1b	955.80	4.70

06,05	6	SHRB	Lf87-2-3b	151.47	0.75
07,01	7	FODB	V1-3a	587.25	40.23
07,02	7	FOEB	V1-3a	91.53	6.27
07,03	7	FOMI	V1-3a	780.84	53.50
08,01	8	FODB	I-L-1b	10794.06	60.32
08,02	8	FODB	V1-3 <sup>a</sup>	1023.03	5.72
08,03	8	FOMI	I-L-1b	290.79	1.63
08,04	8	FOMI	V1-3a	4905.36	27.41
09,01	9	FODB	V1-3a	2719.17	56.37
09,02	9	FOEB	V1-3a	1142.10	23.68
09,03	9	FOMI	V1-3a	515.97	10.70
09,04	9	CRWO	V1-3a	446.31	9.25
10,01	10	FODB	I-L-1b	13299.39	67.45
10,02	10	FODB	Lf87-2-3b	3914.73	19.85
10,03	10	SAVA	Lf87-2-3b	1689.66	8.57
11,01	11	SAVA	Lf87-2-3b	4736.07	23.91
11,02	11	CRDY	Lf87-2-3b	9667.35	48.80
11,03	11	FODB	Lf87-2-3b	5406.75	27.29
12,01	12	CRDY	Lf87-2-3b	7741.98	77.90
12,02	12	FODB	Lf87-2-3b	1071.36	10.24
12,03	12	SAVA	Lf87-2-3b	1179.36	11.87
13,01	13	FODB	Lf87-2-3b	7652.88	60.96
13,02	13	CRDY	Lf87-2-3b	2436.48	19.41
13,03	13	SAVA	Lf87-2-3b	2438.10	19.42
14,01	14	FODB	I-L-1b	8500.14	50.03
14,02	14	FODB	Lf87-2-3b	7807.59	45.96