

Mini curso de modelagem hidrológica: aplicando o método do hidrograma unitário com o HEC-HMS

Filipe Antonio Marques Falcetta

Palestra on-line apresentada no Mini-curso de modelagem hidrológica, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo-MEC, Campus Caraguatatuba, 15-18 de março, 2021.

A série "Comunicação Técnica" compreende trabalhos elaborados por técnicos do IPT, apresentados em eventos, publicados em revistas especializadas ou quando seu conteúdo apresentar relevância pública.

Mini-Curso de Modelagem Hidrológica

Aplicando o método do Hidrograma Unitário com o HEC-HMS

Filipe Falcetta - IPT

2021/1º Semestre

O que é um modelo?
Por que modelamos?



Que respostas procuramos de um modelo?

Modelagem em drenagem urbana



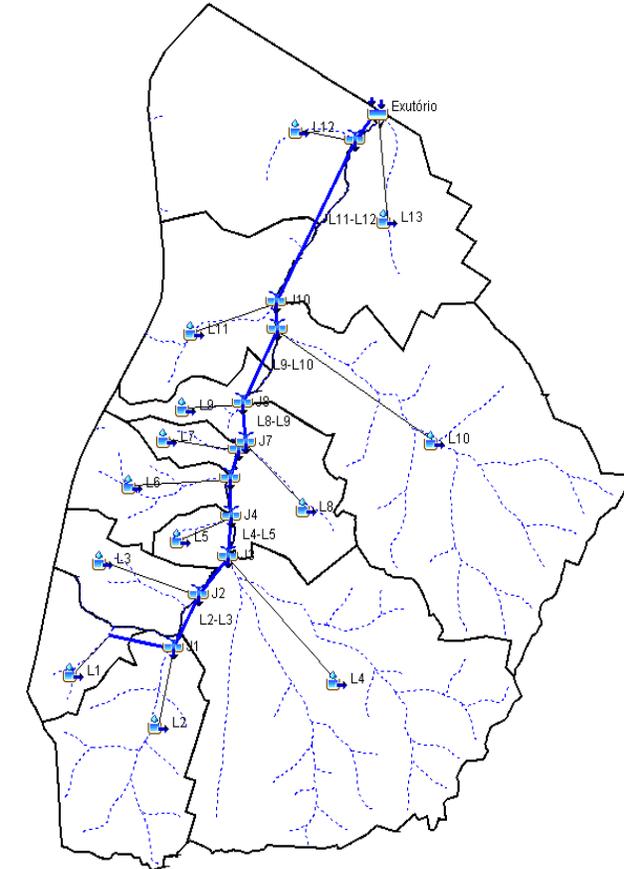
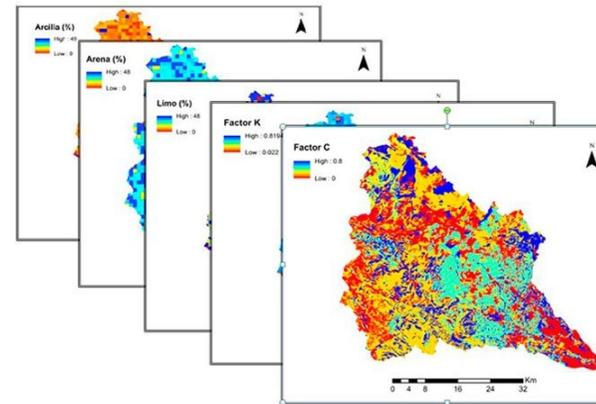
- Análise estatística de cheias depende de dados fluviométricos, muitas vezes inexistentes;
- Modelagem matemática chuva-vazão: utiliza as características hidráulicas e geomorfológicas das bacias, condições de impermeabilização, tempos de concentração e chuvas de projeto;
- Chuva de projeto: para cada distribuição temporal da chuva, tem-se respostas diferentes de vazão na bacia hidrográfica.

Tipos de modelos hidrológicos

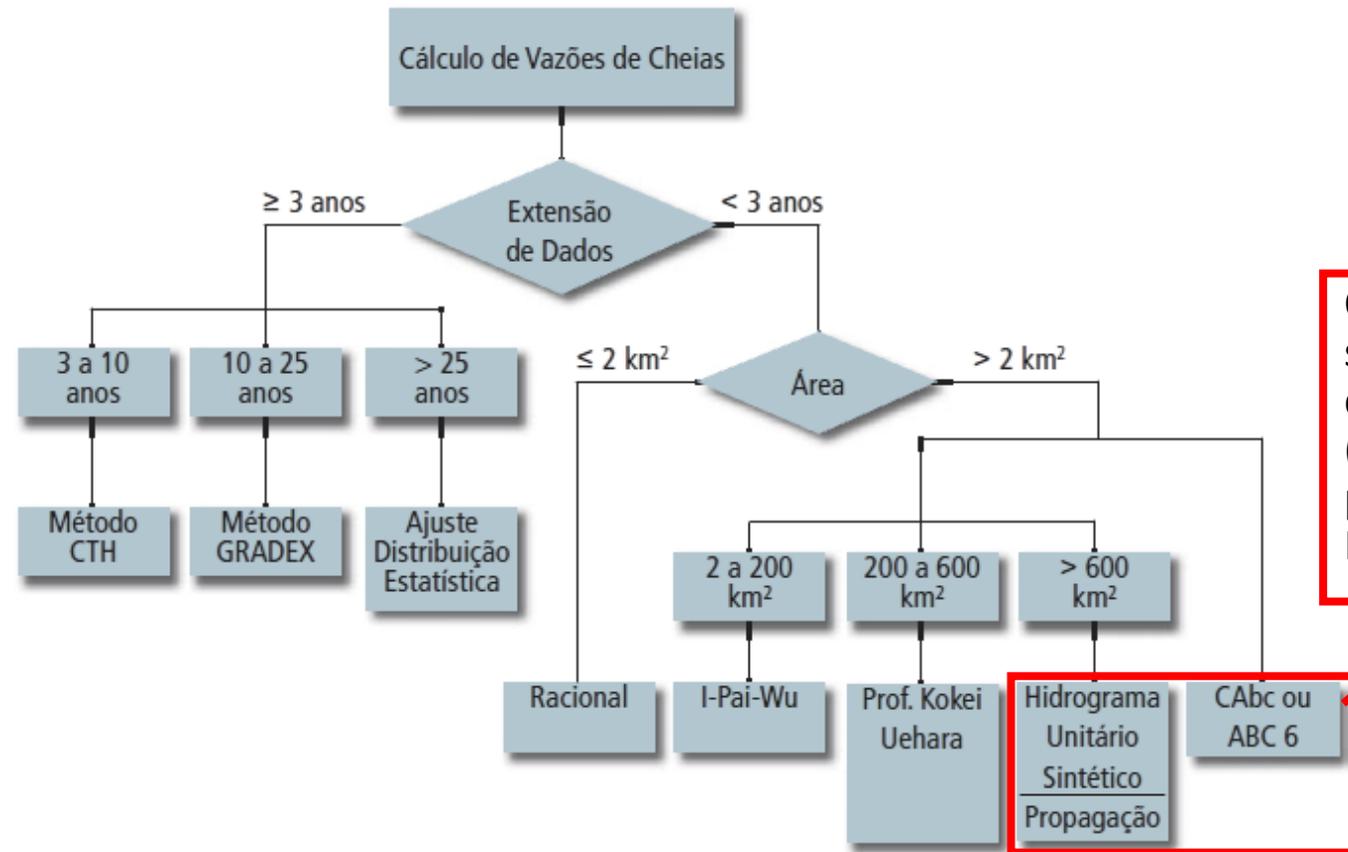
- **Modelo concentrado:** também chamado de modelo pontual, tanto a bacia hidrográfica como o ponto de interesse não tem representatividade espacial. Usado para pequenas bacias de ocupação homogênea, por exemplo em drenagem de pequenos loteamentos urbanos ou de pequenos bairros.

- **Modelo semi-distribuído:** a bacia hidrográfica é dividida em sub-bacias e os parâmetros hidrológicos e as vazões são determinadas utilizando vários modelos concentrados. Usado nas situações onde se tem necessidade de determinar melhor espacialmente a precipitação, em bacias de grande extensão ou com ocupação heterogênea.

- **Modelo distribuído:** modelos que usam softwares de geoprocessamento, a divisão por sub-bacias não é necessária, uma vez que as vazões são determinadas em cada pixel do desenho.



Escolha do modelo chuva-vazão

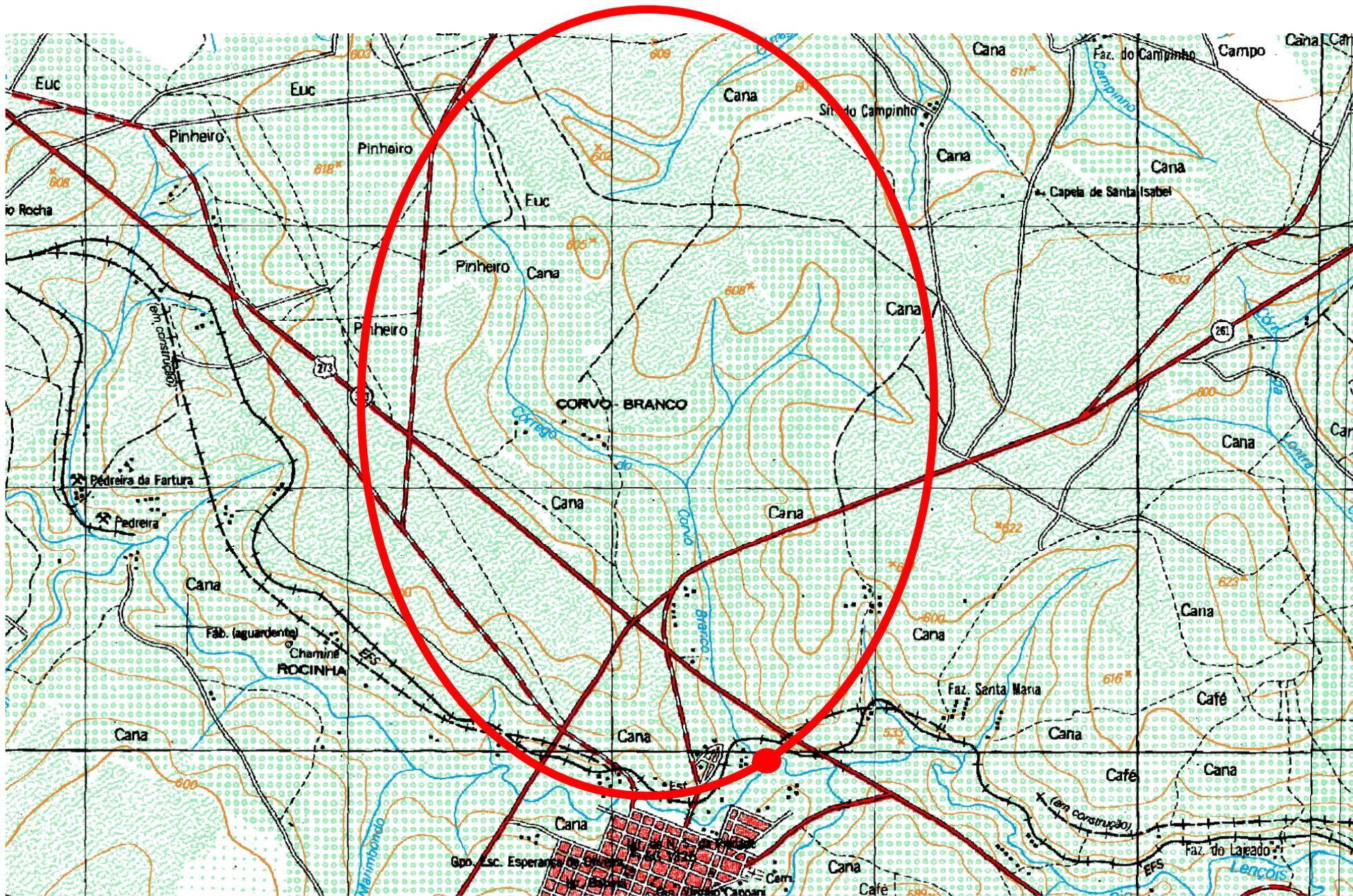


O software CAbc / ABC 6 é um software brasileiro, desenvolvido pelo LabSid (USP/FCTH) baseado nas primeiras versões do HEC-HMS

Guia Prático para Projetos de Pequenas Obras Hidráulicas (DAEE, 2005)

Modelando nossa bacia hidrográfica

Base topográfica / cartográfica



Passo 1:

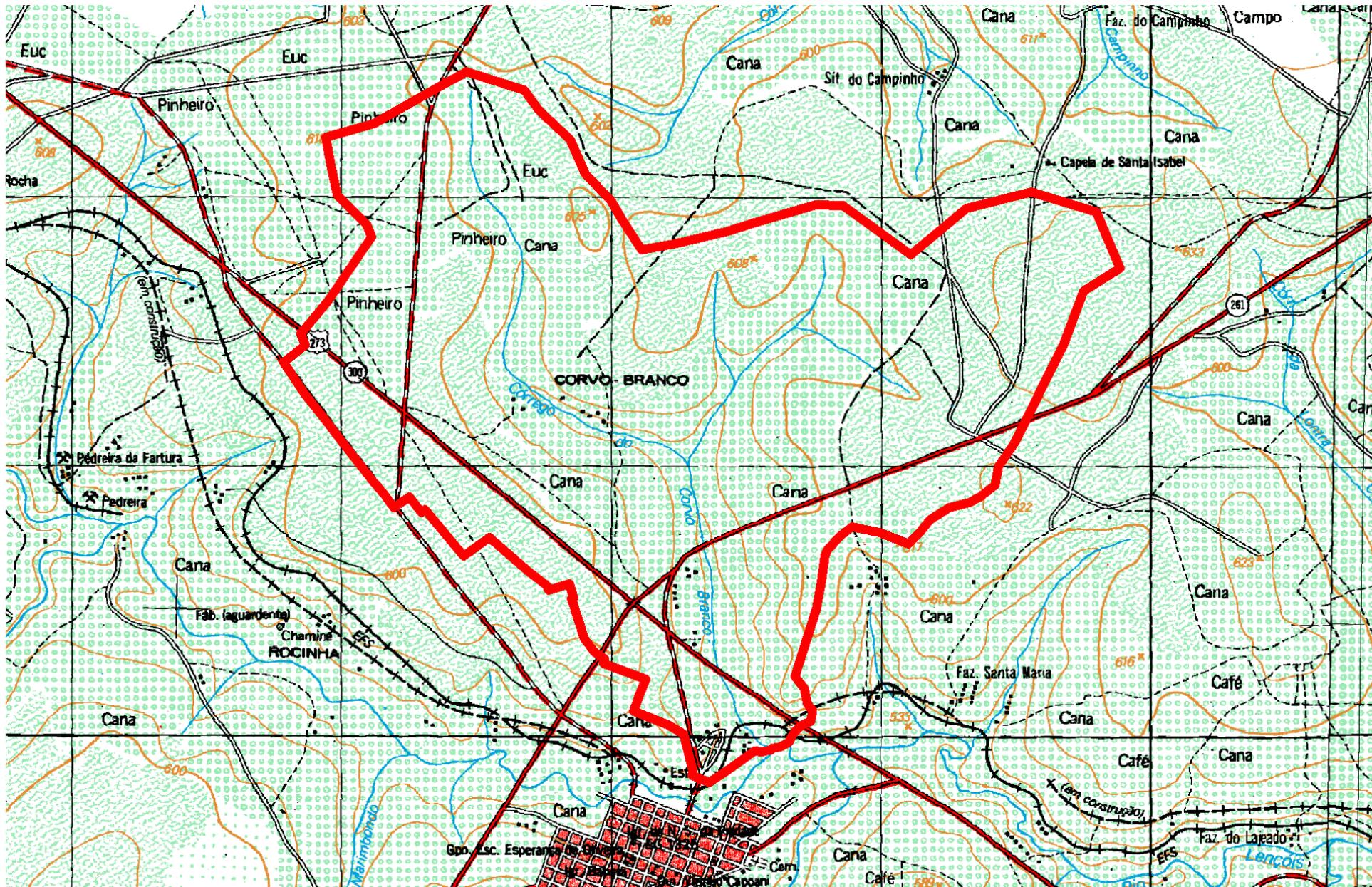
Obtenção da base cartográfica e delimitação aproximada da bacia de interesse (usando cartas/bases topográficas)

Fontes de informação:

GeoFTP (IBGE);
Datageo (estado SP);
Geosampa (cidade SP);
Prefeituras locais;
Comitês de bacia;

Ou... usar os MDEs:

SRTM;
ALOS;
Etc.

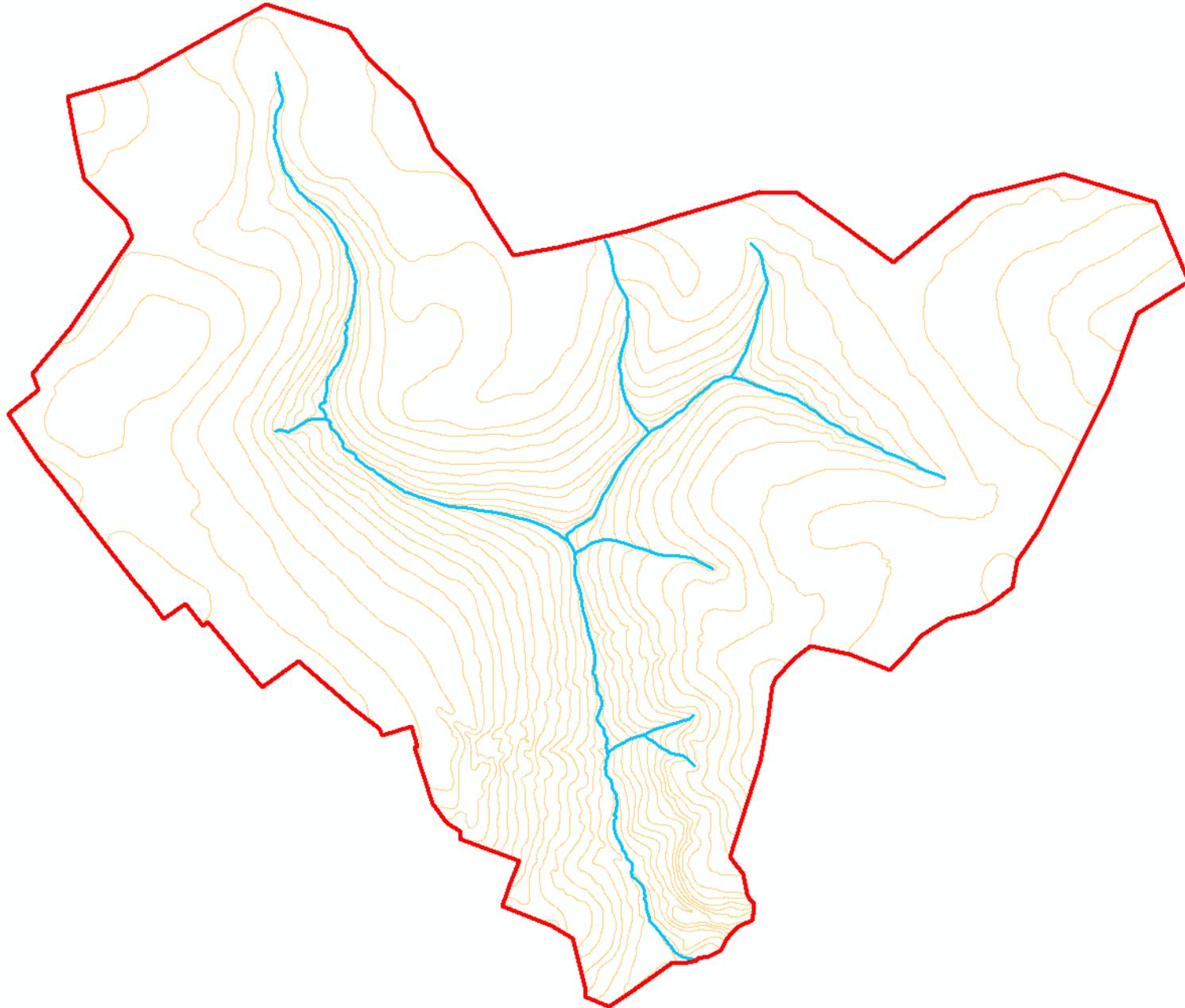


Passo 2:

Refinamento do limite da bacia hidrográfica, com topografia de melhor detalhe, LIDAR etc.

Sempre que possível

realizar visitas *in loco* com esta finalidade...
Principalmente em áreas urbanas onde pode ter ocorrido mudanças na topografia, traçado dos rios, contribuições de outras bacias etc.

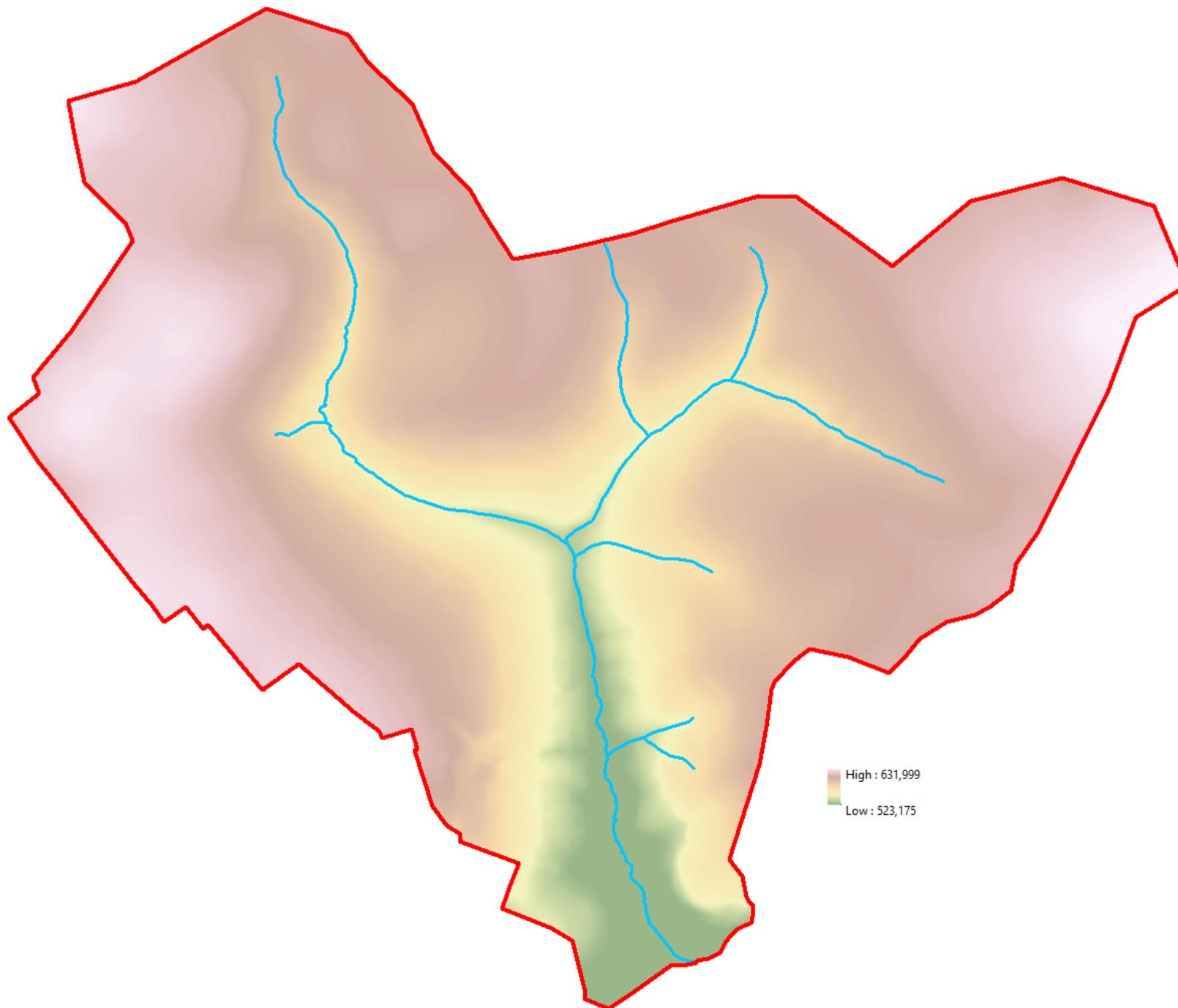


Passo 3:

Se a base não for vetorizada ou não existir raster do terreno, digitalizar as feições da base cartográfica, separando em shapefiles diferentes:

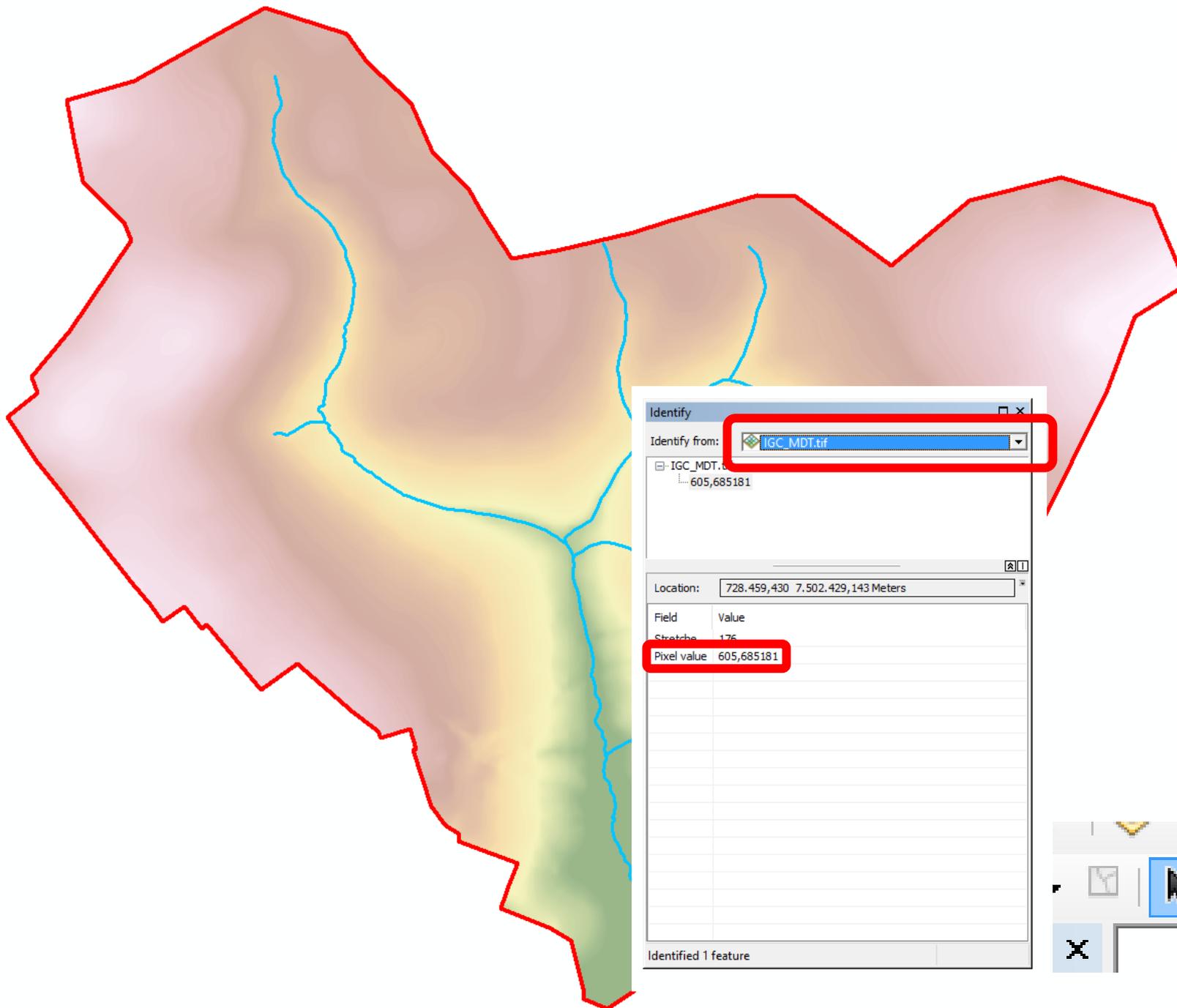
- Hidrografia;
- Curvas de nível;
- Pontos cotados;

Fazer um buffer de pelo menos 100 m da área refinada da bacia e aplicar interpolação para gerar um MDT hidrológicamente consistente. (ArcGIS: Topo To Raster)



Passo 3 1/2:
Modelo de Terreno
Resultante.

Se for usar SRTM, ALOS,
LIDAR ou outro modelo
digital de elevação os
passos anteriores podem
ser ignorados e este será
o primeiro passo da
modelagem.



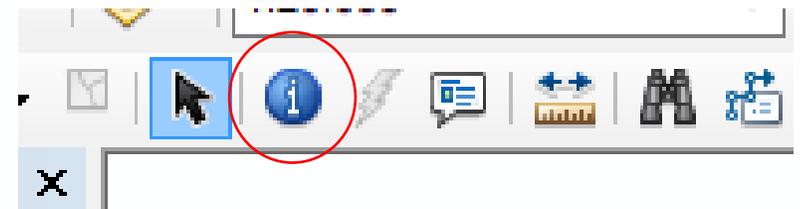
Passo 4:

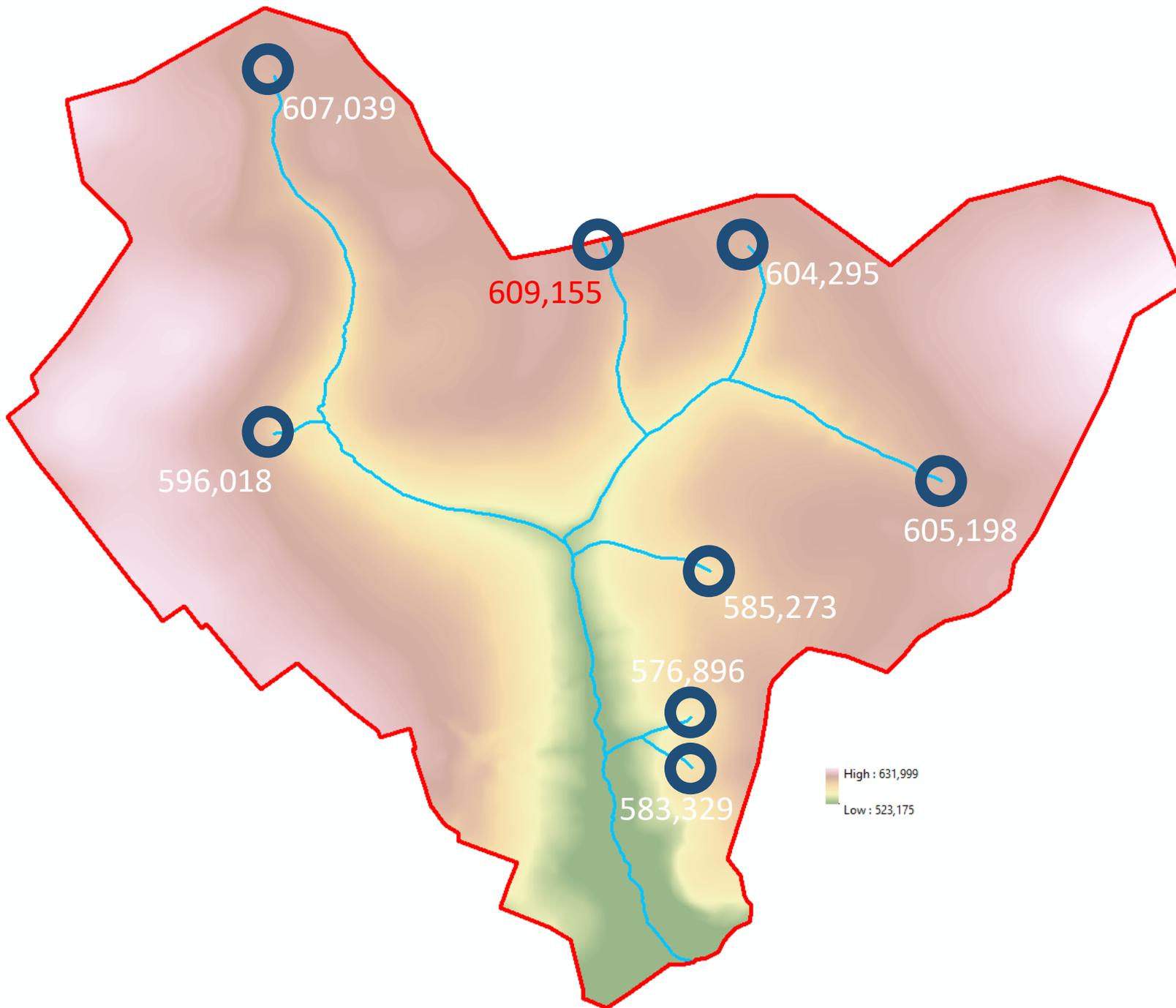
Determinação do curso d'água principal

Existem diversas técnicas...

Neste curso veremos a mais prática.

Usar o MDT e o recurso de identificação do software SIG para calcular a cota de todas as cabeceiras de drenagem.



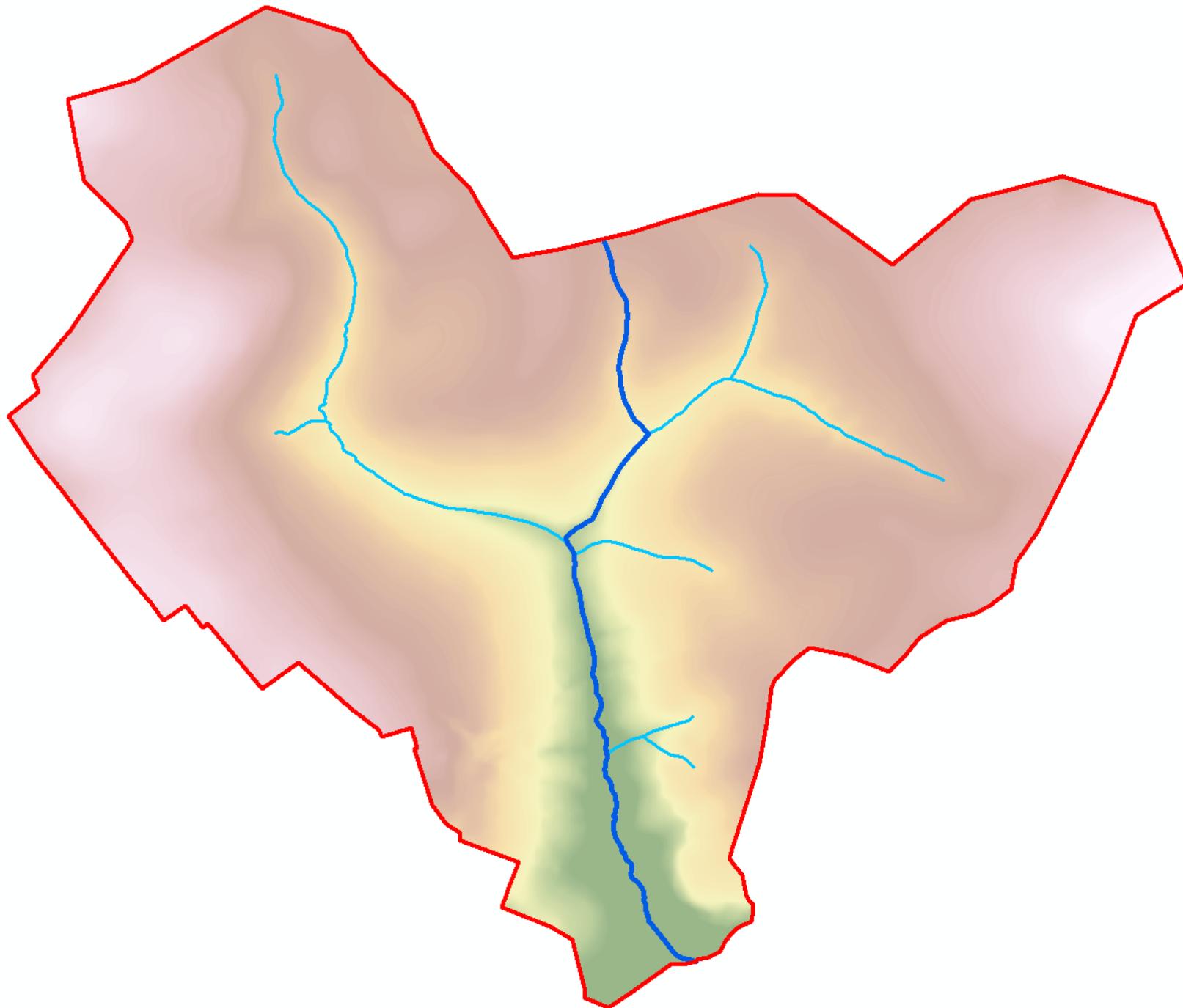


Passo 5:

A drenagem principal é a que possui a cabeceira de maior elevação.

(Em destaque em vermelho no exemplo)

A definição da drenagem principal é importantíssima para as próximas etapas da modelagem.



Passo 5 1/2:

Destaque para a drenagem principal na figura ao lado.

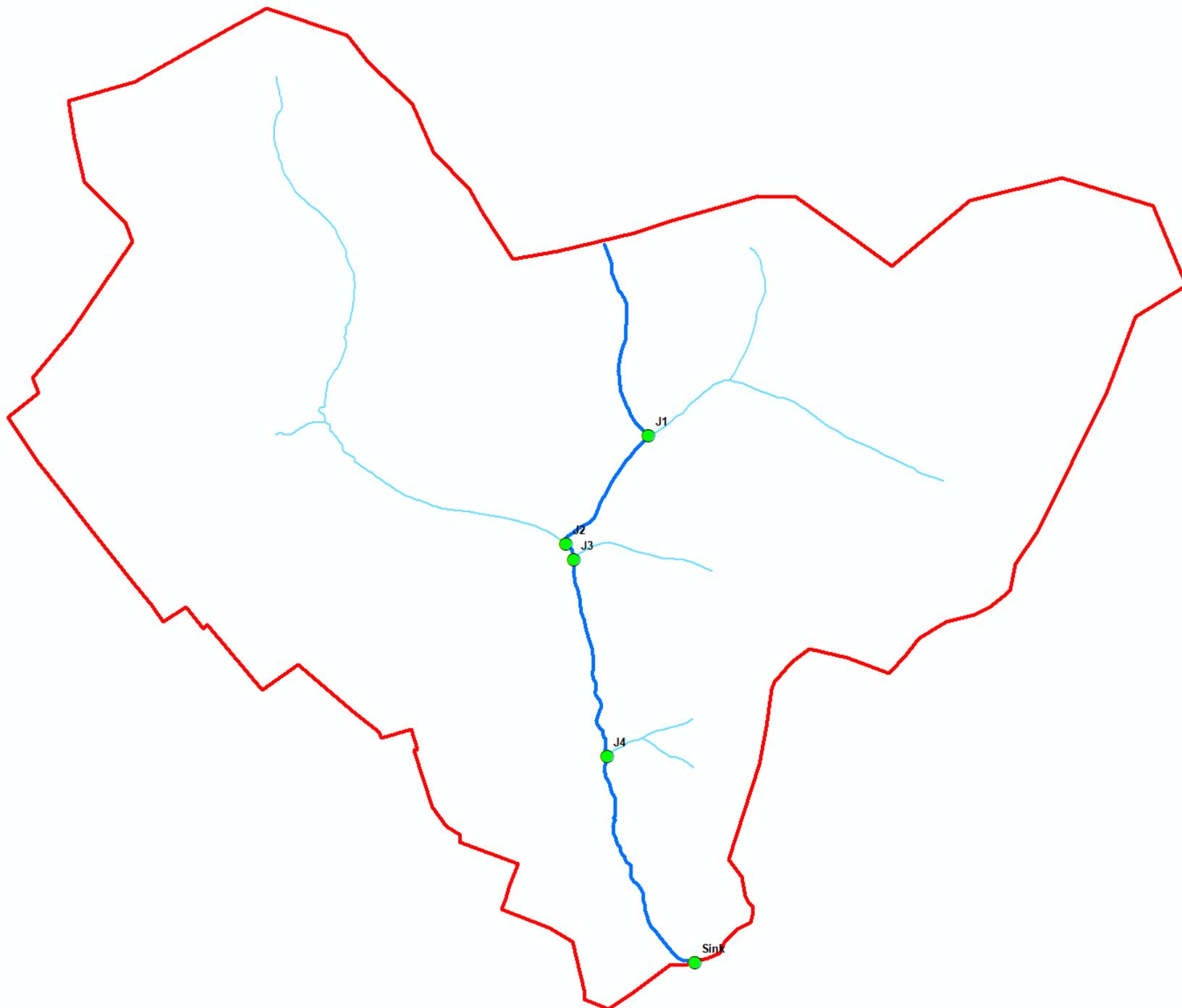
Agora vamos partir para a parte **mais importante** da modelagem... A definição da topologia do modelo em conjunto com a delimitação das sub-bacias (feita pela topografia ou de modo automático e refinada sempre que possível com dados de campo)

Esta parte precisa ficar bem clara para quando formos trabalhar com o HEC-HMS.

Topologia

Agora vamos nos imaginar caminhando dentro do rio como uma gotinha de água que sai lá da cabeceira e vai rumo à foz...



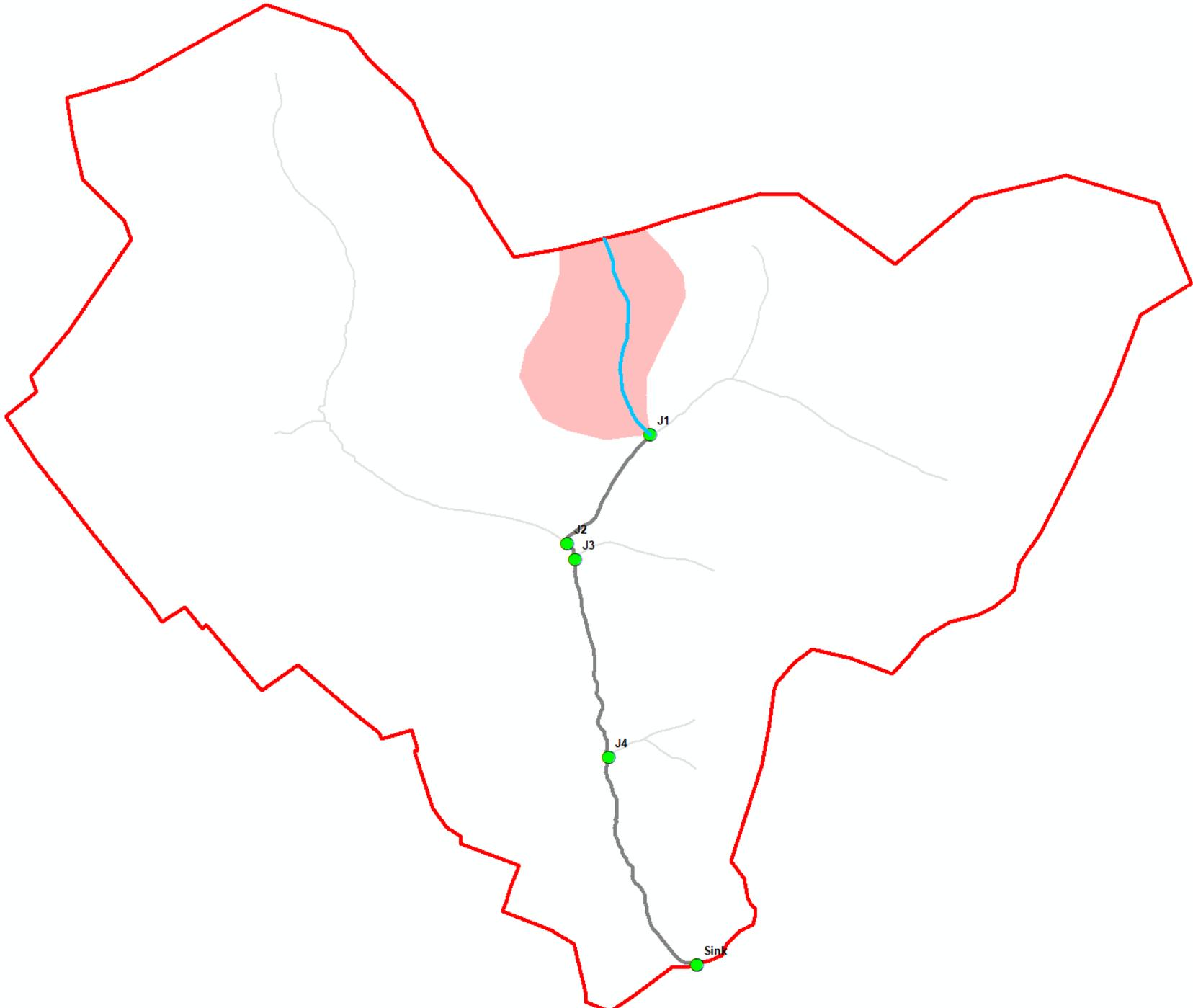


Passo 6:

Definições das junções e do exutório.

Junções (J): pontos de encontro da drenagem principal com afluentes, pontos com medição conhecida de vazão ou pontos de interesse para a modelagem.

Exutório (ou sink): corresponde ao ponto final da bacia modelada ou da modelagem, geralmente na foz do curso d'água (encontro do rio modelado com um curso d'água de maior porte)

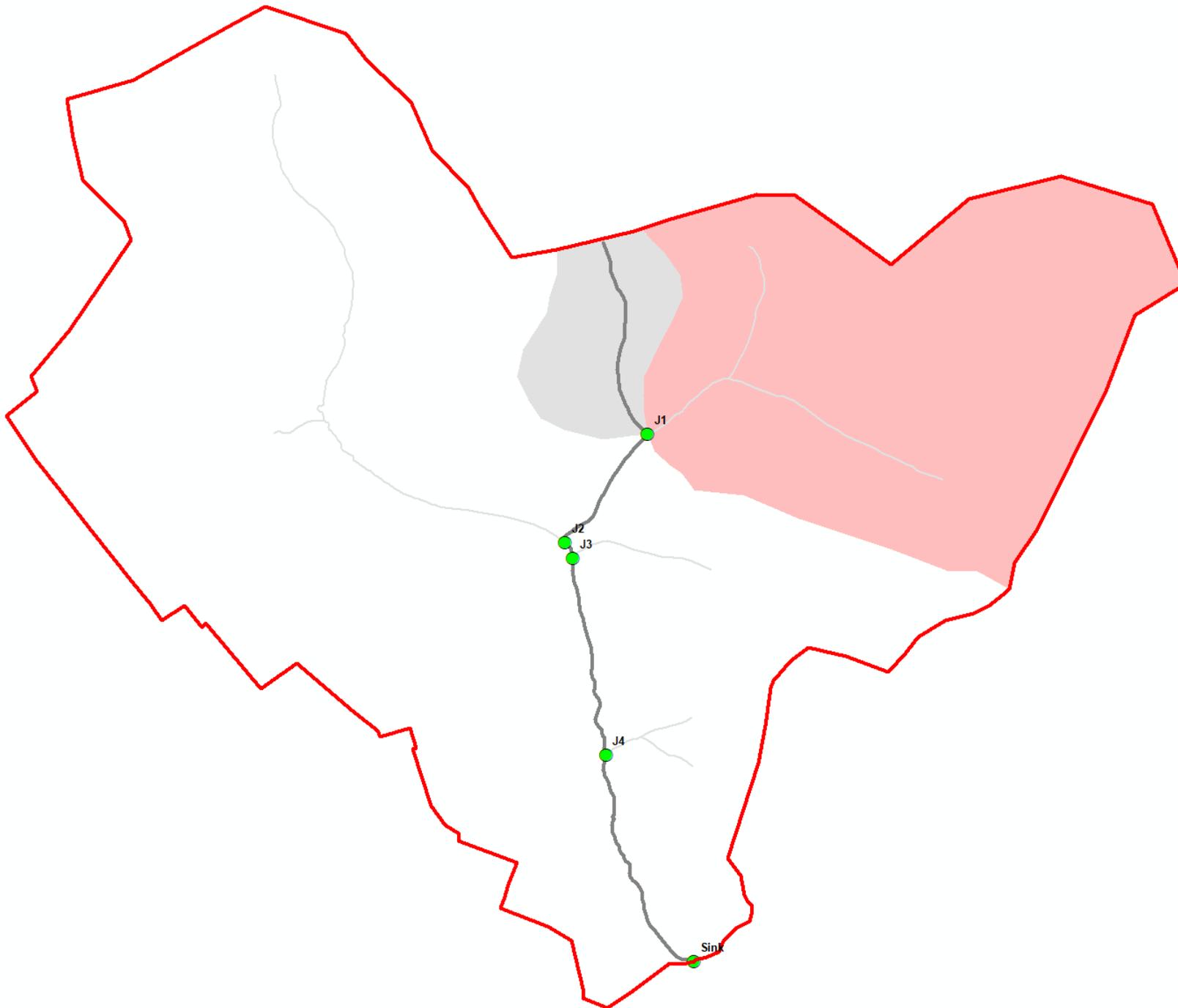


Passo 7:

Definição da primeira sub-bacia.

Esta sub-bacia é denominada **trecho montante**.

Ela é definida pelo trecho da drenagem principal da cabeceira até o ponto de encontro com o primeiro afluente. **(J1)**

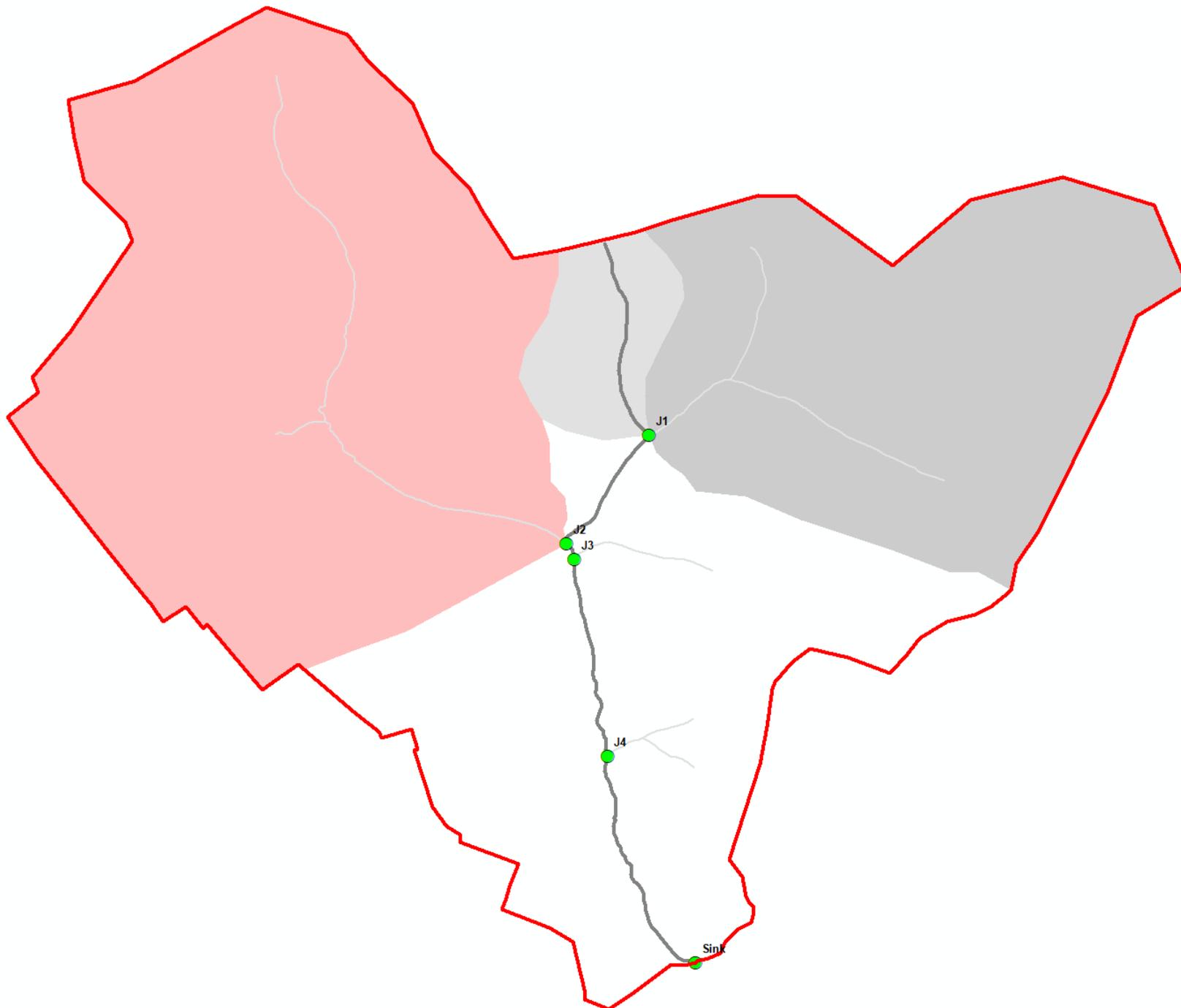


Passo 8:

Definição da segunda sub-bacia.

No nosso exemplo, é a bacia que corresponde ao primeiro afluente na margem esquerda do curso d'água principal

O ponto de encontro do afluente com o curso d'água principal é a primeira junção (**J1**).

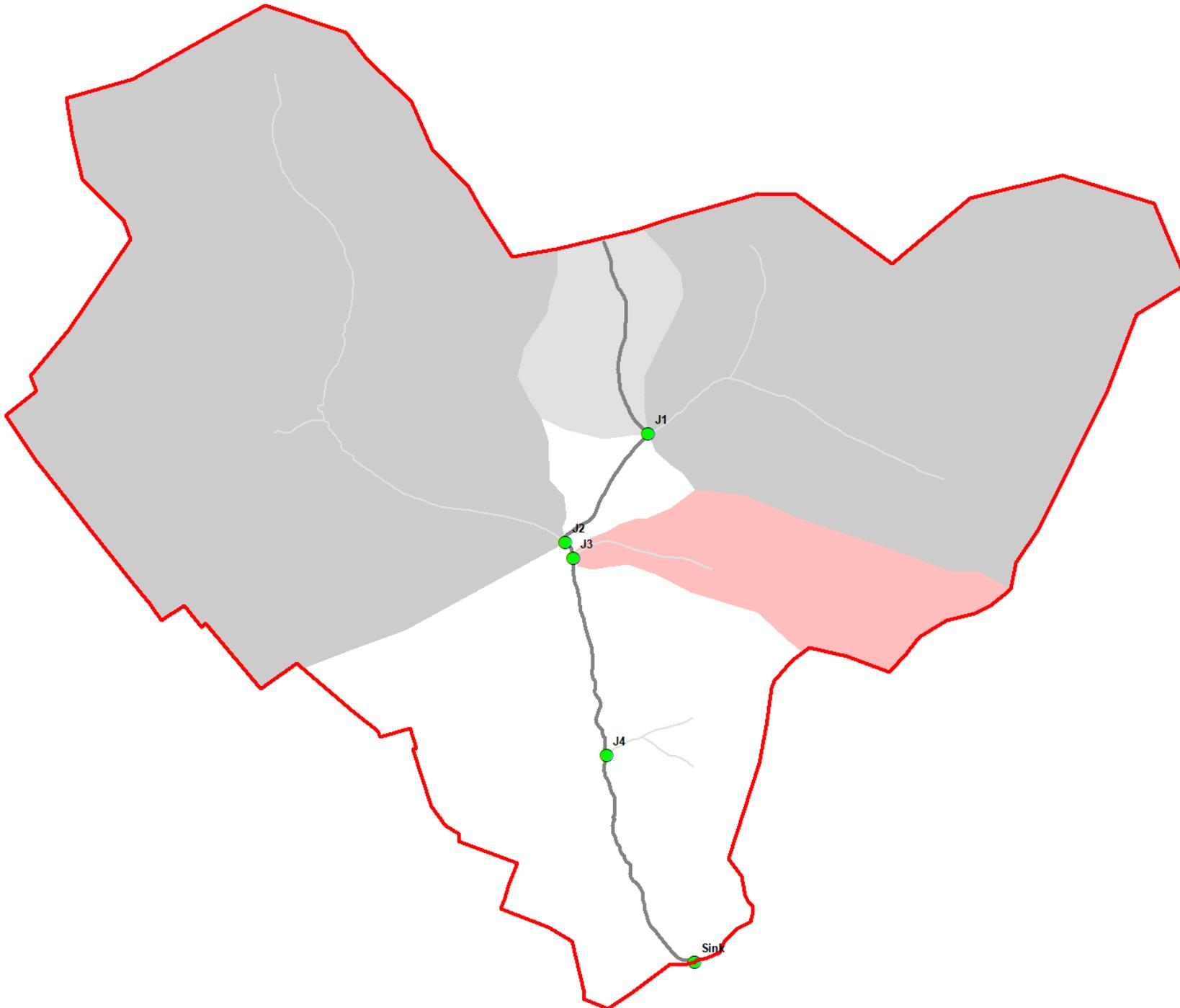


Passo 9:

Definição da terceira sub-bacia.

No nosso exemplo, é a bacia que corresponde ao segundo afluente na margem direita do curso d'água principal

O ponto de encontro do afluente com o curso d'água principal é a primeira junção (**J2**).



Passo 10:

Definição da quarta sub-bacia.

No nosso exemplo, é a bacia que corresponde ao terceiro afluente na margem esquerda do curso d'água principal

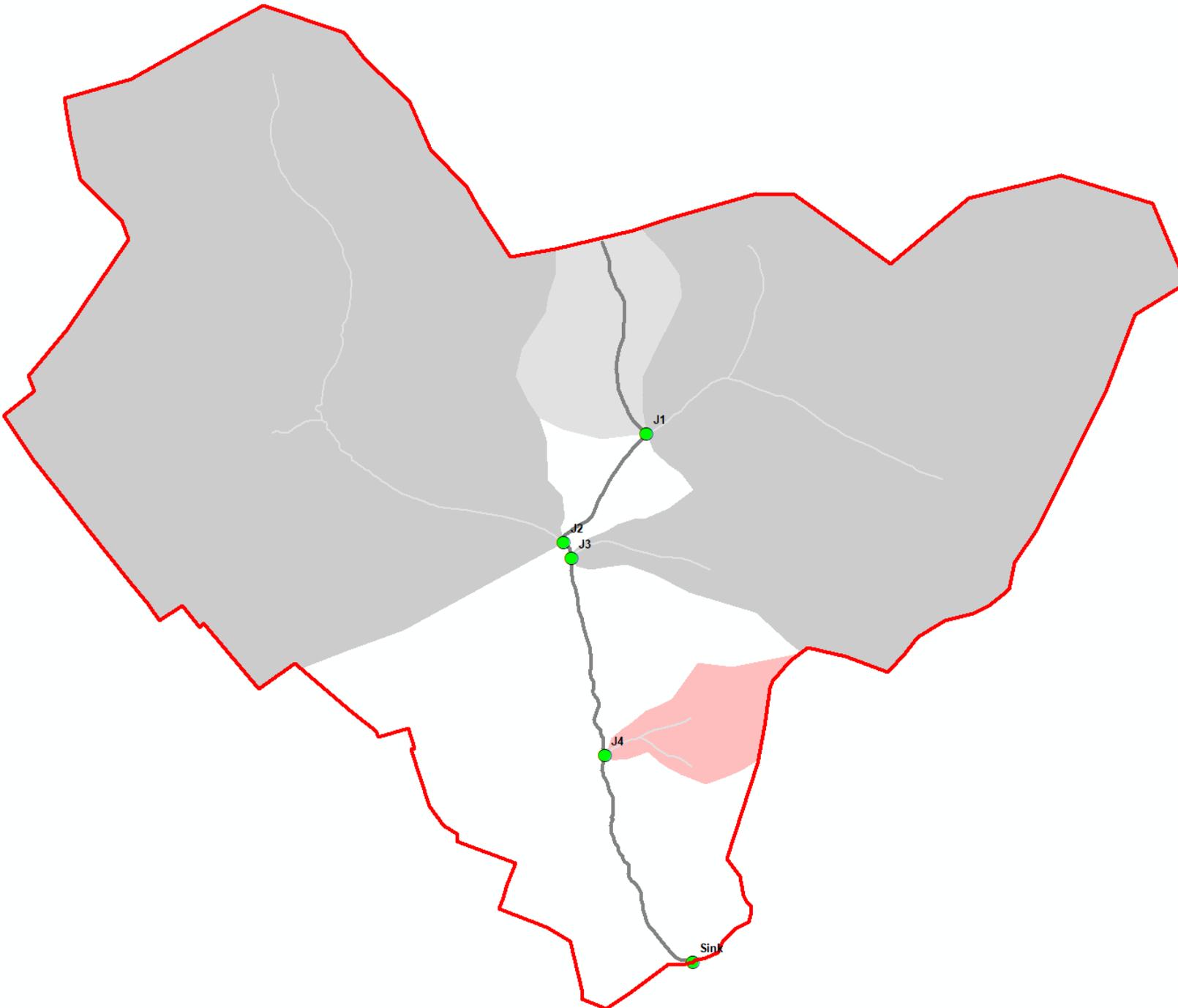
O ponto de encontro do afluente com o curso d'água principal é a primeira junção (**J3**).

Passo 11:

Definição da quinta sub-bacia.

No nosso exemplo, é a bacia que corresponde ao quarto afluente na margem esquerda do curso d'água principal

O ponto de encontro do afluente com o curso d'água principal é a primeira junção (**J4**).

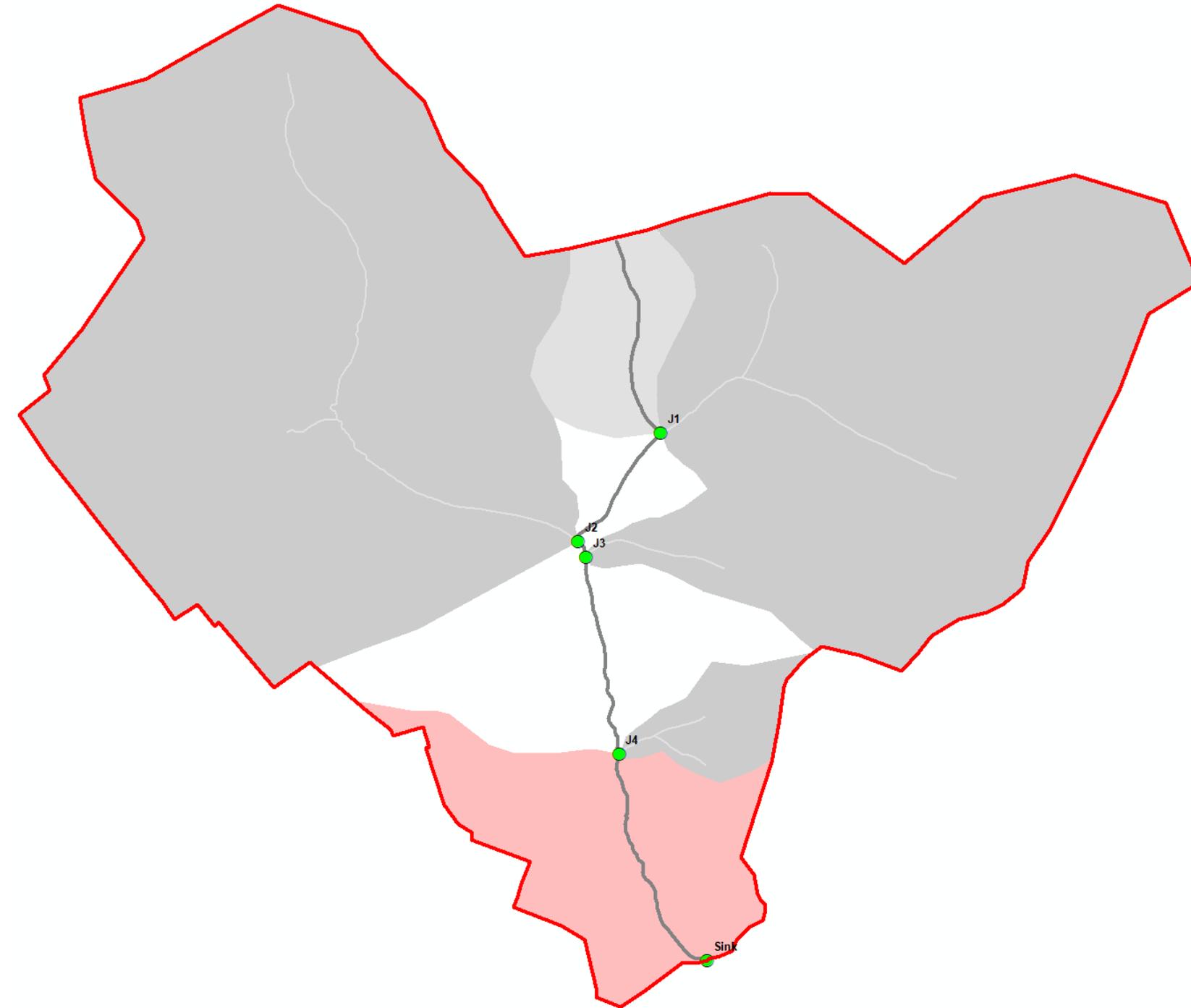


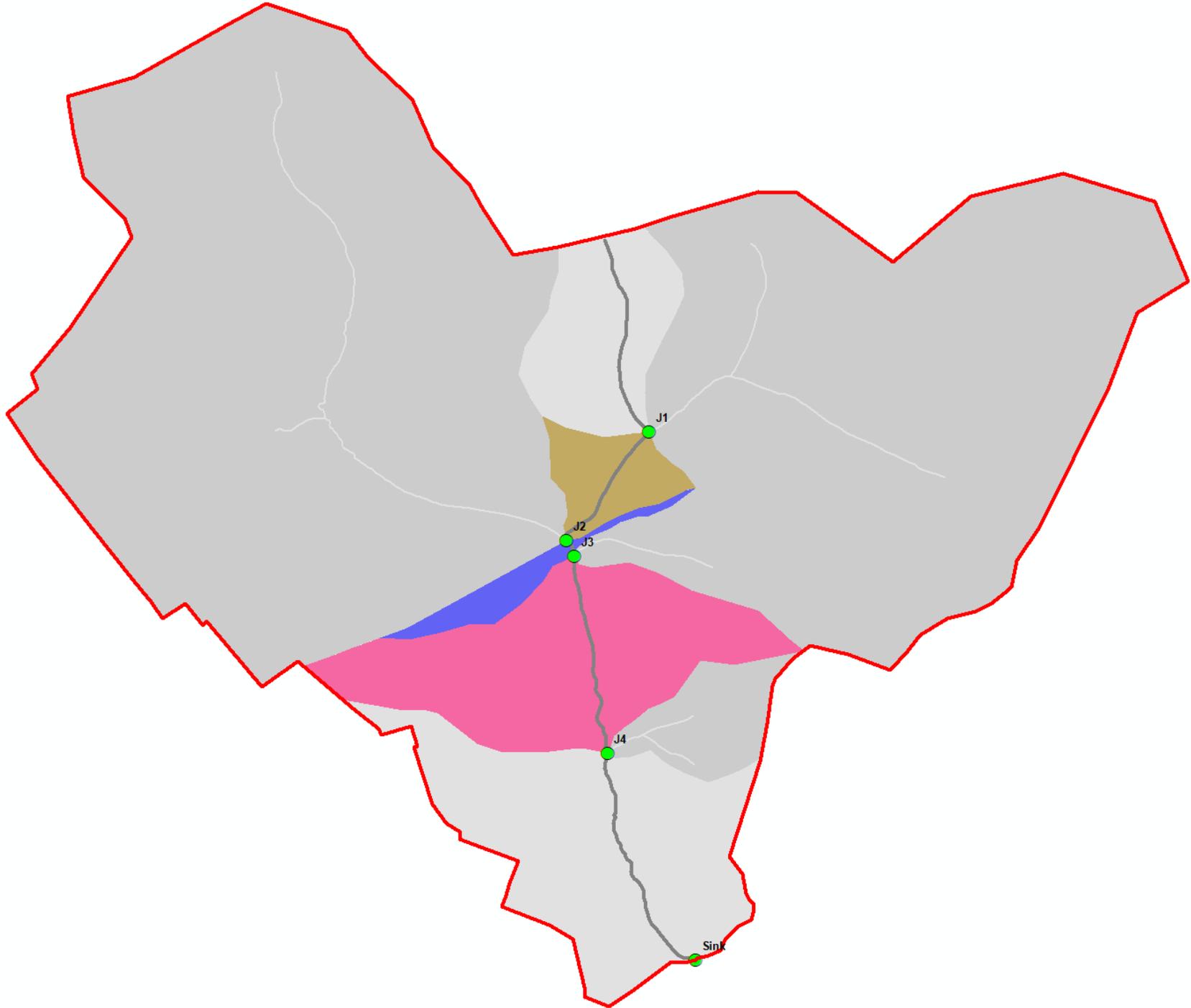
Passo 12:

Definição da sexta sub-bacia.

Esta sub-bacia é denominada **trecho jusante**.

Ela é definida pelo trecho da drenagem principal desde o último afluente ou ponto de interesse (**no nosso caso, J4**) até o exutório. (**Sink**)





Passo 13:

Definição das sub-bacias restantes.

Elas são definidas pelos trechos da drenagem principal entre as junções.

Reparem que as áreas de contribuição são nas duas margens do curso d'água, diferente dos afluentes em que a área de contribuição se situa apenas na margem do afluente correspondente.

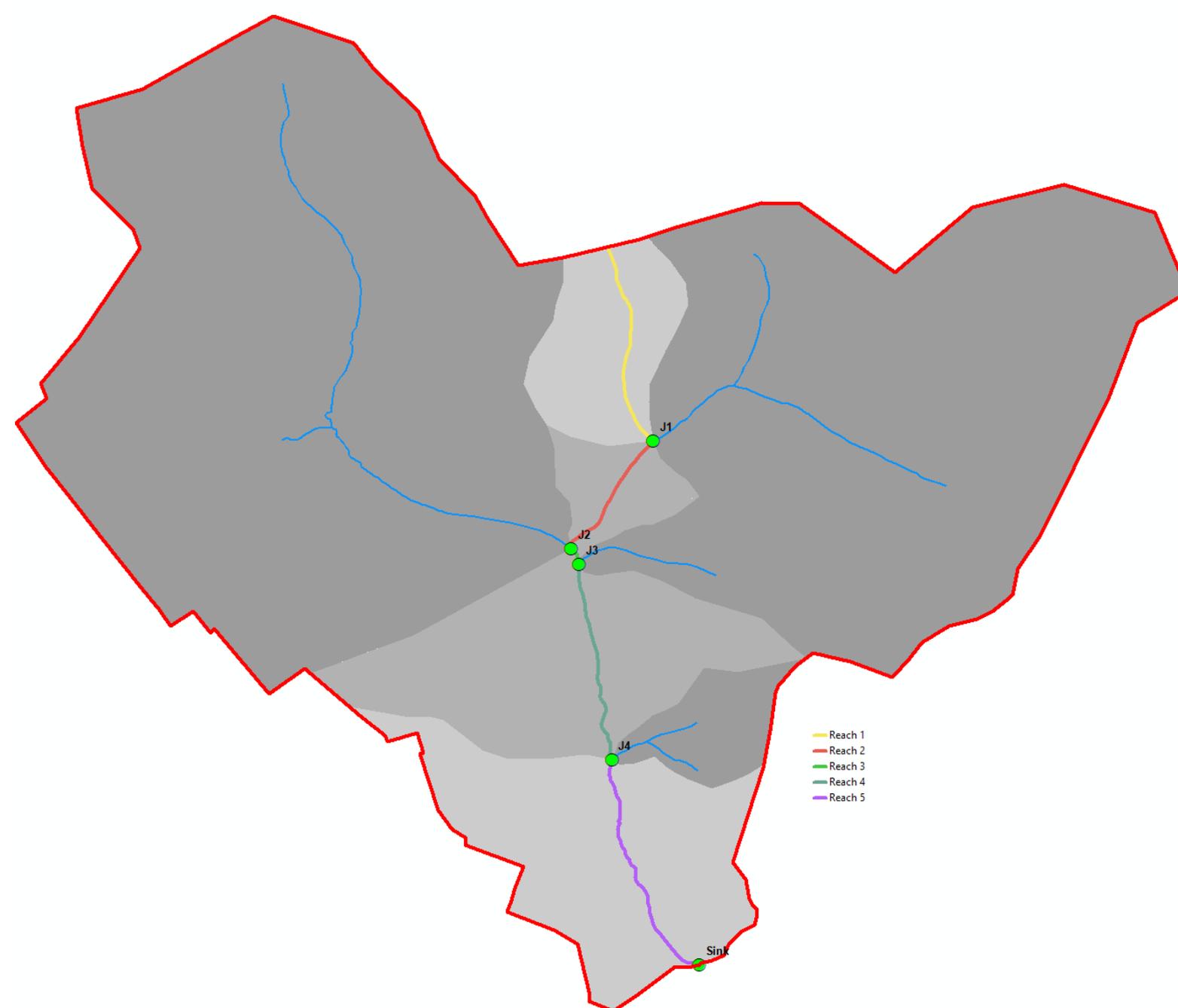
Passo 14:

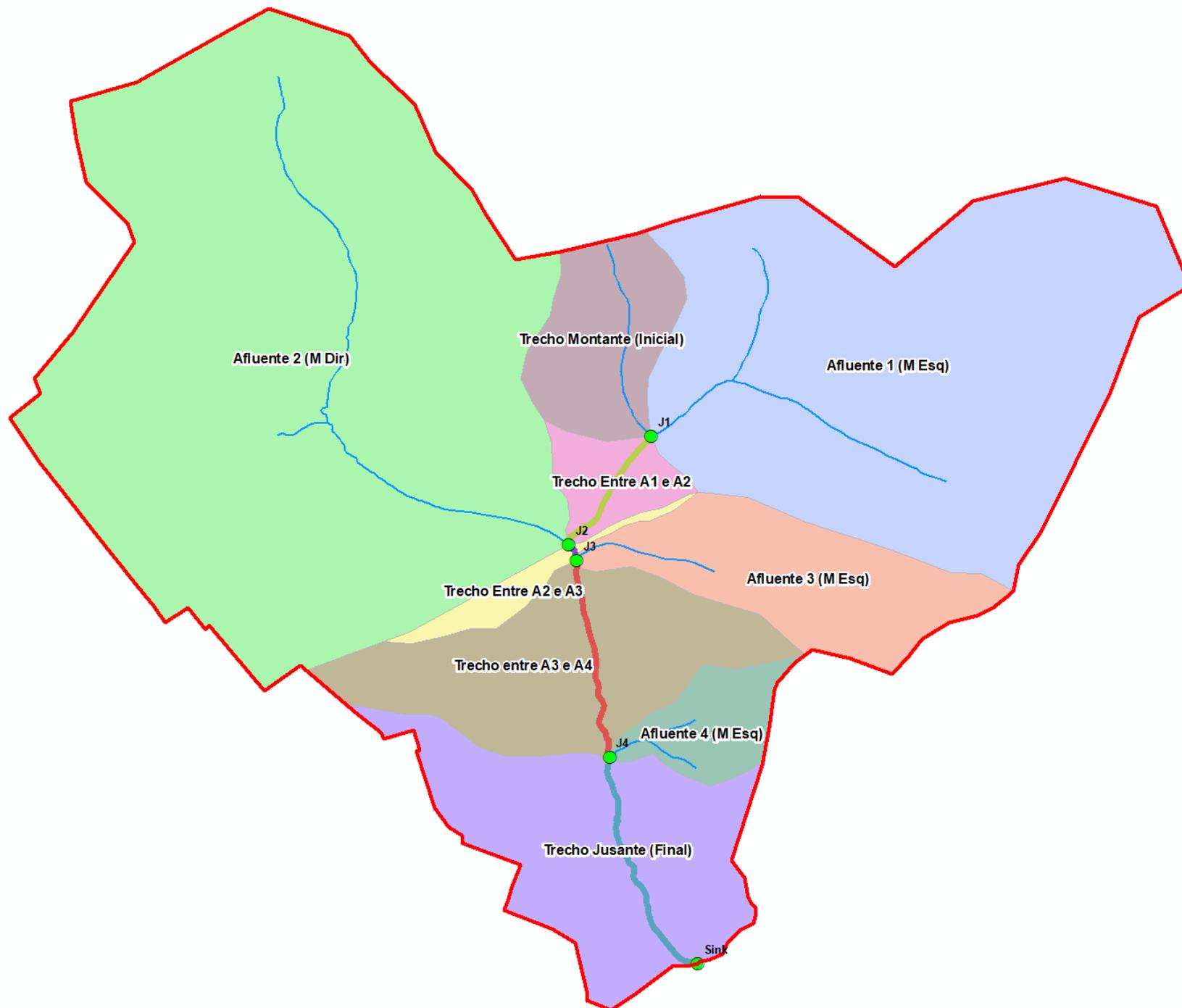
Determinação dos trechos de drenagem (ou **Reaches**).

Outra definição importante para a modelagem hidrológica é a indicação dos trechos de drenagem – sempre entre junções e entre a última junção e o Exutório.

No nosso exemplo são os seguintes:

- **Reach 1** – cabeceira até J1 (opcional)
- **Reach 2** – entre J1 e J2
- **Reach 3** – entre J2 e J3
- **Reach 4** – entre J3 e J4
- **Reach 5** – entre J4 e Sink





Resumo:

Resultado das definições de topologia.

Ao final desta etapa você deve ter todas as sub-bacias com seu limite determinado, os pontos de Junção e do Exutório e os trechos de drenagem.

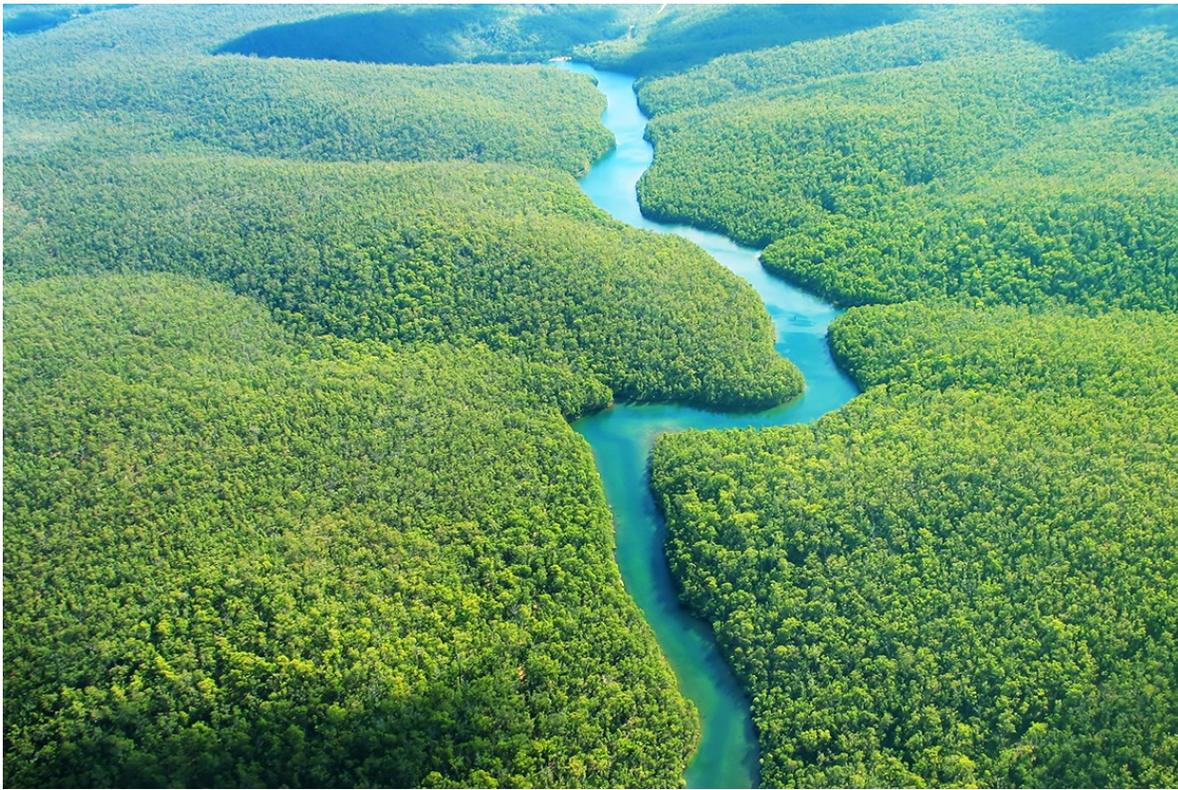
Adicionalmente a estes dados, você também deve possuir uma feição correspondente ao curso d'água principal e de toda a área da bacia hidrográfica.

Usaremos estes dados durante o curso todo.

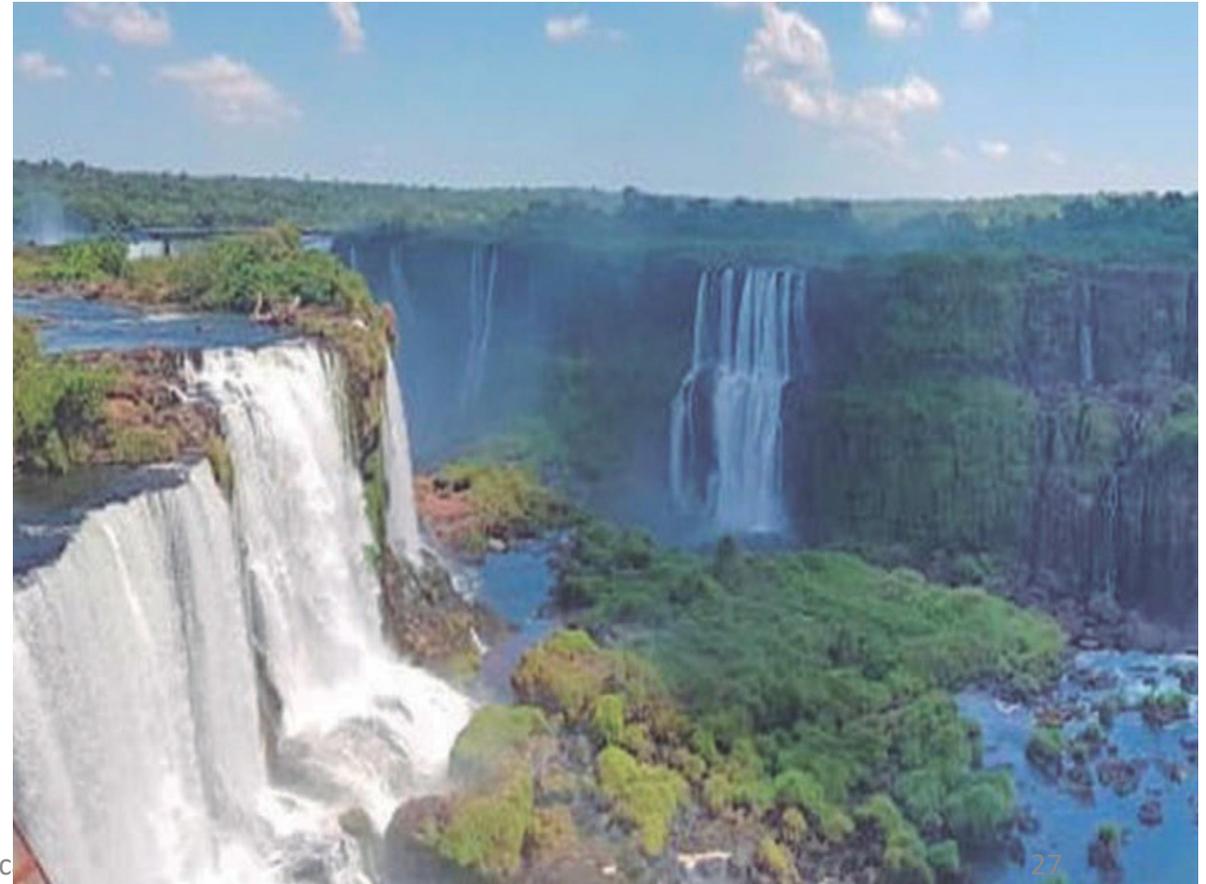
Lembra da nossa gotinha?

Já reparou que tem vezes que a água anda devagarinho... E tem vezes que a água faz um barulhão?





Por que tem rios que a água vai mansinha e em outros a água vem com tudo?



Declividade

É a declividade que faz rios serem mansos ou cheios de corredeiras...

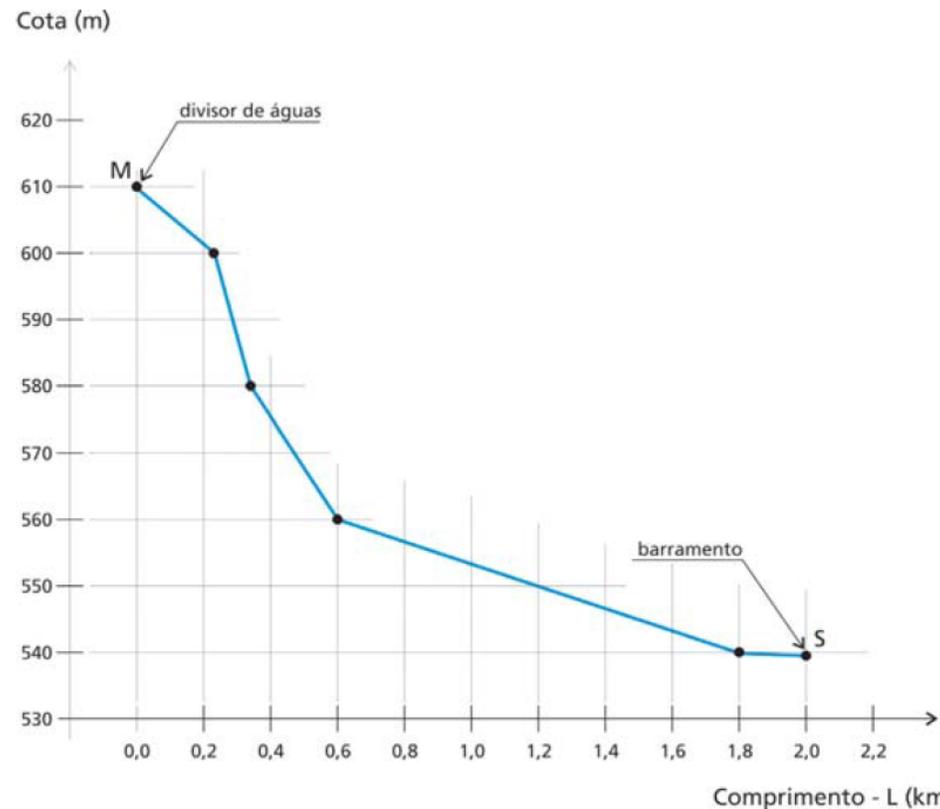
É ela um dos fatores que definem a velocidade das águas e, conseqüentemente, o tempo que leva para a água sair de um ponto a montante e chegar em outro a jusante de um curso d'água.

Existem diversas formas de estimar a declividade de um curso d'água (talvegue), iremos ver neste curso uma das formas.

Esta forma se denomina 'Declividade Equivalente' ou 'Declividade Harmônica' e o método para sua obtenção é simples e descrito no 'Guia Prático para Projetos de Pequenas Obras Hidráulicas' (DAEE, 2005)

Declividade equivalente

Ponto do talvegue	Cota H (m)	Distância de "M": L (km)	Desnível no trecho ΔH (m)	Extensão do trecho L _n (km)	Declividade no trecho j _n (m/km)
Divisor (M)	610,0	0,00	-	-	-
curva de nível	600,0	0,23	10,0	0,23	43,5
curva de nível	580,0	0,34	20,0	0,11	181,8
curva de nível	560,0	0,60	20,0	0,26	76,9
curva de nível	540,0	1,80	20,0	1,20	16,7
Seção "S" *	539,5	2,00	0,5	0,20	2,5



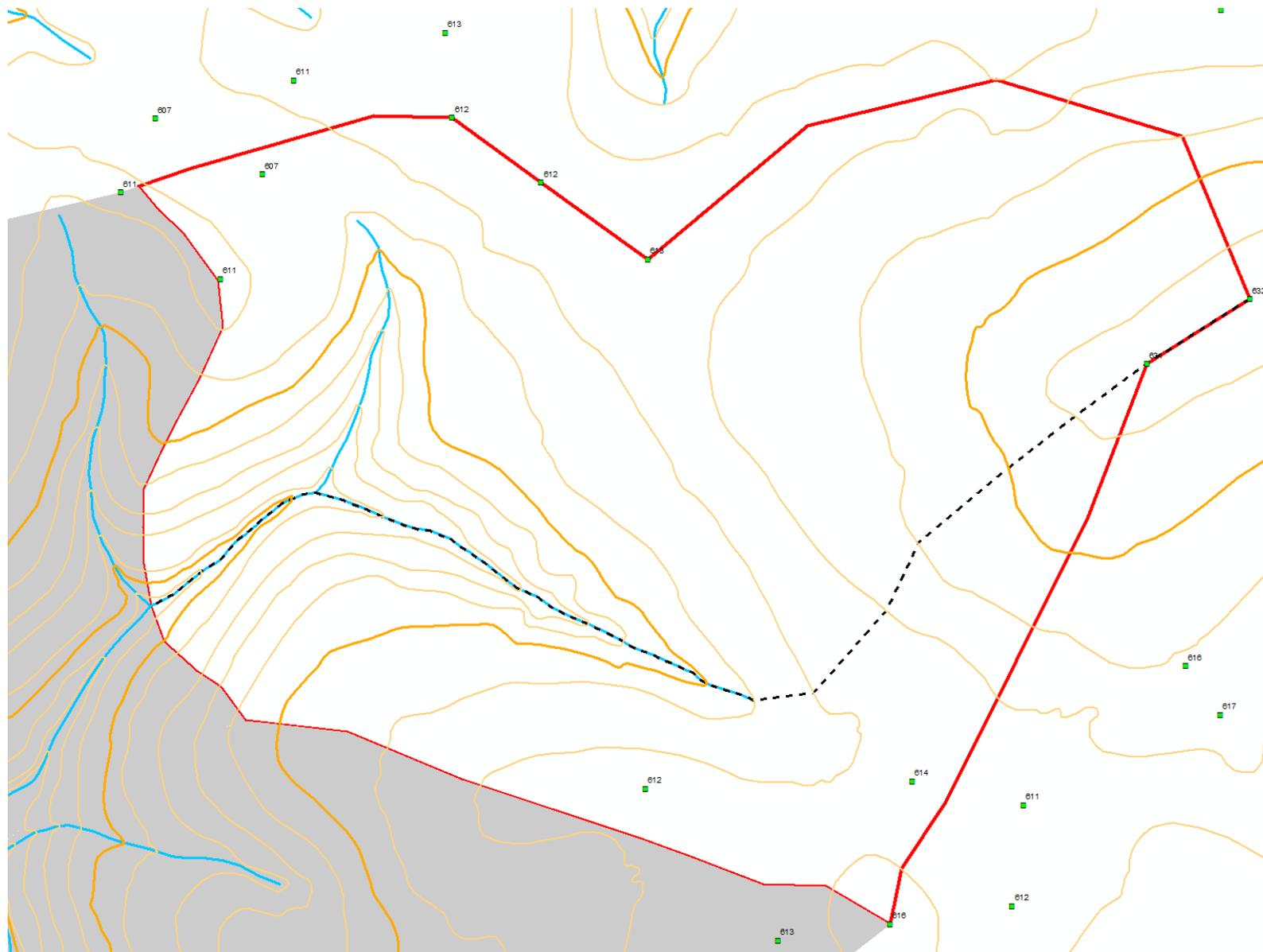
$$I_{eq} = \left(\frac{L}{\frac{L_1}{\sqrt{j_1}} + \frac{L_2}{\sqrt{j_2}} + \frac{L_3}{\sqrt{j_3}} + \frac{L_4}{\sqrt{j_4}} + \frac{L_5}{\sqrt{j_5}}} \right)^2$$

onde

$$L = L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5$$

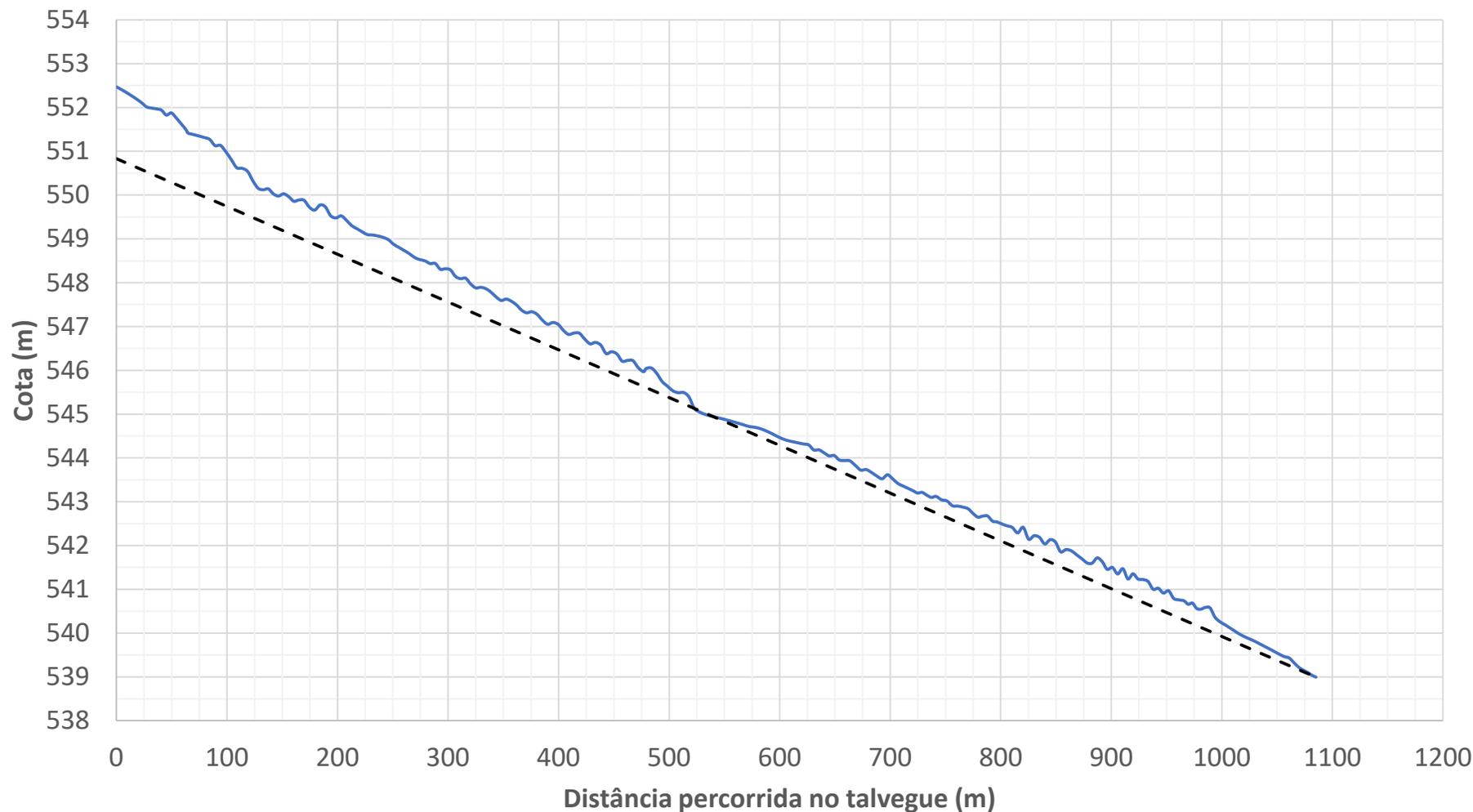
$$I_{eq} = \left(\frac{2,0}{\frac{0,23}{\sqrt{43,5}} + \frac{0,11}{\sqrt{181,8}} + \frac{0,26}{\sqrt{76,9}} + \frac{1,20}{\sqrt{16,7}} + \frac{0,20}{\sqrt{2,5}}} \right)^2$$

$$I_{eq} = 16,45 \text{ m/km}$$

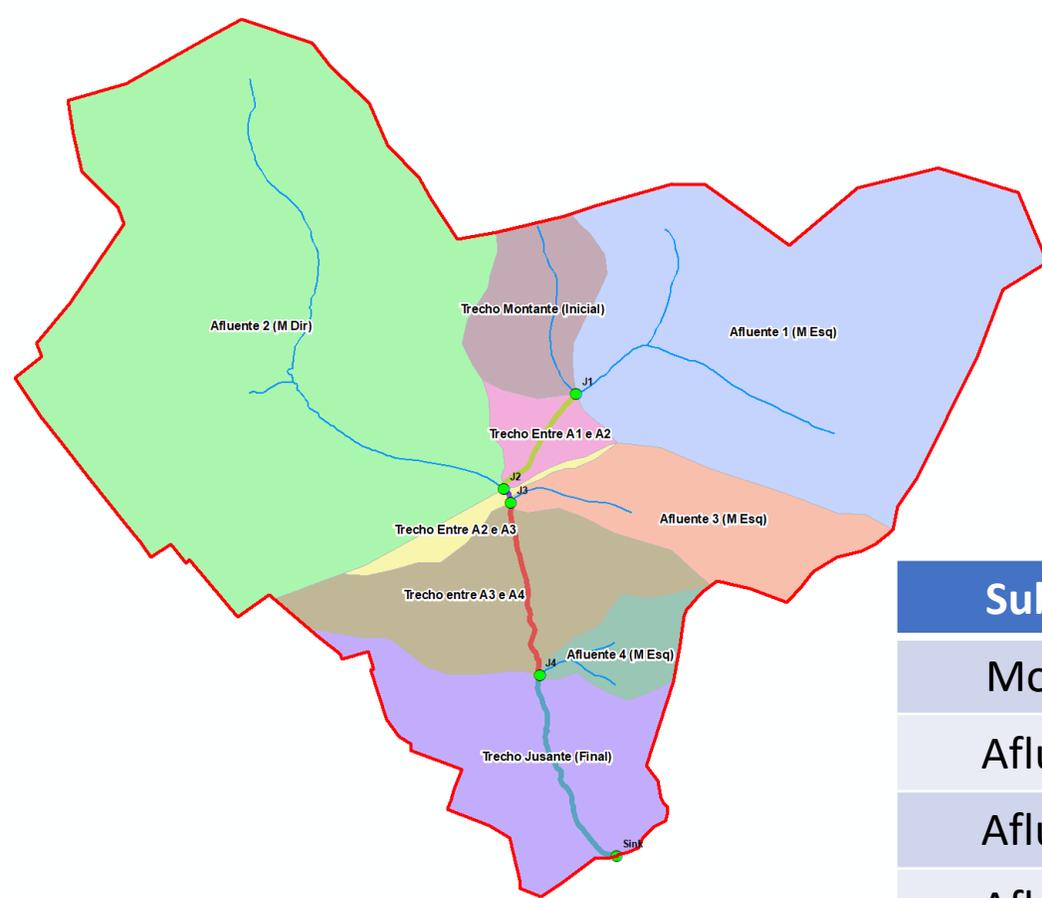


Para traçar a declividade equivalente do Talvegue deve-se começar do ponto mais alto e caminhar perpendicularmente às curvas de nível até o exutório de cada sub-bacia. Nem sempre o talvegue coincide com a hidrografia mapeada apenas.

Perfil Longitudinal do Talvegue e Declividade equivalente do interflúvio A3-A4



Valores de Declividade Equivalente para as sub-bacias do cór. Do Corvo Branco



Sub-bacia	leq (m/km)	Sub-bacia	leq (m/km)
Montante	30,485	Interflúvio A1-A2	14,115
Afluyente 1	8,561	Interflúvio A2-A3	10,281
Afluyente 2	12,409	Interflúvio A3-A4	10,909
Afluyente 3	14,073	Jusante	8,603
Afluyente 4	57,232		

E quanto tempo será que a nossa gotinha de água demora para sair de um ponto da (sub-) bacia e chegar em outro?



Tempo de Concentração (t_c)

É o tempo de percurso da água desde o ponto mais afastado da bacia até a seção de interesse, contado à partir do início da precipitação. Portanto, quando $t = t_c$, toda a área da bacia está contribuindo para produzir vazão no ponto de interesse.

É a variável mais importante para os modelos hidrológicos.

Como calcular o Tempo de Concentração (t_c)?

Apesar de sua importância, o tempo de concentração é difícil de ser obtido. Segundo McCuen (1993), o verdadeiro valor do tempo de concentração nunca será determinado.

Fatores que influenciam o valor de t_c

- Urbanização da bacia;
- Existência de retificações e canalizações;
- Uso e cobertura do solo;
- Declividade;
- Extensão do talvegue...

Como calcular o Tempo de Concentração (t_c)?

Diversas fórmulas empíricas foram desenvolvidas por diversos autores para estimar esta variável.

MANUAL DE HIDROLOGIA BÁSICA PARA ESTRUTURAS DE DRENAGEM

2005

Este guia do DNIT traz 15 fórmulas distintas para o tempo de concentração.

Para o Estado de SP, o DAEE preconiza:
(Instrução Técnica DPO n.11 de
Maio/2017):

1.1.4 Tempo de concentração.

Para tempo de concentração (t_c), não utilizar valores superiores aos determinados pela fórmula descrita no Quadro 1.

Quadro 1. Fórmula para cálculo do tempo de concentração (t_c)

$t_c = 57 \left(\frac{L^2}{S} \right)^{0,385}$
t_c = tempo de concentração (min)
L = comprimento do talvegue (km)
S = declividade do talvegue (m/km), média ou equivalente

Fator de Correção do t_c =
 $1,0 - t_x \text{ urb (\%)} * 0,5$

Corrigir o t_c de
acordo com a
Urbanização

Dica: Validando o valor de t_c calculado: (TOMAZ, 2011)

Velocidades médias em m/s para o cálculo de t_c

Descrição do Escoamento	Declividade 0 a 3 %	Declividade 4 a 7 %	Declividade 8 a 11 %	Declividade > 12 %
Florestas	0 a 0,5	0,5 a 0,8	0,8 a 1,0	acima de 1,0
Pastos	0 a 0,8	0,8 a 1,1	1,1 a 1,3	acima de 1,3
Áreas Cultivadas	0 a 0,9	0,9 a 1,4	1,4 a 1,7	acima de 1,7
Pavimentos	0 a 2,6	2,6 a 4,0	4,0 a 5,2	acima de 5,2

Fonte: Adaptado de TOMAZ (2011).

$$v = \frac{\text{Distância percorrida}}{\text{tempo}}$$

$$v = \frac{L \text{ (km)} \times 1000}{t_c \text{ (min)} \times 60}$$

Declividade em % = Declividade em m/km / 10
Atenção às unidades dos termos das fórmulas!

Valores de Tempo de Concentração (tc) para as sub-bacias do cór. Do Corvo Branco

Sub-bacia	L (km)	leq (m/km)	tc Kirpich (min)	%urb (fator de correção do tc)	tc corrigido (min)
Montante	1,111	30,485	16,585	0,00% (1,00)	16,585
Interflúvio A1-A2	0,738	14,115	16,286	0,00% (1,00)	16,286
Interflúvio A2-A3	0,094	10,281	3,769	0,00% (1,00)	3,769
Interflúvio A3-A4	1,085	10,909	24,193	13,91% (0,93)	22,511
Jusante	1,300	8,603	30,460	41,61% (0,79)	24,123
Afluente 1	2,258	8,561	46,694	2,13% (0,99)	46,197
Afluente 2	4,055	12,409	63,528	25,85% (0,87)	55,318
Afluente 3	2,505	14,073	41,770	4,03% (0,98)	40,927
Afluente 4	0,913	57,232	11,183	0,00% (1,00)	11,183

Precipitação – Chuva de Projeto

Probabilidade de recorrência ou Período de Retorno

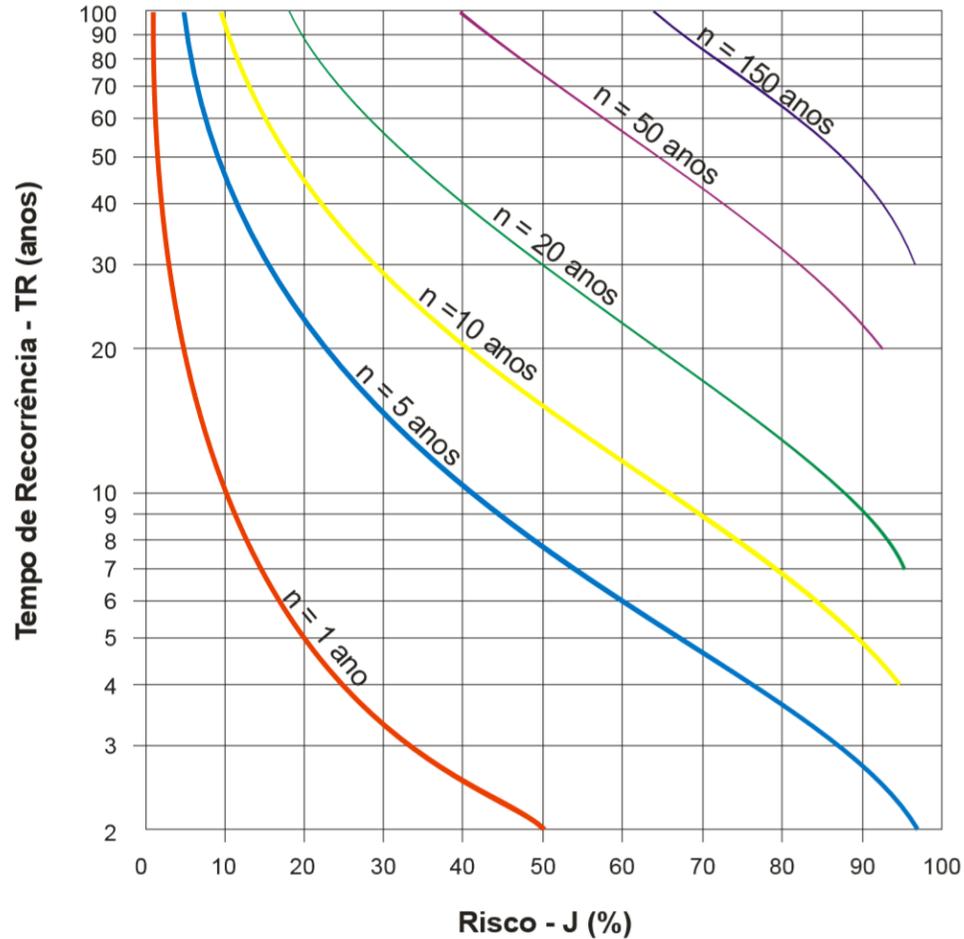
Considera que todo evento de precipitação tem uma probabilidade de recorrência, ou seja, de ocorrer novamente.

Esta probabilidade ou FREQUÊNCIA de recorrência é chamada também de Período de Retorno (T_r).

T_r é o intervalo médio em anos para um fenômeno ocorrer novamente na mesma magnitude ou ser ainda maior.

período de retorno x risco

Figura 1 - Risco de Ocorrer Enchente Maior



Manual de Hidrologia Básica para Estruturas de Drenagem (DNIT, 2005)

DAEE: Instrução Técnica DPO n.º 002 (30/07/2007)

Tabela 1. Valores mínimos de período de retorno (TR) para projetos de canalizações e travessias

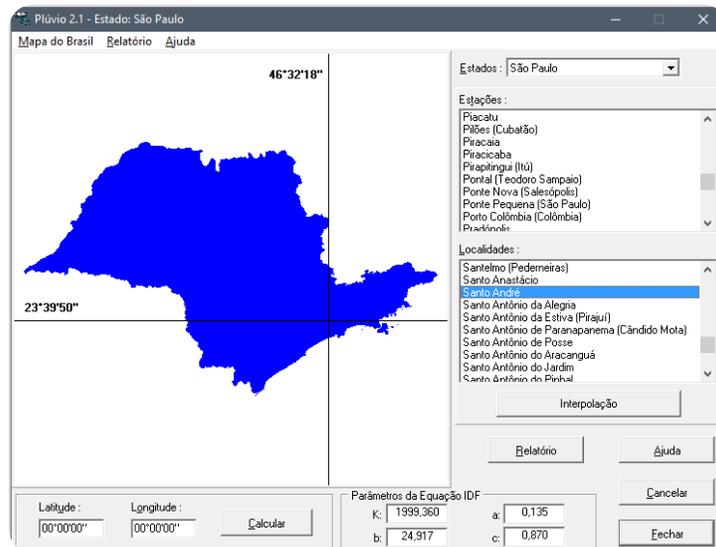
Localização	TR (anos)
zona rural	25
zona urbana ou de expansão urbana	100

Tabela 2. Valores mínimos de período de retorno (TR) para projetos de barragens

Maior altura do barramento H (m)	TR (anos)	
	Região de influência a jusante	
	sem risco para habitações ou pessoas	com risco para habitações ou pessoas
$H \leq 5$	100	500
$5 < H \leq 10$	500	1.000
$H > 10$	1.000	10.000

Como fazer para obter valores tão altos de Tr?

10.000 anos de série histórica de chuvas diárias?



Equações de chuva (i – d – f)

Equações de chuva relacionam as três variáveis mais importantes relacionadas à precipitação:

INTENSIDADE (I)

DURAÇÃO (t)

FREQUÊNCIA (Tr)

São usadas para projetar estruturas de drenagem e definir chuvas de projeto e limiares deflagradores de inundações/alagamentos.

Fornecidas pelo DAEE, publicações científicas, software Plúvio ou calculadas usando conceitos estatísticos e dados pluviográficos/pluviométricos.

$$I = \frac{K \times Tr^a}{(t + b)^c}$$

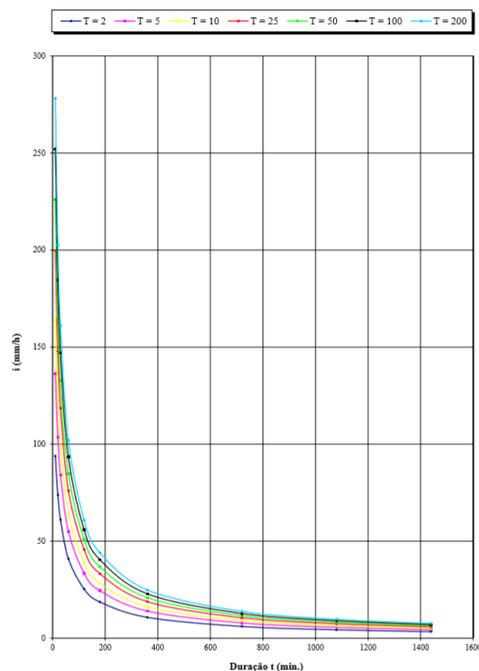


Figura 4.15 - SÃO CAETANO DO SUL: CURVAS I-D-F EM FUNÇÃO DO PERÍODO T (ANOS)

4.59 Equação de precipitações intensas para São Caetano do Sul

Nome da estação / Entidade: Vila Prosperidade – E3-085R / DAEE

Autor: Martinez e Piteri (2015)

Coordenadas geográficas: Lat. 23°37'S; Long. 46°33'W

Altitude: 730 m

Duração da estação: 1943-

Períodos de dados: 1969-1985, 1988-1991, 1993-1994, 1997, 1999-2000, 2002-2005 (30 anos)

$$i_{i,T} = 31,42 (t + 20)^{0,8827} + 9,682 (t + 10)^{0,8866} [-0,4831 - 0,9001 \ln(t/T - 1)]$$

para $10 \leq t \leq 1440$ min.

Onde: i: intensidade da chuva, para a duração t e período de retorno T, em mm/min;

t: duração da chuva em minutos;

T: período de retorno em anos.

Tabela 4.117 – São Caetano do Sul: Previsão de máximas intensidades de chuvas, em mm/h.

Duração t (minutos)	Período de retorno T (anos)								
	2	5	10	15	20	25	50	100	200
10	93,9	136,3	164,3	180,1	191,2	199,8	226,1	252,2	278,2
20	73,8	103,4	123,1	134,1	141,9	147,8	166,2	184,5	202,7
30	61,1	84,1	99,3	107,9	113,9	118,6	132,8	147,0	161,1
60	40,9	55,0	64,3	69,5	73,2	76,0	84,8	93,4	102,0
120	25,3	33,5	38,9	41,9	44,0	45,7	50,7	55,8	60,8
180	18,6	24,5	28,3	30,5	32,0	33,2	36,8	40,4	44,0
360	10,7	14,0	16,1	17,3	18,2	18,8	20,8	22,8	24,8
720	6,0	7,8	9,0	9,7	10,1	10,5	11,6	12,7	13,8
1080	4,3	5,5	6,4	6,8	7,2	7,4	8,2	9,0	9,7
1440	3,4	4,3	5,0	5,3	5,6	5,8	6,4	7,0	7,6

Tabela 4.118 – São Caetano do Sul: Previsão de máximas alturas de chuvas, em mm.

Duração t (minutos)	Período de retorno T (anos)								
	2	5	10	15	20	25	50	100	200
10	15,7	22,7	27,4	30,0	31,9	33,3	37,7	42,0	46,4
20	24,6	34,5	41,0	44,7	47,3	49,3	55,4	61,5	67,6
30	30,5	42,0	49,7	54,0	57,0	59,3	66,4	73,5	80,6
60	40,9	55,0	64,3	69,5	73,2	76,0	84,8	93,4	102,0
120	50,6	66,9	77,7	83,8	88,1	91,4	101,5	111,5	121,5
180	55,9	73,4	85,0	91,5	96,1	99,7	110,5	121,3	132,0
360	64,4	83,9	96,7	104,0	109,1	113,0	125,1	137,1	149,0
720	72,5	93,9	108,1	116,1	121,7	126,0	139,3	152,5	165,6
1080	77,3	99,9	114,8	123,2	129,1	133,7	147,7	161,6	175,4
1440	80,8	104,2	119,7	128,4	134,5	139,2	153,7	168,1	182,5



Equações de chuva (i – d – f) fornecidas pelo daee

Desagregação temporal da chuva de projeto

A chuva de projeto, quando utilizada no método do Hidrograma Unitário, é sempre dividida em períodos menores (durações unitárias)

DU = 0,133 * tc (recomendação do DNIT)

A forma como a chuva avança no tempo (são sucessivos eventos de chuva de duração unitária até que se complete a duração total da chuva de projeto) é determinada por meio de métodos de desagregação temporal.

Os mais usuais são o método dos blocos alternados (+ prático) e o método dos quartis de Huff. O método de blocos alternados se assemelha ao 2º quartil de Huff.

Recomendação de quartil de Huff para cálculo da vazão de pico (Canholi, 2014):

Duração da chuva de projeto	Quartil
< 12 h	1º e 2º
Entre 12 e 24 h	3º
Acima de 24 h	4º

Desagregação temporal da chuva de projeto

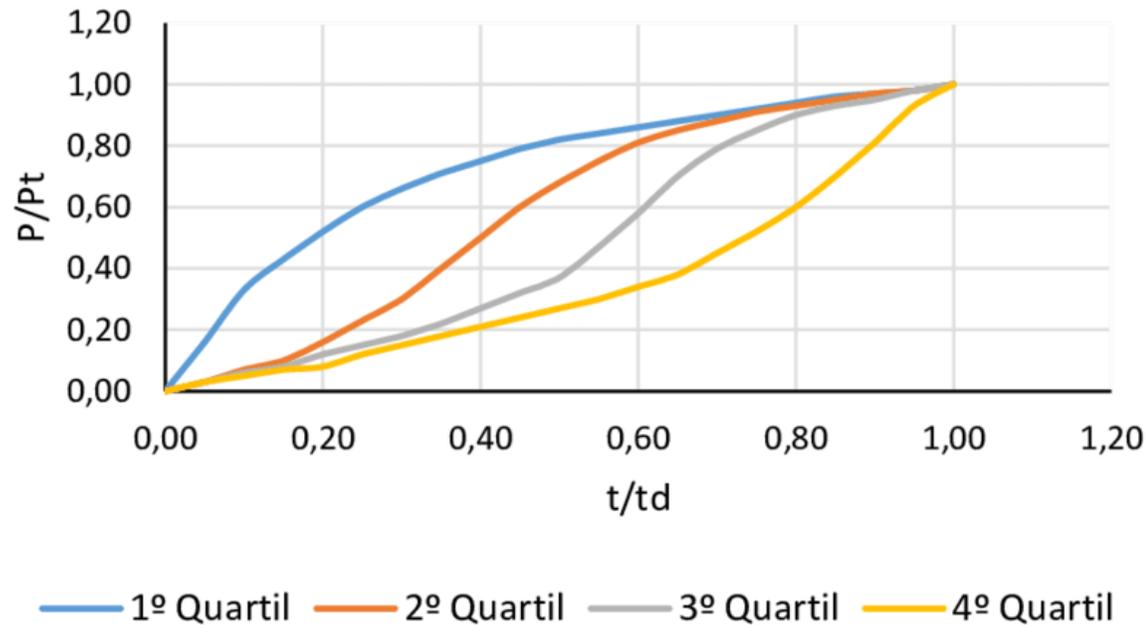


Table 3. Median Time Distributions of Heavy Storm Rainfall at a Point

Cumulative percent of storm rainfall for given storm type

<i>Cumulative percent of storm time</i>	<i>First-quartile</i>	<i>Second-quartile</i>	<i>Third-quartile</i>	<i>Fourth-quartile</i>
5	16	3	3	2
10	33	8	6	5
15	43	12	9	8
20	52	16	12	10
25	60	22	15	13
30	66	29	19	16
35	71	39	23	19
40	75	51	27	22
45	79	62	32	25
50	82	70	38	28
55	84	76	45	32
60	86	81	57	35
65	88	85	70	39
70	90	88	79	45
75	92	91	85	51
80	94	93	89	59
85	96	95	92	72
90	97	97	95	84
95	98	98	97	92

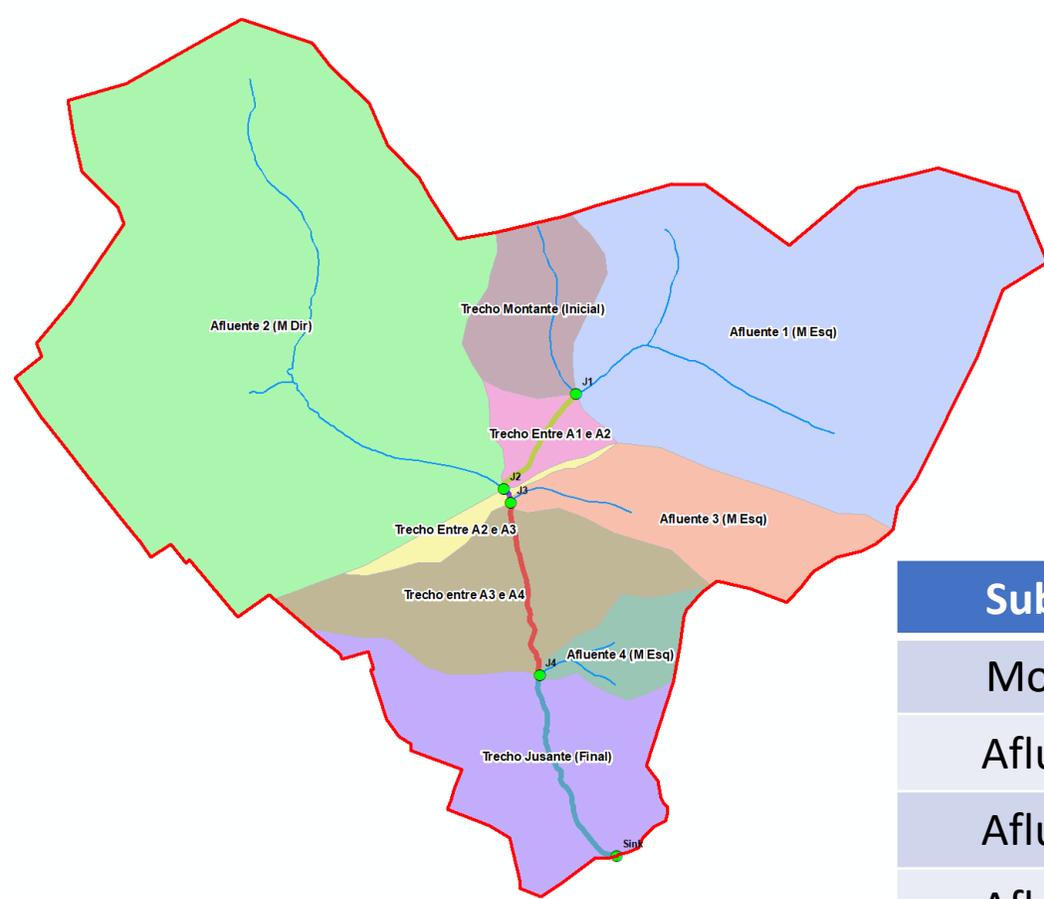
ESCOLHA DA DURAÇÃO DA CHUVA DE PROJETO

- De modo geral, considera-se a duração da chuva $t = t_c$ ou, quando se utiliza o método do hidrograma unitário, considera-se $t = 1,6 * t_c$.
- Como já vimos, é um parâmetro difícil de se obter com exatidão, uma vez que a intensidade da chuva, a forma da bacia e a urbanização tem efeitos significativos no tempo de concentração.
- Convém verificar as velocidades de trânsito da onda de cheia obtidas quando usar de fórmulas empíricas para estimar o t_c .

Lembra da nossa gotinha?
Para determinar a chuva de projeto da nossa
bacia vamos precisar andar junto com ela
pelo nosso rio.



Valores de tc para as sub-bacias do cór. Do Corvo Branco



Sub-bacia	tc corrigido	Sub-bacia	tc corrigido
Montante	16,585 min	Interflúvio A1-A2	16,286 min
Afluyente 1	46,197 min	Interflúvio A2-A3	3,769 min
Afluyente 2	55,318 min	Interflúvio A3-A4	22,511 min
Afluyente 3	40,927 min	Jusante	24,123 min
Afluyente 4	11,183 min		

Mas... Qual valor de t_c adotar para determinar a chuva de projeto da bacia do córrego do Corvo Branco?

Resposta: o mínimo tempo necessário para que a bacia inteira (isto é, todas as sub-bacias) produza vazão no Exutório.



Valores de t_c para as sub-bacias do córrego do Corvo Branco

Mas, quanto é este tempo?

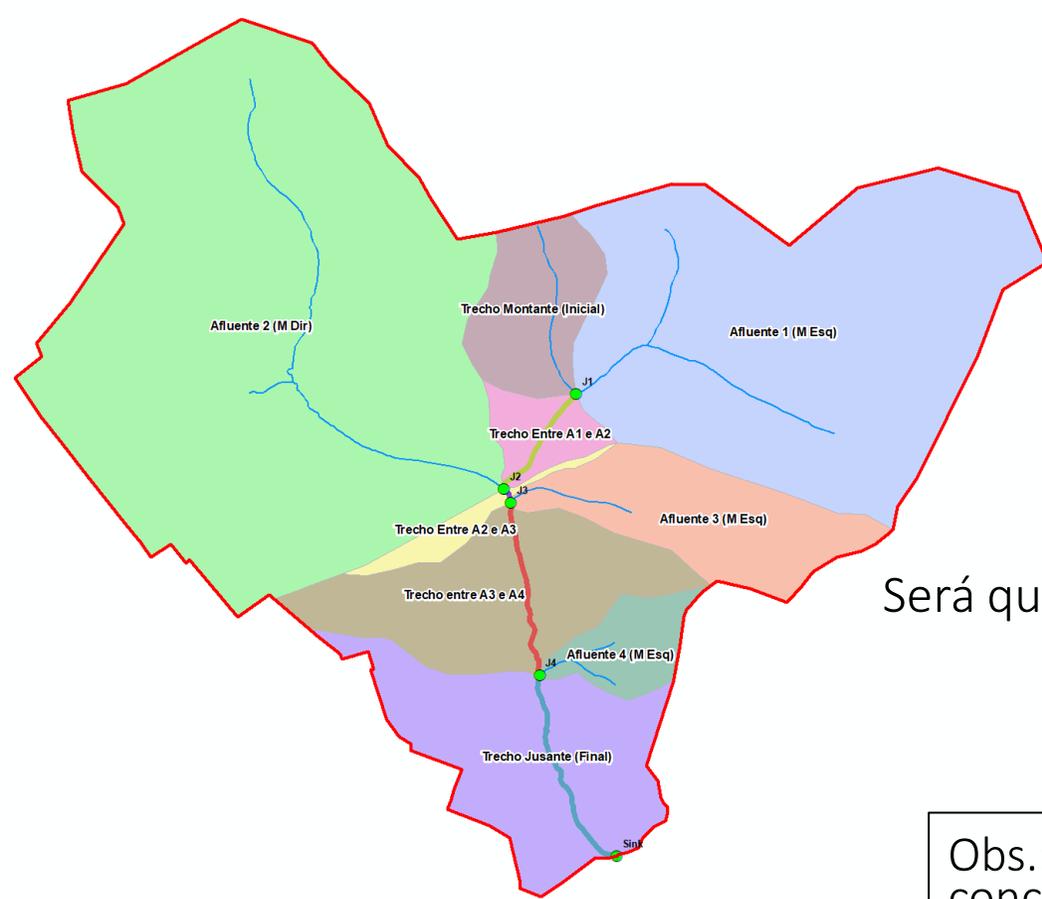
Será que basta somar o tempo que a água demora para percorrer da bacia mais distante até o exutório?

Não! Depende da declividade.

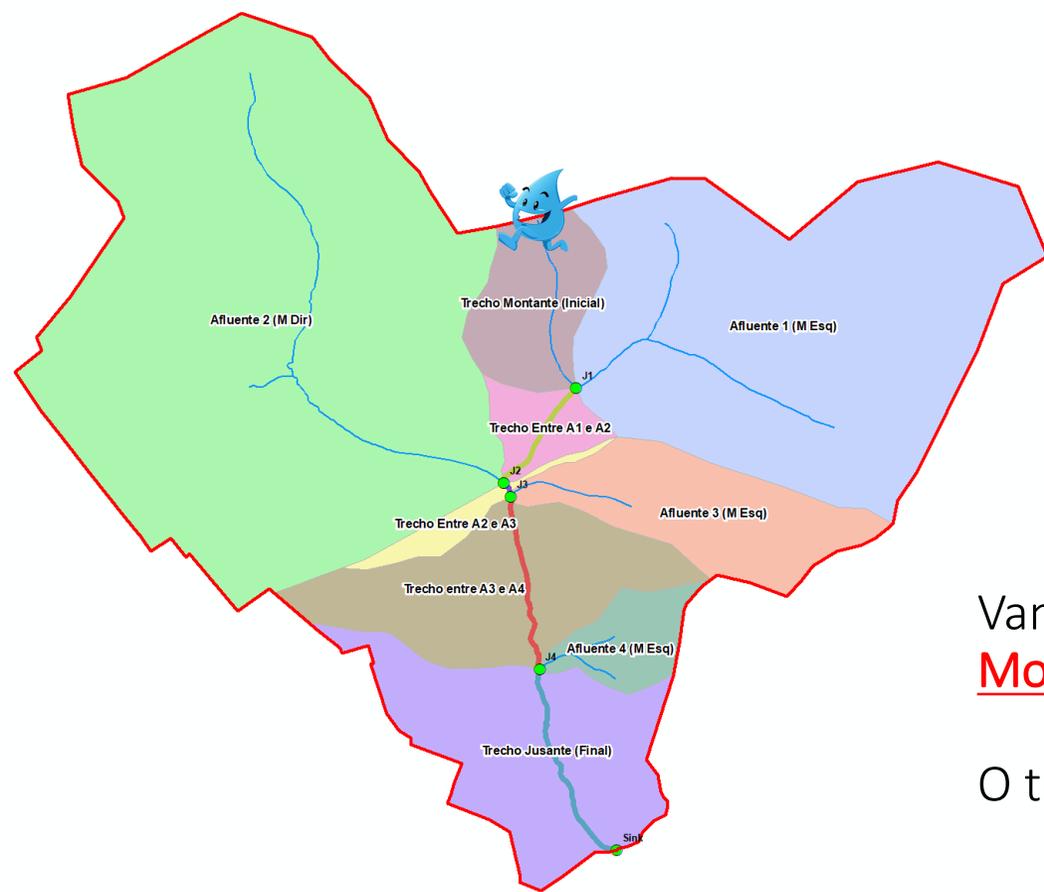
Obs.: Faremos uma simplificação considerando que os tempos de concentração dos interflúvios é igual ao tempo que a água demora para percorrer o caminho entre as junções.

Na prática, uma coisa é o tempo de trânsito da água **no canal** que vale, não na **sub-bacia**... Mas para saber isto precisaríamos conhecer a seção transversal do rio, fazermos uma modelagem hidráulica... Complexo e dependente de informações detalhadas de campo!

Vamos assumir que o tempo é o mesmo, desde que as velocidades estimadas sejam coerentes.



Valores de tc para as sub-bacias do córrego do Corvo Branco



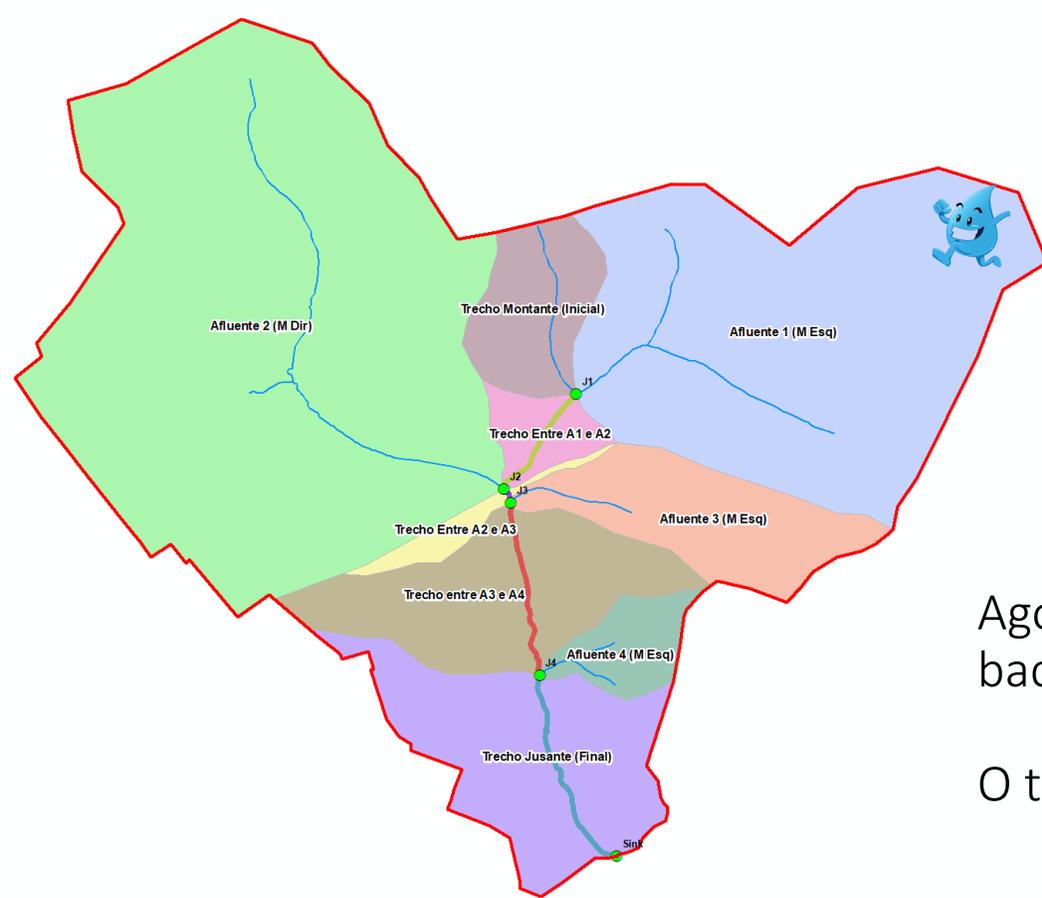
Vamos calcular o tempo que leva para nossa gotinha sair da bacia de Montante e chegar ao exutório:

O trajeto que a gotinha irá percorrer será...

- Toda a bacia de Montante tc Mont = 16,585 min
- Interflúvio A1-A2 (no canal principal) tc A1-A2 = 16,286 min
- Interflúvio A2-A3 (no canal principal) tc A2-A3 = 3,769 min
- Interflúvio A3-A4 (no canal principal) tc A3-A4 = 22,511 min
- Trecho jusante (no canal principal) tc jusante = 24,123 min

Total: $16,585 + 16,286 + 3,769 + 22,511 + 24,123 = 83,274$ min

Valores de tc para as sub-bacias do córrego do Corvo Branco



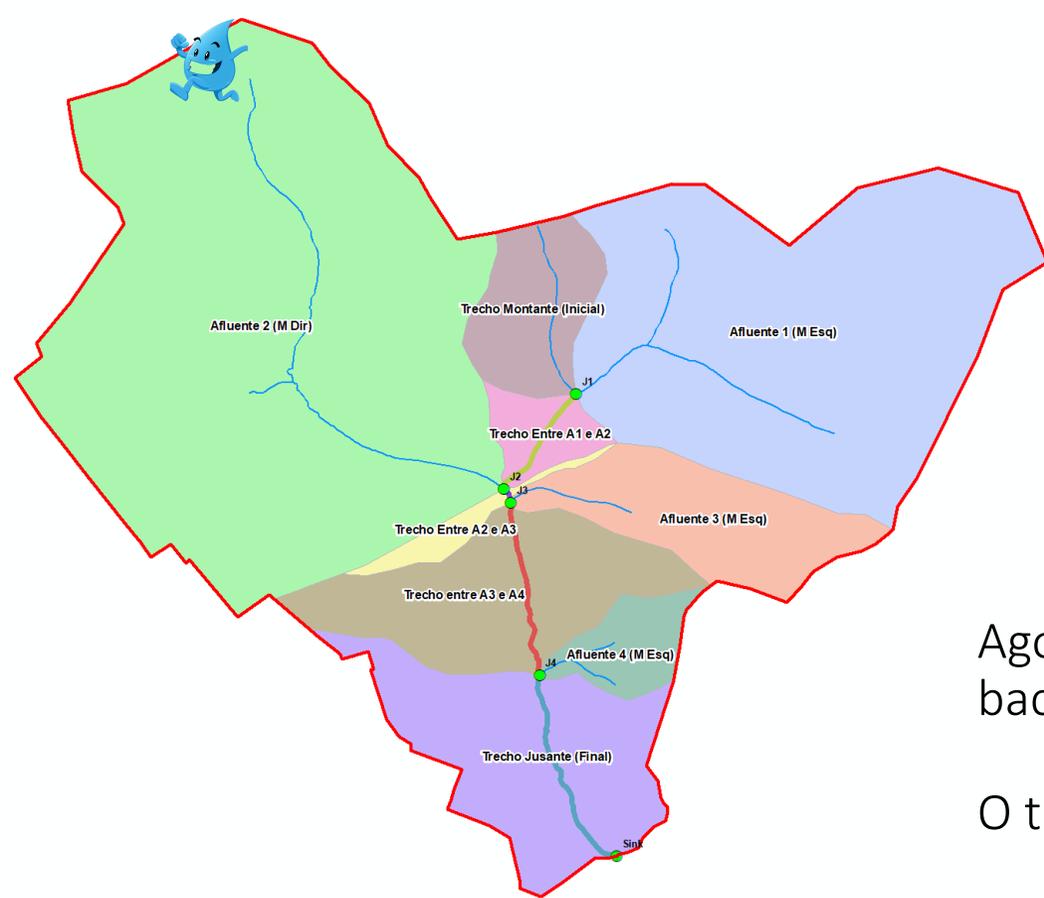
Agora... Vamos calcular o tempo que leva para nossa gotinha sair da bacia do **Afluentes 1 e chegar ao exutório**:

O trajeto que a gotinha irá percorrer será...

- Toda a bacia do afluente 1 tc Afl 1 = 46,197 min
- Interflúvio A1-A2 (no canal principal) tc A1-A2 = 16,286 min
- Interflúvio A2-A3 (no canal principal) tc A2-A3 = 3,769 min
- Interflúvio A3-A4 (no canal principal) tc A3-A4 = 22,511 min
- Trecho jusante (no canal principal) tc jusante = 24,123 min

Total: $46,197 + 16,286 + 3,769 + 22,511 + 24,123 = 112,886$ min

Valores de tc para as sub-bacias do córrego do Corvo Branco



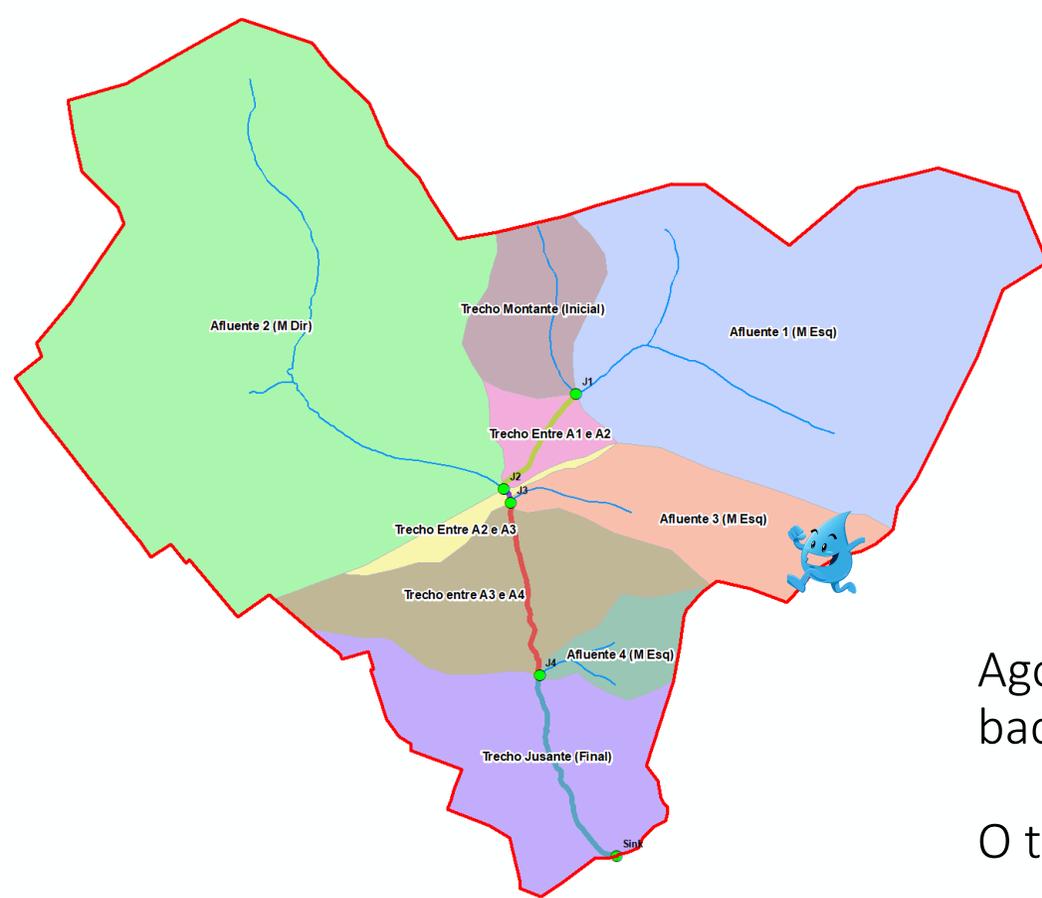
Agora... Vamos calcular o tempo que leva para nossa gotinha sair da bacia do **Afluentes 2 e chegar ao exutório**:

O trajeto que a gotinha irá percorrer será...

- Toda a bacia do afluente 2 tc Afl 2 = 55,318 min
- Interflúvio A2-A3 (no canal principal) tc A2-A3 = 3,769 min
- Interflúvio A3-A4 (no canal principal) tc A3-A4 = 22,511 min
- Trecho jusante (no canal principal) tc jusante = 24,123 min

Total: $55,318 + 3,769 + 22,511 + 24,123 = 105,721$ min

Valores de tc para as sub-bacias do córrego do Corvo Branco



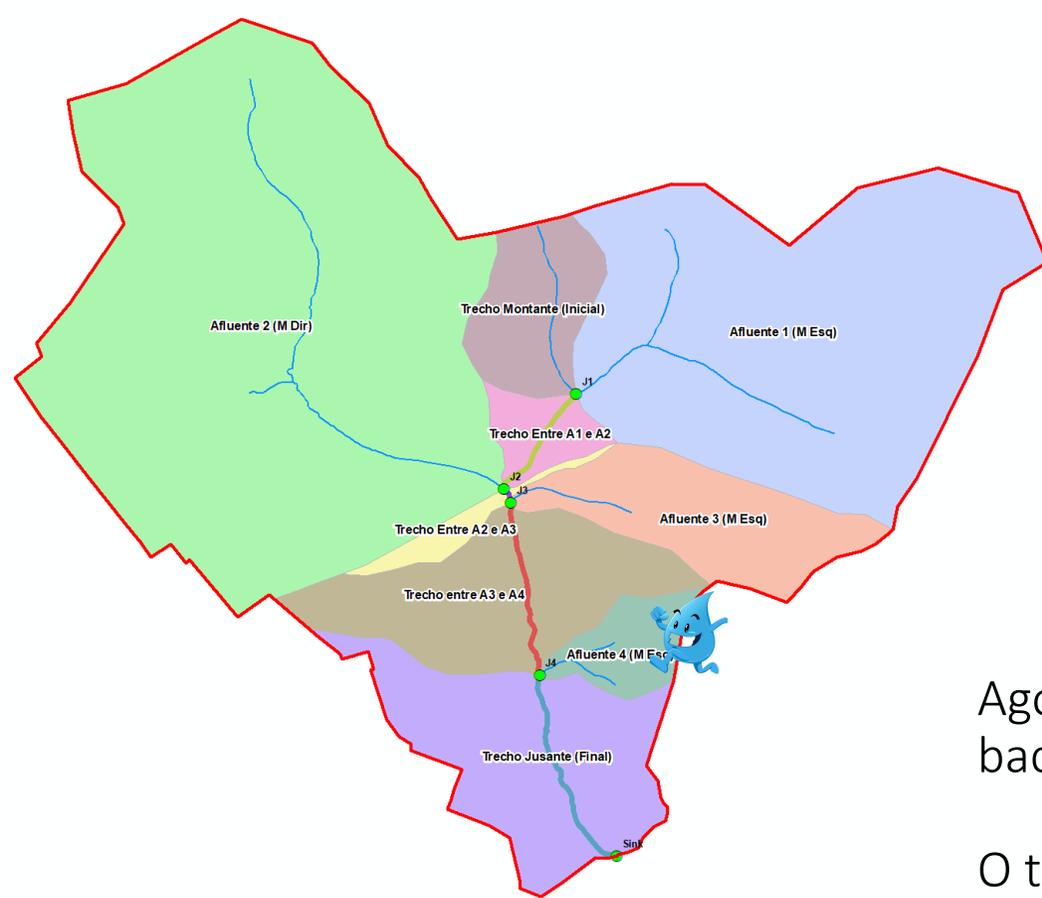
Agora... Vamos calcular o tempo que leva para nossa gotinha sair da bacia do **Afluente 3 e chegar ao exutório**:

O trajeto que a gotinha irá percorrer será...

- Toda a bacia do afluente 3 $tc\ Afl\ 3 = 40,927\ min$
- Interflúvio A3-A4 (no canal principal) $tc\ A3-A4 = 22,511\ min$
- Trecho jusante (no canal principal) $tc\ jusante = 24,123\ min$

Total: $40,927 + 22,511 + 24,123 = 87,561\ min$

Valores de tc para as sub-bacias do córrego do Corvo Branco



Agora... Vamos calcular o tempo que leva para nossa gotinha sair da bacia do **Afluente 4 e chegar ao exutório**:

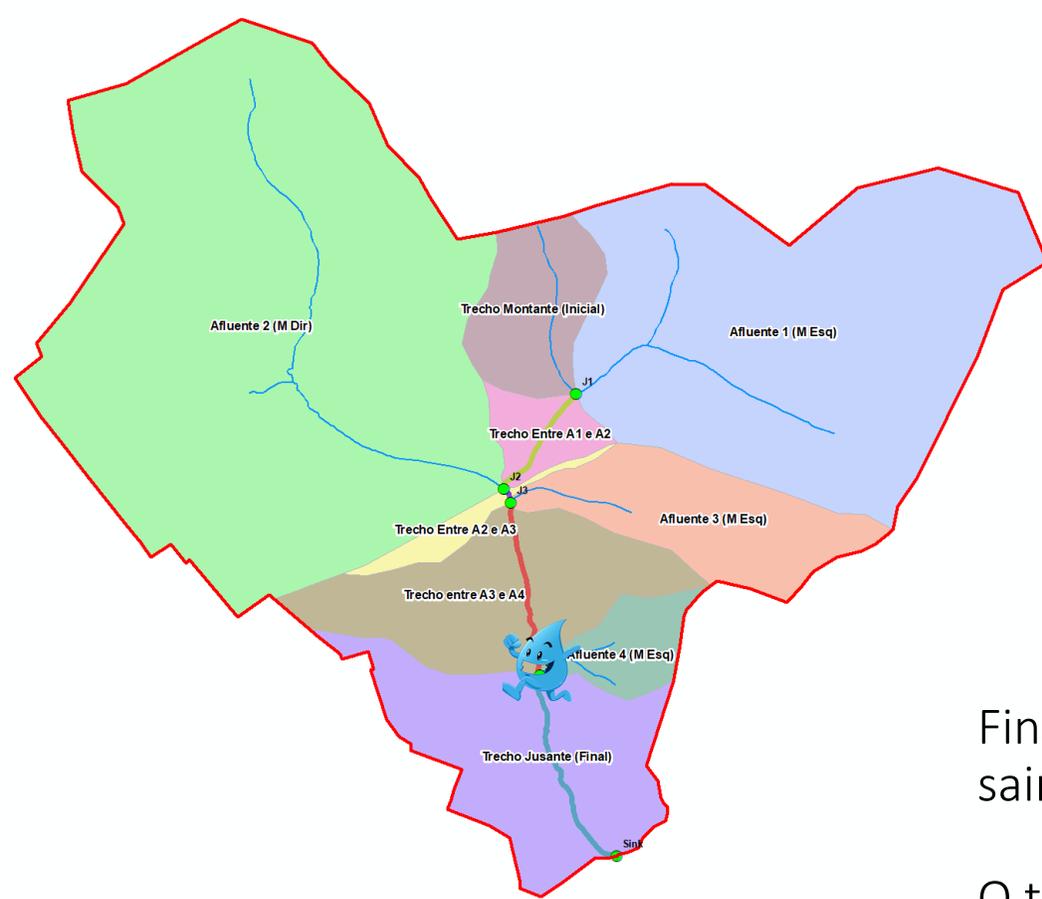
O trajeto que a gotinha irá percorrer será...

- Toda a bacia do afluente 4
- Trecho jusante (no canal principal)

tc Afl 4 = 11,183 min
tc jusante = 24,123 min

Total: 11,183 + 24,123 = **35,306 min**

Valores de tc para as sub-bacias do córrego do Corvo Branco

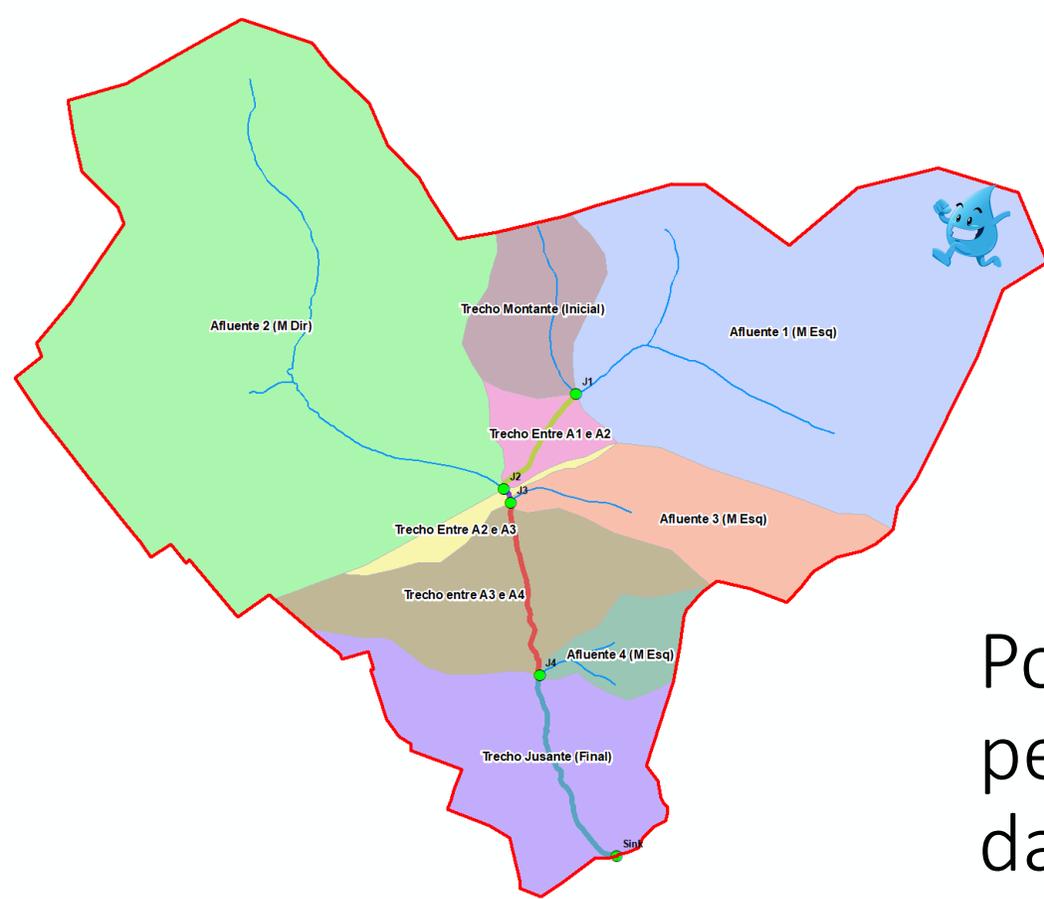


Finalmente... Vamos calcular o tempo que leva para nossa gotinha sair da bacia de jusante e chegar ao exutório:

O trajeto que a gotinha irá percorrer será...

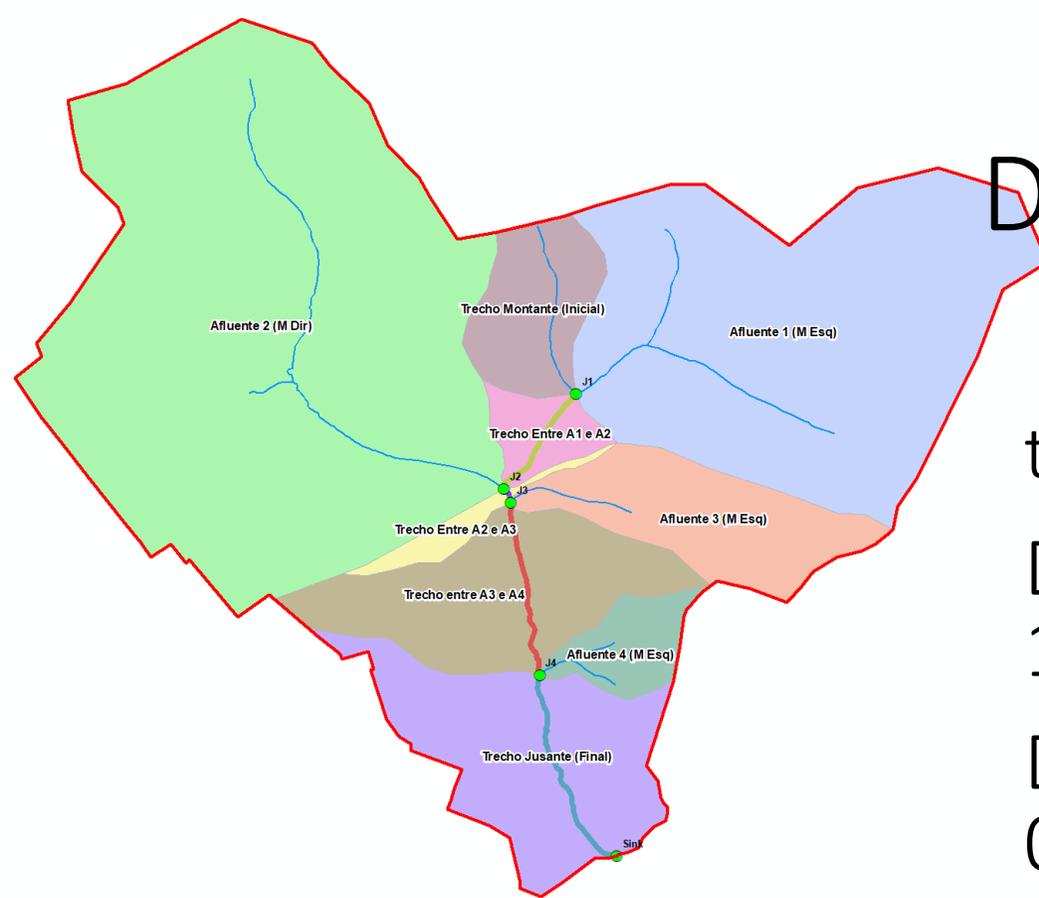
- Trecho jusante (no canal principal) tc jusante = 24,123 min
- Total: 24,123 min**

Valores de tc para as sub-bacias do córrego do Corvo Branco



Portanto, o maior tempo que a água percorre é a distância percorrida da água da bacia do afluente 1 até o exutório... **Aproximadamente 113 minutos.** Esse é o tempo de concentração da bacia que estamos modelando.

Definição dos parâmetros da chuva de projeto



$$t_c = 113 \text{ min}$$

$$\text{Duração total da chuva de projeto (t)} = 1,6 * t_c = 1,6 * 113 = \mathbf{180 \text{ min}}$$

$$\text{Duração unitária (DU)} = 0,133 * t_c = 0,133 * 113 = \mathbf{15 \text{ min}}$$

$$1: \quad i_{t,T} = 35,45 (t+20)^{-0,8894} + 5,97 (t+20)^{-0,7749} \cdot [-0,4772 - 0,9010 \ln \ln(T/T-1)] \quad \text{DAEE Botucatu (mm/min)}$$

$$2: \quad i_{t,T} = 30,68 (t+20)^{-0,8563} + 3,97 (t+10)^{-0,7566} \cdot [-0,4754 - 0,8917 \ln \ln(T/T-1)] \quad \text{DAEE Bauru (mm/min)}$$

$$3: \quad i = \frac{1739,406 \cdot T^{0,119}}{(t + 22,842)^{0,834}} \quad \text{Plúvio Lençóis Paulista (mm/h)}$$

total chuva equação 1: 122,3 mm ; total chuva equação 2: 108,0 mm ; total chuva equação 3: 107,5 mm

Definição do hietograma de projeto – quartis de Huff

Tempo decorrido desde o início da chuva (min)	% do tempo total	% chuva total (Huff 1º Quartil)	Chuva total (mm)	Chuva no intervalo (mm)
15	8 %	26 %	32,0	32,0
30	17 %	47 %	57,0	24,9
45	25 %	60 %	73,4	16,4
60	33 %	69 %	84,4	11,0
75	42 %	77 %	93,7	9,3
90	50 %	82 %	100,3	6,6
105	58 %	85 %	104,2	3,9
120	67 %	89 %	108,6	4,4
135	75 %	92 %	112,5	3,9
150	83 %	95 %	116,4	3,9
165	92 %	97 %	119,1	2,7
t = 180	100 %	100 %	122,3	3,2

A duração de cada intervalo é de $DU = 15$ min, como determinado anteriormente.

Os valores de % dos quartis de Huff foram obtidos por interpolação.

O total acumulado foi definido anteriormente.

Definição do hietograma de projeto – quartis de Huff

Tempo decorrido desde o início da chuva (min)	% do tempo total	% chuva total (Huff 2º Quartil)	Chuva total (mm)	Chuva no intervalo (mm)
30	8 %	6 %	7,3	7,3
60	17 %	14 %	16,6	9,3
90	25 %	22 %	26,9	10,3
120	33 %	35 %	42,8	15,9
150	42 %	55 %	67,7	24,9
180	50 %	70 %	85,6	17,9
210	58 %	79 %	96,6	11,0
240	67 %	86 %	105,4	8,8
270	75 %	91 %	111,3	5,9
300	83 %	94 %	115,2	3,9
330	92 %	97 %	119,1	3,9
t = 360	100 %	100 %	122,3	3,2

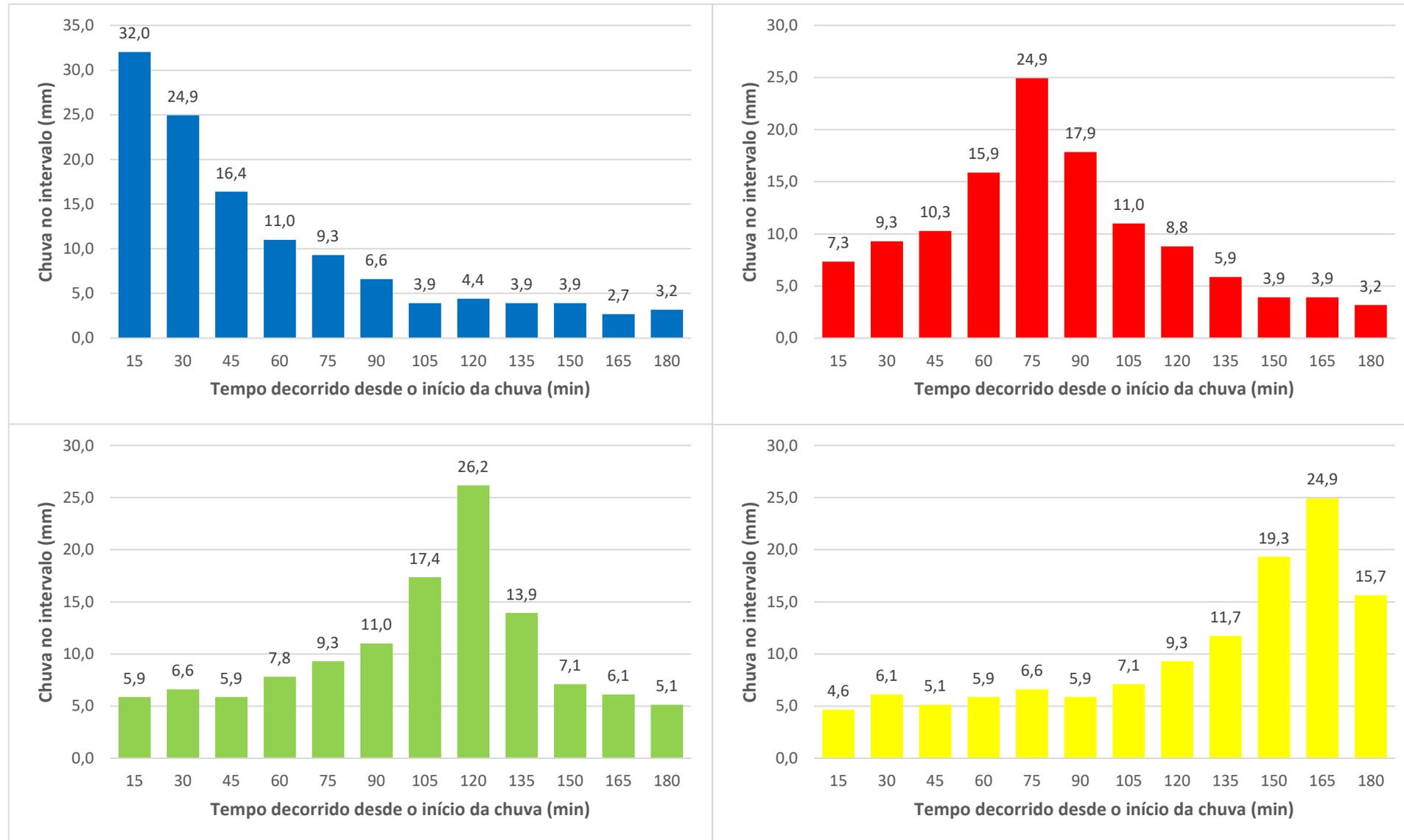
Definição do hietograma de projeto – quartis de Huff

Tempo decorrido desde o início da chuva (min)	% do tempo total	% chuva total (Huff 3º Quartil)	Chuva total (mm)	Chuva no intervalo (mm)
30	8 %	5 %	5,9	5,9
60	17 %	10 %	12,5	6,6
90	25 %	15 %	18,3	5,9
120	33 %	21 %	26,2	7,8
150	42 %	29%	35,5	9,3
180	50 %	38 %	46,5	11,0
210	58 %	52 %	63,8	17,4
240	67 %	74 %	90,0	26,2
270	75 %	85 %	103,9	13,9
300	83 %	91 %	111,0	7,1
330	92 %	96 %	117,1	6,1
t = 360	100 %	100 %	122,3	5,1

Definição do hietograma de projeto – quartis de Huff

Tempo decorrido desde o início da chuva (min)	% do tempo total	% chuva total (Huff 4º Quartil)	Chuva total (mm)	Chuva no intervalo (mm)
30	8 %	4 %	4,6	4,6
60	17 %	9 %	10,8	6,1
90	25 %	13 %	15,9	5,1
120	33 %	18 %	21,8	5,9
150	42 %	23 %	28,4	6,6
180	50 %	28 %	34,2	5,9
210	58 %	34 %	41,3	7,1
240	67 %	41 %	50,6	9,3
270	75 %	51 %	62,4	11,7
300	83 %	67 %	81,7	19,3
330	92 %	87 %	106,6	24,9
t = 360	100 %	100 %	122,3	15,7

As chuvas de projeto resultantes nos 4 quartis de Huff, para $T_r = 100$ anos são essas:



Método do Hidrograma Unitário Triangular do SCS/NRCS ou Método do Número da Curva (CN)



Hidrograma é o gráfico da variação da vazão resultante de uma chuva efetiva.

Quando esta chuva é unitária (por exemplo, uma chuva de 1 mm ou de 1 cm), o gráfico é denominado hidrograma unitário.

O método do hidrograma unitário foi desenvolvido por Le Roy K. Sherman em 1932.

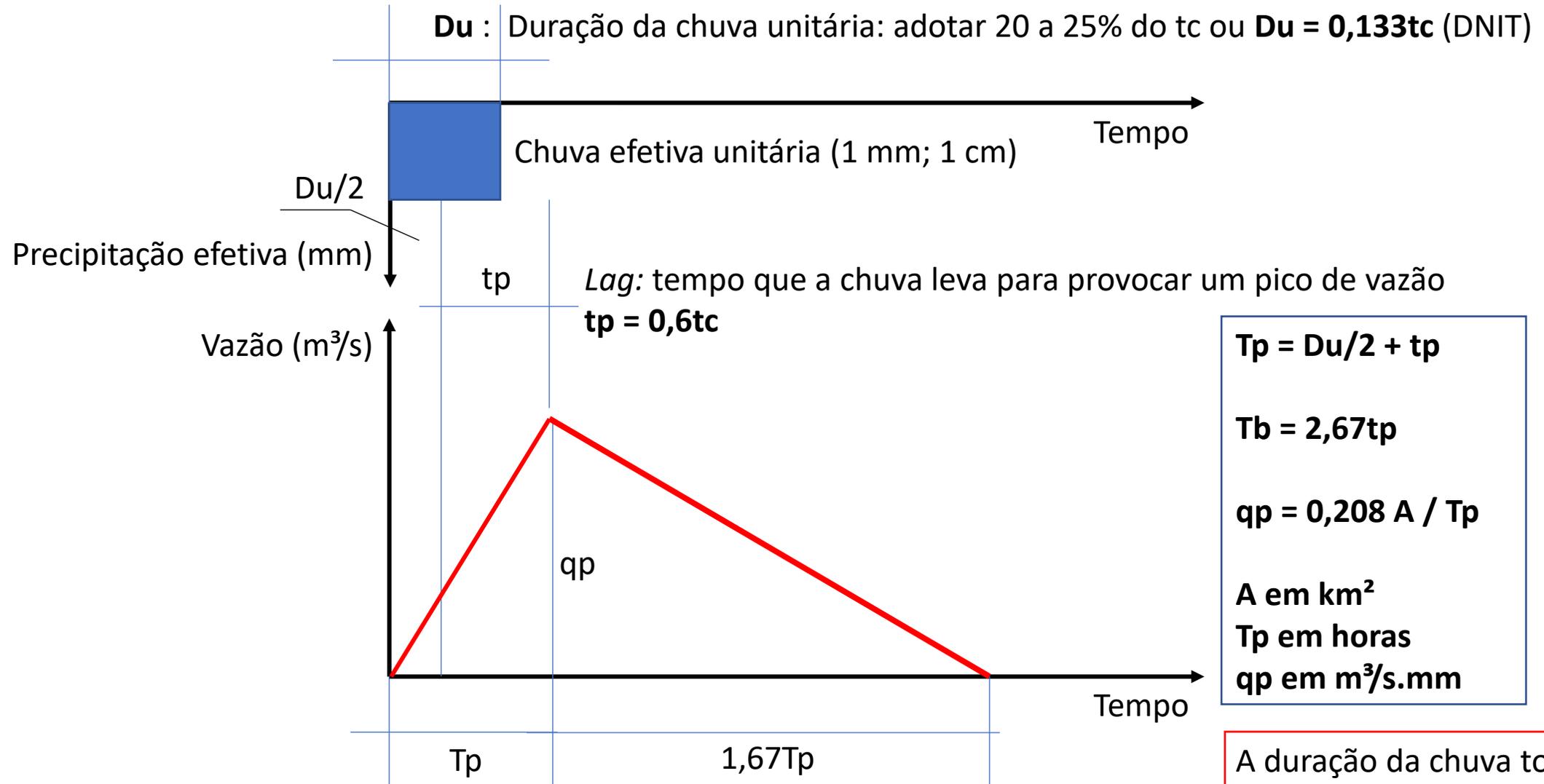
Hipóteses:

- Em uma dada bacia hidrográfica, o tempo de duração do escoamento superficial é constante para chuvas de igual duração;
- duas chuvas de igual duração, produzindo volumes diferentes de escoamento superficial, dão lugar a hidrogramas em que as ordenadas em tempos correspondentes são proporcionais aos volumes totais escoados; e
- a distribuição, no tempo, do escoamento superficial de determinada precipitação independe de precipitações anteriores.

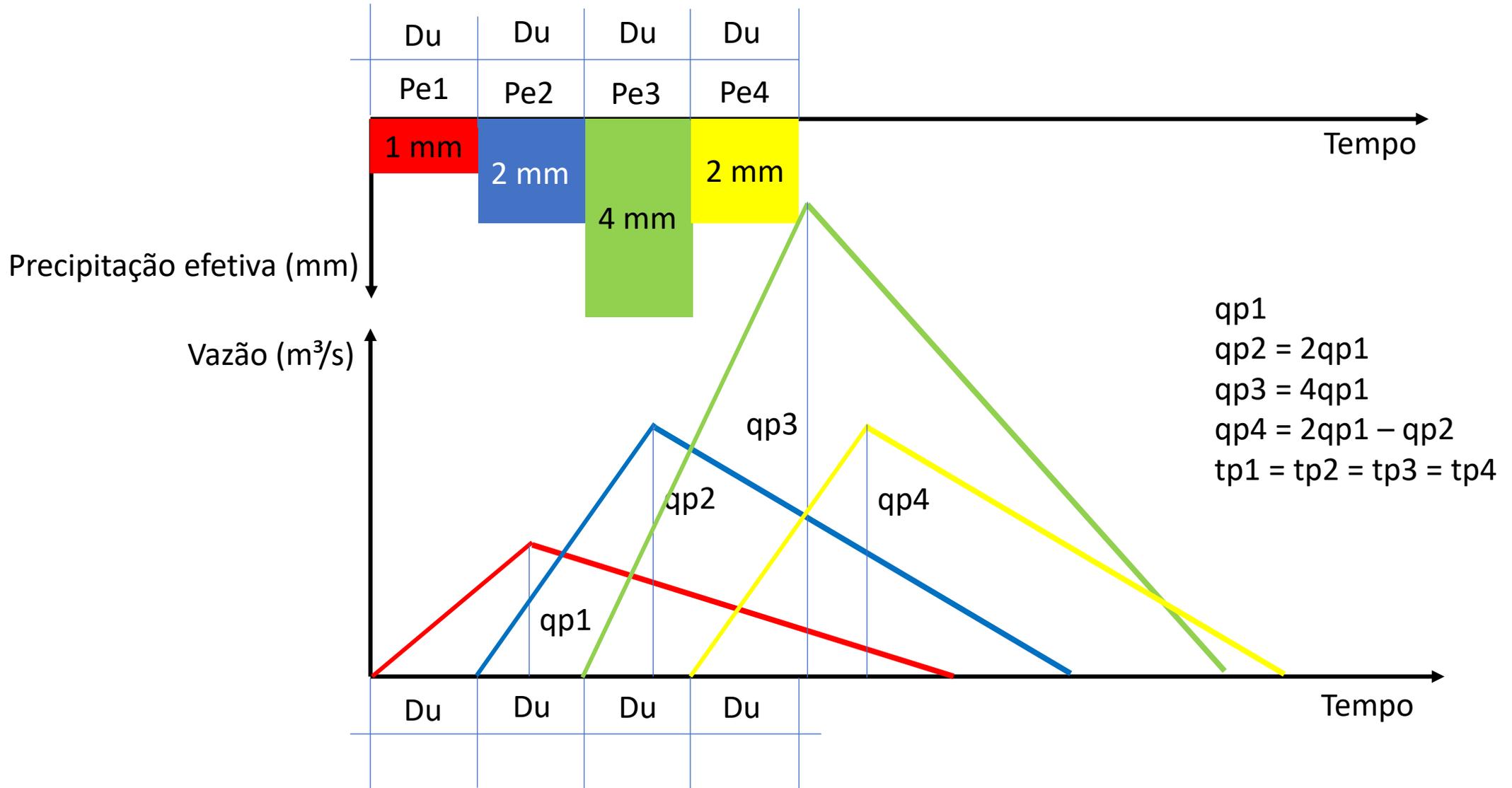
Hidrogramas unitários sintéticos foram desenvolvidos na década de 1950 pelo engenheiro Victor Mockus do *Soil Conservation Service* (SCS) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos, após análise de hidrogramas unitários naturais de bacias das mais variadas localizações e extensões dos Estados Unidos.

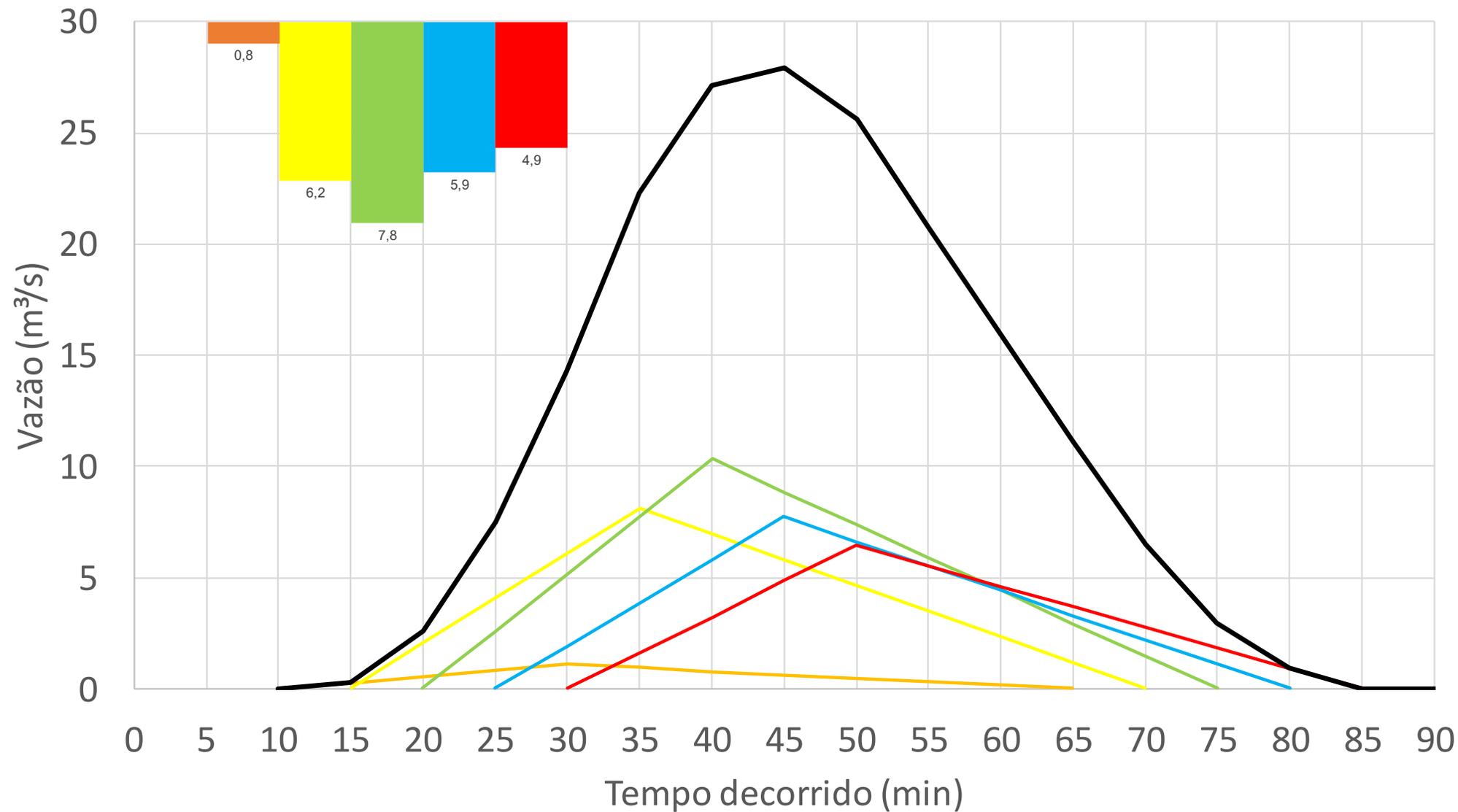
Diversos autores buscaram adaptar este método às condições naturais brasileiras, Setzer e Porto (1979) adaptaram o método para as condições do Estado de São Paulo.

Construção do Gráfico do Hidrograma Unitário



Construção do Gráfico do Hidrograma Unitário



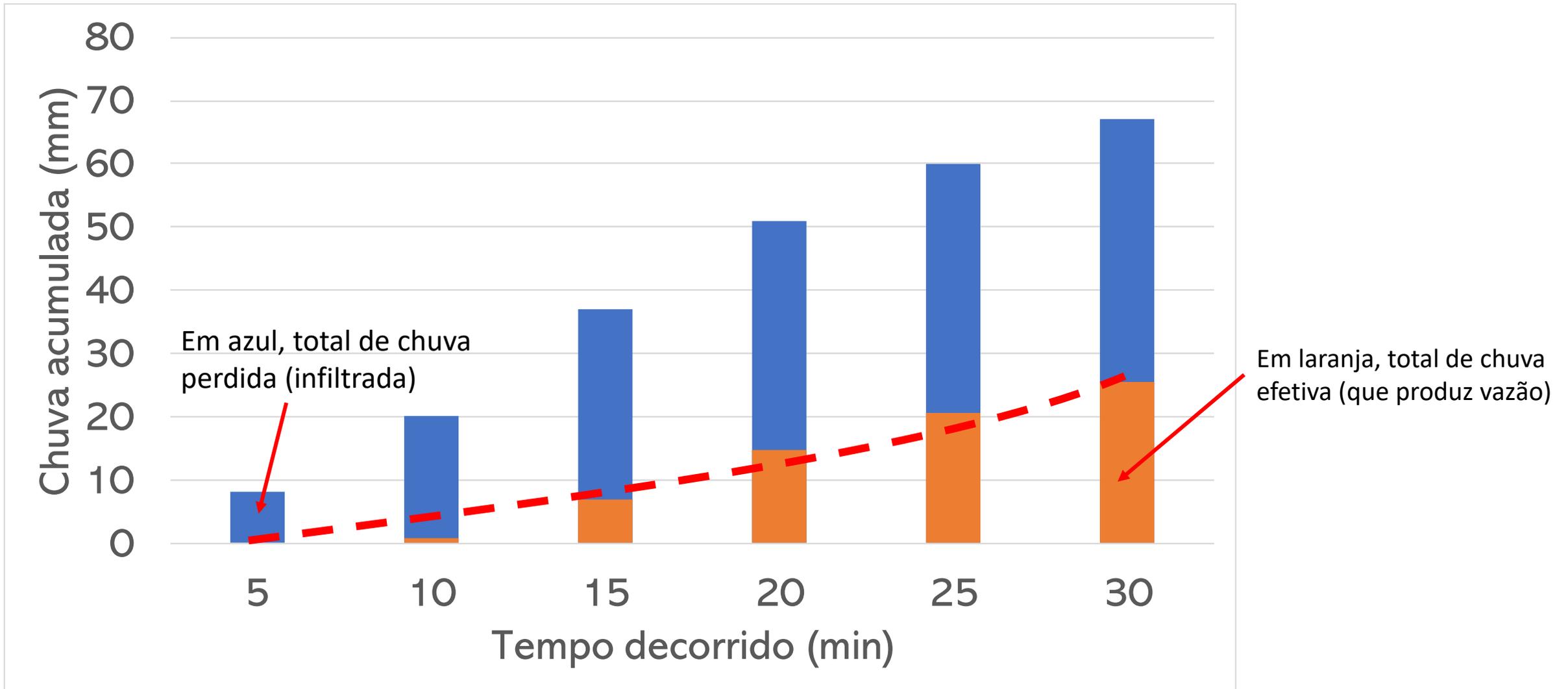


O conceito mais importante do método do hidrograma unitário é o de **precipitação efetiva**, definida como a parcela da chuva que produz escoamento superficial.

A precipitação efetiva depende de alguns fatores, por exemplo:

- **Geologia/Pedologia:** grau de permeabilidade dos solos;
- **Grau de saturação do solo:** quanto mais saturado o solo, menos permeável é o meio; (a resposta do solo para uma mesma precipitação depende da condição de saturação anterior)
- **Ocupação do solo:** áreas urbanas produzem mais chuva efetiva do que áreas rurais ou mesmo áreas vegetadas.

Pelo método do hidrograma unitário do SCS, a capacidade de infiltração decresce em uma função quadrática.



Determinação do Parâmetro CN (Curve Number, ou Número da Curva)

TENTATIVA DE AVALIAÇÃO DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL DE ACORDO COM O SOLO E O SEU RECOBRIMENTO VEGETAL NAS CONDIÇÕES DO ESTADO DE SÃO PAULO.

(adaptação do Apendice A da obra "Design of Small Dams" do Bureau of Reclamation, U.S. Department of Interior, Washington, DC, 1975)

José Setzer
Rubem La Laina Porto

SINOPSE

Graças aos estudos pedológicos havidos em todas as formações geológicas do Estado de São Paulo e à existência de fotografagem aérea completa com restituição aerofotogramétrica cobrindo também as faixas limítrofes dos Estados vizinhos, torna-se possível, aproveitando idéia do Soil Conservation Service dos Estados Unidos, trazer alguma ajuda ao nosso engenheiro na tarefa desagradável, por ser subjetiva, de escolha de coeficientes a aplicar em fórmulas, e no entanto capazes de influenciar fortemente o resultado do cálculo.

Do ponto de vista de formação de enxurrada, encaram-se 5 grupos hidrológicos de solo conforme sua natureza física e tipo de perfil. Os tipos de solo são 41, conforme a formação geológica e a região de ocorrência, cada um apresentando paisagem fisiográfica, cultural e florística peculiares por que os tipos estão enquadrados em 12 zonas ecológicas, as quais refletem o clima e a geologia, e portanto a topografia e as possibilidades agrícolas.

Definido o tipo de solo com auxílio de mapas geológicos e ecológicos e das análises sumárias física e química, as tabelas que trazem a cobertura vegetal e o uso do solo com vários tipos de defesa contra a erosão, indicam, conforme o grupo hidrológico, qual o número mais provável de curva nos gráficos que é a porcentagem de enxurrada no total de água pluvial precipitada.

Trata-se de método, cuja eficiência e rapidez só se adquirem com a prática.

Determinação do Parâmetro CN (Curve Number, ou Número da Curva)

O parâmetro CN depende de três fatores:

1) Umidade antecedente do solo: quanto mais saturado o solo, menor a retenção da água, e, portanto, maior o escoamento superficial. São três as condições de umidade usuais.

- Condição I: Solos secos pouco acima do ponto de murchamento;
- Condição II: Frequente em épocas chuvosas, em que as chuvas nos últimos dias totalizam entre 15 e 40 mm; e
- Condição III: Solos quase saturados, após períodos de chuvas fortes (5 dias) ou baixas temperaturas, em que o efeito da evaporação é reduzido.

Quando não há informação, costuma-se considerar que a condição de umidade é a II.

Determinação do Parâmetro CN (Curve Number, ou Número da Curva)

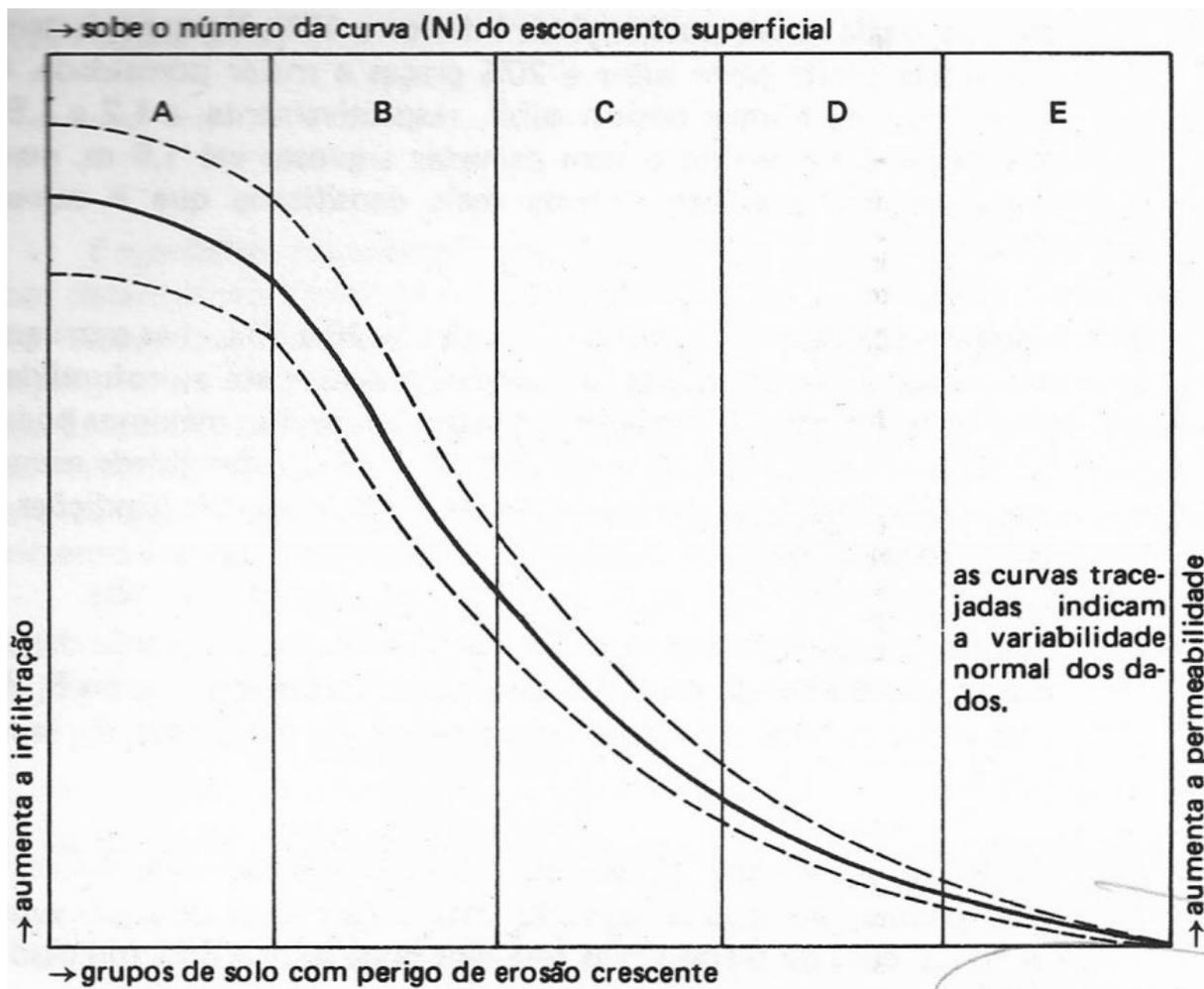
2) Tipo de solo: o SCS divide os solos em cinco **grupos hidrológicos**. Esta classificação abaixo é a apresentada por Setzer e Porto (1979), adaptada para o estado de São Paulo.

- Grupo A: Solos arenosos com teor de argila total inferior a 8%. Não há rocha nem camadas argilosas e nem mesmo densificadas até a profundidade de 1,5 m. O teor de húmus é muito baixo, não atingindo 1%;
- Grupo B: Solos arenosos menos profundos que os do grupo A e com maior teor de argila total, porém ainda inferior a 15%. No caso de terras roxas, este limite pode subir a 20%, graças à maior porosidade. Os dois teores de húmus podem subir, respectivamente, a 1,2 e 1,5%. Não pode haver pedras e nem camadas argilosas até 1,5 m, mas é quase sempre presente camada mais densificada que a camada superficial;

Determinação do Parâmetro CN (Curve Number, ou Número da Curva)

- Grupo C: Solos barrentos com teor total de argila de 20 a 30%, mas sem camadas argilosas impermeáveis ou contendo pedras até a profundidade de 1,2 m. No caso de terras roxas, estes dois limites máximos podem ser 40% e 1,5 m. Nota-se, a cerca de 60 cm de profundidade, camada mais densificada que no grupo B, mas ainda longe das condições de impermeabilidade;
- Grupo D: Solos argilosos (30 a 40% de argila total) e ainda com camada densificada a 50 cm de profundidade, ou solos arenosos como os do grupo B, mas com camada argilosa quase impermeável ou horizonte de seixos rolados;
- Grupo E: Solos barrentos como os do grupo C, mas com camada argilosa impermeável ou com pedras, ou sem tal camada, mas com teor total de argila superior a 40%. No caso de terras roxas, este teor pode subir a 60% (no caso do grupo D, 45%).

Determinação do Parâmetro CN (Curve Number, ou Número da Curva)



Grupo Hidrológico do Solo A – mais permeável, mais infiltração, menos chuva efetiva.

Grupo Hidrológico do Solo E – menos permeável, menos infiltração, mais chuva efetiva.

Determinação do Parâmetro CN (Curve Number, ou Número da Curva)

3) Uso do solo: valores tabelados para cada tipo de ocupação, urbana ou rural.
Ponderar de acordo com o percentual de cada classe de uso em cada sub-bacia.

As tabelas de CN para o uso do solo são encontradas em diversos livros e artigos relacionados ao tema. Algumas delas serão colocadas ao final desta apresentação.

Formulação do método:

$$Pe = \frac{(P - \alpha \times S)^2}{P + (1 - \alpha) \times S} \text{ com } P \geq \alpha \times S$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

Onde:

Pe: precipitação efetiva (mm);

P: precipitação (mm);

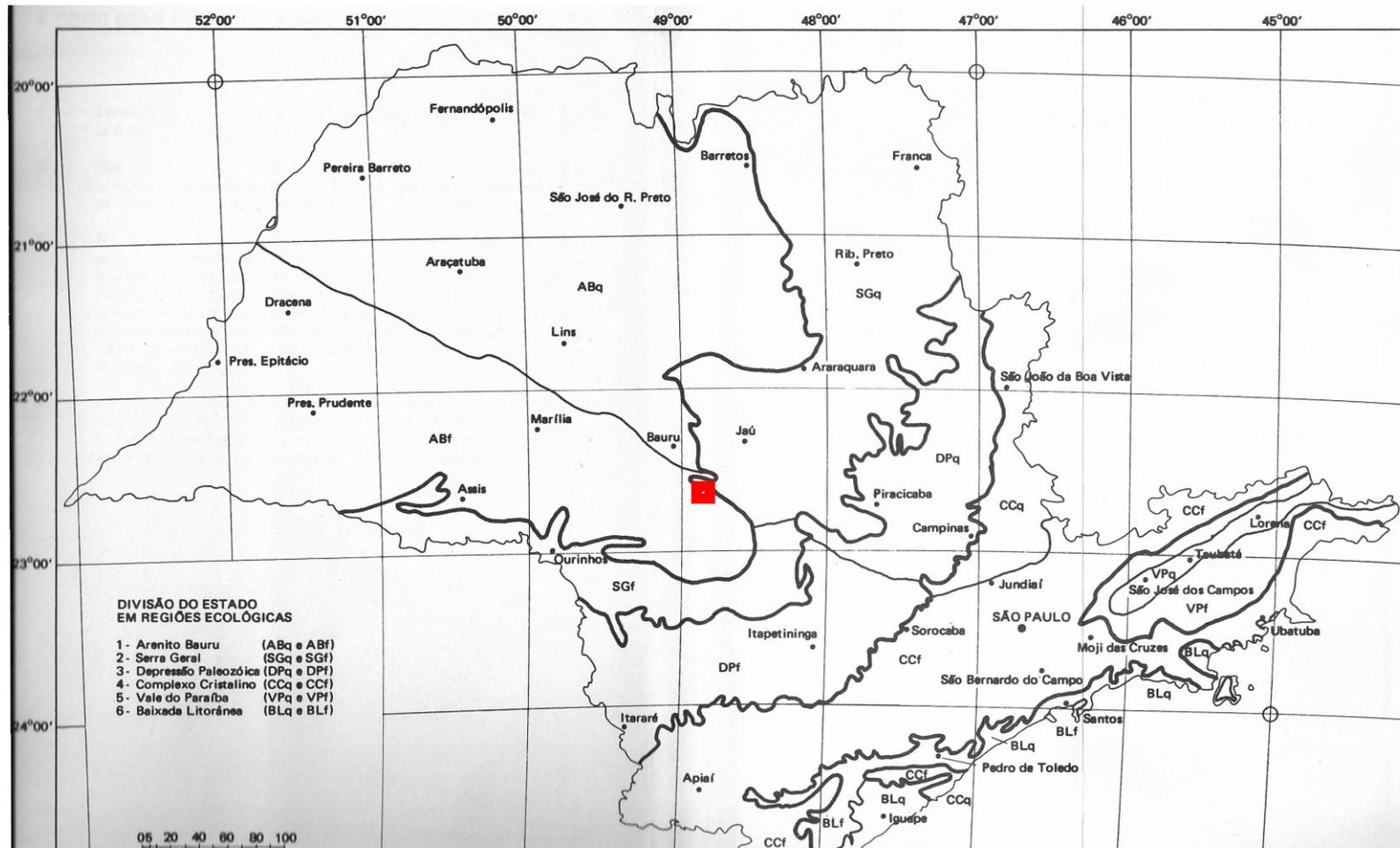
S: retenção potencial do solo (mm).

$\alpha \times S$ é o que alguns autores denominam **abstração inicial**.

Recomenda-se ponderar o valor de α (Canholi)

- Para bacias 100% rurais, adotar $\alpha = 0,2$
- Para bacias 100% urbanas, adotar $\alpha = 0,1$

Determinando o Grupo Hidrológico do Solo



Lençóis Paulista encontra-se na zona ecológica ABf (Arenito Bauru – clima frio)

O Grupo Hidrológico do Solo é o parâmetro mais difícil de ser determinado, então faremos juntos.

O mapa de Setzer e Porto (1979) traz uma divisão do estado de SP em regiões ecológicas, uma combinação entre geologia e clima.

AVALIAÇÃO TENTATIVA DA PERCENTAGEM DE CADA UM DOS CINCO GRUPOS HIDROLÓGICOS DE SOLO POR ZONA ECOLÓGICA NO ESTADO DE SÃO PAULO

nº do tipo de solo	descrição do tipo de solo	GRUPO HIDROLÓGICO				
		A	B	C	D	E
ZONA ECOLÓGICA ARENITO BAURU ABq						
1	Solos arenosos de arenito Bauru quase isento de cimento calcário, topografia quase plana, pastos e cerrados mais ou menos maltratados, cultivos muito raros. Exemplos: Sud Mennucci, vale dos ribs. Santa Rita e Marinheiro.	65	30	5	-	-
2	Solos do mesmo arenito com cimento calcário, topografia ondulada, cultivados intensamente, pouca pastagem. Exemplos: Monte Alto, Monte Azul, Mirassol, espigão da E.F. Noroeste de Rubiácea a Murutinga; de Rubiácea a Alto Alegre; espigão da E.F. Araraq. de Dobrada a Catiguá.	60	30	10	-	-
3	Pequena área de basalto em meio a arenito Bauru intermediário entre os dois tipos anteriores, portanto uma terra roxa arenosa. Exemplos: Icém, Ibitinga, Nova Europa, Itapura. Bem cultivado.	30	55	10	5	-
ZONA ECOLÓGICA ARENITO BAURU ABf						
4	Como 1, mas com inverno mais frio e menos seco. Exemplos: Indiana, Martinópolis; meia encosta dos afluentes do Paranapanema de Rancharia a Narandiba e de Platina a Ubirajara; entre Agudos e Lençóis e entre Areiópolis e Domélia.	60	35	5	-	-

nº do tipo de solo	descrição do tipo de solo	GRUPO HIDROLÓGICO				
		A	B	C	D	E
5	Como 2, mas com inverno mais frio e menos seco. Exemplos: planalto de Garça a Pompeia; espigão de Lucélia a Dracena e de Pirapozinho a Santo Anastácio através de Presidente Prudente. ZONA ECOLÓGICA SERRA GERAL SGq	55	35	10	-	-
6	Restos de arenito Bauru não calcífero no planalto Franca-Pedregulho, Brodosqui-Batatais-Nuporanga, São Carlos-Ibaté e na serra de Itaqueri. Cerrados e pastos pobres, topografia suave.	80	20	-	-	-
7	Basaltos da Serra Geral originando terras roxas e sendo péregosas as mais ricas, as únicas de topografia acidentada. Intensamente cultivados. Exemplos: vales do rio Grande, do Sapucaí, do rio Pardo a jusante de Ribeirão Preto, do Moji-Guaçu a jusante de Rincão, do Tietê entre Igarapu e Jacanga; e entre Cravinhos e Cajuru.	-	-	80	15	5
8	Terras roxas arenosas devido à mistura ou influência de arenitos pobres Bauru e Botucatu, também chamadas "terra roxa de campo". Topografia suave. Pouco cultivo, com calagem e adubações fortes. Quase sempre pastagens ou cerrados. Exemplos: entre Morro Agudo e rio Pardo, marg. esq. do rib. da Onça, na transição do tipo seguinte para o anterior.	65	25	10	-	-
9	Solos do arenito Botucatu. São as terras arenosas mais pobres do Estado, como entre Serrana e Cássia dos Coqueiros e daí pela divisa com Minas até Ibiraci; entre São Simão e Tambaú, entre Rio Claro e Descalvado, entre Itirapina, Boa Esperança e Bocaina e entre Ibitiruna, Vitoriana, Santa Maria, Mineiros, São Pedro e Águas de São Pedro. São os campos cerrados mais pobres do Estado, porém com a topografia mais suave. ZONA ECOLÓGICA SERRA GERAL SGf	80	20	-	-	-
10	Terras roxas ricas como o tipo 7, mas de inverno mais frio e menos seco. Exemplos: vale do Paranapanema, desde Piraju até Iepê e Porecatu; vale do seu afluente rio Pardo a jusante de Santa Bárbara e vale de outro afluente, o Capivara, a jusante de Maracá.	-	-	85	10	5
11	Terras roxas arenosas como tipo 8, mas de inverno mais frio e menos seco, com maior percentagem de área cultivada e sob pastagem em detrimento do cerrado, quase ausente. Exemplos: nos municípios de Assis, Platina, Campos Novos, São Pedro do Turvo, Sodrélia, Óleo.	55	30	15	-	-
12	Solos de arenito Botucatu como o tipo 9, porém de inverno mais frio e menos seco, com relativamente menor área de campo-cerrado e maior sob pastagem. Exemplos: entre Piramboia, Bofete e Pardinho; e daí pelo vale do Paranapanema quase desde Guaref, Angatuba, Paranapanema, Itaf, Tejupá e Sarutaiá. ZONA ECOLÓGICA DEPRESSÃO PALEOZÓICA DPq	70	30	-	-	-
13	Terras argilosas claras de folhelhos da formação Corumbataí e do Grupo Tubarão, geralmente nos vales, quase sempre cultivados e em topografia bem ondulada. Exemplos: no vale do rio Piracicaba a jusante da cidade do mesmo nome, ao longo do Tietê entre Anhembi e Laras, perto de Charqueada e Ipeúna, no rio Corumbataí e jusante da cidade deste nome, perto de Leme e de Tambaú.	-	-	20	45	35
14	Terras arenosas de arenitos Tubarão e Corumbataí, geralmente nas lombadas, pouco cultivadas, quase sempre pastagens, mas há cerrados e campos cerrados muito pobres. A	60	30	10	-	-

nº do tipo de solo	descrição do tipo de solo	GRUPO HIDROLÓGICO				
		A	B	C	D	E
		percentagens				
	topografia é suave. As cores dos solos são mais avermelhadas e alaranjadas que no tipo anterior. Exemplos: vale do rio Pardo nos municípios de Casa Branca, Mococa; vale do Moji-Guaçu nos municípios deste nome, Conchal, Araras, Leme, Aguaf, Piraçununga; nos municípios de Moji-Mirim, Campinas e Indaiatuba.					
15	Terras roxas misturadas dos silts de diabásio, intensamente cultivadas, algumas quase tão ricas como os tipos 7 e 10, a topografia sendo comparável. Exemplos: Itobi, Sta. Cruz das Palmeiras, Sta. Rita do Passa Quatro, a W do ribeirão dos Porcos em S. João da Boa Vista, a E de Leme, ao S de Araras, nos municípios de Iracemápolis e Sta. Gertrudes, a E de Cordeirópolis, ao N de Itapira, ao N de Santo Antonio de Posse, de Campinas, de Americana e de Porto Feliz.	-	-	75	20	5
16	Terras roxas misturadas arenosas: mistura de detritos de arenitos Tubarão e Corumbataí com os de delgadas lentes de diabásios encaixados. Mais pastos que cultivos. Topografia pouco ondulada. Exemplos: entre Moji-Guaçu e Aguaf e numerosas manchas espalhadas por toda a zona DPq, semelhantes aos tipos 8 e 11, mas geralmente com teor algo mais alto de argila.	60	25	15	-	-
17	Terras arroxeadas barrentas com concreções de sílex, apelidadas de bonecas, dos folhelhos e siltitos da formação Irati, quase todas cultivadas. Topografia ondulada. Exemplos: Assistência, Piracicaba, Rio das Pedras, Saltinho, Maristela, Laranja.	10	20	60	10	-
18	Terras arenosas com seixos arredondados, por vezes estriados (glaciais), ora espalhados quando a rocha mãe é tilito, ora formando camada quando se trata de conglomerato. Exemplos: entre Moji-Mirim, Conchal, Artur Nogueira e Limeira.	50	25	15	10	-
ZONA ECOLÓGICA DEPRESSÃO PALEOZÓICA DPf						
19	Como o tipo 13, porém menos frequente. Exemplos: nos municípios de Taquarituba, Cel. Macedo, Taguaf, Tejuapé, Fartura e no vizinho município paranaense de Carlópolis; também no vale do rio Itapetininga.	-	-	30	40	30
20	Como o tipo 14, porém de maior expansão e variabilidade, havendo até casos de larga predominância de areias grossas sobre as finas, como na região de Itapetininga. Outros exemplos abundam no quadrilátero Itararé-Itaí-Itapetininga-Gramadinho.	50	35	15	-	-
21	Solos arenosos rasos do Devoniano, por vezes mal recobridos extensas lajes de arenito. Só ao S e a SE de Itararé. Topografia suave, exceto onde as lajes formam degraus e até escarpas muito irregulares.	55	25	-	20	-
22	Como o tipo 15, mas com inverno mais frio e menos seco. Quase exclusivamente nos municípios de Timburi, Fartura, Taguaf, Taquarituba e Cel. Macedo.	-	-	70	20	10
23	Como o tipo 16, mas com inverno mais frio e menos seco; e não somam mais de 100 km ² , as manchas mais conspícuas sendo perto das cidades de Capela do Alto, Tatuí, Angatuba, Buri, Barão de Antonina, e ao N de Itararé e de Capão Bonito.	45	35	20	-	-
24	Como o tipo 18, mas com inverno mais frio e menos seco, os solos sendo de cores mais pálidas, amareladas e acinzentadas. Ocorrem nas áreas do tipo 20.	50	30	10	10	-

nº do tipo de solo	descrição do tipo de solo	GRUPO HIDROLÓGICO				
		A	B	C	D	E
		percentagens				
ZONA ECOLÓGICA COMPLEXO CRISTALINO CCq						
25	Solos de granito, quartzito, quartzoxisto e gnaíse leucocrático ou bastante escuro, mas profusamente injetado de vieiros de quartzo. Alto teor de areia grossa com bastante elevado teor de argila (15-20%) da decomposição de feldspatos e micas. A pequena profundidade é muito comum camada densificada ou horizonte de seixos rolados. Topografia acidentada a montanhosa. Quase só pastagens com capões de mato em grotas, mas já foi quase tudo plantado com café que arruinou o solo pela erosão. Exemplos: entre Jundiá e Itu, entre Valinhos e Amparo, entre Atibaia e Bragança, nos trajetos Bragança-Amparo-Mta. Alegre-Socorro e Amparo-Serra Negra-Santo Antônio de Posse-Itapira.	5	35	10	20	30
26	Solos de gnaíses mesocráticos, micaxistos quartzosos, pegmatitos, quartzodioritos. São geralmente solos mais escuros que os do tipo anterior, com o alaranjado tendendo para o acastanhado e o vermelho para marrom. O teor de areia grossa é bem menor e o de argila maior (20-30%). Horiz. de seixos menos comum mas o argiloso ainda mais frequente. O cultivo é bastante intenso apesar da topografia acidentada. Exemplos: de permeio com os solos do tipo anterior, nos trajetos citados.	-	20	30	30	20
27	Solos de gnaíses melanocráticos (alto teor de biotita e hornblenda), anfíbolitos, intrusivas alcálicas com quartzo (só no planalto de Poços de Caldas), granodioritos, calcários silicosos, micaxistos, rochas com pouco quartzo, formando solos argilosos (30-40% de argila total) quase sem areia grossa, denominados massapés na nomenclatura popular. As camadas com seixos rolados são ainda mais frequentes que no caso anterior, mas não são menos frequentes camadas quase impermeáveis. O cultivo só não é intenso onde a topografia é montanhosa ou faltam vias de acesso. Além da área indicada no mapa, estes solos ocorrem também ao pé das serras do Mar e Paranaicaba subindo até altitudes de 400-450 m no litoral N e na ilha de São Sebastião, e 250-300 m no litoral S. (acima destas altitudes é CCf)	-	10	40	20	30
28	Solos de rochas insaturadas do Cristalino ou isentas de quartzo, como filitos, gabros, diabásios, dioritos, peridotitos (ex.: ao N de Serra Negra), fonolitos e outras alcálicas sem quartzo. Excluindo os solos filíticos, que podem ser alaranjados ou vermelhos por terem sido decapitados em consequência da impermeabilidade, os derivados das outras rochas são desde marrons a cinzentos escuros, mas a decapitação em declives fortes pode clarear fortemente estas cores. O cultivo é o mais intenso da zona ecológica. Os diabásios que quase sempre ocorrem em veios e diques estreitos, não concorrem na formação de solos por falta de expressão horizontal.	-	-	50	15	35
ZONA ECOLÓGICA COMPLEXO CRISTALINO CCf						
29	Como o tipo 25, porém são geralmente solos mais escuros graças à decomposição mais lenta dos detritos orgânicos por causa de temperaturas mais baixas o ano inteiro. O inverno é bem mais úmido, mas temperaturas médias inferiores a 15°C (junho a agosto) não favorecem a atividade microbiana. A camada densificada é no geral ainda menos permeável que no tipo 25 pelo aumento de seixos e da umidade graças à menor evapotranspiração e, no geral, maior pluviosidade que na zona CCq. É relativamente maior a área dedicada à pastagem e menor ao cultivo por que este tipo de solo	5	30	15	20	30

nº do tipo de solo	descrição do tipo de solo	GRUPO HIDROLÓGICO				
		A	B	C	D	E
	abrange as terras mais altas das serras da Mantiqueira, da Bocaina, do Mar e Paranapiacaba.					
30	Como o tipo 26, mas com diferença semelhante à que existe entre o tipo anterior e o 25, porém com área menor dedicada à pastagem e maior ao cultivo por que geralmente o tipo 30 não ocorre no alto das serras citadas, e portanto a topografia não é tão montanhosa e o acesso mais fácil.	-	10	30	25	30
31	Como o tipo 27, mas com diferença semelhante à que existe entre os tipos 29 e 25, porém o tipo 31 é mais raro que o 27 por motivos puramente geológicos, mas quase totalmente cultivado, exceto no maciço de Itatiaia, de solos excessivamente rasos, montanhosos e frios, e no alto da ilha de São Sebastião e da serra de Araçoiaba por serem áreas montanhosas, de difícil acesso e de solos rasos. Os calcários são lentes quase verticais e porisso estreitas, sem expressão horizontal.	-	5	30	20	45
32	Como o tipo 28, mas ainda mais procurado para o cultivo. Assim mesmo há áreas de filito tão tremendamente erodidas em declives fortes que tiveram de ser reflorestadas ou abandonadas à pastagem, como entre Nazaré e Pirapora do Bom Jesus, entre Caieiras e Santana do Parnaíba e ao longo das margens setentrionais da represa de Itupararanga.	-	-	50	10	40
	ZONA ECOLÓGICA VALE DO PARAÍBA VPq					
33	Solos pretos de várzea praticamente sem escoamento superficial devido ao empoçamento, evaporação e infiltração graças à ausência de declividade, cultivo intenso e com rede de canais. São terras argilosas e com camada densificada, mas geralmente não impermeável graças à grande porosidade que pode ultrapassar 80%.	-	-	90	-	10
34	Solos argilosos alaranjados a vermelhos de sedimento cenozóico encaixante da várzea, quimicamente pobres e muito maltratados pela erosão devido à topografia fortemente ondulada e permeabilidade fraca. A ocupação humana é quase só pastagem com alto teor de ervas daninhas. A área contorna a várzea desde Cachoeira até Jacaré, continuando para SW ao longo da encosta direita do rio Parateí até penetrar no município de Moji das Cruzes.	-	-	40	5	55
35	Solos arenosos alaranjados claros do mesmo sedimento cenozóico. Antigamente eram campos-cerrados e ainda ostentam elementos xerofíticos fora de trechos adubados. A maior área de solos deste tipo acha-se na região de São José dos Campos e, sendo altamente valorizada, sua aguda pobreza química está sendo dominada a poder de calcário e adubos, mas o cultivo ainda é pouco, predominando largamente a pastagem.	45	50	5	-	-
	ZONA ECOLÓGICA VALE DO PARAÍBA VPf					
36	Solos do Complexo Cristalino semelhantes ao tipo 25, distinguindo-se deste por estiagem mais longa e mais quente, enquanto o verão é menos chuvoso e também mais quente, portanto de bem maior evapotranspiração, principalmente entre a serra do Mar e a zona VPq, penetrando até Igaratá. A pastagem predomina largamente sobre o cultivo que é muito pouco. As cores são tão claras como no caso dos solos do tipo 25.	5	25	10	40	20
37	Solos do Cristalino semelhantes ao tipo 26. A diferença é a que distingue o tipo 36 do tipo 25. Cultiva-se mais que o tipo anterior, mas a pastagem ainda predomina largamente. O reflorestamento é ainda mais raro que no tipo de solo anterior.	-	10	30	25	35
38	Solos do Cristalino semelhantes ao tipo 27, porém não há	-	-	40	25	35

nº do tipo de solo	descrição do tipo de solo	GRUPO HIDROLÓGICO				
		A	B	C	D	E
	rochas alcálicas e prevalece a diferença que distingue o tipo 25 do 36. O tipo 38 é mais cultivado que os dois anteriores, mas a pastagem ainda predomina por ser mais nutritiva que nos dois tipos anteriores. Como nesta área não existem filitos e as rochas alcálicas e gabros ainda não foram descobertos, o tipo 38 torna-se pouco diferente do 27. E assim o tipo 39 já pode pertencer à					
	ZONA ECOLÓGICA BAIXADA LITORÂNEA BLq					
39	Solos arenosos das areias marinhas de antigas praias, pois o mar já lambeu o sopé das serras do Mar e da Paranapiacaba; bem como de todas as montanhas e morros cristalinos existentes entre as praias atuais e as serras marítimas. São solos de cor creme a acinzentada, extremamente arenosos e pobres devido à lavagem por precipitação abundante sem estiagem e fortalecida por altas temperaturas. Mesmo onde houve mangues centenas de séculos atrás, com a regressão marinha ou elevação do continente (mais provável) do alto teor de húmus apenas sobrou a cor acinzentada e por vezes minúsculos restos de conchas. As tentativas de cultivo são muito raras.	90	10	-	-	-
40	Solos barrentos da sedimentação continental flúviolacustre que cobriam as areias praianas por vezes com camada tão delgada que a areia aparece na profundidade de 1½ a 2 m. São os solos mais cultivados da zona BLq, mas a ocupação humana é fraca por ser o clima insalubre na Baixada Litorânea: demasiadamente úmido e quente. Daí a quase inexistência de pecuária.	-	20	60	5	15
	ZONA ECOLÓGICA BAIXADA LITORÂNEA BLf					
41	Solos como tipo 40, porém afastados do mar ou atrás de serras, de modo que sofrem menor pluviosidade e a estiagem está bem esboçada, porém ainda sem deficiência hídrica. São porisso os solos mais cultivados de toda a Baixada Litorânea. Na região de Registro a chuva média anual não atinge 1.500 mm, enquanto no litoral N alcança o dobro. As cores são alaranjadas com tonalidade entre acastanhada e acinzentada; topografia suave.	-	15	60	5	20

Determinando o Grupo Hidrológico do Solo

ZONA ECOLÓGICA ARENITO BAURU ABf					
4	Como 1, mas com inverno mais frio e menos seco. Exemplos: Indiana, Martinópolis; meia encosta dos afluentes do Paranapanema de Rancharia a Narandiba e de Platina a Ubirajara; entre Agudos e Lençóis e entre Areiópolis e Domélia.	60	35	5	- -

Portanto, a ponderação dos Grupos Hidrológicos do solo para cálculo do CN é:

$$CN_{pond,GHS} = 0,60 \times CN_A + 0,35 \times CN_B + 0,05 \times CN_C + \cancel{0 \times CN_D} + \cancel{0 \times CN_E}$$

NUMERAÇÃO DAS CURVAS DE ESCOCCAS DE SUPERFÍCIE DAS CURVAS INTENSAS CONFORME O COMPLEXO HIDROLÓGICO DO SOLO COM A SUA COBERTURA VEGETAL

cobertura vegetal ou tipo de uso do solo	defesa contra a erosão	situação hidrológica de infiltração	GRUPO HIDROLÓGICO DO SOLO				
			A	B	C	D	E
Arado, quase sem cobertura vegetal	SR	Boas	65	80	88	92	95
	C	Boas	65	78	86	90	92
Cultivos de ciclo curto e arações freqüentes	SR	Más	60	72	81	87	90
	SR	Boas	52	66	75	82	86
	C	Más	56	65	78	84	87
	C	Boas	48	60	72	78	82
	C-T	Más	52	62	74	80	84
Cultivos de ciclo médio, arações anuais	SR	Más	58	65	73	82	88
	SR	Boas	54	62	70	79	85
	C	Más	55	64	72	78	84
	C	Boas	50	60	67	75	83
	T	Más	52	62	70	77	82
Semeação densa ou a lanço; cobertura curta, mas densa, como a das leguminosas e dos pastos em rodízio	SR	Más	56	64	72	80	86
	SR	Boas	50	58	66	76	82
	C	Más	54	60	69	76	83
	C	Boas	48	56	64	72	80
	T	Más	50	58	65	75	80
Pastagem velha com arbustos	C	Más	65	70	78	85	90
		Médias	60	66	75	82	87
		Boas	56	62	72	79	84
		Más	55	62	70	78	86
		Médias	42	59	67	75	82
Reflorestamento	SR	Más	35	50	62	74	83
		Boas	30	42	55	68	78
		Más	30	45	57	69	80
		Boas	25	36	52	64	75
Mata, capoeira velha		Más	32	40	55	67	76
		Boas	18	25	42	58	70
Gramados tratados		Más	65	72	78	84	88
		Boas	59	67	74	81	86
Estradas de terra	SR	Más	80	85	90	93	95
		C	74	80	86	90	92

NUMERAÇÃO DAS CURVAS DE ESCOCCAS DE SUPERFÍCIE PARA AVALIAÇÃO DE CLASSE DAS SITUAÇÕES HIDROLÓGICAS CONFORME O COMPLEXO DA COBERTURA VEGETAL DO SOLO

I - Metas naturais ou reflorestamento de bacias hidrográficas da condição de saturação II e $A_1 = 0,2S$ (Tabela nº 5). A Figura nº 3 fornece as situações hidrológicas.

classes das situações hidrológicas	GRUPO DE SOLO DO PONTO DE VISTA HIDROLÓGICO				
	A	B	C	D	E
- As piores	50	60	72	84	92
- Más	42	52	65	78	85
- Médias	33	44	57	70	78
- Boas	23	36	50	62	70
As melhores	12	28	42	54	62

II - Vegetação comum, considerada pastagem, anualmente queimada, típica de mau manejo de terras cansadas, em bacias hidrográficas da condição II e $A_1 = 0,2S$ (Tabela nº 5).

tipo de vegetação	estado atual	GRUPO DE SOLO HIDROLOGICAMENTE				
		A	B	C	D	E
HERBÁCIA com alta percentagem (25-30%) de ervas não comestíveis para o gado	Mau	42	52	65	80	89
	Médio	36	47	60	76	85
	Bom	30	42	56	72	80
CAMPO-SUJO: como anterior, mas com 10-15% da área ocupada por arbustos inúteis, além das ervas daninhas, cuja percentagem pode baixar a 15-25%	Mau	39	50	62	75	85
	Médio	32	44	58	70	80
	Bom	25	40	53	64	75
CAMPO-CERRADO, também chamado cerrado: não passa de caso anterior com a maior parte da área ocupada por arbustos e árvores baixas e ralas, porém de caráter xerófito por se tratar de solo seco e clima com estiagem forte. Os capins comestíveis ocupam apenas 10-20% da área. A topografia é sempre suave. Muito raro nos grupos D e E	Mau	36	46	58	70	80
	Médio	28	37	50	64	74
	Bom	20	30	42	56	68
VEGETAÇÃO ARBUSTIVA: pasto abandonado, em transição para capoeira, não havendo quase capins aproveitáveis	Mau	33	44	54	66	75
	Médio	24	35	46	59	69
	Bom	15	26	38	52	63

CN
Tabelas
Usos Rurais

(Setzer e Porto, 1979)

SR – Sulcos retilíneos
C – em curva de nível
T – terraceamento
C-T – curva de nível terraceada

Tab. 3.6 Estimativa de CN para áreas urbanas

TIPO DE SOLO/OCUPAÇÃO E CONDIÇÃO HIDROLÓGICA	ÁREA IMPERMEÁVEL (%)	GRUPO HIDROLÓGICO			
		A	B	C	D
ÁREAS URBANAS					
Áreas livres					
Condições ruins (gramados <50%)		68	79	86	89
Condições normais (gramados de 50% a 75%)		49	69	79	84
Condições excelentes (gramados >75%)		39	61	74	80
ÁREAS IMPERMEÁVEIS					
Estacionamentos pavimentados, telhados		98	98	98	98
Estradas e ruas					
Pavimentadas com sistema de drenagem		98	98	98	98
Pavimentadas sem sistema de drenagem		83	89	92	93
Cascalho		76	85	89	91
Terra		72	82	87	89
ÁREAS URBANAS					
Áreas comerciais	85	89	92	94	95
Áreas industriais	72	81	88	91	93
ÁREAS RESIDENCIAIS (EM FUNÇÃO DA PARTE IMPERMEÁVEL*)					
Área residencial Tipo 1	65	77	85	90	92
Área residencial Tipo 2	38	61	75	83	87
Área residencial Tipo 3	25	54	70	80	85
Área residencial Tipo 4	20	51	68	79	84
Área residencial Tipo 5	12	45	65	77	82

Adaptado de SCS (1986); Akan e Houghtalen (2003).

(*) Para a estimativa da área impermeável utilizou-se nesta tabela, o trabalho de Campana & Tucci (1994), que apresenta uma relação empírica que permite avaliar a parcela de área impermeável com base na densidade populacional. Esse trabalho é baseado em dados populacionais de três grandes centros urbanos: São Paulo, Curitiba e Porto Alegre. Às curvas apresentadas por Campana & Tucci podem ser ajustadas as seguintes equações (Conte, 2001):

$$\frac{A_{imp}}{A_{total}} \% = -3,86 + 0,55.d \text{ (para } 7 \leq d \leq 115 \text{ hab/ha)}$$

$$\frac{A_{imp}}{A_{total}} \% = 53,2 + 0,054.d \text{ (para } d > 115 \text{ hab/ha)}$$

com d = densidade populacional (hab/ha)

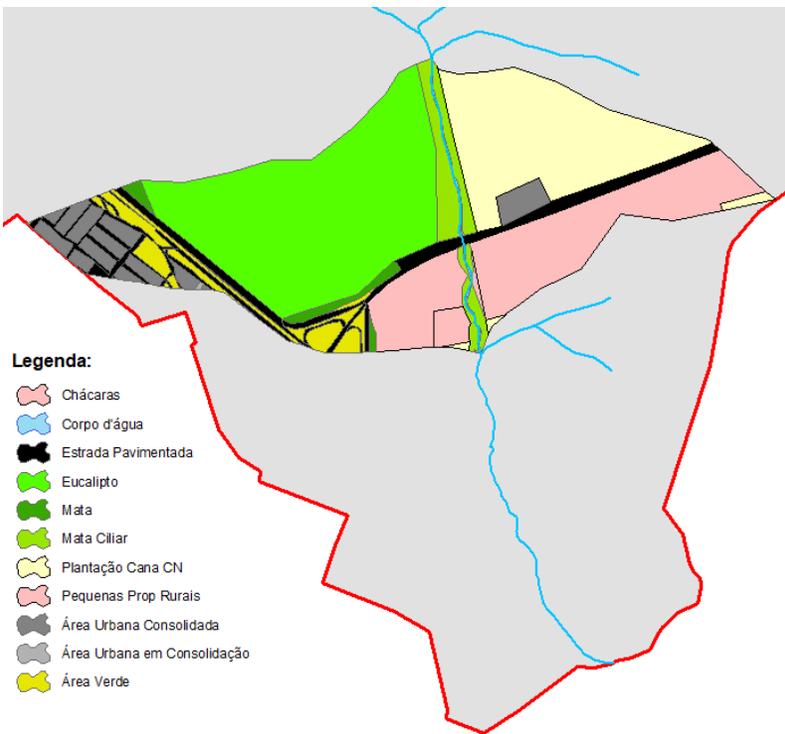
Normalmente é adotado $CN = 98$ para áreas impermeáveis (SCS, 1986).

$$CN_E = 98$$

CN
Tabelas
Usos Urbanos
(Canholi, 2005)

Determinação do Parâmetro CN

Exemplo para o Interflúvio A3-A4:



Uso	Área (km ²)	% da área da sub-bacia	CN
Área Urbana Consolidada	0,07	5,4 %	$0,60 \times 77 + 0,35 \times 85 + 0,05 \times 90 = 80,50$
Áreas Verdes	0,06	4,4 %	$0,60 \times 68 + 0,35 \times 79 + 0,05 \times 86 = 72,80$
Pequenas Propriedades Rurais	0,27	19,7 %	$0,60 \times 54 + 0,35 \times 60 + 0,05 \times 69 = 56,90$
Corpo d'água	0,01	0,4 %	100
Estrada Pavimentada	0,12	8,5 %	98
Reflorestamento (Pinus)	0,46	33,6 %	$0,60 \times 30 + 0,35 \times 45 + 0,05 \times 57 = 36,60$
Mata Nativa e/ou Secundária	0,02	1,4 %	$0,60 \times 42 + 0,35 \times 52 + 0,05 \times 65 = 46,70$
Mata Ciliar / Brejo	0,07	5,0 %	$0,60 \times 33 + 0,35 \times 44 + 0,05 \times 67 = 38,60$
Plantio de Cana em Nível	0,28	20,5 %	$0,60 \times 55 + 0,35 \times 64 + 0,05 \times 72 = 59,00$
Solo Exposto	0,02	1,1 %	$0,60 \times 72 + 0,35 \times 82 + 0,05 \times 87 = 76,60$
Total	1,37	100 %	55,30

$$\%Urb = 8,5\% + 5,4\% = 13,9\% \quad \therefore \alpha = 0,2 - 0,1 \times \%Urb = 0,186$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad S = \frac{25400}{55,30} - 254 = 205,31 \text{ mm} \quad \alpha S = 0,1860 \times 205,31 = 38,19 \text{ mm}$$

Parâmetros finais para o HEC-HMS por sub-bacia

Adotar mesmo percentual encontrado para estradas.

Sub-bacia	Área (km ²)	% impermeável	CN	αS (mm)	tc corr (min)	lag – tp (min)
Montante	0,655	0,00%	57,91	36,926	16,585	9,951
A1-A2	0,281	0,00%	57,20	38,010	16,286	9,772
A2-A3	0,157	0,00%	40,65	74,167	3,769	2,261
A3-A4	1,368	8,50%	55,30	38,211	22,511	13,506
Jusante	1,575	17,00%	73,04	14,852	24,123	14,474
Afluyente 1	4,076	1,09%	58,50	35,651	46,197	27,718
Afluyente 2	6,894	5,41%	59,80	29,739	55,318	33,191
Afluyente 3	1,007	4,03%	59,87	33,366	40,927	24,556
Afluyente 4	0,357	0,00%	58,37	36,238	11,183	6,710

Estamos prontos para colocar os dados no
HEC-HMS