

Conceitos Básicos de Hidrologia e Drenagem para Projetos Rodoviários

Conteudista:

Eider Gomes de Azevedo Rocha

Brasília, setembro de 2022.

Conceitos Básicos de Hidrologia e Drenagem para Projetos Rodoviários

Módulo 3

Bacias Hidrográficas.

- Conceito e importância;
- Delimitação de bacias de contribuição e suas características;
- Métodos para cálculo das descargas de contribuição.

Conforme estabelece O Art. 11 da INSTRUÇÃO NORMATIVA Nº 03/DNIT SEDE, DE 1º DE ABRIL DE 2022, o servidor que optar por receber a GECC relativa à elaboração de material didático, cede, tacitamente e em caráter irrevogável, a titularidade dos direitos patrimoniais relativos aos materiais produzidos em decorrência dessa percepção. Desta forma, tendo em vista o contido no Processo nº 50600.008060/2022-01, o DNIT poderá revisar o material cedido, adaptá-lo e utilizá-lo livremente em outros eventos que venha a promover, bem como o ceder a outros órgãos e entidades federais.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. Bacia Hidrográfica	2
2.1 CARACTERÍSTICAS FISIográfICAS	5
2.1.1 Forma da Bacia	5
2.1.2 Fator de forma	6
2.1.3 Coeficiente de compacidade	7
2.1.4 Tipos de solo	8
3. DELIMITAÇÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS E SUAS CARACTERÍSTICAS	9
4. MÉTODOS PARA CÁLCULO DAS DESCARGAS	13
4.1 MÉTODO RACIONAL	13
4.2 MÉTODO RACIONAL CORRIGIDO	17
4.3 MÉTODO DO HIDROGRAMA UNITÁRIO TRIANGULAR - hut	18
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	26

1. INTRODUÇÃO

O ponto de partida para a escolha e definição dos dispositivos de drenagem em um projeto de infraestrutura corresponde à descarga de contribuição.

Trate-se de dispositivos de drenagem superficial, profunda ou de transposição de talvegues, o seu dimensionamento toma como premissa o volume de água ou descarga que terá de escoar.

E para se alcançar ou obter o valor da descarga, precisa-se de parâmetros como intensidade de chuva ou precipitação, além dos parâmetros físicos da bacia de contribuição.

Como parte destes parâmetros foram tratados nos módulos anteriores, o que se pretende explorar neste módulo é a bacia de contribuição, propriamente dito.

Será apresentado seu conceito e se abrirá discussão sobre alguns de seus parâmetros, como área, comprimento e declividade do talvegue, descarga gerada e seu comportamento.

Também serão apresentados, de forma sucinta, alguns procedimentos e metodologias empregadas para obtenção ou delimitação das bacias de contribuição, sem explorar o assunto na sua completude, haja vista a complexidade do tema e limitação do escopo deste curso.

Finalmente, serão apresentadas as principais metodologias adotadas no DNIT para o cálculo das descargas de contribuição, além dos parâmetros envolvidos em cada uma delas.

2. Bacia Hidrográfica

De acordo com Magalhães (1989), a bacia hidrográfica corresponde a uma área onde a precipitação é coletada e conduzida para seu sistema de drenagem natural, ou seja, uma área composta de um sistema de drenagem natural onde o movimento de água superficial inclui todos os usos da água e do solo existentes na localidade.

Bacia hidrográfica também pode ser definida como a área ou região de drenagem de um rio principal ou de seus afluentes, ou ainda, como a porção do espaço em que as águas das chuvas, das montanhas, subterrâneas ou de outros rios escoam em direção a um determinado curso d'água ou mesmo para os oceanos.

As bacias hidrográficas (também chamadas de bacias de drenagem ou bacias de contribuição) são separadas umas das outras por estruturas do relevo, sendo usualmente chamadas de divisores de água e que normalmente estão associadas a morros, montanhas, serras, picos e chapadas.

É muito comum que as bacias menores, normalmente associadas a afluentes de rios, despejem dentro de bacias maiores, que correspondem à bacia do curso d'água principal, e estes irão descarregar, posteriormente, nos oceanos.

Os principais elementos contribuintes de uma bacia hidrográfica são: nascente, rio principal, divisor de águas, afluentes e foz ou exutória, conforme pode ser visualizado na figura 2.1.

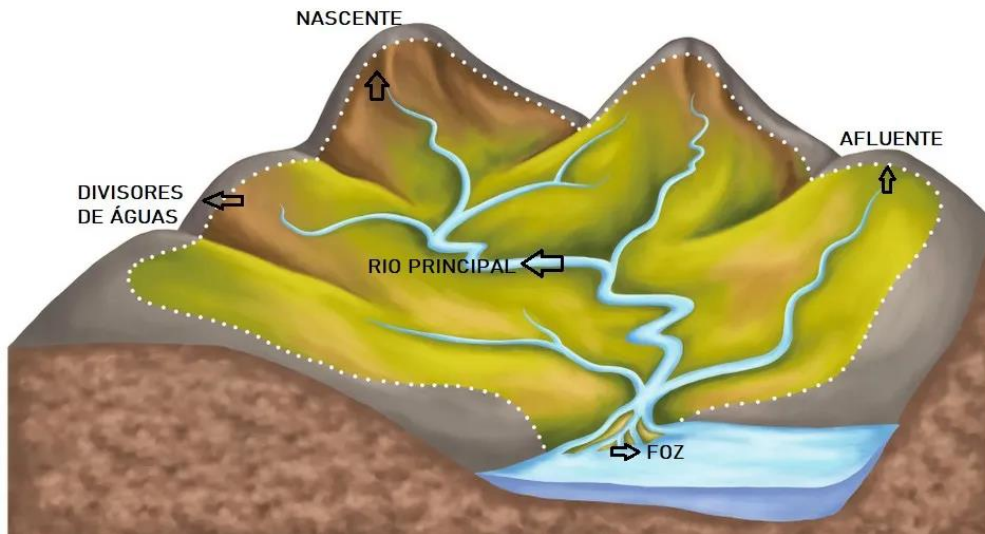


Figura 2.1 – Exemplificação de uma bacia hidrográfica e seus principais elementos. (Fonte: <https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/bacia-hidrografica.htm>)

Cada um destes elementos constituintes pode ser melhor entendido a partir dos seguintes conceitos:

- Nascente: local onde se inicia a bacia hidrográfica. Geralmente é o ponto mais elevado do relevo e também onde se encontra a principal nascente do rio.
- Rio Principal: rio de maior volume e extensão da bacia e que normalmente recebe contribuições dos afluentes.
- Divisor de água: estruturas do relevo que têm o papel de dividir as áreas das bacias. Normalmente são morros, serras, picos, montanhas ou outras estruturas elevadas do relevo.
- Afluente: rios menores que deságuam no rio principal e que têm a função de abastecê-lo.
- Foz: local de deságuo natural da bacia hidrográfica.

O comportamento de uma bacia hidrográfica sofre influência de uma série de fatores, podendo-se destacar aqui aqueles associados ao clima ou a fisiografia.

- Fatores climáticos: relativos aos efeitos da chuva e da evapotranspiração, que apresentam variações ao longo do ano, de acordo com a climatologia local;

- Fatores fisiográficos: associados às características da bacia e do leito do rio principal.

Diversos estudos mostram que há uma diferença marcante entre uma bacia de drenagem pequena e outra grande e isto não está associado exclusivamente ao seu tamanho. Para uma pequena bacia de drenagem, por exemplo, os caudais são influenciados principalmente pelas condições climáticas da localidade, bem como pelas características físicas do solo e da cobertura vegetal, que por sua vez são afetadas pela intervenção do homem. Assim, no estudo hidrológico de uma bacia tida como pequena, é dada maior atenção à própria bacia.

Já para uma bacia grande, o efeito do armazenamento no leito do curso d'água torna-se muito pronunciado, de tal modo que nela predomina o estudo hidrológico do curso d'água, efetuando-se medidas diretas dos caudais em pontos predeterminados e estudos estatísticos das vazões, os quais são muitas vezes estendidos e extrapolados.

No caso de bacias pequenas, ao contrário das bacias grandes, as medidas diretas não têm valor significativo porque o homem, alterando no tempo as condições físicas da cobertura do solo, por onde a água se escoar, modifica as condições de escoamento independentemente de variações dos fatores climáticos locais.

Usando unicamente o tamanho da bacia como critério de classificação, o projetista pode incorrer em erros, pois, frequentemente, duas bacias do mesmo tamanho podem se comportar de modo inteiramente diverso sob o ponto de vista hidrológico. Uma característica distinta da pequena bacia é o fato de que o efeito do escoamento superficial na bacia afeta muito mais o valor do caudal máximo do que o efeito do armazenamento no curso de água. Tal efeito é, todavia, muito pronunciado nas grandes bacias.

Deste modo, para se compreender melhor o efeito destes fatores sobre o comportamento de uma bacia e do seu escoamento, apresentam-se na sequência, algumas das suas principais características fisiográficas, uma vez que os fatores climáticos já foram tratados anteriormente.

2.1 CARACTERÍSTICAS FISIAGRÁFICAS

As características fisiográficas de uma bacia podem ser obtidas a partir dos dados constantes em mapas, fotografias aéreas ou mesmo imagens de satélite. Dentre as principais características pode-se citar a forma, a área, o comprimento, a declividade, o tipo de solo e a sua ocupação.

2.1.1 FORMA DA BACIA

A forma da bacia não costuma ser usada de maneira direta em hidrologia. No entanto, parâmetros que refletem a forma da bacia são usados ocasionalmente e têm base conceitual.

As bacias hidrográficas têm uma variedade infinita de formas, que supostamente refletem o comportamento hidrológico da bacia. Em uma bacia circular, por exemplo, toda a água escoada tende a alcançar a saída da bacia ao mesmo tempo, produzindo um pico de descarga, tal como pode ser visualizado na figura 2.2, que denota o comportamento do escoamento em uma bacia com tal formato.



Figura 2.2 – Bacia com formato arredondado e comportamento esperado para seu escoamento. (Fonte: Notas de aula - Departamento de Hidráulica e Saneamento / UFBA).

Já em uma bacia com formato elíptico, onde a saída localiza-se na ponta do maior eixo e considerando que sua área pode ser tomada como igual à da bacia circular, o escoamento será mais distribuído no tempo, produzindo, portanto, uma enchente menor, como pode ser visualizado na figura 2.3.

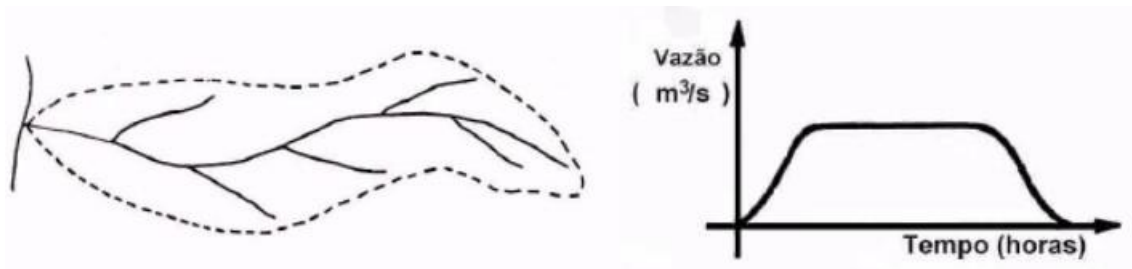


Figura 2.3 – Bacia com formato elíptico e comportamento esperado para seu escoamento. (Fonte: Notas de aula - Departamento de Hidráulica e Saneamento / UFBA).

Há também as bacias do tipo radial ou ramificada, que são formadas por conjuntos de sub-bacias alongadas que convergem para um mesmo curso principal. Neste caso, uma chuva uniforme em toda a bacia origina cheias nas sub-bacias, que vão se somar, mas não simultaneamente, no curso principal. Portanto, a cheia crescerá, estacionará, ou diminuirá a medida em que forem se fazendo sentir as contribuições das diferentes sub-bacias, podendo ocorrer mais de um pico de descarga, como mostrado na figura 2.4.

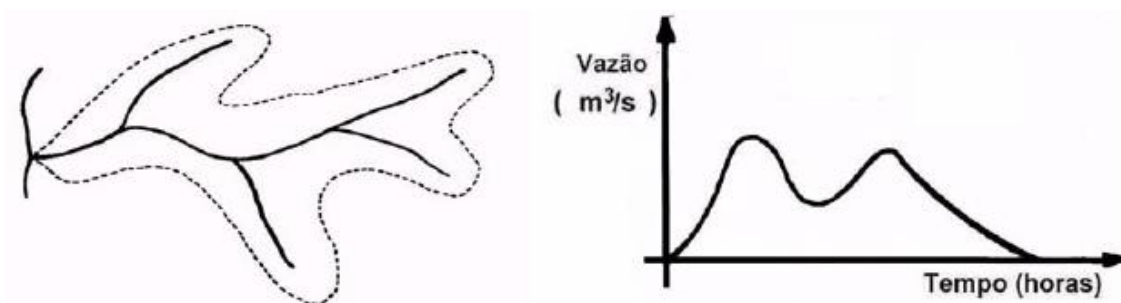


Figura 2.4 – Bacia ramificada e comportamento esperado para seu escoamento. (Fonte: Notas de aula - Departamento de Hidráulica e Saneamento / UFBA).

2.1.2 FATOR DE FORMA

O fator de forma é um índice indicativo da tendência para enchentes de uma bacia. Uma bacia com um fator de forma baixo é menos sujeita a enchentes que outra de mesmo tamanho, porém com maior fator de forma. Isso se deve ao fato de que numa bacia estreita e longa, com fator de forma baixo, há menos possibilidade de ocorrência de chuvas intensas cobrindo simultaneamente toda sua extensão, assim como a contribuição dos tributários atinge o curso d'água principal em vários pontos ao longo do mesmo, afastando-se, portanto, da

condição ideal da bacia circular discutida anteriormente, na qual a concentração de todo o deflúvio se dá num só ponto.

O fator de forma corresponde à relação entre a largura média e o comprimento axial da bacia. Mede-se o comprimento da bacia quando se segue o curso d'água mais longo desde a desembocadura até a cabeceira mais distante da bacia. A largura média, por sua vez, é obtida quando se divide a área pelo comprimento da bacia. Assim, para se calcular o fator de forma de uma bacia, pode-se fazer uso da seguinte equação:

$$K_f = \frac{L_m}{L}, \text{ onde:}$$

- K_f = fator de forma (adimensional);
- L_m = largura média da bacia, calculada pela fórmula abaixo.

$$L_m = \frac{A}{L}$$

- A = área da bacia;
- L = comprimento axial da bacia.

Se a segunda equação for substituída na primeira, se obtém a equação final:

$$K_f = \frac{A}{L^2}$$

2.1.3 COEFICIENTE DE COMPACIDADE

Este coeficiente é um número adimensional que varia com a forma da bacia, independentemente do seu tamanho. Quanto mais irregular for a bacia, maior será o coeficiente de compacidade. Um coeficiente mínimo, igual à unidade, corresponderia a uma bacia circular. Se os outros fatores forem mantidos iguais, a tendência para maiores enchentes é tanto mais acentuada quanto mais próximo da unidade for o valor desse coeficiente.

O coeficiente de compacidade corresponde à relação entre o perímetro da bacia e o perímetro de um círculo de área igual ao da bacia, podendo ser expressa pela seguinte fórmula:

$$K_c = \frac{P}{2\pi R}, \text{ onde:}$$

- K_c = coeficiente de compacidade;
- P = perímetro da bacia.

Sabendo que em um círculo a área pode ser obtida pela expressão a seguir, e isolando o valor de “R” nessa expressão, pode-se obter a seguinte notação final para o coeficiente de compacidade:

$$A = \pi * R^2$$

$$R = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

- A = Área da bacia circular

$$K_c = \frac{0,28 \cdot P}{\sqrt{A}}$$

2.1.4 TIPOS DE SOLO

A correta identificação dos tipos de solo, tanto das camadas mais superficiais como das subsuperficiais e, até certo ponto, das camadas mais profundas, irá permitir sua classificação associada ao maior ou menor grau de permeabilidade, característica esta que afeta diretamente o comportamento das cheias.

Assim, em uma bacia onde predominam solos classificados como impermeáveis (ver tabela 3.1 do módulo 1), citando como exemplos os solos siltosos, argilosos e com grande presença de rochas, grande parcela da precipitação irá escoar superficialmente, gerando descargas maiores e com pico concentrado. Ao passo que, em uma bacia onde predominam solos classificados como permeáveis, a exemplo dos solos pedregulhosos e arenosos, uma parcela menor da precipitação deverá escoar superficialmente, gerando descargas menores e com um comportamento “achatado”, tal como pode ser visualizado na figura 2.5.

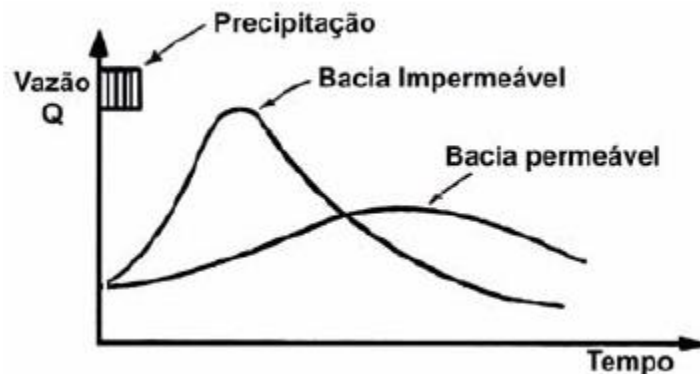


Figura 2.5 – Comportamento da descarga em função do tipo de solo predominante em uma bacia de contribuição (Fonte: Notas de aula - Departamento de Hidráulica e Saneamento / UFBA).

3. DELIMITAÇÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS E SUAS CARACTERÍSTICAS

Nas obras de infraestrutura, mais especificamente implantação de rodovias ou ferrovias, ocorrerá que o seu traçado irá interceptar alguns cursos d'água, podendo este ser o rio principal e/ou um de seus afluentes.

No ponto que ocorre tal interceptação, será necessário prover algum elemento de transposição de talvegue, tal como um bueiro ou uma ponte, que passará a ser encarado como o ponto de exutória de uma nova bacia cujos limites agora foram afetados pelo traçado da rodovia ou ferrovia. Esta nova bacia, correspondente à bacia de contribuição da obra de transposição projetada, terá seus limites definidos pela plataforma rodoviária/ferroviária juntamente com os divisores de água situados à sua montante.

A delimitação de bacias hidrográficas pode ser feita tanto de forma manual, valendo-se de cartas topográficas impressas ou digitais, bem como por meio de programas computacionais, mas como a proposta do presente curso é apresentar as noções básicas da disciplina, serão apresentadas algumas orientações apenas para o caso da delimitação das bacias através de cartas topográficas.

A delimitação de cada bacia hidrográfica é feita numa carta topográfica, seguindo as linhas das cristas das elevações circundantes da seção do curso d'água que foi interceptado pelo traçado da rodovia ou ferrovia.

É justamente nesta interseção que se localizará a exutória e esta será considerada como ponto de partida para o processo de delimitação. O processo poderá ser completado por meio da seguinte sequência de passos, seguindo as orientações de Sperling (2007):

- O primeiro passo é definir o ponto inicial (exutória) a partir do qual será feita a delimitação da bacia. A exutória está situado na parte mais baixa do trecho do curso d'água principal.
- Reforçar a marcação do curso d'água principal e dos tributários (os quais cruzam as curvas de nível, das mais altas para as mais baixas para definição dos fundos de vale). O uso de cores distintas para diferenciar o corpo d'água principal de seus afluentes é uma boa prática.
- A delimitação da bacia hidrográfica inicia a partir da exutória, conectando os pontos mais elevados, tendo por base as curvas de nível. O limite da bacia circunda o curso d'água e as nascentes de seus tributários.
- Nos topos dos morros deve-se verificar se a chuva que cair do lado de dentro do limite realmente escoará sobre o terreno, rumo às partes baixas cruzando perpendicularmente as curvas de nível em direção ao curso d'água em estudo. Se a inclinação do terreno estiver voltada para a direção oposta às drenagens, é porque pertence a outra bacia. Importante destacar que dentro da bacia poderá haver locais com cotas mais altas do que as cotas dos pontos que definem o divisor de águas da bacia.
- Para facilitar a definição dos limites, deve-se diferenciar os talwegues dos divisores de águas. Os talwegues são depressões (vales), representados graficamente, onde as curvas de nível apresentam a curvatura contrária ao sentido da inclinação do terreno, indicando que nestes locais ocorre concentração de escoamento. Os divisores de água são representados pelo

inverso de um talvegue, no qual as curvas de nível apresentam curvatura voltada para o sentido da inclinação do terreno, sobre a qual as águas escoam no sentido ortogonal às curvas em direção aos talvegues.

- A delimitação da bacia deve retornar ao ponto inicial definido como exutória.

Para fins de ilustração do que se espera obter ao final deste processo, se apresenta a figura 3.1. Nela pode ser notado o limite da bacia, em linha vermelha e os cursos d'água, em linha azul. O curso d'água principal está demarcado com uma linha mais grossa, distinguindo-o dos afluentes.

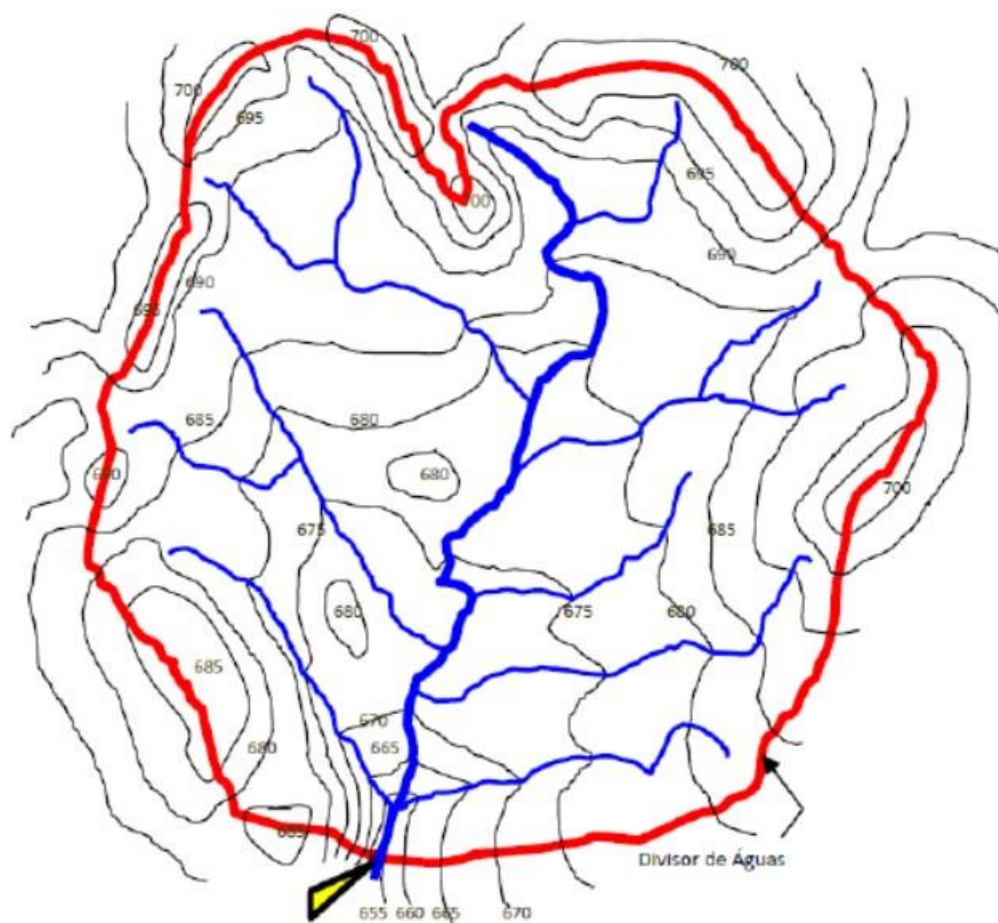


Figura 3.1 – Bacia delimitada através de uma carta topográfica. (Fonte: Sperling, 2007).

Algo que facilitará no processo de delimitação é a correta identificação dos elementos disponíveis nas cartas topográficas, com destaque para as curvas de nível, as cotas do relevo, bem como a sua qualidade e escala. Além destes, o conhecimento prévio do comportamento da representação dos principais acidentes geográficos e o comportamento das curvas de nível para cada caso ajudará o aluno na identificação e distinção das diversas bacias de contribuição e seus elementos, como o traçado dos cursos d'água, que normalmente estão bem identificados nas cartas.

TOME NOTA

Algumas fontes que podem ser consultadas para fins de obtenção destas cartas são o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (www.ibge.gov.br – geociências), além do Exército Brasileiro.

4. MÉTODOS PARA CÁLCULO DAS DESCARGAS

Na literatura nacional e internacional podem ser encontradas diferentes metodologias para cálculo das descargas de bacias de contribuição. Dentre os métodos mais conhecidos, pode-se citar, por exemplo, o racional, o index-área, o hidrograma unitário sintético ou triangular. No entanto, nos projetos elaborados e analisados pelo DNIT, conforme preconiza a IS-203 (DNIT, 2006), é recomendado o uso de apenas três métodos: racional, racional-corrigido e hidrograma unitário triangular (HUT).

Como regra geral, a escolha do método de cálculo das descargas das bacias de contribuição deve ser feita com base na sua área, devendo-se considerar os seguintes limites:

- Método Racional: para bacias com área até 4 km²;
- Método Racional corrigido: para bacias com área entre 4 km² e 10 km²;
- Método do Hidrograma Unitário Triangular: para bacias com área superior a 10 km².

4.1 MÉTODO RACIONAL

Devido à simplicidade da sua fórmula de cálculo, este método é, dentre todos os métodos de avaliação de descargas de projeto para os sistemas de drenagem, aquele que é utilizado com maior frequência, não só no Brasil, mas em todo o mundo, principalmente nas bacias de pequeno porte ou em áreas urbanas.

A aplicação deste método para o cálculo da descarga de bacias encontra vasto campo de discussão entre os hidrólogos.

De acordo com Vem Te Chow (apud TORRICO, 1975), o método racional é recomendável para cálculo de descarga de bacias com área entre 40 ha (ou 0,4 km²) e 81 ha (ou 0,81 km²) e para tempos de recorrência entre 5 e 10 anos.

Já segundo Linsley, Korler e Paulhus (apud TORRICO, 1975), este método deve ser usado para cálculo de descarga de bacias com área até 40 ha (ou 0,4 km²),

com precaução para não exceder 486 ha (ou 0,48 km²), sem limite associado aos tempos de recorrência.

Por sua vez, o California Division Highways (apud TORRICO, 1975) sugere o uso do método racional para o cálculo da descarga em bacias com área até 40,5 km², associados a tempos de recorrência de 50 até 100 anos.

Pode-se ainda encontrar referência para uso do método em bacias com área até 2 km², conforme destacado por Tucci *et. al.* (2007). Ainda conforme este mesmo autor, os princípios básicos deste método são:

- Duração da precipitação intensa de projeto igual ao tempo de concentração;
- Adota um coeficiente único de perdas, denominado “C”, estimado com base nas características das bacias (tal coeficiente também costuma ser chamado de run-off ou coeficiente de deflúvio);
- Não avalia o volume da cheia e a distribuição temporal das vazões.

Deste modo, no estabelecimento do valor da descarga pelo método racional, admite-se que a precipitação sobre a área é constante e uniformemente distribuída sobre a superfície da bacia. Para considerar que todos os pontos da bacia contribuem na formação do deflúvio, é estabelecido que a duração de chuva deve ser igual ou maior que o seu tempo de concentração e, como a intensidade da chuva decresce com o aumento da duração, a descarga máxima resulta de uma chuva com duração igual ao tempo de concentração da bacia.

Apesar destas diferentes abordagens, será considerado o uso do método racional para cálculo de descargas de bacias com área até 4,0 km², no caso de projetos rodoviários no âmbito do DNIT (conforme orientação da IS-203), adotando-se, para tal, a seguinte fórmula:

$$Q = 0,278 * C * I * A, \text{ sendo:}$$

- Q = vazão máxima em m³/s;
- C = coeficiente de perdas, ou coeficiente run-off (tabelado);
- A = área da bacia em km²;

- I = intensidade de precipitação em mm/h.

Há uma diversidade de tabelas disponíveis em diferentes bibliografias com os valores admissíveis para o coeficiente run-off. Tomando por base o conteúdo do Manual de Hidrologia Básica do DNIT (DNIT, 2005) e do livro Hidrologia (TUCCI et al, 2007), fica a sugestão de uso das tabelas 4.1 a 4.3.

É importante ter em mente que o coeficiente de deflúvio representa essencialmente a relação entre a vazão e a precipitação que lhe deu origem, o que envolve além do volume da precipitação vertida, a avaliação do efeito da variação da intensidade da chuva e das perdas por retenção e infiltração do solo durante a tempestade de projeto.

Tabela 4.1 – Valores do coeficiente C.

Superfície	Coeficiente run-off (C)	
	Intervalo	Valor sugerido
PAVIMENTO		
Asfalto	0,70 – 0,95	0,83
Concreto	0,80 – 0,95	0,88
Calçadas	0,75 – 0,85	0,80
Telhados	0,75 – 0,95	0,85
COBERTURA – GRAMA SOLO ARENOSO		
Plano (2 %)	0,05 – 0,10	0,08
Médio (2 % a 7 %)	0,10 – 0,15	0,13
Alta (7 %)	0,15 – 0,20	0,18
COBERTURA – GRAMA SOLO PESADO		
Plano (2 %)	0,13 – 0,17	0,15
Médio (2 % a 7 %)	0,18 – 0,22	0,20
Alta (7 %)	0,25 – 0,35	0,30

Fonte: ASCE, apud TUCCI, 2007.

Tabela 4.2 – Valores do coeficiente C para áreas rurais.

Tipo de área	“C”
TOPOGRAFIA	

Terreno plano, declividade de 0,2 – 0,6 m/km	0,30
Terreno, declividade de 3- 4 m/km	0,20
Morros, declividade de 50 a 50 m/km	0,10
SOLO	
Argila impermeável	0,10
Permeabilidade média	0,20
Arenoso	0,40
COBERTURA	
Áreas cultivadas	0,10
Árvores	0,20

Fonte: WILLIAMS, apud TUCCI, 2007.

Tabela 4.3 – Valores do coeficiente C.

Descrição das áreas das bacias tributárias	Intervalo do coeficiente “C”
COMÉRCIO	
Áreas centrais	0,70 – 0,95
Áreas da periferia do centro	0,50 – 0,70
RESIDENCIAL	
Áreas de uma única família	0,30 – 0,50
Multiunidades, isoladas	0,40 – 0,60
Multiunidades, ligadas	0,60 – 0,75
Residencial (suburbana)	0,25 – 0,40
Áreas de apartamentos	0,50 – 0,70
INDUSTRIAL	
Áreas leves	0,50 – 0,80
Áreas densas	0,60 – 0,90
Parques, cemitérios	0,10 – 0,25
Playgrounds	0,20 – 0,35
Pátio e espaço de serviço de estradas de ferro	0,20 – 0,40
Terrenos baldios	0,10 – 0,30

Fonte: DNIT, 2005.

4.2 MÉTODO RACIONAL CORRIGIDO

O método racional tem sido usado de preferência para bacias de pequena área, mas nada indica que não seja aplicável a bacias maiores, como usualmente é usado em projetos rodoviários em outros países. Naturalmente, para bacias maiores torna-se necessário corrigir as precipitações através do fator de redução para a área, uma vez que a distribuição na superfície da bacia não é uniforme e por isso é denominado normalmente como fator de distribuição.

Desta consideração é que deriva o método racional corrigido e sua expressão acaba diferindo daquela adotada no método anterior em função apenas do acréscimo do fator de distribuição. Com isso, a notação passa a ser:

$$Q = 0,278 * C * I * A * n, \text{ sendo:}$$

- Q = vazão máxima em m³/s;
- C = coeficiente de perdas, ou coeficiente run-off (tabelado);
- A = área da bacia em km²;
- I = intensidade de precipitação em mm/h.
- n = coeficiente de distribuição, calculado conforme a expressão a seguir.

$$n = A^{-0,1}, \text{ sendo:}$$

- A = área da bacia em ha (situadas em áreas rurais). Ou,

$$n = A^{-0,15}, \text{ sendo:}$$

- A = área da bacia em ha (situadas em áreas urbanas).

Alguns autores sugerem o cálculo do coeficiente de distribuição por meio de outra expressão, sendo ela:

$$\theta = \frac{1}{(100 * A)^{1/n}}, \text{ sendo:}$$

- A = área da bacia em km^2 ;
- $n = 4$, para pequenas declividades, inferiores a 0,5 % (Burki Ziegler);
- $n = 5$, médias declividades, entre 0,5 % e 1,0 % (MC Math);
- $n = 6$, fortes declividades, superiores a 1 % (Brix).

4.3 MÉTODO DO HIDROGRAMA UNITÁRIO TRIANGULAR - HUT

O método do hidrograma unitário triangular, desenvolvido pelo U.S. Soil Conservation Service, pode ser aplicado para obtenção das relações chuva/deflúvio em bacias com até 2.500 km^2 . Para áreas maiores que este valor, as bacias podem ser divididas ou decompostas em sub-bacias, com áreas até 2.500 km^2 (TORRICO, 1975).

Já se sabe que a resposta de uma bacia a um evento de chuva depende das características físicas da bacia e das características do evento, como a duração e a intensidade da chuva. Chuvas mais intensas tendem a gerar mais escoamento e hidrogramas mais pronunciados, enquanto que chuvas menos intensas tendem a gerar hidrogramas mais atenuados, com menor vazão de pico.

Para fins de simplificação, admite-se que existe uma relação linear entre a chuva efetiva, que corresponde à parcela da chuva que gera escoamento superficial, e a vazão. Associada a esta relação surge a teoria do hidrograma unitário, que nada mais é que o hidrograma de escoamento direto causado por uma chuva efetiva unitária (de valor unitário, como 1 mm, ou 1 cm, para fins de exemplificação). Tal teoria considera que a precipitação efetiva e unitária tem intensidade constante ao longo de sua duração e distribui-se uniformemente sobre toda a área de drenagem.

Também se admite que a bacia hidrográfica tem um comportamento linear e isto permite a aplicação dos princípios da proporcionalidade e da superposição.

De acordo com o princípio da proporcionalidade, para uma chuva efetiva de uma dada duração, o volume de chuva (que é igual ao volume escoado

superficialmente) é proporcional à intensidade dessa chuva. Assim, o hidrograma que resultaria de uma precipitação efetiva de 2 mm seria duas vezes maior que aquele resultante de uma chuva de 1 mm.

Já de acordo com o princípio da superposição, as vazões de um hidrograma de escoamento superficial, produzidas por chuvas efetivas sucessivas, podem ser encontradas somando as vazões dos hidrogramas de escoamento superficial correspondentes à cada chuva efetiva individual. Deste modo, o hidrograma de resposta de duas chuvas unitárias sucessivas pode ser obtido por meio da soma dos seus hidrogramas unitários deslocados no tempo por uma diferença “D”.

Se estes dois princípios forem aplicados, será possível calcular os hidrogramas resultantes de eventos complexos a partir do hidrograma unitário e este cálculo será feito através da convolução. Em matemática, particularmente na área de análise funcional, convolução é um operador linear que, a partir de duas funções, produz uma terceira, que mede a soma do produto dessas funções ao longo da região subentendida pela superposição delas em função do deslocamento existente entre elas.

No hidrograma unitário, a vazão em um intervalo de tempo “t” será calculada a partir da convolução entre as funções P_{ef} (chuva efetiva) e h (ordenadas do hidrograma unitário discreto), assumindo as seguintes notações:

$$Q_t = \sum_{i=1}^t P_{ef_i} * h_{t-i+1} \text{ , para } t < k;$$

$$Q_t = \sum_{i=t-k+1}^t P_{ef_i} * h_{t-i+1} \text{ , para } t > k; \text{ sendo:}$$

- Q_t é a vazão do escoamento superficial no intervalo de tempo t;
- h é a vazão por unidade de chuva efetiva do hidrograma unitário;
- P_{ef} é a precipitação efetiva do bloco i;
- k é o número de ordenadas do hidrograma unitário, que pode ser obtido por $k = n - m + 1$, sendo “m” o número de pulsos de precipitação e “n” o número de valores de vazões do hidrograma.

Se esta convolução for representada na forma matricial ficará mais fácil observar como ela evolui. Assim, se for considerada uma chuva efetiva formada por 3 blocos ($m = 3$) de duração D cada um, ocorrendo em sequência, e uma bacia

cujo hidrograma unitário para a chuva de duração D é dado por 9 ordenadas ($k = 9$) de duração D cada uma, a aplicação da convolução para calcular as vazões Q_t na exutório da bacia seria conforme a figura 4.1.

$Q_1 =$	$P_{ef1.h1}$
$Q_2 =$	$P_{ef2.h1} + P_{ef1.h2}$
$Q_3 =$	$P_{ef3.h1} + P_{ef2.h2} + P_{ef1.h3}$
$Q_4 =$	$P_{ef3.h2} + P_{ef2.h3} + P_{ef1.h4}$
$Q_5 =$	$P_{ef3.h3} + P_{ef2.h4} + P_{ef1.h5}$
$Q_6 =$	$P_{ef3.h4} + P_{ef2.h5} + P_{ef1.h6}$
$Q_7 =$	$P_{ef3.h5} + P_{ef2.h6} + P_{ef1.h7}$
$Q_8 =$	$P_{ef3.h6} + P_{ef2.h7} + P_{ef1.h8}$
$Q_9 =$	$P_{ef3.h7} + P_{ef2.h8} + P_{ef1.h9}$
$Q_{10} =$	$P_{ef3.h8} + P_{ef2.h9}$
$Q_{11} =$	$P_{ef3.h9}$

Figura 4.1 – Notação matricial da convolução proposta. (Fonte: Collischonn – IPH/UFRGS)

Segundo o Soil Conservation Service, o hidrograma unitário adimensional curvilíneo, representado na figura 4.2, e que foi desenvolvido por Víctor Mockus, foi deduzido da média de um grande número de hidrogramas unitários naturais de bacias com tamanhos muito variados e situações geográficas diversas.

Dividindo as ordenadas do hidrograma unitário pela sua descarga máxima e as abscissas pelo tempo de ponta T_p , resulta o hidrograma adimensional cujo ponto de inflexão no ramo de descida fica $1,70 T_p$ após o início da chuva unitária e a base é igual a $5 T_p$.

Nessa metodologia, o tempo de concentração da bacia é igual ao tempo entre o fim da chuva e o ponto de inflexão no ramo descendente do hidrograma unitário. O atraso da onda ou "Lag" é definido como sendo o tempo entre o centro da chuva unitária e o pico do hidrograma unitário, valendo $0,6 T_c$ para condições

médias de bacia hidrográfica e deflúvios com distribuição aproximadamente uniforme sobre a área.

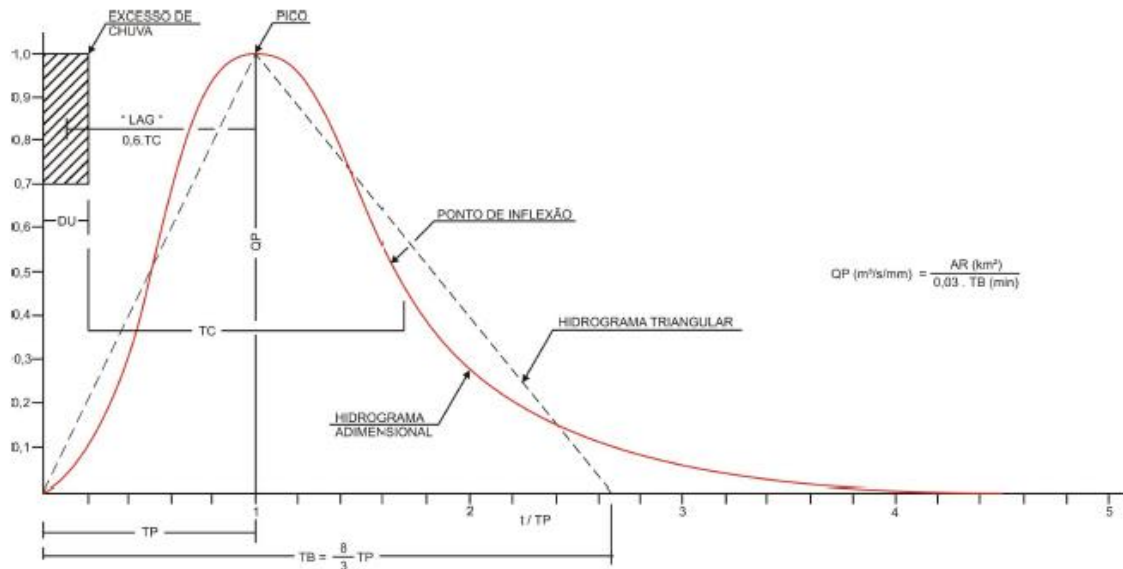


Figura 4.2 – Hidrograma unitário adimensional e triangular (Fonte: Manual de Hidrologia Básica para Estruturas de Drenagem, DNIT/2005)

Também se recomenda que a "duração unitária" da chuva usada com o hidrograma unitário seja próxima de 0,20 T_p , não devendo ter valores maiores que 0,25 T_p . Recomenda-se a adoção de durações unitárias até um quinto do tempo de concentração, para reduzir o trabalho de cálculo.

O próprio Soil Conservation Service recomenda a substituição do hidrograma adimensional curvilíneo por um hidrograma triangular cuja forma se adapta razoavelmente ao primeiro, conforme mostra a figura anterior. O tempo de base T_b desse hidrograma triangular é igual a $8/3$ do tempo de ponta T_p e sua forma mais simplificada não necessita da apresentação adimensional, sendo obtida a partir do tempo de concentração T_c e da duração unitária D_u .

Obtém-se a descarga de ponta Q_p , ou a ordenada máxima do hidrograma unitário, observando-se que a área do triângulo representa o volume escoado da bacia para um deflúvio de 1 mm.

Assim, os parâmetros do hidrograma unitário triangular para uma chuva efetiva P_{ef} igual a 1 mm de altura no tempo unitário “D” poderão ser obtidos por meio das seguintes expressões:

$$\mu_{(Tp)} = \frac{0,208 \cdot A}{Tp} \rightarrow \text{vazão de pico por mm de chuva efetiva (m}^3\text{/s/mm);}$$

A = área da bacia (km²);

$$Tp = \frac{D}{2} + 0,6Tc \rightarrow \text{tempo de pico (horas);}$$

$$D = \frac{Tc}{5} \rightarrow \text{tempo unitário (horas);}$$

$$Tr = 1,67Tp \rightarrow \text{tempo de retorno (horas);}$$

$$Tb = 2,67Tp \rightarrow \text{tempo base (horas).}$$

Para a composição do hidrograma total será necessário multiplicar as ordenadas do hidrograma unitário pelos excessos de precipitação ou deflúvios em cada intervalo de tempo igual à duração unitária D , obtendo-se os hidrogramas parciais triangulares, que somados (mantendo-se as devidas defasagens), fornecem o hidrograma total da enchente.

As ordenadas do hidrograma unitário devem, por isso, corresponder às abscissas com intervalos iguais à duração unitária. As ordenadas dos hidrogramas parciais, que serão assim também espaçadas de “ D ”, serão somadas com deslocamento de um intervalo “ D ”, cada vez que se considere o acréscimo de precipitação efetiva seguinte.

É bastante comum que os cálculos do hidrograma sejam processados em planilhas eletrônicas, a exemplo da que está apresentada na figura 4.3, desenvolvida no Microsoft Excel e aplicada em um caso real para cálculo de descarga em bacia com área de aproximadamente 40 km². Nela pode-se observar que os parâmetros de entrada, como o tempo de concentração, o tempo de base, o tempo de pico, além da duração unitária, por exemplo, estão processados na parte superior da planilha, ao passo que os cálculos da chuva efetiva e a convolução, na forma matricial, aparecem na parte intermediária e final da planilha.

As expressões complementares que auxiliaram na elaboração da planilha mostrada na figura a pouco citada foram obtidas do Manual de Hidrologia Básica para Estruturas de Drenagem (DNIT, 2005) e do Manual Técnico de Drenagem e Esgoto Sanitário (JABOR et al, 2008) e estão transcritas na sequência:

$$Q_i = P_{ef(i)} \cdot \mu_1 + P_{ef(i-1)} \cdot \mu_2 + P_{ef(i-2)} \cdot \mu_3 + \dots + P_{ef1} \cdot \mu_1;$$

$$P_{ef} = \frac{(P + \frac{5080}{CN} + 50,8)^2}{P + \frac{20320}{CN} - 203,2}; \text{ sendo:}$$

Q_i = vazão do escoamento superficial associada ao intervalo de tempo considerado;

P_{ef} = precipitação efetiva;

μ_i = vazão por unidade de chuva efetiva (ou μ_{Tp});

P = altura pluviométrica associada ao intervalo de tempo considerado e ao tempo de recorrência definido;

CN = número do complexo solo vegetação.

Escolhe-se o valor de CN , variável de 0 a 100, conforme a permeabilidade do solo, a cobertura vegetal, a textura da superfície e a umidade antecedente do solo, que fornecem a orientação para escolha do CN , para diversos tipos de cobertura vegetal, tratamento agrícola e para diversos grupos hidrológicos de solos, classificados de acordo com sua permeabilidade.

Em razão das obras de engenharia não dependerem essencialmente da forma de utilização dos solos na produção agrícola, adota-se uma classificação simplificada para exprimir a influência da superfície do terreno na formação dos deflúvios. Apresenta-se dessa forma a tabela 4.1 que melhor atende aos objetivos de um projeto rodoviário.

Nome do Curso D'água :		Riacho das Porteiras								
BACIA		CARACTERÍSTICAS DA BACIA								
Nº	ESTACA	ÁREA A(km ²)	COMP. TALV. L(km)	DIF.DE NÍVEL ΔH (m)	Valor de K	Valor de CN	Valor de TR (anos)	Tempo de Conc.(h)		
58	5235+15,07	39,7	11,5	110,0	4	65	100	3,31		
CÁLCULO DOS PARÂMETROS DO HUT										
ΔD = 0,2 T _c (hora) =>		0,66								
T _p = 0,5 ΔD + 0,6 T _c (hora) =>		2,32								
T _R = 1,67 T _p (hora) =>		3,87								
T _b = 2,67 T _p (hora) =>		6,19								
Q = $\frac{2,08 \cdot A}{T_p}$ (m ³ /s/cm)		35,59								
CÁLCULO DA CHUVA EFETIVA (P _e)										
$P_e = \frac{\left(P - \frac{5080}{CN} + 50,8 \right)^2}{P + \frac{20320}{CN} - 203,2} \text{ (m}^3\text{/s/cm)}$				<table border="1"> <tr> <td>RELAÇÃO P/P₀ =</td> <td>0,98</td> </tr> </table>		RELAÇÃO P/P ₀ =	0,98			
RELAÇÃO P/P ₀ =	0,98									
DETERMINAÇÃO DOS INCREMENTOS DE CHUVA										
ΔT (hora)	HUT (m ³ /s/cm)	PRECIPITAÇÕES (mm) (*)		P _e		Incr.				
		P (mm)	P Corrig.(mm)	(mm)	(cm)					
0,66	10,1	74,7	73,2	11,50	1,15	1,15				
1,32	20,2	95,4	93,5	21,55	2,16	1,01				
1,98	30,4	107,5	105,3	28,32	2,83	0,68				
2,64	32,6	116,1	113,8	33,45	3,35	0,51				
3,30	26,6	122,7	120,3	37,60	3,76	0,42				
3,96	20,5	128,2	125,6	41,09	4,11	0,35				
4,62	14,4	132,8	130,1	44,10	4,41	0,30				
5,28	8,4	136,8	134,0	46,76	4,68	0,27				
5,94	2,3	140,3	137,5	49,13	4,91	0,24				
ΔT (hora)	INCREMENTOS DE CHUVA									VAZÃO (m ³ /s)
	1,15	1,01	0,68	0,51	0,42	0,35	0,30	0,27	0,24	
0,66	11,64									11,64
1,32	23,29	10,18								33,46
1,98	34,93	20,35	6,85							62,14
2,64	37,54	30,53	13,71	5,19						86,97
3,30	30,56	32,81	20,56	10,39	4,20					98,53
3,96	23,58	26,71	22,10	15,58	8,40	3,53				99,92
4,62	16,60	20,61	17,99	16,75	12,61	7,07	3,05			94,68
5,28	9,62	14,51	13,88	13,63	13,55	10,60	6,10	2,69		84,59
5,94	2,64	8,41	9,77	10,52	11,03	11,39	9,14	5,39	2,40	70,70
Q máx.(m³/s) => 99,92										

Figura 4.3 – Modelo de planilha com processamento da descarga pelo método do HUT. (Fonte: Próprio autor).

Tabela 4.1 – Número de curva (CN) para diferentes condições de complexo hidrológico.

Solo – Cobertura Vegetal					
Cobertura Vegetal	Condições de retenção superficial	Grupo hidrológico do solo			
		A	B	C	D
Terreno não cultivado com pouca vegetação	Pobre	77	86	91	94
	Boa	72	81	88	91
Terreno cultivado	Pobre	51	67	76	80
	Boa	68	79	86	89
Pasto	Pobre	39	61	74	80
	Boa	45	66	77	83
Mata ou bosque	Pobre	25	55	70	77
	Boa	74	80	87	90
Área urbana	Pobre	70	76	83	86
	Boa				

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

Nesta tabela, os quatro grupos hidrológicos do solo são relacionados com a permeabilidade relativa das camadas inferiores, após um período prolongado de chuvas intensas, independentemente da cobertura vegetal, conforme descrito em seguida:

- **GRUPO A** - Potencialidade mínima para formação de deflúvio superficial. Inclui areias em camadas espessas com muito pouco silte e argila e também loess profundo muito permeável.
- **GRUPO B** - Principalmente solos arenosos menos espessos que no grupo A e loess menos profundo ou menos agregado que no grupo A, porém apresentam infiltração acima da média, após intenso umedecimento prévio.
- **GRUPO C** - Compreende solos pouco profundos e solos contendo bastante argila e coloides, no entanto, menos que no grupo D. O grupo apresenta infiltração abaixo da média, após pré-saturação.
- **GRUPO D** - Potencial máximo para formação do deflúvio superficial. O grupo inclui em sua maioria, argilas de alto valor de expansão, incluindo também alguns solos pouco profundos, com sub-horizontes quase impermeáveis, próximos da superfície. Qualquer tipo de solo em terreno plano, com fraca rede de drenagem, acaba enquadrando-se nesse grupo, após um período prolongado de chuvas que eleva o nível do lençol freático para a superfície.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. **Manual de Hidrologia Básica para Estruturas de Drenagem**. Rio de Janeiro, IPR, 2 ed. DNIT, 2005.

BRASIL. **Diretrizes Básicas para Estudos e Projetos Rodoviários: Escopos Básicos/ Instruções de Serviço**. Rio de Janeiro, IPR, 3 ed. DNIT, 2006.

GIMENEZ, Alírio Brasil. FIGUEIREDO, Antônio Domingues. SILVA, Cláudio Oliveira. LANGENDONCK, Francisco Van. ROMERO, José Roberto Hortêncio. JABÔR, Marcos Augusto. TSUTIYA, Milton Yomoyuki. DEBS, Mounir Khalil El. NETO, Pedro Jorge Chama. BANNOKI, Regina. **Manual Técnico de Drenagem e Esgoto Sanitário**. São Paulo, ABTC, 1 ed, 2008.

JABÔR, Marcos Augusto. **Drenagem de Rodovias – Estudos Hidrológicos e Projeto de Drenagem**. Notas de aula, 2019.

LE COLLISCHONN, Walter; LE TASSI, Rutinéia de. **Introdução Hidrologia**. Porto Alegre, Editora da Universidade UFRGS, 2008.

MAGALHÃES, A.; LORENA, M. Hydraulic Designe of Labyrinth Weirs. Report nº 736, National Laboratory of Civil Engineering, Lisbon, Portugal, 1989.

VON SPERLING, M. **Introdução a qualidade das águas e o tratamento de esgotos**. Belo Horizonte, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2007.

TORRICO, José Jaime Taborga. **Práticas Hidrológicas**. Rio de Janeiro, TRANSCON, 2 ed., 1975.