

A – O MODELO DE SIMULAÇÃO CHUVA – VAZÃO

O modelo AÇUMOD (PASSERAT DE SILANS, 1998) foi utilizado no processo de transformação chuva-vazão, trata-se de um modelo do tipo conceitual determinístico distribuído linear.

A discretização fisiográfica da bacia é realizada a partir de uma malha quadriculada retangular, a qual cobre toda a área da bacia. Em cada uma destas quadrículas é realizada a simulação do ciclo hidrológico, através de um conjunto de quatro reservatórios (Figura A.1). Em seguida, a água é encaminhada de quadrícula em quadrícula até chegar ao exutório da bacia. O balanço de massa realizado nestes quatro reservatórios é para um intervalo de tempo diário. As condições de contorno (níveis máximos e/ou mínimos) e iniciais (níveis dos reservatórios) dos reservatórios são utilizados no cálculo deste balanço hídrico.

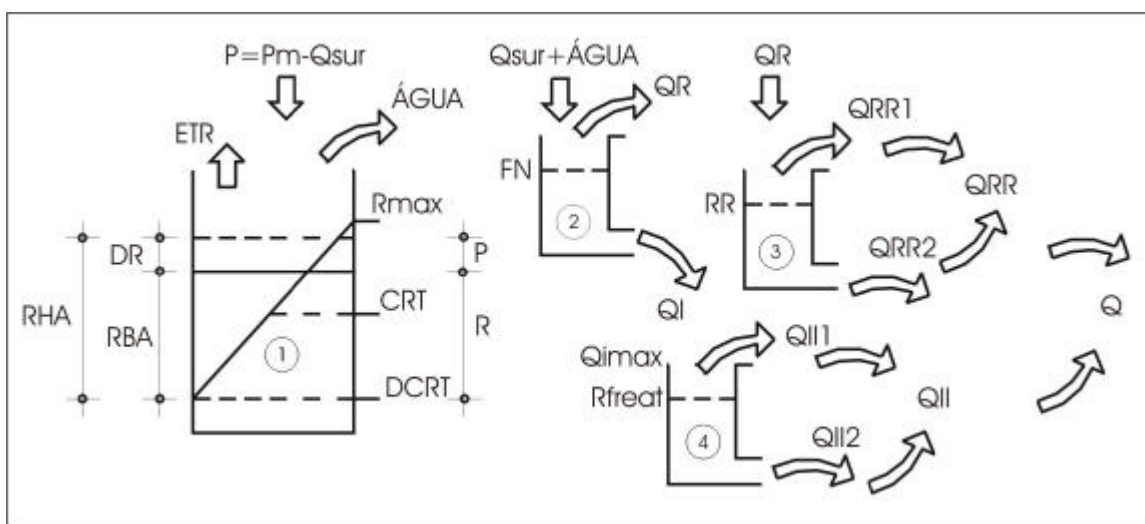


Figura A.1 – Conjunto de quatro reservatórios que simulam o ciclo hidrológico.

Para o conjunto de reservatórios que simulam o ciclo hidrológico definem-se os seguintes parâmetros:

- P – Precipitação efetiva, em mm, ou seja, utilizada para gerar o termo ÁGUA , em mm;
- P_m – Precipitação observada, medida em campo, em mm;
- Q_{sur} – Parcela da precipitação observada que se transforma em escoamento superficial direto, em mm, antes da geração do termo ÁGUA ;
- ÁGUA – Quantidade de água disponível para gerar os escoamentos, em mm;
- ETR – Evapotranspiração real, em mm;

- DR – Variação da quantidade de água no reservatório solo, em mm;
- RBA – Reserva útil de água no solo, antes da ocorrência de um evento chuvoso, em mm;
- RHA – Reserva útil de água no solo, depois da ocorrência de um evento chuvoso, em mm;
- Rmax – Reserva máxima de água no solo, acima da qual nenhuma água é retida no solo, em mm;
- R – Reserva de água no reservatório 1 ao final de cada passo de tempo, em mm;
- CRT – Nível correspondente à capacidade média de armazenamento de água no solo, em mm;
- DCRT – Capacidade de armazenamento de água no solo, abaixo do qual não há escoamentos, em mm;
- FN – Função de infiltração;
- QR – Escoamento superficial, antes do retardamento no reservatório superficial, em mm;
- QI – Escoamento infiltrado, antes do retardamento no reservatório subterrâneo, em mm;
- QRmax – Nível máximo do reservatório superficial, este reservatório realiza a divisão entre escoamento instantâneo (QRR1) e retardado (QRR2), em mm;
- RR – Nível de água no reservatório superficial no passo de tempo inicial, em mm;
- QRR1 – Escoamento superficial instantâneo, em mm;
- QRR2 – Escoamento superficial retardado, em mm;
- QRR – Soma das duas parcelas definidas anteriormente (QRR1 e QRR2) após passar pelo reservatório superficial, em mm;
- QImax – Nível máximo do reservatório subterrâneo, estabelecendo um retardamento entre a infiltração e a alimentação do lençol, em mm;
- Rfreat – Nível de água no reservatório subterrâneo no tempo inicial, em mm;
- QII1 – Escoamento de base instantâneo, em mm;
- QII2 – Escoamento de base retardado em função, em mm;
- QII – Soma das duas parcelas definidas anteriormente (QII1 e QII2), representa o escoamento infiltrado após passar pelo reservatório subterrâneo, em mm;
- Q – Lâmina escoada, em mm;

A caracterização fisiográfica da bacia hidrográfica é realizada, primeiramente, pelas ações de eliminar as quadrículas que não fazem parte da bacia e, depois, pela divisão das quadrículas, de forma a se detalhar melhor as informações da bacia. Por exemplo, aproximar um conjunto de quadrículas a forma irregular das sub-bacias, ou localizar um elemento hidráulico. A quadrícula “mãe” de lado A , só poderá ser sub-dividida em quadrículas de lado $A/2$, $A/4$ e $A/8$, conforme Figura A.2. No momento da divisão deve-se respeitar uma regra que relaciona quadrículas vizinhas. Assim, uma quadrícula de lado $3.A/2^n$ ($n = 0, 1, 2$, ou 3) só poderá ter como vizinha outra de lado igual ($A/2^n$), ou de lado imediatamente superior ($A/2^{n-1}$), ou de lado imediatamente inferior ($A/2^{n+1}$). Esta regra é imposta para que uma quadrícula não tenha duas ou mais vizinhas, pois uma quadrícula só pode drenar para uma vizinha.

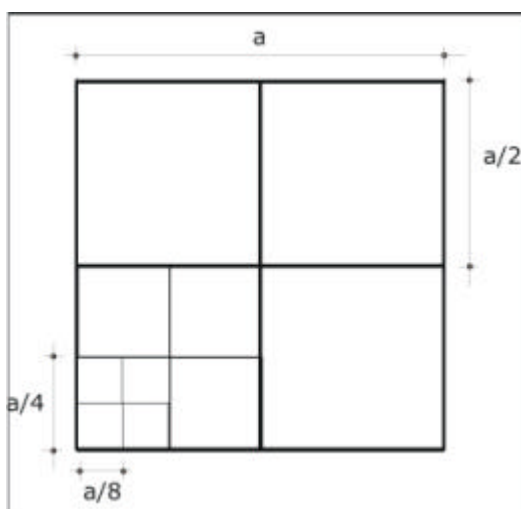


Figura A.2 – Discretização da quadrícula.

Depois de finalizada a etapa de eliminação e divisão de quadrículas, passa-se, então, para a fase final de discretização da bacia, que consiste na entrada, por quadrículas, das seguintes informações:

1. Altitude mínima (Z) – obtida a partir de um camada contendo informações plani-altimétricas;
2. Indicação do tipo da malha – o modelo distingue 2 tipos possíveis para as quadrículas. Um tipo é a malha rio, que é aquela que faz ligação direta entre um elemento da estrutura hidráulica (reservatórios, postos fluviométricos, etc.). O outro é a malha solo, que não faz este tipo de ligação, nem contém elemento de estrutura hidráulica;

3. Sentido de drenagem (NW, NE, EN, ES, SE, SW, WS, WN ou WN) – definido em função da rede de drenagem e da altitude mínima, uma vez que uma quadrícula só drena para outra de altitude inferior. São oito os possíveis sentidos de drenagem, conforme a Figura A.3, valendo salientar que à quadrícula representante do exutório da bacia é atribuído o sentido genérico “Ex”;
4. Funções de produção – a partir de mapas de solo, vegetação (ou ocupação do solo), geologia e, eventualmente, topografia, definem-se, para a bacia hidrográfica, as funções de produção. Estas zonas são áreas para as quais, sob uma mesma precipitação e mesma umidade inicial do solo, tem-se uma mesma resposta hidrológica, ou seja, apresentam mesma função de produção de água. Assim, com o auxílio de ferramentas de SIG, superpõe-se o mapa das funções de produção com o mapa da bacia discretizada, e, para cada quadrícula, determina-se a porcentagem de área de cada uma destas zonas;
5. Elemento da arquitetura hidráulica – tais elementos são formados pelos reservatórios construídos ou em projeto, captações de água ao longo do rio, pontos de transposição de vazões entre bacias, postos fluviométricos e exutórios de sub-bacias, sendo que cada quadrícula pode conter, no máximo, 1 elemento de estrutura hidráulica. Os açudes podem ser de ordem 1 ou 2. Os de ordem 1 são os pequenos e, sobre eles, não há retirada significativa, além de que a montante desses açudes não há açudes. Já os de ordem 2 são os que têm uma maior capacidade. Neles há retiradas significativas. Para cada um destes, faz-se necessário entrar com uma série de informações do tipo: características geométricas, datas de construção e modificação, caso haja alguma. Os outros elementos da estrutura hidráulica são considerados açude de ordem 2, com curva cota / área / volume nula, ou seja, com um único ponto [0,0,0];
6. Zonas pluviométricas e evaporimétricas – através do método de Thiessen, são definidas as quadrículas cujas precipitações são consideradas iguais de um posto pluviométrico. Da mesma maneira, são definidas as áreas de igual evapotranspiração potencial, podendo ser adotada a do tanque classe A ou calculadas pela fórmula de Penman.

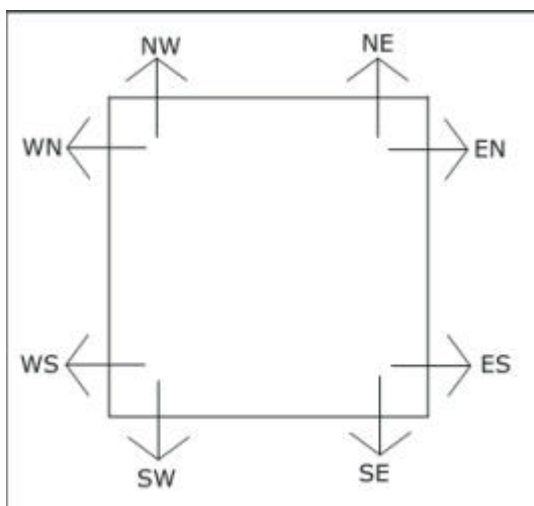


Figura A.3 – Sentidos de drenagem.

Caracterizada a bacia hidrográfica, passa-se para a fase de simulação do ciclo hidrológico. Para tanto, são necessários dados de precipitação e evapotranspiração potencial médias diárias. A simulação do ciclo hidrológico na bacia é realizada através de três funções:

I. Função de produção água:

Esta função objetiva simular o ciclo hidrológico através de um conjunto de quatro reservatórios, repartindo a precipitação entre infiltração, escoamento superficial, evapotranspiração, armazenamento no solo e percolação profunda. Esta função realiza o cálculo das lâminas de água em duas etapas.

Na primeira etapa, realiza-se o balanço hídrico no primeiro reservatório fictício, denominado de reservatório solo (Figura A.4), e assim determina-se a quantidade de água, em mm, disponível para gerar os escoamentos. Neste reservatório foi introduzido um termo que é responsável pela geração do escoamento superficial direto (Q_{sur}). Este termo permite a geração de escoamento superficial direto mesmo se a intensidade da precipitação for inferior à capacidade de infiltração, e o solo não estiver saturado (GOULA BI TIE, 1993). A ocorrência deste tipo de fenômeno é típica de regiões semi-áridas, onde em geral os solos, cobertos por uma vegetação esparsa, apresentam uma crosta superficial (MONTENEGRO, 1990). Essa situação é modelada pela seguinte formulação:

$$Q_{sur} = 0 \quad \text{se } P_m \leq ETP$$

$$Q_{sur} = (P_m - ETP) \cdot K_{rs} \quad \text{se } P_m > ETP$$

Sendo:

$$K_{rs} = \text{Min}\left(\frac{R + P_m}{R_{\max}}, C_{rs}\right)$$

Sendo:

C_{rs} , o coeficiente máximo do escoamento superficial direto.

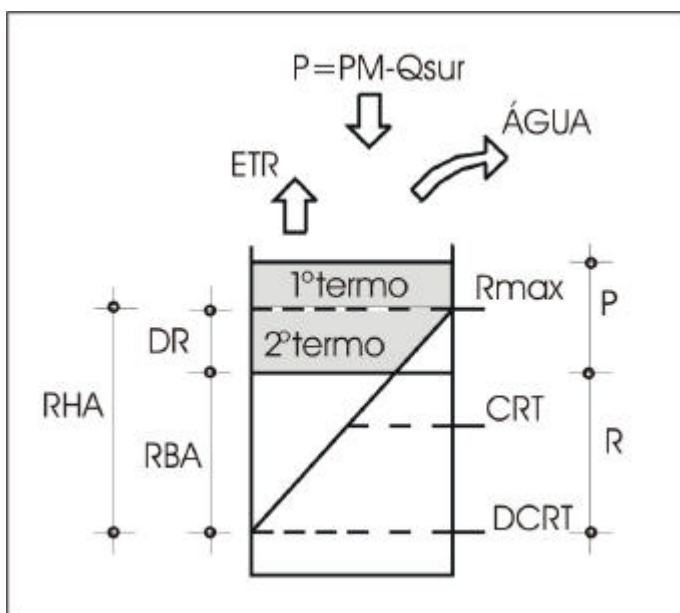


Figura A.4 – Reservatório Solo.

No reservatório solo (Figura A.4), o balanço hídrico é realizado através da divisão do total precipitado em dois termos. Dois casos são possíveis de ocorrer: o primeiro, quando o reservatório solo encontra-se totalmente cheio, ou seja, $(R + P > R_{max})$. Neste caso tem-se dois termos (Figura A.5 e Figura A.6):

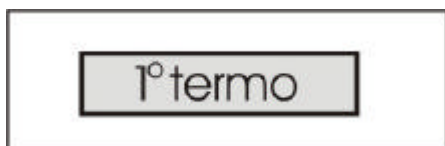


Figura A.5 – Primeiro termo da componente ÁGUA

No primeiro termo (Figura A.5) a quantidade de ÁGUA disponível para gerar o escoamento é determinada calculando-se o excesso que é dado por: $R + P - R_{max}$.

Já para o cálculo do segundo termo (Figura A.6) é processado para determinar parcela de água (ÁGUA) disponível para os escoamentos. O segundo termo será calculado e adicionado ao primeiro termo (Figura A.5), quando o reservatório solo estiver cheio. Caso contrário apenas o segundo termo é utilizado para o cálculo da parcela ÁGUA. Porém, salienta-se que a cada passo de tempo o segundo termo é calculado, o cálculo da lâmina representativa do segundo termo é apresentada em seguida.

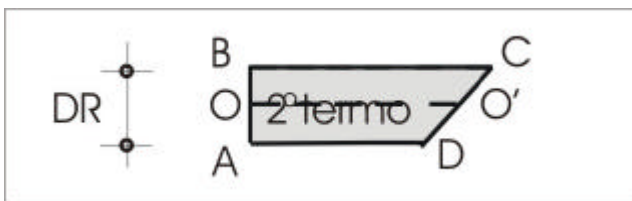


Figura A.6 – Segundo termo da componente ÁGUA

Para o segundo termo a quantidade de ÁGUA disponível para gerar o escoamento é determinada em função das características geométricas da Figura A.6, logo o segmento de reta OO' é igual a média dos segmentos AD e BC , assim tem-se:

$$OO' = \frac{AD + BC}{2} \quad (\text{Equação A.1})$$

Pela semelhança de triângulos da Figura A.4 pode-se tirar que:

$$\frac{AD}{RBA} = \frac{0,5}{DCR} \quad (\text{Equação A.2})$$

E também que:

$$\frac{BC}{DR + RBA} = \frac{0,5}{DCR} \quad (\text{Equação A.3})$$

Rearranjando os termos das equações (A.2) e (A.3), tem-se os comprimentos dos segmentos de reta AD e BC :

$$AD = \frac{0,5 \cdot RBA}{DCR} \quad (\text{Equação A.4})$$

$$BC = \frac{0,5 \cdot (DR + RBA)}{DCR} \quad (\text{Equação A.5})$$

Substituindo as equações (A.4) e (A.5) na equação (A.1), tem-se:

$$OO' = \frac{1}{2} \left(\frac{0,5 \cdot RBA}{DCR} + \frac{0,5 \cdot DR}{DCR} + \frac{0,5 \cdot RBA}{DCR} \right)$$

Agrupando-se os termos de mesmos numeradores, tem-se:

$$OO' = \frac{1}{2} \left(\frac{RBA}{DCR} + \frac{0,5 \cdot DR}{DCR} \right)$$

Multiplicando-se o numerador e o denominador por 2, tem-se:

$$OO' = \frac{1}{2} \left(\frac{RBA + 0,5 \cdot DR}{CRT - DCRT} \right) \quad \left[\frac{(x2)}{(x2)} \right]$$

Ou ainda:

$$OO' = \frac{2 \cdot RBA + DR}{4 \cdot (CRT - DCRT)}$$

Multiplicando-se a expressão acima pela constante DR , tem-se:

$$DR.OO' = \frac{2.RBA + DR}{4.(CRT - DCRT)}.DR$$

E desta forma chega-se ao termo relativo a quantidade de ÁGUA formada pelo segundo termo (Figura A.6)

$$DR.OO' = \frac{DR.(2.RBA + DR)}{4.(CRT - DCRT)} \quad (\text{Equação A.6})$$

Assim, genericamente, pode-se ter dois casos:

Caso $(R + P > R_{\max})$, tem-se que a quantidade de ÁGUA calculada pela soma do primeiro e do segundo termo, e matematicamente, obtém-se:

$$\text{ÁGUA} = R + P - R_{\max} + \frac{DR.(2.RBA + DR)}{4.(CRT - DCRT)}$$

Caso $(R + P \leq R_{\max})$, tem-se apenas o segundo termo (Figura A.6), e matematicamente, obtém-se:

$$\text{ÁGUA} = \frac{DR.(2.RBA + DR)}{4.(CRT - DCRT)}$$

De uma forma genérica, tem-se:

$$\text{ÁGUA} = \text{Max}(R + P - R_{\max}, 0) + \frac{DR.(2.RBA + DR)}{4.(CRT - DCRT)}$$

Em seguida, tem-se as fórmulas para determinação das seguintes lâminas do reservatório solo:

$$DR = \text{Max}(RHA - RBA, 0)$$

$$RBA = \text{Max}(R, DCRT) - DCRT$$

$$RHA = \text{Min}[\text{Max}(R + P, DCRT), R_{\max}] - DCRT$$

$$CRT = \frac{R_{\max} - DCRT}{2} + DCRT$$

$$R_{\max} = 2.CRT + DCRT$$

Para realização do balanço hídrico no reservatório solo, faz-se necessário calcular a evapotranspiração real, através da seguinte fórmula:

$$ETR_j = R_j + P_{j-1} - \text{ÁGUA}_{j-1} - ETR_{j-1}$$

Assim, pode-se calcular a reserva de água no solo no passo de tempo seguinte (R_{j+1}), através da expressão:

$$R_{j+1} = R_j + P_j - \text{ÁGUA}_j - ETR_j$$

Na segunda etapa, realiza-se a repartição da quantidade de água disponível para os escoamentos (ÁGUA) em escoamento superficial (reservatório 3 da Figura A.1) e escoamento de base (reservatório 4 da Figura A.1). No reservatório 2 apresentado na figura A.1, separa-se a parcela ÁGUA em lâminas para o escoamento superficial (QR) e escoamento infiltrado (QI), através da função de infiltração (FN), que corresponde ao valor máximo da infiltração para um passo de tempo, expressa em mm, assim tem-se:

$$QI = \text{Min}(\text{ÁGUA}, FN)$$

$$QR = \text{Max}(\text{ÁGUA} - QI, 0)$$

Em seguida, são geradas componentes retardadas para o escoamento superficial e o escoamento subterrâneo, através dos dois últimos reservatórios fictícios (Reservatórios 3 e 4). O termo relativo ao escoamento superficial é obtido pela divisão, da soma dos termos QR e QSUR, em dois novos termos QRR1 e QRR2, cuja soma resulta no escoamento superficial (QRR), desta forma tem-se:

$$QRR = QRR1 + QRR2$$

Sendo que o QRR1 representa a componente instantânea, e QRR2 representa o escoamento subsuperficial retardado em função do nível RR, no reservatório de escoamento superficial (Reservatório 3 da Figura A.1), assim tem-se:

$$RR_{(j+1)/2} = RR_j + QR_j + QSUR_j$$

$$QRR2_j = CQR \cdot RR_{(j+1)/2}$$

$$QRR1_j = \text{Max}(RR_{(j+1)/2} - QRR2_j - Q_{\text{max}}, 0)$$

$$RR_{j+1} = RR_{(j+1)/2} - QRR2_j - QRR1_j$$

Onde:

- RR_j , $RR_{(j+1)/2}$, RR_{j+1} – Representam os níveis de água no reservatório de escoamento superficial no passo de tempo inicial, em um tempo intermediário ao processo de escoamento, e no passo de tempo seguinte, respectivamente;
- CQR – Representa o coeficiente de esvaziamento do reservatório de escoamento superficial;

O processo, anteriormente descrito, também é utilizado para o escoamento de base (QI). O termo QI é repartido em dois termos, QII1 e QII2 (Reservatório 4 da Figura A.1), assim tem-se:

$$QII = QII1 + QII2$$

$$RFreat_{(j+1)/2} = RFreat_j + QI_j$$

$$QII2_j = CQI \cdot RFreat_{(j+1)/2}$$

$$Q_{IIj} = \text{Max}(\text{RFreat}_{(j+1)/2} - Q_{II2j} - Q_{\text{Imax}})$$

$$\text{RFreat}_{j+1} = \text{RFreat}_{(j+1)/2} - Q_{II1j} - Q_{II2j}$$

Onde:

- RFreat_j , $\text{RFreat}_{(j+1)/2}$, RFreat_{j+1} – Representam os níveis de água no reservatório subterrâneo no tempo inicial, em um tempo intermediário e no passo de tempo seguinte, respectivamente;
- CQI – Representa o coeficiente de esvaziamento do reservatório de alimentação do lençol;

E desta maneira, chega-se ao valor da lâmina escoada (Q), para uma determinada função de produção, dentro de uma zona de precipitação (ou produção de água), a qual é dada pela seguinte expressão:

$$Q = QRR + QII$$

II. Função de transferência de água:

Para a transferência dos volumes escoados para as quadriculas rio, utiliza-se o método das Isócronas. A definição das zonas isócronas é feita em função do tempo de concentração (T_c) da bacia hidrográfica, expresso em dias e fração de dia. O número da zona isócronas (NZC) é igual ao tempo de concentração arredondado para o inteiro superior. Por exemplo, se o tempo de concentração for estimado em 3,2 dias, então o número de zonas isócronas será igual a quatro (Figura A.7).

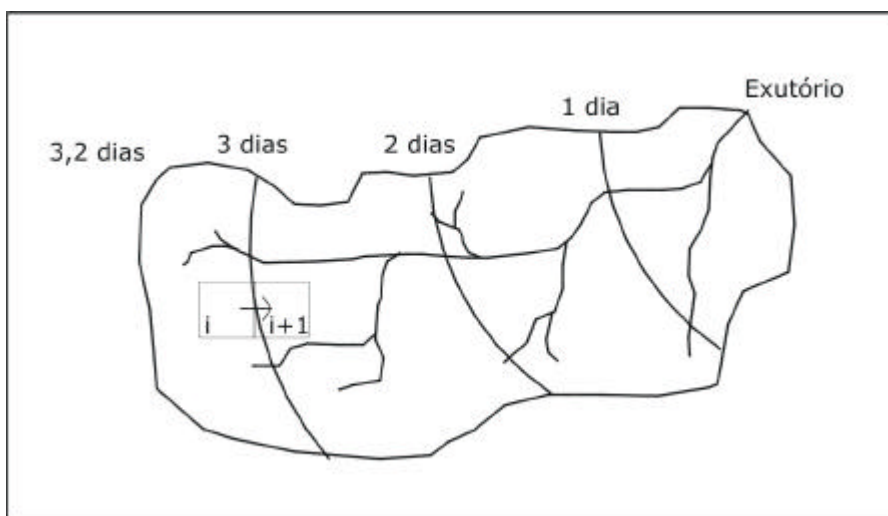


Figura A.7 – Zonas isócronas.

O método da definição das zonas isócronas é iniciado pelo cálculo do tempo de transferência (TRF) entre uma quadrícula i , de montante, para uma quadrícula $i + 1$, imediatamente a jusante (Figura A.7). Este tempo é inversamente proporcional à raiz quadrada da declividade; assim:

$$TRF_{i,i+1} = k \cdot d_i \cdot \sqrt{(Z_i - Z_{i+1}) / d_i}$$

Sendo que:

- d_i – representa a distância entre os centros geométricos das quadriculas adjacentes i e $i + 1$;
- Z_i e Z_{i+1} – representam, respectivamente, as altitudes das quadriculas adjacentes i e $i + 1$;
- k – equiivale ao inverso da velocidade média de translado.

Tomando-se o tempo de concentração da bacia, definido como o tempo que a água precipitada leva para sair do ponto mais distante do exutório e atingi-lo, pode-se defini-lo pela seguinte expressão:

$$Tc = \text{Max} \left[\sum_{i,i+1=1}^n TRF_{i,i+1} \right]$$

$$Tc = k \cdot \text{Max} \left[\sum_{i,i+1=1}^n d_i / \sqrt{\frac{Z_i - Z_{i+1}}{d_i}} \right] \quad (\text{Equação A.7})$$

Sendo:

- n – quantidade de quadriculas percorrida pela água, desde uma quadrícula i até o exutório;

Assim, o coeficiente de proporcionalidade ou o inverso da velocidade de translado na célula (k) é determinado pela equação A.7, o qual servirá para realizar a associação, em cada quadrícula, do número da isócrona a qual pertence, através da seguinte expressão:

$$Nzi = \text{INT} \left[\frac{k \cdot \sum_{i,i+1}^n (d_i / \sqrt{\frac{Z_i - Z_{i+1}}{d_i}})}{Tc} \cdot NZC \right]$$

Em que:

INT – É uma função que determina a parte inteira da expressão anterior.

Por outro lado, o volume disponível (Q_i^j), em cada quadrícula rio, i , a cada passo de tempo, j , é determinado pela seguinte expressão:

$$Q_i^j = \sum_{k=1}^n QD_k^{j-k+1}$$

Sendo, QD_k^{j-k+1} o volume escoado calculado, no passo de tempo $(j - k + 1)$, sobre a zona isócrona de número k . Os volumes escoados (QD_k^{j-k+1}) são determinados a partir do produto das lâminas de água escoada (Q) pela área da função de produção associada, contida na zona isócrona k , no passo de tempo $(j - k + 1)$.

III. Função balanço hídrico dos elementos hidráulicos:

O AÇUMOD tem incorporado o cálculo do balanço hídrico dos elementos hidráulicos existentes na rede de drenagem (açudes, captações e/ou transferência d'água entre bacias) na simulação do ciclo hidrológico. Isto se faz necessário uma vez que, a existência destes elementos na rede de drenagem modifica todo o comportamento hidráulico e hidrológico da bacia hidrográfica. Assim, realiza-se a cada dia, de montante para jusante, o balanço hídrico de cada um destes elementos implantado na bacia. No caso dos açudes, são considerados os volumes precipitados sobre sua superfície, as contribuições sobre a área da bacia hidráulica descoberta, as perdas por evaporação, os volumes de retirada (abastecimento, irrigação, etc.), os volumes restituídos na rede hidrográfica (vazões ecológicas ou de operação do reservatório), os volumes vertidos e, a principal contribuição, que se refere ao volume de água escoado pela bacia hidrográfica do reservatório, respeitando-se sempre, o tempo de percurso em função das zonas isócronas.