Apêndice 3

Método do Balanço Hídrico

Ioana Nicoleta Firta e Armando Borges de Castilhos Jr.

Histórico do Método do Balanço Hídrico

O método do balanço hídrico, um dos modelos mais utilizados atualmente em aterros sanitários para determinação dos volumes de lixiviados gerados, foi proposto por Fenn em 1975 e depois desenvolvido por Kmet em 1982 (Bendz *et al.*, 1997). Esse método foi uma adaptação do "balanço hídrico" publicado pelo C. W. Thorntwaite em 1955, estudo conhecido sob a denominação de "Teoria de Thornthwaite", aplicado no campo da conservação de solo e da água. Para o entendimento do balanço hídrico aplicado em aterros sanitários é necessário bom conhecimento dos conceitos básicos e da terminologia do método.

O balanço hídrico, da forma como foi concebido, para o estudo do solo e da água, é baseado na relação existente entre a precipitação, a evapotranspiração, o escoamento superficial e o armazenamento da água no solo. A precipitação representa a recarga de água do sistema, enquanto a evapotranspiração representa a combinação entre a evaporação das plantas e a da superfície do solo, estando incluída a transpiração das plantas. Esse processo de evapotranspiração é praticamente o transporte da água de volta para a atmosfera, sendo o inverso do processo da precipitação. O escoamento superficial representa o fluxo superficial da água diretamente na área de interesse. A capacidade de armazenamento representa a quantidade de água que pode ficar retida no solo e nos resíduos sólidos nos casos dos aterros sanitários (Fenn *et al.*, 1975).

Muitos anos antes da teoria de Thornthwaite já se tinha noção sobre o ciclo hidrológico e sobre o balanço hídrico. Estudos mostram que, cerca de 600 anos a.C., o filosofo grego Tales de Mileto já citava os elementos físicos da natureza, terra, água, ar e fogo, e as correlações entre essas fases, consideradas essenciais para vida (Oraggio, 2003). Milênios antes de gregos, os chineses já haviam descoberto os cinco elementos considerados as forças da natureza, água, fogo, terra, madeira e o metal, e as relações entre os elementos que fundamentaram a teoria da filosofia e a medicina chinesa. Um esquema completo do ciclo hidrológico, com todos parâmetros, data de 1500 e foi realizado por Leonardo da Vinci.

Aplicabilidade e Limitações do Método

Método do balanço hídrico é um método complexo que se aplica nos casos em que há grande disponibilidade de dados de precipitação e evapotranspiração, medidos no local do aterro ou disponibilizados pela mais próxima estação metereológica. Para assegurar a confiabilidade dos dados, estes devem ser validados e comparados com dados provenientes das outras estações situadas na proximidade do local estudado. Os parâmetros metereológicos utilizados devem ser as médias aritméticas mensais.

Algumas condições básicas para utilização do método são apresentadas a seguir (Neto *et al.*, 1999):

- Cobertura do solo de 60 cm de espessura.
- Infiltração no aterro proveniente somente da precipitação incidente.
- Características hidráulicas do lixo e do material de cobertura uniforme.
- Movimento de água no aterro somente no sentido vertical.

O presente método é centrado em torno da quantidade de água livre existente no solo. Até que a capacidade de campo do solo seja alcançada, a umidade do solo será vista como um balanço entre a água que entra como resultado das precipitações e a que sai sob forma de evapotranspiração. Como o próprio Fenn afirmava, o balanço hídrico é como uma conta bancária na qual as precipitações sempre são adicionadas e as evapotranspirações sempre são sacadas (Fenn *et al.*, 1975). Os três fatores críticos que devem ser considerados no balanço hídrico são os conceitos do armazenamento de água no solo, evapotranspiração e escoamento superficial. Apesar de o método do balanço hídrico ser muito utilizado, a precisão e a sensibilidade desse método são muito pouco estudadas e dependem das condições locais de cada análise de aterro em escala experimental ou campo.

Balanço Hídrico – Método de Cálculo no Programa do Software SADES

Para a determinação do volume de lixiviado, foi desenvolvido um algoritmo de cálculo do método de balanço hídrico, incluído no software do programa SADES – "Desenvolvimento de um Sistema de Apoio à Decisão para Seleção de Áreas Destinadas à Implantação de Aterros Sanitários e Dimensionamento de Aterros Sanitários". O software possibilita o cálculo do volume de lixiviado por dois métodos:

- Método suíço
- Método do balanço hídrico

O cálculo do método é conduzido em uma planilha que centraliza todos os parâmetros envolvidos na equação geral do balanço hídrico. A planilha será atualizada somente no momento em que o usuário informar a área do aterro sanitário e a declividade. A tela para ativação da planilha é apresentada na Figura A3.1.

Com as informações sobre o tipo de solo utilizado, a área do aterro estudado e a declividade, a planilha será ativada, como apresentado na Figura A3.2. Os dados de precipitação e evapotranspiração devem ser informados pelo usuário.

O cálculo será feito mês a mês, durante um ano, utilizando as escolhas do usuário sobre o tipo de solo, declividade, área do aterro e estação seca ou úmida do ano, condições nas quais o cálculo será conduzido automaticamente.

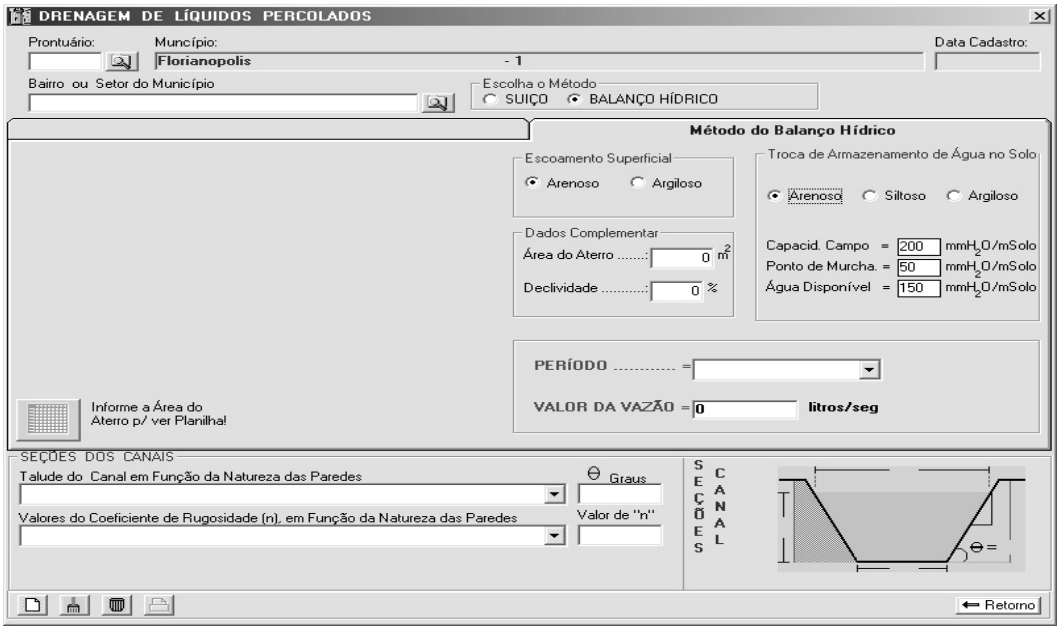


Figura A3.1 Tela inicial do método do balanço hídrico.

Dando prosseguimento ao cálculo de dimensionamento da rede de drenagem, o método permite utilizar como volume de lixiviado aquele escolhido pelo usuário: o do mês que apresenta a mais desfavorável situação do ano. Apesar de o método em si ser bastante complicado, o programa oferece a possibilidade de calcular o volume de lixiviado de maneira rápida e bastante confiável.

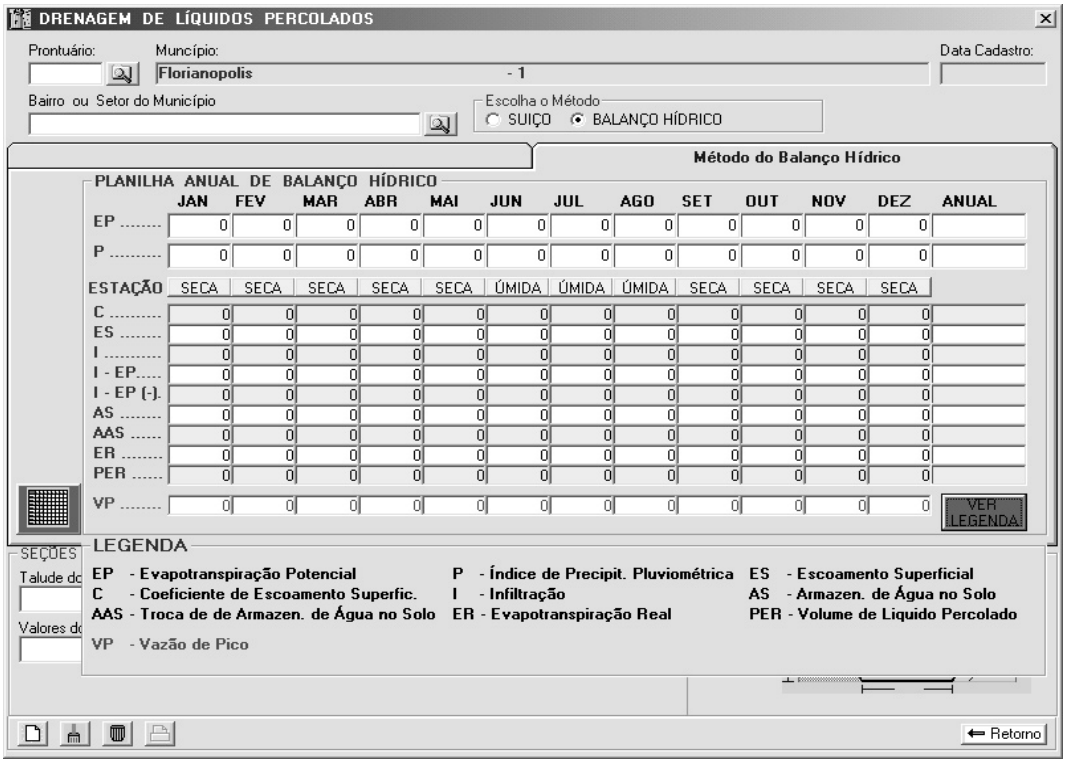
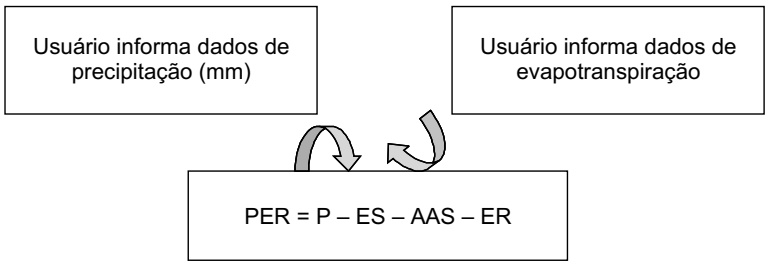


Figura A3.2 Planilha anual do método do balanço hídrico.

Fluxogramas do Método do Balanço Hídrico

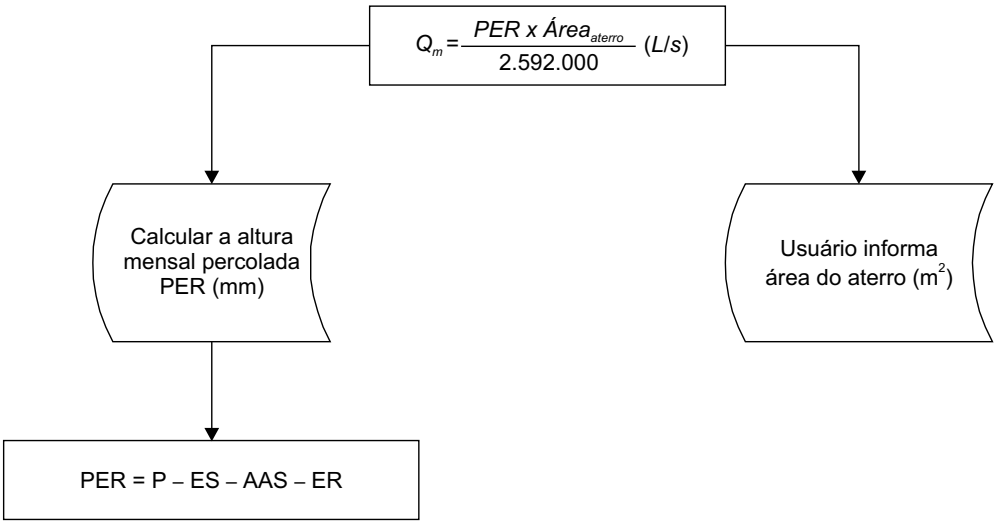
Equação básica do método do balanço hídrico:



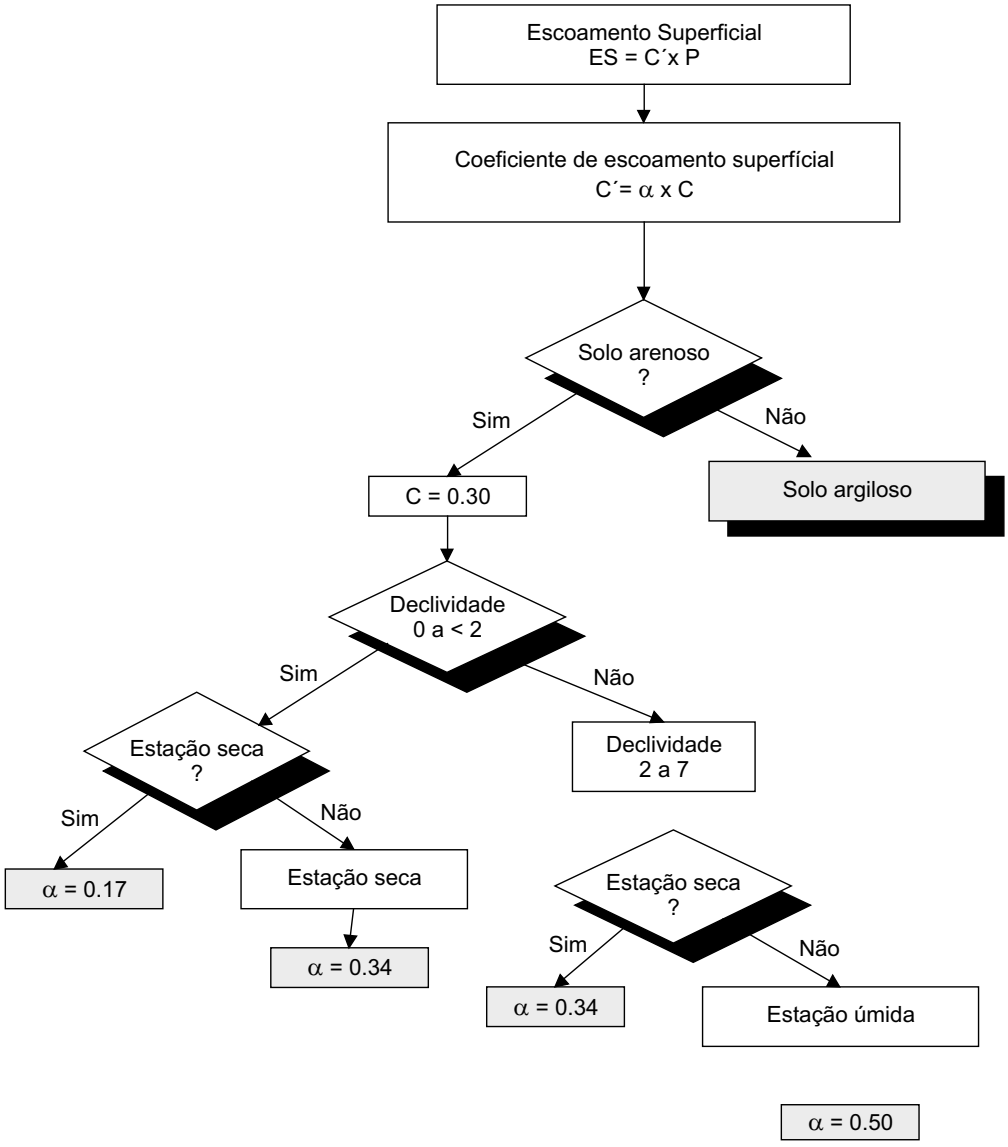
em que:

PER = volume de lixiviado, valores médios mensais;
P = índice de precipitação pluviométrica, valores médios mensais;
ES = escoamento superficial
C´ = coeficiente de escoamento superficial;
I = infiltração;
AS = armazenamento de água no solo;
AS_c = armazenamento de água na camada de cobertura, representando a quantidade máxima de água armazenada no solo;
AAS = troca de armazenamento de água no solo
ER = evapotranspiração real.

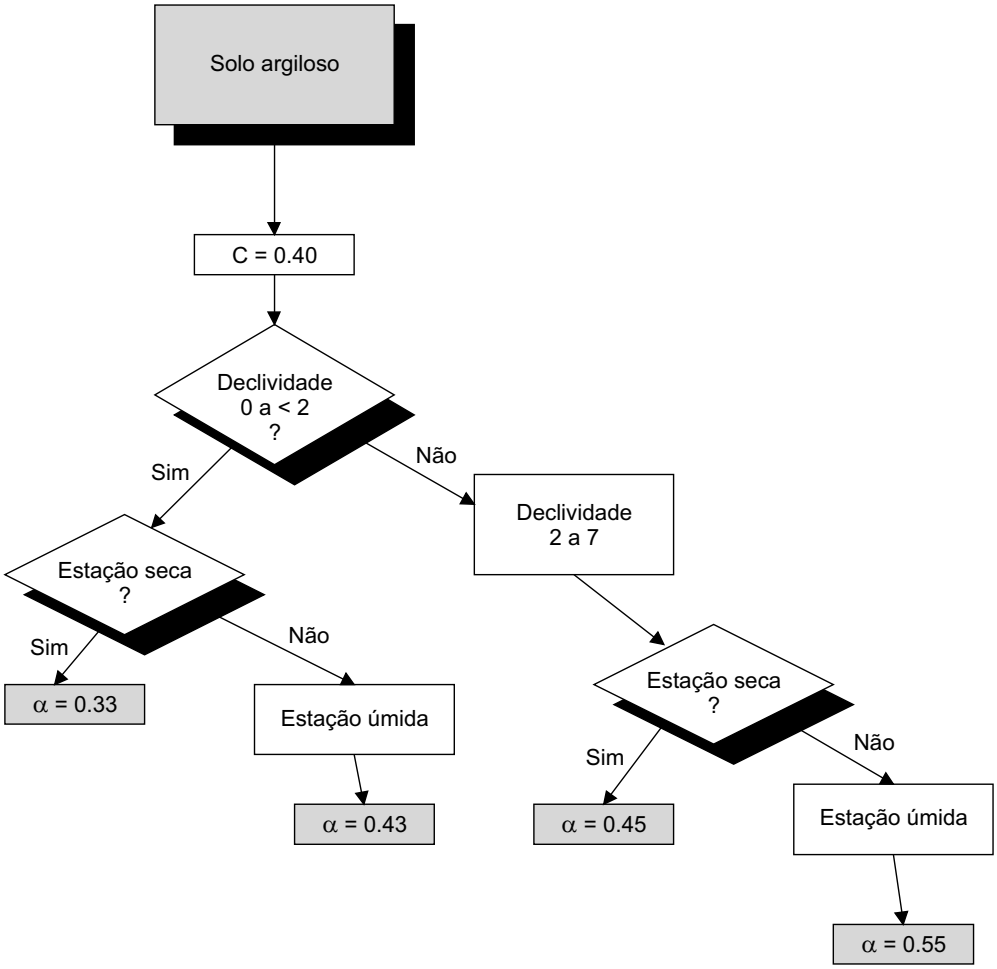
Fluxograma para cálculo da vazão mensal de lixiviado



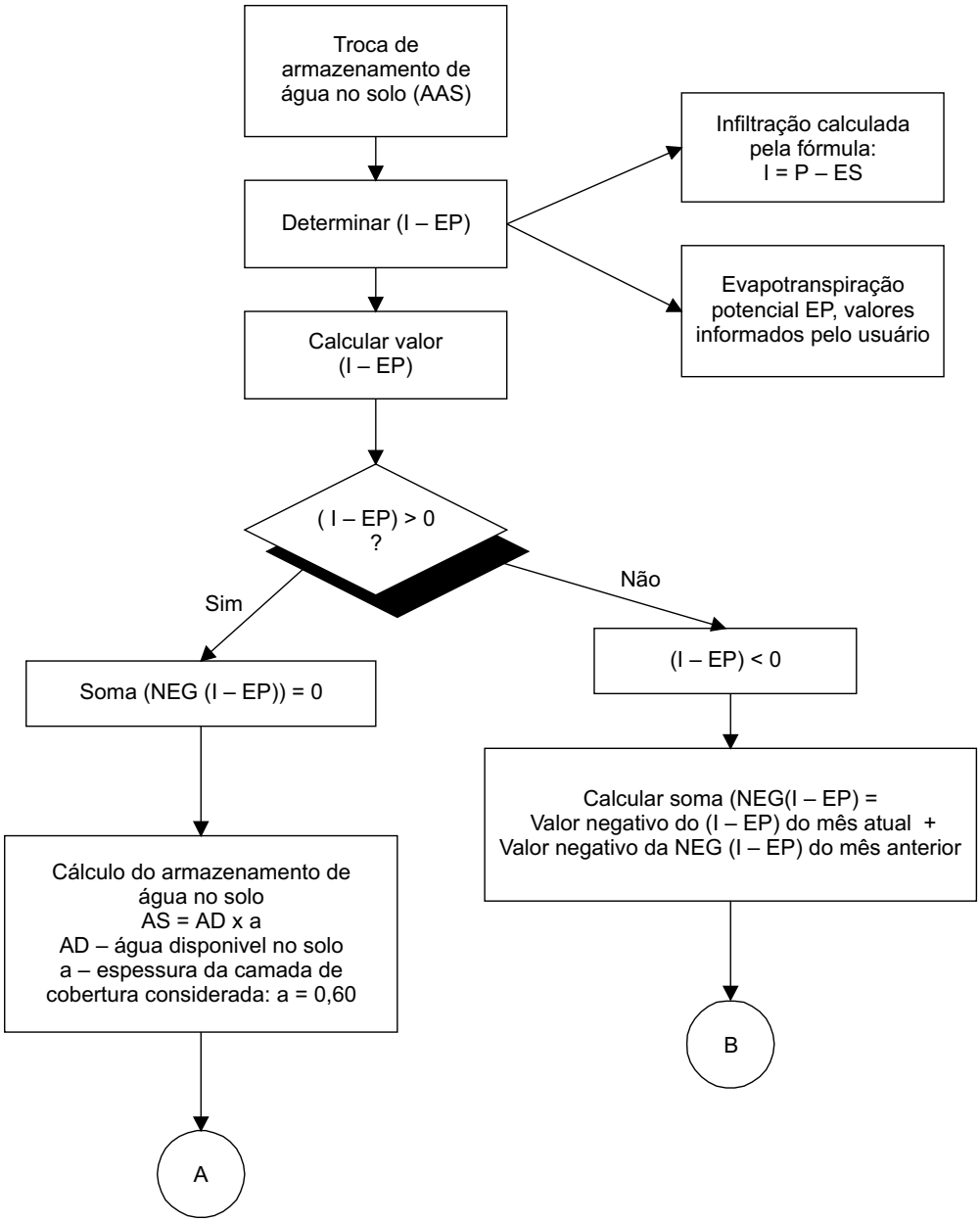
Fluxograma para cálculo de escoamento superficial (ES)



Fluxograma para cálculo de escoamento superficial (ES): solo argiloso (*continuação*)

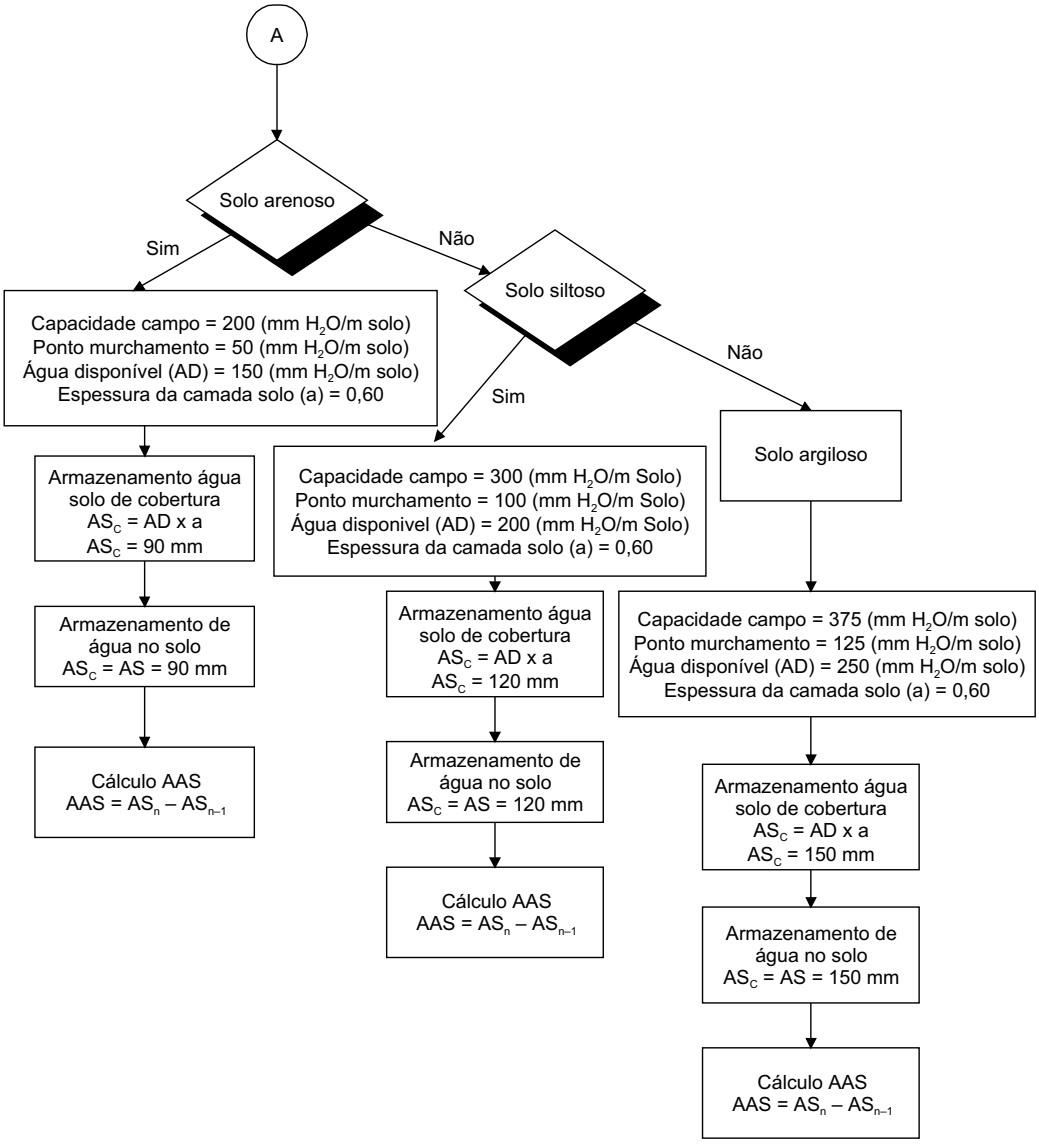


Fluxograma para cálculo da troca de armazenamento de água no solo (AAS)



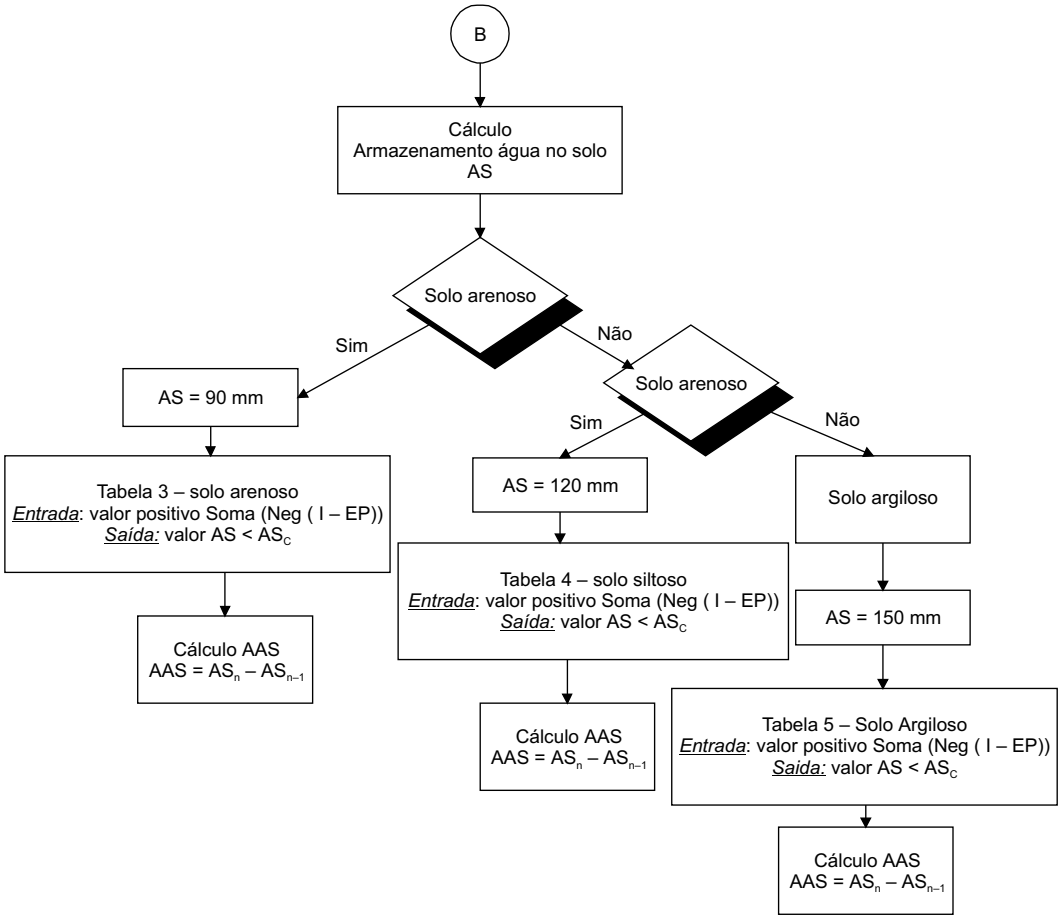
Fluxograma para cálculo da troca de armazenamento de água no solo (AAS) (*continuação*)

PARTE A

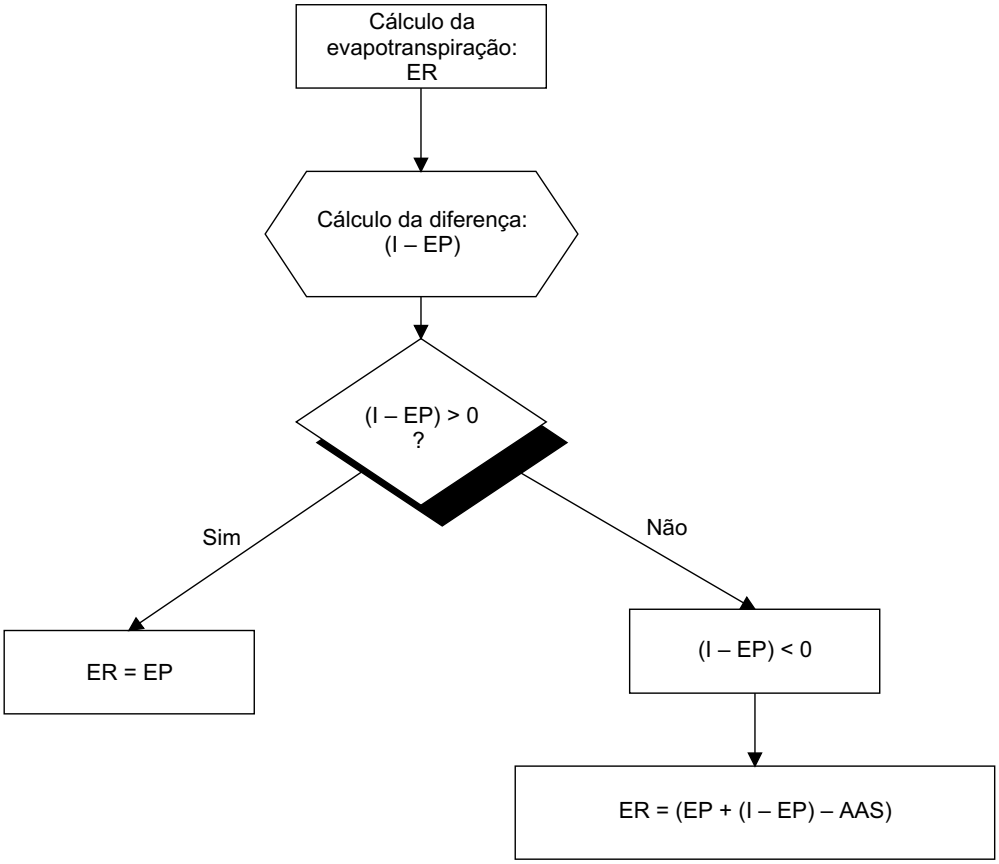


Fluxograma para cálculo da troca de armazenamento de água no solo (AAS) (*continuação*)

PARTE B



Fluxograma para cálculo da evapotranspiração real (ER)



Tabelas Utilizadas no cálculo do Método do Balanço Hídrico

A seguir serão apresentadas as tabelas com os coeficientes e todos os índices utilizados na elaboração dos fluxogramas apresentados anteriormente.

Tabela A3.1 Valores do coeficiente de escoamento superficial (C´).

Tipo de solo	Declividade (%)	Coeficiente (α)	
		Estação seca	Estação úmida
Arenoso C = 0.30	0 a 2	0.17	0.34
	2 a 7	0.34	0.50
Argiloso C = 40	0 a 2	0.33	0.43
	2 a 7	0.45	0.55

Fonte: Rocca *et al.*, 1993.

Tabela A3.2 Umidade do solo (mm H_2O/m de solo).

Tipo de solo	Capacidade campo	Ponto murchamento	Água disponível
Arenoso	200	50	150
Siltoso	300	100	200
Argiloso	375	125	250

Fonte: Rocca *et al.*, 1993.

Tabela A3.3 Armazenamento de água no solo (AS) em função da evapotranspiração potencial acumulada NEG (I – EP).

Solo arenoso (AS_c = 90 mm)										
NEG (I – EP)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	100	99	98	97	96	95	94	93	92	91
10	90	89	88	88	87	86	85	84	83	82
20	81	81	80	79	78	77	77	76	75	74
30	74	73	72	71	70	70	69	68	68	67
40	66	66	65	64	64	63	62	62	61	60
50	60	59	59	58	58	57	56	58	55	54
60	54	53	53	52	52	51	51	50	50	49
70	49	48	48	47	47	46	46	45	45	44

Tabela A3.3 Armazenamento de água no solo (AS) em função da evapotranspiração potencial acumulada NEG (I – EP) (*continuação*).

Solo arenoso (AS_c = 90 mm)										
NEG (I–EP)	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
80	44	44	43	43	42	42	41	41	40	40
90	40	39	39	38	38	38	37	37	36	36
100	36	35	35	35	34	34	34	33	33	33
110	32	32	32	31	31	31	30	30	30	30
120	29	29	29	28	28	28	27	27	27	27
130	26	26	26	26	25	25	25	24	24	24
140	24	24	23	23	23	23	22	22	22	22
150	22	21	21	21	21	20	20	20	20	20
160	19	19	19	19	19	18	18	18	18	18
170	18	17	17	17	17	17	16	16	16	16
180	16	16	15	15	15	15	15	15	14	14
190	14	14	14	14	14	14	13	13	13	13
200	13	13	12	12	12	12	12	12	12	12
210	12	11	11	11	11	11	11	11	11	11
220	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
230	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
240	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
250	8	8	8	7	7	7	7	7	7	7
260	7	7	7	7	7	7	6	6	6	6
270	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
280	6	6	6	6	6	5	5	5	5	5
290	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
300	5	5	4	4	4	4	4	4	4	4
310	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
320	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
330	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
340	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
350	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
360	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
370	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

Tabela A3.3 Armazenamento de água no solo (AS) em função da evapotranspiração potencial acumulada NEG (I – EP) (*continuação*).

Solo arenoso (AS_c = 90 mm)										
NEG (I–EP)	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
380	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
390	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
400	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
410	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1
420	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
430	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
440	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
450	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
460	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
470	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
480	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
490	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
500	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Fonte: Fenn *et al.*, 1975.

Tabela A3.4 Armazenamento de água no solo (AS) em função da evapotranspiração potencial acumulada NEG (I – EP).

Solo siltoso (AS_c = 120 mm)										
NEG (I–EP)	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
0	125	124	123	122	121	120	119	119	117	116
10	115	114	113	112	111	110	109	108	107	106
20	106	105	104	103	102	102	101	100	99	99
30	98	97	95	95	94	94	93	92	91	90
40	90	89	88	87	86	86	85	84	84	83
50	83	82	82	81	80	80	79	79	78	77
60	76	76	75	74	74	73	73	72	72	71
70	70	70	69	69	68	68	67	67	66	65
80	65	64	64	63	63	62	62	61	61	60
90	60	59	59	58	58	57	57	56	56	55
100	55	55	54	54	53	53	53	52	52	51

Tabela A3.4 Armazenamento de água no solo (AS) em função da evapotranspiração potencial acumulada NEG (I – EP) (*continuação*).

Solo siltoso (AS_c = 120 mm)										
NEG (I–EP)	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
110	51	51	50	50	49	49	49	48	48	47
120	47	47	46	46	45	45	45	44	44	43
130	43	43	42	42	41	41	41	41	40	40
140	40	40	39	39	39	38	38	38	38	37
150	37	37	36	36	36	35	35	35	35	34
160	34	34	33	33	33	32	32	32	32	31
170	31	31	31	30	30	30	30	30	30	29
180	29	29	29	29	28	28	28	27	27	27
190	26	26	26	26	26	25	25	25	25	25
200	24	24	24	24	24	23	23	23	23	23
210	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
220	21	21	21	21	20	20	20	20	20	20
230	19	19	19	19	19	18	18	18	18	18
240	18	18	17	17	17	17	17	17	17	17
250	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
260	15	15	15	15	15	14	14	14	14	14
270	14	14	14	14	14	13	13	13	13	13
280	13	13	13	13	13	12	12	12	12	12
290	12	12	12	12	12	11	11	11	11	11
300	11	11	11	11	11	10	10	10	10	10
310	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
320	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
330	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
340	8	8	8	8	8	7	7	7	7	7
350	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
360	7	7	7	7	7	6	6	6	6	6
370	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
380	6	6	6	6	6	5	5	5	5	5
390	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
400	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

Tabela A3.4 Armazenamento de água no solo (AS) em função da evapotranspiração potencial acumulada NEG (I – EP) (*continuação*).

Solo siltoso (AS_c = 120 mm)										
NEG (I–EP)	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
410	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
420	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
430	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
440	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
450	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
460	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
470	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
480	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
490	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
500	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
510	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
520	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
530	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
540	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1
550	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
560	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
570	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
580	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
590	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
600	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
610	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
620	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
630	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
640	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Fonte: Fenn *et al.*, 1975.

Tabela A3.5 Armazenamento de água no solo (AS) em função da evapotranspiração potencial acumulada NEG (I – EP).

Solo argiloso (AS_c = 150 mm)										
NEG (I–EP)	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
0	150	149	148	147	146	145	144	143	142	141
10	140	139	138	137	136	135	134	133	132	131
20	131	130	129	128	127	127	126	125	124	123
30	122	122	121	120	119	118	117	115	115	114
40	114	113	113	112	111	111	110	109	108	107
50	107	106	106	105	104	103	103	102	101	100
60	100	99	98	97	97	97	96	96	94	93
70	93	92	92	91	90	90	89	89	88	87
80	87	86	86	85	84	84	84	83	83	82
90	82	81	81	80	79	79	78	77	77	76
100	76	76	75	75	74	74	73	72	72	71
110	71	71	70	70	69	69	68	68	67	67
120	66	65	65	65	65	64	64	63	63	62
130	62	62	61	61	60	60	60	59	59	58
140	58	58	57	57	56	56	55	55	54	54
150	54	53	53	53	52	52	52	52	51	51
160	51	51	50	50	50	49	49	48	48	47
170	47	47	47	46	46	46	45	45	45	44
180	44	44	44	43	43	43	42	42	42	41
190	41	41	41	40	40	40	40	39	39	39
200	39	38	38	38	37	37	37	37	36	36
210	36	36	35	35	35	35	35	34	34	34
220	34	34	33	33	33	33	33	32	32	32
230	32	31	31	31	31	31	30	30	30	30
240	30	29	29	29	29	29	28	28	28	28
250	28	27	27	27	27	27	26	26	26	26
260	26	26	25	25	25	25	25	24	24	24
270	24	24	24	23	23	23	23	23	23	23
280	22	22	22	22	22	22	22	22	21	21
290	21	21	21	20	20	20	20	20	20	20
300	20	19	19	19	19	19	19	19	18	18

Tabela A3.5 Armazenamento de água no solo (AS) em função da evapotranspiração potencial acumulada NEG (I – EP) (*continuação*).

Solo argiloso (AS_c = 150 mm)										
NEG (I–EP)	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
310	18	18	18	18	18	18	18	17	17	17
320	17	17	17	17	17	17	17	16	16	16
330	16	16	16	16	16	16	16	15	15	15
340	15	15	15	15	15	15	14	14	14	14
350	14	14	14	14	14	14	14	13	13	13
360	13	13	13	13	13	13	13	12	12	12
370	12	12	12	12	12	12	12	12	11	11
380	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
390	11	11	11	11	10	10	10	10	10	10
400	10	10	10	10	10	10	10	10	9	9
410	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
420	9	9	9	9	8	8	8	8	8	8
430	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
440	8	8	8	8	7	7	7	7	7	7
450	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
460	7	7	7	7	6	6	6	6	6	6
470	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
480	6	6	6	6	6	6	6	6	5	5
490	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
500	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
510	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4
520	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
530	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
540	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
550	4	4	4	4	4	4	4	3	3	3
560	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
570	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
580	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
590	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
600	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2

Tabela A3.5 Armazenamento de água no solo (AS) em função da evapotranspiração potencial acumulada NEG (I – EP) (*continuação*).

Solo argiloso (AS_c = 150 mm)										
NEG (I–EP)	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
610	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
620	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
630	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
640	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
650	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
660	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
670	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
680	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1
690	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
700	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
710	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
720	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
730	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
740	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
750	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
760	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
770	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
780	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
790	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
800	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
810	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
820	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
830	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
840	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Fonte: Fenn *et al.*, 1975.