

Capítulo 40
Balanço Hídrico em pequenas barragens

SUMÁRIO

Ordem	Assunto	Página
	Capítulo 40 - Balanço Hídrico em pequenas barragens	
40.1	Introdução	
40.2	Conceito de sistema e limite	
40.3	Lei da conservação da massa	
40.4	Precipitação P	
40.5	Runoff Ro	
40.6	Vazão Base Qb	
40.7	Infiltração "I"	
40.8	Evaporação de superfície líquida da represa	
40.9	Overflow "Ov"	
40.10	Outros "Ou"	
40.11	Balanço Hídrico da bacia da área da pequena barragem	
40.12	Volume do prisma trapezoidal	
40.13	Bibliografia	

13 páginas

Capítulo 40 - Balanço Hídrico em pequenas barragens

40.1 Introdução

É muito importante o balanço hídrico de uma barragem, pois pode haver muita evaporação e infiltração na região havendo necessidade de se reexaminar o volume do reservatório.

Não adianta somente calcular o volume necessário para um empreendimento, pois o balanço hídrico é vital em caso de retirada de água para irrigação ou para tratamento de água.

O objetivo é mostrar metodologia simplificada de aplicação do balanço hídrico de uma lagoa de detenção alagada ou uma *wetland* localizada em bacias hidrográficas pequenas que variam de 10ha a 250ha, para ver o comportamento da mesma durante um determinado tempo.

Em casos especiais, deverá ser feito estudo aprofundado e detalhado do balanço hídrico, com análises mais rigorosas, conforme recomendado pelo Estado da Geórgia, 2001.

Salientamos que nosso estudo não se destina a outorgas onde se examinam as disponibilidades hídricas, a demanda, a vazão de retorno e a vazão ecológica ambiental.

40.2 Conceito de sistema e limite

Primeiramente vamos definir o conceito de sistema e limite.

Sistema: é um conjunto de elementos ligados por um conjunto de relações.

Limite: é a definição da fronteira do sistema.

Elementos: são os componentes do sistema que podem ser separados por categorias ou grupos.

Um sistema pode ser aberto ou fechado. O sistema é considerado **aberto** quando permite a entrada e saída de *energia e massa* e é considerado **fechado** quando somente entra ou sai *energia*, mas não massa.

A equação básica do balanço hídrico está baseada na *equação da continuidade da massa*. Em um determinado *sistema* a água que entra (**I**) menos a água que sai (**O**) é igual a variação do volume num determinado tempo (dS/dt). Um sistema pode ser composto de vários sub-sistemas que na verdade são novos sistemas em separado, como, infiltração, precipitação, volume de entrada, etc.

O sistema escolhido denomina-se de **volume de controle** no qual o fluido é tratado como massa concentrada num ponto do espaço.

40.3 Lei da conservação da massa

Será aplicada a lei da conservação da massa ao volume de controle da Figura (40.1), conforme Estado da Geórgia, 2001.

Diferença de armazenamento = Entradas – Saídas

$$\Delta V = \Sigma I - \Sigma O \quad \text{(Equação 40.1)}$$

Sendo:

ΔV = variação de volume no tempo, que consideraremos de um mês (m³)

ΣI = somatório dos volumes de água que entram no sistema isolado (m³)

ΣO = somatória dos volumes de água que saem do sistema isolado (m³)

$$\Delta V = \Sigma I - \Sigma O$$

$$\Delta V = P + Ro + Qb - I - E - ETo - Ov - Ou \quad \text{(Equação 40.2)}$$

Sendo:

ΔV = variação do volume no tempo de um mês (m³/mês)

P = volume precipitado na superfície da água (m³/mês)

Ro = volume referente ao escoamento superficial ou *runoff* da área que cai na represa (m³/mês)

Qb = volume referente a vazão base que chega à represa (m³/mês)

I = infiltração da água no solo na represa ($m^3/mês$)

E = evaporação na superfície líquida da represa ($m^3/mês$)

ET_o = evapotranspiração de referência na superfície líquida para plantas emergentes da represa ($m^3/mês$)

O_v = *overflow*, isto é, volume que sairá da represa ($m^3/mês$)

O_u = volume retirada para outros fins, tal como irrigação ($m^3/mês$)

Vamos explicar com mais detalhes cada parâmetro da Equação (40.2), sempre observando que usaremos o intervalo de um mês.

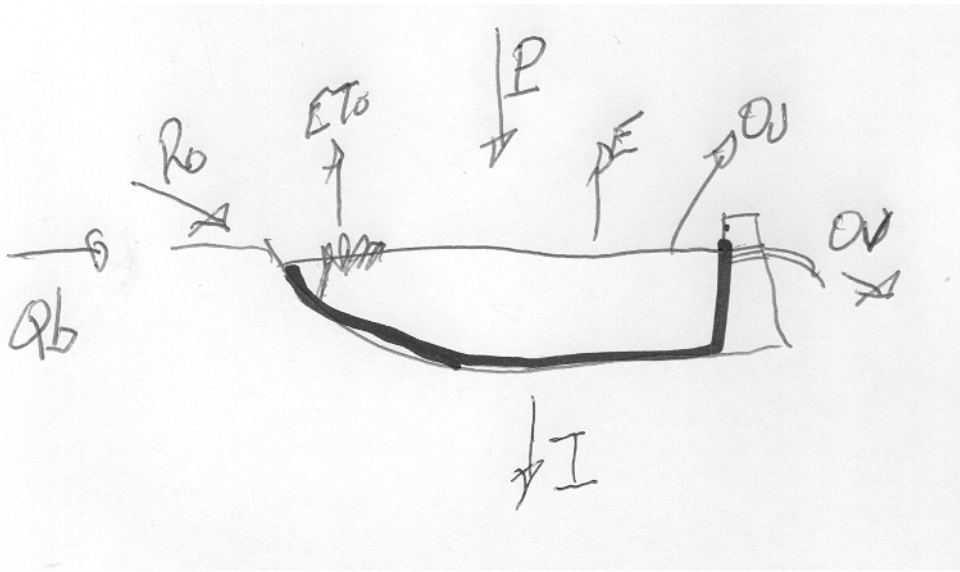


Figura 40.1- Esquema do balanço hídrico em um barramento

40.4 Precipitação P

Trata-se da precipitação média mensal em milímetros obtida por pluviômetros na região.

Tabela 40.1- Precipitação média mensal do município de Guarulhos

Meses	(mm)
Janeiro	254,1
Fevereiro	251,7
Março	200,9
Abril	58,3
Maio	70,3
Junho	39,0
Julho	30,8
Agosto	24,9
Setembro	75,1
Outubro	137,4
Novembro	130,5
Dezembro	214,7
	1487,8

40.5 Runoff R_o

A precipitação caindo no solo, uma parte se infiltra, outra esco, formando o escoamento superficial, ou seja, o *runoff*. Num curto intervalo de tempo podemos deixar de considerar a evapotranspiração.

Uma parte da precipitação fica aderida as folhas e a superfície impermeável e consideramos então que 10% da precipitação fica retida por aderência e devido a isto que consideramos somente 90% do *runoff*. Não consideramos o armazenamento em depressões e conforme o caso poderá ser levada em conta.

$$R_o = (P/1000) \times A \times R_v \times 0,90$$

Sendo:

R_o = escoamento superficial ou *runoff* mensal ($m^3/mês$)

P= precipitação do mês (mm)

A= área total da bacia (m^2)

R_v = coeficiente volumétrico (adimensional)

$R_v = 0,05 + 0,009 \cdot AI$

AI= área impermeável em porcentagem

0,90= coeficiente que leva em conta a aderência de cerca de 1mm de água de chuva, não sendo considerado as poças de água.

40.6 Vazão Base Q_b

A vazão base pode ser levada em conta ou não. Caso queiramos considerar a vazão base, poderíamos estimá-la usando a vazão $Q_{7,10}$ conforme método de Regionalização Hidrográfica de Pallos et al.

Para o caso da cidade de Guarulhos com $P= 1500mm/ano$ localizada na Região Metropolitana de São Paulo podemos considerar a vazão $Q_{7,10}$ de $0,032 L/s \times ha$.

Verificações empíricas parece nos mostrar que a área de contribuição para formar uma vazão base deve ser no mínimo de 10ha, sendo que isto já foi recomendado pelo Estado de Ontário, 2003.

Fórmula empírica para a recarga média anual

Na Índia Kumar e Seethpathi, 2002 fizeram uma fórmula empírica com 8% de precisão (para a região) que fornece a recarga das águas das chuvas que adaptadas às unidades SI fica:

$$R_r = 1,37 (P - 388)^{0,76}$$

Sendo:

R_r = recarga do aquífero subterrâneo devido somente a águas das chuvas (mm/ano)

P=precipitação média anual da estação (mm)

Exemplo 40.1

Estimar a recarga devida as chuvas para local com 1500mm.

$$R_r = 1,37 (P - 388)^{0,76}$$

$$R_r = 1,37 (1500 - 388)^{0,76} = 283mm$$

Em L/s x ha teremos:

$$283mm \times 10.000m^2 / (365 \text{ dias} \times 86.400s) = 0,0897 L/s \times ha$$

A favor da segurança podemos tomar 50% desta vazão e teremos:

$$Q_b = 0,50 \times 0,0897 L/sxha = 0,045 L/sxha$$

40.7 Infiltração “I”

Para infiltração da água no solo usamos Equação (40.3) de Darcy temos:

$$Q = A \times K \times G \quad (\text{Equação 40.3})$$

Sendo:

Q= infiltração (m³/dia)

A= área da seção transversal em que a água infiltra (m²)

G= gradiente hidráulico (m/m)

K= condutividade hidráulica (m/dia) e estimado conforme Tabela (40.2).

Na prática podemos adotar para áreas planas o gradiente hidráulico G= 1 e para áreas com declividade maiores que 4H: 1V gradiente hidráulico G= 0,5.

Tabela 40.2 - Condutividade hidráulica K em função do tipo de solo

Tipo de solo	K mm/h	K m/dia
Areia	210,06	4,96
Areia franca	61,21	1,45
Franco arenoso	25,91	0,61
Franco	13,21	0,31
Franco siltoso	6,86	0,16
Franco argilo arenoso	4,32	0,10
Franco argiloso	2,29	0,05
Franco argilo siltoso	1,52	0,04
Argila arenosa	1,27	0,03
Argila siltosa	1,02	0,02
Argila	0,51	0,01

Fonte: Febusson e Debo, 1990 in Georgia Stormwater Manual, 2001

40.8 Evaporação da superfície líquida da represa

Existe duas evaporações importante, a evapotranspiração do solo com as plantas e a evaporação somente da superfície líquida.

A evaporação da superfície líquida é geralmente maior que a evapotranspiração onde são consideradas as plantas.

Para o cálculo da evaporação da superfície líquida usamos o Método de Penman-Monteith original, onde se utilizou albedo de 0,08.

Tabela 40.3- Evaporação de superfície líquida pelo método de Penman-Monteith original para o município de Guarulhos

Meses	(mm/mês)
Jan	140
fev	126
mar	130
abr	107
maio	85
junho	73
julho	81
agosto	104
set	108
out	130
nov	139
dez	144
Total=	1367

40.9 Overflow “Ov”

Consideramos a represa como um sistema isolado aberto. Entra água e sai água. O volume de água líquida sai pelos extravasores e segue adiante. É o *overflow*.

40.10 Outros “Ou”

Poderá na representa eventualmente ou sistematicamente ser retirado água para irrigação ou outros fins previstos e que deverá ser levado em conta.



Figura 40.2 - Lagoa de retenção alagada pode ser considerado um sistema aberto para o balanço hídrico.

40.10 Balanço Hídrico da bacia da área da pequena barragem

Fazemos agora o balanço hídrico, isto é, consideremos o volume total que entra no sistema isolado, ou seja na represa, menos o volume que sai.

Volume que entra:

1. Runoff= R_o
 2. Precipitação= P
 3. Vazão base= Q_b
- Total= $R_o + P + Q_b$

Volume que sai:

1. Volume de água que evapora= E
 2. Volume de água que se infiltra no fundo da represa= I
 3. Volume retirado da represa para outros fins= O_u
 4. Volume de *overflow*= O_v
- Total= $E + I + O_u + O_v$

Dica: temos dois volumes, um permanente e outro temporário.

É importante que seja mantido o volume permanente e o ideal seria que o mesmo nunca ficasse a zero, isto é, a represa nunca secasse.

40.11 Volume do prisma trapezoidal

Conforme Geórgia, 2001 ou Akan e Paine, 2001 o volume prismático trapezoidal é dado pela Equação (40.4) e Figura (40.3).

$$V = L \cdot W \cdot D + (L+W) Z \cdot D^2 + 4/3 \cdot Z^2 \cdot D^3 \quad (\text{Equação 40.4})$$

Sendo:

V = volume do prisma trapezoidal (m^3)

L = comprimento da base (m)

W = largura da base (m)

D = profundidade do reservatório (m)

Z = razão horizontal/vertical. Normalmente 3H:1V

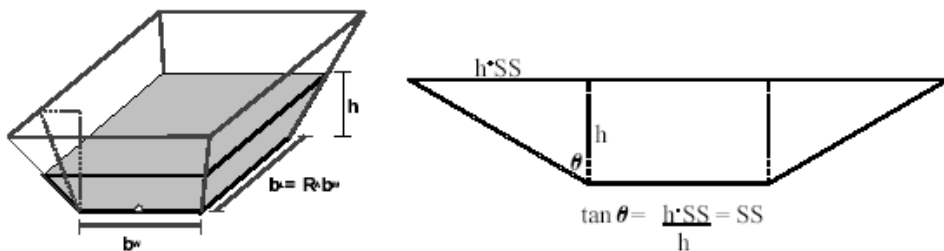


Figura 40.3 - Reservatório com seções transversais e longitudinais trapezoidal
Fonte: Washington, 2001

Exemplo 40.3

Vamos considerar uma bacia em área residencial que tem $A=10\text{ha}$ onde existe um reservatório de detenção alagada com área de superfície $AS=1007\text{m}^2$ de superfície. Supõe-se que a vazão de base seja igual a $Q_b=0,032$ litros/segundo x hectare.

A área impermeável é de $AI=75\%$ e existe um solo de silte argiloso margoso com condutividade hidráulica de 4mm/h ($0,10\text{m/dia}$).

Conhecemos a precipitação anual de 1.488mm e a evaporação anual de superfície líquida de 1367mm .

Queremos saber como se comporta o reservatório durante o ano, especialmente nos meses de pouca chuva e muita evaporação.

$$R_v = 0,05 + 0,009 \times AI = 0,05 + 0,009 \times 75 = 0,73$$

$$WQV = (P/1000) \times A \times R_v = (25/1000) \times 10\text{ha} \times 10000\text{m}^2 \times 0,73 = \mathbf{1813\text{m}^3}$$

Como o reservatório de detenção alagada tem um reservatório permanente e outro provisório cada um com 50% de WQV , temos:

$$\text{Volume do reservatório permanente} = WQV/2 = 1813/2 = \mathbf{906\text{m}^3}$$

$$\text{Volume do reservatório temporário} = WQV/2 = 1813/2 = 906\text{m}^3$$

A profundidade adotado para o volume $WQV = 1813\text{m}^3$ total é de $1,80\text{m}$, sendo $0,90\text{m}$ para o reservatório permanente e $0,90\text{m}$ para o reservatório temporário.

A área da superfície líquida $AS = \text{volume total} / 1,80\text{m} = 1813 / 1,80 = \mathbf{1007\text{m}^2} > 1000\text{m}^2$ que é a área mínima adotada de superfície.

Runoff (Ro)

Considerando a bacia de área de 1007m^2 como um sistema isolado, o volume de escoamento mensal, ou seja, o *runoff* será:

$$\mathbf{Ro = (P/1000) \times A \times R_v \times 0,90}$$

Sendo:

Ro = escoamento superficial ou *runoff* mensal ($\text{m}^3/\text{mês}$)

P = precipitação do mês (mm)

A = área total da bacia (m^2) = $10\text{ha} \times 10000\text{m}^2$

R_v = coeficiente volumétrico (adimensional)

$AI = 75\%$

$R_v = 0,05 + 0,009 \cdot AI = 0,05 + 0,009 \times 75 = 0,73$

$0,90$ = coeficiente que leva em conta a aderência de cerca de 1mm de água de chuva, não sendo considerado as poças de água.

Para o mês de janeiro teremos o *runoff* de:

$$Ro = (P/1000) \times A \times R_v \times 0,90$$

$$Ro = (254\text{mm}/1000) \times 10\text{ha} \times 10000\text{m}^2 \times 0,73 \times 0,90 = 16.582\text{m}^3$$

E assim se faz para os meses restantes até atingir dezembro.

Infiltração:

Para infiltração, admitimos que a condutividade hidráulica para solo franco argilo arenoso o valor $K = 0,10\text{m/dia} = 4,0\text{mm/h} = 100\text{litros/dia} \times \text{m}^2$.

Como se trata do fundo do reservatório supõe-se que 10% da área tem declividade maior que 1:4.

Dados do problema: $G = 1,0$ (plano) e $G = 0,50$ para a declividade maior que (4H:1V).

Usando a Equação (40.8) de Darcy temos:

$$Q = A \times K \times G \quad \text{(Equação 40.8)}$$

Sendo:

Q= infiltração (m³/dia)

A= área da seção transversal em que a água infiltra (m²)

G= gradiente hidráulico

K= 0,10m/dia (condutividade hidráulica)

Área do fundo do reservatório é suposta igual a área de superfície= 1007m²

90% 0,90 x 1007m²= 906m²

10% 0,10 x 1007m²= 101m²

G=1 e G=0,5 (dados do problema)

Q= A x K x G= 906m² x 0,10m/dia x 1,00 + 101m² x 0,10m/dia x 0,50= 95,65m³/dia

Para o mês de janeiro, que tem 31 dias, teremos:

31 dias x 95,65m³/dia= 2.965 m³/mês

Nota:

Não esquecer da definição de gradiente hidráulica que é a diferença de pressão no ponto 1 menos o ponto 2 dividido pela distancia entre os pontos. No caso de superfície plana o ponto 1 está na parte superior e o 2 na perpendicular e a distancia é a mesma, daí ser G=1.

Em regiões de declividade teremos diferenças e adotamos nos cálculos G=0,5. É como se fosse o seno do ângulo onde a hipotenusa fica sobre o terreno.

Tabela 40.5 - Balanço hídrico de bacia de detenção alagada em Guarulhos

Meses do ano	jan	fev	mar	abr	mai	jun
Número de dias no mês=	31	28	31	30	31	30
Mês	1	2	3	4	5	6
Precipitação média mensal (mm) Guarulhos=	254	252	201	58	70	39
Evaporação média mensal (mm)=	140	126	130	107	85	73
Volume runoff=	16582	16420	13107	3805	4586	2546
Precipitação na represa=	256	253	202	59	71	39
Evaporação volume (m ³)	141	127	131	108	86	73
Infiltração no solo (m ³)=	2965	2678	2965	2870	2965	2870
Retirada de água constante (m ³ /mês)	0	0	0	0	0	0
Vazão base (m ³ /mês)=	857	774	857	829	857	829
Balanço (m ³) volume que entra - volume que sai=	14589	14642	11070	1716	2462	472
Balanço mensal	906	906	906	906	906	906

Tabela 40.6 –Continuação- Balanço hídrico de bacia de detenção alagada em Guarulhos

Meses do ano	julho	ago	set	out	nov	dez	
Número de dias no mês=	31	31	31	30	31	30	
Mês	7	8	9	10	11	12	
Precipitação média mensal (mm) Guarulhos=	31	25	75	137	130	215	1488
Evaporação média mensal (mm)=	81	104	108	130	139	144	1367
Volume runoff=	2013	1626	4902	8965	8515	14012	
Precipitação na represa=	31	25	76	138	131	216	
Evaporação volume (m ³)	81	105	109	131	139	145	
Infiltração no solo (m ³)=	2965	2965	2965	2870	2965	2870	
Retirada de água constante (m ³ /mês)	0	0	0	0	0	0	
Vazão base (m ³ /mês)=	857	857	857	829	857	829	
Balanço (m ³) volume que entra - volume que sai=	-146	-562	2760	6932	6398	12042	
Balanço mensal	760	198	906	906	906	906	

Evaporação:

A evaporação é somente para a superfície da lagoa, visto que a consideramos um sistema isolado. Trata-se da evaporação de superfície líquida, que geralmente é um pouco maior que a evapotranspiração ETo.

Em caso de wetlands ou de muita vegetação poderíamos ter considerado uma parte de evapotranspiração e outra de superfície líquida.

Para o mês de janeiro temos evaporação de 141mm:

$$\text{Volume evaporado} = (141\text{mm}/10000) = 141\text{m}^3/\text{mês}$$

Retirada de água do reservatório

Não existe nenhuma retirada de água do reservatório, sendo pois a mesma considerada igual a zero. Poderia haver água retirada de água para irrigação ou outro destino.

Vazão base

Conforme Método da Regionalização Hidrográfica de Pallos et al, a vazão base é calculada da seguinte maneira para o Estado de São Paulo:

Vazão média plurianual para Guarulhos= 0,1547 litros/ segundo x ha

Para a vazão $Q_{7,10}$ temos:

$$Q_{7,10} = 0,75 \times 0,632 \times (0,4089 + 0,0332) \times 0,1547 \text{ litros/segundo} \times \text{ha} = 0,032 \text{ litros/segundo} \times \text{ha}.$$

Para a área de 10ha a vazão base que chega até a bacia alagada será:

$$Q_b = 0,032 \text{ L/s} \times \text{ha} \times 10\text{ha} = 0,32 \text{ L/s}$$

Durante 24h, ou seja, 86400 segundos teremos:

$$Q_b = 0,32 \text{ L/s} \times 86400/1000 = 27,6\text{m}^3/\text{dia}$$

Para o mês de janeiro que tem 31 dias teremos:

$$Q_b = 27,6\text{m}^3/\text{dia} \times 31 \text{ dias} = \mathbf{857\text{m}^3}$$

Nota:

A vazão base correntemente é muito difícil de ser obtida e se faz a hipótese de $Q_b=0$.

A vazão base é importante para manter a represa sempre com água daí, o usual de usar bacia alagada em áreas sempre maiores ou igual a 10ha e em alguns casos até acima de 20ha.

Balanço

Fazemos agora o balanço hídrico, isto é, consideremos o volume total que entra no sistema isolado, ou seja na represa, menos o volume que sai.

Para o mês de janeiro temos:

Volume que entra:

$$\text{Runoff} = 16582\text{m}^3$$

$$\text{Precipitação} = 256\text{m}^3$$

$$\text{Vazão base} = 857\text{m}^3$$

$$\text{Total} = 17.695\text{m}^3$$

Volume que sai:

$$\text{Volume de água que evapora} = 141\text{m}^3$$

$$\text{Volume de água que se infiltra no fundo da represa} = 2965\text{m}^3$$

$$\text{Volume retirado da represa para outros fins} = 0$$

$$\text{Total} = 3106\text{m}^3$$

$$\text{Volume que entra} - \text{volume que sai} = 17.695\text{m}^3 - 3.106\text{m}^3 = 14.589\text{m}^3$$

Como o volume permanente da represa tem 1906m^3 , então o resto vai ser jogada fora, isto é, será *overflow*.

$$\text{Overflow} = 14.589\text{m}^3 - 906\text{m}^3 = 13.683\text{m}^3$$

A represa então armazenará o volume de 906m^3 para o próximo mês, que é o volume permanente que ficará sempre constante, não ser nos meses de julho e agosto onde o volume chegará respectivamente a 760m^3 e 198m^3 , mas mesmo assim o reservatório não ficará seco.

Caso se queira melhorar o volume permanente uma solução seria impermeabilizar o fundo da represa com argila impermeável. Fazê-la mais fundo é uma solução, mas as profundidades passarão daquelas aconselhadas que variam de 0,90m a 1,80m para lagoa de detenção alagada.

40.12 Custos

O custo de uma bacia de detenção alagada está entre $\text{US}\$18/\text{m}^3$ a $\text{US}\$35/\text{m}^3$ e manutenção entre 3% a 5% do custo total.

Exemplo 40.2

Calcular a estimativa de custo de implantação de uma lagoa de detenção alagada com 2000m^3 de volume.

$$C = 2000\text{m}^3 \times \text{US}\$ 30/\text{m}^3 = \text{US}\$ 60.000$$

Manutenção: 5%

$$M = 0,05 \times \text{US}\$ 60.000 = \text{US}\$ 3000/\text{ano}$$

40.13 Bibliografia e livros consultados

- ESTADO DA GEORGIA, 2001. *Georgia Stormwater Management Manual*. August 2001. Volume 1, Volume 2.
- PALLOS, JOSÉ CARLOS F. e THADEU, MARIO LEME DE BARROS. *Análise de métodos hidrológicos empregados em projetos de drenagem urbana no Brasil*. ABRH: 1997, 9p. Vitória, Espírito Santo, 16 a 20 de novembro de 1997.