



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

Lisboa, 5-6 Março 2009

# COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA APLICAÇÃO DE DUAS ABORDAGENS DE CÁLCULO DA RECARGA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS À SUB-BACIA HIDROGRÁFICA A MONTANTE DA E.H. DE PONTE DE PANASCO

**Manuel M. Oliveira**

Núcleo de Águas Subterrâneas

Laboratório Nacional de Engenharia Civil

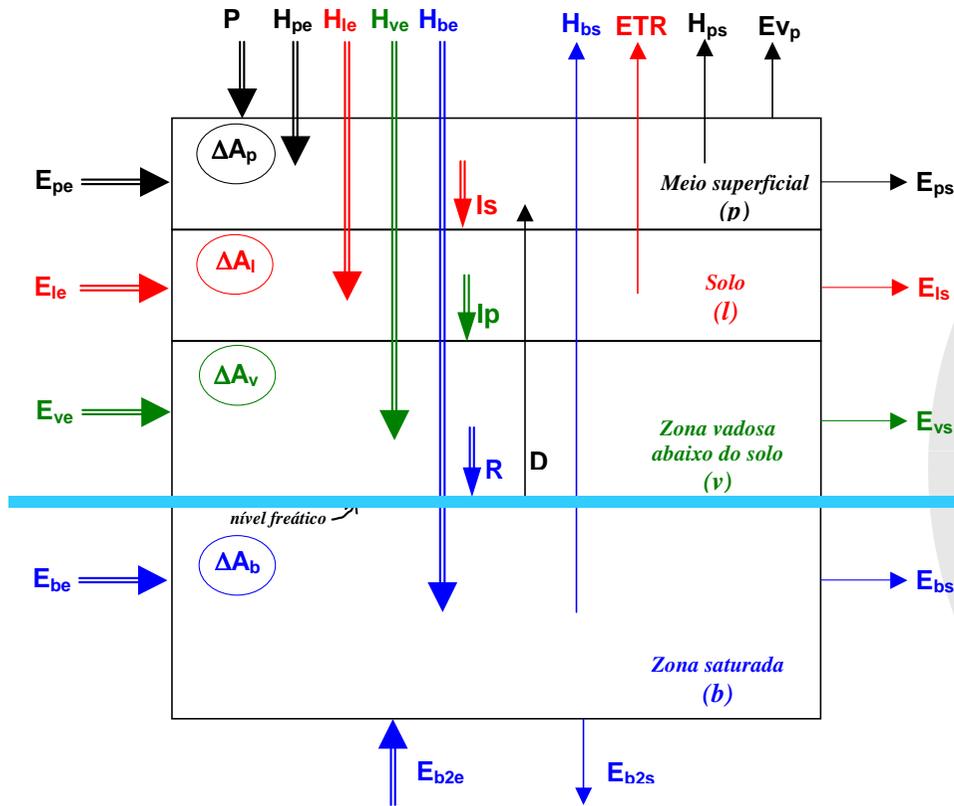
Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal

Tel: (+351) 21 844 3436, Fax: (+351) 21 844 3016

Correio-e: [moliveira@lnec.pt](mailto:moliveira@lnec.pt)

Internet: <http://www.lnec.pt/organizacao/dha/nas>

# Recarga

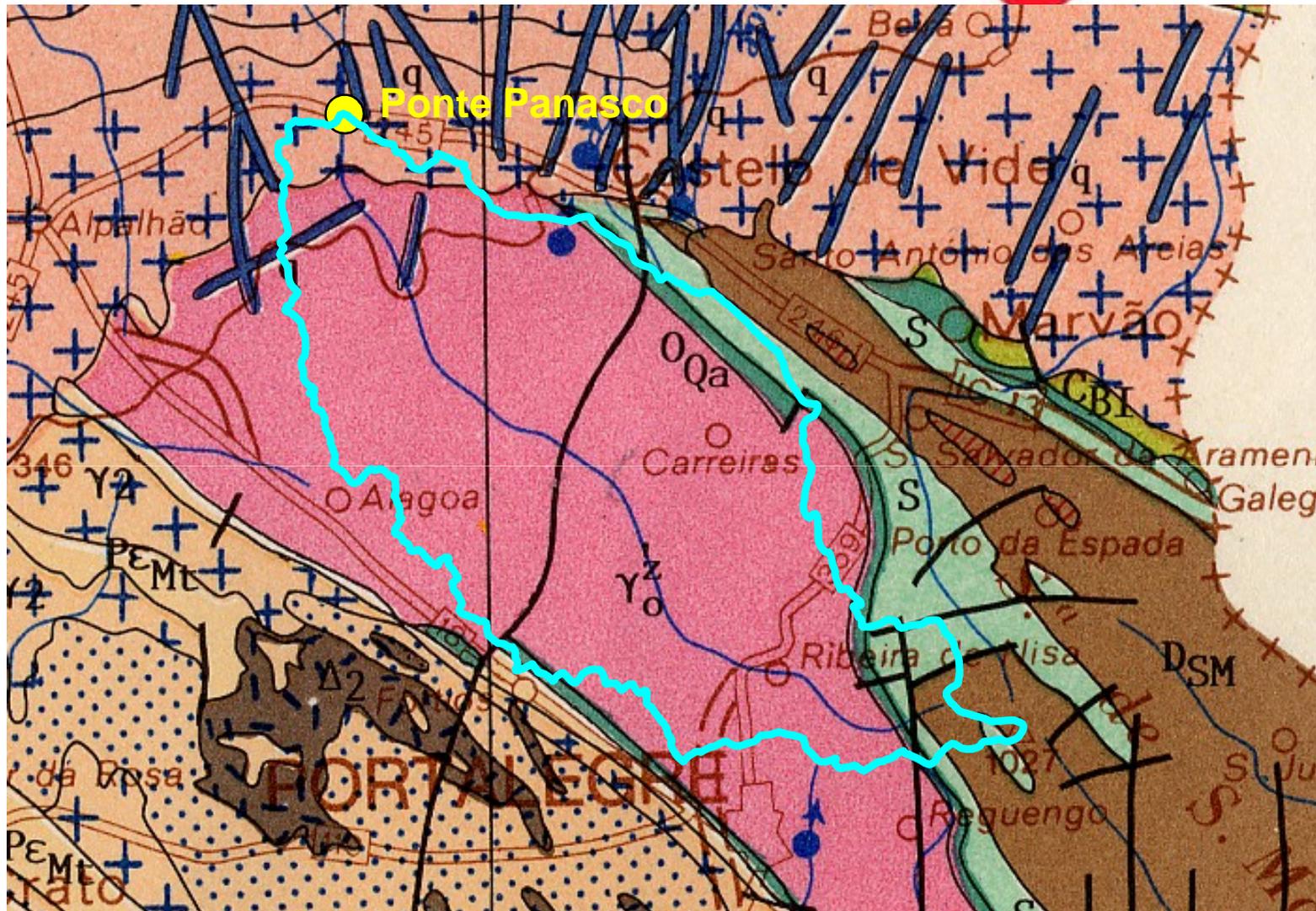


$$R = P + E_{pe} + E_{le} + E_{ve} + H_{ve} + H_{pe} + H_{le} + D - E_{vp} - E_{ps} - E_{ls} - E_{vs} - H_{ps} - ETR - \Delta A_p - \Delta A_l - \Delta A_v$$

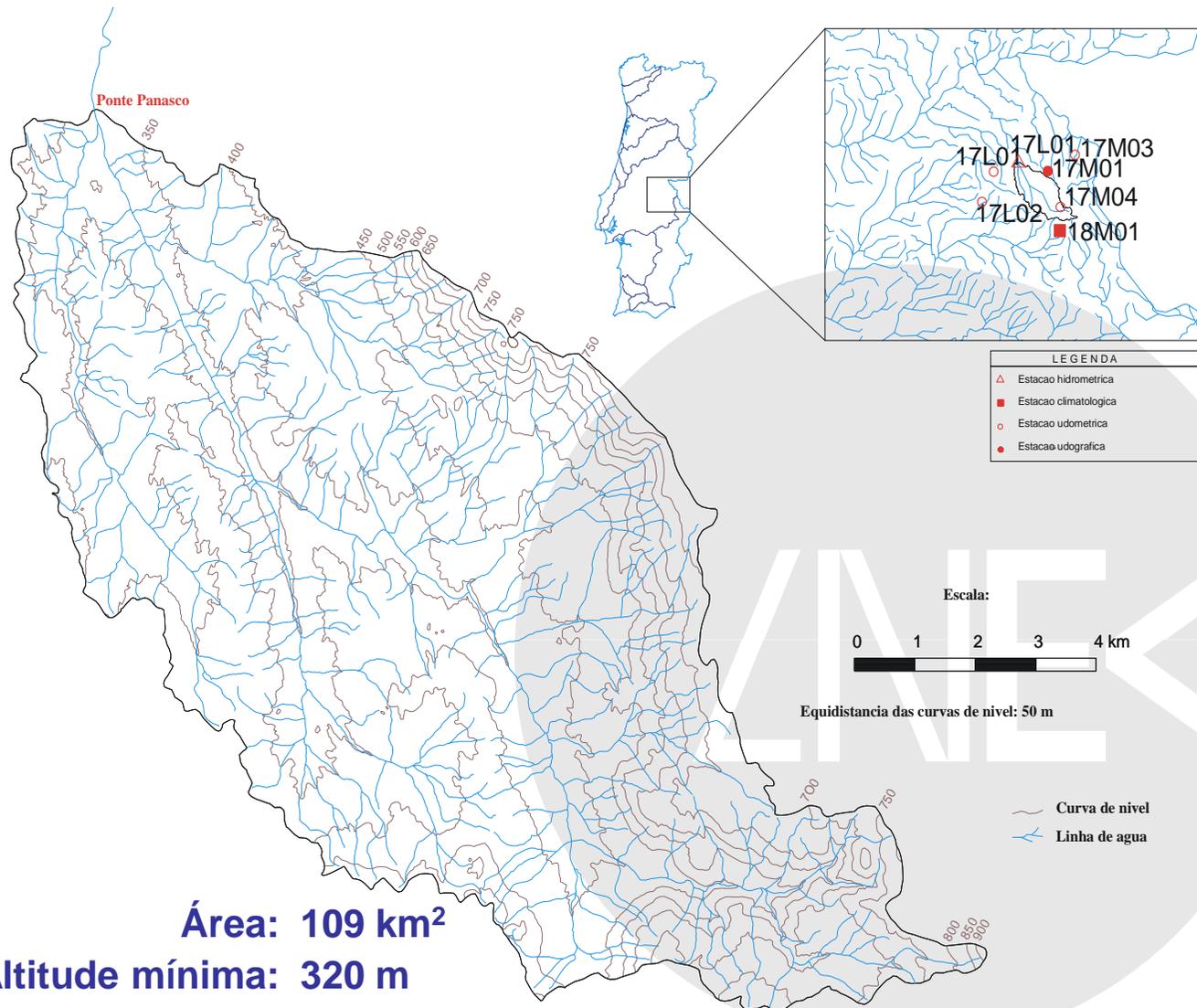


Nível freático

$$R = E_{bs} + E_{b2s} + H_{bs} + D + \Delta A_b - E_{be} - E_{b2e} - H_{be}$$



Fonte: Carta Geológica de Portugal  
Escala 1:500 000 (IGM, 1992)



**Área: 109 km<sup>2</sup>**  
**Altitude mínima: 320 m**  
**Altitude máxima: 1025 m**  
**Nº de anos analisados: 9**  
**Precipitação média: 801 mm/ano**  
**Escoamento total médio: 249 mm/ano**

Série de precipitação média diária na bacia.

Evapotranspiração de referência determinada pelo método de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998) com os dados mensais provenientes da estação de Portalegre.

Água utilizável para evapotranspiração [ $AGUT = rp * (cc - wp)$ ] médio ponderado para a bacia = 133 mm (Calculado com base na cartografia de ocupação do solo *Corine Land-Cover* e nos solos representados na carta de solos de Portugal à escala 1:50 000).

O horizonte superior do solo médio da bacia é o franco arenoso. A capacidade utilizável ( $nu = cc - wp$ ) é de 0,09.

### Principais classes de ocupação do solo e de solos representados na bacia hidrográfica a montante de Ponte Panasco

Ocupação do solo ( <i>Corine Land Cover</i> )	Área (km <sup>2</sup> )	Solos (carta de solos)	Área (km <sup>2</sup> )
Terras ocupadas principalmente por agricultura com espaços naturais importantes - 243	37,1	Pg - 221103	97,5
Folhosas - 311	35,3	Arg - 102	5,2
Pântanos e Charnecas - 322	19,7	Ex - 111011	2,6
Zonas de utilização agrícola fora dos perímetros de rega - 211	12,6	Sbl - 140101	1,6

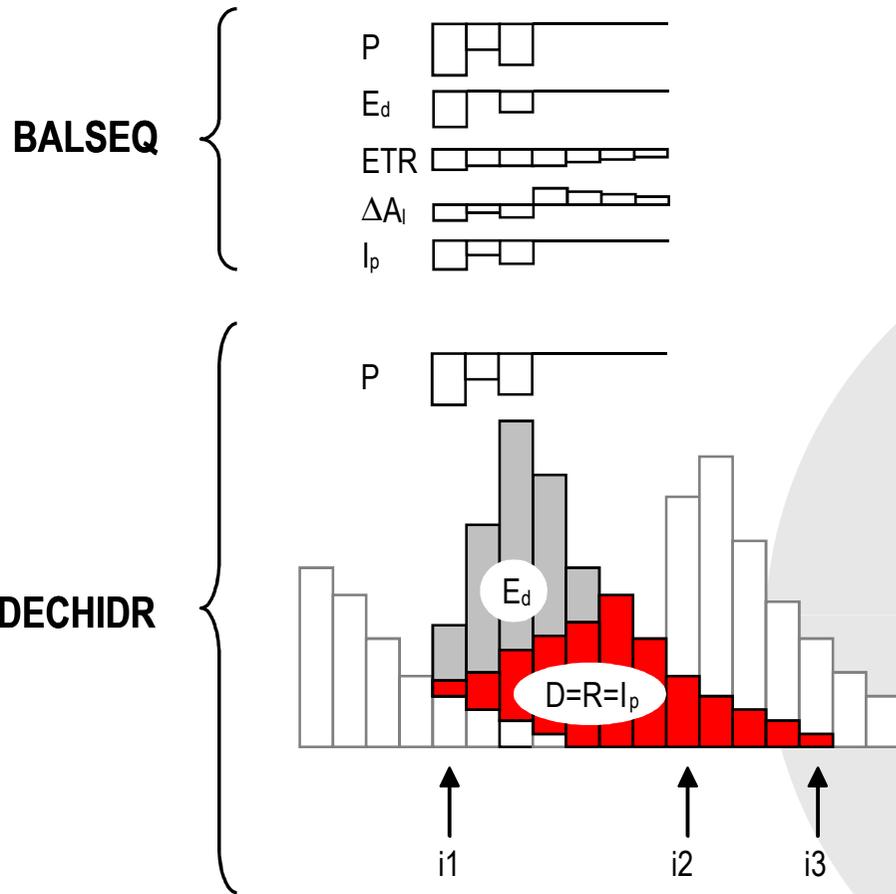


INEC

# Comparação de valores



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL



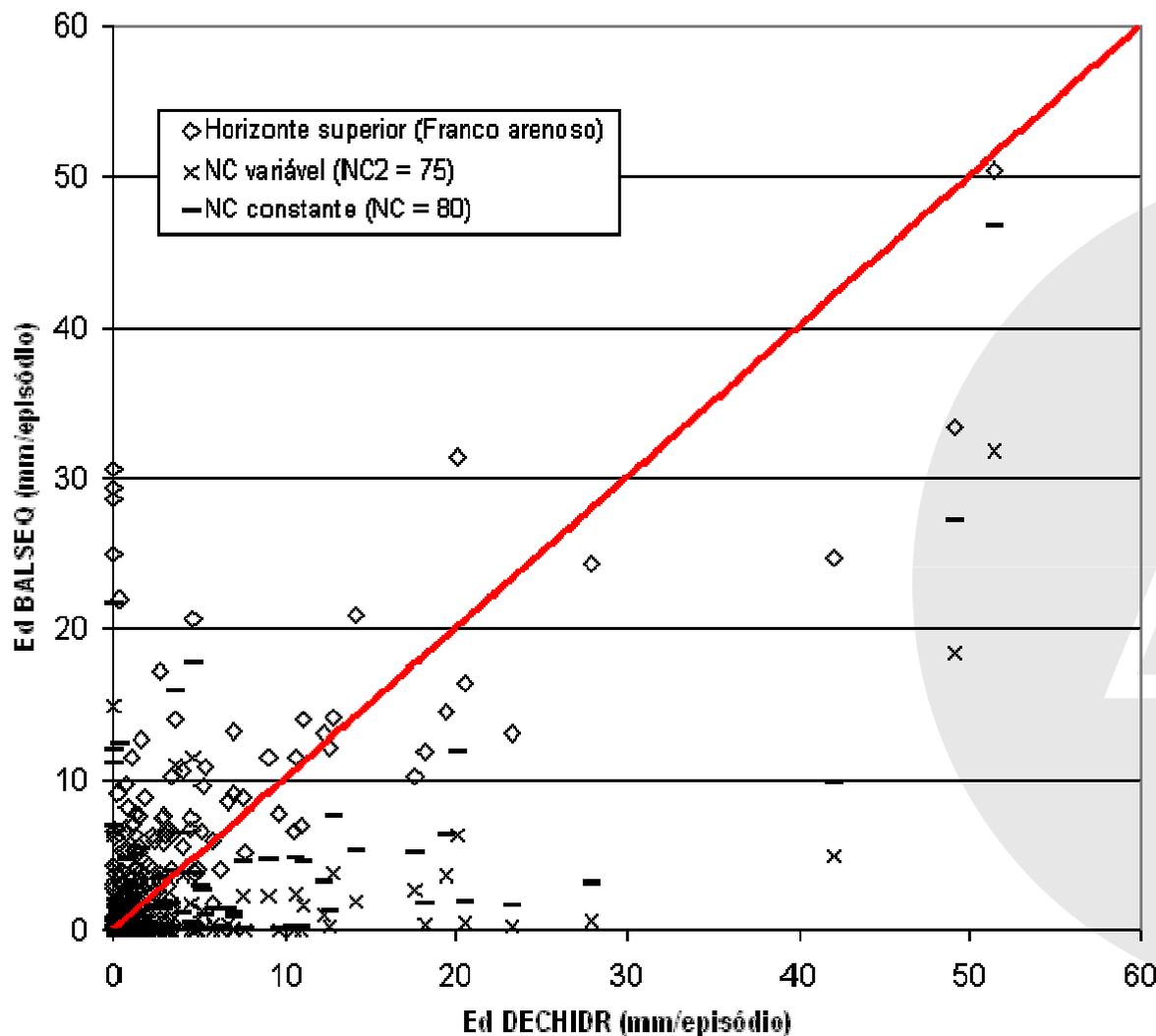
Decomposição dos hidrogramas	Balanco hídrico sequencial diário
$P$ (acumulada entre o dia $i_1$ e o dia $i_2-1$ )	$P$ (acumulada entre o dia $i_1$ e o dia $i_2-1$ )
$E_d$ (acumulado desde dia $i_1$ até $n$ dias após a ponta do hidrograma ou final da precipitação)	$E_d$ (acumulado entre o dia $i_1$ e o dia $i_2-1$ )
$D (=R=I_p)$ (acumulada entre dia $i_1$ e dia $i_3$ )	$I_p$ (acumulada entre o dia $i_1$ e o dia $i_2-1$ )
$P - (E_d + D)$ (calculados nos passos anteriores)	$ETR$ (acumulada entre o dia $i_1$ e o dia $i_2-1$ ) + $\Delta A_l$ (entre o dia $i_1$ e o dia $i_2-1$ )



# Comparação dos escoamentos directos



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL



**Menor DQM (= 4,12):**

- MBHSD: NC2 = 75;
- DECHIDR: "E<>P", "nE/P", "nP"

**Melhor comparação:**

- MBHSD: horiz. sup. Solo AGUT = 200 mm ;
- DECHIDR: "E<>P", "nE/P", "nP"

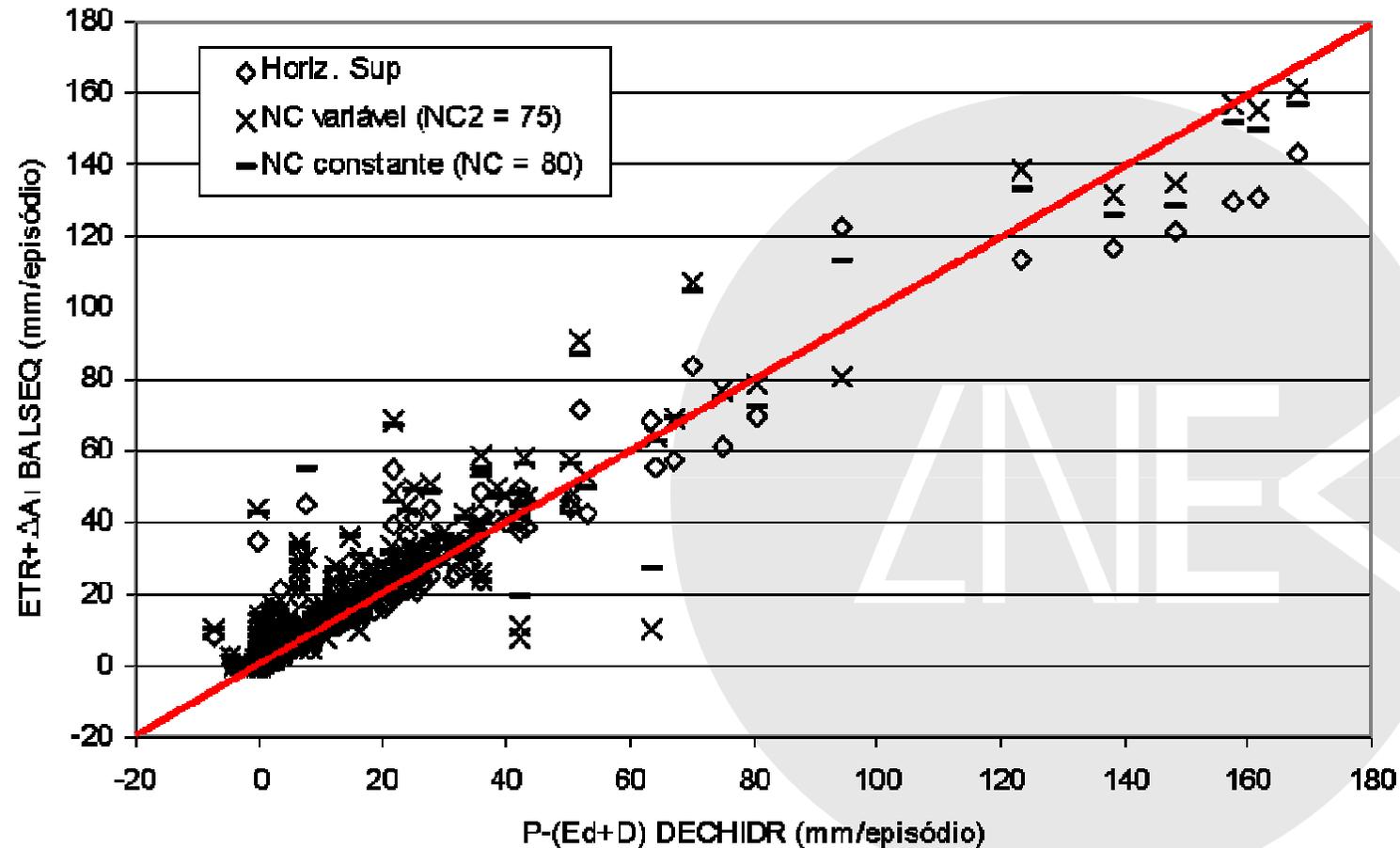
**Seleccionados para a continuação da análise no MBHSD:**

horiz. sup. solo AGUT = vários; NC = 80; NC2 = 75

# Comparação das evapotranspirações + variação de armazenamento de água no solo



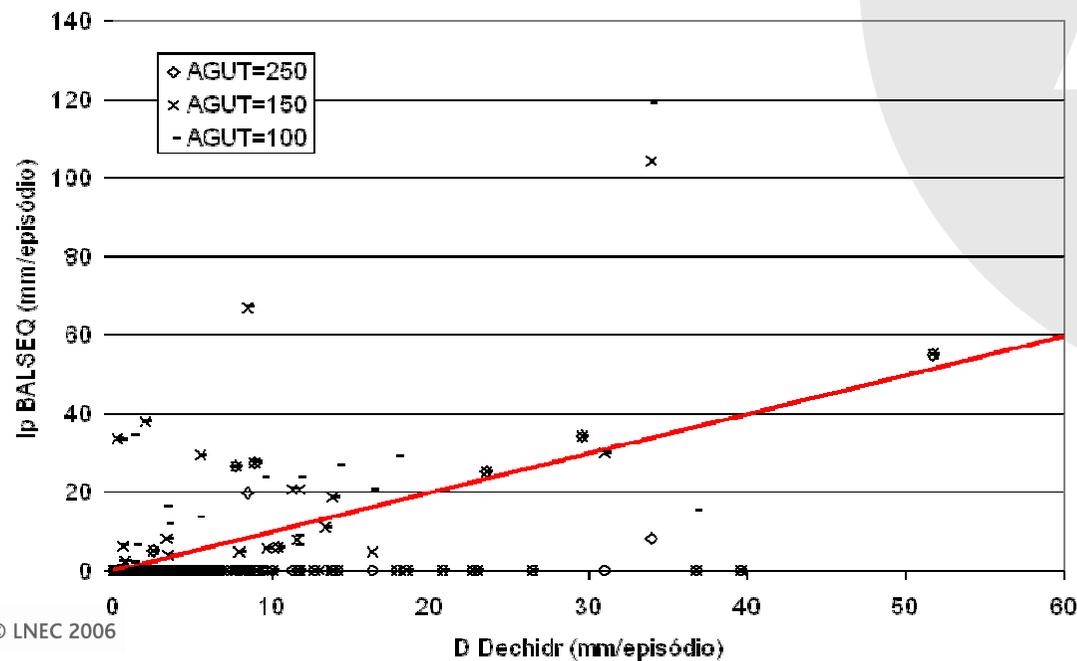
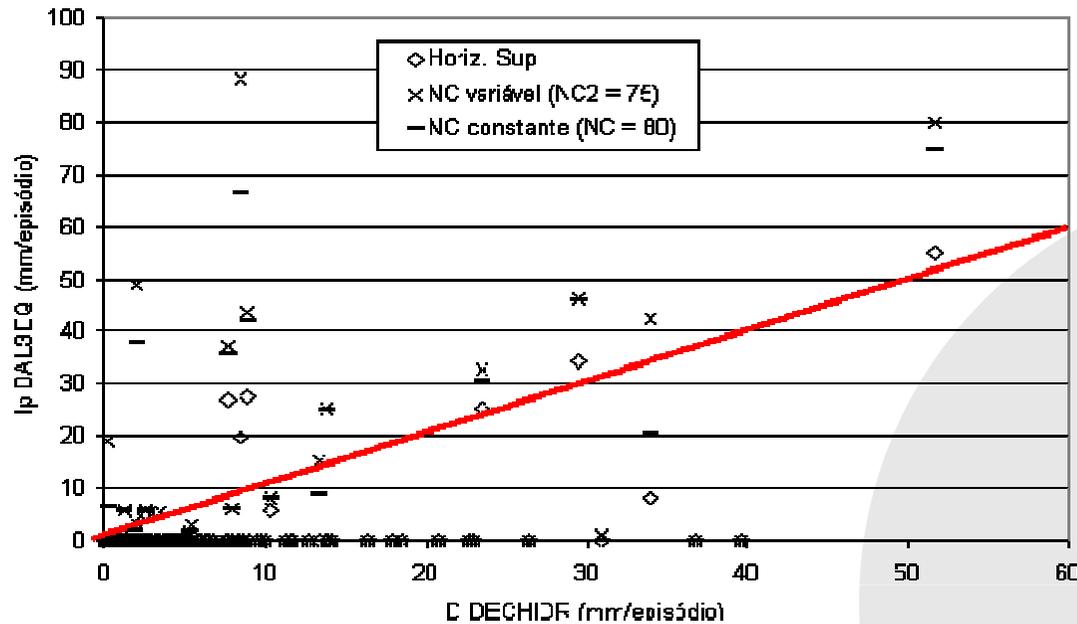
LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL



**Melhor comparação (DQM = 7,06 mm):**

- MBHSD: horizonte superior do solo com AGUT = 250 mm
- DECHIDR: "E<>P", "E/P", "nP").

# Comparação das recargas



## Menor DQM (= 6,20):

- MBHSD: horiz. sup. Solo AGUT = 250 mm;
- DECHIDR: "E<>P", "E/P", "nP"

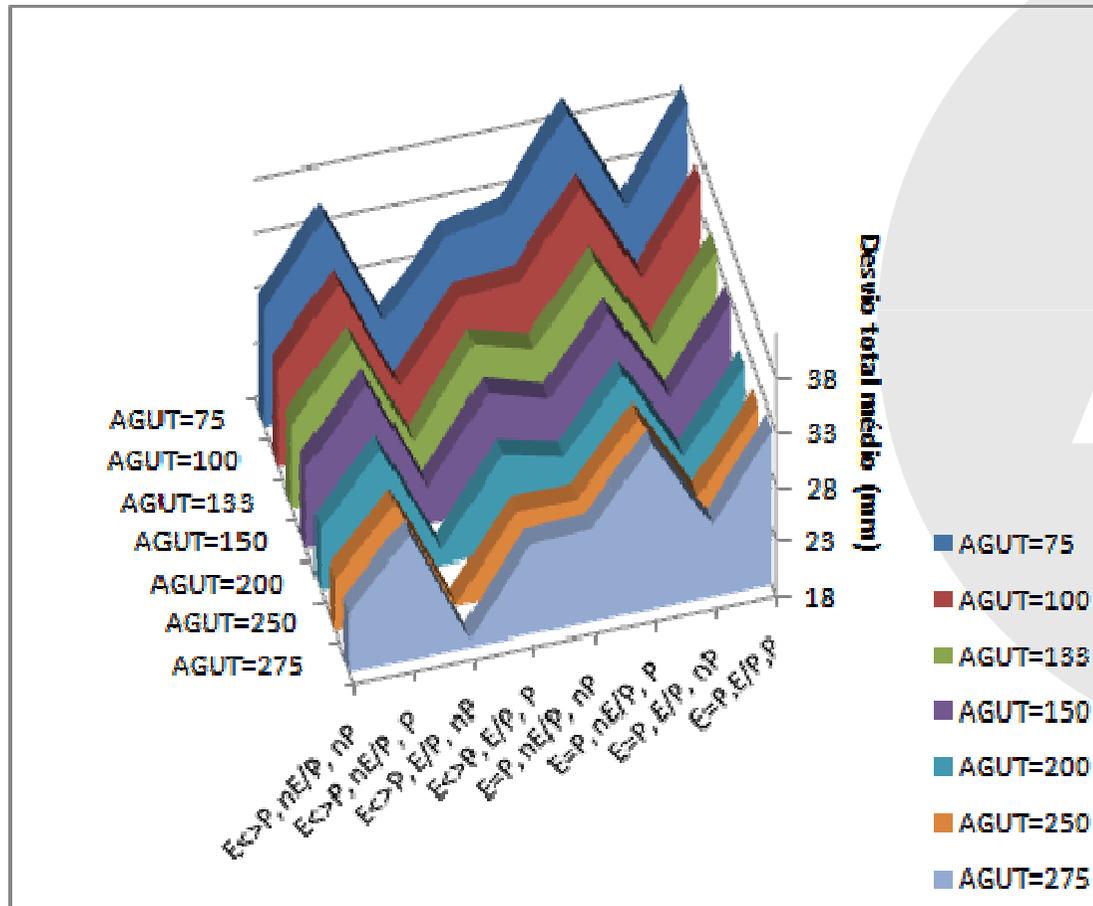
## Melhor comparação:

- MBHSD: horiz. sup. Solo AGUT = 100 mm ;
- DECHIDR: "E<>P", "E/P", "nP"

# Melhores resultados

Desvio Total Médio

$$DTM = DQM_{Ed} + DQM_R + DQM_{ETR+\Delta AI}$$



**Melhor DTM (= 18,04):**

- MBHSD: horiz. sup. Solo AGUT = 250 mm ;
- DECHIDR: "E<>P", "E/P", "nP"

**Melhor comparação valor anual médio de recarga MBHSD: horiz. sup. solo AGUT = 100 mm;**

# Considerações finais (I)



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

Foi possível fazer a comparação dos resultados da aplicação dos métodos por episódios de precipitação/recarga.

## Modelos de balanço hídrico acima da zona saturada:

- modelo de balanço hídrico sequencial diário: BALSEQ; BALSEQ\_MOD.
- recarga distribuída, embora neste caso tenha sido calculada uma recarga média.
- modelos de previsão.
- requer a caracterização de parâmetros do meio (NC, AGUT, horizonte superior do solo).

## Modelos de balanço hídrico da zona saturada:

- decomposição de hidrogramas de escoamento superficial: DECHIDR\_VB.
- recarga integrada.
- modelos de resposta.
- não requer a caracterização de parâmetros do meio.

## Considerações finais (II)

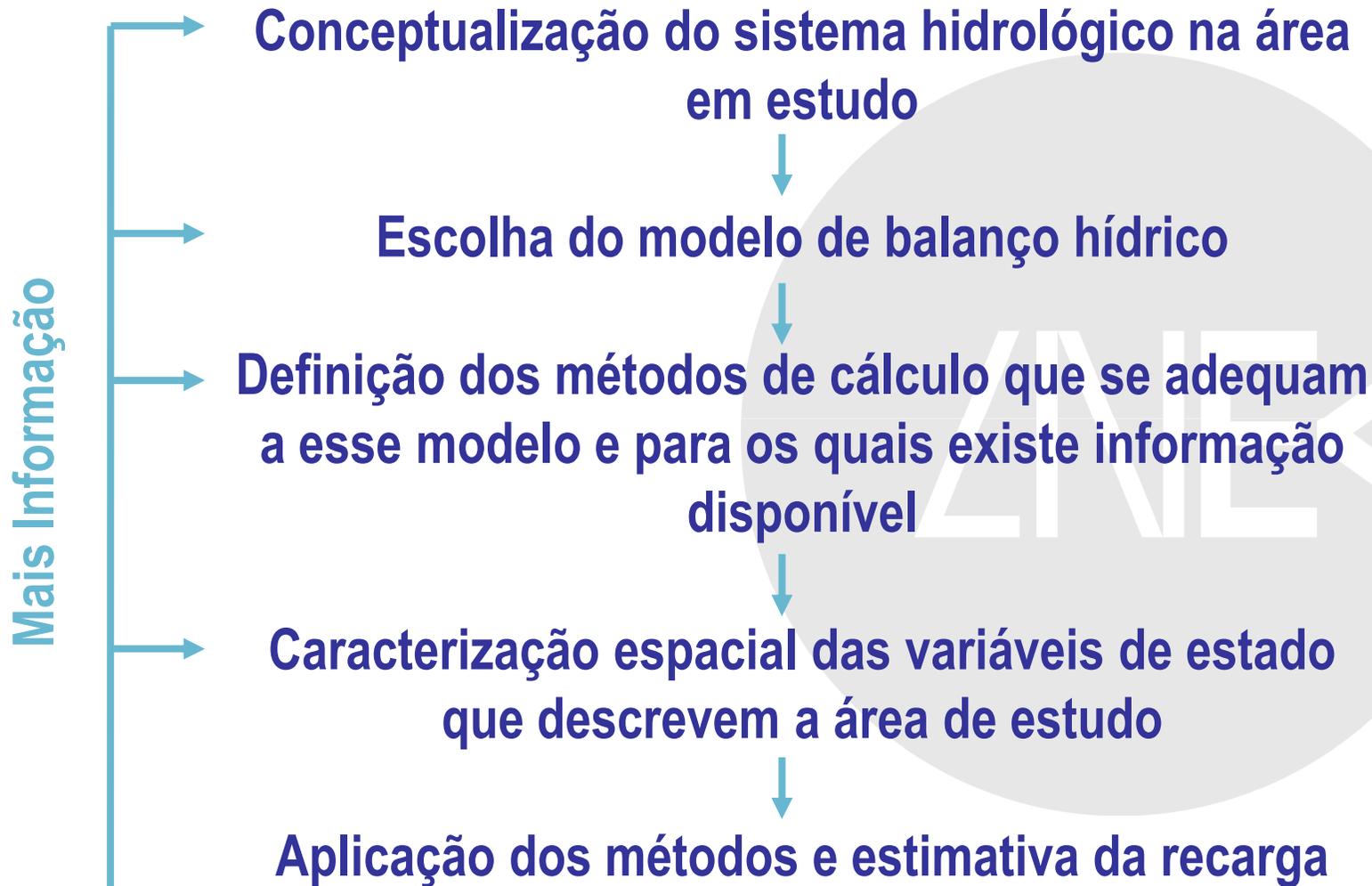


- Há uma maior confiança nos resultados obtidos pelo método da decomposição dos hidrogramas.
- Verificou-se uma razoável diferença entre os valores obtidos. Possíveis explicações:
  - no MBHSD não se consideram os caminhos preferenciais, que fazem com que a água chegue à zona saturada sem passar pelo processo de escoamento através do solo contemplado por estes modelos;
  - Utilizaram-se séries de precipitação e de evapotranspiração potencial médias no MBHSD, e apenas um valor para cada parâmetro do meio, que pretende traduzir a situação média da bacia;
- Esta deverá ser a principal razão das diferenças observadas uma vez que a utilização de valores médios em vez de valores distribuídos subestima a recarga.
- As diferenças poderiam ser reduzidas se se fizesse um modelo distribuído, que considerasse diferentes subáreas em função do solo e ocupação do solo, e para cada uma utilizasse um parâmetro do meio diferente.

# Metodologia para a estimativa da recarga



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL



*7º Seminário  
sobre*

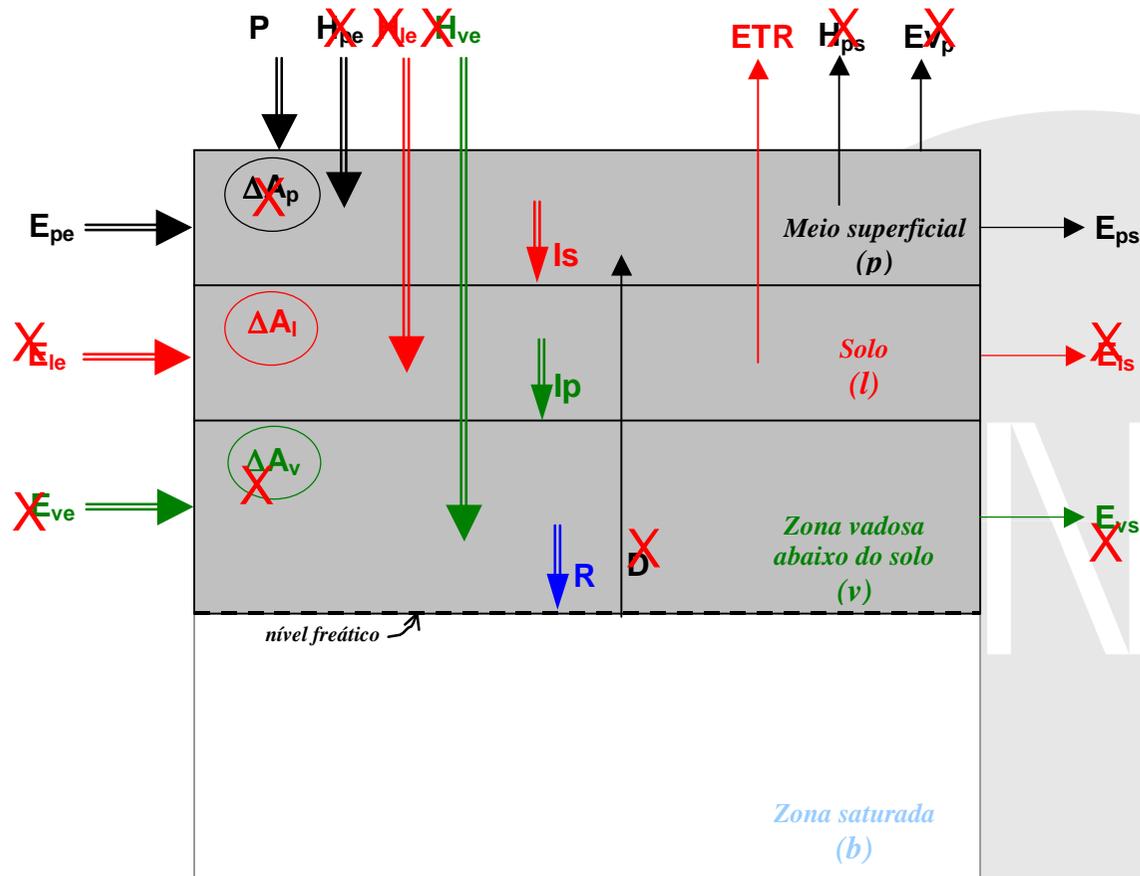
*Águas Subterrâneas*

**Lisboa, 5-6 Março 2009**

# Balanço hídrico acima da zona saturada



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL



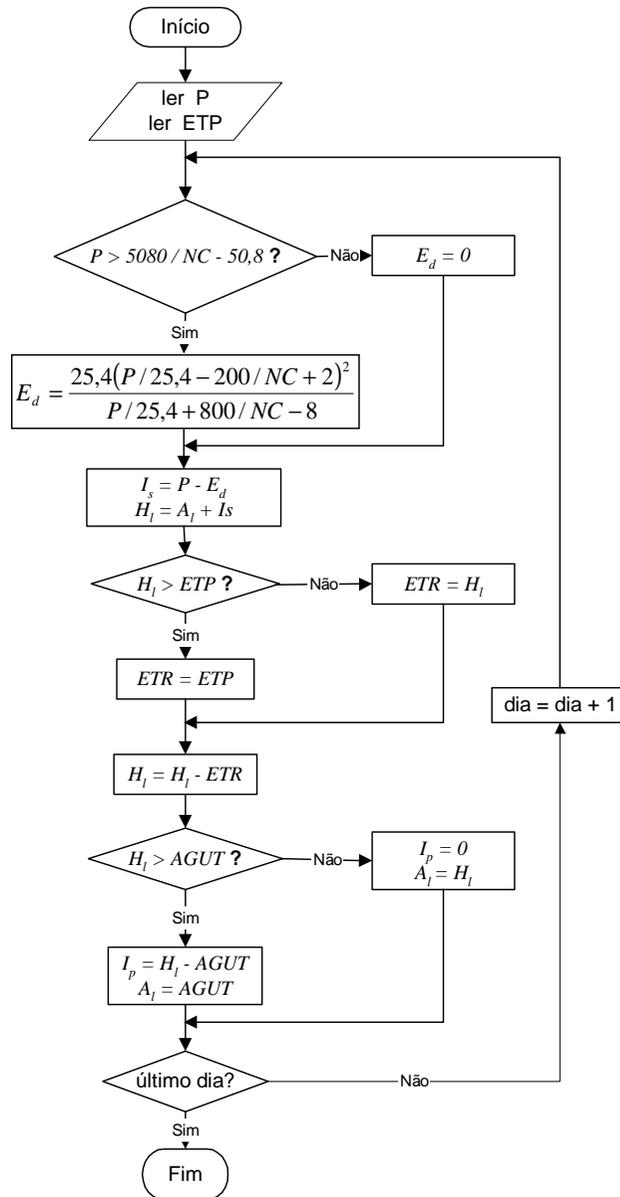
$$R = P - (E_{ps} - E_{pe}) - ETR - \Delta A_l$$

$$R = P - Ed - ETR - \Delta A_l$$

# Balanço hídrico sequencial diário



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL



$P$  = precipitação

$ETP$  = evapotranspiração potencial

$NC$  = número característico de escoamento

$E_d$  = escoamento directo

$I_s$  = infiltração superficial

$A_t$  = água armazenada no solo no final do dia

$H_t$  = água armazenada no solo ao longo do dia

$ETR$  = evapotranspiração real

$AGUT$  = quantidade máxima de água disponível no solo para evapotranspiração

$I_p$  = infiltração profunda

## Modelos numéricos:

**BALSEQ** – Lobo Ferreira (1981)

**BALSEQ\_MOD** – Oliveira (2004)

# Balanço hídrico sequencial diário



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

## Modelos numéricos:

BALSEQ – Lobo Ferreira (1981)

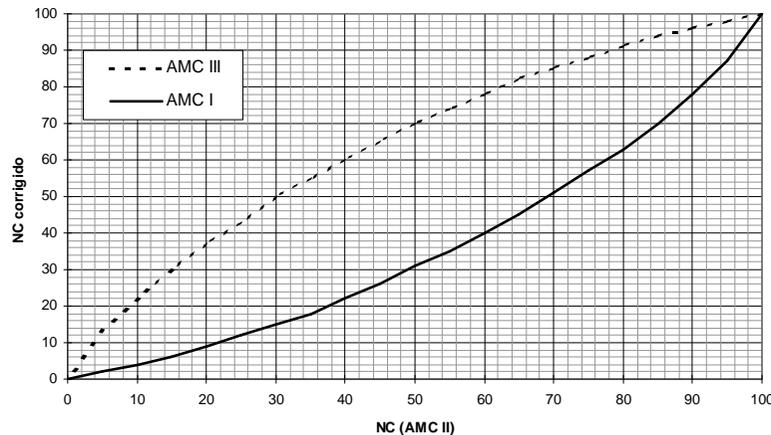
BALSEQ\_MOD – Oliveira (2004)

## 3 opções de cálculo do escoamento directo:

A. NC constante;

B. NC variável com o teor de humidade do solo;

} dependente da ocupação do solo e da classe de permeabilidade do solo (tipo de solo)  
(NC = 72, 50, 60, 70, 75, 80, 85, 90, 95)



C. dependente da textura do horizonte superior do solo e do teor de humidade do solo (solo franco arenoso)

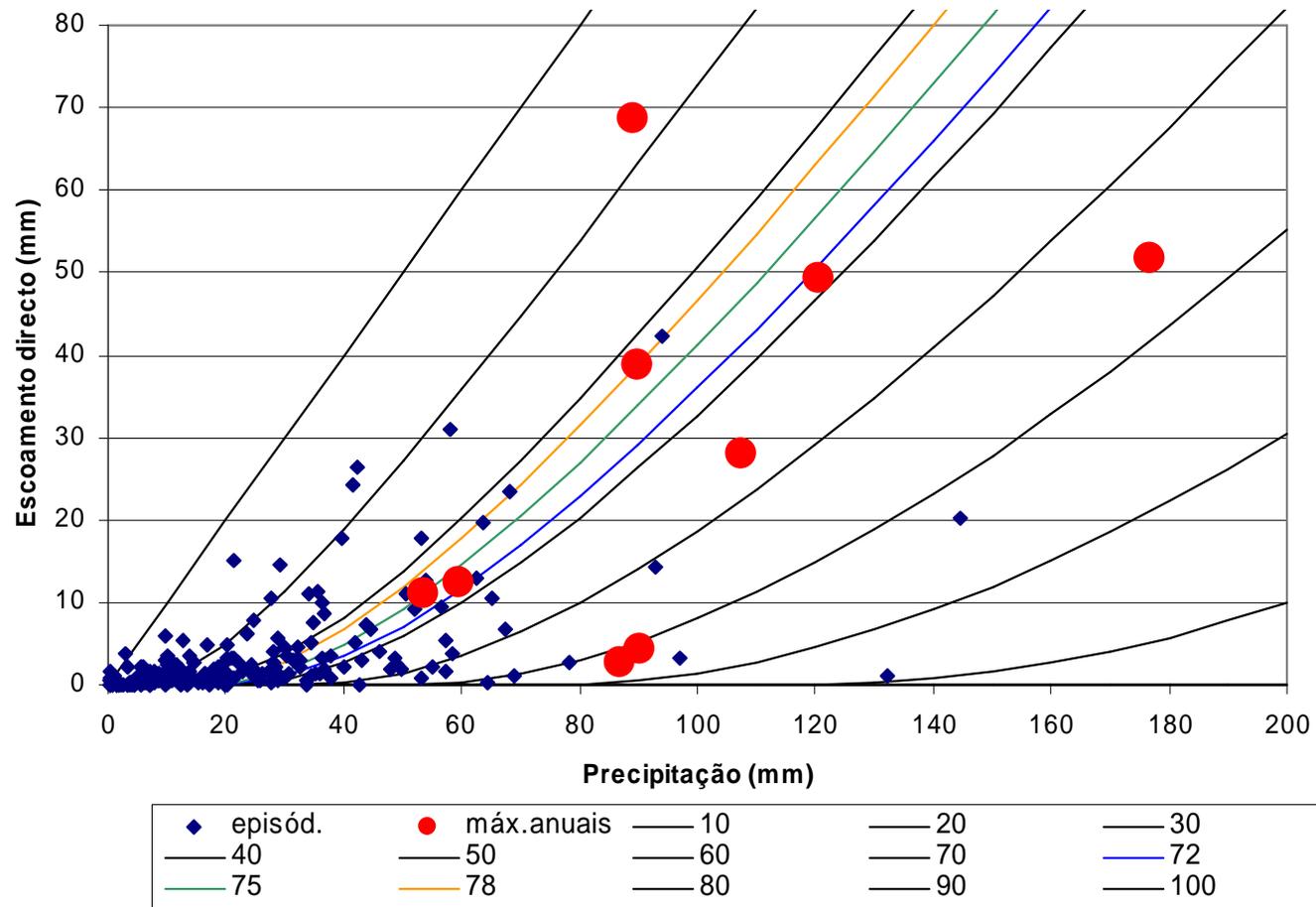


Fig. 116 – Projecção dos escoamentos directos anuais máximos nas curvas de  $Ed=f(P,NC)$

# Corrida do BALSEQ



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL



NC constante (NC =80)

a.h.	AGUT			75			100			133			150			200			250			275		
	P	ETP	ETR	Ed	R	ETR	Ed	R	ETR	Ed	R	ETR	Ed	R	ETR	Ed	R	ETR	Ed	R	ETR	Ed	R	
1981-1982	726	1469	403	66	209	428	66	184	461	66	151	478	66	134	528	66	84	578	66	34	603	66	9	
1982-1983	517	1327	510	23	30	535	23	5	541	23	0	541	23	0	541	23	0	541	23	0	541	23	0	
1983-1984	994	1343	612	77	306	638	77	279	671	77	246	688	77	229	738	77	179	788	77	129	813	77	104	
1984-1985	1066	1394	579	67	420	604	67	395	637	67	362	654	67	345	704	67	295	754	67	245	779	67	220	
1985-1986	715	1413	457	32	213	482	32	188	515	32	155	532	32	138	582	32	88	632	32	38	657	32	13	
1986-1987	701	1456	579	35	100	604	35	75	637	35	42	654	35	25	679	35	0	679	35	0	679	35	0	
1987-1988	1020	1290	684	53	282	714	53	253	747	53	220	764	53	203	814	53	153	864	53	103	889	53	78	
Média	820	1385	547	50	223	572	50	197	601	50	168	616	50	153	655	50	114	691	50	78	709	50	61	

NC variável (NC2 = 75)

a.h.	AGUT			75			100			133			150			200			250			275		
	P	ETP	ETR	Ed	R	ETR	Ed	R	ETR	Ed	R	ETR	Ed	R	ETR	Ed	R	ETR	Ed	R	ETR	Ed	R	
1981-1982	726	1469	406	42	223	431	42	198	464	42	165	481	42	148	531	42	98	581	42	48	606	42	23	
1982-1983	517	1327	524	13	33	549	13	8	557	13	0	557	13	0	557	13	0	557	13	0	557	13	0	
1983-1984	994	1343	616	43	336	643	43	308	676	43	275	693	43	258	743	43	208	793	43	158	818	43	133	
1984-1985	1066	1394	581	35	449	608	35	423	641	35	390	658	35	373	708	35	323	758	35	273	783	35	248	
1985-1986	715	1413	458	14	225	483	14	200	516	14	167	533	14	150	583	14	100	633	14	50	658	14	25	
1986-1987	701	1456	593	16	110	618	16	85	651	16	52	668	16	35	703	16	0	703	16	0	703	16	0	
1987-1988	1020	1290	692	26	301	729	26	265	762	26	232	779	26	215	829	26	165	879	26	115	904	26	90	
Média	820	1385	553	27	240	580	27	213	609	27	183	624	27	169	665	27	128	700	27	92	718	27	74	

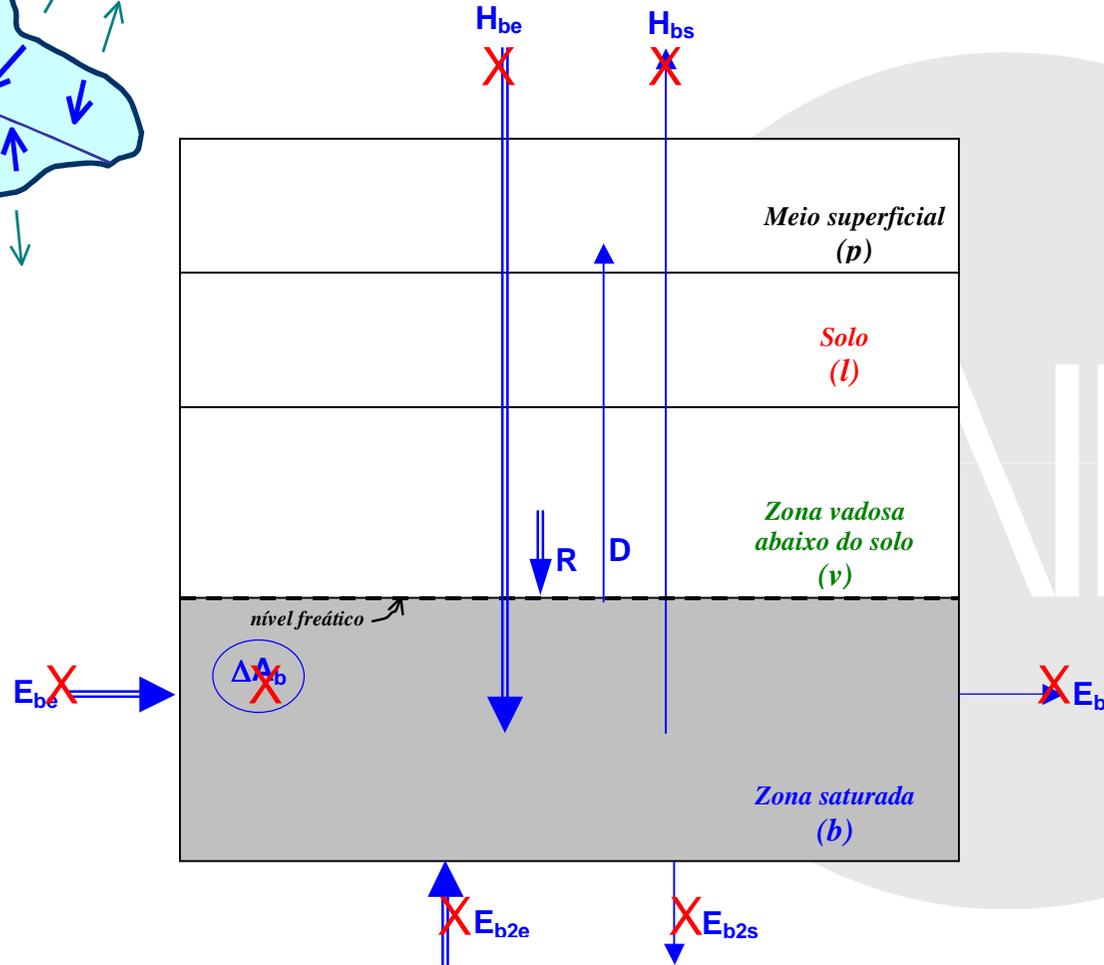
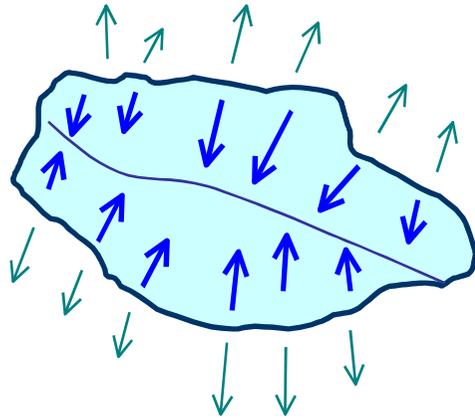
Horizonte superior do solo = franco arenoso

a.h.	AGUT			75			100			133			150			200			250			275		
	P	ETP	ETR	Ed	R																			
1981-1982	726	1469	381	139	163	405	138	138	438	137	107	455	136	91	505	134	42	549	133	0	550	132	0	
1982-1983	517	1327	477	82	1	480	80	0	482	79	0	482	78	0	483	77	0	484	77	0	484	77	0	
1983-1984	994	1343	562	200	232	587	200	208	618	200	176	634	200	160	683	200	111	731	200	63	756	199	39	
1984-1985	1066	1394	542	222	302	567	222	278	599	222	246	615	222	229	664	221	181	714	219	134	738	218	110	
1985-1986	715	1413	442	135	131	467	134	107	500	133	75	516	132	59	566	130	11	579	128	0	580	128	0	
1986-1987	701	1456	525	126	58	550	125	34	582	124	2	585	123	0	587	122	0	588	121	0	589	120	0	
1987-1988	1020	1290	648	193	178	674	191	155	708	189	123	725	188	107	774	187	59	823	186	11	834	185	0	
Média	820	1385	511	157	152	533	156	131	561	155	104	573	154	92	609	153	58	638	152	30	647	151	21	

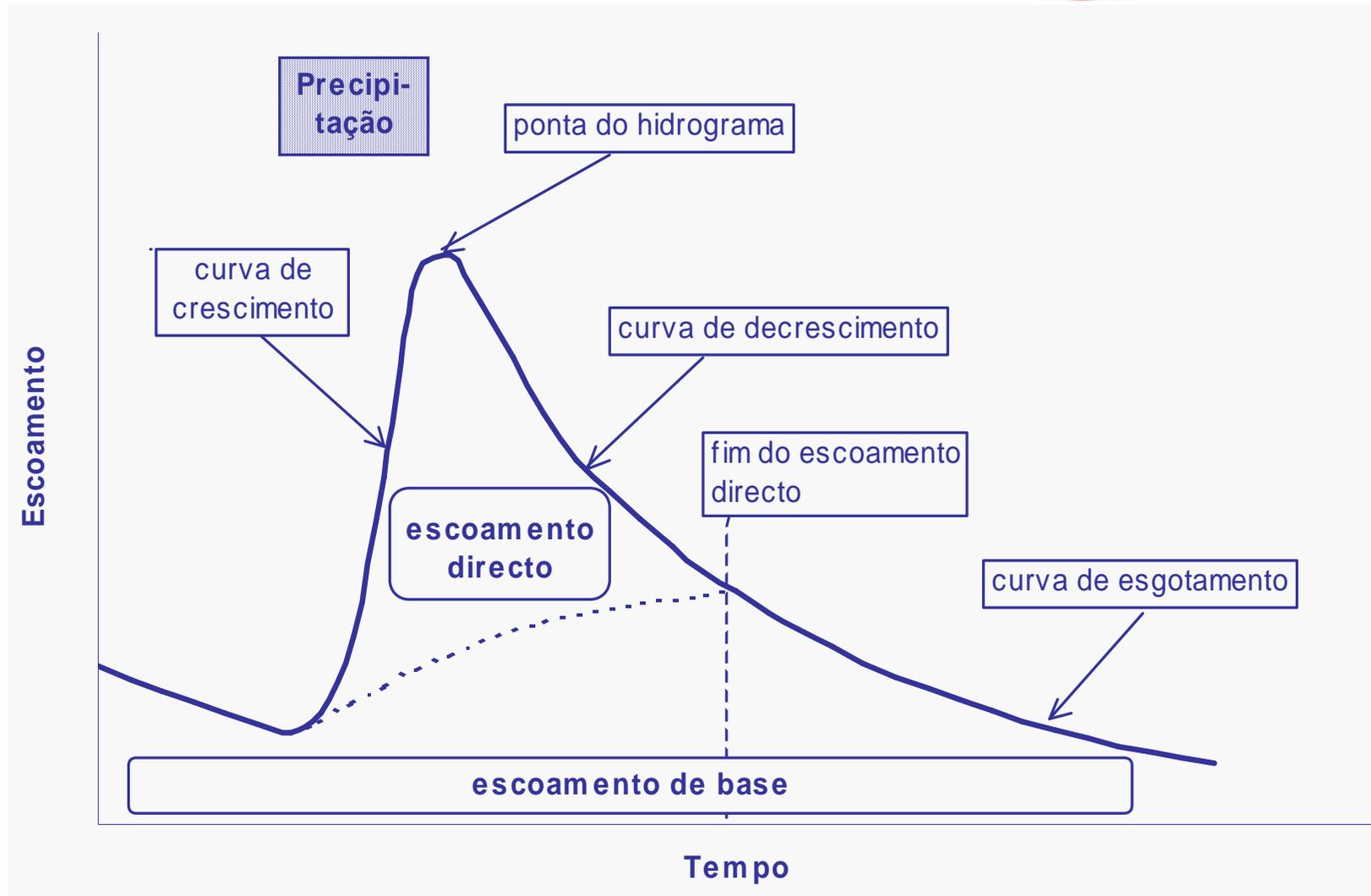
# Balanço hídrico da zona saturada



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

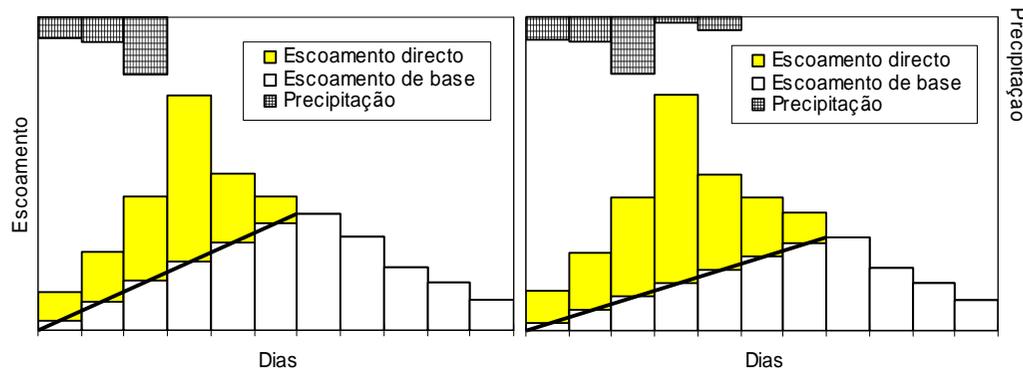


$$R = D$$

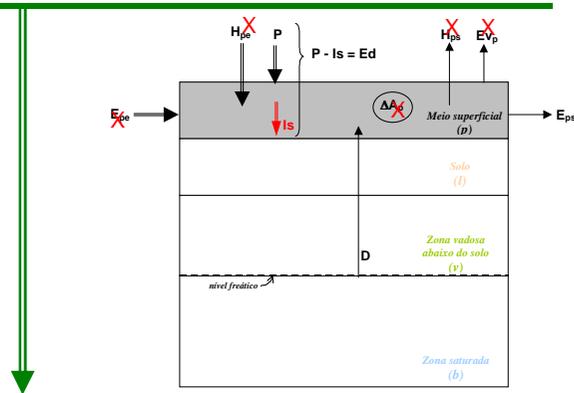


# Descarga (D)

## Escoamento de base dos cursos de água:



## Escoamento de base



Não há armazenamento de água superficial

Não há evaporação de água superficial

Não há extracção de água superficial

## Descarga de águas subterrâneas

# Decomposição do episódio de Precipitação / Escoamento superficial

Esgotamento:

$$E = E_0 \cdot \text{EXP}(-\alpha \cdot t)$$

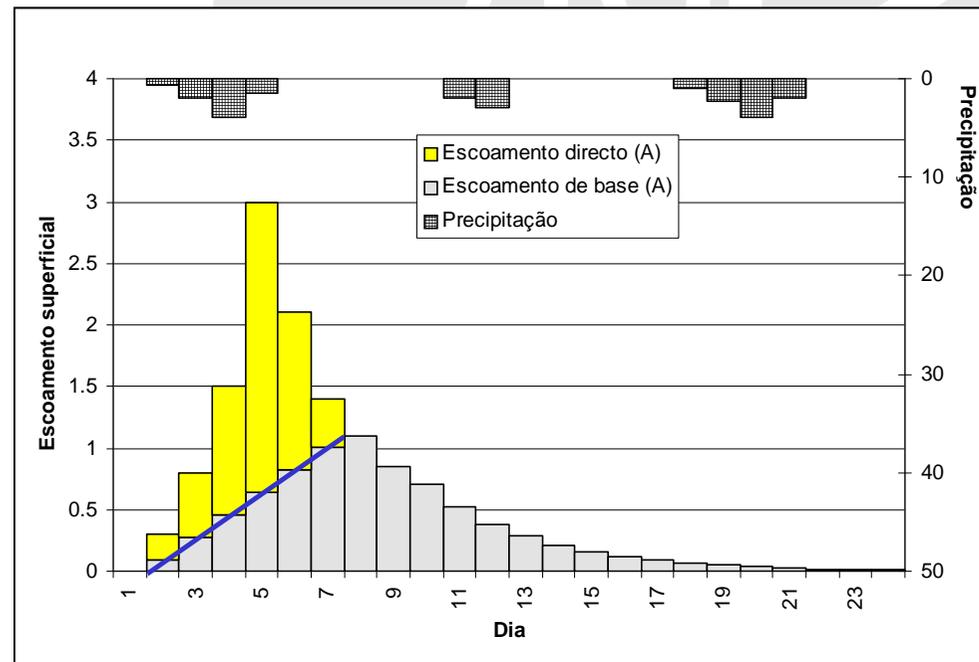
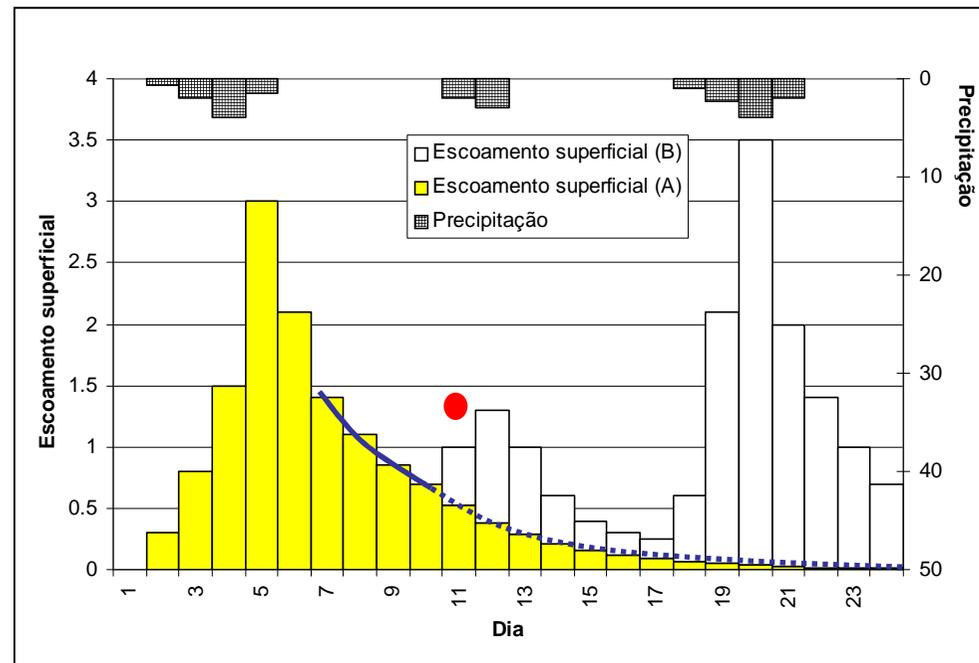
Tempo com escoamento directo:

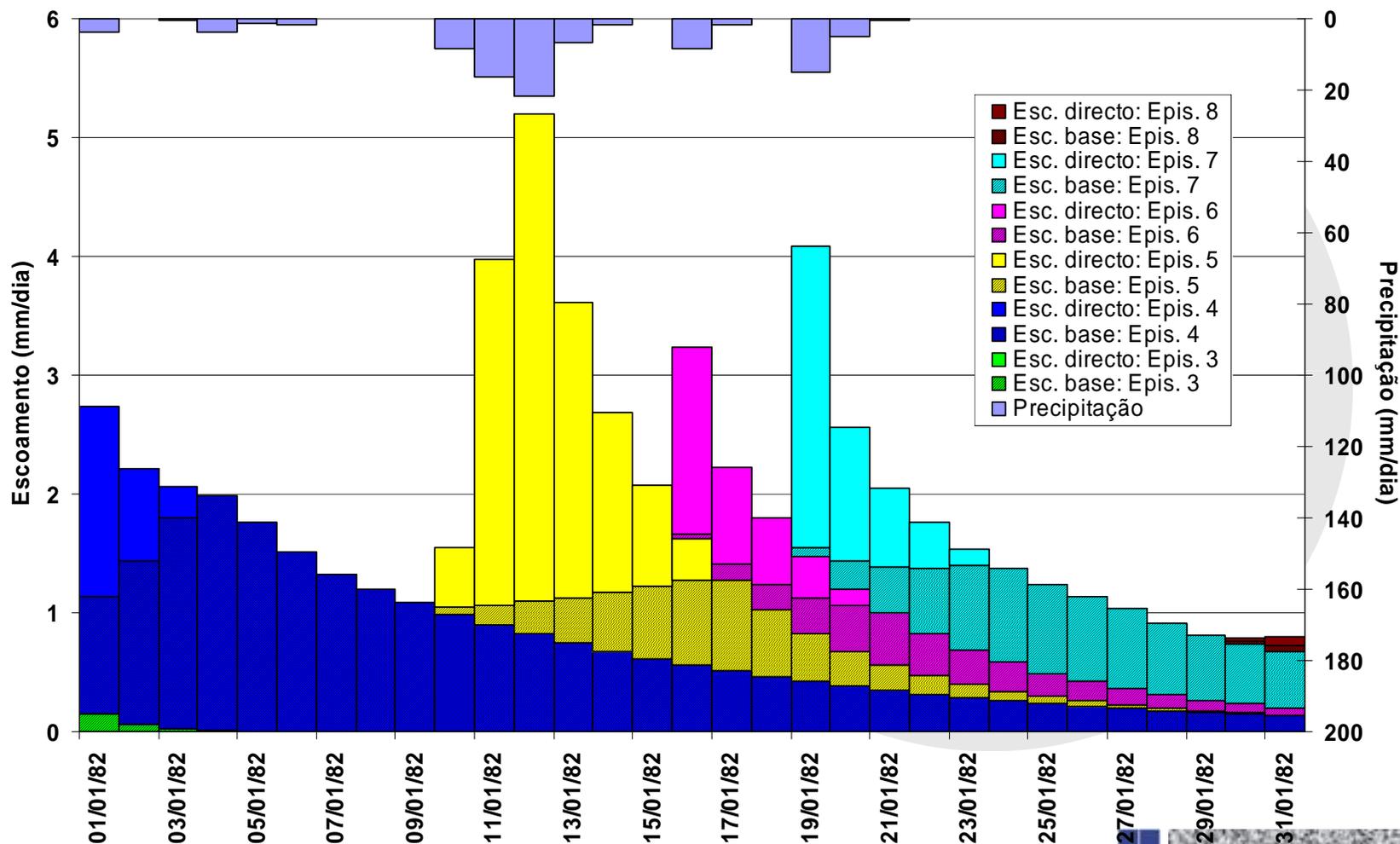
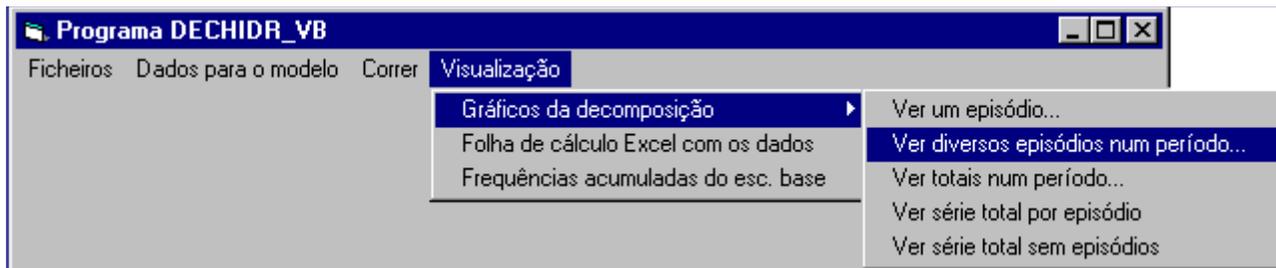
$$N = 19,84 \times A^{0,2}$$

$N$  (horas)

$A$  (km<sup>2</sup>)

Linsley et al. (1975)





# Decomposição do hidrograma



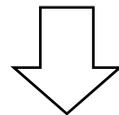
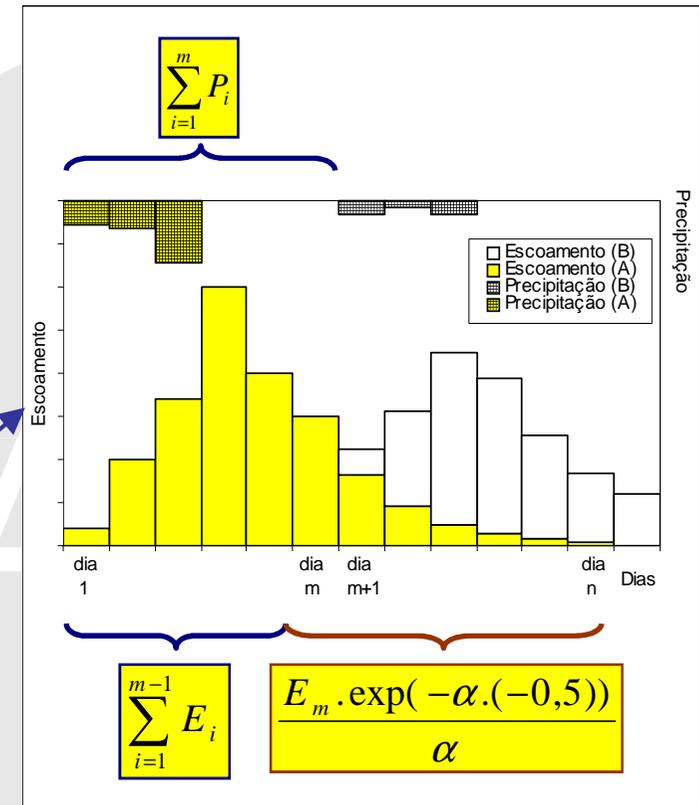
LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

Modelos numérico:

DECHIDR\_VB – Oliveira (2004)

3 opções de corrida do programa:

- (op. 1) com correcção do escoamento total para o mesmo período de 24 dos registos de precipitação ( $E=P$ ) ou sem correcção ( $E \neq P$ );
- (op. 2) considerando o balanço entre a precipitação e o escoamento total para o cálculo do coeficiente de esgotamento ( $E/P$ ) ou não considerando ( $nE/P$ );
- (op. 3) considerando a ocorrência de precipitação para definir o início de um novo período de Precipitação/Escoamento ( $P$ ), ou não considerando ( $nP$ ).

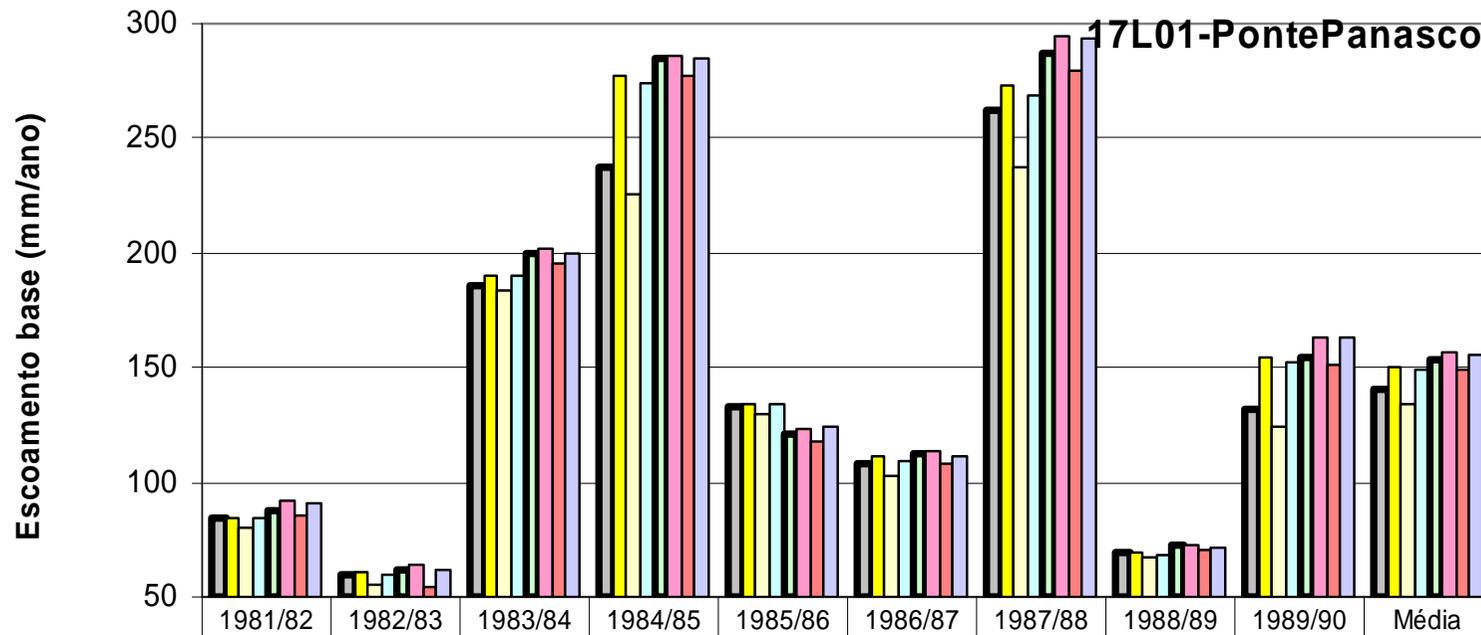


$2^3 \text{ opções} = 8 \text{ combinações}$

# Corrida do DECHIDR



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL



	1981/82	1982/83	1983/84	1984/85	1985/86	1986/87	1987/88	1988/89	1989/90	Média
■ E<>P;P;E/P	84	60	186	237	133	108	262	69	132	141
■ E<>P;P;nE/P	85	61	190	277	134	111	273	69	154	150
□ E<>P;nP;E/P	80	55	184	226	130	103	238	67	124	134
□ E<>P;nP;nE/P	84	60	190	274	134	109	269	68	152	149
■ E=P;P;E/P	88	61	200	285	121	113	287	72	154	153
■ E=P;P;nE/P	92	64	202	286	123	114	294	72	164	157
■ E=P;nP;E/P	86	54	196	277	118	108	279	70	151	149
■ E=P;nP;nE/P	91	62	200	285	124	111	293	71	163	156
P (mm/a)	726	517	994	1066	715	701	1020	594	873	801
E (mm/a)	202	79	323	477	194	163	423	85	290	248