



Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental
PHD-2307 - Hidrologia Aplicada

Ciclo Hidrológico - Balanço Hídrico

Prof. Dr. Kamel Zahed Filho

Prof. Dr. Arisvaldo Vieira Mélo Jr.

2011

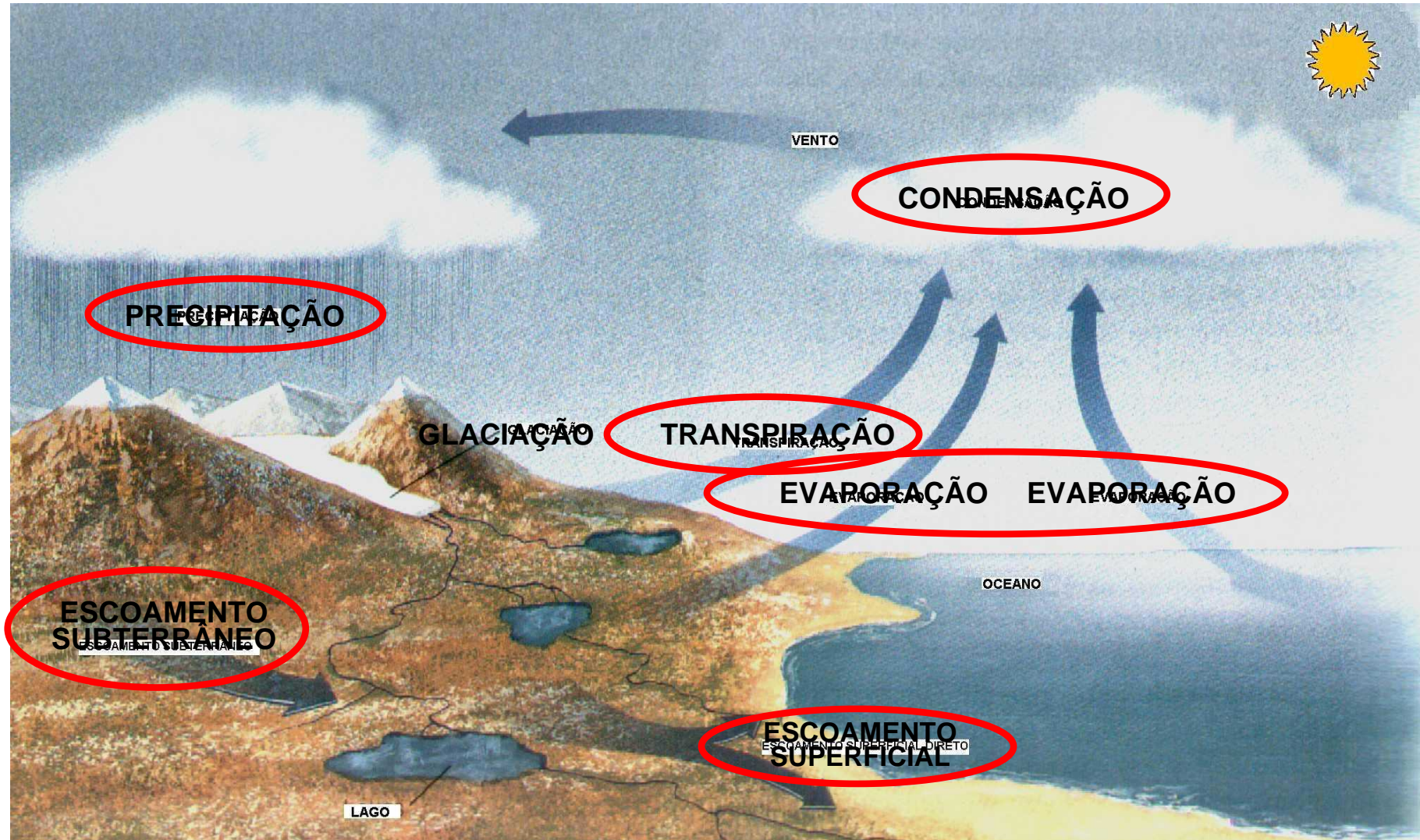
O Ciclo Hidrológico

- Forma de Ícone:



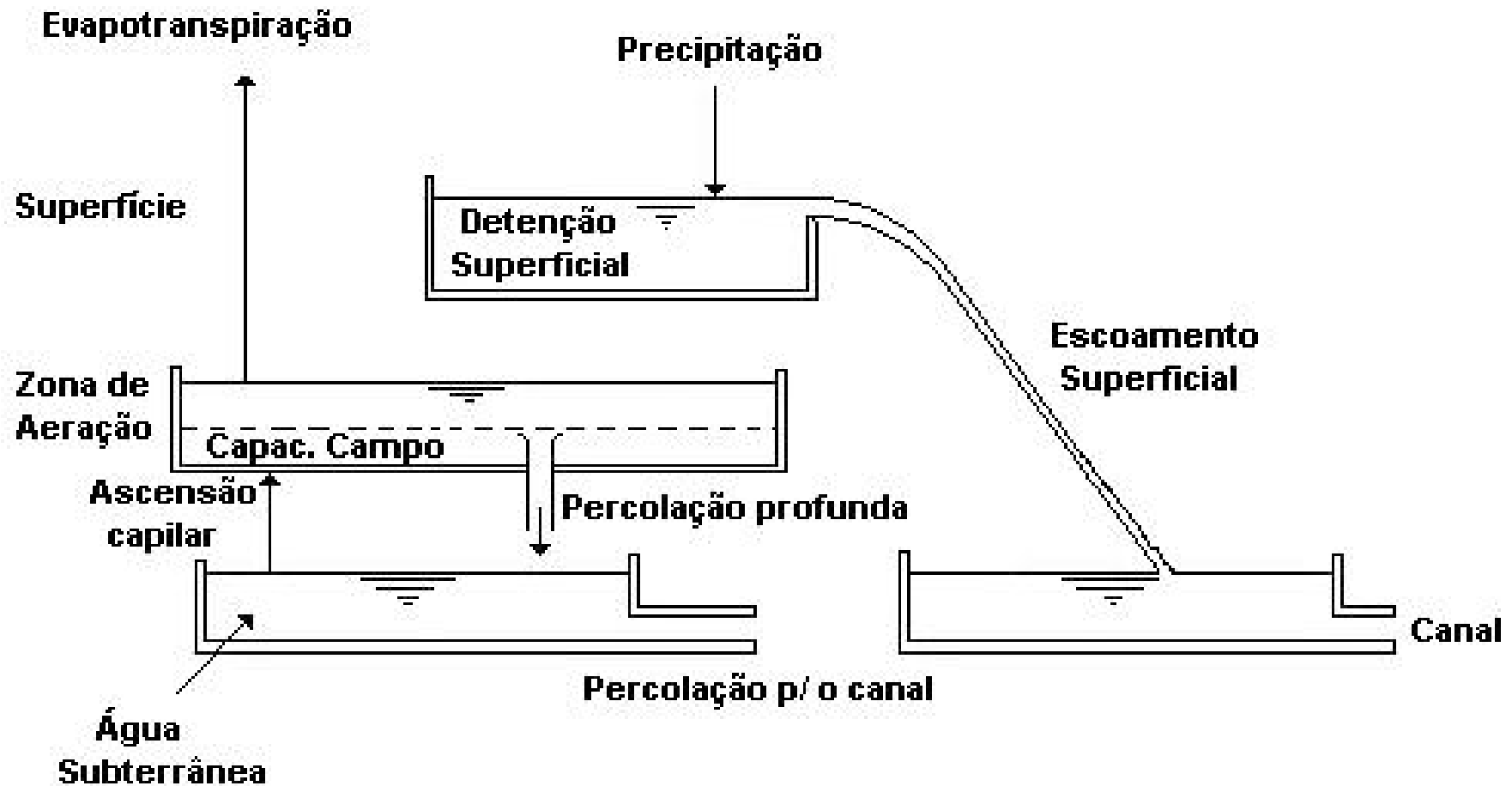
O Ciclo Hidrológico

- Forma Pictórica



O Ciclo Hidrológico

- **Forma Sistêmica**



História da Hidrologia

- **Marcos Vitruvius Pollio (100 AC) → Conceitos próximos aos atuais**
- **Da Vinci e Bernard Palissy - Século XV**
- **Perrault (1608-80) e Mariotte → Vazão do Rio Sena = 16 % da precipitação**
- **Hidrologia Quantitativa → Década de 1930 (Sherman -1932; Horton - 1933; Theiss- 1935)**
- **Computadores + Modelos Conceituais chuva x vazão → Década de 1950**

Ciclo Hidrológico

Fenômeno global de circulação da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado fundamentalmente pela energia solar, associada à gravidade e à rotação da Terra.

Fluxos e Reservas Globais de Água

Reservas Globais

| | 10^{15} m^3 | % do Total |
|-------------------------|-----------------------|-----------------|
| Oceanos | 1350 | 97,57 |
| Geleiras | 25 | 1,81 |
| Água Subterrânea | 8,4 | 0,61 |
| Rios e Lagos | 0,2 | 0,014 |
| Atmosfera | 0,013 | 9,40E-04 |
| Biosfera | 0,0006 | 4,30E-05 |
| TOTAL | 1383,6 | |



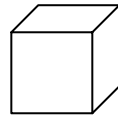
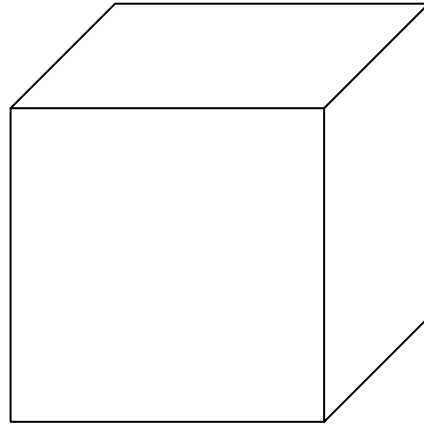
Oceanos - 97,57%



Geleiras - 1,81%



Águas Subterrâneas - 0,61%



Fluxos e Reservas Globais de Água



Rios e Lagos - 0,014%



Atmosfera - 0,00094%

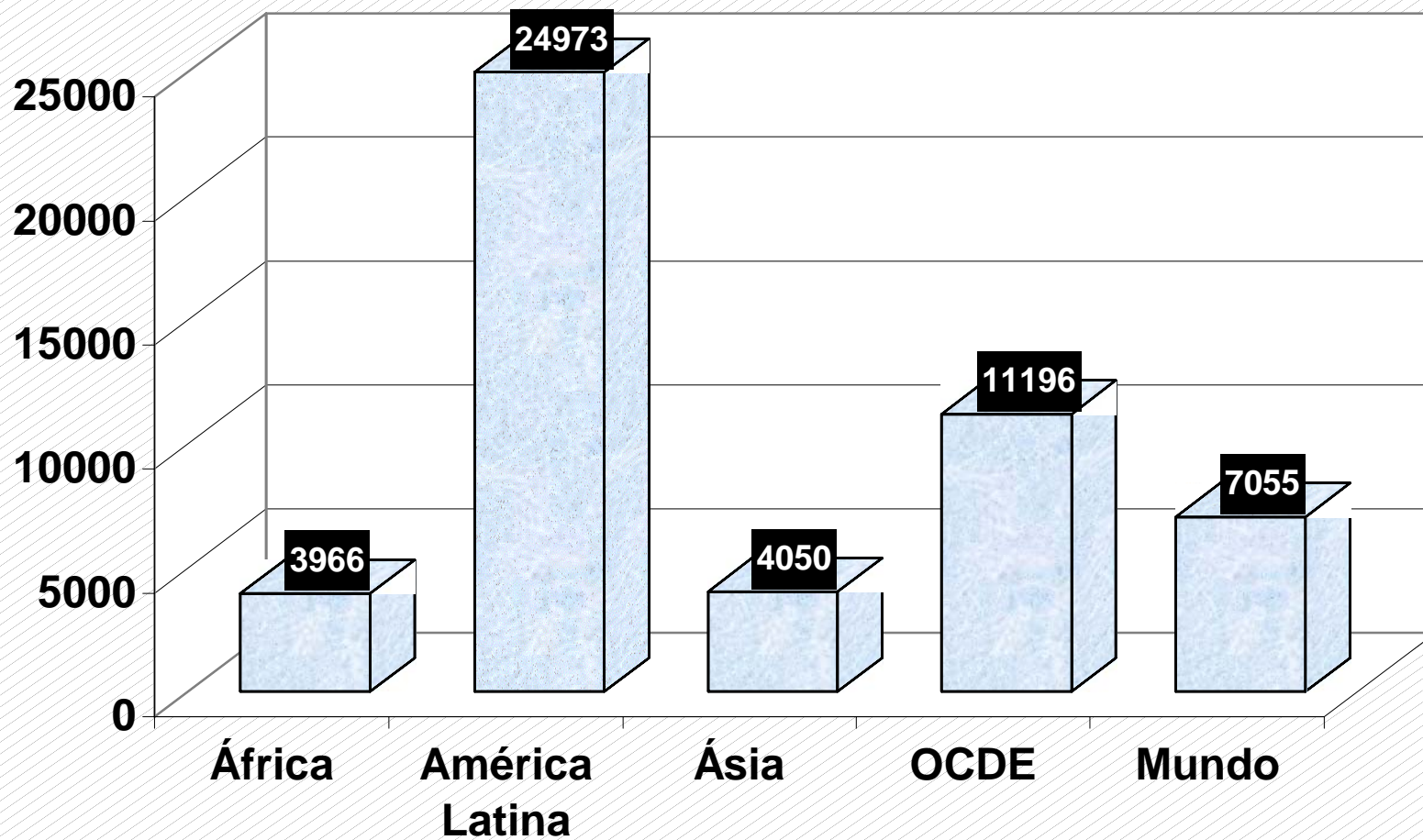


Biosfera - 0,000043%

Produção Hídrica de Superfície Mundial

| Região | Vazão Média (m³/s) | Participação (%) |
|---------------------------|--|-----------------------------|
| América do Sul | 334000 | 23,1 |
| América do Norte | 260000 | 18,0 |
| África | 145000 | 10,0 |
| Europa | 102000 | 7,0 |
| Antártida | 73000 | 5,0 |
| Oceania | 65000 | 5,5 |
| Austrália/Tasmânia | 11000 | 0,8 |
| Ásia | 458000 | 31,6 |
| BRASIL | 177900 | 12,3 |
| Total | 1448000 | 100,0 |

Disponibilidade de Água Per Capita (m³/ano)



Consumos de Água na Produção

16000 litros de água



1 kg de bife



140 litros de água



1 xícara de café



1350 litros de água



1 kg de trigo



900 litros de água



1 kg de milho



1000 litros de água



1 litro de leite



3000 litros de água



1 kg de arroz



Balanço Demanda x Disponibilidade

Para se avaliar se uma região pode atender às diversas demandas (abastecimento, irrigação, uso industrial...), é necessário comparar esses valores de demanda com a disponibilidade de fornecimento.

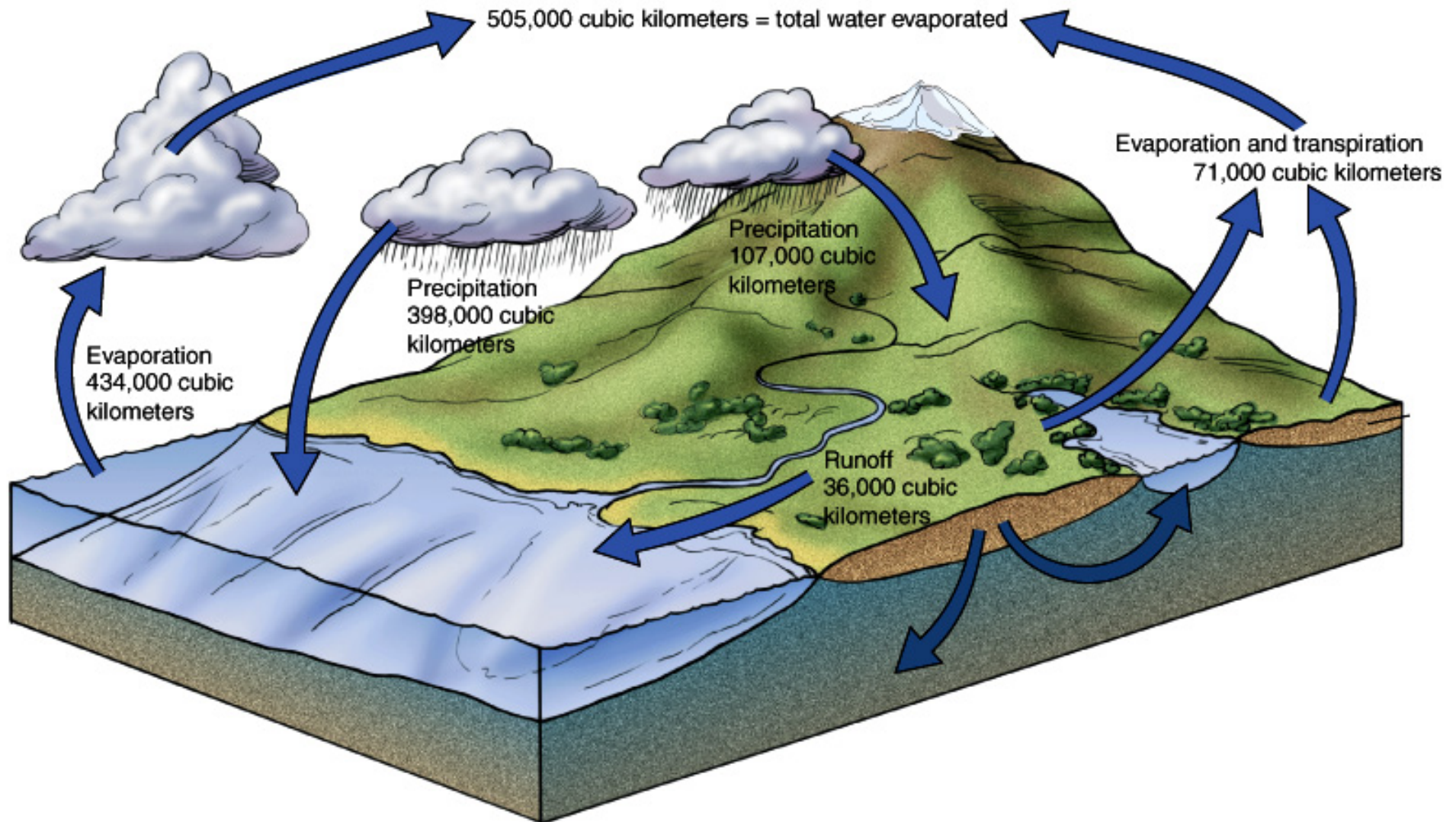
Para isso, vamos avaliar a quantidade de água de cada fase do Ciclo Hidrológico.

Conteúdo virtual de água nos alimentos mais consumidos

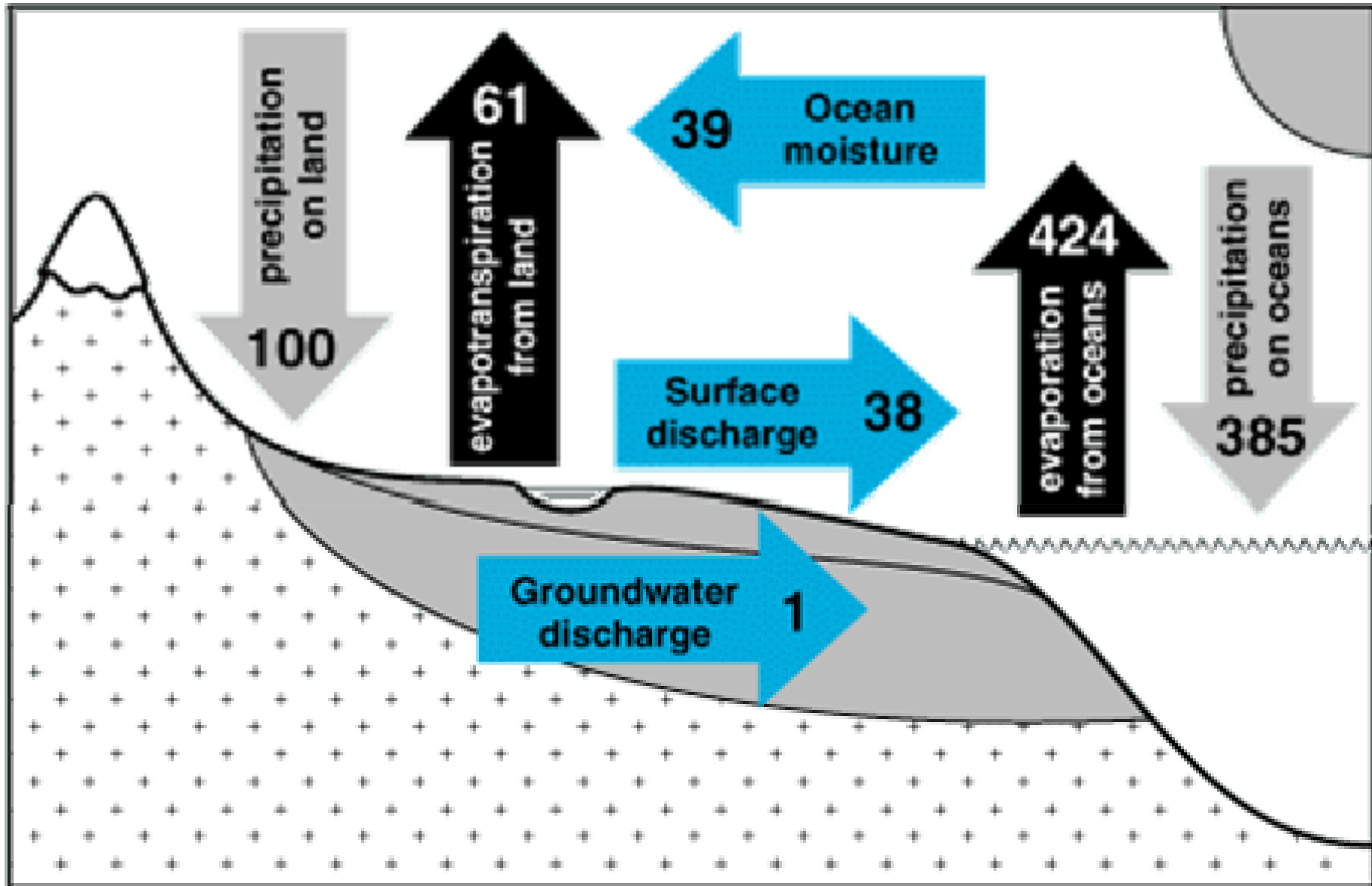
| <i>Alimento</i> | <i>Água virtual (m³kg⁻¹)</i> | <i>Alimento</i> | <i>Água virtual (m³kg⁻¹)</i> |
|-------------------------------------|--|-----------------------------------|--|
| <i>Cereals and Roots</i> | | Vegetables | # 0.19 |
| Rice | 1.31 | Fruits | †† 0.50 |
| Wheat | 0.98 | <i>Animal products</i> | |
| Maize | 0.84 | Beef | 12.56 |
| Other cereals | † 1.24 | Pork | 4.46 |
| Potatoes and other starchy roots | ‡ 0.23 | Poultry | 2.39 |
| <i>Sugar and Sweeteners</i> | § 1.02 | Mutton and goat meat | ‡‡ 4.50 |
| <i>Oil crops and Vegetable oils</i> | | Fish and sea food | 5.00 |
| Soybeans and other oil crops | 3.20 | Eggs | 3.55 |
| Vegetable oils | ¶ 5.08 | Milk | 1.00 |
| <i>Vegetables and Fruits</i> | | Animal fats | 4.00 |
| - | - | Alcoholic beverages ^{§§} | 0.18 |

Sources: virtual water content (VWC) of cereals, soybean, vegetables and fruits from Liu et al. (2007c); VWC of fish and seafood from Zimmer and Renault (2003); VWC of other food items from Chapagain and Hoekstra (2004); Energy content of all food items from FAO (2006).

Ciclo Hidrológico em Números



Ciclo Hidrológico em Números



Balanço Hídrico das Regiões Hidrográficas Brasileiras

| Região | Área | Chuva | Vazão | Evapo | Chuva | Vazão | Evapo | Vazão |
|--|-----------------|---------------|---------------|---------------|-------------|-------------|-------------|-----------|
| | | | | transp. | | | transp. | % |
| | km2 | m3/s | m3/s | m3/s | mm | mm | mm | Chuva |
| Amazonas - Total | 6112000 | 493491 | 202000 | 291491 | 2546 | 1042 | 1504 | 41 |
| Amazonas- Brasil | 3884191 | 277000 | 128900 | 139640 | 2249 | 1047 | 1134 | 47 |
| Tocantins | 757000 | 42387 | 11300 | 31087 | 1766 | 471 | 1295 | 27 |
| Atlântico Norte | 242000 | 16388 | 6000 | 10388 | 2136 | 782 | 1354 | 37 |
| Atlântico Nordeste | 787000 | 27981 | 3130 | 24851 | 1121 | 125 | 996 | 11 |
| São Francisco | 634000 | 19829 | 3040 | 16789 | 986 | 151 | 835 | 15 |
| Atlântico Leste (1) | 242000 | 7784 | 670 | 7114 | 1014 | 87 | 927 | 9 |
| Atlântico Leste (2) | 303000 | 11791 | 3710 | 8081 | 1227 | 386 | 841 | 31 |
| Paraná | 877000 | 39935 | 11200 | 28735 | 1436 | 403 | 1033 | 28 |
| Paraguai | 368000 | 16326 | 1340 | 14986 | 1399 | 115 | 1284 | 8 |
| Uruguai | 178000 | 9589 | 4040 | 5549 | 1699 | 716 | 983 | 42 |
| Atlântico - Sul | 224000 | 10519 | 4570 | 5949 | 1481 | 643 | 838 | 43 |
| Brasil - Amazonas Total | 10724000 | 696020 | 251000 | 445020 | 2047 | 738 | 1309 | 36 |
| Brasil - Amazonas Parcial | 8496191 | 479529 | 177900 | 293169 | 1780 | 660 | 1088 | 37 |
| (1) Do Japaratuba (SE) ao Pardo (BA) | | | | | | | | |
| (1) Do Jequitinhonha (MG/BA) ao Paraíba do Sul (SP/MG/RJ) | | | | | | | | |

CONVERSÃO DE UNIDADES

- A altura de chuva equivale à altura da lâmina d'água que seria obtida se o volume de água de uma chuva fosse distribuído por uma lâmina uniforme sobre uma bacia hidrográfica.
- Se, em um período de um ano, houve uma chuva acumula de P mm, sobre uma bacia hidrográfica com A km² de área, então o volume precipitado em um ano foi de:

$$P(\text{mm}) * 10^{-3}(\text{m/mm}) * A(\text{km}^2) * 10^6 (\text{m}^2/\text{km}^2)$$

A vazão equivalente a este volume seria dada por:

$$\text{Vazão} = \text{Volume} / \text{1ano}$$

$$P(\text{m}^3 / \text{s}) = \frac{P(\text{mm}) * 10^{-3} (\text{m} / \text{mm}) * A(\text{km}^2) * 10^6 (\text{m}^2 / \text{km}^2)}{365 * 24 * 3600(\text{seg} / \text{ano})}$$

Disponibilidade hídrica per capita nas grandes bacias brasileiras.

| Bacia hidrográfica | | Área 1.000 km ² | % | População 1991 | % | Densidade hab/km ² | Vazão m ³ /s | Disponibilidade m ³ /dia/hab |
|--------------------|--------------------|-------------------------------|-----|-------------------|-----|----------------------------------|----------------------------|--|
| 1 | Amazonas (1) | 3.900 | 46 | 6.245.597 | 4 | 1,60 | 120.000 | 606.379 |
| 2 | Tocantins | 757 | 9 | 3.271.674 | 2 | 4,32 | 11.800 | 113.828 |
| 3A | Atlântico Norte | 76 | 1 | 3.424.511 | 2 | 45,06 | 3.660 | 33.730 |
| 3B | Atlântico Nordeste | 953 | 11 | 25.761.672 | 18 | 27,03 | 5.390 | 6.603 |
| 4 | São Francisco | 634 | 7 | 10.958.888 | 7 | 17,29 | 2.850 | 8.208 |
| 5A | Atlântico Leste 1 | 242 | 3 | 10.909.302 | 7 | 45,08 | 680 | 1.967 |
| 5B | Atlântico Leste 2 | 303 | 4 | 22.598.203 | 15 | 74,58 | 3.670 | 5.125 |
| 6A | Paraguai (1) | 368 | 4 | 1.700.168 | 1 | 4,62 | 1.290 | 23.946 |
| 6B | Paraná | 877 | 10 | 46.622.840 | 32 | 53,16 | 11.000 | 7.446 |
| 7 | Uruguai (1) | 178 | 2 | 3.584.152 | 2 | 20,14 | 4.150 | 36.543 |
| 8 | Atlântico Sudeste | 224 | 3 | 11.605.507 | 8 | 51,81 | 4.300 | 11.693 |
| | Brasil | 8.512 | 100 | 146.682.514 | 100 | 17,23 | 168.790 | 36.317 |

(1) - Somente a área situada no território brasileiro.

Fonte: Aspectos de sustentabilidade e vulnerabilidade dos recursos hídricos - Benevides, V.F. de Sá e Beekman, Gertjan B. - XI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Recife, 1995.

Balanço hídrico das grandes bacias hidrográficas brasileiras.

| Bacia hidrográfica | | Área 1.000 km ² | P mm/ano | Q m ³ /s | q l/s/km ² | E mm/ano | Escoamento superficial % |
|--------------------|--------------------------|-------------------------------|-------------|------------------------|--------------------------|-------------|-----------------------------|
| Nº | Denominação | | | | | | |
| 1 | Amazonas total | 6.112 | 2.460 | 209.000 | 34,2 | 1.381 | 44 |
| 2 | Tocantins | 757 | 1.660 | 11.800 | 15,6 | 1.168 | 30 |
| 3A | Atlântico Sul – Norte | 76 | 2.950 | 3.660 | 48,2 | 1.430 | 52 |
| 3B | Atlântico Sul – Nordeste | 953 | 1.328 | 5.390 | 5,7 | 1.150 | 13 |
| 4 | São Francisco | 634 | 916 | 2.850 | 4,5 | 774 | 15 |
| 5A | Atlântico Leste 1 | 242 | 895 | 680 | 2,8 | 806 | 10 |
| 5B | Atlântico Leste 2 | 303 | 1.229 | 3.670 | 12,1 | 847 | 31 |
| 6A | Paraná | 877 | 1.385 | 11.000 | 12,5 | 989 | 29 |
| 6B | Paraguai | 368 | 1.370 | 1.290 | 3,5 | 1.259 | 8 |
| 7 | Uruguai | 178 | 1.567 | 4.150 | 23,3 | 831 | 47 |
| 8 | Atlântico Sudeste | 224 | 1.394 | 4.300 | 19,2 | 788 | 43 |
| | Brasil com Amazonas | 10.724 | 1.954 | 257.790 | 24,0 | 1.195 | 39 |
| | Brasil | 8.512 | | 168.790 | 19,8 | | |
| | Amazonas Cabeceiras | 2.212 | | 89.000 | 40,2 | | |
| | Amazonas Brasileiro | 3.900 | | 120.000 | 30,8 | | |

P= ; Q= ; q= ; E .

Fonte: Mapa Disponibilidade Hídrica no Brasil - MME/DNAEE/CGRH – 1994.

Observações: Atlântico Norte: do rio Oiapoque à bacia do rio Araguari.

Atlântico Nordeste: da bacia do rio Capim (PA) até bacia do rio Coruripe (AL).

Atlântico Leste 1: da bacia do rio Japarutuba (SE) até a bacia do rio Pardo (BA).

Atlântico Leste 2: da bacia do rio Jequetinhonha até a bacia do rio Paraíba do Sul.

Atlântico Sudeste: da bacia do ribeirão Grande (SP) até ao rio Jaguarão (RS).

Bacias dos rios Paraguai, Paraná e Uruguai: partes das bacias no território brasileiro.

Disponibilidade Hídrica em m³/ano/habitante

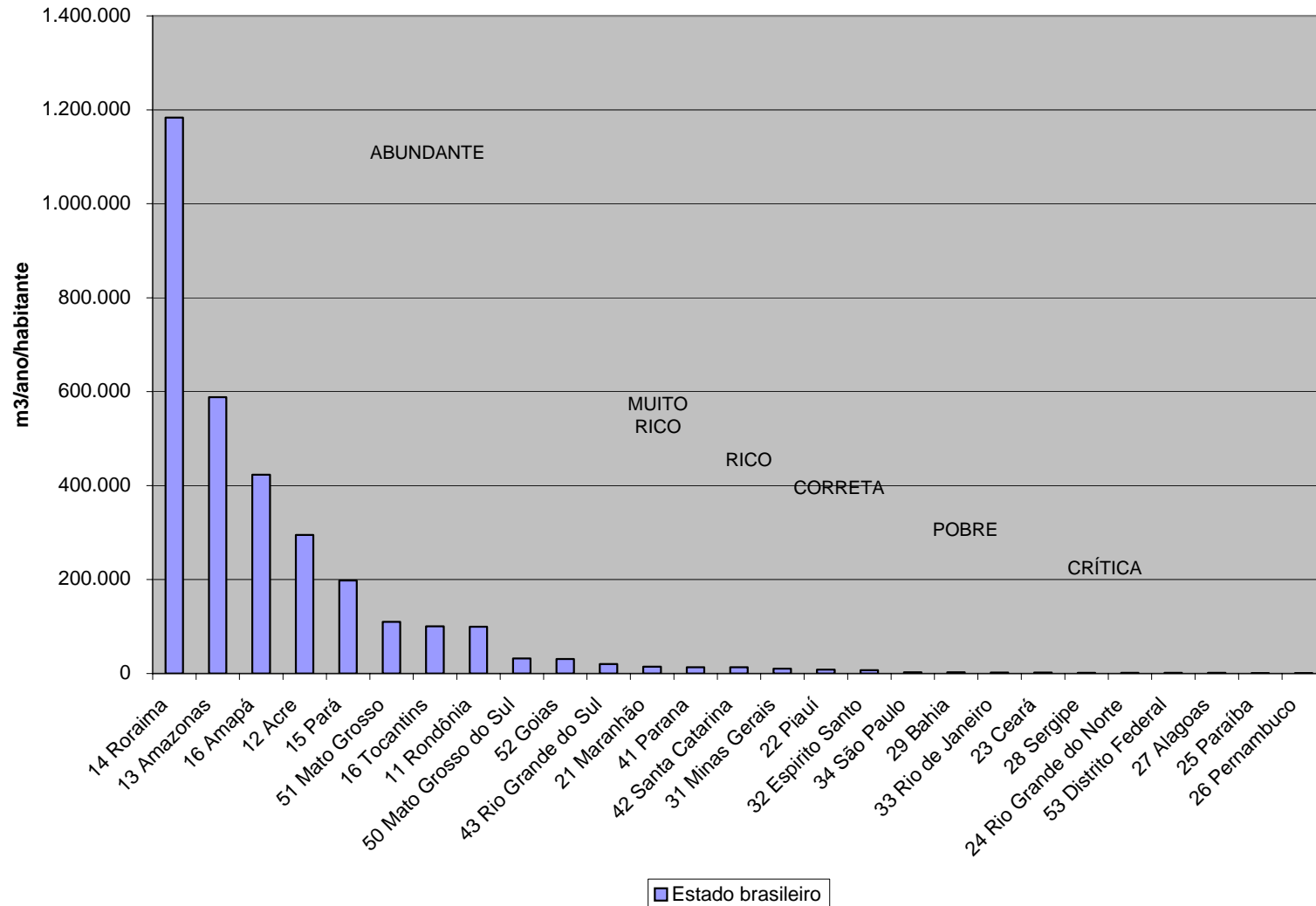
| | País | Valor | País | Valor | Estado | Valor |
|------------------|---------------|------------|---------------------|------------|---------------------|------------|
| | | m3/hab/ano | americano | m3/hab/ano | brasileiro | m3/hab/ano |
| Abundância | Finlândia | 22.600 | Suriname | 483.342 | Rondônia | 132.818 |
| > 20.000 | Suécia | 21.800 | Guyana | 283.677 | Acre | 369.305 |
| | | | Canada | 93.235 | Amazonas | 878.929 |
| | | | Belize | 69.627 | Roraima | 1.747.010 |
| | | | Panama | 52.037 | Pará | 217.058 |
| | | | Bolívia | 37.701 | Amapá | 678.929 |
| | | | Venezuela | 36.830 | Tocantins | 137.666 |
| | | | Nicaragua | 36.406 | Rio Grande Sul | 20.798 |
| | | | Chile | 31.571 | Mato Grosso Sul | 39.185 |
| | | | Brazil | 31.293 | Mato Grosso | 258.242 |
| | | | Colombia | 26.223 | Goiás | 39.185 |
| | | | Colombia | 26.223 | | |
| | | | Ecuador | 25.791 | | |
| | | | Costa Rica | 24.730 | | |
| Muito rico | Irlanda | 14.000 | Argentina | 19.212 | Maranhão | 17.184 |
| > 10.000 | Luxemburgo | 12.500 | Paraguay | 18.000 | Minas Gerais | 12.325 |
| | Áustria | 12.000 | Uruguay | 17.937 | Paraná | 13.431 |
| | | | Guatemala | 10.740 | Santa Catarina | 13.662 |
| Rico | Países Baixos | 6.100 | Honduras | 9.015 | Piauí | 9.608 |
| > 5.000 | Portugal | 6.100 | United States | 8.974 | Espírito Santo | 7.235 |
| | Grécia | 5.900 | | | | |
| Situação correta | França | 3.600 | Trinidad and Tobago | 3.975 | Bahia | 3.028 |
| > 2.500 | Itália | 3.300 | Mexico | 3.751 | São Paulo | 2.913 |
| | Espanha | 2.900 | Jamaica | 3.270 | | |
| | | | El Salvador | 3.141 | | |
| | | | Cuba | 3.104 | | |
| Pobres | Reino Unido | 2.200 | Peru | 1.613 | Ceará | 2.436 |
| < 2.500 | Alemanha | 2.000 | | | Rio Grande do Norte | 1.781 |
| | Bélgica | 1.900 | | | Alagoas | 1.751 |
| | | | | | Sergipe | 1.743 |
| | | | | | Rio de Janeiro | 2.315 |
| | | | | | Distrito Federal | 1.752 |
| Situação crítica | | | Haiti | 1.383 | Paraíba | 1.437 |
| < 1.500 | | | | | Pernambuco | 1.320 |

Fontes :

1- Les politiques de l'eau en Europe, Bernard Barraque - Edition La Découverte - Paris, 1995

2- Disponibilidades Hídricas per capita no Brasil - Comissão de Gestão da ABRH

Disponibilidades Hídricas per Capita dos Estados Brasileiros (m³/ano/habitante)



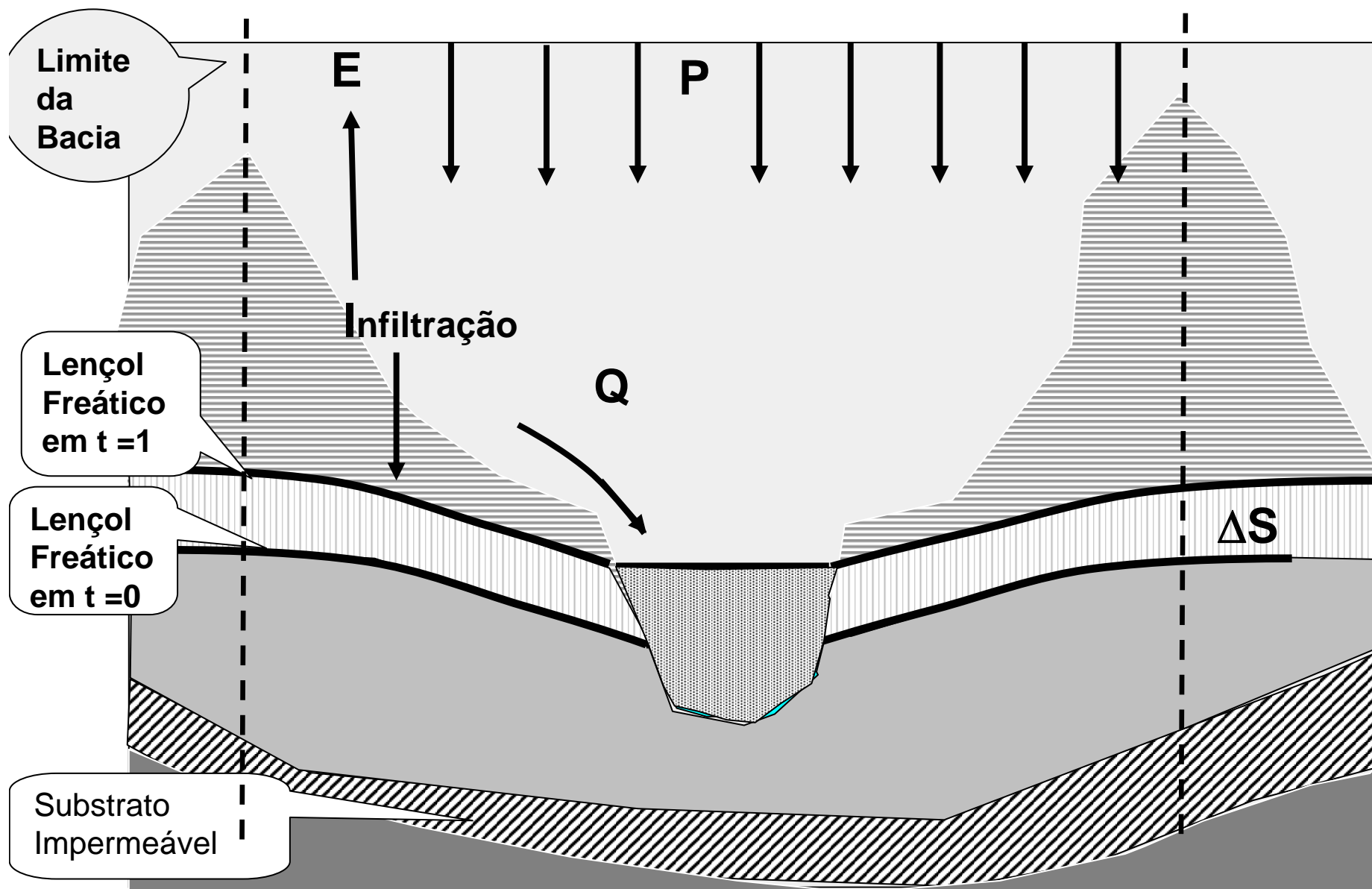
*Disponibilidade
Hídrica Social
(Rebouças, 1994)
Censo IBGE 1991*

| ESTADOS | Vazão total Rios* km ³ /ano | Disponibilidade social **m ³ /hab/ano | Demanda total m ³ /hab/ano** | Nível % de Utilização 1980*** | Nível % de Utilização 1991 |
|---------------|---|---|--|----------------------------------|-------------------------------|
| Rondônia | 150,2 | 132.817 | 44 | 0,03 | 0,03 |
| Acre | 154,0 | 369.158 | 95 | 0,00 | 0,02 |
| Amazonas | 1.848,3 | 878.928 | 80 | 0,00 | 0,00 |
| Roraima | 372,3 | 1.724.010 | 92 | 0,00 | 0,00 |
| Pará | 1.124,7 | 217.058 | 46 | 0,00 | 0,02 |
| Amapá | 196,0 | 678.929 | 69 | 0,01 | 0,01 |
| Maranhão | 84,7 | 17.207 | 61 | 0,30 | 0,35 |
| Piauí | 24,8 | 9.608 | 101 | 0,89 | 1,05 |
| Ceará | 15,5 | 2.436 | 259 | 8,65 | 10,63 |
| R. G. Norte | 4,3 | 1.781 | 207 | 9,77 | 11,62 |
| Paraíba | 4,6 | 1.437 | 172 | 10,00 | 12,00 |
| Pernambuco | 9,4 | 1.320 | 268 | 16,91 | 20,30 |
| Alagoas | 4,4 | 1.751 | 159 | 7,50 | 9,10 |
| Sergipe | 2,6 | 2.826 | 161 | 7,69 | 5,70 |
| Bahia | 35,9 | 3.028 | 173 | 4,76 | 5,71 |
| M. Gerais | 193,9 | 12.325 | 262 | 1,77 | 2,12 |
| E. Santo | 18,8 | 7.235 | 223 | 2,55 | 3,10 |
| R. Janeiro | 29,6 | 2.315 | 224 | 8,07 | 9,68 |
| S. Paulo | 91,9 | 3.135 | 373 | 9,48 | 12,00 |
| Paraná | 113,4 | 13.431 | 189 | 1,17 | 1,41 |
| Sta. Catarina | 62,0 | 13.662 | 366 | 2,23 | 2,68 |
| R. G. Sul | 190,0 | 20.798 | 1015 | 4,07 | 4,90 |
| M. G. Sul | 69,7 | 39.185 | 174 | 0,37 | 0,44 |
| M. Grosso | 522,3 | 258.242 | 89 | 0,02 | 0,03 |
| Goiás | 283,9 | 70.753 | 177 | 0,21 | 0,25 |
| D. Federal | 2,8 | 1.752 | 150 | 7,14 | 8,56 |
| BRASIL | 5.610,0 | 38.185 | 273 | 0,60 | 0,71 |

* DNAEE, 1985, ** População IBGE, 1991,

Disponibilidade
hídrica social
na RMSP
 $\cong 170 \text{ m}^3 / \text{hab.}$
/ano

Balanço Hídrico de uma Bacia Hidrográfica



Balanço Hídrico de uma Bacia Hidrográfica

$$P = Q + E \pm \Delta S$$

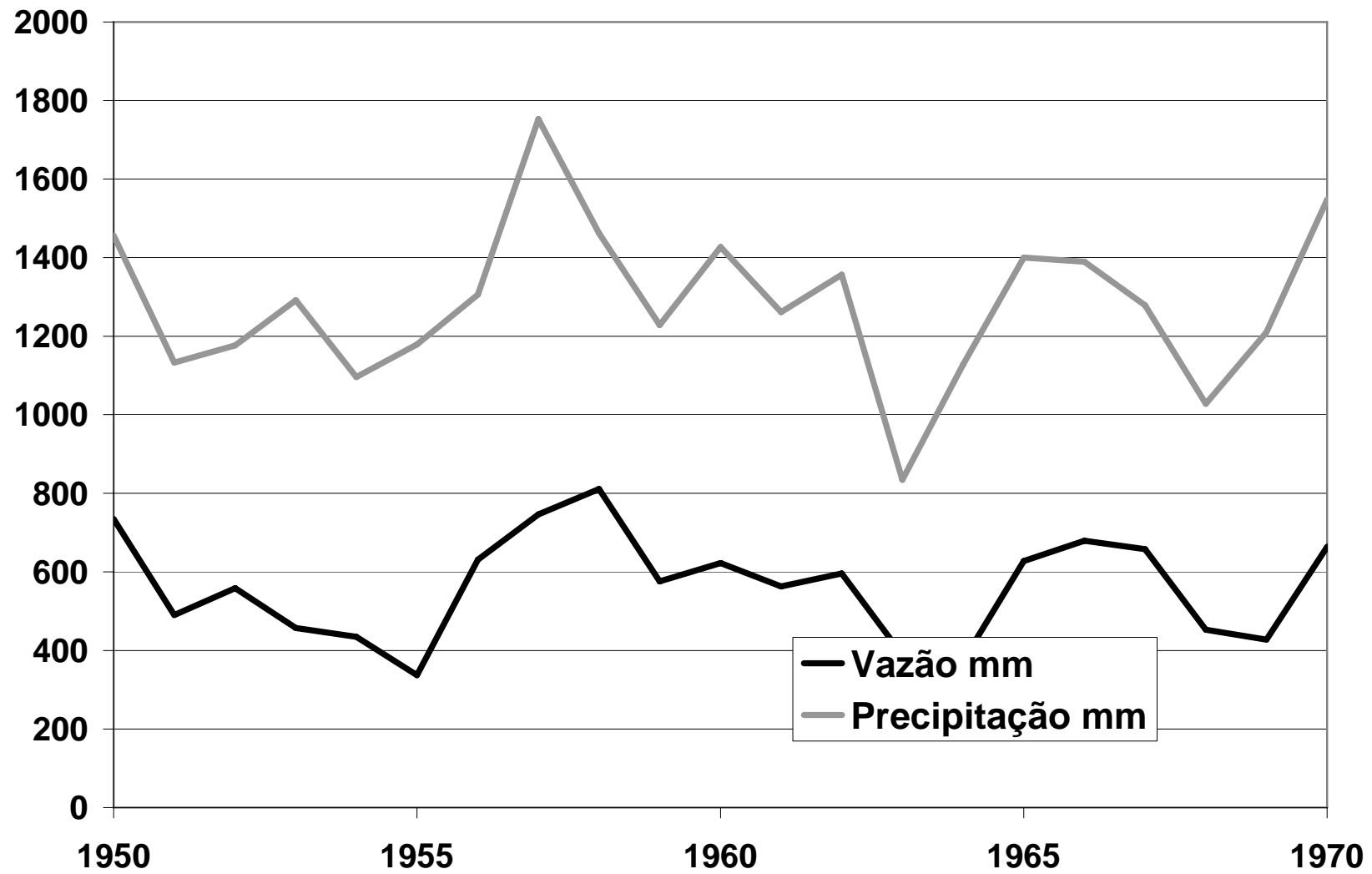
- onde :
- P = Precipitação
- Q = Vazão
- E = Evapotranspiração
- ΔS = Armazenamento Subterrâneo

Dados da Bacia do Guarapiranga

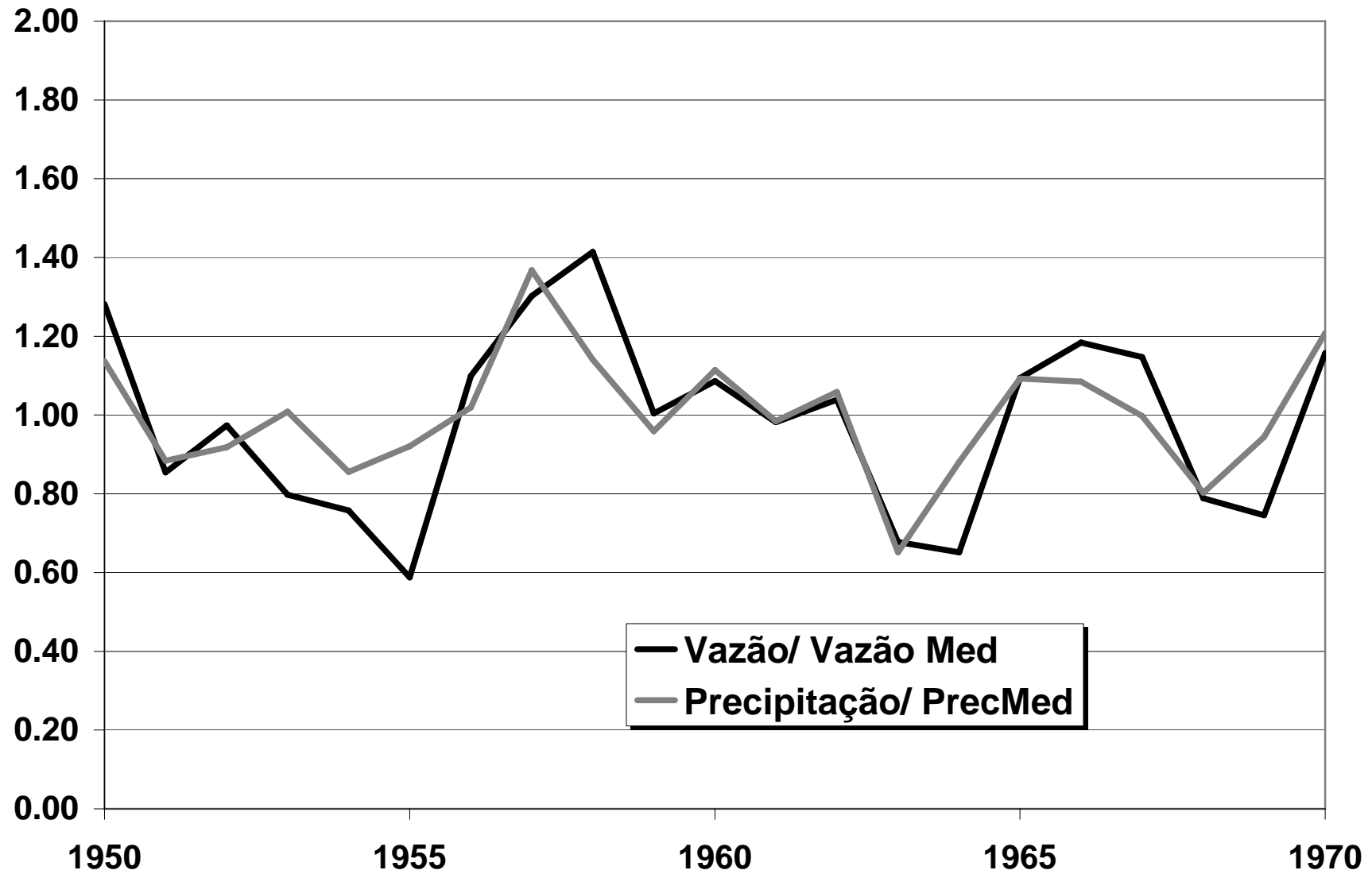
Dados da Bacia do Guarapiranga (área = 630 km²)

| Ano | Vazão mm | Precipitação mm | Vazão/ Vazão Med | Precipitação/ PrecMed | Vazão Acumulada | Precipitação Acumulada |
|--------------|-------------|--------------------|---------------------|--------------------------|--------------------|---------------------------|
| 1950 | 735 | 1456 | 1.28 | 1.14 | 735 | 1456 |
| 1951 | 490 | 1133 | 0.85 | 0.88 | 1225 | 2589 |
| 1952 | 559 | 1177 | 0.97 | 0.92 | 1784 | 3766 |
| 1953 | 458 | 1292 | 0.80 | 1.01 | 2241 | 5057 |
| 1954 | 435 | 1096 | 0.76 | 0.86 | 2676 | 6153 |
| 1955 | 337 | 1179 | 0.59 | 0.92 | 3013 | 7333 |
| 1956 | 631 | 1306 | 1.10 | 1.02 | 3644 | 8638 |
| 1957 | 747 | 1752 | 1.30 | 1.37 | 4391 | 10391 |
| 1958 | 811 | 1462 | 1.41 | 1.14 | 5202 | 11852 |
| 1959 | 576 | 1228 | 1.00 | 0.96 | 5778 | 13081 |
| 1960 | 623 | 1427 | 1.09 | 1.11 | 6400 | 14508 |
| 1961 | 563 | 1261 | 0.98 | 0.98 | 6964 | 15769 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 1971 | 465 | 1370 | 0.81 | 1.07 | 12295 | 28313 |
| 1972 | 518 | 1213 | 0.90 | 0.95 | 12813 | 29525 |
| 1973 | 610 | 1226 | 1.06 | 0.96 | 13423 | 30751 |
| 1974 | 526 | 1182 | 0.92 | 0.92 | 13950 | 31933 |
| 1975 | 548 | 1128 | 0.95 | 0.88 | 14497 | 33062 |
| 1976 | 1082 | 1838 | 1.89 | 1.43 | 15579 | 34900 |
| 1977 | 566 | 1110 | 0.99 | 0.87 | 16144 | 36010 |
| 1978 | 559 | 1305 | 0.97 | 1.02 | 16703 | 37314 |
| 1979 | 504 | 1119 | 0.88 | 0.87 | 17208 | 38433 |
| Média | 574 | 1281 | | | | |

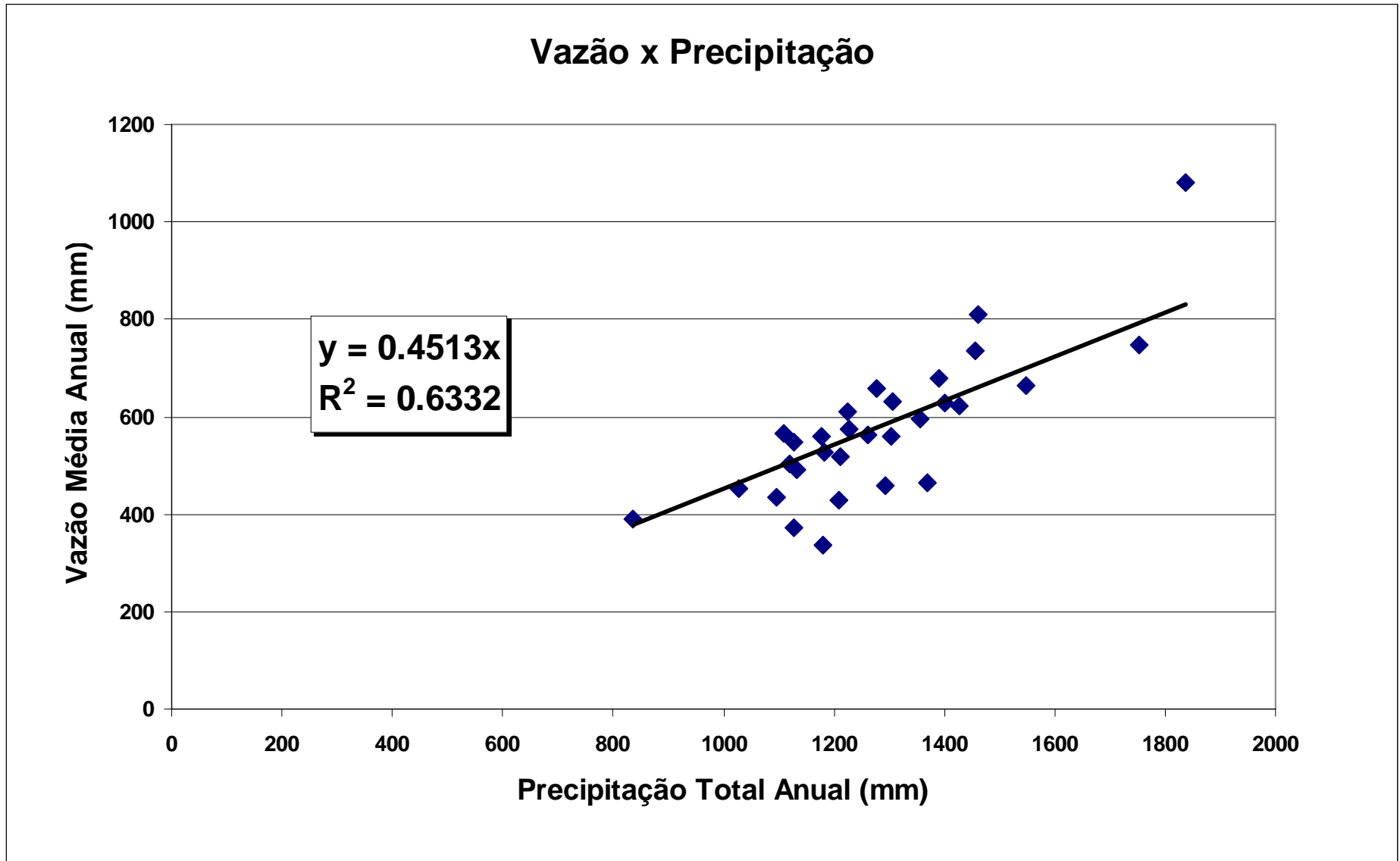
Comportamento Vazão x Chuva



Comportamento Vazão x Chuva (Adimensional)



Correlação Vazão x Chuva



Balanço Hídrico de uma Bacia

$$\sum P = \sum Q + \sum E \pm \sum \Delta S$$



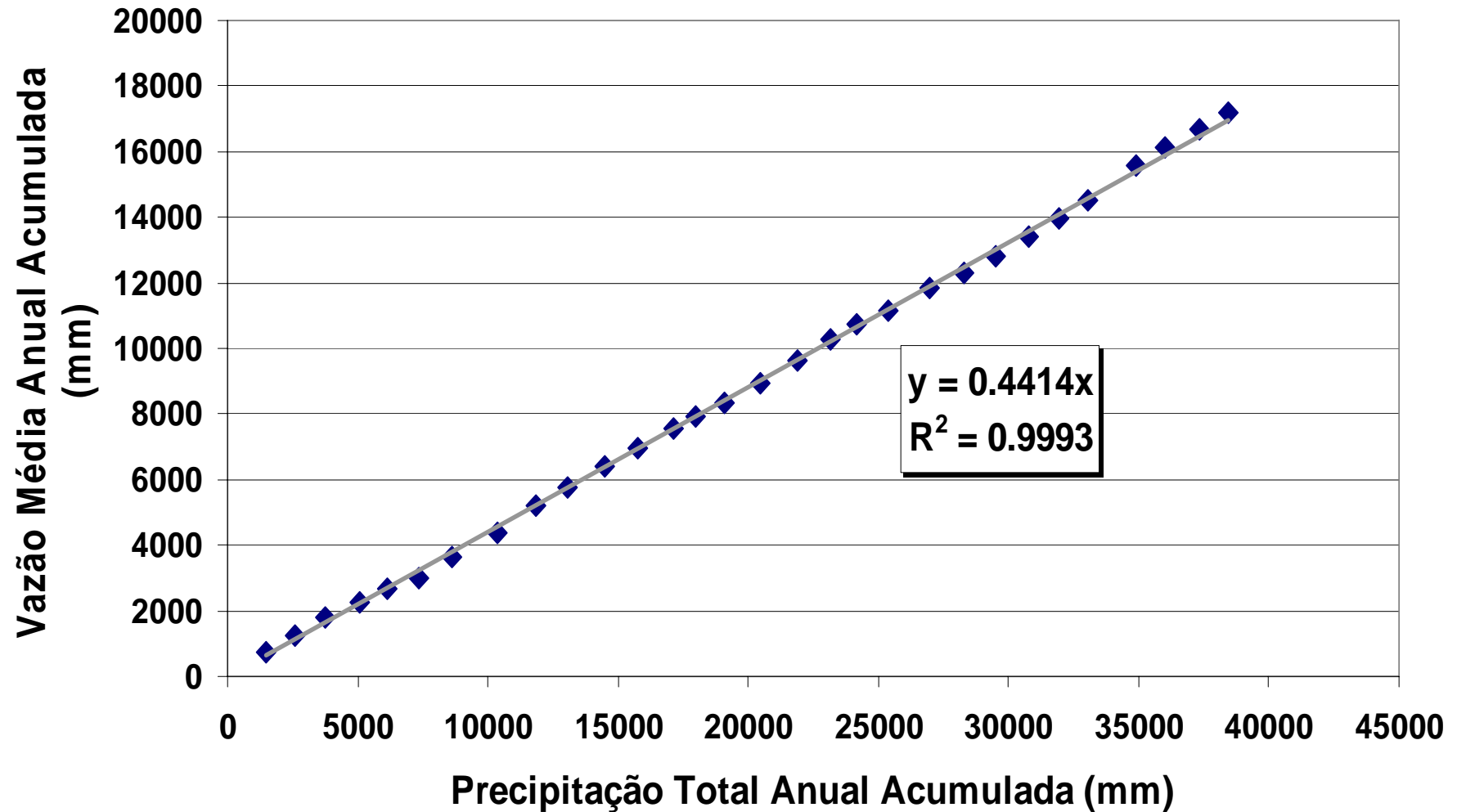
Crescem



Tende a 0

Correlação Vazão x Chuva

Vazão Acumulada x Precipitação Acumulada



*Eu que sei prever a trajetória dos astros,
nada sei dizer sobre o movimento de
uma pequena gota de água*

Galileo Galilei

FIM