



COLEÇÃO ENSINO DA CIÊNCIA E DA TECNOLOGIA

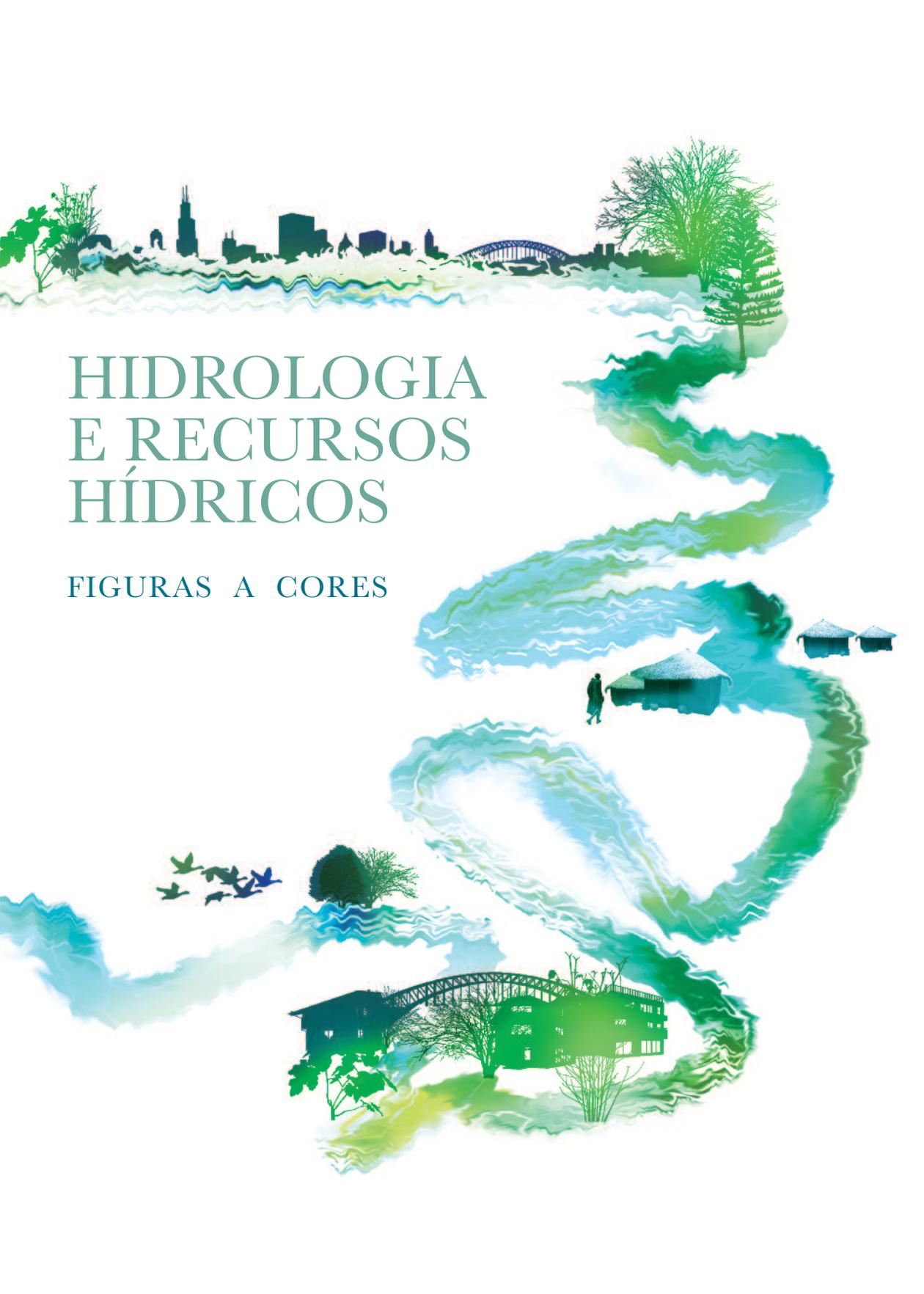
# HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS

JOÃO REIS HIPÓLITO  
ÁLVARO CARMO VAZ

3<sup>a</sup> EDIÇÃO



PRESS



# HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS

FIGURAS A CORES

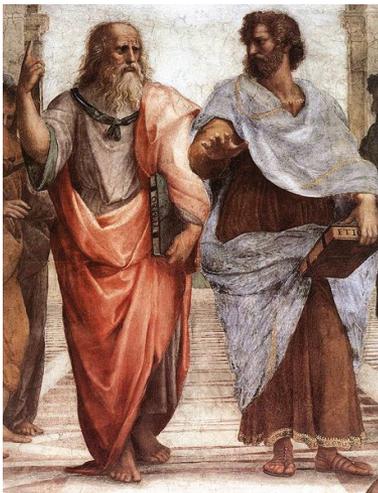
# 1

---

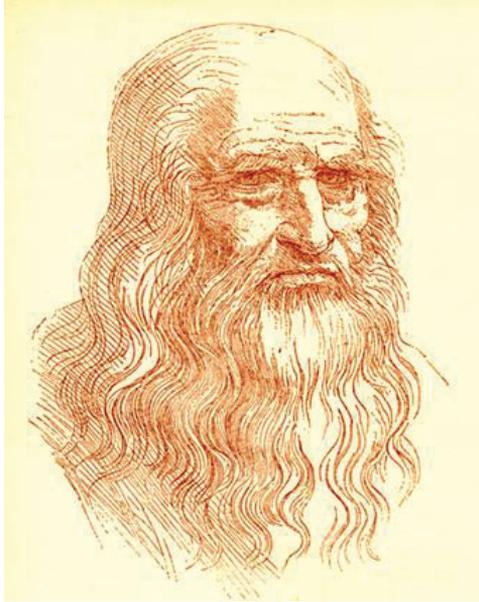
INTRODUÇÃO À HIDROLOGIA  
E AOS RECURSOS HÍDRICOS



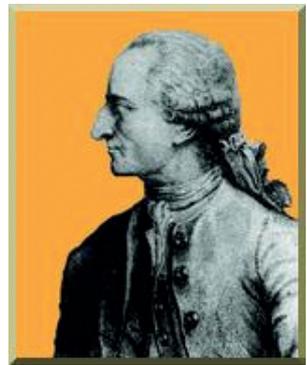
**Figura 1.1:** Nilómetro de Elefantina | **pág. 5.**



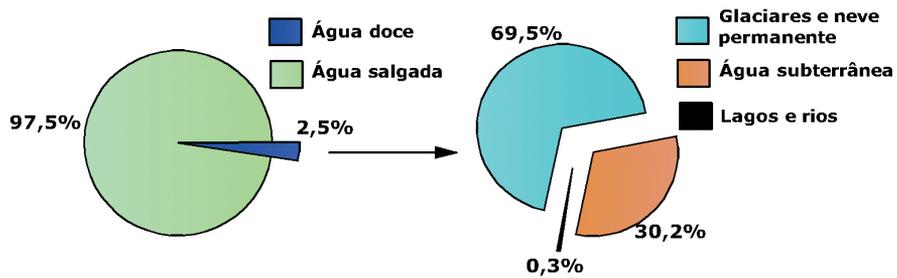
**Figura 1.2:** Platão e Aristóteles (fragmento do quadro *A Escola de Atenas* de Rafael) e Anaxágoras | **pág. 6.**



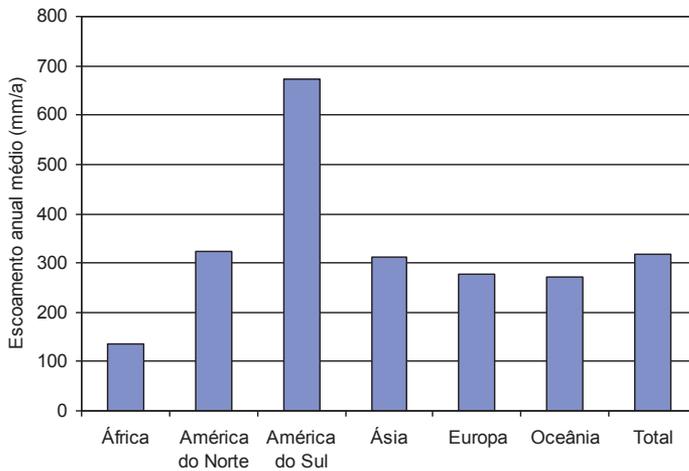
**Figura 1.3:** Leonardo da Vinci (Autorretrato) | **pág. 7.**



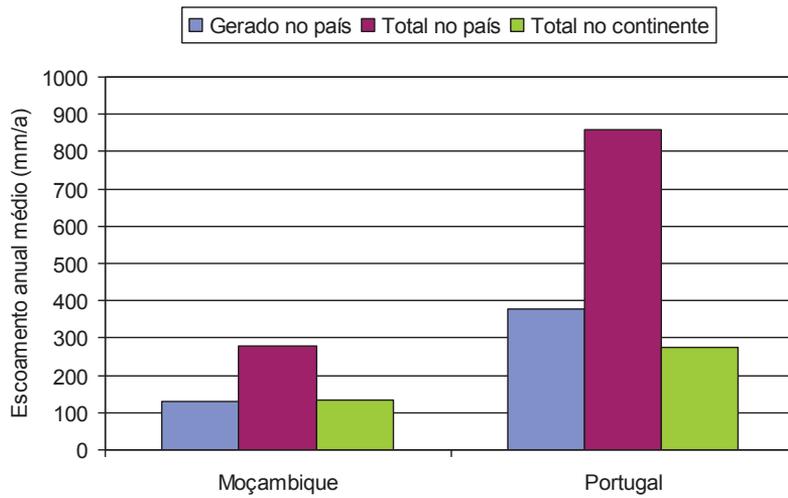
**Figura 1.4:** Edmond Halley, Daniel Bernoulli, Antoine de Chézy | **pág. 9.**



**Figura 1.6:** Distribuição de água na Terra | **pág. 11.**



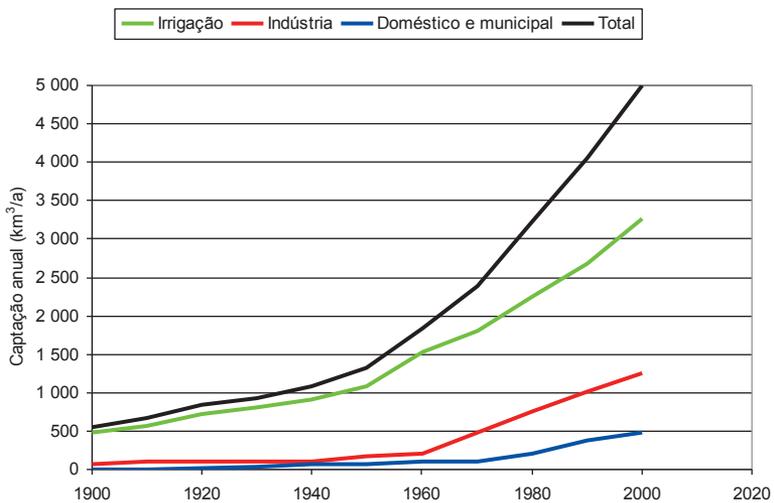
**Figura 1.7:** Escoamentos anuais médios expressos em altura de água | **pág. 14.**



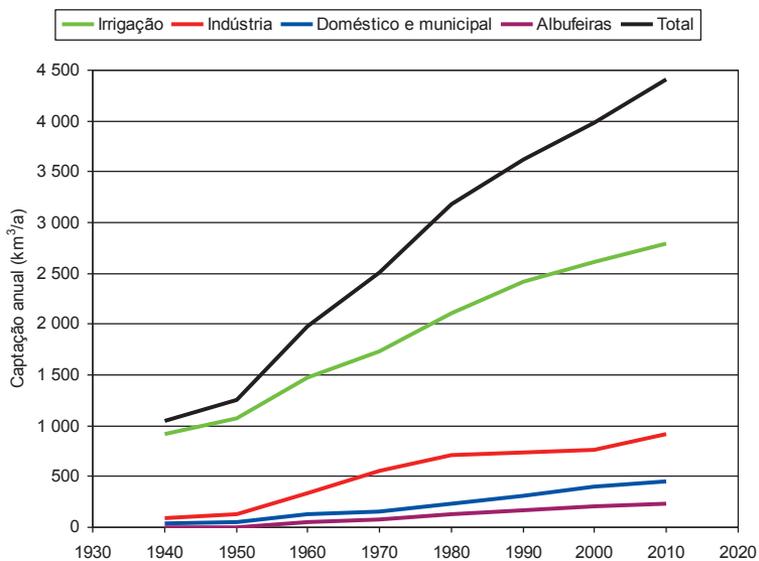
**Figura 1.8:** Alturas dos escoamentos anuais médios em Moçambique e Portugal comparadas com os valores dos respetivos continentes | **pág. 15.**



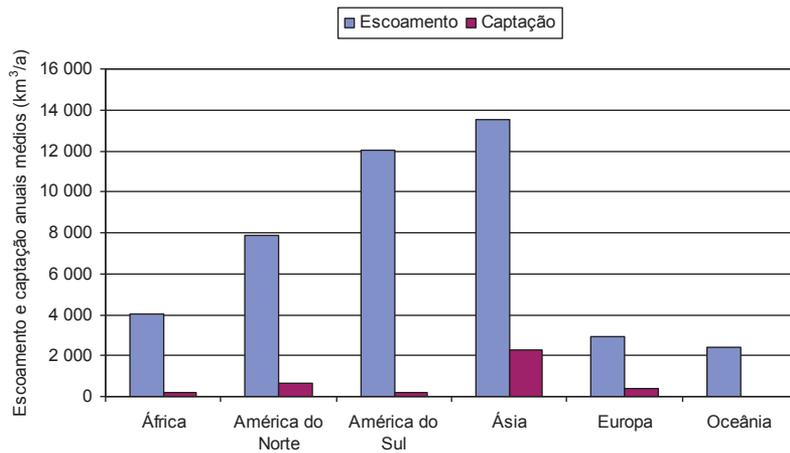
**Figura 1.9:** Água: em utilizações e na natureza | **pág. 17.**



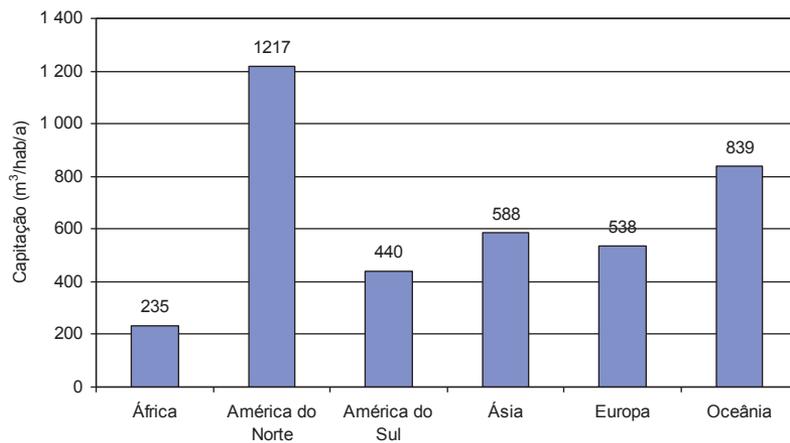
**Figura 1.10:** Evolução a nível mundial das captações de água para vários fins | **pág. 18.**



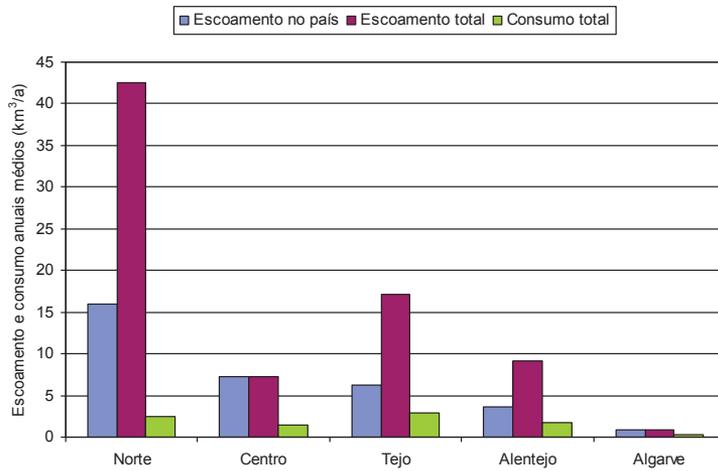
**Figura 1.11:** Evolução a nível mundial das captações | **pág.19.**



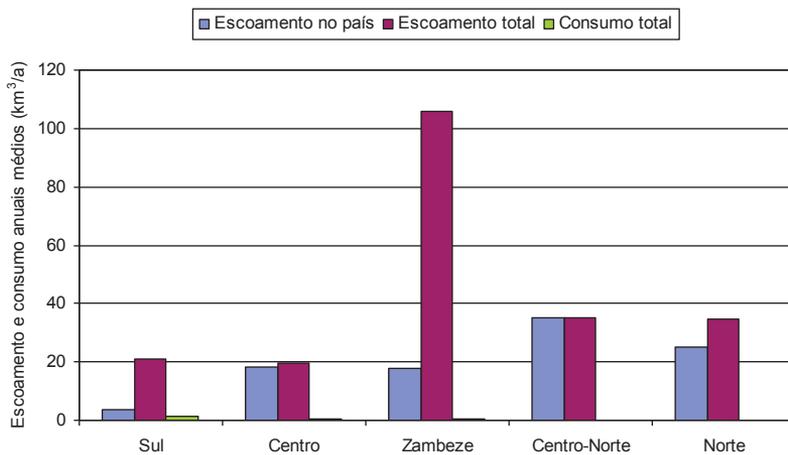
**Figura 1.12:** Escoamento e captação nos vários continentes,  $\text{km}^3/\text{a}$  | **pág. 24.**



**Figura 1.13:** Captação das captações anuais nos continentes | **pág. 25.**



**Figura 1.14:** Escoamento e consumos anuais médios nas regiões de Portugal continental | **pág. 27.**

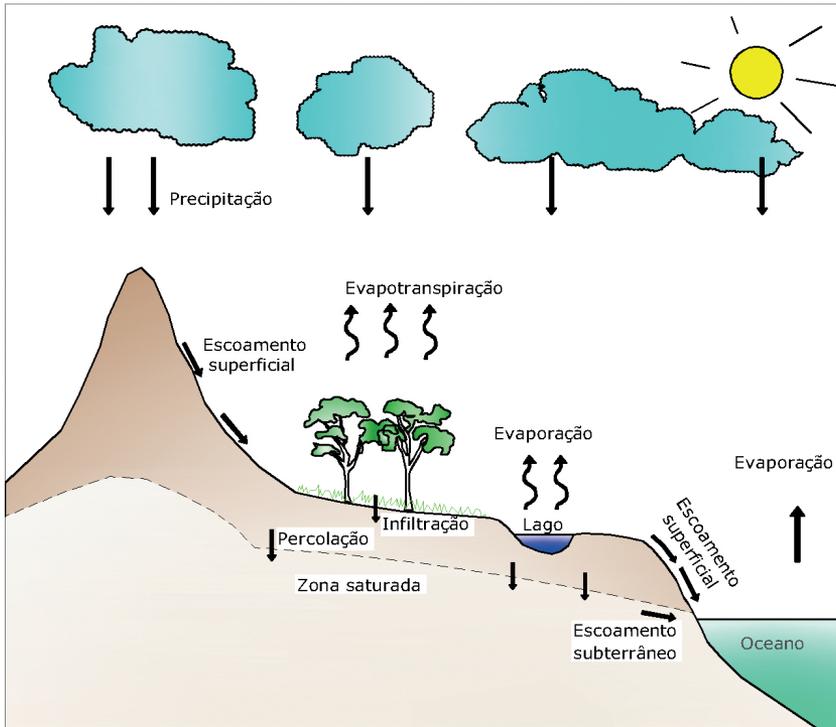


**Figura 1.15:** Escoamento e consumo anuais médios nas regiões de Moçambique | **pág.**

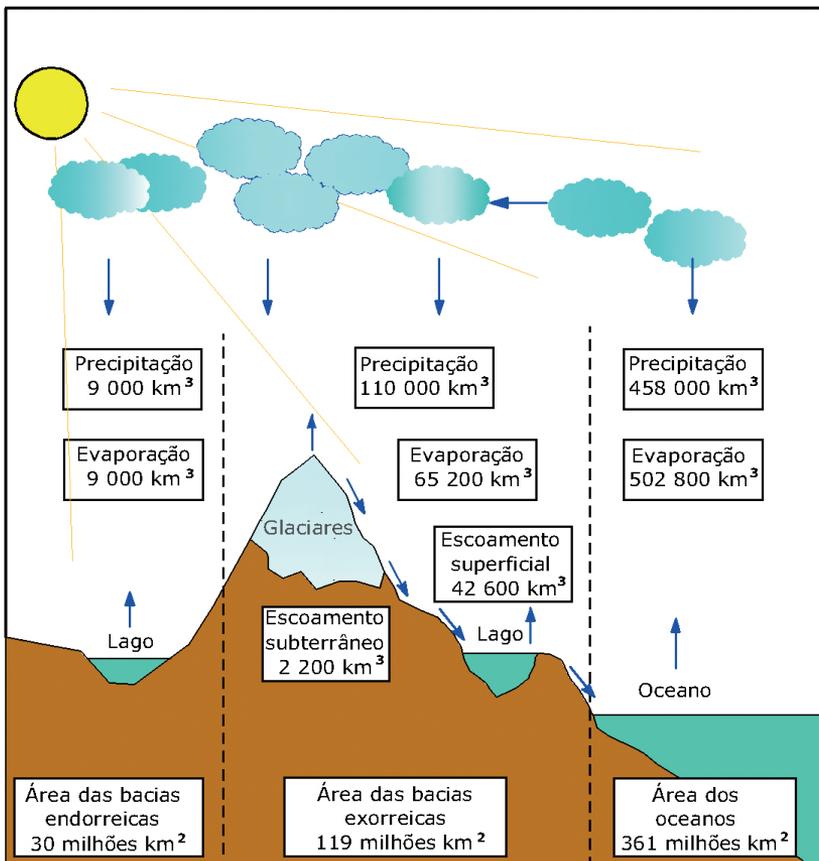
# 2

---

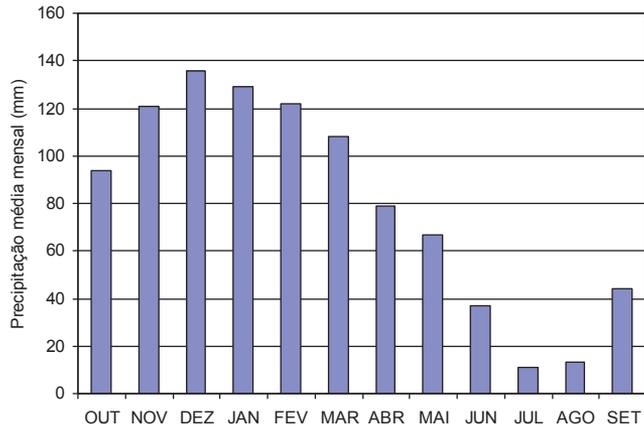
CICLO HIDROLÓGICO. BALANÇO HÍDRICO



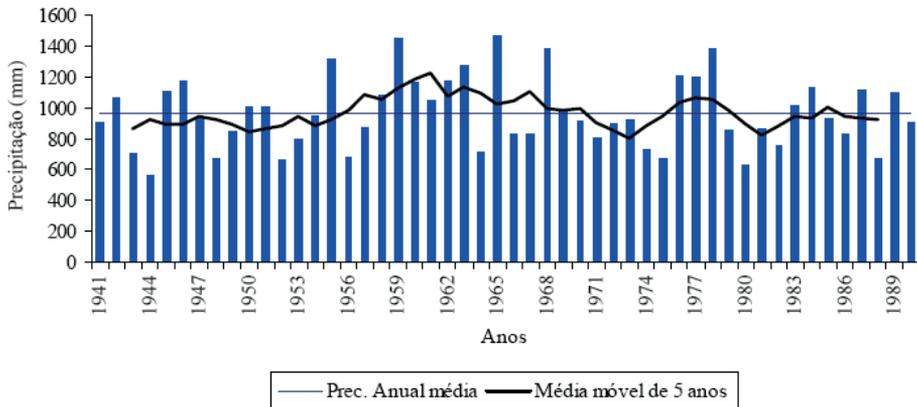
**Figura 2.1:** Esquematização do ciclo hidrológico | **pág. 38.**



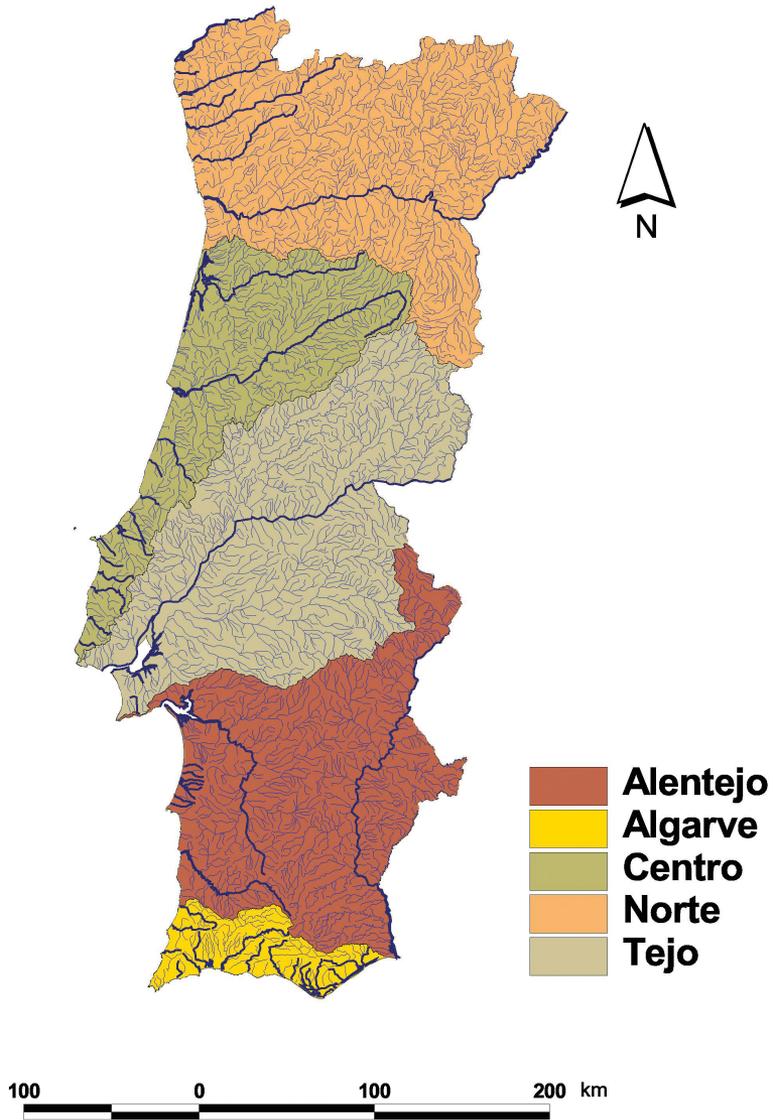
**Figura 2.2:** Representação quantitativa do ciclo hidrológico  
(adaptada de Shiklomanov, 1998) | **pág. 40.**



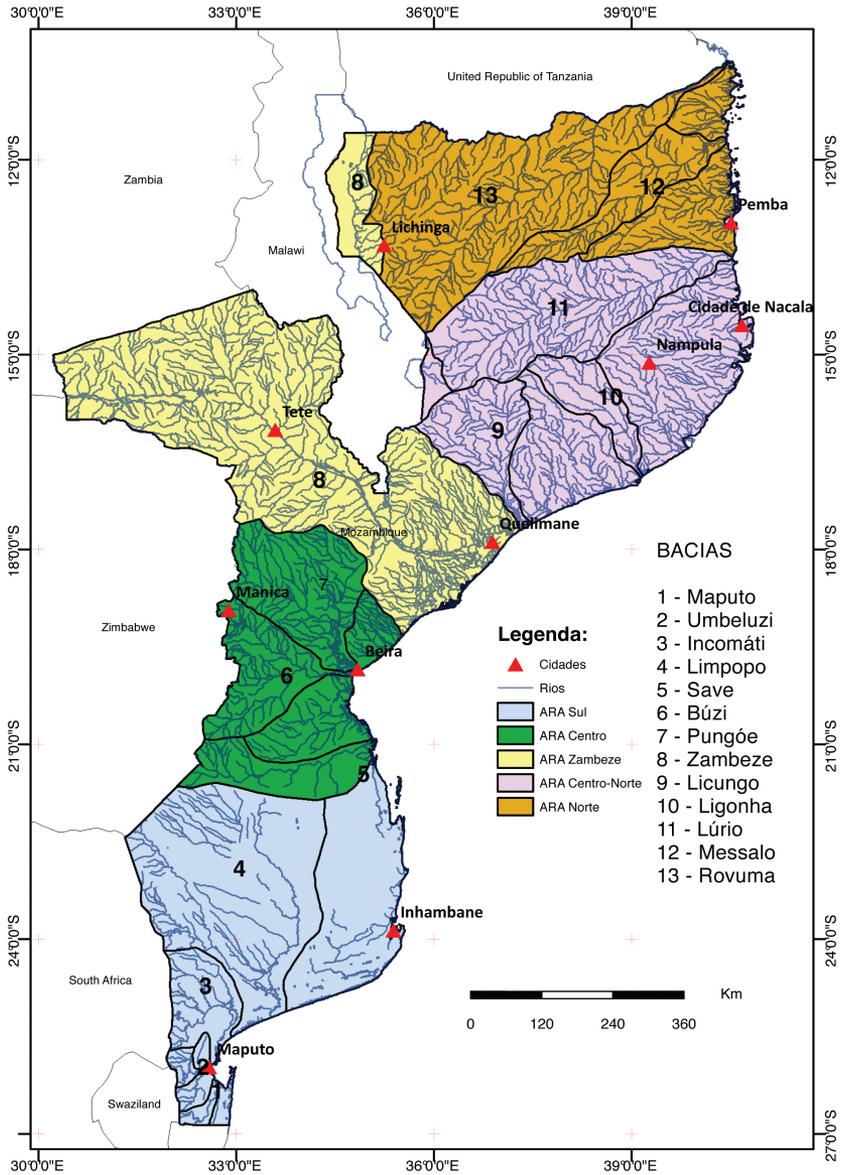
**Figura 2.5:** Distribuição da precipitação mensal média em Portugal continental | **pág. 50.**



**Figura 2.6:** Precipitação anual média em Portugal continental | **pág. 50.**  
(reproduzida de INAG, 2002)



**Figura 2.7:** Delimitação das ARH em Portugal | **pág. 52.**

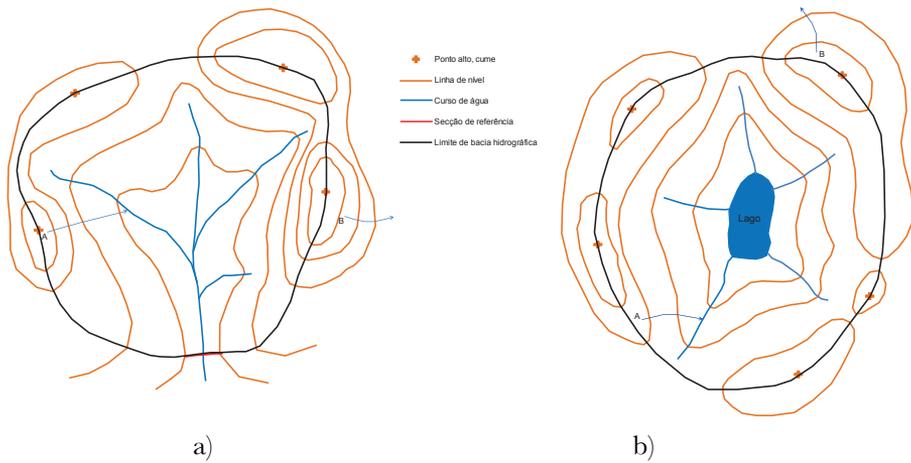


**Figura 2.8:** Delimitação das ARA em Moçambique | **pág. 53.**

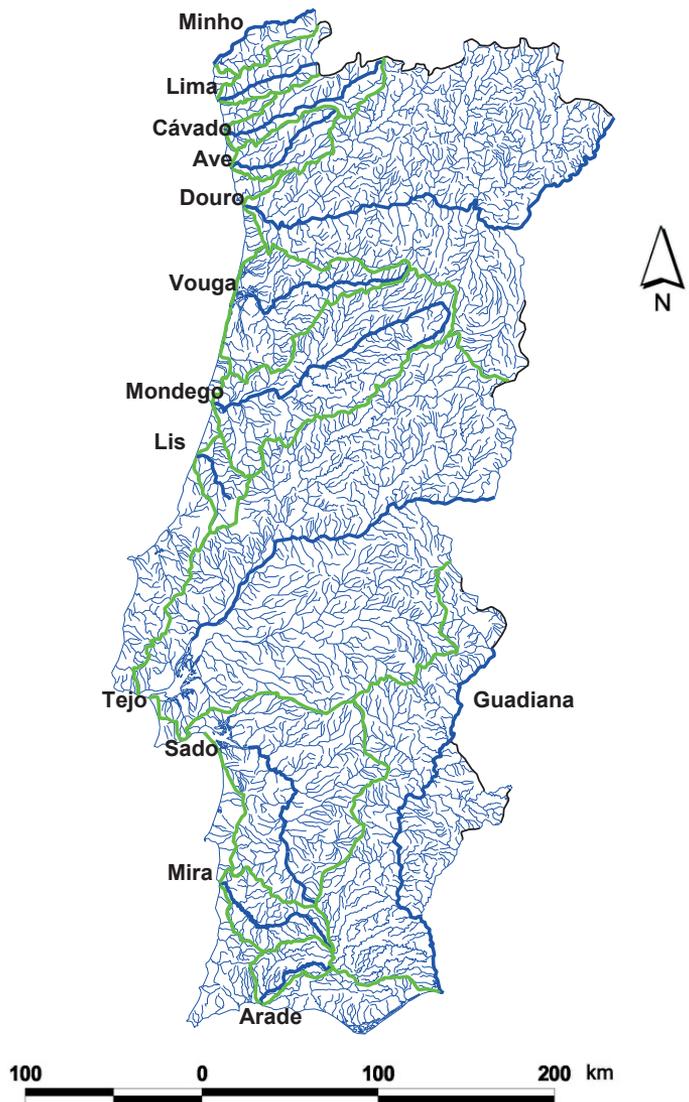
# 3

---

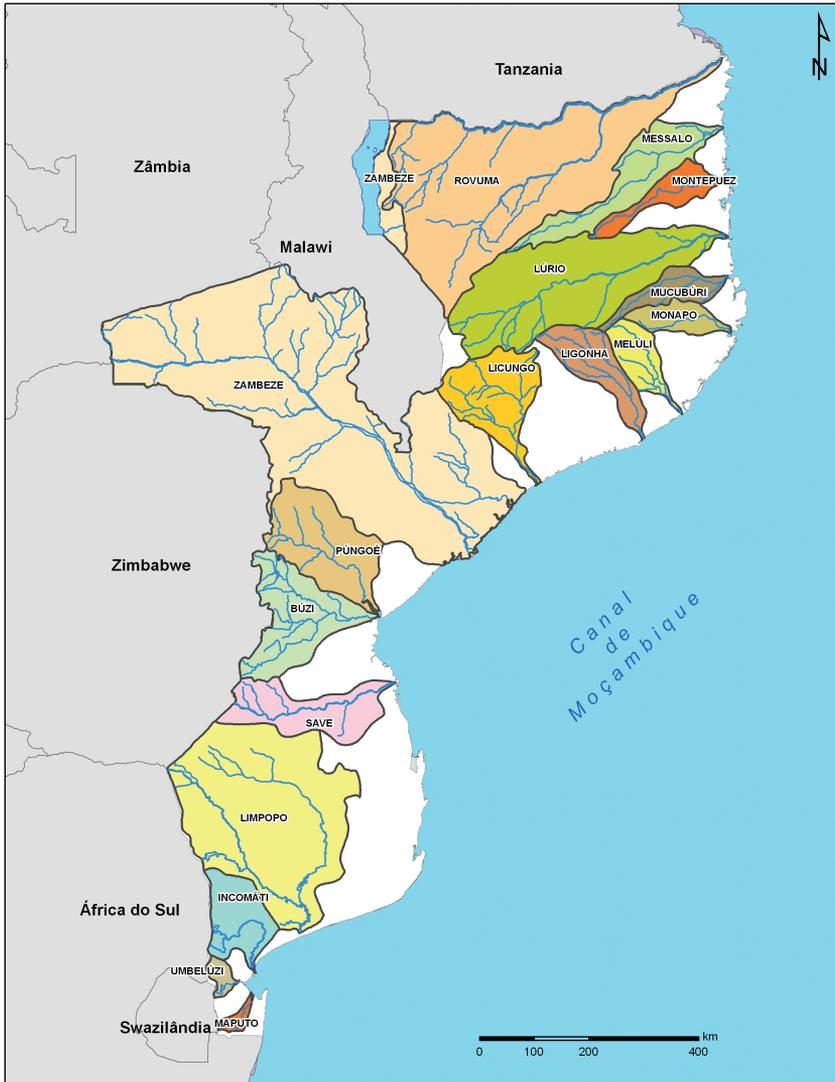
CARACTERIZAÇÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS



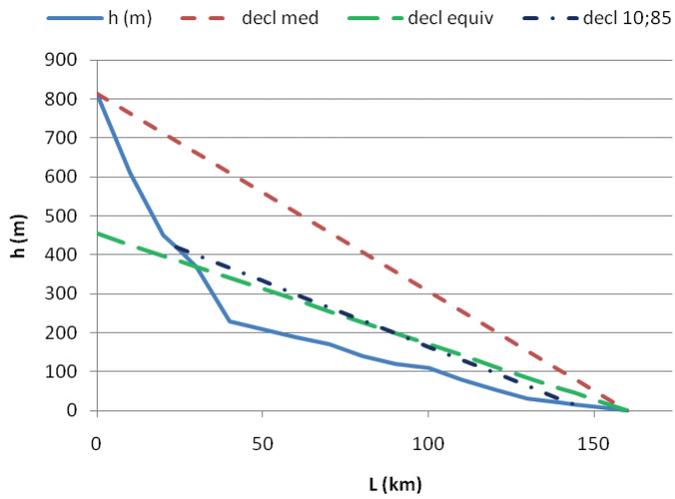
**Figura 3.1:** Delimitação de bacias hidrográficas:  
 a) bacia exorreica, b) bacia endorreica | **pág. 61.**



**Figura 3.2:** Principais bacias hidrográficas de Portugal continental | **pág. 64.**



**Figura 3.3:** Principais bacias hidrográficas de Moçambique | **pág. 65.**

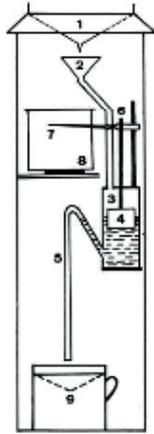


**Figura 3.8:** Perfil dum rio e declives | **pág. 75.**

# 4

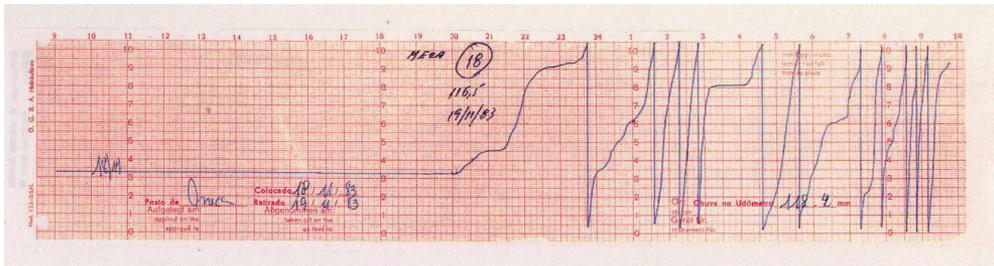
---

PRECIPITAÇÃO



- 1/2 – Recipiente
- 3 – Depósito
- 4 – Flutuador
- 5 – Sifão
- 6 – Haste do flutuador
- 7 – Aparo
- 8 – Tambor do registo
- 9 – Recipiente

**Figura 4.17:** Udógrafo de sifão (da publicação “Água em Portugal”, [www.inag.pt](http://www.inag.pt)) | **pág. 127.**



**Figura 4.18:** Gráfico diário de um udógrafo de sifão | **pág. 127.**

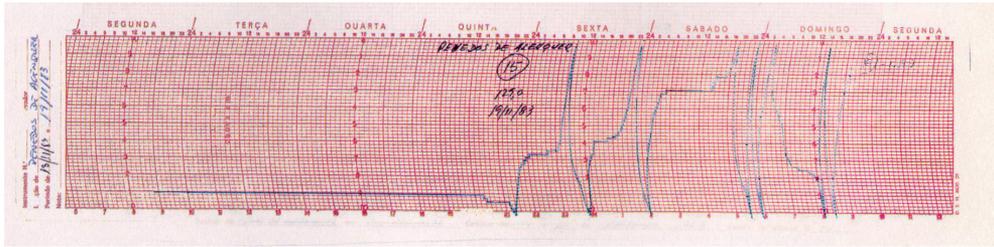


Figura 4.20: Gráfico diário de um udógrafo de báscula | **pág. 129.**

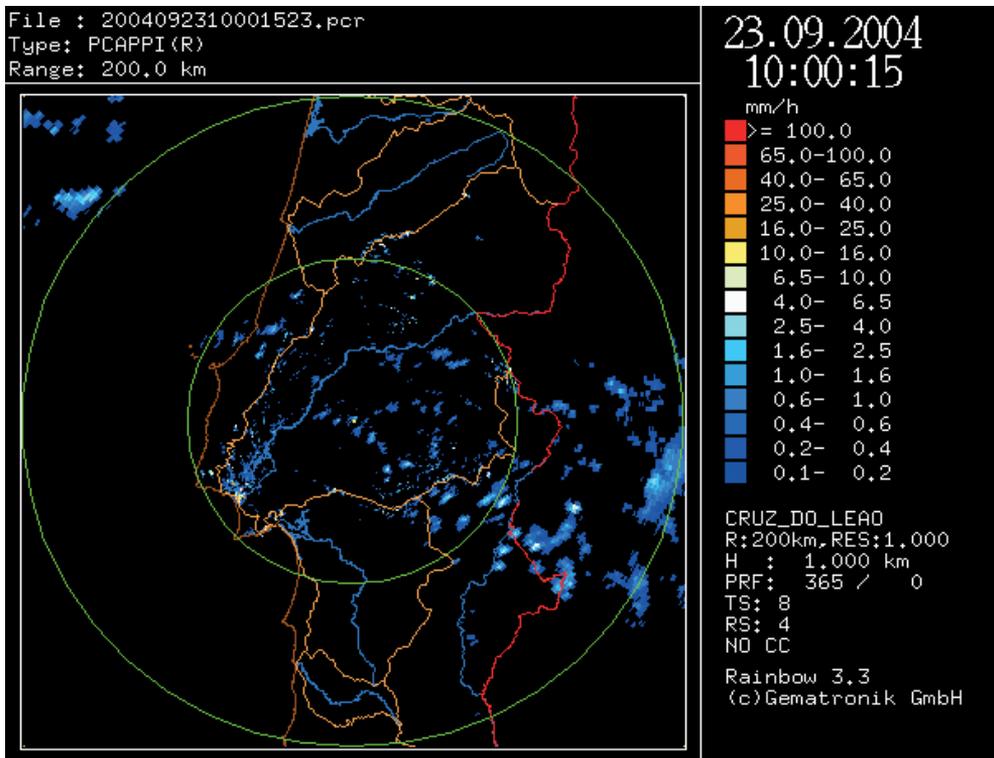
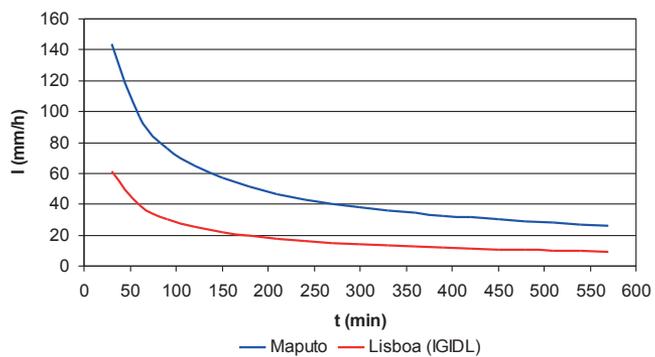
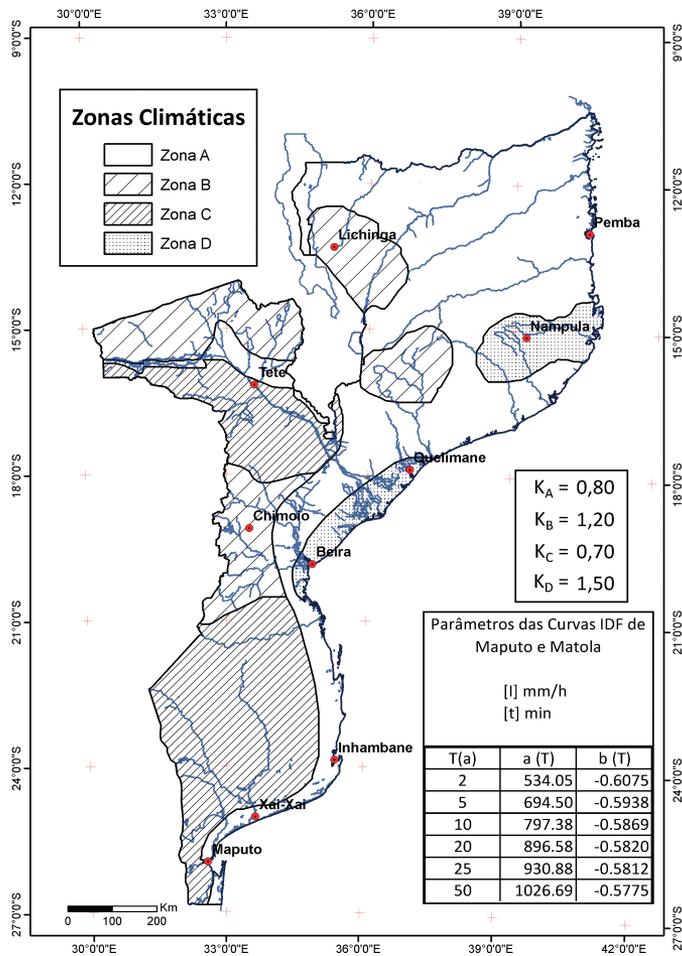


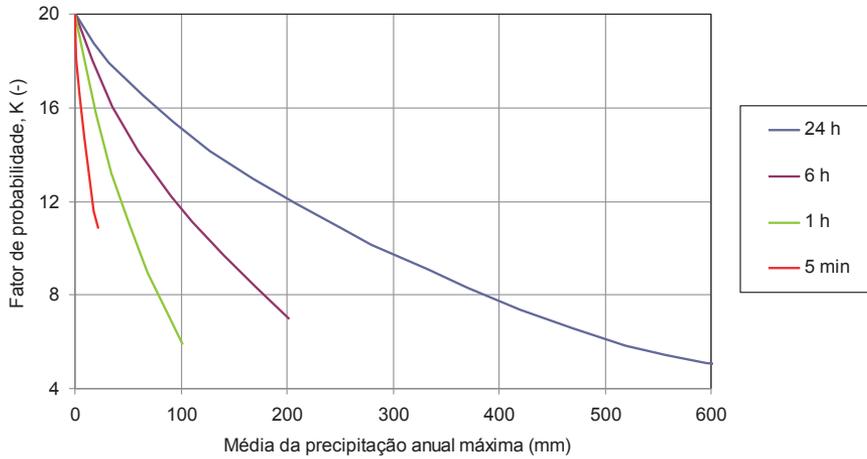
Figura 4.22: Imagem do campo da intensidade da precipitação | **pág. 131.**  
 (<http://www.meteo.pt>)



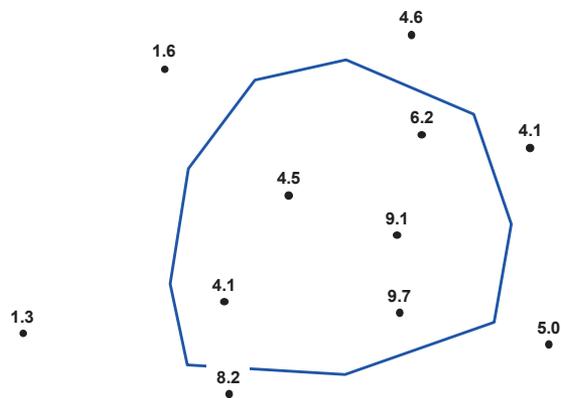
**Figura 4.24:** Curvas IDF de Maputo e de Lisboa (IGIDL) para  $T = 50a$  | **pág. 135.**



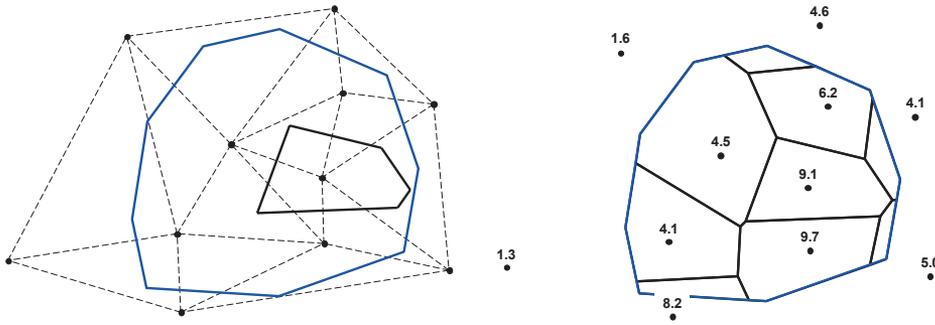
**Figura 4.26:** Parâmetros de curvas IDF para Moçambique | **pág. 137.**



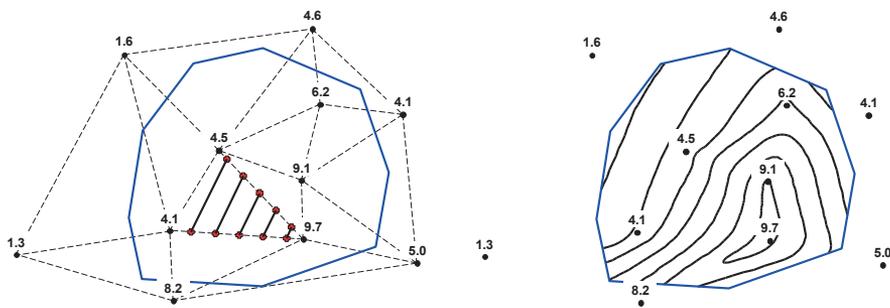
**Figura 4.27:** Fator de probabilidade da PMP em função da duração e da média da precipitação anual máxima com essa duração (adaptada de Hershfield, 1965) | **pág. 138.**



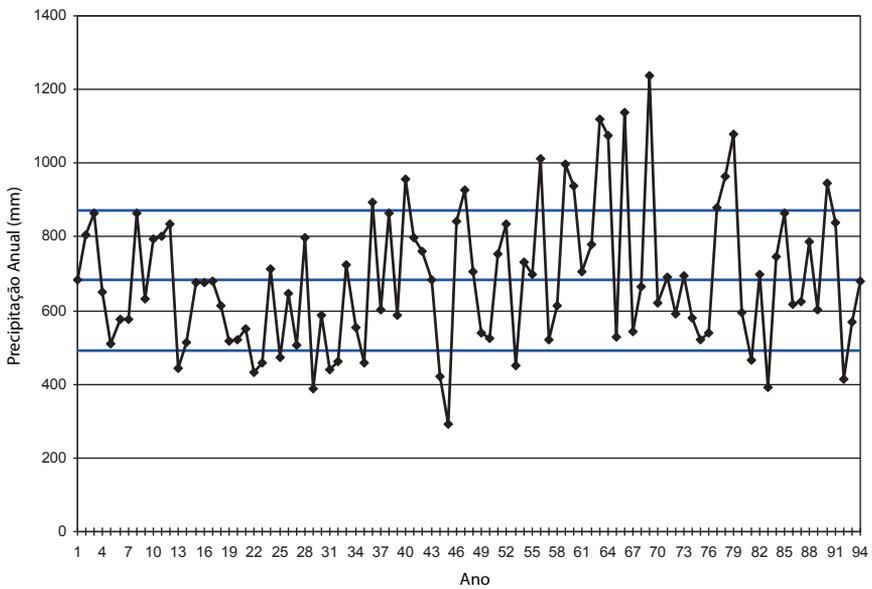
**Figura 4.28:** Precipitação medida sobre e na vizinhança de uma área (mm) | **pág. 139.**



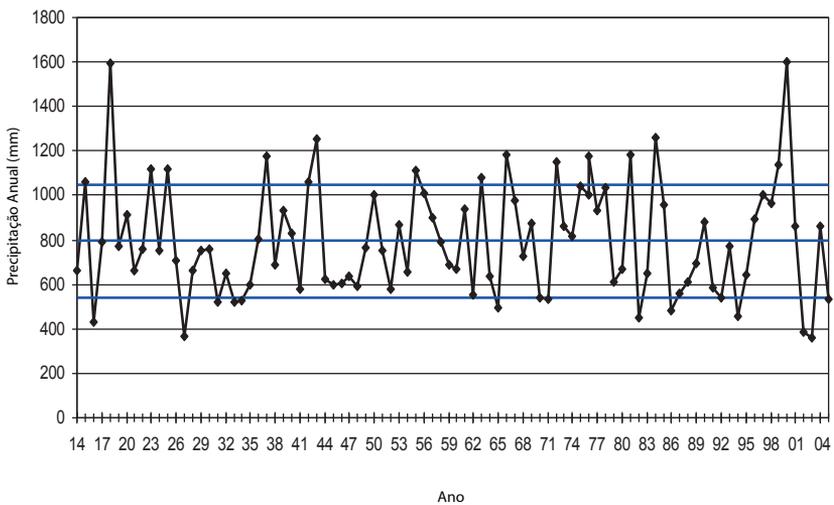
**Figura 4.29:** Construção e malha de polígonos de Thiessen sobre uma área | **pág. 140.**



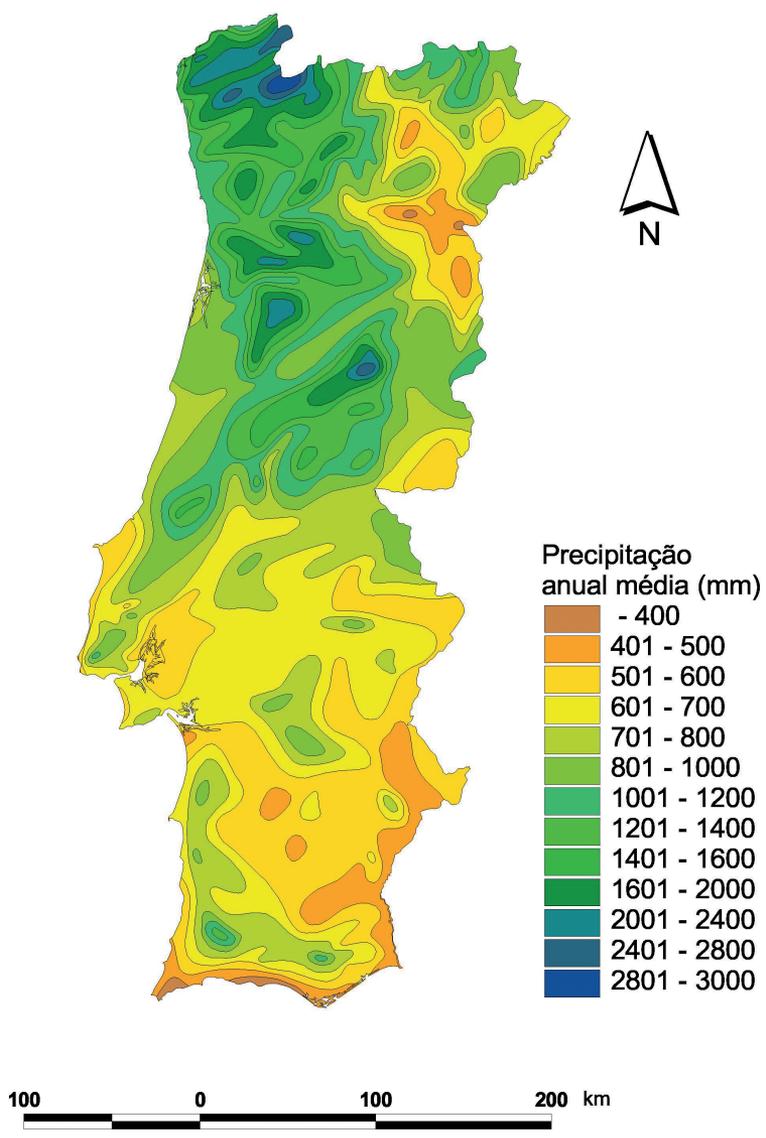
**Figura 4.30:** Construção e traçado de isoietas | **pág. 141.**



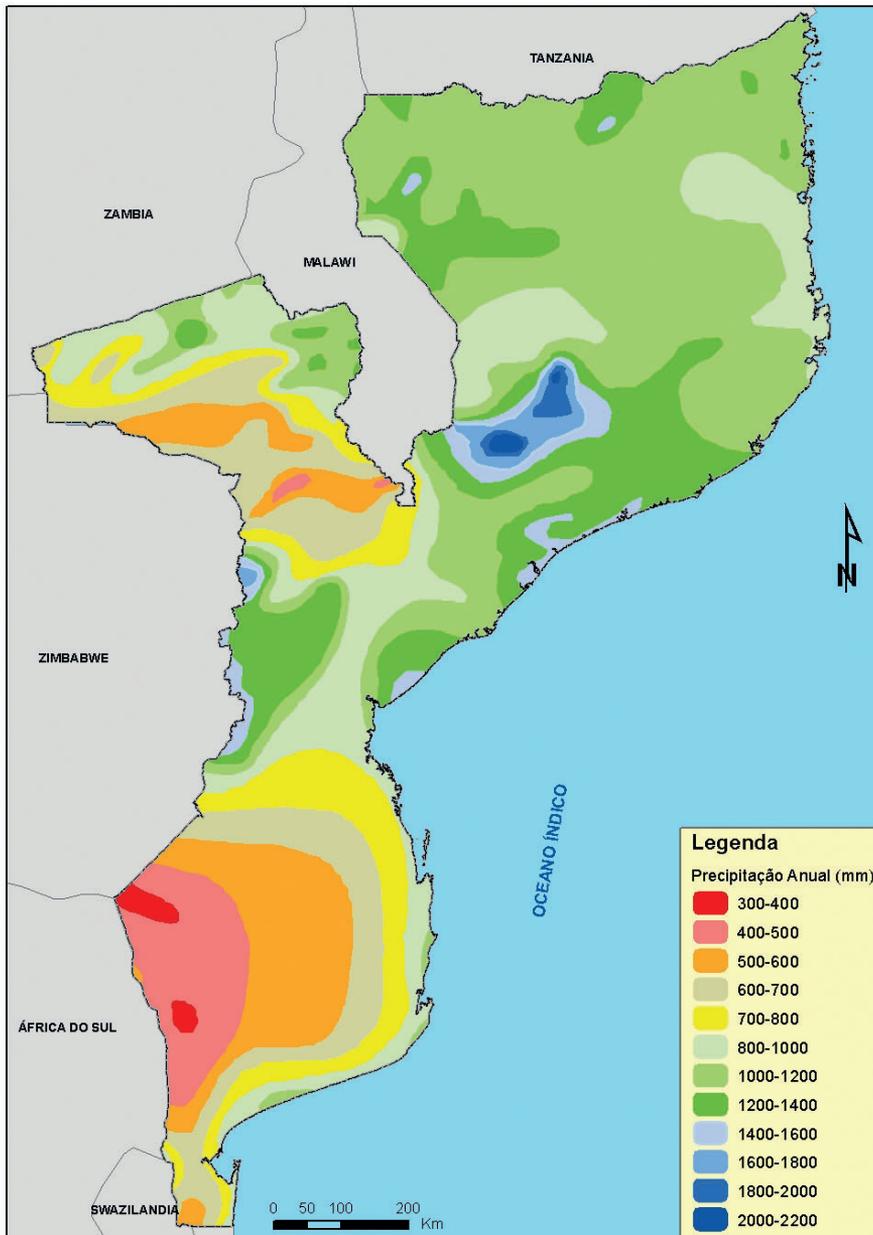
**Figura 4.32:** Precipitação anual em Lisboa (IGIDL) de 1900/01 a 1993/94 | **pág. 144.**



**Figura 4.34:** Precipitação anual em Maputo de 1913/14 a 2004/05 | **pág. 145.**



**Figura 4.35:** Distribuição da precipitação anual média em Portugal continental | **pág. 146.**



**Figura 4.36:** Distribuição da precipitação anual média em Moçambique | **pág. 147.**

# 6

---

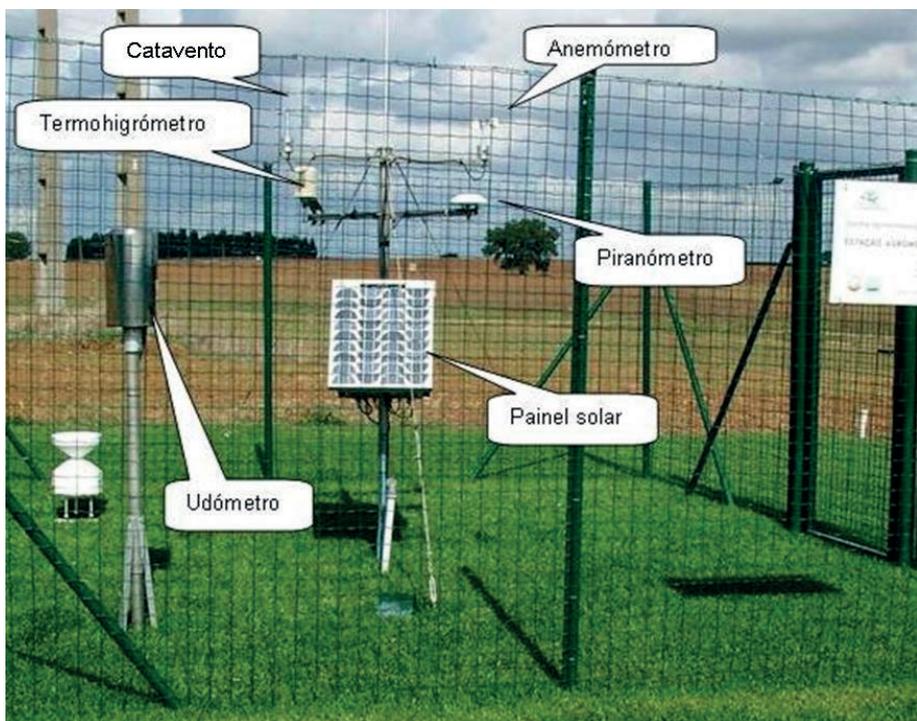
## EVAPORAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO



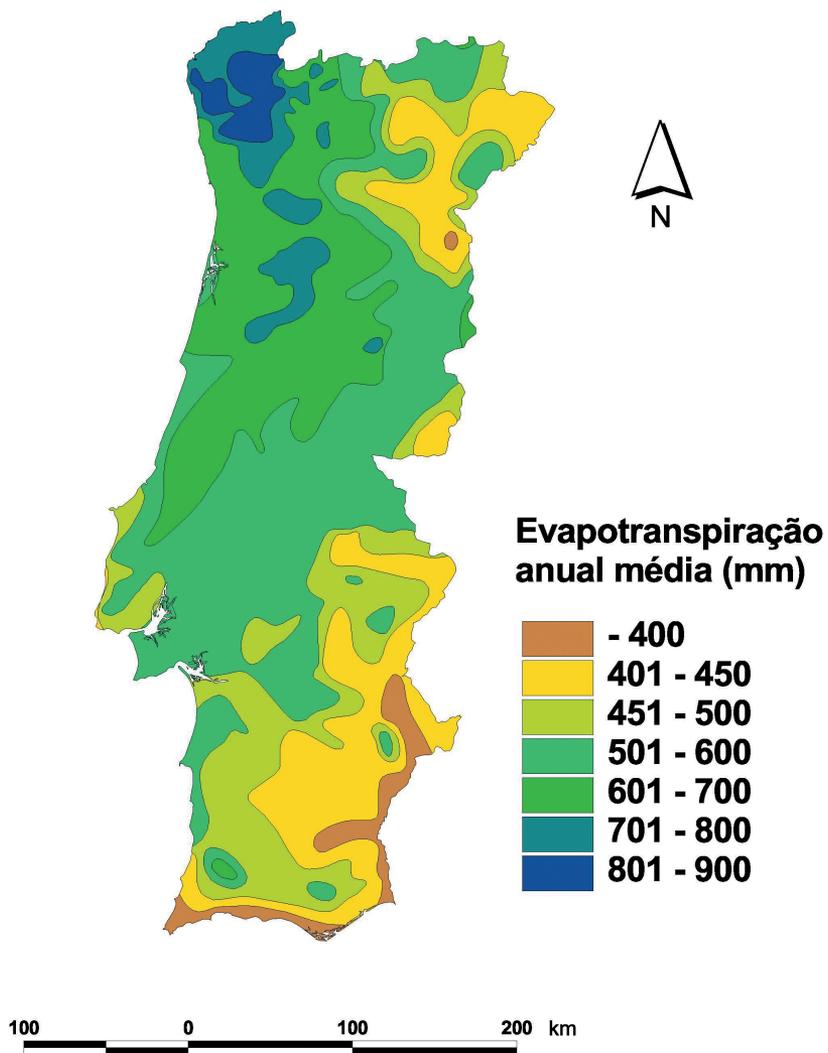
**Figura 6.8:** Tina da classe A do U. S. Weather Bureau | **pág.** 224.



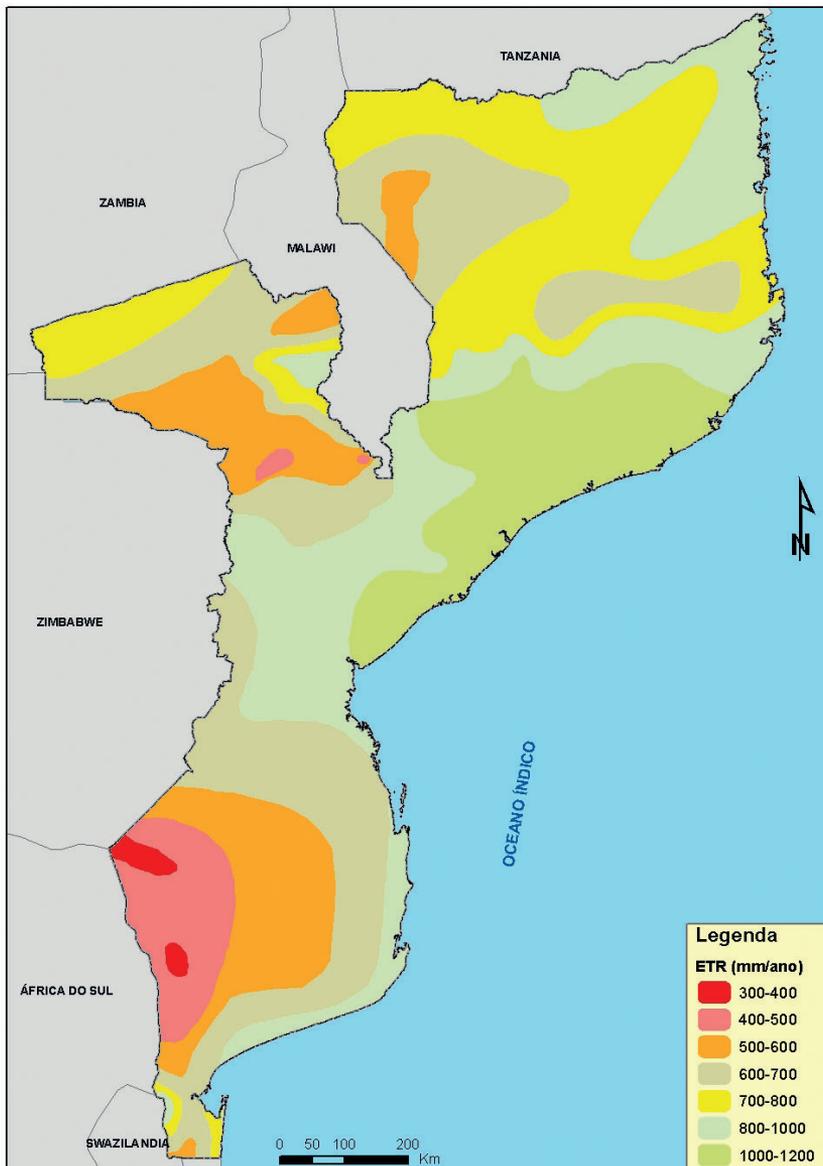
**Figura 6.11:** Abrigo meteorológico da estação meteorológica do IGIDL | **pág. 227.**



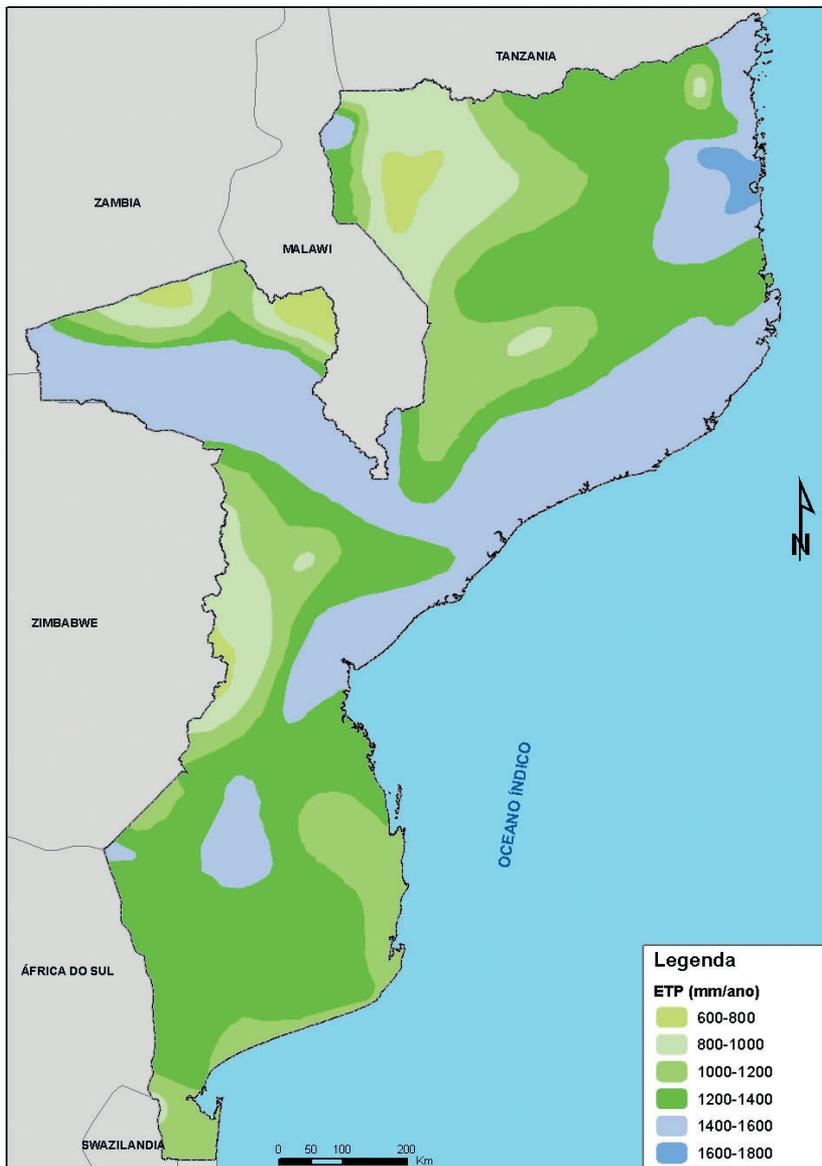
**Figura 6.12:** Estação agrometeorológica da Herdade do Outeiro | **pág. 228.**



**Figura 6.15:** Distribuição da evapotranspiração real anual média em Portugal | **pág. 231.**



**Figura 6.16:** Distribuição da evapotranspiração real anual média em Moçambique (adaptada de Gonçalves, 1974) | **pág. 232.**

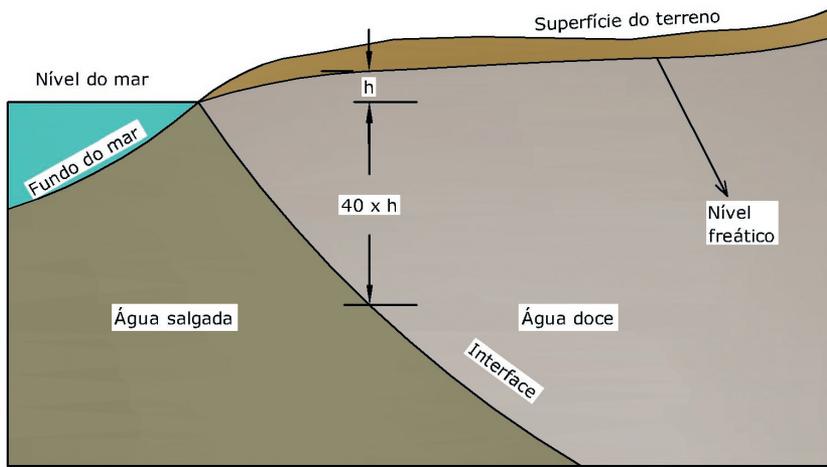


**Figura 6.17:** Distribuição da evapotranspiração potencial anual média em Moçambique (adaptada de Gonçalves, 1974) | **pág. 233.**

# 8

---

ÁGUA SUBTERRÂNEA

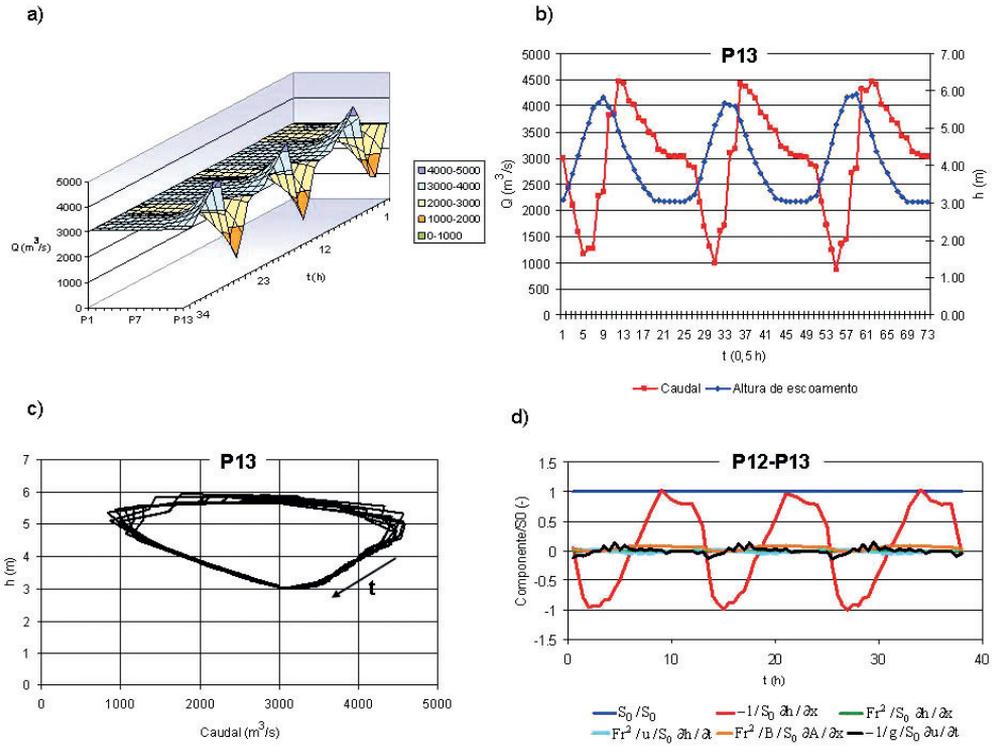


**Figura 8.25:** Esquema da intrusão salina segundo Ghyben e Herzberg | **pág. 331.**

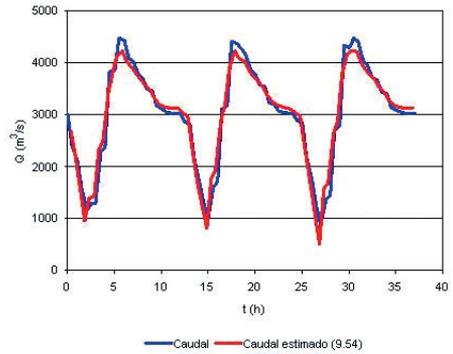
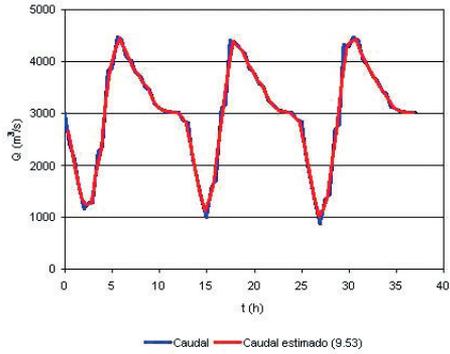
# 9

---

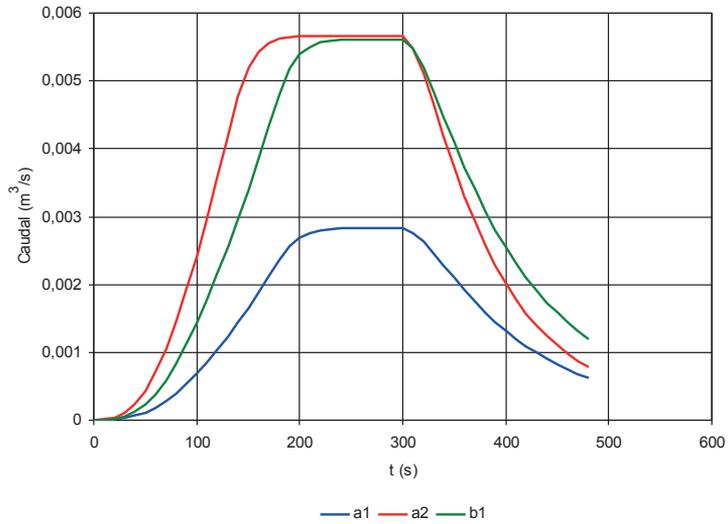
ESCOAMENTO SUPERFICIAL



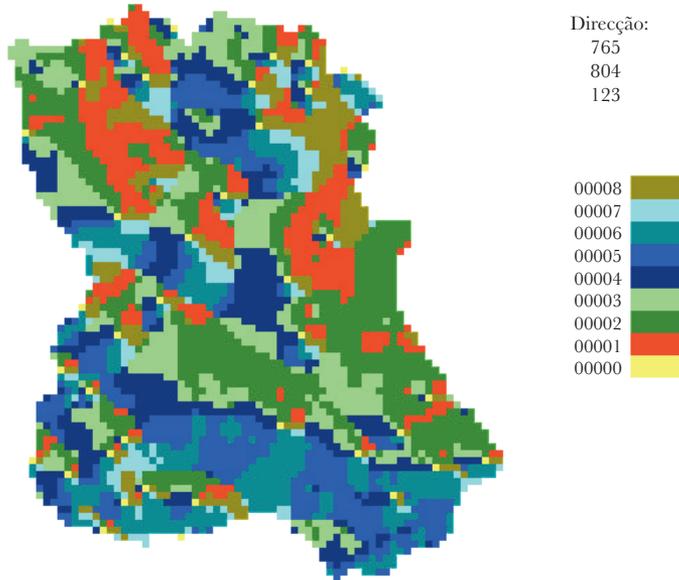
**Figura 9.10:** Análise do escoamento no rio Sado em Alcácer do Sal | **pág. 363.**  
(reproduzida de Santos, 2004)



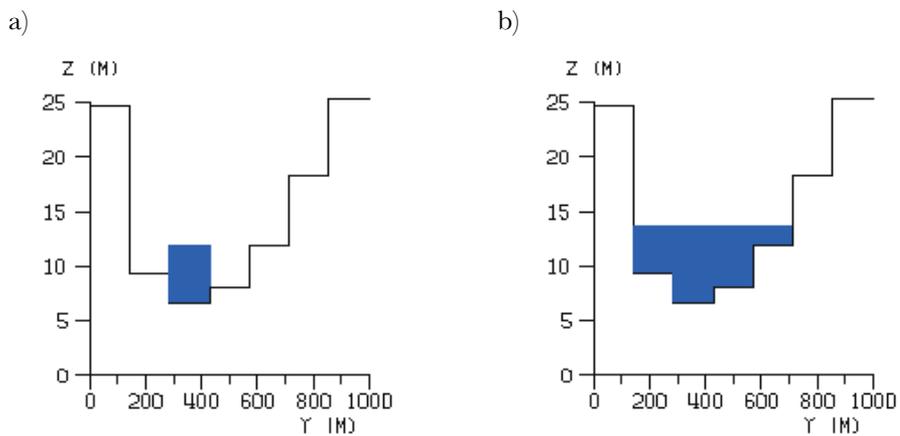
**Figura 9.11:** Comparação entre o caudal simulado e o caudal estimado por (9.53) e (9.54) | **pág. 365.**



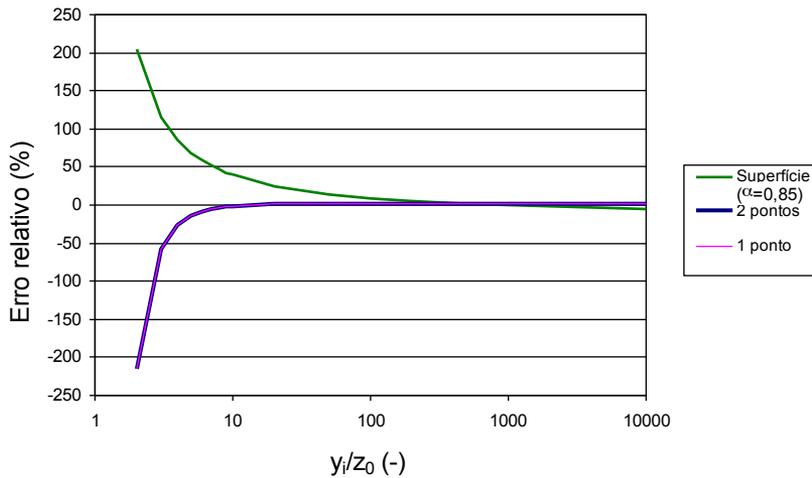
**Figura 9.23:** Caudal na secção final do coletor | **pág. 387.**



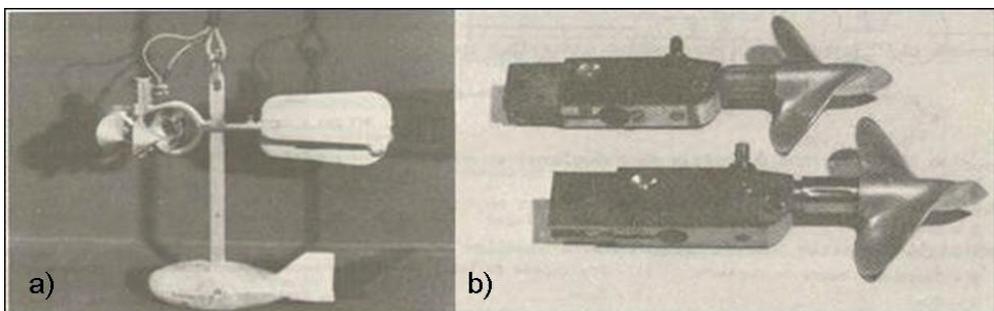
**Figura 9.26:** Sentidos do escoamento superficial numa bacia hidrográfica | **pág. 391.**



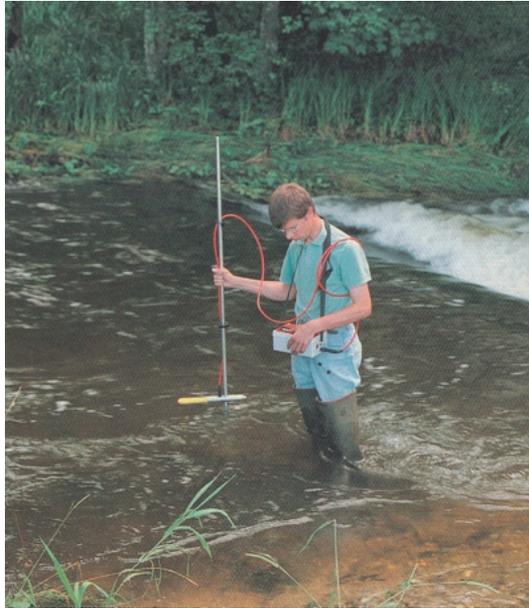
**Figura 9.28:** Preenchimento das secções transversais: a) modelo cinemático, b) modelo difusivo (reproduzida de Hipólito e Simões, 2002) | **pág. 395.**



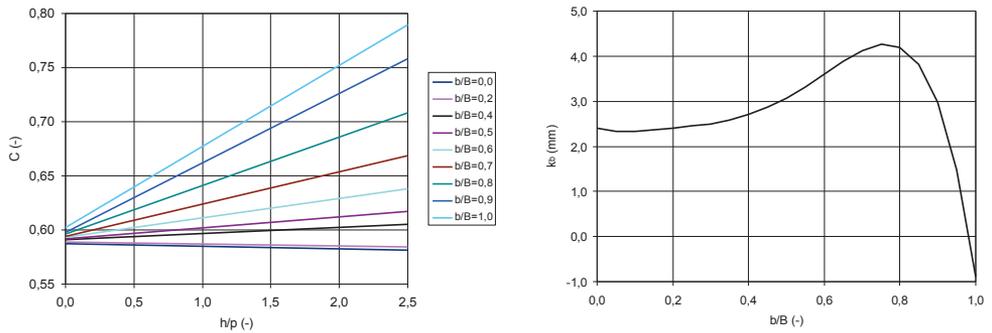
**Figura 9.34:** Erro relativo entre a velocidade média estimada por cada um dos métodos e a velocidade média do perfil logarítmico | **pág. 400.**



**Figura 9.36:** Molinetes hidráulicos: a) molinete de eixo vertical do tipo Price, com cabo de suspensão, leme direcional e contrapeso; b) molinetes de eixo horizontal do tipo Ott | **pág. 401.**



**Figura 9.37:** Medição a vau com molinete eletromagnético (OTT) | **pág. 402.**



**Figura 9.41:** Coeficiente de vazão e parcela  $k_b$  num descarregador retangular de parede delgada | **pág. 407.**

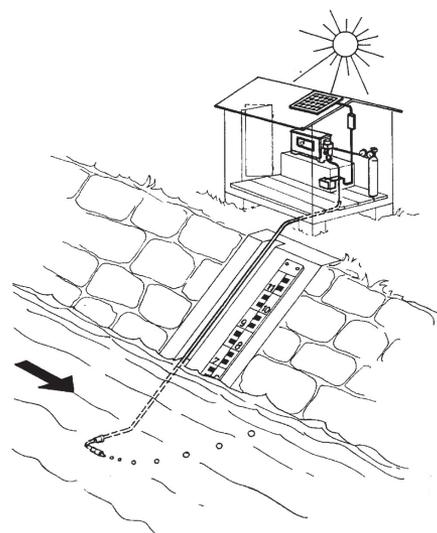


a)

b)



c)

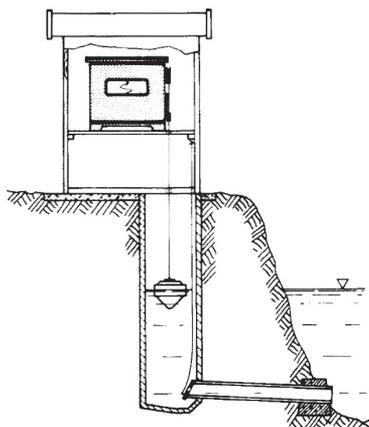


d)

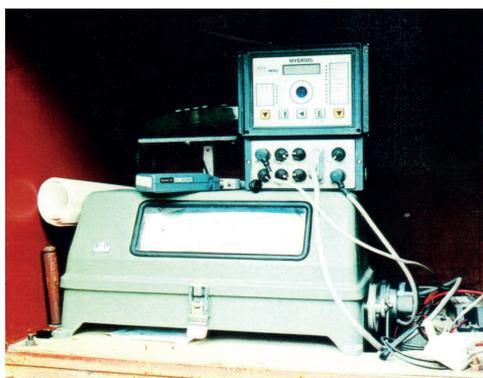
**Figura 9.45:** Escalas hidrométricas: a) pormenor; b) instalada no pilar de uma ponte; c) instalada em pilaretes; d) instalada no talude de um canal | **pág. 412** .



a)



b)

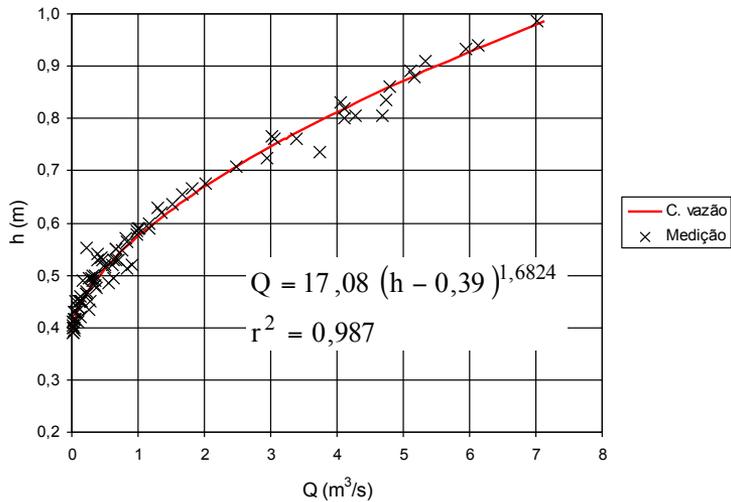


c)

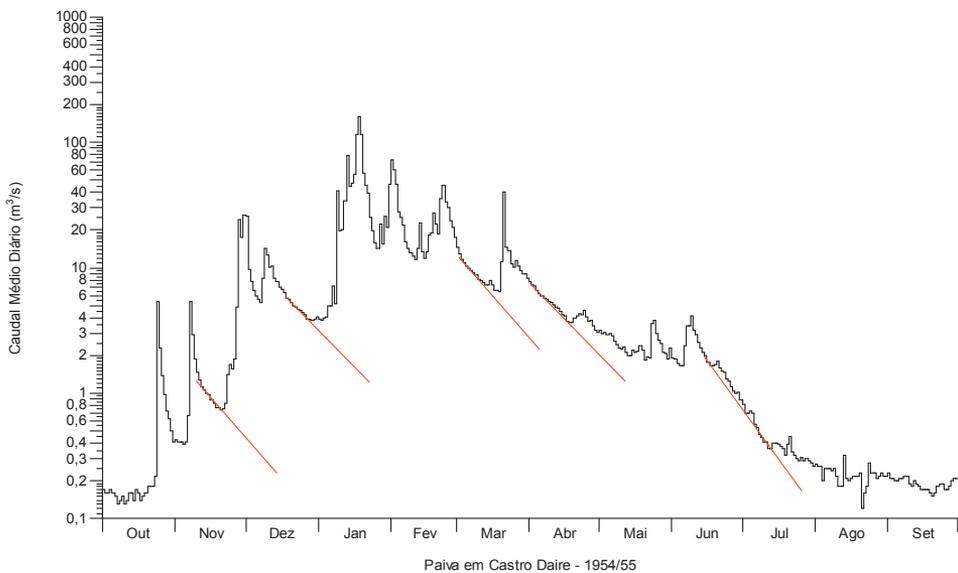


d)

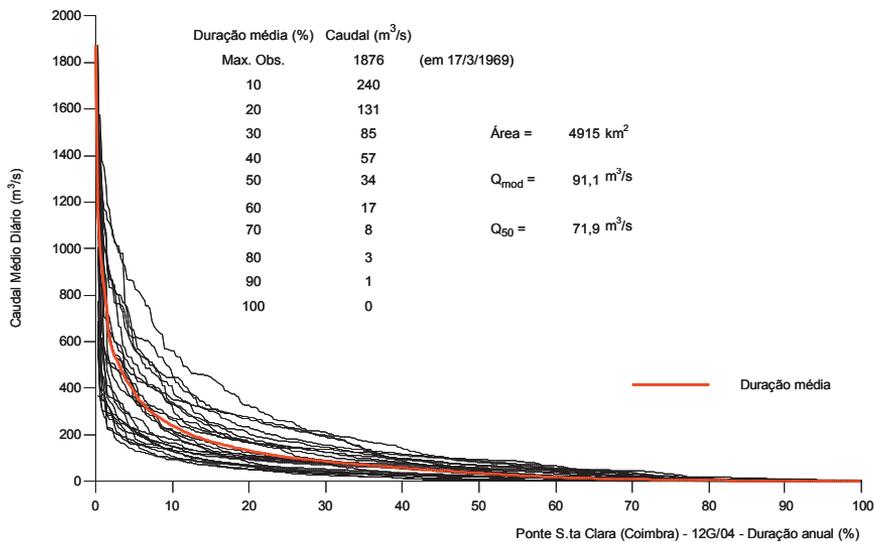
**Figura 9.46:** Limnógrafos: a) instalação em torre; b) instalação em poço; c) limnógrafo mecânico com acessórios de transição; d) limnógrafo digital com sensor de pressão | **pág. 414.**



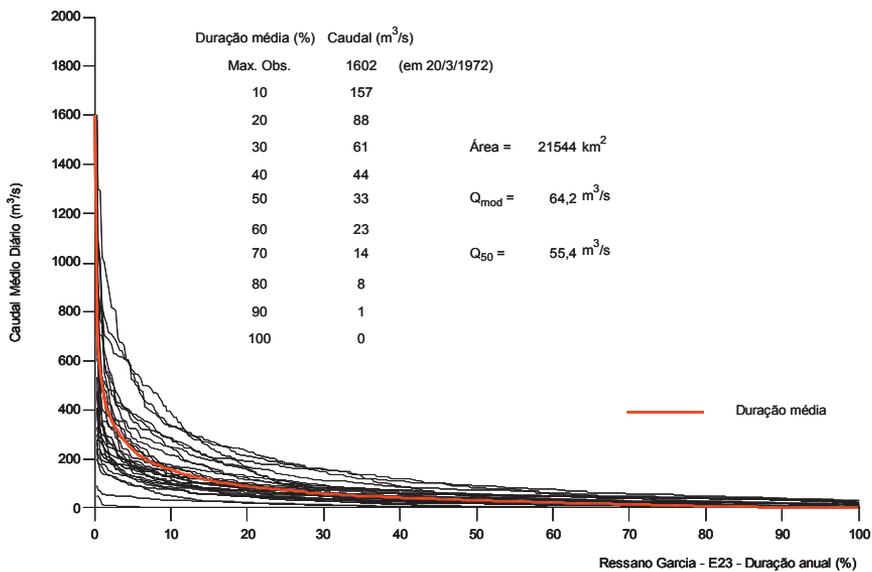
**Figura 9.47:** Ilustração da curva de vazão de um curso de água em determinada secção transversal | **pág. 415.**



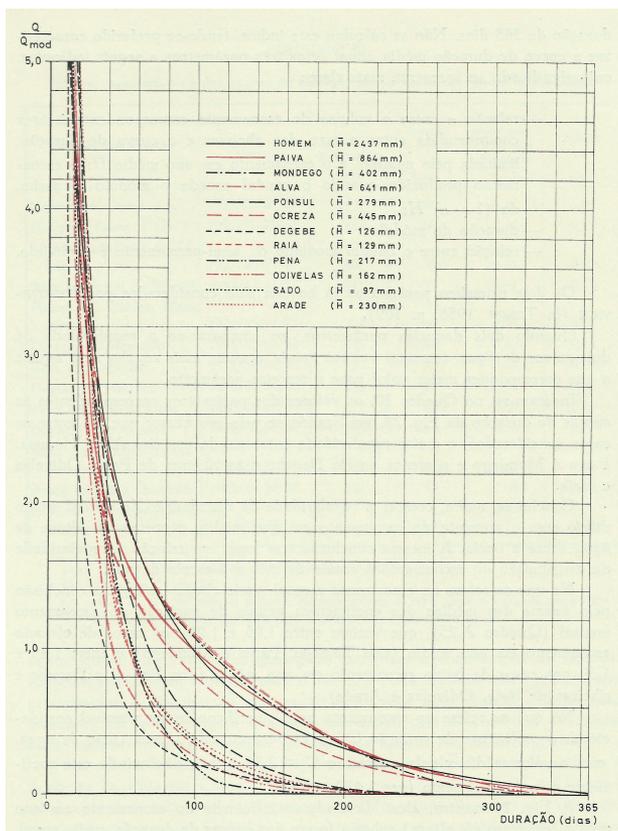
**Figura 9.49:** Hidrograma do caudal médio diário em gráfico semilogarítmico | **pág. 418.**



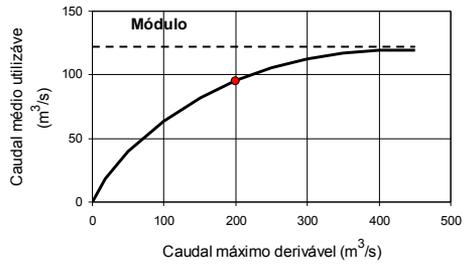
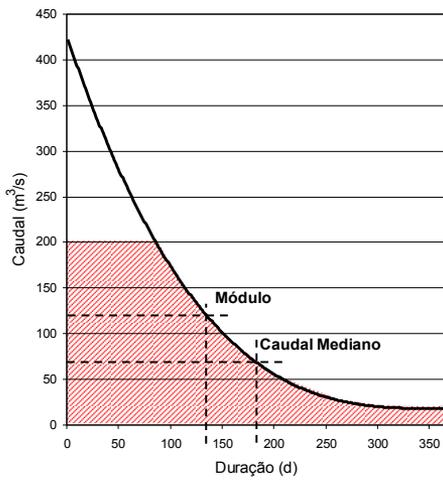
**Figura 9.52:** Curvas de duração do caudal médio diário no rio Mondego na ponte de Santa Clara (1955/56 a 1979/80) | **pág. 421.**



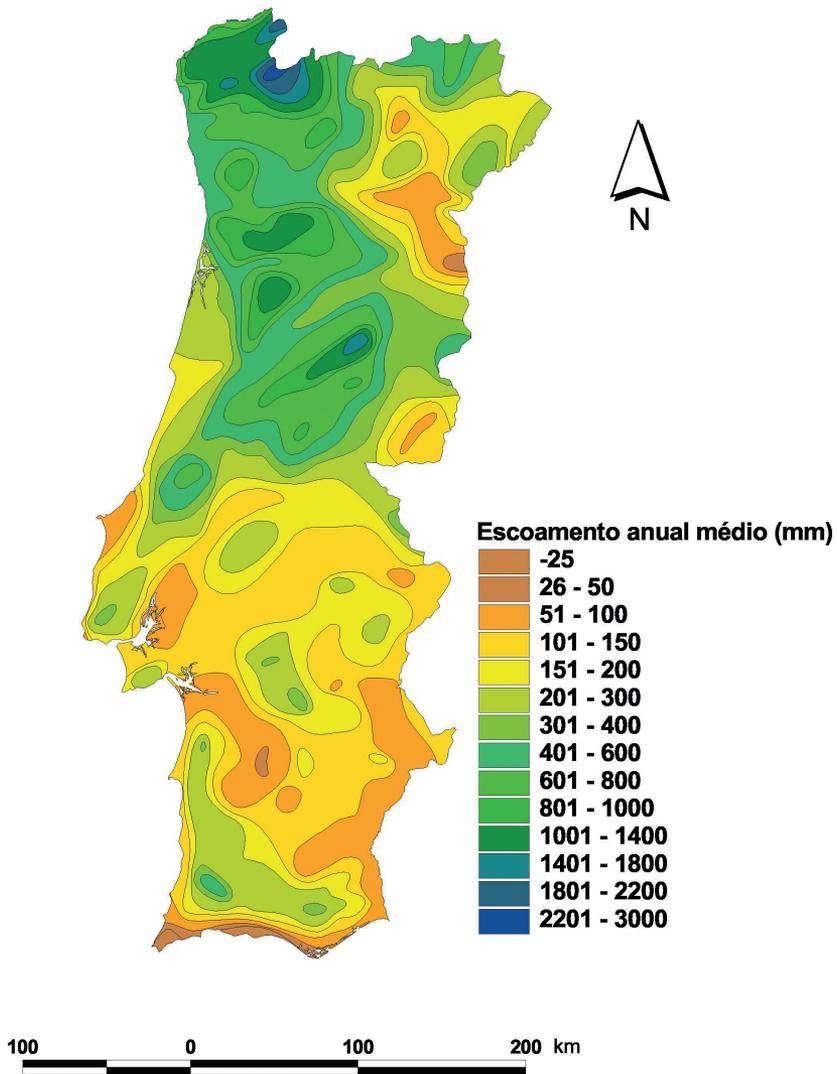
**Figura 9.53:** Curvas de duração do caudal médio diário no rio Incomati em Ressano Garcia (1953/54 a 1982/83) | **pág. 421.**



**Figura 9.54:** Curvas de duração média anual do caudal médio diário em vários rios portugueses (reproduzida de Quintela, 1967) | **pág. 423.**



**Figura 9.55:** Exemplo de utilização da curva de duração média anual | **pág. 424.**

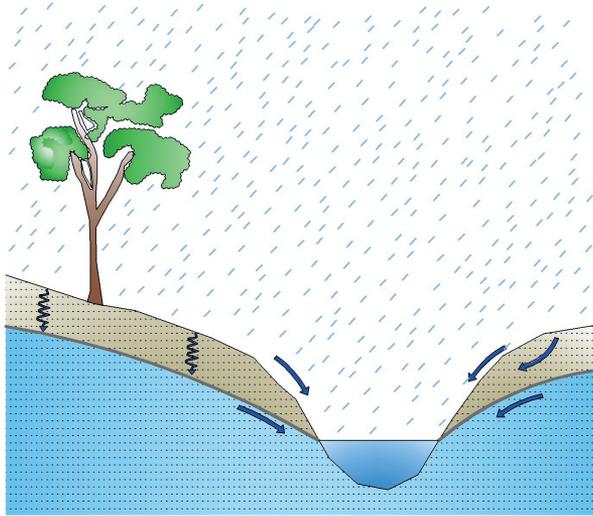


**Figura 9.56:** Distribuição do escoamento anual médio em Portugal continental | pág. 425.

# 10

---

MODELOS DE TRANSFORMAÇÃO DA  
PRECIPITAÇÃO EM ESCOAMENTO



**Figura 10.5:** Esquema ilustrativo da formação do escoamento | **pág. 440.**

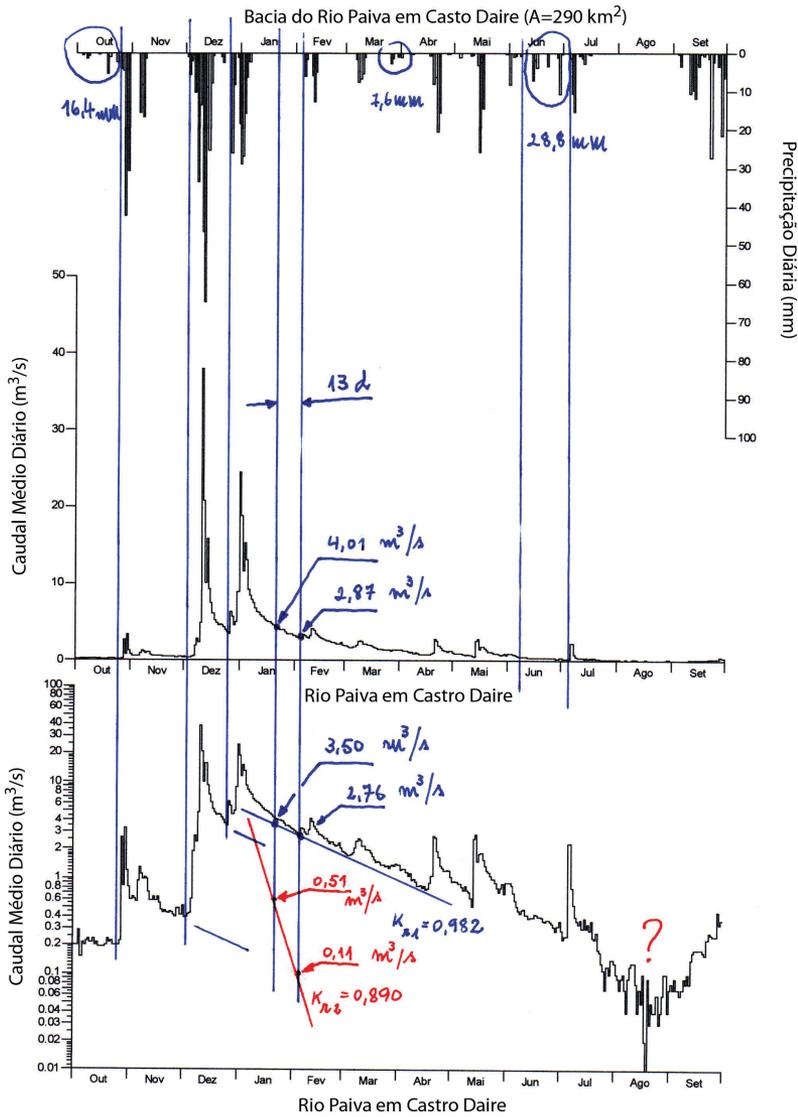
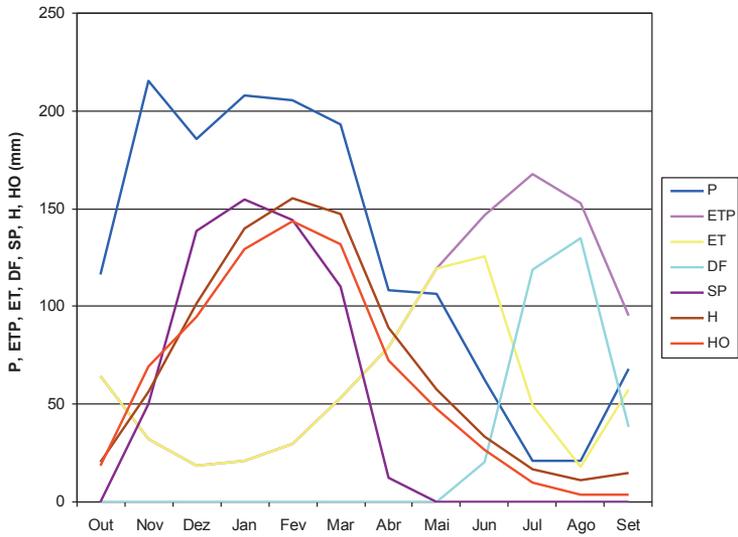
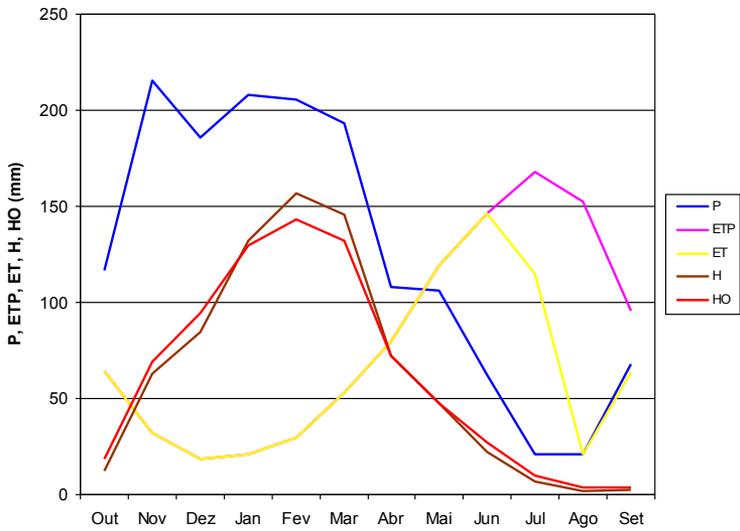


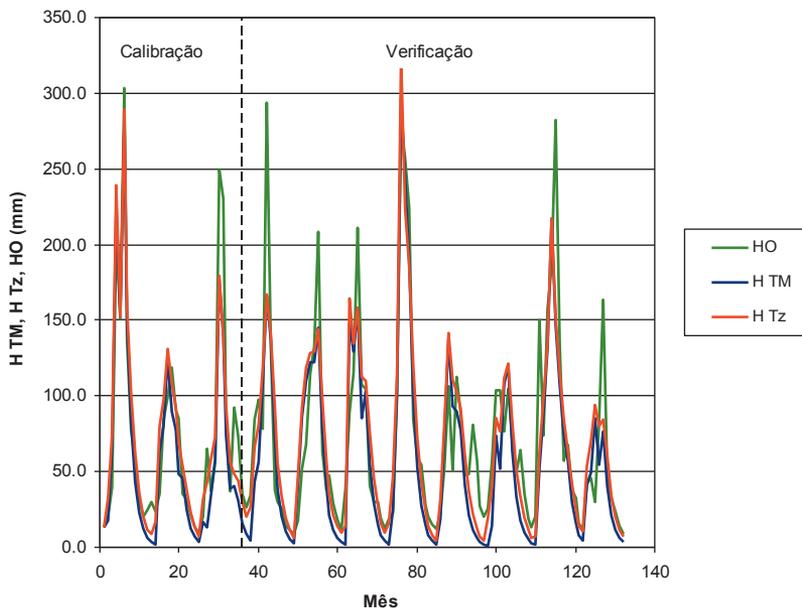
Figura 10.7: Ilustração para a análise do hietograma e dos hidrogramas | pág. 446.



**Figura 10.13:** Aplicação do modelo de Thornthwaite e Mather. Variáveis de entrada e de saída | **pág. 460.**



**Figura 10.16:** Aplicação do modelo de Têmez. Variáveis de entrada e de saída | **pág. 467.**



**Figura 10.18:** Aplicação dos modelos de Thornthwaite e Mather e de Téméz à bacia hidrográfica do rio Licungo em Gurulé | **pág. 475.**

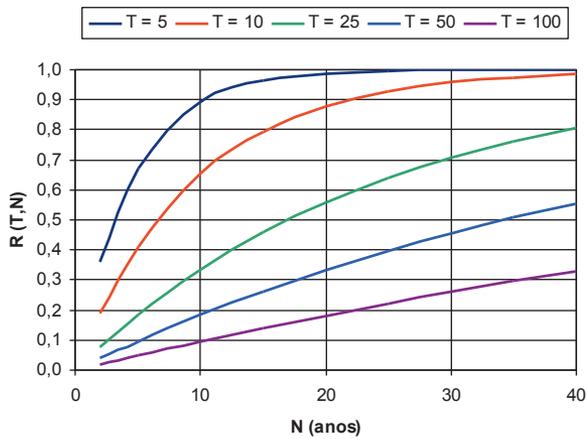
# 11

---

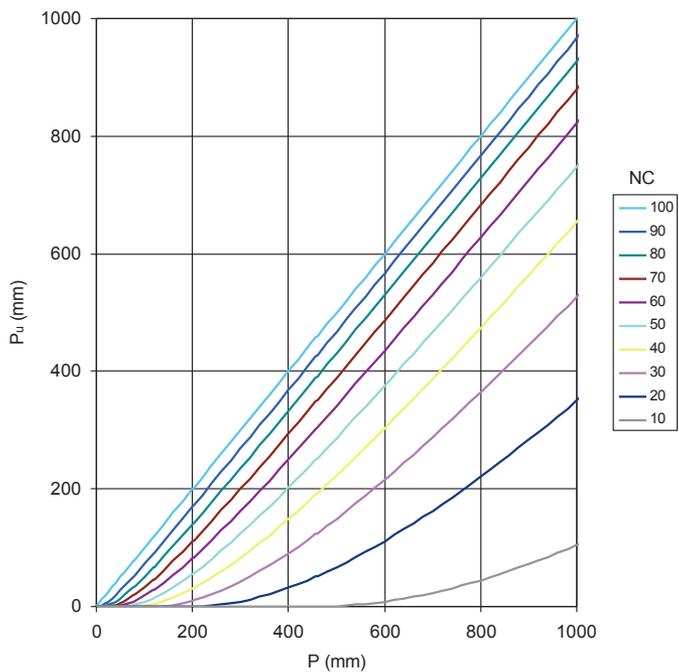
CARACTERIZAÇÃO DE CHEIAS



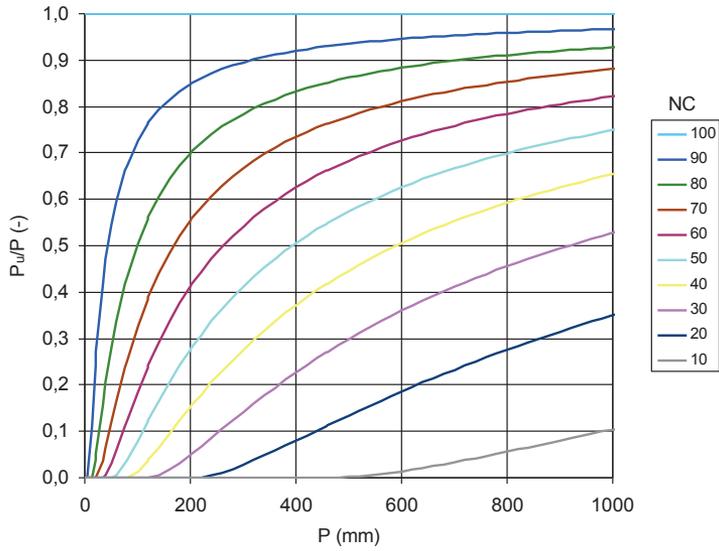
**Figura 11.1:** Imagens de cheias: ponte de Xai-Xai no rio Limpopo em 2000, marcas de cheias excepcionais em Ponte de Lima | **pág. 486.**



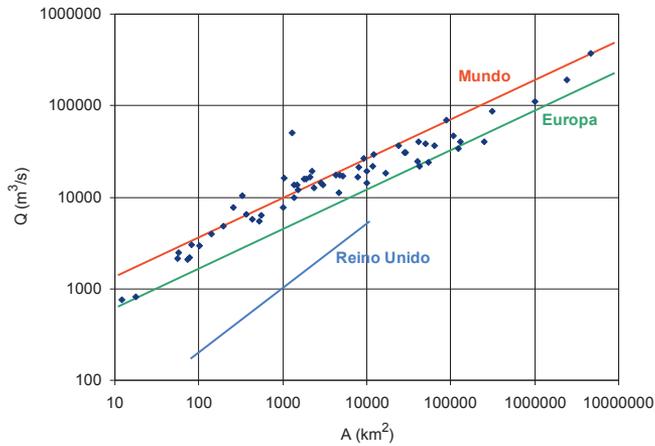
**Figura 11.2:** Variação do risco  $R$  com a duração  $N$  e com o período de retorno  $T$  | **pág. 490.**



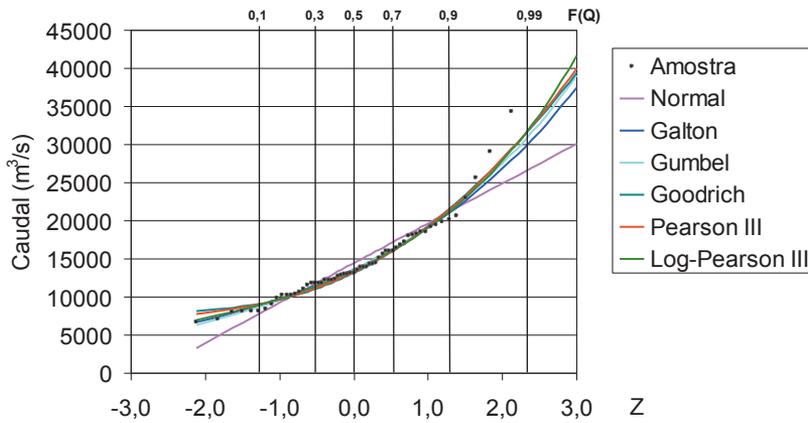
**Figura 11.4:** Precipitação útil acumulada em função da precipitação acumulada e do número da curva, *NC* | **pág. 496.**



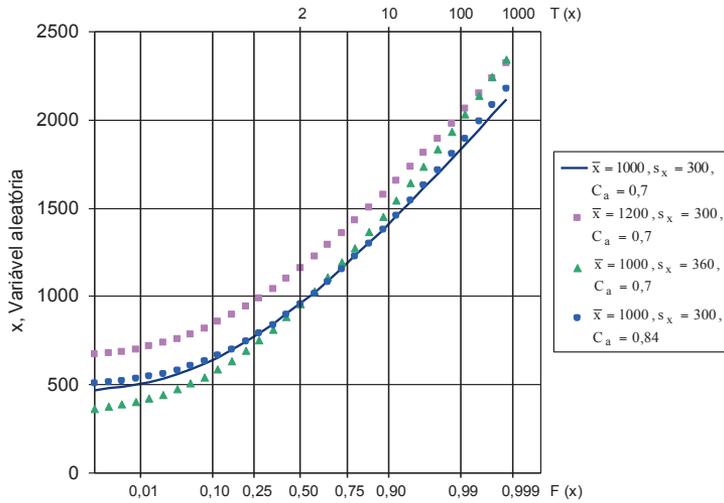
**Figura 11.5:** Razão entre a precipitação útil acumulada e a precipitação acumulada em função da precipitação acumulada e do número da curva,  $NC$  | **pág. 497.**



**Figura 11.6:** Máximos caudais observados no mundo em função da área da bacia hidrográfica e linhas ajustadas (adaptada de Herschy, 2002) | **pág. 502.**

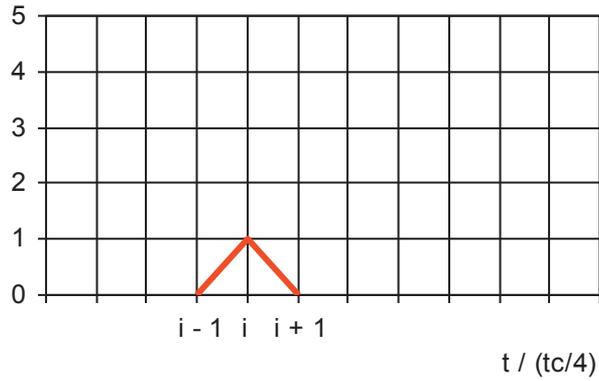


**Figura 11.7:** Ajustamento de diversas distribuições a uma amostra | **pág. 519.**



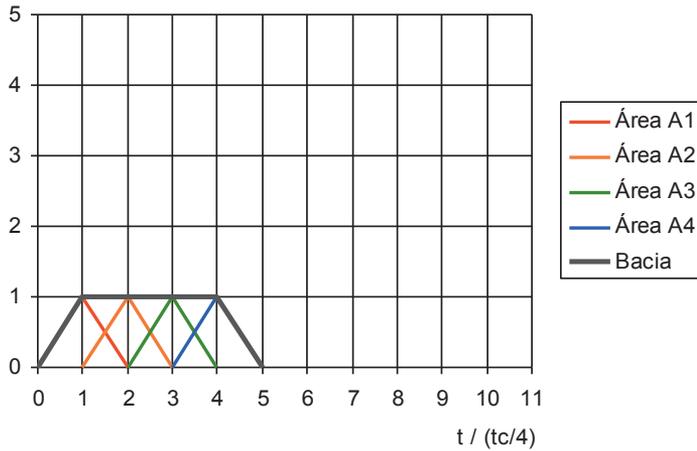
**Figura 11.8:** Sensibilidade aos parâmetros estatísticos da amostra | **pág. 520.**

$Q / (I A_0)$

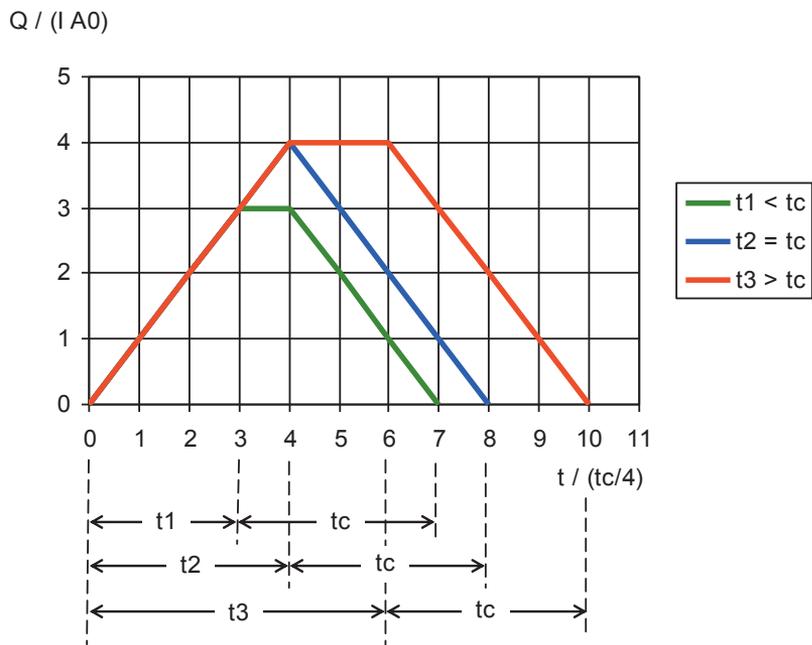


**Figura 11.11:** Resposta da área  $A_i$  | **pág. 523.**

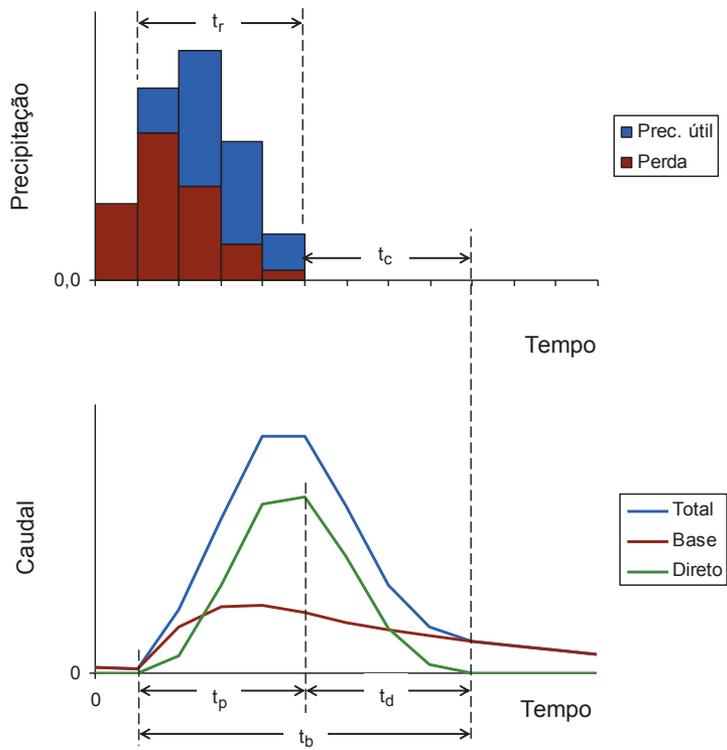
$Q / (I A_0)$



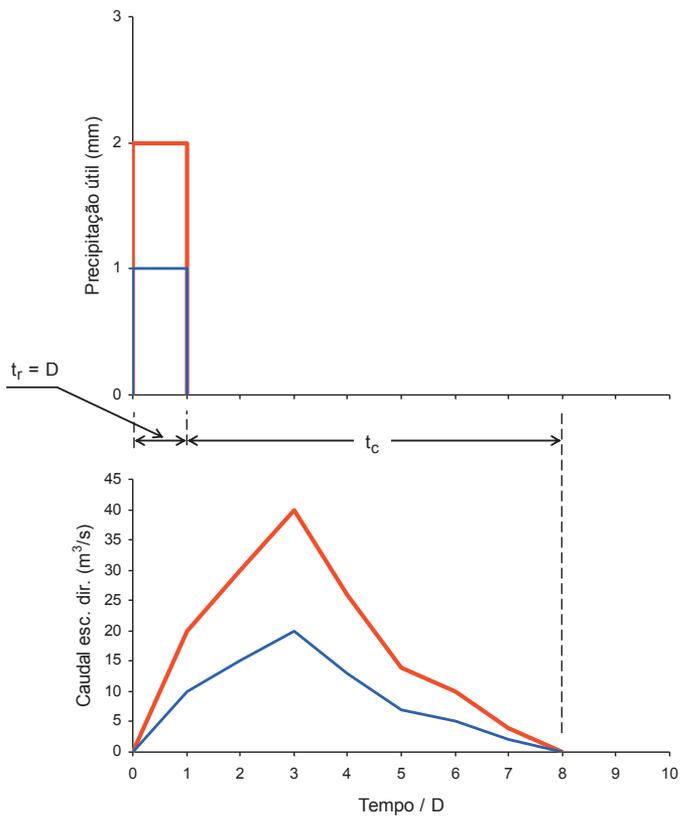
**Figura 11.12:** Resposta da bacia a uma precipitação com intensidade  $I$ , uniformemente distribuída e com duração igual a  $t_c/4$  | **pág. 524.**



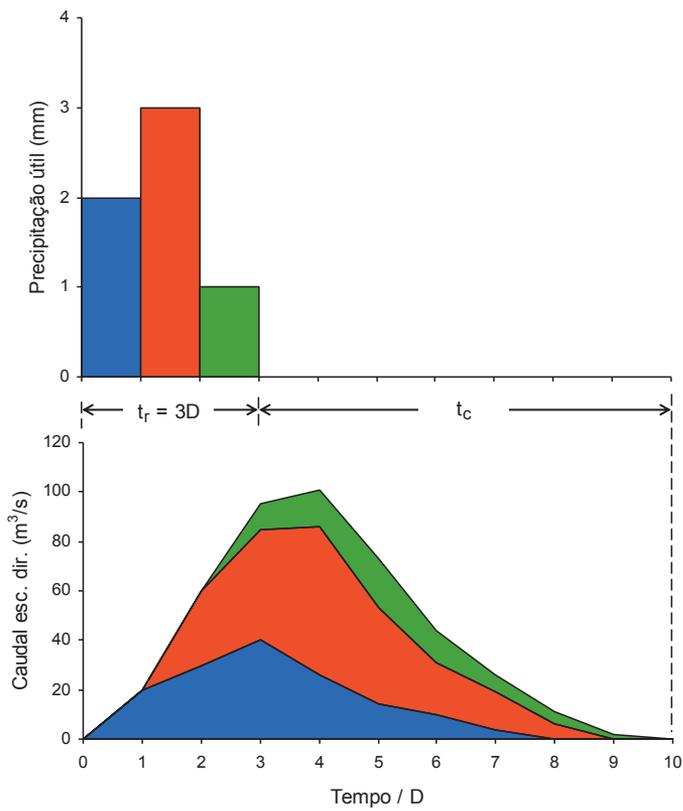
**Figura 11.13:** Respostas da bacia a precipitações com intensidade  $I$ , uniformemente distribuídas e diversas durações  $t_i$  | **pág. 525.**



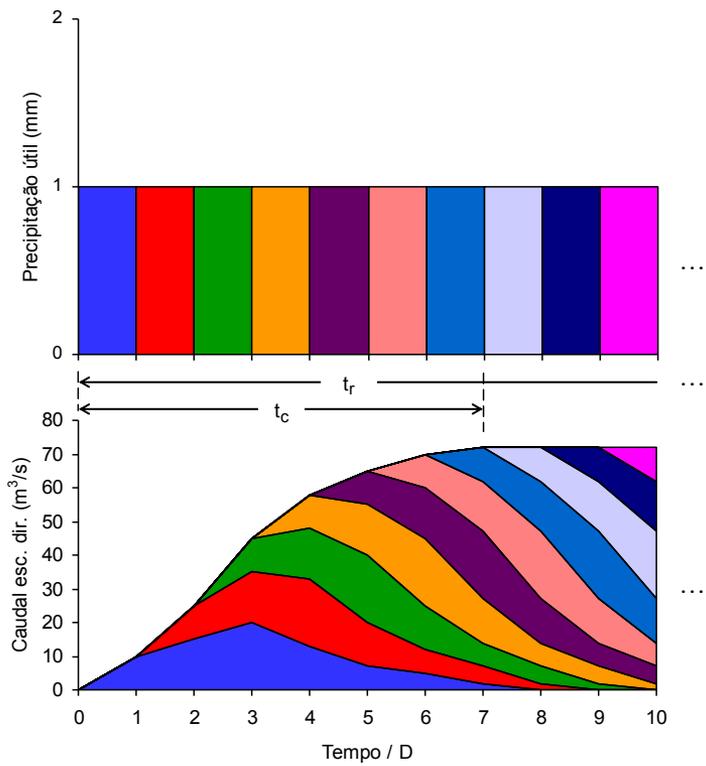
**Figura 11.14:** Componentes do hietograma e do hidrograma | **pág. 527.**



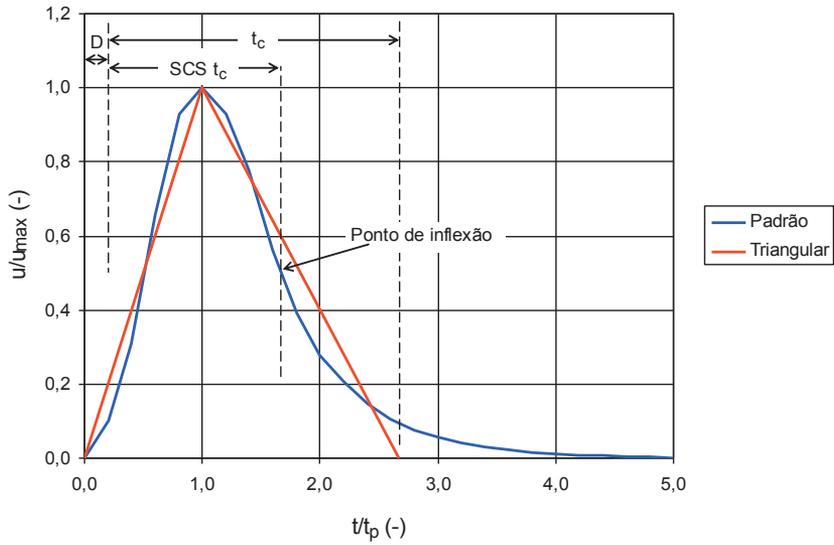
**Figura 11.15:** Postulado da proporcionalidade | **pág. 529.**



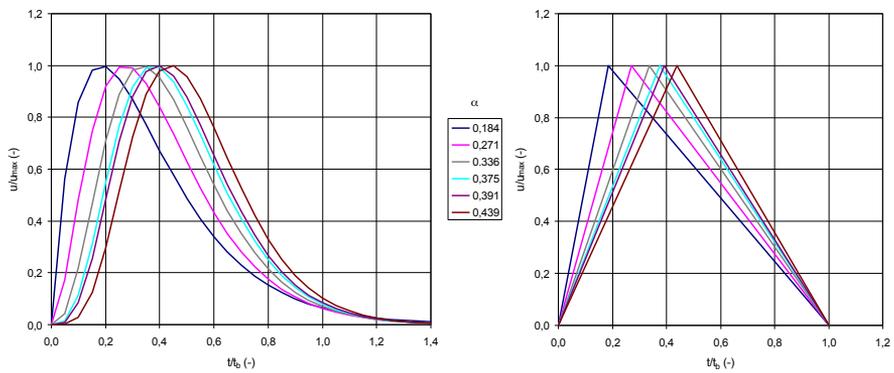
**Figura 11.16:** Postulado da sobreposição linear | **pág.** 530.



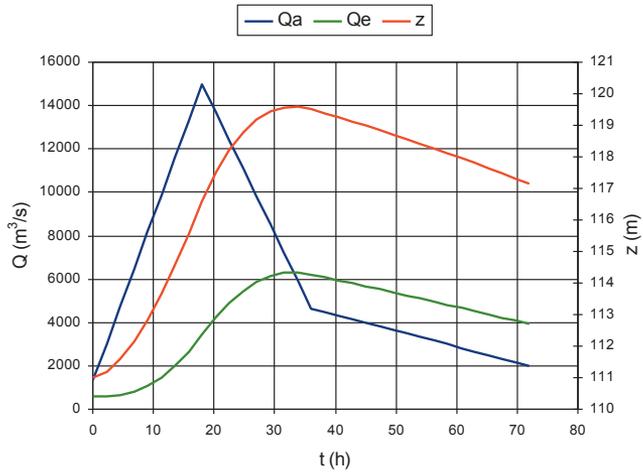
**Figura 11.17:** Hidrograma em S | pág. 533.



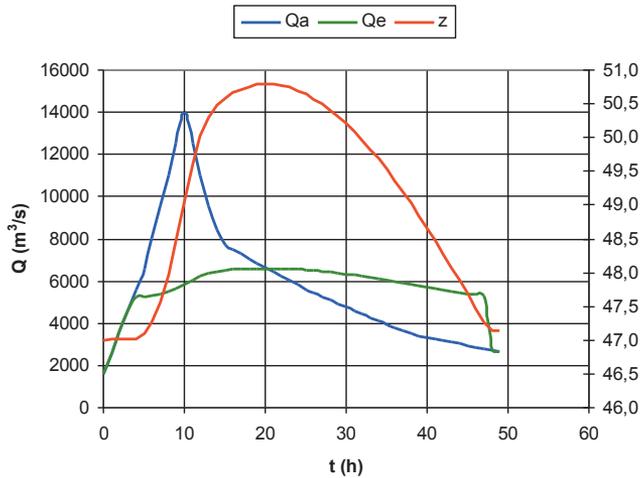
**Figura 11.19:** Hidrogramas unitários padrão e triangular do SCS | **pág. 540.**



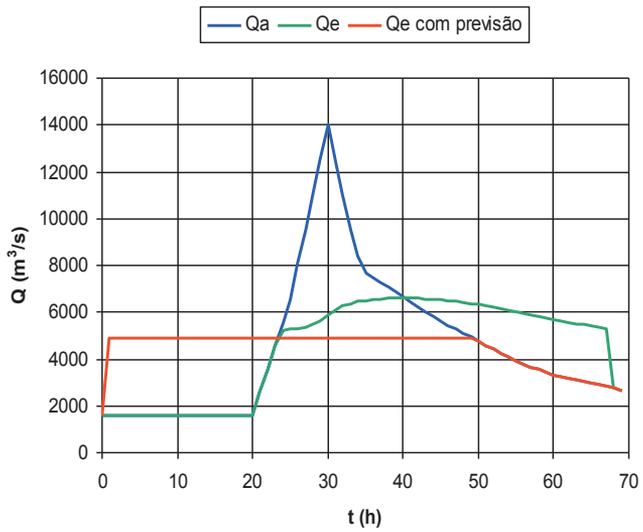
**Figura 11.20:** Hidrogramas unitários funcionais e triangulares | **pág. 544.**



**Figura 11.26:** Propagação da cheia num descarregador sem comportas | **pág.** 553.



**Figura 11.27:** Propagação da cheia num descarregador com comportas | **pág.** 554.

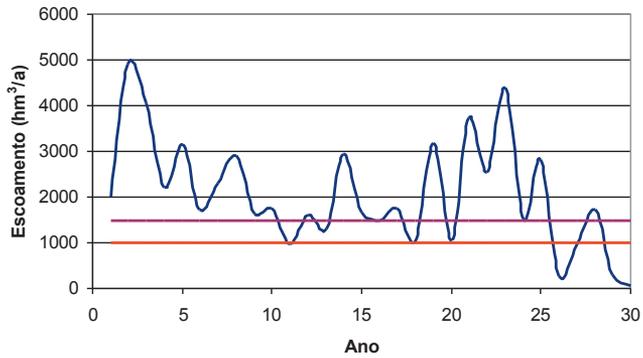


**Figura 11.28:** Hidrogramas de caudais descarregados sem e com previsão de cheia | **pág. 556.**

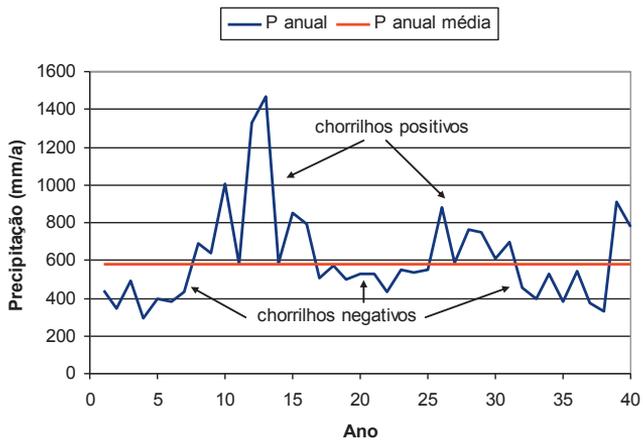
# 12

---

CARACTERIZAÇÃO DE SECAS



**Figura 12.2:** Períodos de seca numa série de escoamentos | **pág. 576.**



**Figura 12.3:** Série anual com chorrilhos positivos e negativos | **pág. 581.**

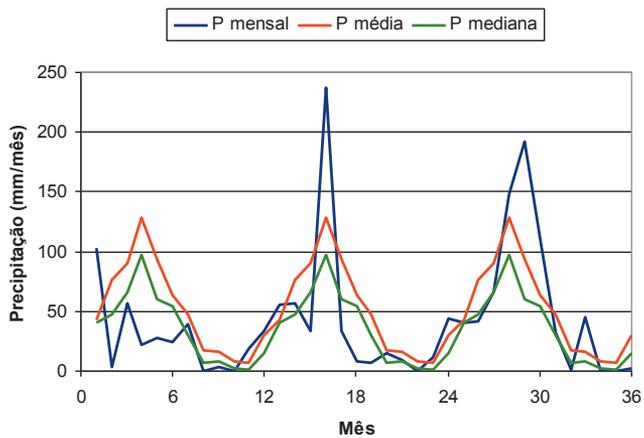


Figura 12.4: Precipitações, médias e medianas mensais | **pág. 583** .

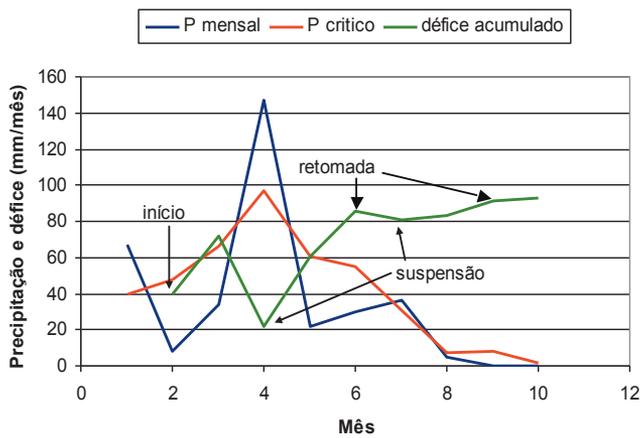
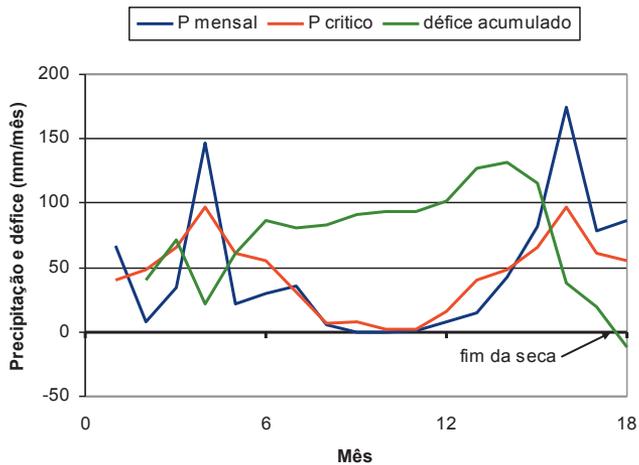
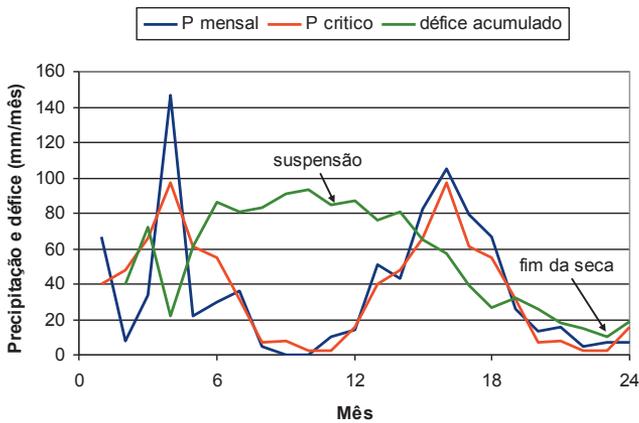


Figura 12.5: Início, suspensão e retomada da seca | **pág. 584**.



**Figura 12.6:** Fim da seca: recuperação total do déficit | **pág. 585.**

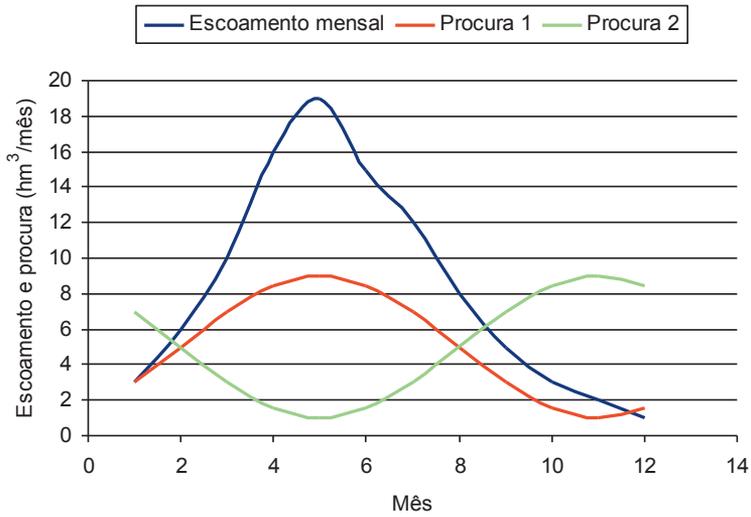


**Figura 12.7:** Fim da seca: duração da suspensão superior a 12 meses | **pág. 585.**

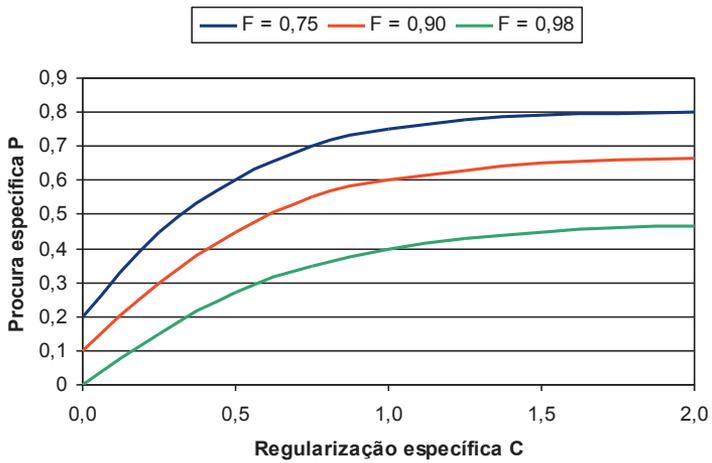
# 14

---

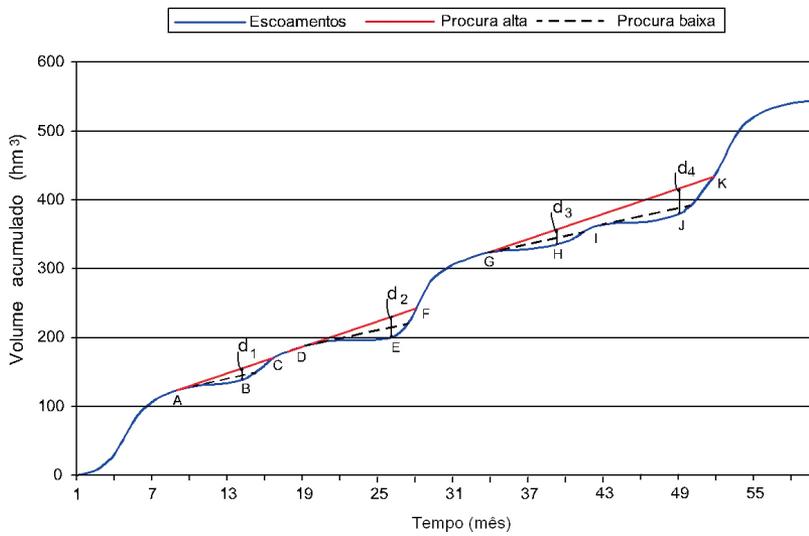
DIMENSIONAMENTO E EXPLORAÇÃO DE ALBUFEIRAS



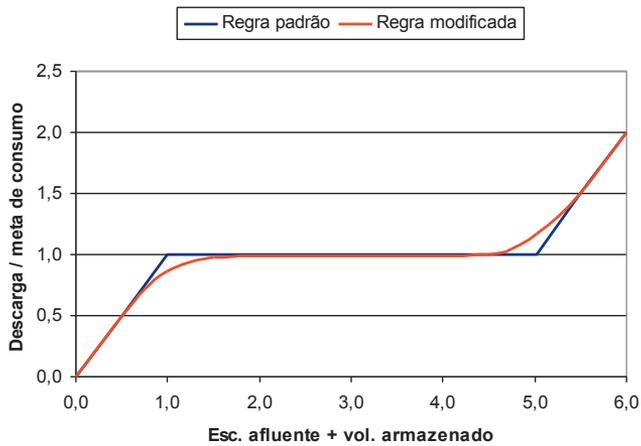
**Figura 14.1:** Armazenamento, escoamento afluente e procura | **pág. 619.**



**Figura 14.9:** Relação entre capacidade, procura e fiabilidade | **pág. 633.**



**Figura 14.10:** Ilustração do Método de Rippl | **pág. 635.**

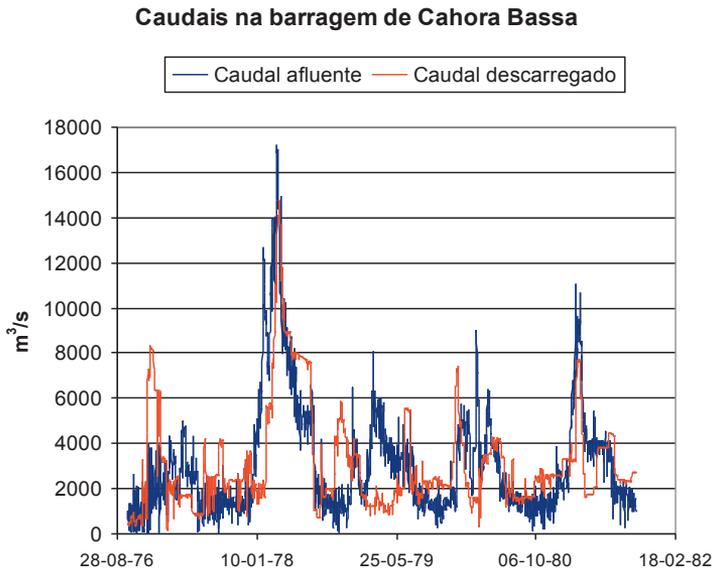


**Figura 14.13:** Regra de exploração padrão e modificações | **pág. 644.**

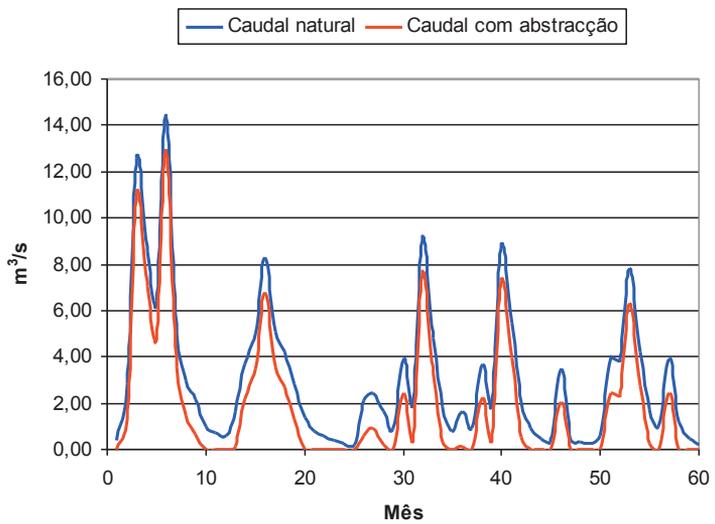
# 15

---

CAUDAIS ECOLÓGICOS



**Figura 15.1:** Caudais afluentes e descarregados na barragem de Cahora Bassa | **pág. 658.**



**Figura 15.2:** Alteração dos caudais naturais por efeito de abstracções de água | **pág. 658.**

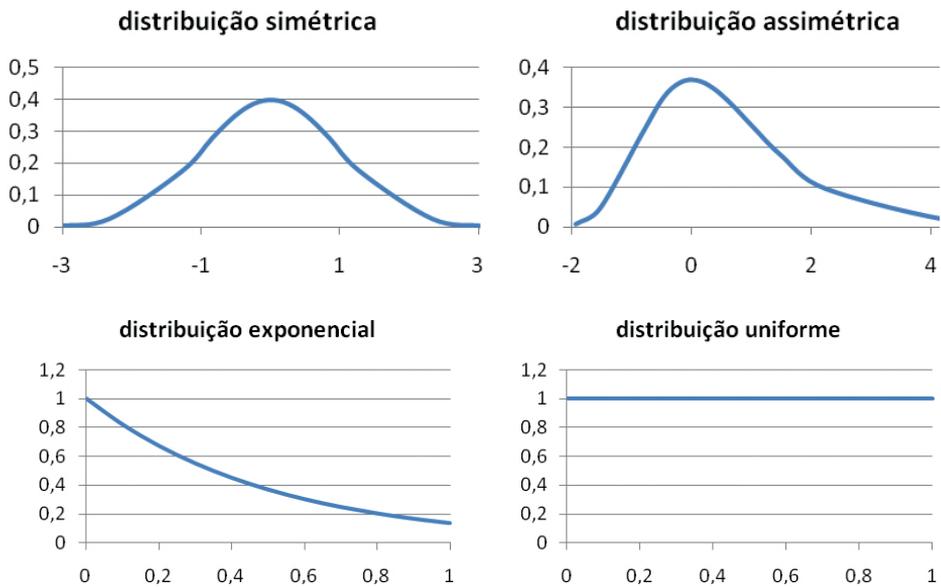


**Figura 15.3:** Biodiversidade dos ecossistemas fluviais | **pág. 660.**

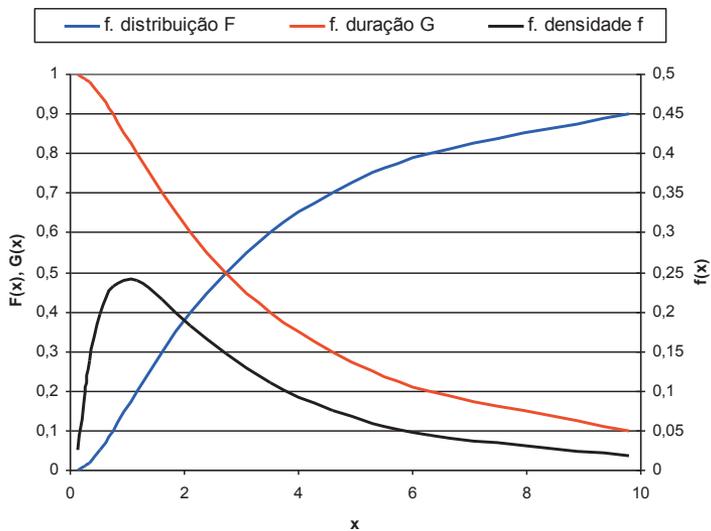
# ANEXO

---

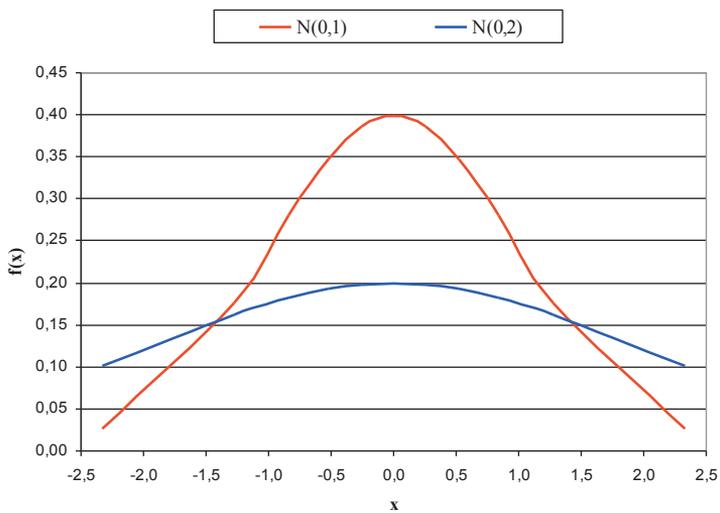
ESTATÍSTICA APLICADA À HIDROLOGIA



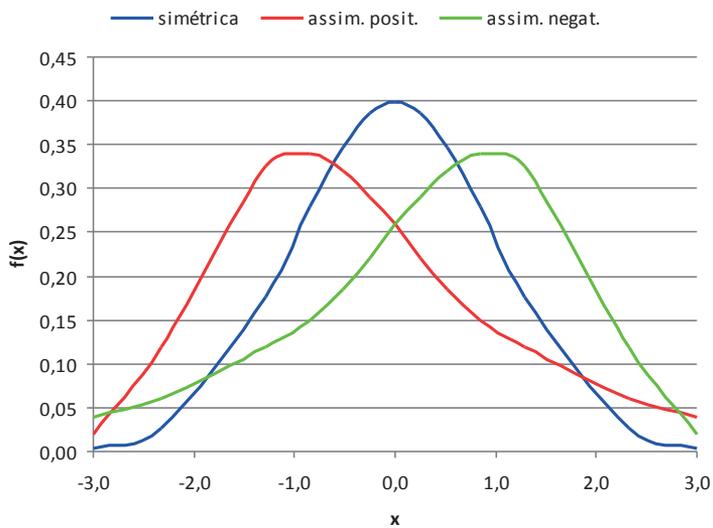
**Figura A.1:** Exemplos de função densidade  $f(x)$  | **pág. 728.**



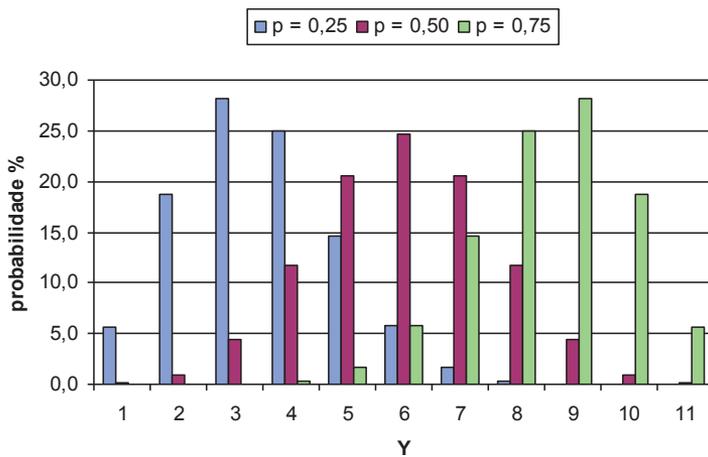
**Figura A.2:** Funções de distribuição  $F$ , duração  $G$  e densidade  $f$  | **pág. 729.**



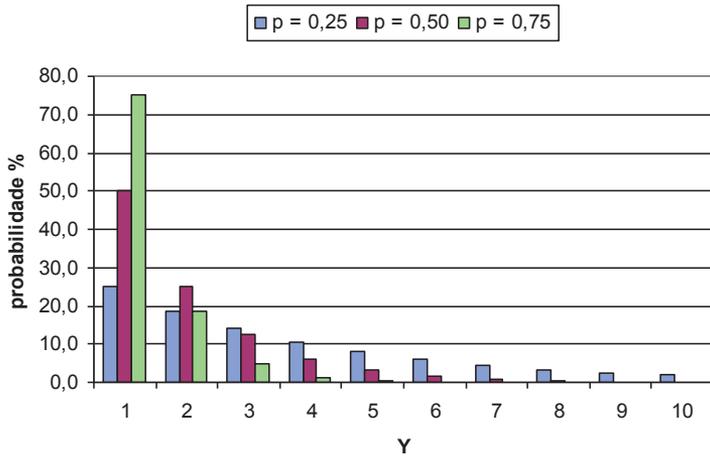
**Figura A.3:** Distribuições com a mesma média e variâncias diferentes | **pág. 733.**



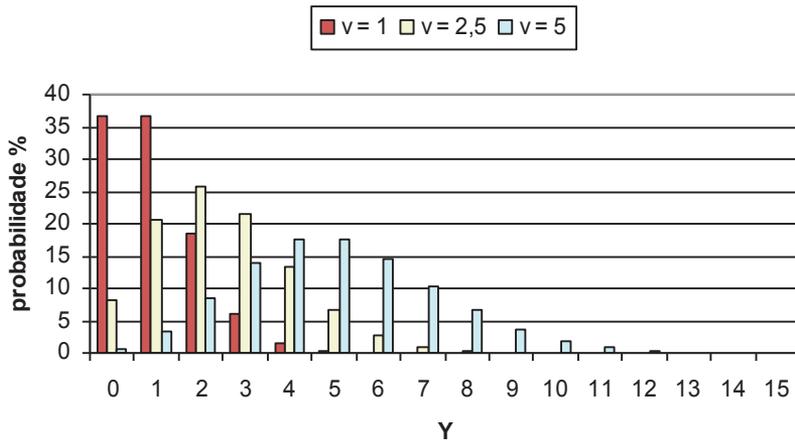
**Figura A.4:** Funções densidade com diferentes assimetrias | **pág. 733.**



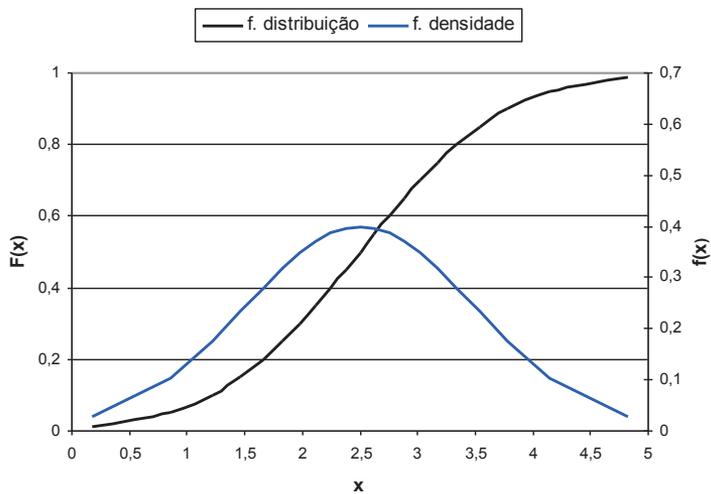
**Figura A.5:** Distribuição binomial para diversos valores de  $p$  | **pág. 742.**



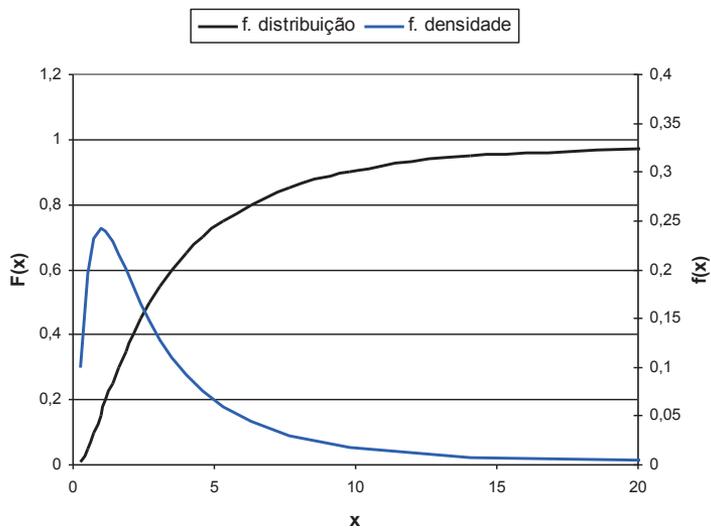
**Figura A.6:** Distribuição geométrica para diversos valores de  $p$  | **pág. 744.**



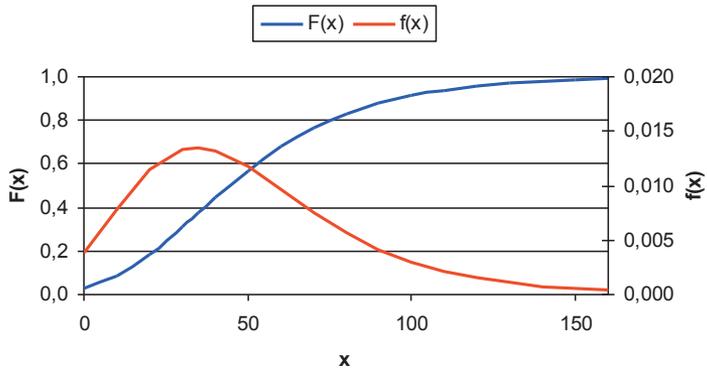
**Figura A.7:** Distribuição de Poisson para diversos valores do parâmetro  $v$  | **pág. 745.**



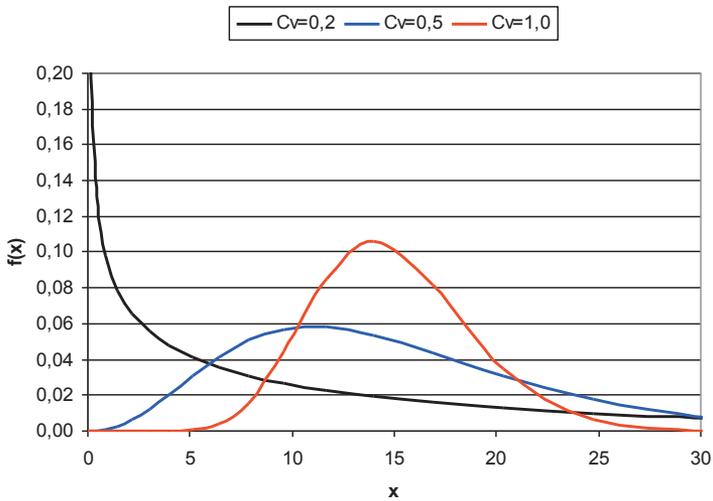
**Figura A.8:** Funções densidade e de distribuição Normal | **pág. 747.**



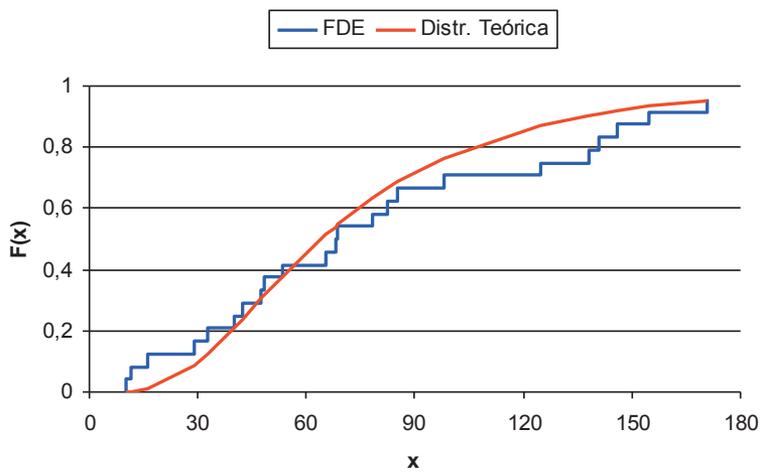
**Figura A.9:** Funções densidade e de distribuição log-Normal | **pág. 750.**



**Figura A.10:** Funções densidade e de distribuição Gumbel | **pág. 753.**



**Figura A.11:** Função densidade gama para diversos coeficientes de variação | **pág. 758.**



**Figura A.15:** Gráfico do teste de Kolmogorov-Smirnov | **pág. 768.**