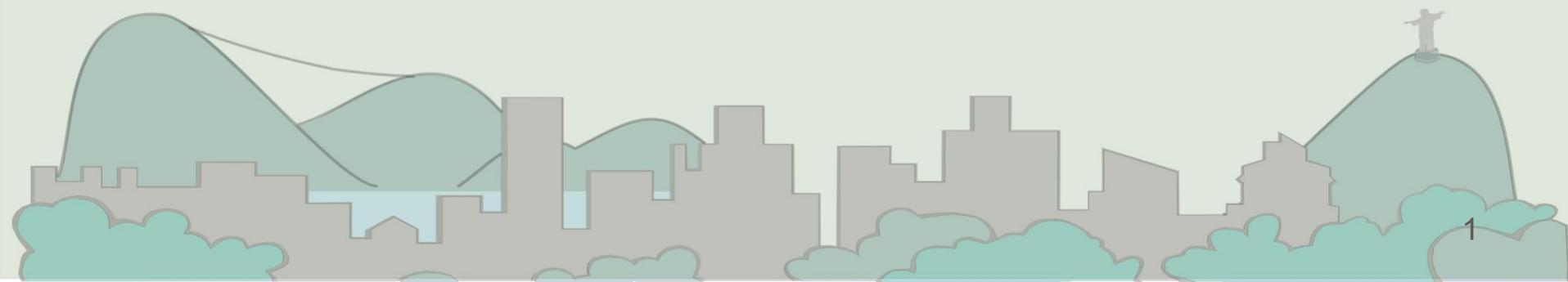




1. INTRODUÇÃO





Ocorrência da dinâmica e da variabilidade espacial e temporal dos processos hidrológicos

Contextualização Histórica

Avanços tecnológicos desde a Revolução Industrial por volta de 1820 e da medicina por volta de 1950



Crescimento demográfico acelerado



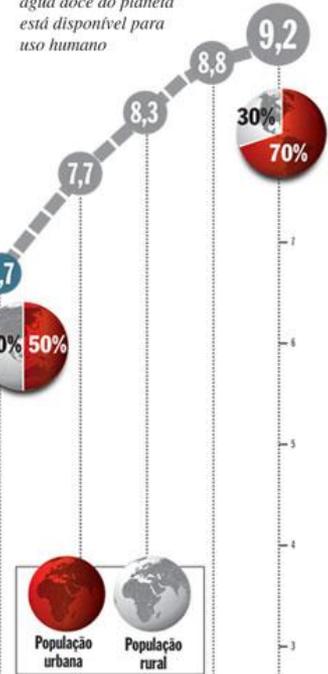
Desenvolvimento urbano intenso desde 1980

O início dos estudos de **medições de precipitação e vazão** ocorreu no século 19, porém somente **após 1950** com o advento do computador, que as técnicas usadas em **estudos hidrológicos** apresentaram um grande avanço.

Histórico de inundações

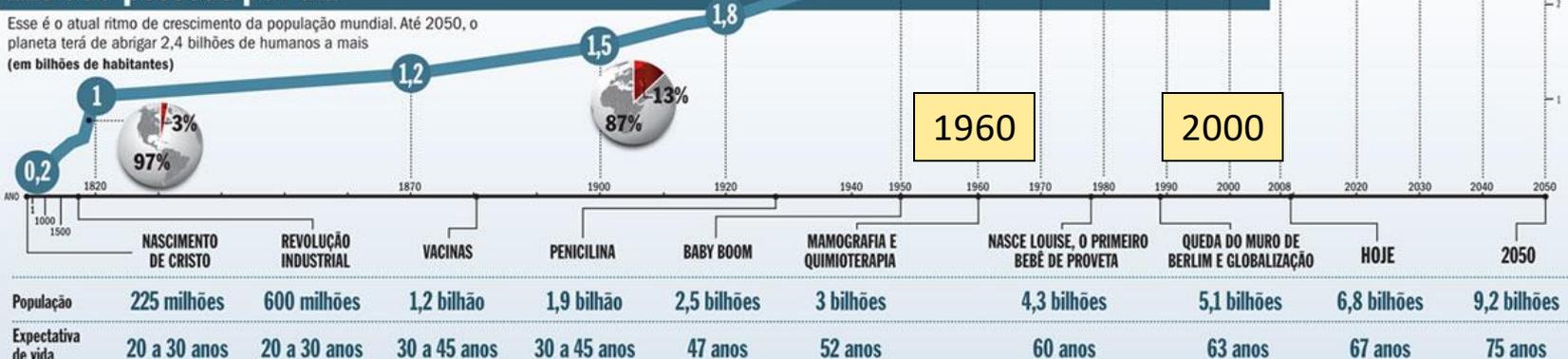


FALTA D'ÁGUA A disputa em torno de um poço em aldeia indiana: menos de 1% da água doce do planeta está disponível para uso humano



213 000 pessoas por dia

Esse é o atual ritmo de crescimento da população mundial. Até 2050, o planeta terá de abrigar 2,4 bilhões de humanos a mais (em bilhões de habitantes)

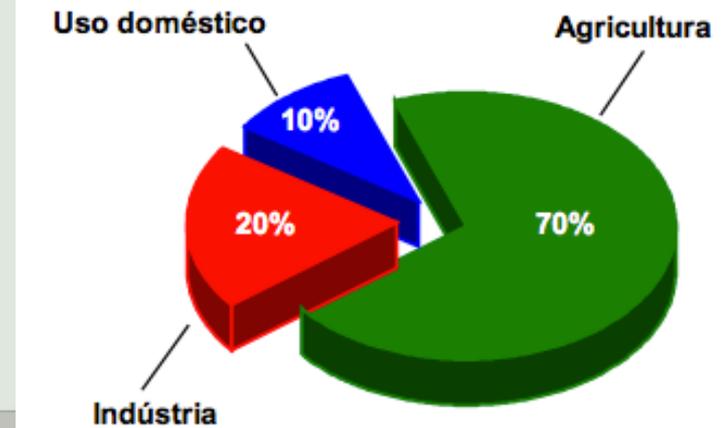
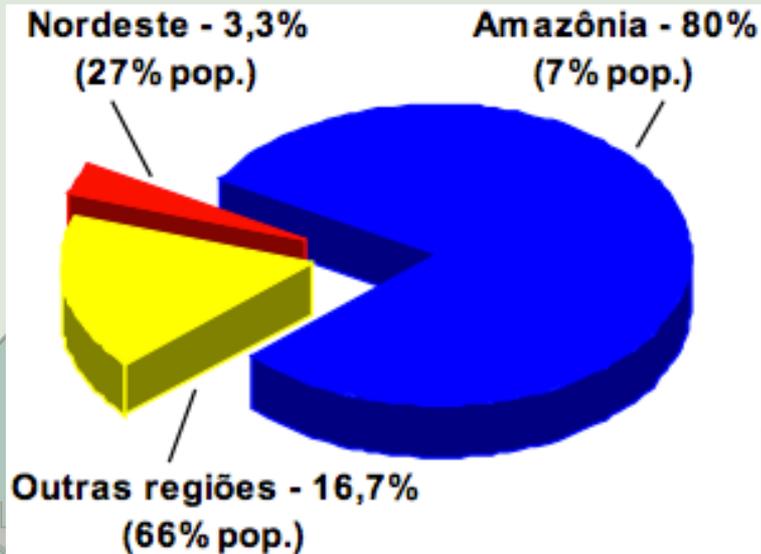
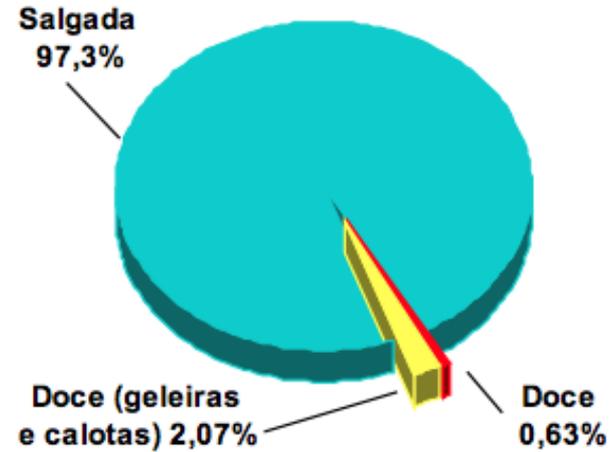
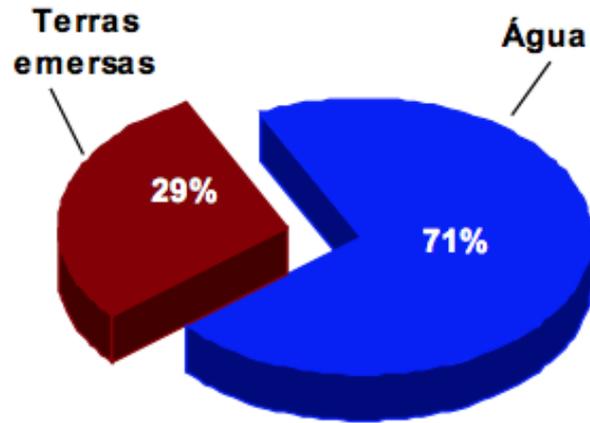




Urbanização no Brasil

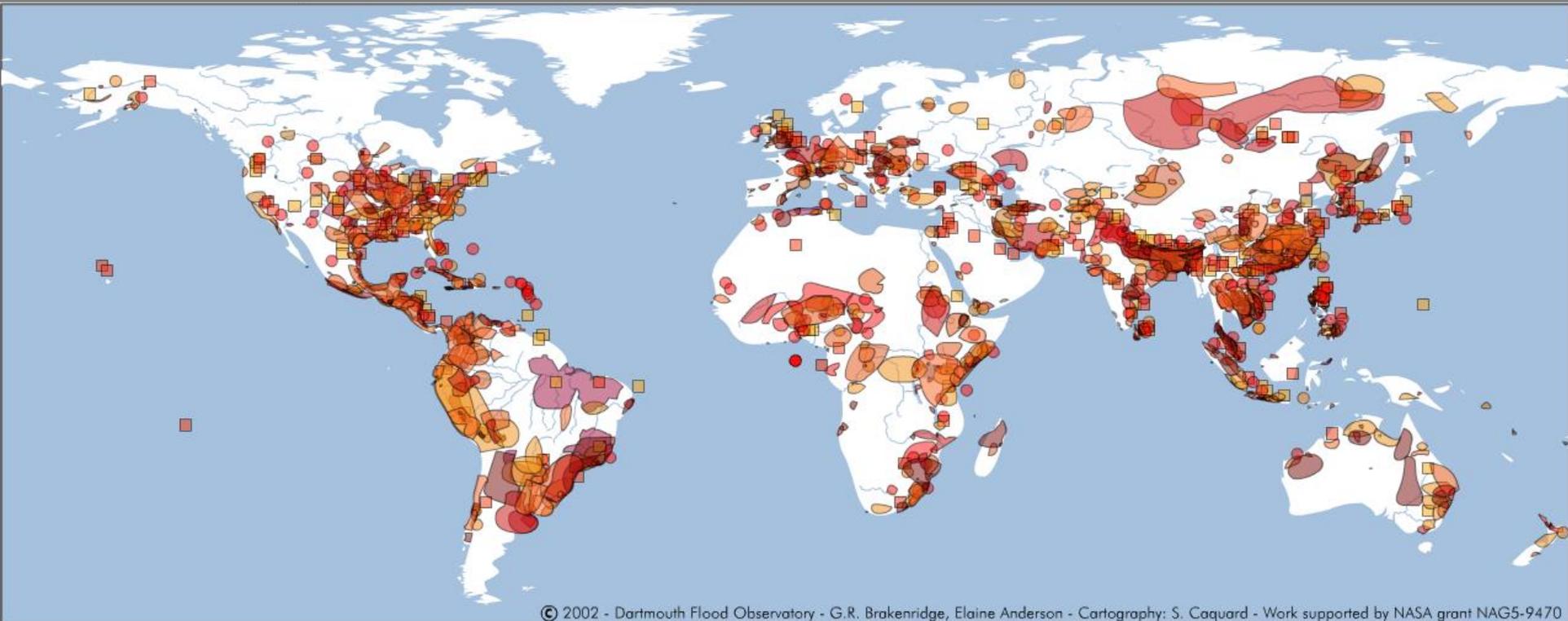
- grande **crescimento urbano** depois de 1950
- várias cidades com população **acima de 1 milhão**;
- **crescimento de periferia** e estabilização dos núcleos das cidades
- **expansão irregular** na periferia sobre as áreas de mananciais (fundos de vale)
- **contaminação** das fontes de abastecimento e degradação ambiental

Ano	População Milhões de habitantes	Parcela da população urbana %
1970	93,1	55,9
1980	119,0	67,7
1991	146,8	75,5
1996	157,1	78,4
2000	169,8	81,2
2010	190,8	84,4
2022	203,1	87,4





Histórico de inundações: Arquivo mundial desde 1985



© 2002 - Dartmouth Flood Observatory - G.R. Brakenridge, Elaine Anderson - Cartography: S. Coquard - Work supported by NASA grant NAG5-9470





Ocupação,
canalização, resíduos
sólidos, falta de
planejamento

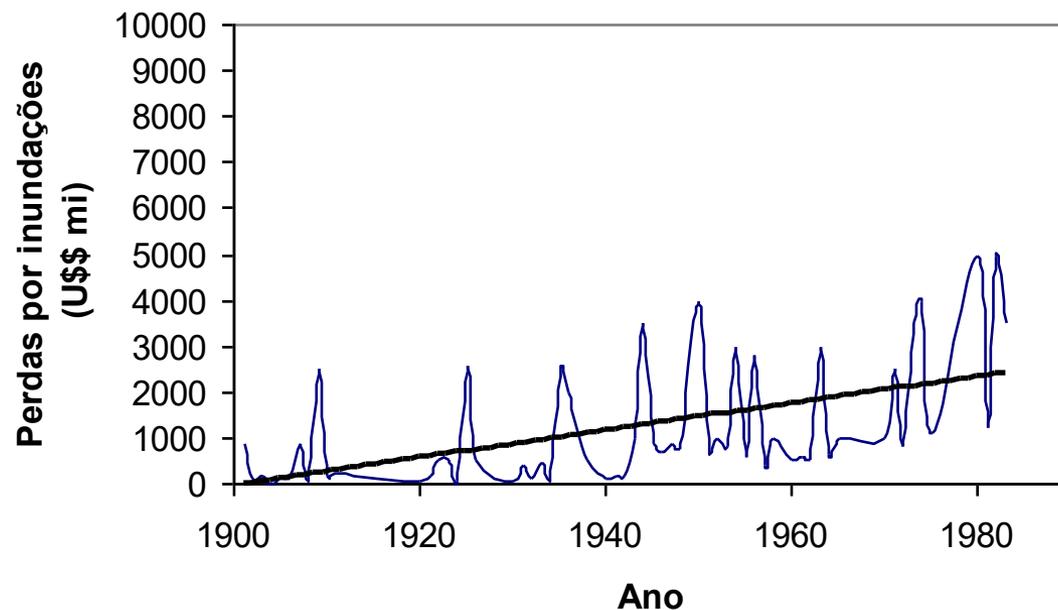


Inundações urbanas

Crescimento
populacional e
inundações



Eventos diretamente
relacionados que
envolvem perdas
humanas e materiais

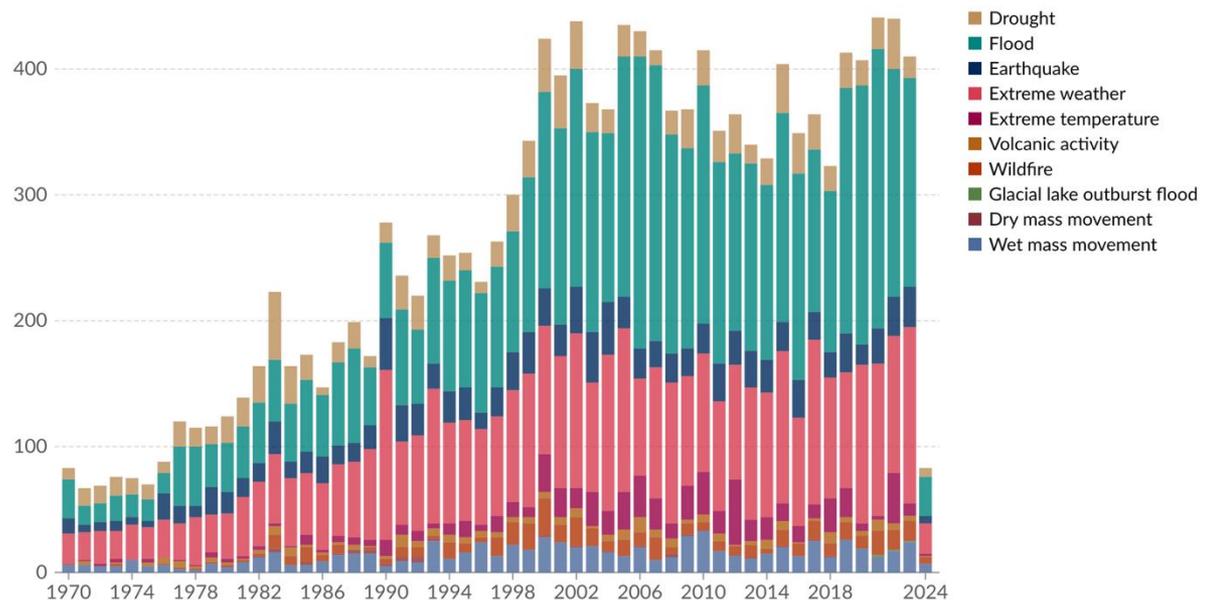


Desde 1990, os desastres naturais somaram aproximadamente **1,3 milhões de mortes** em todo o mundo, segundo dados compilados de diversas fontes, incluindo o *Centre for Research on the Epidemiology of Disasters* (CRED).

Neste mesmo período, a catástrofe identificada como a de maior recorrência é a **inundação**. As inundações afetaram mais de **2,3 bilhões de pessoas** e resultaram em mais de **1 trilhão de dólares** em danos econômicos globais.

Global reported natural disasters by type, 1970 to 2024

The annual reported number of natural disasters, categorised by type. The number of global reported natural disaster events in any given year. Note that this largely reflects increases in data reporting, and should not be used to assess the total number of events.



Data source: EM-DAT, CRED / UCLouvain (2024)

Note: Data includes disasters recorded up to April 2024.

OurWorldInData.org/natural-disasters | CC BY

Extreme temperature (calor/frio extremos)

- **Ano mais quente no Brasil (2023):** temperatura média anual **0,69 ° C** acima da climatologia 1991–2020; vários estados registraram picos de onda de calor ao longo do ano.
- **Onda de frio ampla (27/07–01/08/2021):** massa de ar polar derrubou as temperaturas no Sul, Sudeste, Centro-Oeste e até em porções da Amazônia (friagem), com geadas e mínimas muito baixas.
- **Sequência de ondas de calor em 2024 (novembro):** informativos do INMET relataram persistência de calor acima da média em grande parte do país no início de novembro, com manutenção de avisos especiais.

Extreme weather (tempo severo não-térmico: vento/precipitação/poeira/granizo)

- **Tempestades de poeira no interior de SP (set-out/2021):** episódios de transporte intenso de poeira (“haboobs”) atingiram Araçatuba, Ribeirão Preto e outras cidades; análise do INPE documenta datas e municípios afetados.
- **Ciclone extratropical e granizo em SC (07/03/2023):** sistema provocou tempestades, alagamentos e episódios de granizo em diversas áreas do estado.
- **Tornado em Gentil, RS (12/05/2024):** a Defesa Civil do estado confirmou a ocorrência após temporais severos associados a nuvens de tempestade.



Catálogos de Desastres Naturais

Atlas Digital de Desastres no Brasil (MIDR/SEDEC): o governo federal confirmou a **atualização com os dados consolidados de 2024**. A ferramenta cobre registros desde 1991 e permite filtrar por tipo (ex.: **Inundação**), por UF e por ano para extrair a série anual. Disponível em:

<https://atlasdigital.mdr.gov.br/paginas/graficos.xhtml>

Base operacional S2iD (registros e reconhecimentos federais) e o **portal de dados abertos do MIDR**: disponibilizam os conjuntos para exploração/descarga, que podem ser agregados por **ano e tipo de desastre**.

<https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/protecao-e-defesa-civil/sistema-integrado-de-informacoes-sobre-desastres>

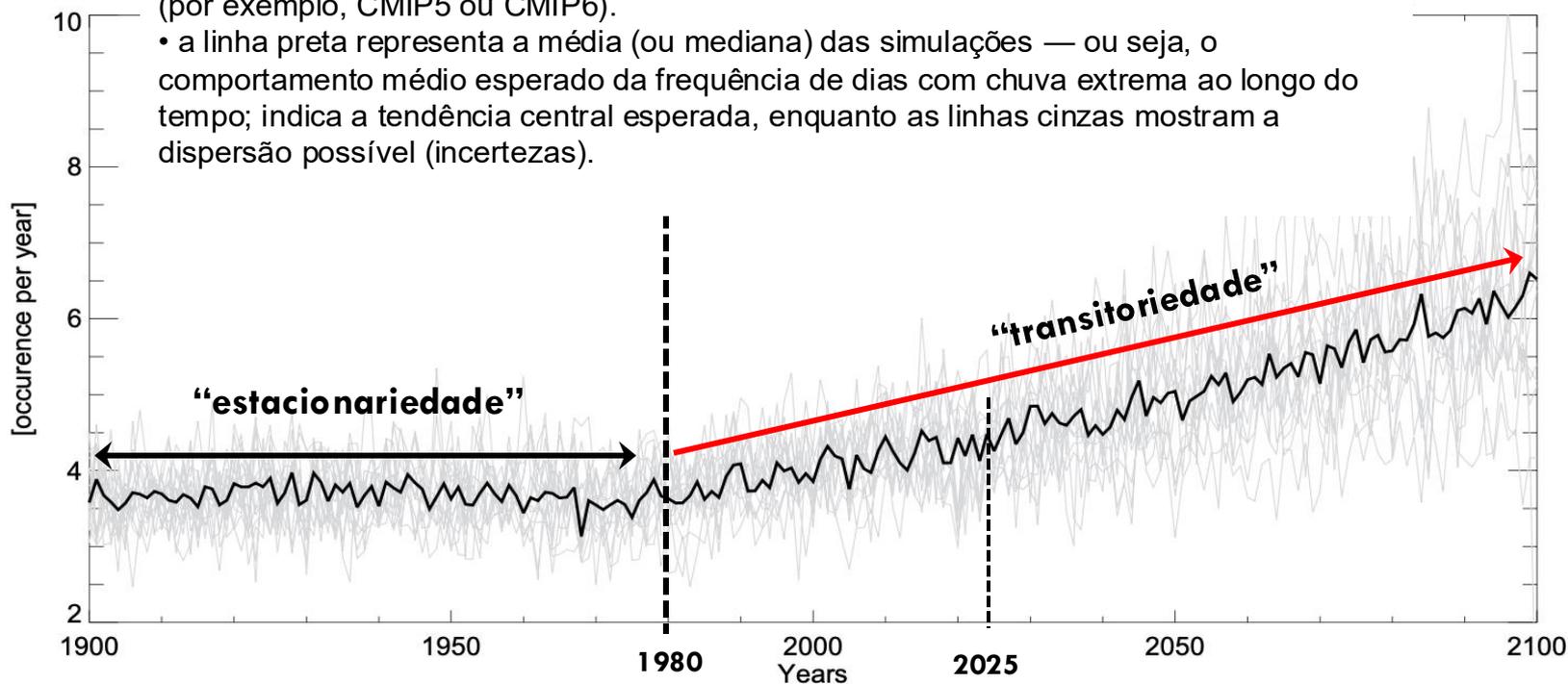
Como alternativa internacional, o **EM-DAT/Our World in Data** também publica séries **por país e por tipo** até 2024 (categoria **Flood**), úteis para comparação com outros países (atenção às diferenças de escopo/critério).

Disponível em:

<https://ourworldindata.org/grapher/number-of-natural-disaster-events>

Frequência da precipitação diária \geq percentil 99° na Europa

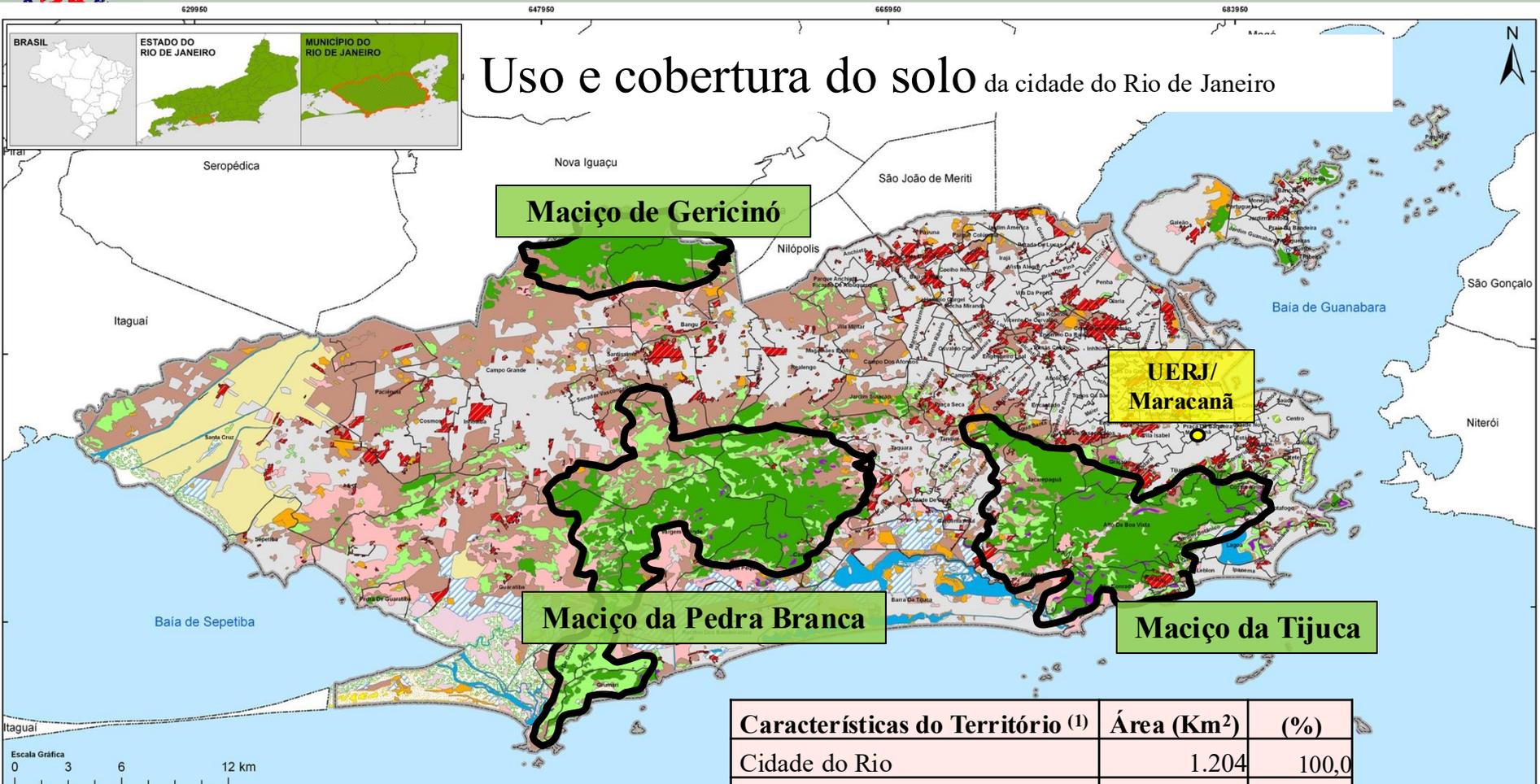
- linha cinza corresponde a uma simulação específica de um modelo climático global (GCM), representa a **variabilidade natural e as incertezas nas projeções futuras**.
- as simulações constituem conjuntos de modelos usados em relatórios como os do IPCC (por exemplo, CMIP5 ou CMIP6).
- a linha preta representa a média (ou mediana) das simulações — ou seja, o comportamento médio esperado da frequência de dias com chuva extrema ao longo do tempo; indica a tendência central esperada, enquanto as linhas cinzas mostram a dispersão possível (incertezas).



(adaptado MYHRE, ALTERSKJÆR, STJERN, 2019)

A precipitação diária correspondente ao percentil 99° (R99p) significa que 99% dos valores da precipitação diária da série histórica analisada possuem valor menor que R99p, enquanto 1% possui valor superior ao R99p.

Uso e cobertura do solo da cidade do Rio de Janeiro



- Legenda**
- Limite do Município do Rio de Janeiro
 - Limite de Bairro
 - Limite de Outros Municípios
 - Favelas (2008)
 - Afloramento rochoso
 - Apicum
 - Campo Antrópico
 - Cultura/Pastagem
 - Floresta
 - Floresta alterada
 - Mangue
 - Parques
 - Praia
 - Restinga
 - Solo Exposto
 - Urb não consolidada
 - Águas interiores
 - Área Urbana
 - Área úmida
 - Corpo Hídrico

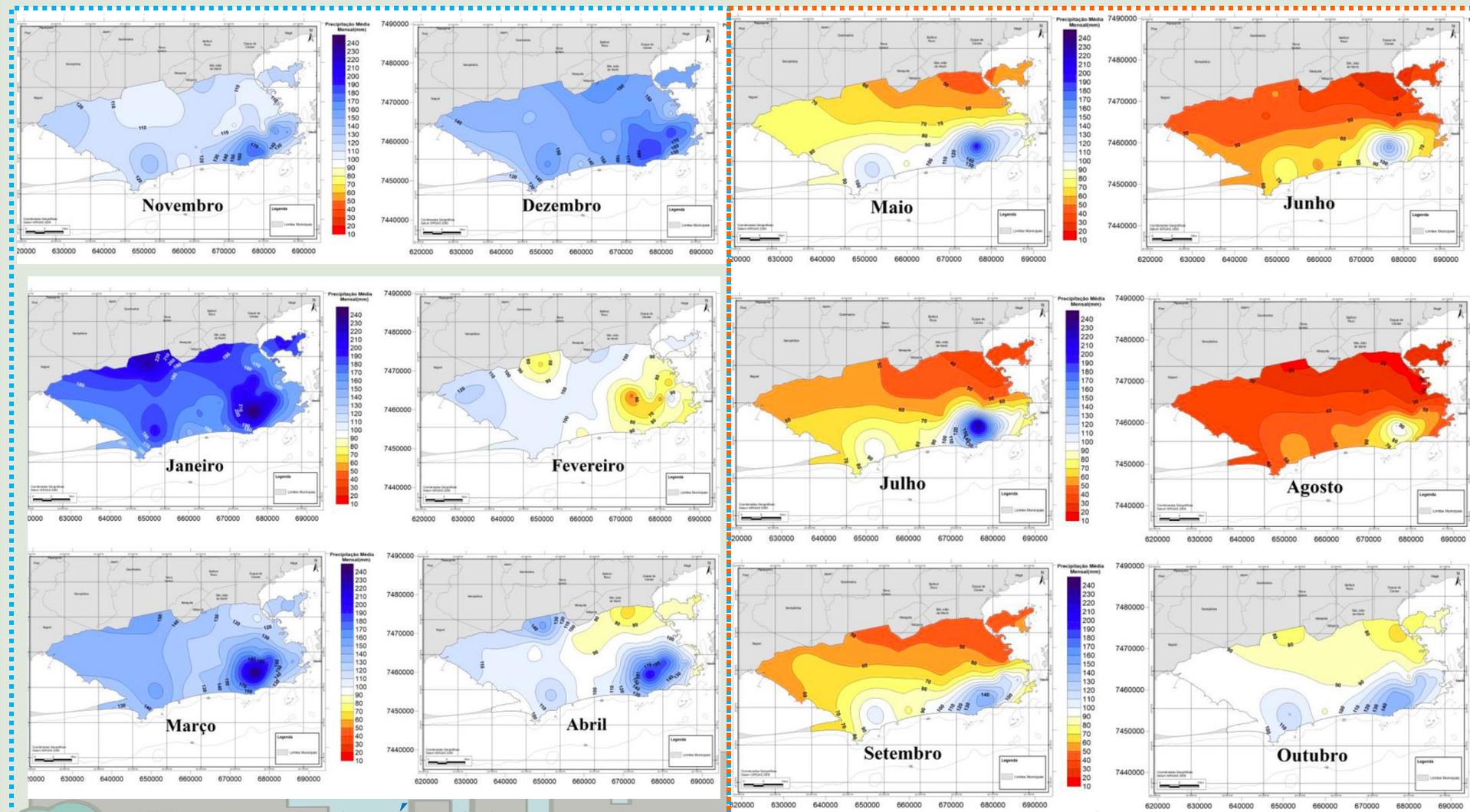
Características do Território ⁽¹⁾	Área (Km ²)	(%)
Cidade do Rio	1.204	100,0
Urbanizada ⁽²⁾	600	49,8
Não-Urbanizada ⁽²⁾	604	50,2
Maciço da Tijuca	92	7,6
Maciço da Pedra Branca	125	10,4
Maciço de Gericinó	14	1,2
Área Total dos Maciços	231	19,2
Favelas ⁽²⁾	54	4,5

(1) IBGE, 2010; (2) IPP, 2018



Distribuição das chuvas na cidade do Rio de Janeiro

(SICILIANO et al., 2018)



Período Úmido

Período Seco

Histórico de inundações na cidade do Rio de Janeiro



Centro da Cidade. 1906. Acervo Casa de Rui Barbosa.



Tijuca. 1911. Acervo da Biblioteca Nacional.



Catete e Praça da Bandeira. 1928.
Acervo da Biblioteca Nacional.



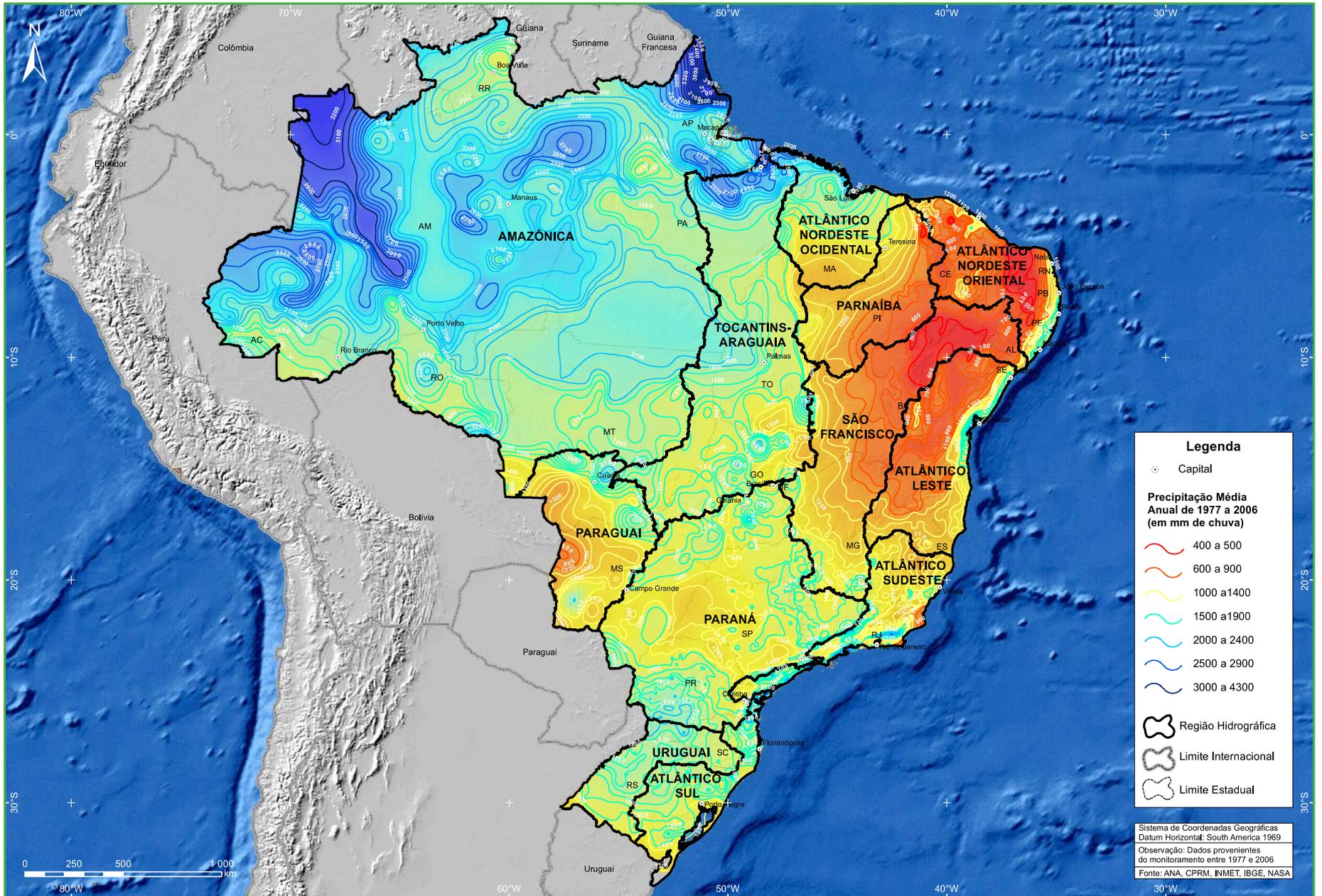
Jardim Botânico, 1966. Acervo do Jornal O Globo.



Centro, 1976. Acervo do Jornal O Globo.



Muzema, 2019. Acervo do Jornal O Globo.



Águas Superficiais

A **chuva é a grande fonte de água** para o continente. Sua quantidade e dinâmica de ocorrência durante o ano são variáveis no território.

Embora a **chuva média anual do Brasil seja de 1.760 mm**,
pode-se observar no ano:

- menos de 500 mm de chuva na região Semiárida e
- mais de 3.000 mm na região Amazônica.

Grandes variações da chuva ocorrem inclusive dentro das bacias, como se verifica explicitamente na UGRH São Francisco.

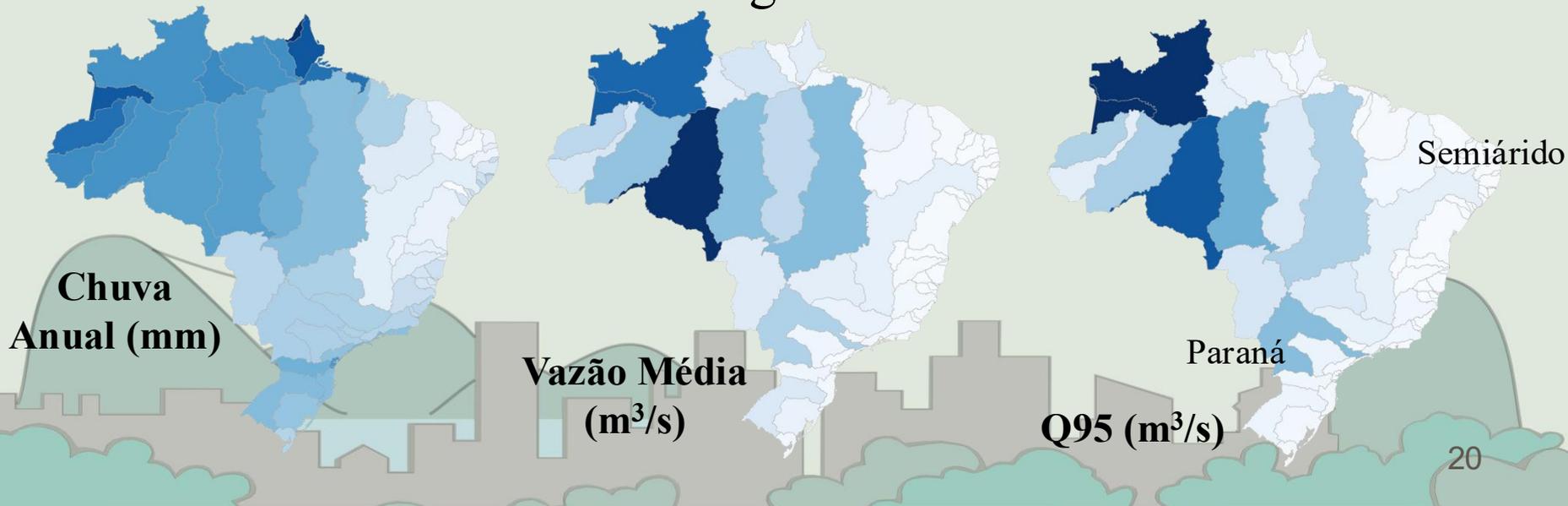
As **variações de regimes fluviométricos**, tanto espaciais como temporais, observadas nas bacias hidrográficas brasileiras, se devem à **combinação das:**

- variadas condições climáticas,
- armazenamento no solo,
- demandas evaporativas e
- diferentes graus de declividade dos terrenos.

Todavia, o fator predominante é a **chuva**.

Chuvas e Vazões

Cerca de **255 mil m³/s** de água escoam em média pelo território **brasileiro**, com (i) 80% do volume na bacia Amazônica; (ii) a Q95 corresponde a aproximadamente 30% da vazão média; (iii) enquanto a Q95 em rios da bacia do Paraná pode ultrapassar 40% da vazão média; (iv) :em bacias do Semiárido a maioria dos rios seca no período de estiagem, de forma que a ampliação da garantia de oferta de água só pode ser alcançada a partir de reservatórios artificiais ou por transferências de água de outras bacias.



A **Q95** é obtida pela **ordenação das vazões diárias** medidas na estação fluviométrica durante todo seu histórico, sendo o valor que limita as 5% menores observações.

Assim, espera-se que em 95% do tempo a vazão no rio seja maior ou igual à Q95.

□ Outra medições:

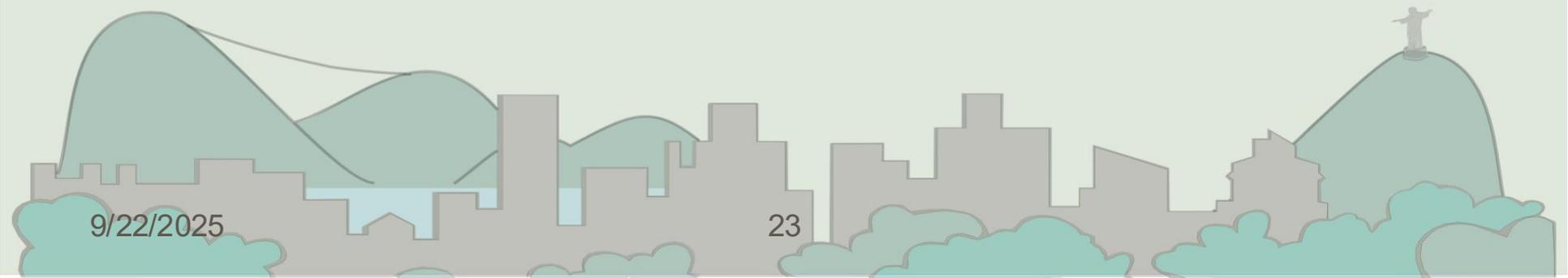
- Q90 e Q95 – calculada através da análise de frequência;
- Q7,10 – calculado com dados estatísticos.

□ Usos:

- Usos múltiplos da água;
- Enquadramento para padrões de qualidade da CONAMA 357/05

Regiões Hidrográficas do ERJ

A disponibilidade de água no Estado do RJ é heterogênea e fortemente influenciada pela diversidade climática e geomorfológica, além do efeito das intervenções antrópicas na dinâmica natural dos cursos hídricos.



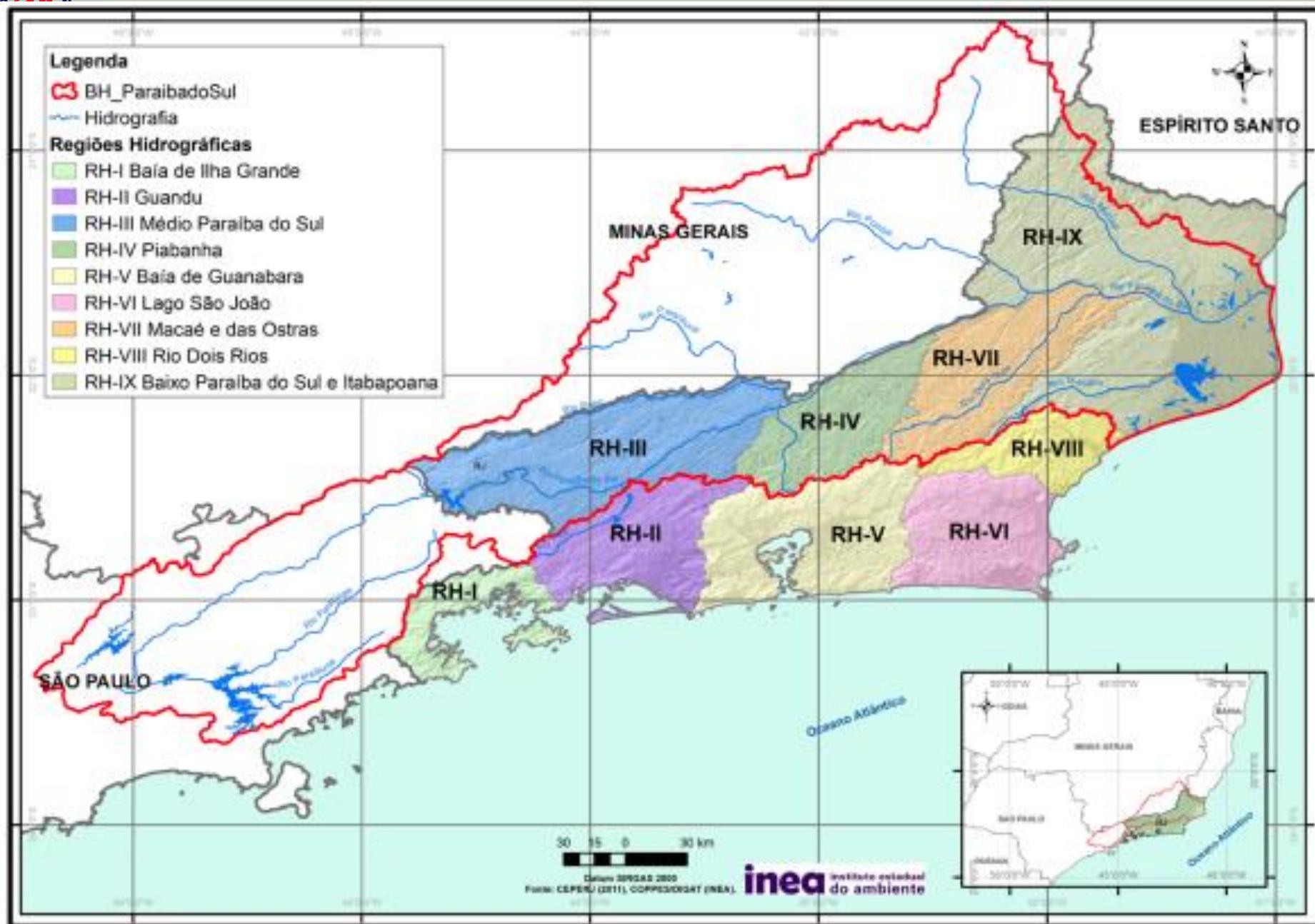


Figura 1 - Regiões hidrográficas do Estado do Rio de Janeiro e delimitação da Bacia do Rio Paraíba do Sul

Disponibilidade hídrica

A região apresenta uma situação de pouco “conforto” quanto à disponibilidade hídrica, com valor estimado de $1\,279\text{ m}^3/\text{hab}/\text{ano}$.

Tabela 1 - Vazões de referência para as regiões hidrográficas do Estado do Rio de Janeiro

Disponibilidade hídrica ($\text{m}^3/\text{hab}/\text{ano}$)	Situação
1.700 - 1.000	ALERTA de escassez hídrica
1.000 - 500	Escassez hídrica CRÔNICA
< 500	Escassez hídrica ABSOLUTA

Fonte: Beekman, 1998

< $500\text{ m}^3/\text{hab}/\text{ano}$ – Situação de escassez;
500 a $1.700\text{ m}^3/\text{hab}/\text{ano}$ – Situação de estresse;
> $1.700\text{ m}^3/\text{hab}/\text{ano}$ – Situação confortável.

Vazões de referência

A disponibilidade hídrica natural de uma bacia é uma grandeza expressa por meio de vazões de referência, como valores estatisticamente calculados com a finalidade de representar as vazões mínimas, tais como $Q_{7,10}$ e $Q_{95\%}$.

$$F = 1 / TR;$$

$$TR = 1 / F$$



Vazões de referência de Regiões Hidrográficas do ERJ

Tabela 4 - Vazões de referência para as regiões hidrográficas do Estado do Rio de Janeiro

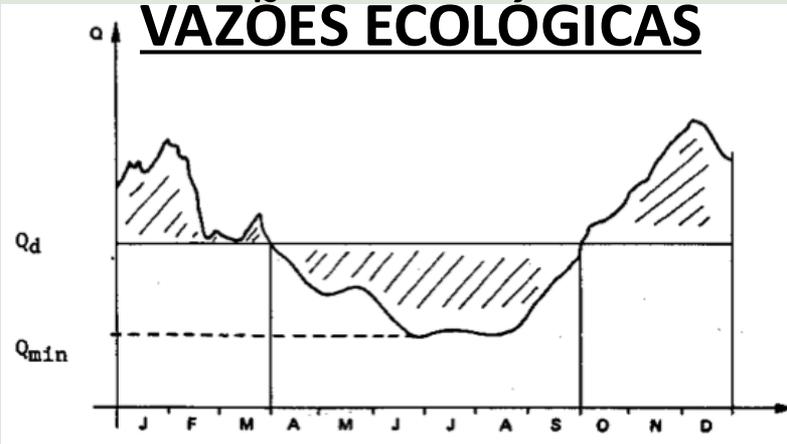
Região hidrográfica	Vazões (m ³ /s)		
	Q7,10	Q95%	QMLT
RH I - Baía da Ilha Grande	24,8	32,9	102,2
RH II - Guandu	-	169,2	258,0
RH III - Médio Paraíba do Sul	92,3	132,0	325,6
RH IV - Piabanha	13,2	18,0	55,8
RH V - Baía de Guanabara	-	42,0	134,3
RH VI - Lagos São João	24,7	43,5	174,9
RH VII - Rio Dois Rios	14,9	18,8	60,2
RH VIII - Macaé e das Ostras	9,4	13,0	54,8
RH IX - Baixo Paraíba do Sul e Itabapoana	87,0	118,9	379,9

*Não foram considerados os valores de vazão do Rio Paraíba do Sul

Fonte: INEA (PERHI, 2014)

Também conhecidas como **vazões residuais ou remanescentes**, as vazões mínimas definem a quantidade de água que devem permanecer no leito dos rios depois de retiradas para antes usos externos, determinadas para garantir a preservação do equilíbrio natural e a sustentabilidade de ecossistemas aquáticos.

VAZÕES MÍNIMAS ou VAZÕES ECOLÓGICAS



As vazões mínimas necessitam ser estabelecidas para aplicações, como:

- no dimensionamento de sistemas de **abastecimento de água**,
- na definição de projetos de **pequenas centrais hidrelétricas (PCH's)**,
- na avaliação da **qualidade de água** e
- nos processos de obtenção de **outorga** de uso da água.



VAZÕES MÍNIMAS ou VAZÕES ECOLÓGICAS

A determinação da vazão ecológica requer aplicação de métodos específicos classificados conforme a característica do estudo e as condições do local.

Grupo	Método	Característica
Hidráulico	<ul style="list-style-type: none">• Perímetro Molhado• Regressões Múltiplas	Observam as características do escoamento e a biota aquática.
Habitats	<ul style="list-style-type: none">• Idaho• IFIM	Contemplam inúmeras etapas, como características físicas, ambientais, econômicas por equipe multidisciplinar.
Holístico	<ul style="list-style-type: none">• Construção de Blocos	
Hidrológico	<ul style="list-style-type: none">• $Q_{7,10}$• Curva de Permanência• Tennant ou Montana• Mediana das Vazões Mensais• Área de Drenagem	Análise estatística de série histórica de vazões, em benefício do ecossistema. Desconsidera análise de aspectos ambientais. Requer poucas informações.

VAZÕES MÍNIMAS ou VAZÕES ECOLÓGICAS

Estados brasileiros adotam critérios diferenciados para o processo de outorga de direitos de usos da água, e não consideram fatores relacionados a ecologia, de modo a ressaltar que as legislações brasileiras possuem visão mais sanitaria do que ambiental.

Estado	Q_{ref}	Critério	Vazão Ecológica
CE	Q_{90}	90% da Q_{ref} quando houver barramento 33% da Q_{ref} em lagos e lagoas	10% da Q_{90} 67% da Q_{90}
RN	Q_{90}	90% da Q_{ref}	10% da Q_{90}
PB	Q_{90}	90% da Q_{ref}	10% da Q_{90}
PE BA	Q_{90} diário	80% da Q_{ref} quando não houver barramento ou quando houver barramento em rios perenes (PE e BA)	20% da Q_{90}
		95% da Q_{ref} quando não houver barramento ou quando houver barramento em rios intermitentes (PE e BA)	5% da Q_{90}
		95% da Q_{ref} quando o suprimento é para abastecimento humano (BA)	
		Vazões regularizadas por reservatório (BA)	20% da Q_{90}

RESOLUÇÃO INEA Nº 162 DE 26 DE DEZEMBRO DE 2018.

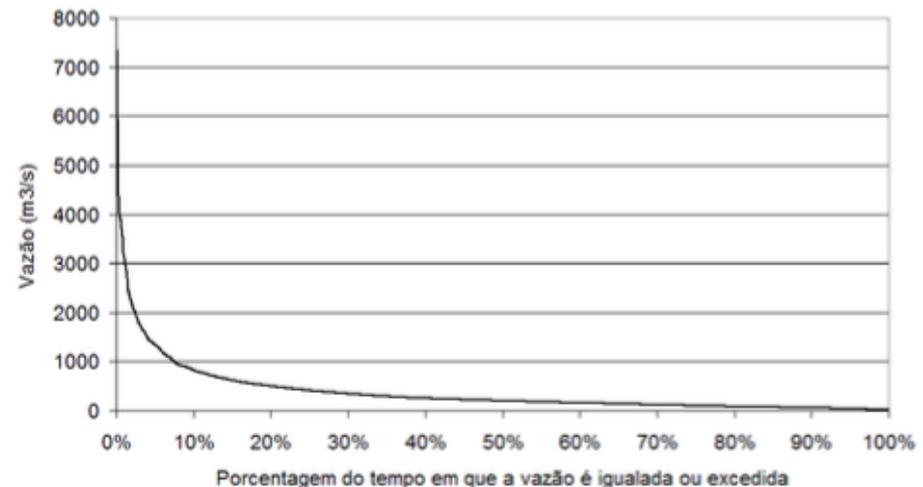
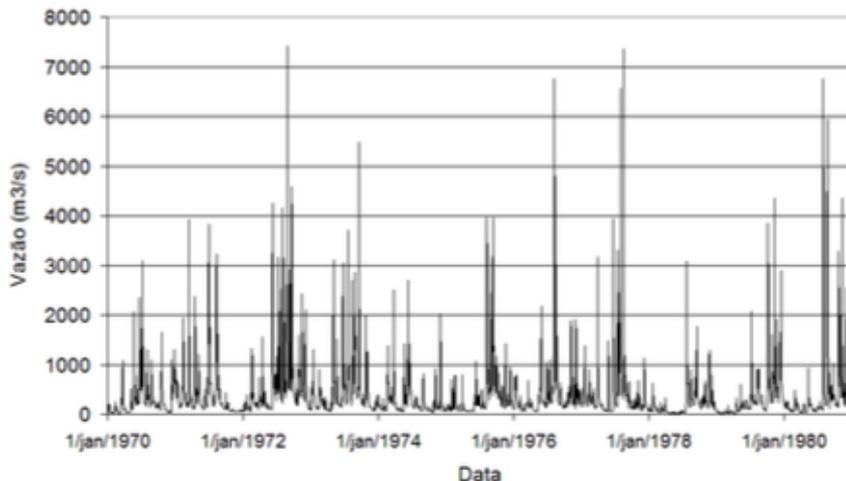
ESTABELECE CRITÉRIO PARA A DETERMINAÇÃO DA VAZÃO DE REFERÊNCIA PARA FINS DO CÁLCULO DE DISPONIBILIDADE HÍDRICA PARA OUTORGA DE DIREITO DE USO DE RECURSOS HÍDRICOS E USOS CONSIDERADOS INSIGNIFICANTES DE DOMÍNIO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO E REVOGA O ART. 10 E ALTERA O ART. 18 DA PORTARIA SERLA Nº 567, DE 07 DE MAIO DE 2007

Art. 1º - **Estabelecer para fins de cálculo de disponibilidade hídrica** para outorga de direito de uso de recursos hídricos e de usos considerados insignificantes de domínio do Estado do Rio de Janeiro **a vazão de referência Q95**, definida como a vazão que ocorre com uma frequência de 95% do tempo, sendo **a vazão máxima outorgável igual a 40% da Q95.**

CURVA DE PERMANÊNCIA

É obtida pela relação da **vazão** com a sua probabilidade de ocorrência ao longo do tempo, ou seja, expressa a relação entre a **vazão e a frequência** com que pode ser superada ou igualada. Pode ser elaborada a partir de vazões diárias ou mensais

Exemplo: a vazão de $1000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ é igualada ou superada em menos de 10% do tempo. Apesar de apresentar picos de cheias com $7000 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ou mais, na maior parte do tempo as vazões do rio Taquari neste local são bastante inferiores a $500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.



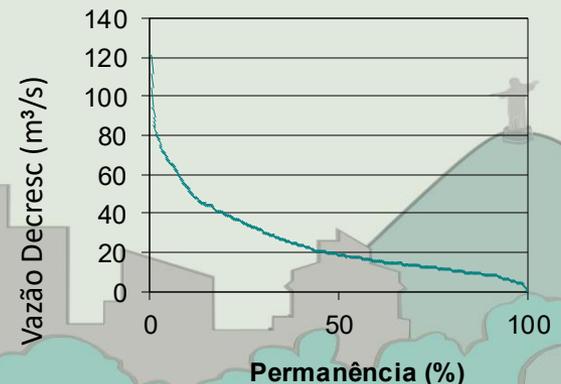


CURVA DE PERMANÊNCIA: Método Excel

$$P (\%) = \frac{\textit{ordem}}{n} \times 100$$

PERMANÊNCIA	VAZÃO (m³/s)
Q95	6
Q75	13
Q50	19
Q25	35
Q5	66

$Q_{\%} =$
Percentil(Série $Q_{decresc}$;(100-Q%))



DATA	VAZÃO
07-mar-76	5,16
08-mar-76	4,95
09-mar-76	4,64
07-fev-77	6,87
08-fev-77	10,03
09-fev-77	10,02
10-fev-77	10,02
11-fev-77	10,00
12-fev-77	9,97
13-fev-77	8,77
14-fev-77	4,59
01-jan-78	8,73
02-jan-78	9,96

DATA	VAZÃO DECRESC
15-jan-79	121,95
16-mar-78	120,96
18-mar-78	112,12
17-mar-78	104,11
15-mar-78	94,31
19-mar-78	93,27
20-mar-78	89,19
14-mar-78	87,14
21-mar-78	85,37
02-mar-80	84,77
03-mar-80	82,27
04-mar-80	81,56
01-mar-80	80,64

ORDEM	PERMANÊNCIA (%)
1	0,1278
2	0,2557
3	0,3836
4	0,5115
5	0,6393
6	0,7672
7	0,8951
8	1,0230
9	1,1508
10	1,2787
11	1,4066
12	1,5345
13	1,6624

17-abr-06	19,18
18-abr-06	18,26
19-abr-06	17,57
20-abr-06	16,77
21-abr-06	16,72
22-abr-06	16,71
23-abr-06	17,90
24-abr-06	17,29
25-abr-06	15,78
26-abr-06	13,64
27-abr-06	7,10

09-fev-86	4,24
11-fev-86	4,00
12-fev-86	3,17
27-fev-86	3,05
06-jan-87	2,92
24-fev-88	2,81
25-fev-88	2,23
23-mar-88	2,21
19-mar-95	1,46
15-fev-06	1,37
22-jan-02	0,56

772	98,7212
773	98,8491
774	98,9769
775	99,1048
776	99,2327
777	99,3606
778	99,4884
779	99,6163
780	99,7442
781	99,8721
782	100,0000



Previsão de vazões mínimas pela $Q_{7,10}$

A vazão $Q_{7,10}$ é estabelecida pelas **vazões mínimas anuais** das médias móveis de **7 dias** consecutivos para um período de retorno de **10 anos**.

Tabela – Exemplo de determinação das médias móveis de vazões de 4 dias consecutivos Q_4

Dia	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$Q_{\text{diário}} \text{ (m}^3/\text{s)}$	3,2	2,5	3,6	2,8	3,1	6,2	4,5	2,2	3,1	3,8	4,7	5,1
$Q_4 \text{ (m}^3/\text{s)}$	3,0	3,0	3,9	4,2	4,0	4,0	3,4	3,5	4,2			

Após converter os dados diários de um dado ano observado para vazões médias de 7 dias consecutivos, selecionar o menor valor de cada ano de modo a obter a **série de mínimas anuais**.

O cálculo da $Q_{7,10}$ necessita avaliar o período de recorrência, cujos métodos envolvem funções de densidade de probabilidade, como da distribuição de: *Gumbel*, *Log-Pearson III*, *Normal* e *Weibull*.

Distribuição de Gumbel

A probabilidade de que uma determinada vazão venha a ser igualada ou excedida em um ano qualquer pode ser estimada usando a distribuição de Gumbel.

onde “P” é a probabilidade;

“e” é a base dos logaritmos naturais (LN);

“b” é o expoente da equação calculado pela equação;

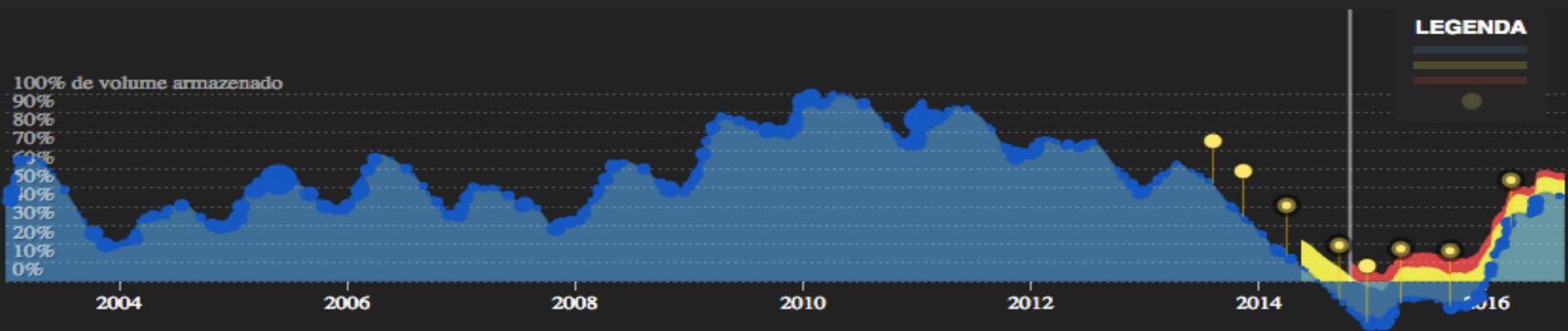
$$P = 1 - e^{-e^{-b}}$$

$$b = \frac{1}{0,7797 \times \sigma} \cdot [x - \bar{x} + (0,45 \times \sigma)]$$

” \bar{x} ” é a média das vazões obtidas na série histórica e σ o desvio padrão da amostra da série histórica.

20 de Outubro de 2014

-15,1
3,0 %



FILTRO DADOS

de	01/09/2016	-0.2 % DE VARIAÇÃO DE VOLUME
até	08/09/2016	25.3 mm DE PLUVIOMETRIA ACUMULADA

COMPARAR DADOS COM OUTROS ANOS

Monitoramento de nível no Reservatório do Sistema Cantareira (SP): 3,5% de volume morto em 20/10/2014 (Sabesp, 2014).



**Ocupações irregulares na margem da Represa Billings, São Paulo-
SP**



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2 - Ocupação irregular nas áreas de preservação permanente (a), impermeabilização dos interflúvios devido à urbanização crescente (b), rio Granjeiro contido num canal de concreto estreito (c) e quadra chuvosa trágica (d).

Alterações no uso e ocupação do solo

**Profundas alterações na drenagem natural
eliminação das características fluviais nos
aspectos **quantitativos** e **qualitativos**.**

Impactos no sistema de infra-estrutura urbana devido:

- ✓ ocupação irregular,
- ✓ redução dos espaços naturais,
- ✓ canalização e retificação de córregos,
- ✓ lançamentos de água pluvial em locais inadequados,
- ✓ poluição da água,
- ✓ sedimentação, etc.

Tabela 1 Municípios que sofreram inundações ou enchentes em 1998 e 1999 (IBGE, 2002)

Grandes Regiões	Brasil	Norte	Nordeste	Sudeste	Sul	Centro-Oeste
Total de municípios	5507	449	1787	1666	1159	446
Municípios que sofreram inundações ou enchentes	1235 22%	57	238	539 44%	356	45
Fatores agravantes das inundações ou enchentes						
Dimensionamento inadequado de projeto	339	8	63	166	92	10
Obstrução de bueiros / bocas de lobo	631 26%	38	123	260 41%	192	18
Obras inadequadas	345	16	67	145	104	13
Adensamento populacional	391 16%	16	75	192 49%	95	13
Lençol freático alto	205	13	54	69	58	11
Existência de interferência física	298	8	57	130	91	12
Outros	237	13	26	110	78	10
Sem declaração	3	1	1	1	-	-
Áreas onde ocorreram inundações ou enchentes (ha)	48809	1629	6606	10171	28176	2227

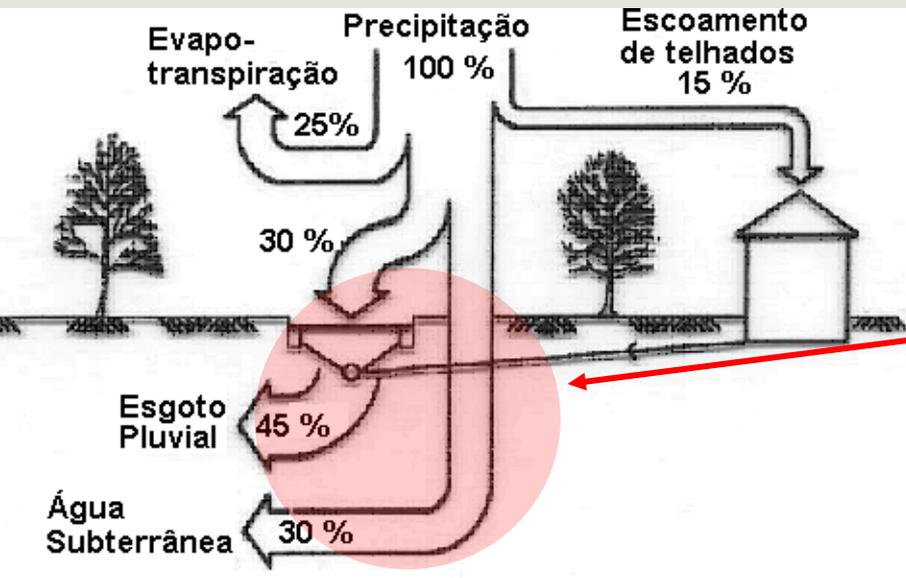
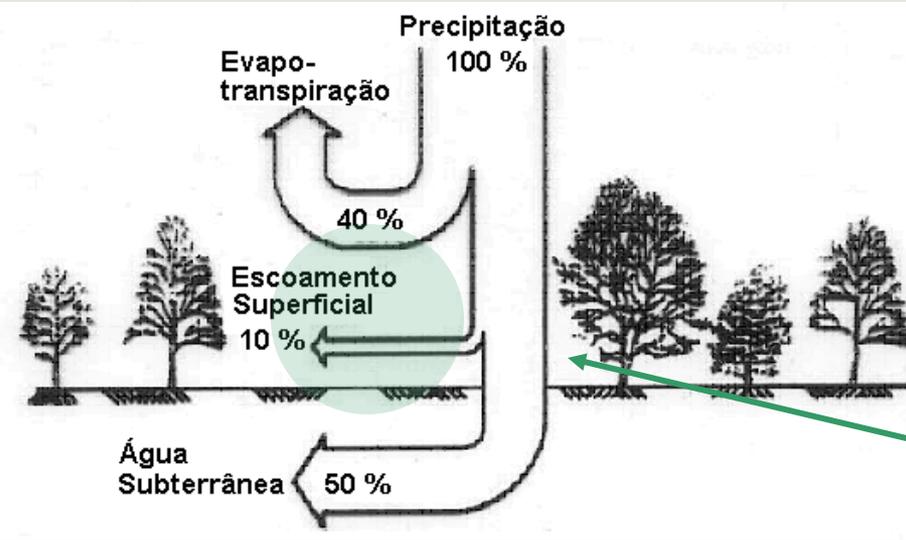
Interferência física (?)



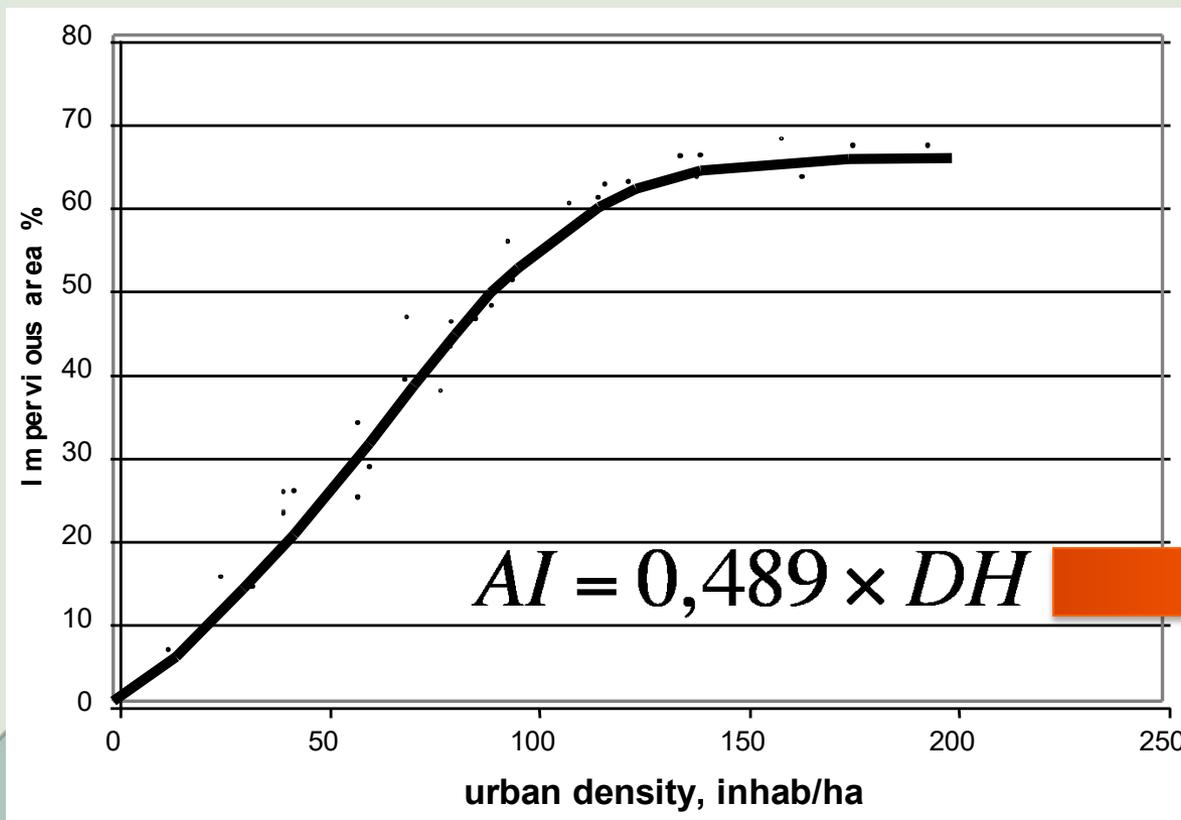
Obstr



Efeito da urbanização na drenagem



Impactos da urbanização na bacia hidrográfica



Mudanças na
urbanização:
fertilidade e
número de
pessoas / edif.

(1990-2011)

$$AI = 0,544 \times DH$$

Variáveis que influenciam o hidrograma

Estágios de uso e ocupação do solo

Estágio 1

Estágio 2

Estágio 3



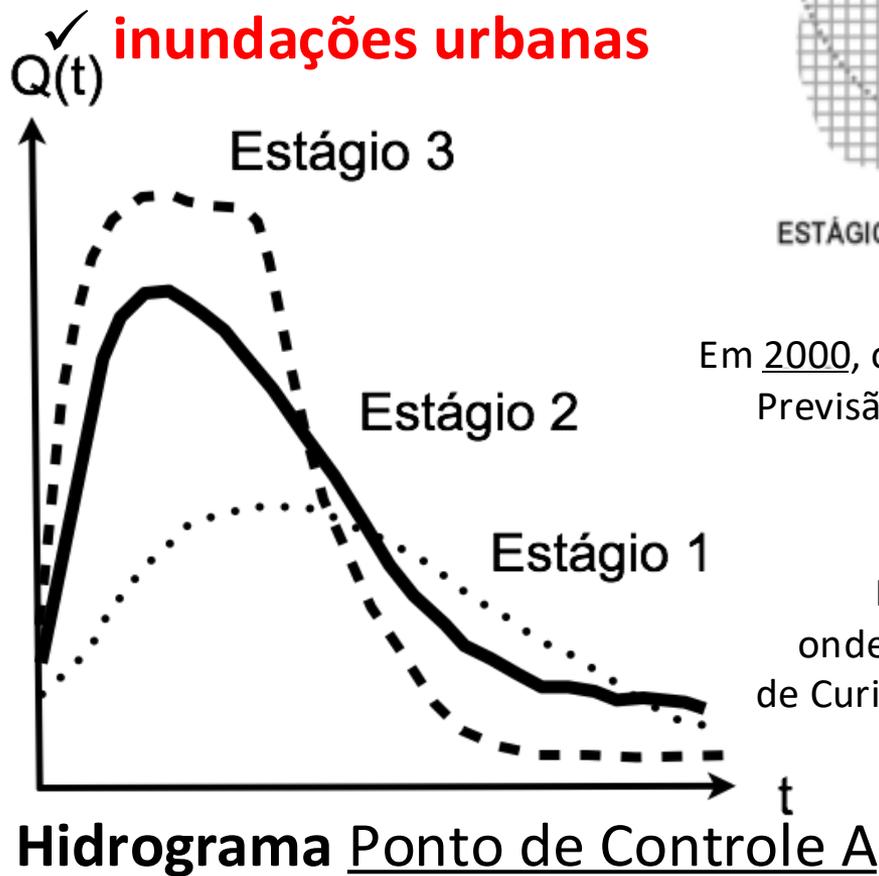
Área Imperm. = **33%**

46%

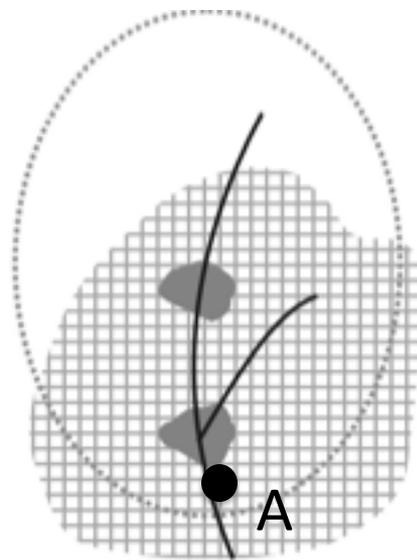
75%

Evolução dos estágios de ocupação ao longo da bacia:

- ✓ **urbanização**
- ✓ **canalização**
- ✓ **inundações urbanas**

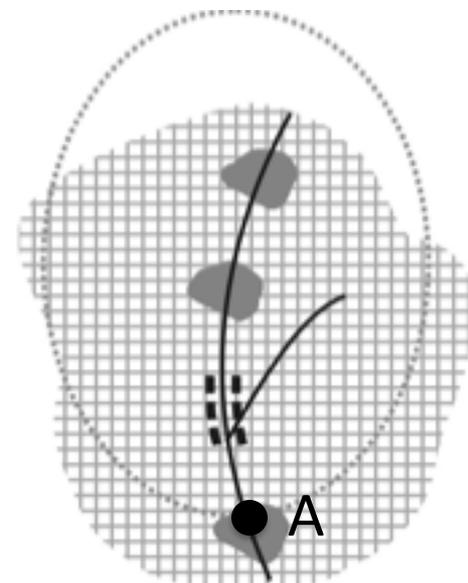


Em 1820, Curitiba-PR:
0,12% de seu território impermeabilizado.



ESTÁGIO 1

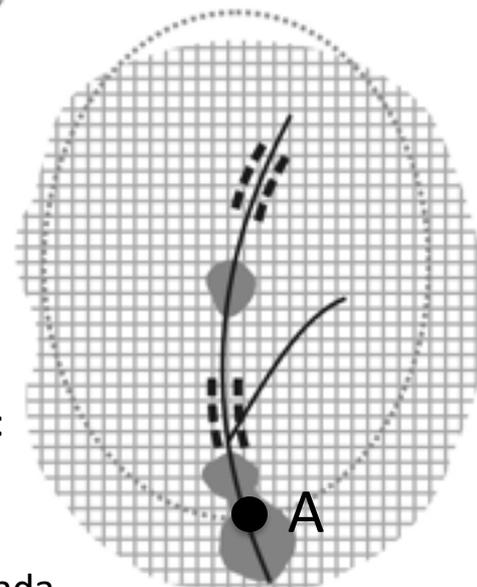
Canalização
Urbanização
Inundação



ESTÁGIO 2

Em 2000, o índice passou a **18,24%**
Previsão para 2020: **26,53%**.

Na Bacia do Rio Belém,
onde vive metade da população
de Curitiba, a situação pode ser pior:

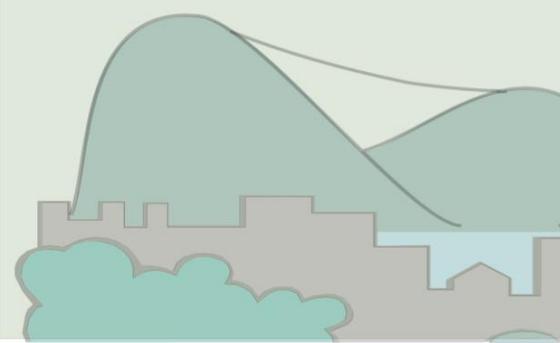
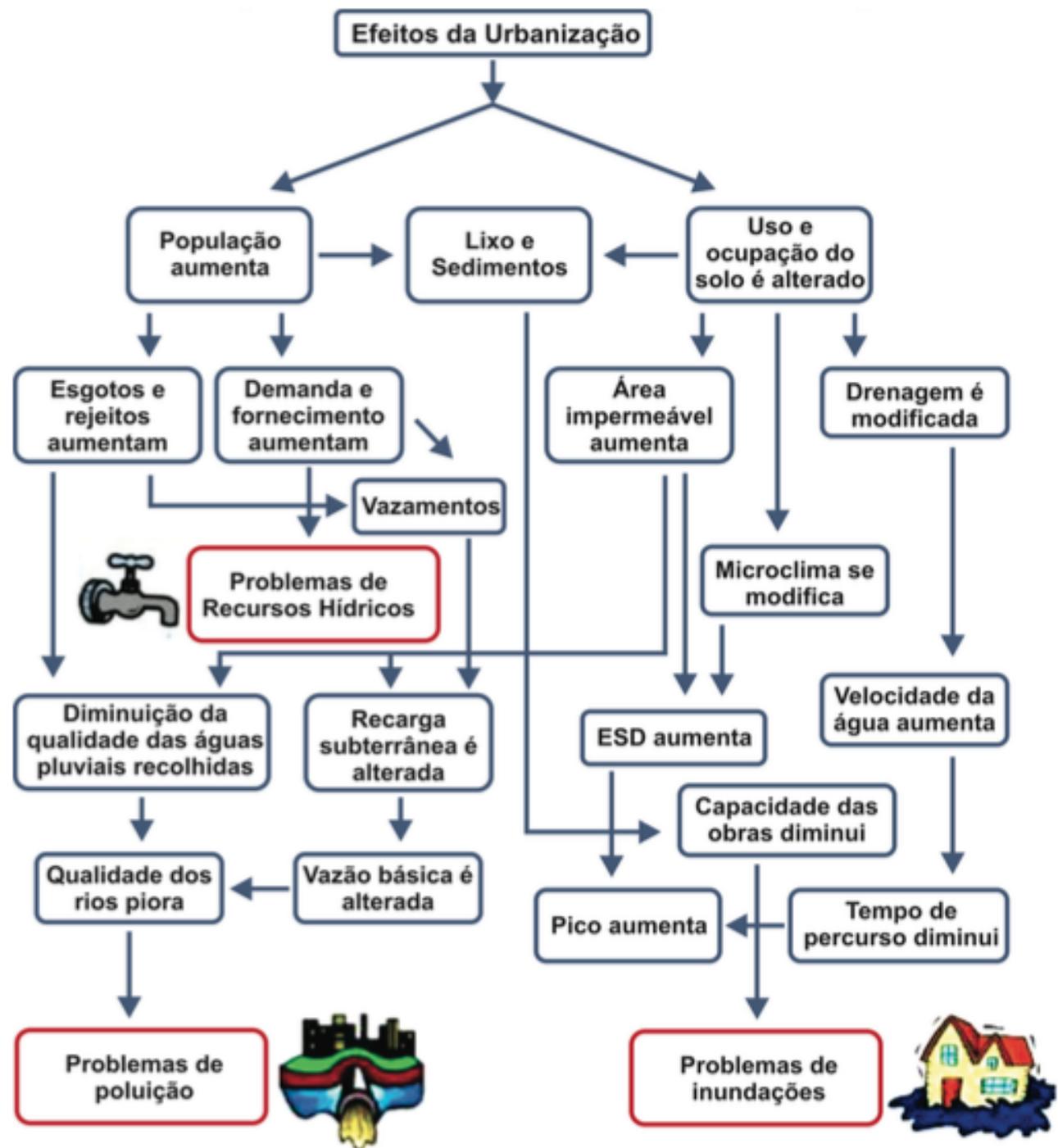


ESTÁGIO 3

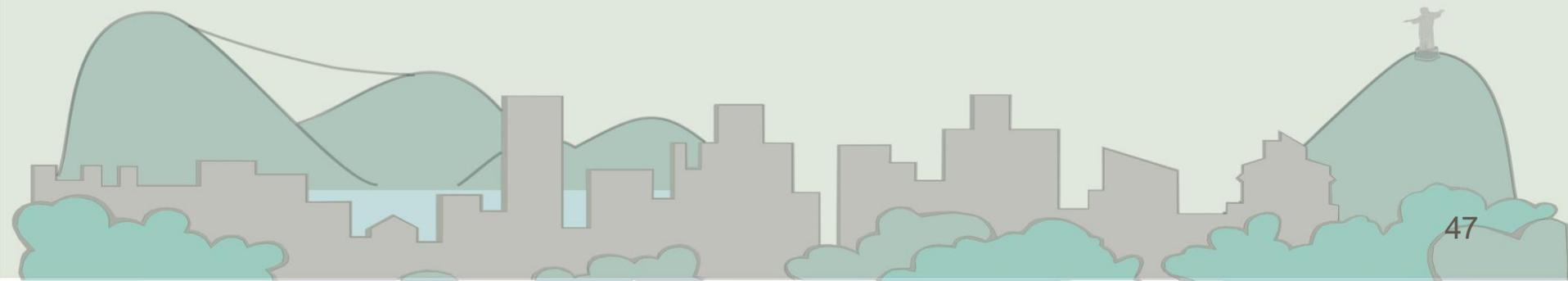
Em 2020, prevê-se
90% da área impermeabilizada.



Efeito da urbanização
sem planejamento:
Poluição e Inundações



As fotos a seguir ilustram a formação de uma **cratera (sinkhole)** em via urbana e a **perda súbita de suporte do pavimento** — o carro afunda porque o asfalto ficou como uma “tampa” sobre um vazio criado no subsolo, por problema relacionado ao colapso do sistema de drenagem local.



Acúmulo de água na superfície;



Erosão interna por cano rompido/galeria fissurada ? → formação de vazios;



Pavimento perde apoio e **colapsa** sob carga veicular;



Cratera se amplia com a circulação de água e tráfego.



Falhas que podem ser observadas:

- **Rede enterrada:** rompimento/colapso de **galeria de águas pluviais, coletor de esgoto ou adutora**. O fluxo (muitas vezes pressurizado) arrastou os finos do solo (**piping/sifonamento**), com esvaziamento da antiga vala da tubulação.
- **Drenagem superficial:** **bueiros obstruídos**/captação insuficiente causaram lâmina d'água e infiltração contínua nas bordas e juntas do pavimento.
- **Geotecnia do pavimento:** base/sub-base mal drenadas, materiais inadequados ou mal compactados em volta da tubulação (**reaterro fraco**) → **socavamento e assentamento diferencial**.
- **Manutenção:** ausência de inspeção (CCTV, geofone, georadar), limpeza de bocas de lobo e detecção de vazamentos.

Boas práticas para evitar

- Projeto de **drenagem superficial** suficiente (captação, bocas de lobo, sarjetas, rotas de extravasão, SbN's, técnicas de infiltração).
- **Leito e reaterro de tubulações** com material granular drenante, camadas bem compactadas, e geossintéticos, quando necessário.
- **Juntas estanques** e proteção contra pressão negativa/piping.
- **Inspeção e manutenção periódica** (limpeza, detecção de vazamentos, CCTV), além de planos de resposta rápida e **interdição imediata** ao primeiro indício de socavamento ou erosão do solo.

Em resumo: as imagens representam um **colapso integrado de drenagem e infraestrutura viária** — uma falha hidráulica (rede/galeria) que evoluiu para **falha geotécnica e estrutural do pavimento**.