MUDANÇAS CLIMÁTICAS: IMPACTO NO ÍNDICE PLUVIOMÉTRICO NO ESTADO DE SÃO PAULO

Paulo Takashi Nakayama [1]
Engenheiro civil sênior da SP Águas, com mestrado e doutorado em Hidrologia e Recursos Hídricos pela EPUSP. Foi professor de Hidrologia na FESP por 25 anos e tem vários artigos publicados, principalmente na área de Recursos Hídricos, nos anais de simpósios nacionais e internacionais.

José Mendes de Lima Neto [2]
Graduação em engenharia Civil pela FESP, mestrado em recursos hídricos, energéticos e ambientais pela UNICAMP com pesquisa em drenagem urbana e especialização em fundações e geotecnia em obras imobiliárias pelo IMT (Instituto Mauá de Tecnologia).

Endereço [1]**:** Edifício Cidade II, Rua Boa Vista, 175, Bloco A, 2º andar, Centro, São Paulo - SP é01014-001 – Tel: +55 (11) 3291-3153 – E-mail: paulo.nakayama@spaguas.sp.gov.br

RESUMO

O mundo em que vivemos vem sofrendo com as mudanças climáticas intensificadas pelo próprio homem. Dentre essas mudanças, podem se citar o aquecimento global causado pelo efeito estufa, os derretimentos de geleiras, as mudanças bruscas de temperaturas, os períodos de estiagem fora do comum e a alteração do índice pluviométrico de uma região. Assim como o mundo, o Brasil é afetado por estas mudanças, como a ocorrência de cheias cada vez mais acentuadas na região norte e estiagem excepcional na região sudeste como a ocorrida no período chuvoso de 2013/2014. Neste trabalho foi realizada uma avaliação da mudança no índice pluviométrico no Estado de São Paulo, com base na série histórica de chuvas anuais registradas em nove postos pluviométricos situados em diferentes regiões do estado. Essa análise consistiu em verificar se houve alteração no índice pluviométrico nos últimos 30 anos, através de teste de hipótese aplicado à média das duas séries históricas de chuva (antes e após o ano de 1980). O ano de 1980 foi adotado como o limite entre as amostras, pois observou-se, através dos dados pluviométricos, que nessa década iniciou uma alteração, ainda que discreta, nos índices de precipitação, especialmente nas regiões próximas às áreas urbanas.

PALAVRAS-CHAVE: Índice pluviométrico, avaliação estatística, teste de hipótese.

INTRODUÇÃO

O mundo em que vivemos vem sofrendo com as mudanças climáticas intensificadas pelo próprio homem. Dentre essas mudanças, podem se citar os derretimentos de geleiras, as mudanças bruscas de temperaturas, os períodos de estiagem fora do comum, o excesso de chuvas em algumas regiões. Todos estes eventos devem ser vistos como um alerta dado pela Terra aos seus habitantes. Assim como o mundo, o Brasil é afetado por estas mudanças, as secas na Amazônia, as secas no Sul do Brasil, o furacão Catarina, dentre outros. Neste contexto, o estado de São Paulo vem também sofrendo com a mudança climática, que tem provocado a alteração no regime pluviométrico, tanto nas áreas urbanas como nas rurais. À vista disso, há necessidade de medidas eficazes para contornar essa situação, caso contrário isto pode se tornar um transtorno para os habitantes e um problema para os gestores de recursos hídricos.

MUDANÇAS CLIMÁTICAS NO BRASIL

O clima do Brasil e do mundo tem sido afetado pelo chamado Aquecimento Global, dado em virtude de impactos ambientais (como o derretimento das geleiras e calotas polares) ou ainda processos biológicos (como os períodos de defloração), somado às atividades indevidas como o uso excessivo da terra e a construção de grandes cidades de forma desordenada. No Sul do Brasil foram observadas tendências para o aumento de chuvas e vazões dos rios em meados do século 20; na Amazônia, apesar de o desmatamento ter crescido significativa e gradativamente, as alterações no regime pluviométrico não foram observadas. No Nordeste tem se observado um pequeno aumento nas chuvas a longo prazo. Em cidades compactas como São Paulo e Rio de

Janeiro, as eventuais mudanças climáticas poderão ser observadas pelo aumento da frequência e intensidade das precipitações, acentuando assim o índice de inundações nas regiões urbanas.

AVALIAÇÃO ESTATÍTICA DA MUDANÇA DO ÍNDICE PLUVIOMÉTRICO NO ESTADO DE SÃO PAULO

METODOLOGIA

Para realizar a avaliação estatística da mudança do índice de chuvas no Estado de São Paulo foram utilizados dois métodos da estatística descritiva, o Teste t-Student para a diferença de duas médias populacionais e o Teste não paramétrico de Mann-Whitney.

A análise estatística pode demonstrar se as médias das duas amostras são iguais ou não; para isso são adotadas duas hipóteses denominadas hipótese nula e hipótese alternativa, respectivamente, representadas por H_0 e H_1, onde:

H_0: As médias das duas amostras são iguais; H_1: As médias das duas amostras não são iguais.

TESTE *t-Student* PARA A DIFERENÇA DE DUAS MÉDIAS POPULACIONAIS

Neste método, a análise da variação dos dados de duas amostras de mesma população será feita, inicialmente, através de suas médias e a diferença entre as mesmas. Com isso, poderá ser concluído se as amostras possuem ou não uma diferença significativa que poderá ser levada em consideração para conclusões futuras.

O método consiste em verificar se as médias das duas amostras $\overline{X}_1$ e $\overline{X}_2$ provêm de uma mesma população.

Para a aplicação deste método, calcula-se inicialmente o parâmetro T_{obs} da seguinte forma:

$$T_{obs} = \frac{\overline{X}_1 - \overline{X}_2 - \delta}{S_p^2 \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \qquad \text{Equação (1)}$$

onde:

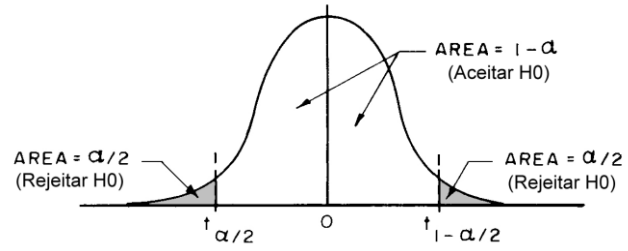
$$S_p^2 = \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \qquad \text{Equação (2)}$$

n_1 – número de dados da amostra 1; n_2 – número de dados da amostra 2; $\delta = 0$; S_1^2 - variância da amostra 1; S_2^2 - variância da amostra 2; S_p^2 - variância equivalente.

A Figura 1 abaixo mostra o gráfico utilizado para o teste bicaudal. Neste gráfico podem ser observadas duas regiões, de aceitação e rejeição de H_0. O valor limite entre estas regiões é chamado T_{teor}, e está relacionado ao parâmetro $t_{\upsilon;\alpha}$, cujo valor pode ser obtido a partir da tabela da Distribuição t de Student, onde υ é o grau de liberdade dado por:

$v = n_1 + n_2 - 2$ Equação (3)

Figura 1 – Gráfico do teste bicaudal.



A região de aceitação ou rejeição pode ser obtida adotando o nível de significância α desejado para o teste (por exemplo, α= 10%). Dependendo da relação T_{obs} e T_{teor}, pode se aceitar ou rejeitar a hipótese H_0. Nos casos em que a hipótese H_0 é aceita, não possuem uma diferença significativa das médias, ou seja, a diferença não deve ser levada em consideração, pois é menor do que o nível de significância adotado no método.

TESTE NÃO PARAMÉTRICO DE MANN-WHITNEY

O teste de Mann-Whitney é um teste não paramétrico alternativo ao teste t-Student para comparar as médias de duas amostras independentes. O único pressuposto exigido para a aplicação deste teste é que as duas amostras sejam independentes e aleatórias e que as variáveis em análise sejam numéricas ou ordinais.

Para o teste, consideram-se duas amostras: a amostra 1 de tamanho N_1 com a média $\tilde{\mu}_1$ e amostra 2 de tamanho N_2 com a média $\tilde{\mu}_2$.

O teste consiste em aceitar ou rejeitar as hipóteses H_0 ou H_1 para um dado nível de significância, onde:

$H_0 : \tilde{\mu}_1 = \tilde{\mu}_2$ - as duas amostras têm distribuições idênticas;

$H_1 : \tilde{\mu}_1 \neq \tilde{\mu}_2$.- as duas amostras têm distribuições diferentes.

Descreve-se a seguir os procedimentos do teste:

- As observações das duas amostras são combinadas numa única variável de tamanho N_1 e N_2, sendo identificadas as respectivas proveniências;
- O conjunto de observações assim constituído pela junção das duas amostras é ordenado por ordem crescente, atribuindo o número de ordem 1 à observação menor e o número de ordem $N_1 + N_2$ à observação maior. Caso haja “empates”, a cada uma das observações “empatadas” é atribuído o numero de ordem médio que essas observações teriam se não estivessem e "empatadas”;
- Em seguida, calculam-se as somas dos números de ordem das observações de cada amostra:
- W_1: soma dos números de ordem das observações da amostra 1;
- W_2: soma dos números de ordem das observações da amostra 2;
- Calcular a estatística de Mann-Whitney-Wilcoxn:

$$U_1 = N_1 \cdot N_2 + \frac{N_2 \cdot (N_2 + 1)}{2} - W_2 \qquad \text{Equação (4)}$$

$$U_2 = N_1 \cdot N_2 + \frac{N_1 \cdot (N_1 + 1)}{2} - W_1 \qquad \text{Equação (5)}$$

- A estatística de teste é:

$$U = \min (U_1, U_2) \qquad \text{Equação (6)}$$

Para este trabalho, em vez de fazer a comparação do valor de U com o U crítico (tabelado), foi feita a aproximação do teste Mann-Whitney à distribuição normal, pois ambas as amostras têm tamanhos superiores a vinte observações. Neste caso, os parâmetros utilizados são:

- Valor esperado:

$$\mu_U = \frac{N_1 \cdot N_2}{2} \qquad \text{Equação (7)}$$

- Variância:

$$\sigma_U^2 = \frac{N_1 \cdot N_2 \cdot (N_1 + N_2 + 1)}{12} \qquad \text{Equação (8)}$$

Desta forma, a estatística do teste é:

$$Z = \frac{U - \mu_U}{\sqrt{\sigma_U^2}} \sim \text{N}(0,1) \qquad \text{Equação (9)}$$

POSTOS PLUVIOMÉTRICOS UTILIZADOS

Para uma caracterização abrangente do estudo do índice de chuvas no Estado de São Paulo, foram escolhidos postos pluviométricos em diferentes regiões do Estado. Na Tabela 1 abaixo, estão relacionadas as regiões, as cidades, os postos pluviométricos e seus prefixos de identificação e a Figura 2 ilustra a localização desses postos.

Tabela 1 – Identificação dos postos pluviométricos utilizados.

Região	Município	Posto pluviométrico	Prefixo	Período de observ.
Interior	Ribeirão Bonito	Ribeirão Bonito	D5-003	1937 - 2014
Interior	Campos do Jordão	Vila Capivari	D2-001	1938 - 2014
Interior	Olímpia	Ribeirão dos Santos	B5-009	1944 - 2014
Interior	Franca	Franca	B4-001	1938 - 2014
Interior	Sarutaiá	Sarutaiá	E6-002	1939 - 2014
Interior	Piquerobi	Piquerobi	C8-001	1936 - 2014
Litoral	Bertioga	Represa Itatinga	E3-042	1938 - 2014
RMSP	São Paulo	Luz	E3-036	1889 - 2003
RMSP	São Paulo	Observatório IAG	E3-035	1937 - 2014

Fonte: Agência de Águas do Estado de São Paulo (2025).

Figura 2 - Localização dos postos pluviométricos utilizados no estudo.



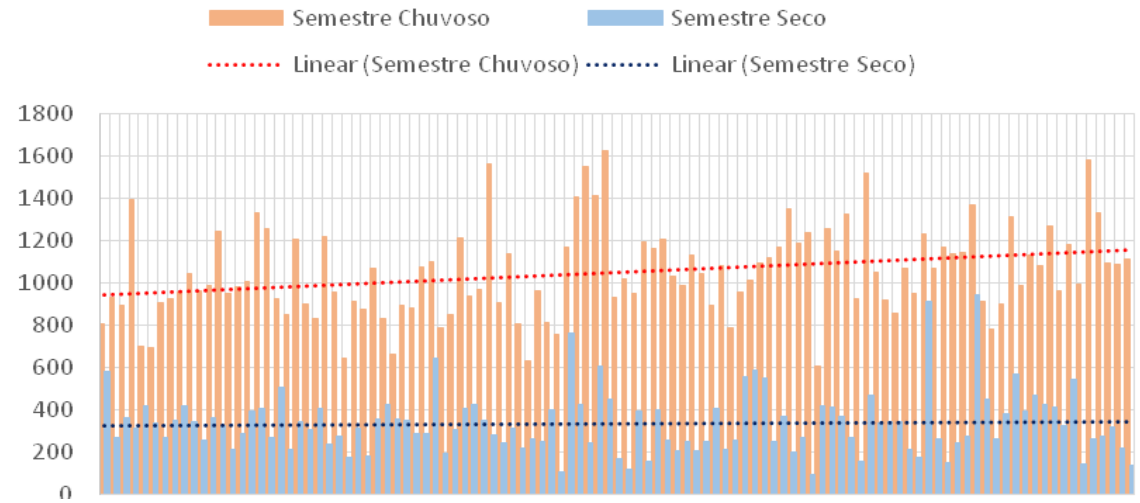
Fonte: elaborado pelo autor a partir da Tabela 1

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

ANÁLISE GRÁFICA

Para a análise e cálculo da variação do índice pluviométrico do Estado de São Paulo, foram considerados os valores semestrais das precipitações, dividindo-se em semestres secos e chuvosos. A evolução do índice de chuvas pode ser visualizada através da Linha de Tendência, traçada a partir dos dados de chuvas semestrais de cada posto selecionado. A Figura 3 mostra um exemplo da Linha de Tendência traçado com os dados do posto pluviométrico da Luz, localizado na RMSP.

Figura 3 – Precipitações semestrais do posto Luz – semestres chuvoso e seco.



Fonte: Eleborado pelo autor

As Linhas de Tendência, como as mostradas na Figura 3, foram traçadas para todos os postos selecionados neste estudo. No caso do posto da Luz, embora a Linha de Tendência seja crescente no período chuvoso, não se pode afirmar com certeza que está havendo aumento nas precipitações acumuladas de seis meses chuvosos (outubro a março).

ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para a análise estatística da variação do índice pluviométrico do Estado de São Paulo, os dados registrados em cada posto foram divididos em dois grupos, ou amostras. No primeiro grupo tem-se a soma semestral das precipitações de cada posto somente dos anos anteriores a 1980 e os dados posteriores a 1980 compõem o segundo grupo.

O ano de 1980 foi adotado como o limite entre as amostras, pois observou-se, através dos dados pluviométricos, que nessa década iniciou uma alteração, ainda que discreta, nos índices de precipitação, especialmente nas regiões próximas às áreas urbanas. Isto pode ter ocorrido provavelmente devido à ação antrópica que começou a se intensificar na década de 70. Essa década foi a época de transição econômica, com a construção de grandes barragens, crescimento das indústrias, mecanização nas agriculturas e crescimento da população urbana.

Para ambos os testes, foi adotado o nível de significância de $\alpha = 10\%$. Apresentam-se a seguir os resultados dos dois testes.

- Teste t-Student para a diferença de duas médias amostrais

As tabelas 2 e 3 apresentam, respectivamente, os resultados do teste de hipótese aplicado para duas médias amostrais, para o semestre chuvoso e semestre seco.

Tabela 2 – Resultados do teste de hipótese para duas amostras (semestre chuvoso).

Posto	Amostra 1			Amostra 2			t_{obs}	t_{teor}	Decisão
	N_1	$\overline{X}_1$	S_1	N_2	$\overline{X}_2$	S_2			
D5-003	42	955,4	353,2	31	1167,4	214,2	-2,962	-1,645	Rejeita H_0
D2-001	36	1366,9	336,6	29	1283,7	200,0	1,174	1,645	Aceita H_0
E3-042	43	2969,9	815,5	33	2763,7	656,9	1,186	1,645	Aceita H_0
B5-009	35	1075,7	247,8	33	1086,9	171,0	-0,215	-1,645	Aceita H_0
B4-001	39	1311,7	251,1	34	1407,7	272,3	-1,565	-1,645	Aceita H_0
E3-036	89	1034,8	214,9	19	1123,3	196,2	-1,615	-1,645	Aceita H_0
E6-002	38	931,5	156,4	33	1051,8	168,9	-3,117	-1,645	Rejeita H_0
E3-035	43	997,1	143,5	34	1154,4	195,3	-4,072	-1,645	Rejeita H_0
C8-001	26	901,5	247,5	34	929,0	207,4	-0,469	-1,645	Aceita H_0

Fonte: Eleborado pelo autor

Tabela 3 – Resultados do teste de hipótese para duas amostras (semestre seco).

Posto	Amostra 1			Amostra 2			t_{obs}	t_{teor}	Decisão
	N_1	$\overline{X}_1$	S_1	N_2	$\overline{X}_2$	S_2			
D5-003	42	235,2	159,9	31	319,9	121,6	-2,469	-1,645	Rejeita H_0
D2-001	36	346,8	177,0	29	414,2	146,6	-1,646	-1,645	Rejeita H_0
E3-042	43	1548,6	464,0	33	1543,8	373,9	0,048	1,645	Aceita H_0
B5-009	35	196,5	116,9	33	238,2	100,3	-1,573	-1,645	Aceita H_0
B4-001	39	240,8	134,2	34	285,9	120,2	-1,503	-1,645	Aceita H_0
E3-036	89	329,4	138,7	19	377,7	187,2	-1,266	-1,645	Aceita H_0
E6-002	38	353,6	152,9	33	447,9	165,2	-2,497	-1,645	Rejeita H_0
E3-035	43	341,7	143,3	34	401,4	141,8	-1,821	-1,645	Rejeita H_0
C8-001	26	296,6	146,1	34	370,9	143,6	-1,972	-1,645	Rejeita H_0

Fonte: Eleborado pelo autor

- Teste não paramétrico de Mann-Whitney

Os resultados deste teste para os semestres chuvoso e seco estão apresentados, respectivamente, nas tabelas 4 e 5.

Tabela 4 – Resultados do teste de Mann-Whitney para duas amostras (semestre chuvoso).

Posto	Amostra 1			Amostra 2			U	Z_{obs}	Z_{teo}	Decisão
	N_1	R_1	U_1	N_2	R_2	U_2				
D5-003	31	1412	916	42	1289	386	386	-2,957	-1,645	Rejeita H_0
D2-001	29	898	463	36	1247	581	463	-0,779	-1,645	Aceita H_0
E3-042	33	1160	599	43	1766	820	599	-1,158	-1,645	Aceita H_0
B5-009	33	1175	614	35	1171	541	541	-0,448	-1,645	Aceita H_0
B4-001	34	1364	769	39	1337	557	557	-1,172	-1,645	Aceita H_0
E3-036	19	1228	1038	89	4658	653	653	-1,553	-1,645	Aceita H_0
E6-002	33	1430	869	38	1126	385	385	-2,790	-1,645	Rejeita H_0
E3-035	34	1658	1063	43	1345	399	399	-3,406	-1,645	Rejeita H_0
C8-001	34	1075	480	26	755	404	404	-0,567	-1,645	Aceita H_0

Fonte: Eleborado pelo autor

Tabela 5 – Resultados do teste de Mann-Whitney para duas amostras (semestre seco).

Posto	Amostra 1			Amostra 2			U	Z_{obs}	Z_{teo}	Decisão
	N_1	R_1	U_1	N_2	R_2	U_2				
D5-003	31	1370	874	42	1331	428	428	-2,489	-1,645	Rejeita H_0
D2-001	29	1080	645	36	1065	399	399	-1,623	-1,645	Aceita H_0
E3-042	33	1306	745	43	1620	674	674	-0,372	-1,645	Aceita H_0
B5-009	33	1283	722	35	1063	433	433	-1,773	-1,645	Rejeita H_0
B4-001	34	1434	839	39	1267	487	487	-1,946	-1,645	Rejeita H_0
E3-036	19	1167	977	89	4719	714	714	-1,061	-1,645	Aceita H_0
E6-002	33	1419	858	38	1137	396	396	-2,663	-1,645	Rejeita H_0
E3-035	34	1547	952	43	1456	510	510	-2,267	-1,645	Rejeita H_0
C8-001	34	1161	566	26	669	318	318	-1,850	-1,645	Rejeita H_0

Fonte: Eleborado pelo autor

CONCLUSÃO

Ambos os testes, t-Student e Mann-Whitney, mostraram que a média do total precipitado no semestre chuvoso (outubro a março) tem aumentado de forma significativa na região central do estado (Sarutaiá e Ribeirão Bonito) e na Região Metropolitana de São Paulo.

Para o semestre seco (abril a setembro), o teste t-Student indicou que, além da região central do estado (Sarutaiá e Ribeirão Bonito), houve também aumento da chuva média na região oeste do estado e na região de Campos do Jordão. O teste de Mann-Whitney confirmou os resultados do teste anterior e indicou ainda o aumento da chuva na região norte do estado (Franca e Olímpia).

O posto da Luz, localizado na RMSP, não indicou alteração da chuva média, tanto no semestre chuvoso como no semestre seco. No caso deste posto, pode ter havido prejuízo no resultado do teste pelo fato de a amostra 2 (mais recente) ter apenas 19 dados.

A análise dos resultados obtidos neste estudo leva a uma conclusão que as mudanças climáticas que estão ocorrendo em todo o país estão afetando, mesmo de forma discreta, o índice pluviométrico do Estado de São Paulo.

Porém, se comparados os semestres seco e chuvoso entre si, pode se observar uma diferença nas regiões afetadas pelas mudanças climáticas. O semestre seco caracterizou-se pela variação das chuvas em praticamente todo o estado, com exceção das regiões litorâneas. Porém, no semestre chuvoso a mudança do índice pluviométrico concentra-se na região central do estado e na RMSP.

Cabe ressaltar, por último, que a análise foi feita com a chuva acumulada de seis meses. Dessa forma, embora os testes tenham indicado alteração no índice pluviométrico, não se pode concluir nada em relação à chuva máxima diária e intensidade de chuvas convectivas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AFONSO, C. M. A paisagem da Baixada Santista: urbanização, transformação e conservação. 2011. Tese (Doutorado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

2. AGÊNCIA DE ÁGUAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (São Paulo). BANCO DE DADOS HIDROLÓGICOS. 2025. Disponível em: https://www.spaguas.sp.gov.br/site/hidrologia/. Acesso em: 26 maio 2025.

3. DEVORE, J. L. *Probabilidade e estatística: para engenharia e ciências.* Tradução de Joaquim Pinheiro Nunes da Silva. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2006.

4. HANN, T.C. *Statistical methods in hydrology.* The Iowa State University Press, 1977.

5. MARENGO, J. A. Mudanças climáticas globais e seus efeitos sobre biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI. Brasília: MMA, 2006. 212 p. Série Biodiversidade, v. 26. ISBN 85-7738-038-6.

6. MARENGO, J.A.; JONES, R.; ALVES, L. M.; VALVERDE, M.C. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. Reino Unido: Royal Meteorological Society, 2009.

7. MEYER, P.L. *Probabilidade: aplicação à estatística.* 2ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 1983.

8. NUNES, L.H. Distribuição espaço-temporal da pluviosidade no Estado de São Paulo: variabilidade, tendências, processos intervenientes. Tese (doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 192 p. 1997.

9. SÃO PAULO. Manual de Parcerias do Estado de São Paulo. Disponível em http://www.parcerias.sp.gov.br/parcerias/docs/manual_de_parcerias_do_estado_de_sao_paulo.pdf. Acesso em: 11/11/2021.

10. VIANELLO, R.L., ALVES, A.R. *Meteorologia básica e aplicações.* Viçosa, UFV: Impr. Univ., 1991. 449p.