

Variabilidade Temporal no Regime Hidrológico da Bacia do Rio Paraguai

Robin Thomas Clarke, Carlos Eduardo Morelli Tucci, Walter Collischonn

Instituto de Pesquisas Hidráulicas – Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Caixa Postal 15029

91501-970 Porto Alegre, RS - Fone (51) 3316-6325

Recebido: 06/02/02 - revisão: 08/08/02 - aceito: 13/11/02

RESUMO

Neste trabalho são analisados os dados de vazão de 20 postos fluviométricos e dados de precipitação de 36 postos pluviométricos, localizados na bacia do rio Paraguai, em território brasileiro, bem como uma série de 95 anos de dados de cotas do rio Paraguai em Ladário, mostrando que, durante o período de 1960 até pouco além de 1970, o regime hidrológico na bacia foi substancialmente diferente do ocorrido nos períodos anterior e posterior. Os dados de cota do rio Paraguai em Ladário sugerem que as mudanças entre os períodos foram abruptas, e que os períodos diferem tanto nos valores médios da cota, como na correlação interanual das cotas médias, mínimas e máximas. Apesar do grande número de falhas nas séries de dados da maioria dos postos pluviométricos, uma explicação para a mudança das vazões verificada a partir de 1970 foi encontrada no aumento da precipitação, ocorrido simultaneamente. Este aumento de precipitação ocorreu, de forma consistente, em toda a área coberta pelos 36 postos analisados. A análise mais detalhada dos dados de precipitação diários, em dois postos pluviométricos, com séries relativamente completas, revelou que, durante a década de 1960, quando a vazão dos rios esteve baixa, os períodos de estiagem (dias consecutivos sem chuva) foram mais longos e que, nos dias de chuva, a precipitação média foi inferior ao período posterior. Os resultados obtidos foram comparados aos resultados semelhantes relatados na literatura, sobre as vazões dos rios Paraguai, Paraná, Negro (no Uruguai) e Uruguai. Os resultados foram comparados também aos resultados de análises de rios na África Equatorial, especialmente do rio Congo, que apresenta o comportamento inverso ao observado na bacia do Paraguai, com um período muito úmido, durante a década de 1960, e um período relativamente seco, a partir de 1970.

Palavras-chave: variabilidade temporal; regime hidrológico; rio Paraguai.

INTRODUÇÃO

O rio Paraguai é um dos principais rios da bacia do Prata, a segunda maior bacia da América do Sul e a quinta maior do mundo. De todos os rios que formam a bacia do Prata, o rio Paraguai é o que penetra mais em direção ao centro do sub-continente, formando um corredor natural para o desenvolvimento da região.

Ao norte e a oeste a bacia do rio Paraguai é vizinha à bacia Amazônica, a leste à bacia do rio Araguaia e ao sul à bacia do rio Paraná. A bacia pode ser dividida em uma região alta, denominada Planalto, e uma região baixa e plana, denominada Pantanal, que é temporariamente e parcialmente inundada pelo rio Paraguai e pelos seus principais afluentes todos os anos.

O Pantanal é utilizado para a pecuária e apresenta também uma grande importância do ponto de vista ecológico e turístico. A baixa densidade demográfica aliada às extensas planícies inundáveis, aos lagos permanentes e temporários e à regularidade dos pulsos de cheia constituem um excelente refúgio para a fauna.

O Planalto, a partir da década de 1960, passou por profundas modificações causadas pela ocupação humana, especialmente a substituição da vegetação original por pastagens e por cultivos agrícolas. Estas alterações podem ter contribuído para a modificação do regime hidrológico e da

produção de sedimentos nas bacias dos rios que correm para o Pantanal.

O rio Paraguai tem grande importância como via de navegação para o transporte de produtos como minério e grãos e, para incrementar o uso para navegação, têm sido propostos planos de modificações do leito do rio. É importante avaliar como as modificações propostas podem afetar o comportamento hidrológico e sedimentológico do Pantanal. Além disso, é importante avaliar o efeito de uma sucessão de anos secos sobre o ambiente pantaneiro e sobre a atividade de navegação. É necessário avaliar se a via permanecerá navegável durante um longo período seco, com ou sem eventuais obras de modificação do leito do rio. Historicamente, as atividades humanas nesta região sempre têm sido fortemente influenciadas pelos condicionantes hidrológicos (Costa, 1999).

Para esta preocupação com a possibilidade de ocorrência de uma longa seqüência de anos secos, as séries de dados de chuva e vazão na bacia do rio Paraguai fornecem uma resposta parcial, porque incluem um período em que a vazão do rio Paraguai esteve bastante abaixo dos valores observados durante as últimas décadas.

Este trabalho apresenta alguns resultados da análise estatística dos dados hidrológicos, com atenção particular sobre as variações de baixa frequência de vazões e do clima, que são claramente identificáveis nesta região (Collischonn et al., 2001).

DESCRIÇÃO DA BACIA

A área da bacia do rio Paraguai, na sua confluência com o rio Paraná, é de $1,095.10^6 \text{ km}^2$, representando mais de 35% da área da bacia do Prata. A área drenada pertence a quatro países: a Argentina (165.10^3 km^2); a Bolívia (205.10^3 km^2); Brasil (370.10^3 km^2) e Paraguai (355.10^3 km^2). No local onde se encontram os rios Paraguai e Paraná, junto às cidades de Corrientes e Resistência, na Argentina (Figura 1), a vazão média do rio Paraguai é de $2.700 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, o que corresponde a uma vazão específica de $2,47 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^2$, que é significativamente menor do que a vazão específica do rio Paraná, que chega a $11,72 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^2$. Esta diferença é uma consequência da diferença entre o regime pluviométrico das duas bacias e da topografia extremamente plana do Pantanal do rio Paraguai, onde a evaporação é incrementada em grandes áreas permanente ou temporariamente inundadas.

A precipitação média anual varia entre aproximadamente 800 mm em algumas regiões da fronteira entre o Brasil e a Bolívia e quase 2000 mm em algumas áreas no norte da bacia. As chuvas são sazonais, ocorrendo principalmente nos meses de verão. Uma característica importante da região é o forte gradiente de precipitação que existe no sentido leste-oeste. A região de Corumbá, na fronteira com a Bolívia, recebe apenas $1000 \text{ mm} \cdot \text{ano}^{-1}$. A parte boliviana da bacia é ainda mais seca, com cerca de $800 \text{ mm} \cdot \text{ano}^{-1}$, em média (Tucci & Clarke, 1998). A região nordeste, nas cabeceiras dos rios Cuiabá e Manso, é a mais úmida, com mais de $1800 \text{ mm} \cdot \text{ano}^{-1}$ em média. Corumbá e a região do rio Manso, afluente do rio Cuiabá estão separadas por apenas cerca de 500 km em linha reta, o que significa que nesta região existe um gradiente de precipitação média anual de quase $2 \text{ mm} \cdot \text{ano}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$. Dentro do território brasileiro os maiores afluentes do rio Paraguai e, também, os principais formadores do Pantanal, são os rios Cuiabá, São Lourenço, Taquari, Aquidauana e Miranda.

VARIABILIDADE DAS COTAS DO RIO PARAGUAI EM LADÁRIO

O posto fluviométrico de Ladário, localizado na região centro-sul do Pantanal, é o que apresenta a série de dados mais longa de todos os postos da região. A série de dados de cotas inicia em 1900 e se estende até atualmente, apresentando algumas características interessantes, já apresentadas por Galdino et al. (1997).

A Figura 2 apresenta as séries de cotas médias, máximas e mínimas anuais do posto Ladário no período de 1900 a 1995. A seqüência de anos com cotas baixas durante a década de 1960 se destaca claramente na série, assim como o retorno às cotas altas no período posterior. A inspeção visual indica que o período total pode ser dividido em três partes: (a) a série de 1900 a 1960; (b) a série de 1961 a 1970

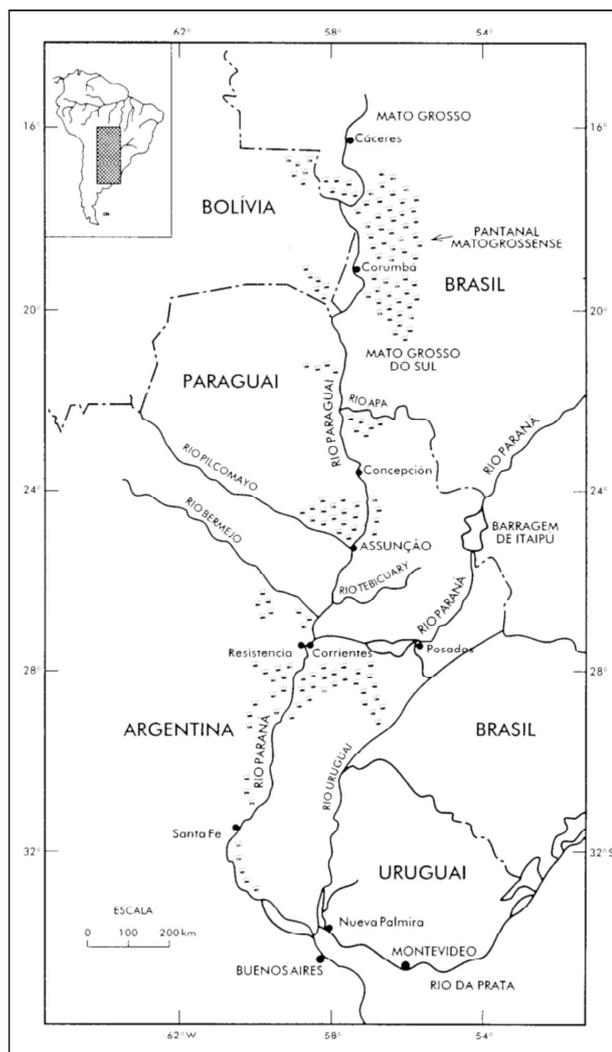


Figura 1. O rio Paraguai e a bacia do rio da Prata (adaptado de Ponce, 1995).

ou 1971; (c) a série após 1971. A Tabela 1 apresenta os valores de cotas médias e os desvios padrão das cotas médias, para as três partes do período total.

Dos dados da Tabela 1 percebe-se, claramente, que a cota máxima média e que a cota mínima média, são bastante menores no período 1961 a 1970, do que nos períodos anterior e posterior. Não há, por outro lado, evidência forte de que a cota máxima média no período de 1971 a 1995 seja superior à cota máxima média no período de 1900 a 1960 (a diferença entre elas é de $66,8 \pm 35,2 \text{ cm}$). Existe, porém, uma clara evidência de mudança na cota mínima média, que passou de $90 \pm 9 \text{ cm}$, no período anterior a 1960, para $144 \pm 16 \text{ cm}$, no período posterior a 1971.

Além das mudanças nos valores médios, é interessante investigar a ocorrência de mudanças na estrutura correlacional dos valores de cota máxima e cota mínima. A estrutura correlacional identifica o quanto uma variável como a cota, em um ano qualquer, está associada à cota nos anos

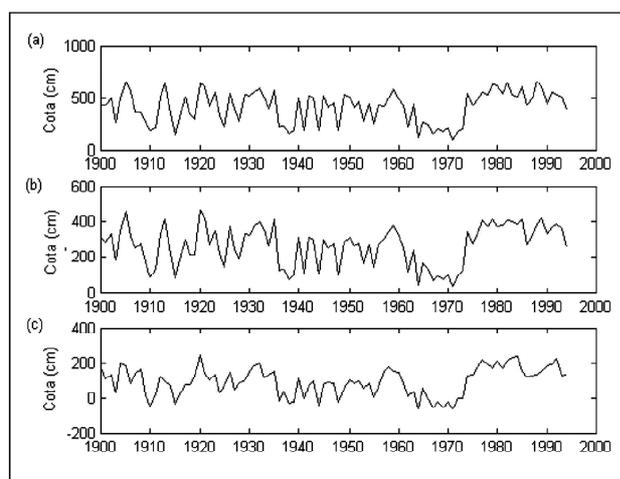


Figura 2. Cotas máximas (a), médias (b) e mínimas (c) anuais do rio Paraguai em Ladário.

anteriores. Os resultados desta análise estão apresentados na Tabela 2.

Os valores da correlação serial apresentados na tabela são relativamente altos, o que ocorre em função da grande capacidade de armazenamento da área inundada do Pantanal, e do armazenamento em água subterrânea de algumas regiões. No período da década a partir da década de 60, no entanto, a correlação é maior. Além disso, a Tabela 2 mostra que a correlação é maior para as cotas mínimas do que para as cotas máximas e médias. A correlação pode ser considerada significativa até para 3 anos de antecedência, se comparada com o erro padrão aproximado, dado por $\pm 1/N^{1/2}$ (onde N é o tamanho da amostra). Porém, para o período anterior a 1960, a correlação é muito menor, e não pode ser considerada significativa no caso das cotas máximas e a correlação entre as cotas mínimas, embora exista, é muito fraca. No período posterior a 1971, por outro lado, tanto as cotas máximas como as mínimas são fortemente correlacionadas, com evidências de que a correlação é significativa até a antecedência de 2 anos.

O gráfico apresentado na Figura 2 também permite analisar as diferenças na estrutura correlacional da série. É bastante claro que houve uma perturbação do regime hidrológico em 1960, aproximadamente, que persistiu por um longo tempo.

Variabilidade das séries de vazão em postos fluviométricos da bacia do rio Paraguai

Apesar de configurarem uma série muito longa e completa, os dados de cota de Ladário fornecem uma informação um tanto limitada sobre o regime hidrológico da bacia do rio Paraguai, devido à ausência de uma relação confiável entre cota e vazão. Séries de vazão estão disponíveis em vários outros locais na bacia do rio Paraguai (Tabela 3 e Figu-

Tabela 1. Médias das cotas máxima, mínima e das diferenças entre máxima e mínima anual, com desvio padrão, nas três partes do período de 1900 a 1994.

	Período		
	1900-60	1961-70	1971-94
Máxima (cm)	414±18	280±41	481±30
Mínima (cm)	90±9	15±22	144±16
Diferença (cm)	324±20	265±46	337±34

ra 3), porém nenhuma é tão longa quanto à série de cotas de Ladário.

Os dados destes postos fluviométricos com dados de vazão foram analisados adimensionalizando as vazões, isto é, subtraindo de cada valor da série a média de longo período e dividindo o resultado pelo desvio padrão. Desta forma todos os valores foram convertidos resultando uma série com média zero e variância igual a um. As Figuras 4 a 7 apresentam, em grupos de 5, as séries de vazões adimensionais para os 20 postos fluviométricos com dados de vazão apresentados na Tabela 3 e na Figura 3.

Todos os gráficos das Figuras 4 a 7 mostram que as séries de vazão adimensional têm valores negativos até 1973. A partir deste ano, aproximadamente, todas as séries apresentam um forte crescimento, atingindo valores claramente positivos no final da década de 70 e durante a década de 80. Este padrão é mais claro nos postos da bacia dos rios Cuiabá e São Lourenço (incluindo os rios Piquiri, Itiquira e Correntes – Figura 6), e nos postos localizados mais ao sul no próprio rio Paraguai, e nos rios Taquari, Aquidauana, Miranda (Figura 7).

Portanto, os dados de vazão dos 20 postos fluviométricos, apresentados na Figura 3 e na Tabela 3, confirmam o quadro geral apresentado pela série de cotas de Ladário e estendem a análise anterior, realizada por Galdino et al. (1997), que identificaram alterações no regime hidrológico dos rios Taquari e Paraguai, com o início de um período seco em 1960 ou 1961, que terminou em 1972-1973.

Uma análise realizada por Müller et al. (1998) apresenta resultados similares para a bacia do rio Paraná, a montante da barragem de Itaipu. Estes resultados levam a crer que foi considerável a abrangência espacial do fenômeno de variabilidade climática na América do Sul, especialmente a partir de 1970.

Os dados dos postos fluviométricos do rio Madeira, em Porto Velho, também apresentam um crescimento das vazões a partir de, aproximadamente, 1970 (Figura 8). A bacia do rio Madeira é vizinha à bacia do rio Paraguai, e são as duas bacias que ocupam a região mais continental da América do Sul. Infelizmente a série de dados do rio Madeira é relativamente recente, e não inclui um período considerável antes de 1970 para permitir uma análise mais profunda.

Tabela 2. Coeficientes de correlação serial de lag 1 a 4 das cotas máxima, média e mínima anuais, do rio Paraguai em Ladário.

Lag	de 1900 a 1995			de 1900 a 1960			de 1971 a 1995		
	máxima	média	mínima	máxima	média	mínima	máxima	média	mínima
1	0.416	0.523	0.637	0.139	0.225	0.364	0.639	0.706	0.757
2	0.293	0.374	0.483	-0.074	-0.021	0.101	0.419	0.468	0.491
3	0.307	0.338	0.237	0.037	0.037	0.115	0.294	0.272	0.225
4	0.164	0.199	0.184	-0.131	-0.110	-0.060	0.083	0.096	-0.011
erro aproximado	± 0,102			± 0,128			± 0,204		

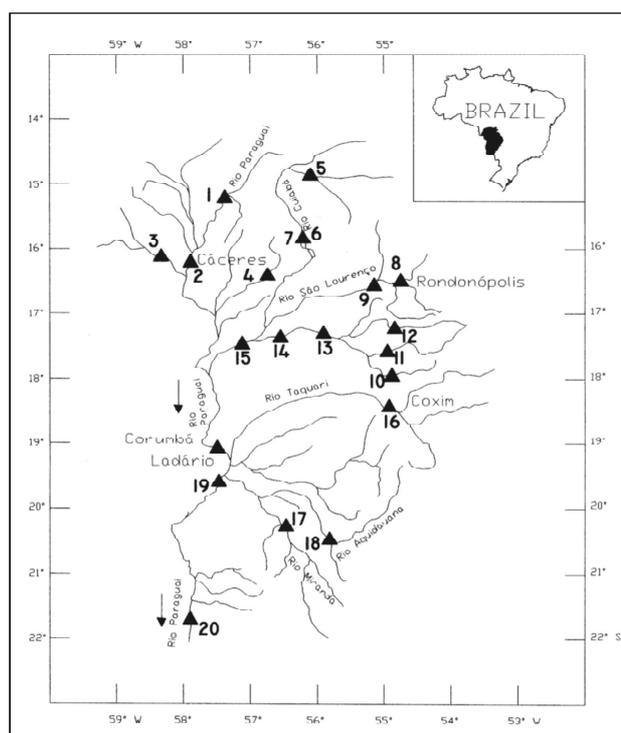


Figura 3. O rio Paraguai e seus afluentes no Brasil (Os triângulos indicam os postos fluviométricos listados na Tabela 3).

Variabilidade das séries de precipitação na bacia do rio Paraguai

A partir da constatação da alteração das vazões dos rios da bacia do rio Paraguai, é natural que uma explicação seja buscada em possíveis alterações no regime pluviométrico. A Figura 9 apresenta os locais de 36 postos pluviométricos com séries relativamente longas e sem falhas, na bacia do rio Paraguai (15 postos) e em bacias vizinhas das regiões Norte e Centro-Oeste. As séries de precipitação destes postos foram analisadas buscando identificar tendências no tempo. Os postos pluviométricos das bacias vizinhas foram incluídos para permitir a estimativa preliminar da extensão geográfica das possíveis mudanças.

Tabela 3. Postos fluviométricos com dados de vazão analisados na bacia do rio Paraguai.

N	Código	Rio	Local	Período
1	66010000	Paraguai	Barra do Bugres	1965-84
2	66070004	Paraguai	Cáceres	1974-
3	66076000	Jaurú	Baía Grande	1966-83
4	66110000	Bento Gomes	Poconé	1969-83
5	66231000	Manso	Fazenda Raizama	1961-83
6	66260001	Cuiabá	Cuiabá	1961-92
7	66260002	Cuiabá	Varzea Grande	1969-83
8	66450001	Vermelho	Rondonópolis	1965-93
9	66460000	São Lourenço	Correntes	1969-84
10	66480000	Piquiri	BR163	1969-83
11	66490000	Correntes	BR163	1969-83
12	66525000	Itiquira	BR163	1969-83
13	66600000	Piquiri	S. Jerônimo	1969-84
14	66650000	Piquiri	S. José do Piquiri	1969-84
15	66750000	Cuiabá	Porto Alegre	1967-84
16	66870000	Taquari	Coxim	1966-84
17	66910000	Miranda	Miranda	1965-83
18	66945000	Aquidauana	Aquidauana	1968-83
19	66960008	Paraguai	Porto Esperança	1964-84
20	67100000	Paraguai	Porto Murtinho	1965-84

A análise dos dados de precipitação é prejudicada pela existência de falhas de um ou mais anos de dados nas séries em diversos postos. A Figura 10 apresenta a série de dados pluviométricos anuais (adimensionalizados pela média Pm e pelo desvio padrão SD) de 8 dos postos localizados mais ao sul, onde as séries tendem a ser mais completas, onde os períodos em branco correspondem às falhas.

Para simplificar a análise dos dados pluviométricos, os dados de chuva anual, em mm, foram convertidos para uma variável Bernoulli, valendo zero ou um, de acordo com a condição acima da média ou abaixo da média. A partir desta transformação, foram obtidos, para o conjunto de todos os postos, os valores de duas variáveis: r e N. Onde N é o número de postos com dados completos em um ano qualquer; e r é o número de postos (entre os N com dados) em que a precipitação observada no ano está acima da média de longo período. A variável p, dada por $p = r/N$, indica a proporção de postos com chuva acima da média em um ano qual-

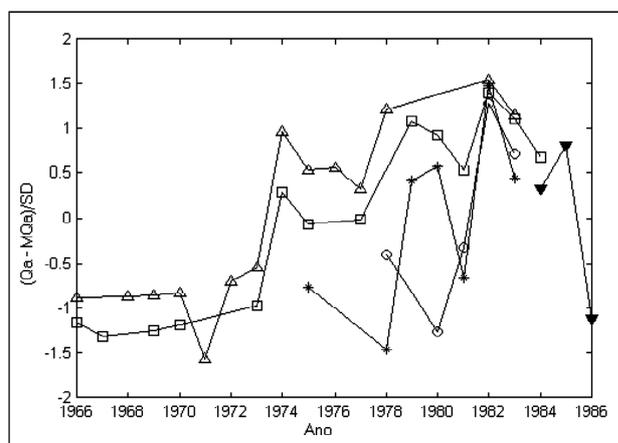


Figura 4. Séries de vazão adimensionalizada dos postos fluviométricos 66010000 (triângulos vazios); 66070004 (quadrados); 66076000 (asteriscos); 66110000 (círculos) e 66231000 (triângulos preenchidos).

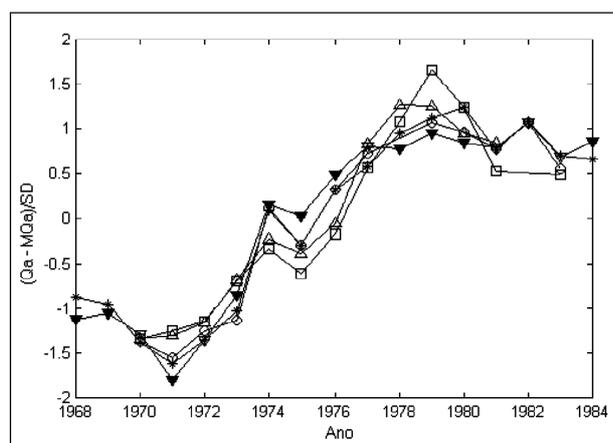


Figura 6. Séries de vazão adimensionalizada dos postos fluviométricos 66490000 (triângulos vazios); 66525000 (quadrados); 66600000 (asteriscos); 66650000 (círculos) e 66750000 (triângulos preenchidos).

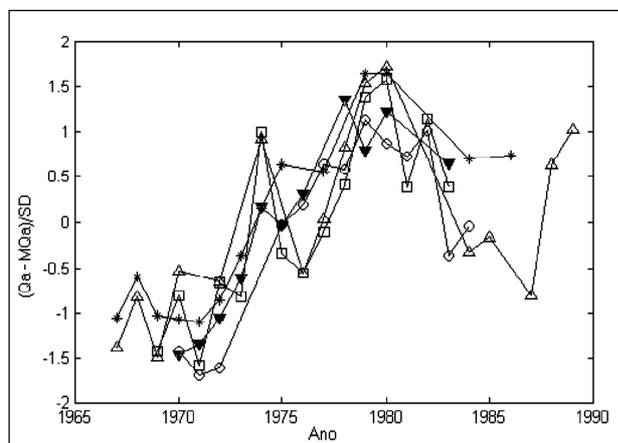


Figura 5. Séries de vazão adimensionalizada dos postos fluviométricos 66260001 (triângulos vazios); 66260002 (quadrados); 66450001 (asteriscos); 66460000 (círculos) e 66480000 (triângulos preenchidos).

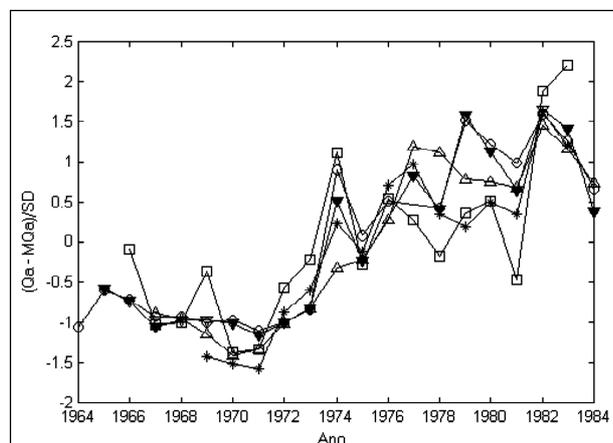


Figura 7. Séries de vazão adimensionalizada dos postos fluviométricos 66870000 (triângulos vazios); 66910000 (quadrados); 66945000 (asteriscos); 66960008 (círculos) e 67100000 (triângulos preenchidos).

quer, e um aumento no valor de p ao longo do tempo pode indicar a existência de uma tendência crescente na precipitação média anual da região ou bacia de interesse. Por outro lado, se o valor de p varia de maneira aleatória ao longo do tempo, então não existe tendência crescente ou decrescente na precipitação da região.

Para testar a hipótese de que não houve tendência na série dos valores de p ao longo do tempo (p_t), uma função de regressão do tipo $\ln\{p_t/(1-p_t)\} = \beta_0 + \beta_1.t + \beta_2.t^2 + \varepsilon_t$ foi ajustada à série, através da minimização dos erros quadrados médios, e os coeficientes β_1 e β_2 foram avaliados quanto à significância de sua diferença de zero. Para o conjunto dos 36 postos pluviométricos, os valores destes coeficientes são positivos e significativamente diferentes de zero ($\beta_1 = 0,1211 \pm 0,0315$ e $\beta_2 = -0,002434 \pm 0,000799$). A Figura 11 apresenta as freqüências de pos-

tos com precipitação acima da média (τ) e a proporção de postos com precipitação acima da média, ao longo do tempo. Na mesma figura estão os dados calculados a partir da função de regressão ajustada. Apesar da grande variação do valor de N , devido às falhas dos dados, é bastante evidente que é maioria o número de postos com precipitação abaixo da média entre 1960 e 1972, aproximadamente, e que a proporção p cresce nos anos seguintes.

Estes resultados confirmam a tendência observada nos dados de vazão, e sugerem que as alterações nas séries de vazão são, pelo menos em parte, causadas por alterações nas séries de chuva. É necessário ressaltar, no entanto, que a série de Bernoulli, com valores 0 ou 1, utilizada na análise, não leva em conta a dependência espacial, que pode existir nos dados de precipitação.

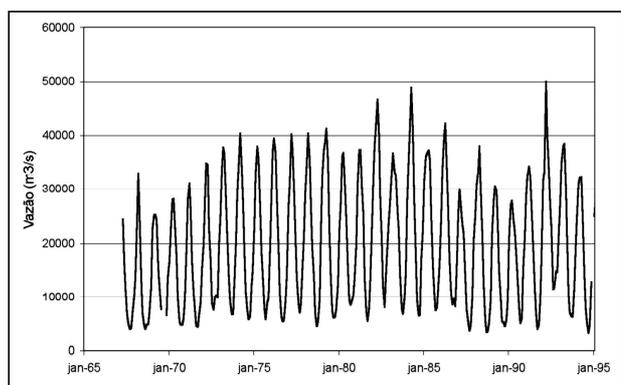


Figura 8. Série de dados de vazão mensal do rio Madeira, em Porto Velho (posto ANEEL 15400000), mostrando um crescimento das vazões entre o final da década de 60 e o início da década de 70.

Os postos pluviométricos analisados estão distribuídos em uma vasta região e, por isso, é interessante avaliar se o padrão detectado na precipitação anual apresenta variabilidade espacial, isto é, se existem regiões com maior ou menor evidência de tendência crescente na precipitação, no período considerado. Para responder este questionamento os 36 postos foram divididos em 6 grupos, de 6 postos cada um, de acordo com as bandas de latitude, sendo o primeiro grupo formado pelos 6 postos localizados em latitudes mais próximas do equador e o último formado pelos 6 postos mais distantes, ou mais ao sul. A análise descrita antes para todos os postos em conjunto, usando a variável binomial, ajustando uma função de regressão à série de dados e avaliando a significância da diferença dos coeficientes β_1 e β_2 de zero, foi repetida para cada um dos 6 grupos de postos. Entretanto, como para cada um dos grupos o valor de N é menor do que na análise envolvendo todos os postos, e a análise é muito mais imprecisa. Os resultados são apresentados na Tabela 4, que mostra os coeficientes β_1 e β_2 estimados para cada grupo. A tendência positiva, representada pelo valor positivo de β_1 , ocorre em 5 dos 6 grupos analisados, porém em apenas dois grupos de postos o valor de β_1 é significativamente diferente de zero (grupos marcados na Tabela 4). O grupo de postos pluviométricos em que a tendência é mais marcante (nível de significância = 1%) é o quinto grupo, definido pela região entre os paralelos 16 e 18 S, incluindo os postos localizados nas bacias do rio São Lourenço, Itiquira, Piquiri, Correntes e a parte norte da bacia do rio Taquari. Esta é, justamente, a região em que as mudanças na vazão são mais evidentes e homogêneas.

Mudanças no padrão de precipitação diária

A análise anterior refere-se às mudanças da precipitação total anual em 36 postos pluviométricos, e foi constatada evidência de que o período de vazões baixas no rio



Figura 9. Distribuição espacial de postos pluviométricos com séries relativamente longas na região da bacia do rio Paraguai e bacias vizinhas.

Paraguai e em seus afluentes corresponde a um período de precipitações abaixo da média. Nesta seção deste trabalho é analisada a natureza desta mudança em termos de precipitação diária. Uma mudança de regime pluviométrico anual pode ser causada pela ocorrência, combinada ou não, de dois fenômenos: menor número de dias de chuva ao longo do ano, e menos precipitação em cada um dos dias de chuva do ano.

Para analisar se estes fenômenos ocorreram na bacia do rio Paraguai, dois postos pluviométricos do quinto grupo apresentado na Tabela 4 (os postos 01753000 e 01754000) foram selecionados, em função da alta significância das mudanças de precipitação neste grupo de postos e do menor número de falhas nos dados de precipitação diária destes dois postos. O posto 01753000 tem 10 anos de dados diários no período de 1960 a 1970 e 15 anos no período subsequente. O posto 01754000 tem 9 anos de dados entre 1960 e 1970 e 17 no período subsequente. Para cada um dos postos e para cada um dos períodos (antes e depois de 1970), a série de dados de precipitação diária foi analisada em duas fases. A primeira fase da análise foi verificar, para cada dia do ano, sendo este dia sem chuva, a probabilidade de que no dia seguinte também não ocorresse chuva. Assim, para cada dia t do ano (com $t = 1, 2, 3, \dots, 365$), a proporção $p_t = r_t/N_t$ foi calculada, onde N_t é o número de anos em que o dia t foi seco e r_t é o número de anos em que o dia $t + 1$ também foi seco.

Considerando a sazonalidade da precipitação na região, o valor da proporção p_t tem um comportamento cíclico, com valores maiores no período de estiagem. Por

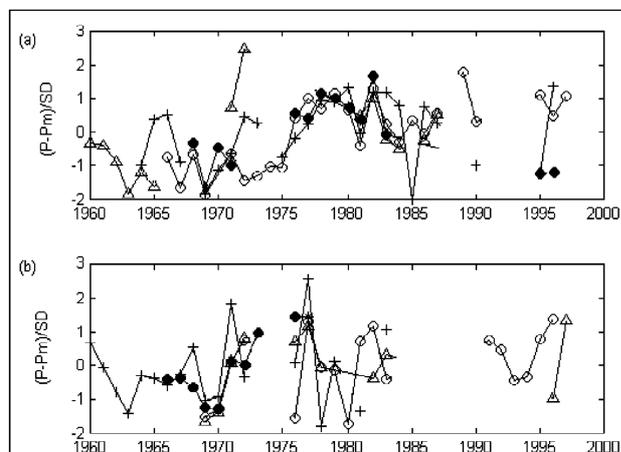


Figura 10. Série de precipitação anual adimensional em alguns postos pluviométricos (a) entre 16°S e 18°S (b) entre 18°S e 20°S.

isso, foi ajustada uma função do tipo $\ln\{p/(1-p)\} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \cos(2\pi \cdot t) + \beta_2 \cdot \sin(2\pi \cdot t) + \dots$ à seqüência de valores das proporções p_t .

O resultado desta análise para os dois postos pluviométricos considerados, mostrando as funções ajustadas na forma descrita acima, é apresentado nas Figuras 12a e 13a. Observa-se que a probabilidade de que um dia seco é sucedido por outro dia seco é maior no período de 1960 a 1970 do que no período subsequente.

A segunda fase da análise foi a avaliação da quantidade de chuva em cada dia em que ocorreu chuva, nos dois postos pluviométricos e nos períodos entre 1960 e 1970 e depois de 1970. Para cada dia do ano foi estimada a média dos logaritmos da lâmina de precipitação, e a seqüência desta média ao longo do ano foi ajustada por uma função de senos e cossenos, de forma semelhante à anterior. As Figuras 12b e 13b apresentam estas funções ajustadas.

Conforme se observa nas Figuras 12 e 13, a probabilidade de que um dia seco seja sucedido por outro dia seco é maior no período de 1960 a 1970 do que no período posterior a 1970, nos dois postos pluviométricos considerados (01753000 e 01754000). Isto significa que os períodos secos na década de 1960 foram mais persistentes ou duradouros. Além disso, conforme se observa nas Figuras 12b e 13b, nos dias em que a chuva ocorreu, a precipitação foi em média inferior no período de 1960 a 1970, em grande parte do ano, no caso do posto 01753000, e em todo o ano, no caso do posto 01754000. Portanto, durante a década de 1960 os períodos secos foram mais duradouros e menos chuva ocorreu em cada um dos dias de chuva nos dois postos analisados, localizados entre as latitudes 16 e 18, evidenciando que houve variação do regime pluviométrico nesta região. Os valores de chuva média mensal, apresentados na Tabela 5, também apresentam evidência desta variação.

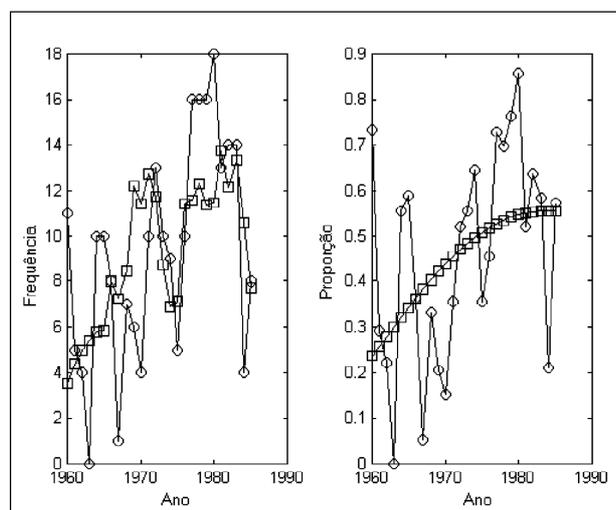


Figura 11. Esquerda – frequências observadas de postos pluviométricos com precipitação acima da média (r postos de um conjunto de N postos – os círculos indicam a frequência observada e os quadrados a frequência esperada pela regressão descrita no texto); Direita – proporção observada (círculos) e ajustada (quadrados) de postos pluviométricos com chuva superior à média (r/N).

Tabela 4. Estimativas dos coeficientes da função de regressão, ajustada em grupos de seis postos pluviométricos.

Grupo	β_1	β_2	Nível de significância de β_1
1	0.1352 ± 0.0949	-0.00202 ± 0.00306	-
2	0.2054 ± 0.0970	-0.00429 ± 0.00216	5%
3	-0.0082 ± 0.0757	0.00073 ± 0.00222	-
4	0.1248 ± 0.0782	-0.00281 ± 0.00194	-
5	0.4270 ± 0.1200	-0.00835 ± 0.00268	1%
6	0.0840 ± 0.0758	-0.00131 ± 0.00194	-

ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados apresentados neste trabalho confirmam os resultados anteriores apresentados por Galdino et al. (1997), mostrando que houve uma alteração no regime hidrológico do rio Paraguai e em alguns de seus afluentes no Brasil, no período das décadas de 60 a 80.

No que diz respeito ao rio Paraguai, os resultados apresentados complementam os resultados apresentados no trabalho de Genta et al. (1998) que demonstram, para, aproximadamente, o mesmo período, uma tendência na série hidrológica do rio Paraguai em Puerto Bermejo, e em três outros rios na América do Sul, o Uruguai, o Paraná e o Negro (no Uruguai). Nestes quatro rios Genta et al. (1998) encontraram uma tendência crescente nos dados de vazão, usando um cálculo de médias móveis.

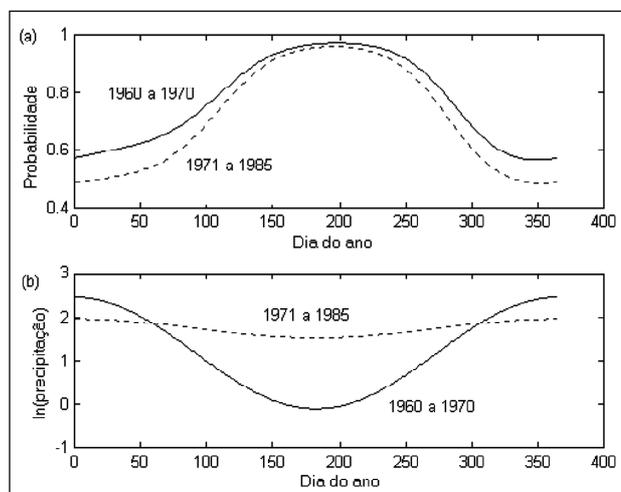


Figura 12. a) Probabilidade de que um dia sem chuva seja sucedido por outro dia sem chuva, em cada dia do ano. b) Média do logaritmo natural da precipitação em cada dia do ano. Os dois gráficos referem-se ao posto pluviométrico 01753000 (linha contínua = 1960 a 1970; linha tracejada = período posterior a 1970).

A análise dos dados de precipitação mostra que as alterações no regime hidrológico foram acompanhadas por alterações no regime pluviométrico. Porém, em função da maior variabilidade espacial dos dados de chuva, especialmente nas regiões tropicais, é mais difícil encontrar as tendências nas séries de dados de precipitação. Além disso, o grande número de falhas nas séries e o curto período de dados de precipitação na bacia do rio Paraguai dificultam ainda mais esta análise. Mesmo assim, os resultados da análise apresentada neste trabalho confirmam resultados semelhantes encontrados por Muller et al. (1998) para a bacia do rio Paraná. O trabalho de Muller et al. (1998) é uma análise extensa de dados de vazão e precipitação na bacia do rio Paraná, a montante de Itaipu, que mostrou um significativo aumento de vazão média entre os períodos antes e depois de 1970, acompanhado pelo aumento de precipitação, embora menos evidente.

Tanto em termos de precipitação como de vazão, portanto, os dados apresentados aqui dão suporte aos resultados publicados por outros autores, analisando dados de outras bacias na América do Sul. Contudo, existem análises de bacias em outros continentes que estimulam um aprofundamento desta pesquisa. Por exemplo, Laraque et al. (1997), Orange et al. (1997) e Laraque et al. (2001) analisaram dados de vazão na bacia do rio Congo, na África central, cujas séries iniciam no início do século e na década de 30, e encontraram três períodos distintos: (i) de 1902 a 1960, um período estável; (ii) de 1960 a 1970, um período muito úmido; (iii) de 1971 em diante, um período muito seco, que se tornou ainda mais crítico a partir de 1982. Este padrão é, aproximadamente, o inverso do padrão apresentado pelo rio Paraguai em Ladário.

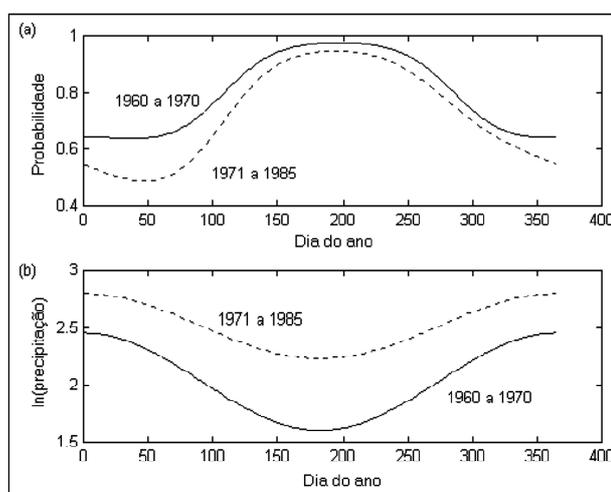


Figura 13. a) Probabilidade de que um dia sem chuva seja sucedido por outro dia sem chuva, em cada dia do ano. b) Média do logaritmo natural da precipitação em cada dia do ano. Os dois gráficos referem-se ao posto pluviométrico 01754000 (linha contínua = período entre 1960 e 1970; linha tracejada = período posterior a 1970).

As mudanças verificadas na bacia do rio Congo estenderam-se pelo continente Africano, incluindo o Sahel e o Golfo da Guiné (localizados mais ao norte e a oeste, em relação à bacia do Congo). Le Barbé e Lebel (1997) analisaram os dados de precipitação da região do Sahel, encontrando uma mudança abrupta em 1970, ano a partir do qual a precipitação foi de 7 a 42% inferior entre os períodos antes de 1968 e depois de 1968. Um pouco mais ao sul, o Golfo da Guiné também apresentou mudanças na precipitação, conforme as análises de Servat et al. (1997) e de Paturol et al. (1997). No Golfo da Guiné os anos 60 foram mais úmidos do que os anos 50, enquanto os anos 70 e 80 foram muito mais secos que os períodos anteriores.

A pesquisa sobre as causas de alterações climáticas desta natureza, com impactos em regiões tão vastas e distantes entre si, ainda está em fase bastante incipiente. Algumas análises (Kousky et al., 1984; Molion & Moraes, 1987; Damázio et al., 1997) vem sendo realizadas, buscando identificar como a atmosfera e o oceano interagem no hemisfério sul, onde a proporção entre superfícies terrestre e oceânica é muito menor do que no hemisfério norte. Genta et al. (1998) mostraram que a média móvel das vazões anuais de quatro rios na América do Sul (Paraguai, Paraná, Uruguai e Negro, no Uruguai) e a média móvel da temperatura de superfície do mar (média de três regiões: 6 a 2°N, 170° a 190°W; 2 a 6°S, 180° a 90°W; 6 a 10°S, 150° a 110°W) cresceram juntas durante o período após 1960. Amarasekera et al. (1997) também mostraram que as séries de vazão do rio Paraná, em dois locais (Posadas e Corrientes), estão correlacionadas com as anomalias da temperatura da superfície do mar (TSM) associadas ao fenômeno El Niño (ENOS).

Tabela 5. Precipitação média mensal e médias anuais, nos postos 01753000 e 01754000 nos períodos de 1960 a 1970 e posterior a 1970.

	posto 01753000		posto 01754000	
	1960 a 1970	1971 a 1985	1960 a 1970	1971 a 1985
janeiro	241	290	193	320
fevereiro	240	209	222	294
março	172	220	166	238
abril	109	114	89	153
maio	69	52	28	87
junho	7	25	9	38
julho	19	8	13	13
agosto	10	27	15	33
setembro	49	96	43	106
outubro	194	134	123	119
novembro	249	239	178	211
dezembro	190	310	162	281
total anual	1548	1724	1240	1892

Embora a bacia do rio Paraguai faça parte da bacia do Paraná, para a qual existem evidências de correlação entre vazão e o fenômeno El Niño (Amaresekera et al., 1997), a influência do El Niño sobre na bacia do rio Paraguai parece ser muito menor (Ropelewski & Halpert, 1987; Grimm et al., 1998a). Na América do Sul, a influência do El Niño sobre a precipitação é mais marcada na região sul do Brasil e no Uruguai, e nas regiões norte e nordeste, além da costa do Pacífico. Na região sul do Brasil e no Uruguai a correlação é positiva, isto é, precipitações superiores à média tendem a ocorrer durante períodos com altos índices ENOS (Ropelewski & Halpert, 1987; Diaz et al., 1998; Grimm et al., 2000; Grimm et al. 1998b). A vazão de alguns rios também tem correlação positiva com os índices ENOS (Mechoso & Perez-Iribarren, 1992; Amarasekera et al., 1997). No norte e no nordeste do Brasil, por outro lado, a correlação é negativa. Esta correlação foi detectada em diversos trabalhos incluindo uma grande região, conforme trabalhos como os de Ropelewski & Halpert (1987) e Souza et al. (2000). A vazão dos rios Amazonas, no Brasil, e Magdalena, na Colômbia, também apresentam esta correlação negativa (Molion & Moraes, 1987; Amaresekera et al., 1997; Restrepo & Kjerfve, 2000). Conforme o trabalho de Ropelewski & Halpert (1996), confirmado por Grimm et al. (2000) e Souza et al. (2000), a correlação negativa, verificada no norte e no nordeste da América do Sul, tende a diminuir na direção sul, e a correlação positiva, verificada no sul do Brasil e no Uruguai tende a diminuir no sentido norte, sugerindo que existe uma zona de transição entre as latitudes 10° e 25° S, em que o fenômeno El Niño tem menor influência. A bacia do rio Paraguai está localizada justamente nesta região de transição. O único trabalho encontrado na bibliografia que analisa a relação das chuvas da bacia do rio Paraguai com o El

Niño (Grimm et al., 1998a) não apresenta evidência de correlação nesta região, confirmando que a bacia está numa região de transição entre as regiões de correlação positiva, localizadas ao sul, e as de correlação negativa, localizadas ao norte.

As fracas evidências com relação ao El Niño não diminuem a necessidade de buscar causas da variabilidade em dados de TSM em outras regiões. Robertson & Mechoso (1998), por exemplo, chamam a atenção para um componente cíclico, com período de 10 anos, na série de vazão dos rios Paraná e Paraguai, e concluem que este ciclo nada tem a ver com o ENOS, embora esteja bem correlacionado com as TSM na região tropical do Atlântico Norte.

É interessante ressaltar que a bacia do rio Paraguai e as regiões africanas do Sahel e do Congo têm ainda duas outras características em comum, além do regime hidrológico de uma apresentar o comportamento inverso das outras. Tanto na bacia do rio Paraguai como na região central da África as mudanças apresentam uma grande persistência, isto é, a correlação interanual da vazão dos rios é relativamente alta. Além disso, estas regiões apresentam fortes gradientes espaciais de precipitação. Na região do Sahel o gradiente de precipitação anual chega a 1 mm.km⁻¹ (Le Barbé & Lebel, 1997), na bacia do rio Congo também se encontram gradientes consideráveis, especialmente na bacia do rio Oubangui, um dos seus principais afluentes, o gradiente é de aproximadamente 2 mm.ano⁻¹.km⁻¹ (Orange et al., 1997). Na bacia do rio Paraguai a precipitação anual também apresenta gradientes da ordem de 2 mm.ano⁻¹.km⁻¹, especialmente no sentido leste-oeste. Conforme observado por Le Barbé & Lebel (1997), as mudanças de regime de precipitação nestas regiões correspondem ao deslocamento de algumas centenas de quilômetros das isoietas médias anuais.

CONCLUSÕES

As análises apresentadas neste trabalho demonstram que o regime hidrológico da bacia do rio Paraguai, no Brasil, foi substancialmente diferente no período entre 1960 e 1970 do que nos períodos posterior e anterior. Os dados de nível do rio Paraguai em Ladário sugerem que as mudanças de regime hidrológico foram abruptas e que as mudanças ocorreram tanto em valores médios como nas características da correlação interanual dos níveis observados.

Apesar da precariedade das séries de precipitação nesta bacia, a análise de séries de dados posteriores a 1960 de 36 postos pluviométricos revelou que uma explicação para a mudança do regime hidrológico pode ser encontrada nas mudanças do regime pluviométrico.

Uma análise detalhada das séries de precipitação diária de dois postos pluviométricos na região com maior evidência de mudanças de regime revelou que, durante a década de 60 os períodos secos foram mais longos e, em dias de chu-

va, a intensidade de precipitação foi menor do que no período posterior.

Os resultados obtidos na bacia do rio Paraguai foram comparados aos resultados de análises publicados por outros autores para outras bacias na América do Sul e com observações sobre variabilidades semelhantes em grandes regiões do continente Africano, especialmente na bacia do rio Congo, cuja série de vazões apresenta um comportamento inverso ao da série de níveis de Ladário.

Não existem evidências de correlação entre o regime hidrológico do rio Paraguai, em território brasileiro, com índices como o ENOS (El Niño – Oscilação Sul), e a busca por causas físicas para a variabilidade climática deve continuar, eventualmente com outros índices relacionados às temperaturas de superfície dos Oceanos Atlântico e Pacífico.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a ANEEL que cedeu os dados hidrológicos, ao CNPq pela concessão da bolsa de doutorado que manteve o último autor durante sua pesquisa e aos revisores pelas sugestões.

REFERÊNCIAS

- AMARASEKERA, K. N.; LEE, R. F.; WILLIAMS, E. R. & ELTAHIR, E. A. B. (1997). ENSO and the natural variability of flow of tropical rivers. *Journal of Hydrology* 200 24-39.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. & CLARKE, R. T. (2001). Further evidence of changes in hydrological regime of the river Paraguay: part of a wider phenomenon of climate change? *Journal of Hydrology*, vol.245, p.218-238.
- COSTA, M. F. (1999). *História de um país inexistente: O Pantanal entre os séculos XVI e XVIII*. Kosmos, São Paulo, 277p.
- DAMÁZIO, J. G.; SERRA, C. F. & OLIVEIRA, G. A. (1997). Analysis of hydrological complementarities at the continental level in South America (in Portuguese) *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 2, 2 143-56.
- DIAZ, A. F.; STUDZINSKI, C. D. & MECHOSO, C. R. (1998) Relationships between precipitation anomalies in Uruguay and Southern Brazil and Sea Surface Temperature in the Pacific and Atlantic Oceans. *Journal of Climate*, vol.11, p.251-271.
- GALDINO, S.; CLARKE, R. T.; PADOVANI, C. R.; SORIANO, B. M. A. e VIEIRA, L. M. (1997). Evolução do regime hidrológico na planície do baixo curso do rio Taquari, Pantanal. *Anais. XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Vitória, ES.
- GENTA, J. L.; PEREZ-IRIBARREN, G. & MECHOSO, C. R. (1998). A recent increasing trend in the streamflow of rivers in southeastern South America. *Journal of Climate* 11 2858-2862.
- GRIMM, A. M.; BARROS, V. R. & DOYLE, M. E. (2000). Climate variability in southern South America associated with El Niño and La Niña events. *Journal of Climate*, vol.13, p.35-58.
- GRIMM, A. M.; CARDOSO, A. O.; FERRAZ, S. E. T. & SORIANO, B. (1998b). *Is there a significant impact of El Niño and La Niña events on rainfall in Central-Western Brazil?* (in Portuguese) X Congresso Brasileiro de Meteorologia. Sociedade Brasileira de Meteorologia. Brasília.
- GRIMM, A. M.; FERRAZ, S. E. T. & GOMES, J. (1998a). Precipitation anomalies in southern Brazil associated with El Niño and La Niña events. *Journal of Climate*, vol.11, p.2863-2880.
- KOUSKY, V. E.; KAGANO, M. T. & CAVALCANTI, I. F. A. (1984). A review of the Southern Oscillation: oceanic-atmospheric circulation changes and related anomalies. *Tellus* vol.36A, p.490-504.
- LARAQUE, A.; MAHÉ, G.; ORANGE, D. & MARIEU, B. (2001). Spatiotemporal variations in hydrological regimes within Central Africa during the XXth century. *Journal of Hydrology*, vol.245, p.104-117.
- LARAQUE, A.; OLIVRY, J. C.; ORANGE, D. & MARIEU, B. (1997). Variações no espaço e no tempo dos regimes pluviométricos e hidrológicos na África Central desde o início do século. In: XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Vitória ES. *Anais*.
- LE BARBÉ, L. & LEBEL, T. (1997). Rainfall climatology of the HAPEX – Sahel region during the years 1950-1990. *Journal of Hydrology*, vol.188-189, p.43-73.
- MECHOSO, C. R. & PEREZ IRIBARREN, G. (1992). Streamflow in southeastern South America and the Southern Oscillation. *Journal of Climate*, vol.5, p.1535-1539.
- MOLION, L. C. B. & MORAES, J. C. (1987). Southern Oscillation and the discharge of rivers in tropical South America (in portuguese). *Revista Brasileira de Engenharia*, Caderno de Recursos Hídricos 5, 1.
- MÜLLER, I. I.; KRÜGER, C. M. & KAVISKI, E. (1998). Analysis of the stationarity of hydrological series in the incremental basin of Itaipú (in portuguese). *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 3, 4 51-71.
- ORANGE, D.; WESSELINK, A. J.; MAHE, G. & FEIZOURE, C. T. (1997). The effects of climate changes on river baseflow and aquifer storage in Central Africa. In: *Sustainability of Water Resources under increasing uncertainty* IAHS Publ. n°240, p.113-123.
- PATUREL, J. E.; SERVAT, E.; KOUAMÉ, B.; LUBÈS, H.; OUEDRAOGO, M. & MASSON, J. M. (1997). Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea – part II: an integrated regional approach. *Journal of Hydrology*, vol.191, p.16-36.
- PONCE, V. M. (1995). *Impacto hidrológico e ambiental da hidrovía Paraná-Paraguai no Pantanal Matogrossense – um estudo de referência*. San Diego State University, San Diego.
- RESTREPO, J. D. & KJERFVE, B. (2000). Magdalena river: interannual variability (1975-1995) and revised water

- discharge and sediment load estimates. *Journal of Hydrology*, vol.235, p.137-149.
- ROBERTSON, A. W. & MECHOSO, C. R. (1998). Interannual and decadal cycles in river flows of southeastern South America. *Journal of Climate*, vol.11, p.2570-2581.
- ROPELEWSKI, C. F. & HALPERT, M. S. (1987). Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation. *Monthly Weather Review*, vol.115, p.1606-1626.
- ROPELEWSKI, C. F. & HALPERT, M. S. (1996). Quantifying southern oscillation – precipitation relationships. *Journal of Climate*, vol.9, p.1043-1059.
- SERVAT, E.; PATUREL, J. E.; LUBÈS, H.; KOUAMÉ, B.; OUEDRAOGO, M. & MASSON, J. M. (1997). Climatic variability in humid Africa along the Gulf of Guinea – part I: detailed analysis of the phenomenon in Côte d'Ivoire. *Journal of Hydrology*, vol.191, p.1-15.
- SOUZA, E. B.; KAYANO, M. T.; TOTA, J.; PEZZI, L.; FISCH, G. & NOBRE, C. (2000). On the influences of the El Niño, La Niña and Atlantic Dipole pattern on the Amazonian rainfall during 1960-1998. *Acta Amazonica*, vol.30, n°2, p.305-318.
- TUCCI, C. E. M. & CLARKE, R. T. (1998). Environmental issues in the la Plata basin. *Water Resources Development* 14, 2, 157-173.

Further Evidence of Changes in the Hydrological Regime of the River Paraguay Basin

ABSTRACT

Analysis of flow measured at 20 sites, rainfall measured at 36 sites, and a 95-year record of water-levels at a site in the basin of the river Paraguay (area 1095 10 3 km 2) showed that the flow regime during the approximate period 1960-70 differed substantially from the flow regime both before and after. The long record of Ladario water-levels suggested that the changes between one period and the next were abrupt, and that the periods differed not only in terms of mean water-levels but also in terms of the year-to-year correlational structure within the record. Despite the fragmentary nature of rainfall records from 36 sites, an explanation for the increased flows since 1970 was found in the increased rainfall, as assessed in terms of the frequency of annual rainfalls rather than the long-term mean rainfall. There was some degree of consistency in the change of rainfall pattern across the Paraguay basin as a whole. A detailed examination of daily rainfall characteristics at two gauges where records were fairly complete showed that during the 1960-70 period, when river flows were low, dry spells were more persistent and, on days when rain did fall, the amounts of rain were generally smaller. The results obtained were compared with results obtained by other researchers using flow records from the Rivers Paraguay, Paraná, Negro and Uruguay in the la Plata basin, and rainfall records from other parts of South America. There is now strong evidence of changes in the runoff regime of the la Plata basin during the last 40 years, not all of which can be attributed to land-use change, as there is complementary evidence of change in rainfall regime. The results were also compared with findings from the Congo basin, which appears to exhibit changes in flow regime that are a mirror image of those found for the Paraguay at Ladario.

Key-words: hydrological change; rio Paraguay.