

ANÁLISE DE COMPLEMENTARIEDADES HIDROLÓGICAS A NÍVEL CONTINENTAL NA AMÉRICA DO SUL

Jorge Machado Damazio,
Fernanda da Serra Costa, Angela de Oliveira Ghirardi

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL
Av. Hum, s/nº - Cidade Universitária
20001-970 Rio de Janeiro, RJ

RESUMO

Este trabalho apresenta os resultados de análises estatísticas para a identificação de complementariedades hidrológicas, causadas por teleconexões meteorológicas relacionadas com o fenômeno El Niño, em séries hidrológicas na América do Sul, tendo em vista a interconexão dos sistemas elétricos dos diferentes países deste continente.

INTRODUÇÃO

O termo “complementariedade hidrológica” refere-se à coincidência cronológica entre as estiagens de uma bacia hidrográfica e os períodos mais molhados de outra. O interesse prático deste fenômeno está na possibilidade de se combater as estiagens através da utilização conjunta dos recursos hídricos de bacias complementares. Este é o caso do aproveitamento do potencial hidroelétrico do continente sul-americano onde a eventual existência de complementariedades hidrológicas entre as bacias do continente favoreceriam a interconexão dos sistemas elétricos dos seus diversos países.

Muitas vezes, bacias hidrográficas apresentam uma complementariedade hidrológica “sazonal” devido ao não sincronismo de suas curvas de variação das vazões dentro do ano. Por exemplo, nas bacias patagônicas e na bacia do rio Uruguai o período mais seco começa em dezembro e permanece até abril, sendo exatamente este o período mais molhado das bacias do Paraná e São Francisco (IEE, 1992). Outro tipo de complementariedade hidrológica, de mais difícil comprovação, é a complementariedade

“anual”, caracterizada pela ocorrência de anos secos numa bacia e molhados noutra.

Bacias vizinhas tendem a não apresentar grau significativo de complementariedade anual já que, em geral, estão sujeitas às condições macro-meteorológicas médias anuais semelhantes. Por outro lado, bacias mais distantes, como por exemplo, as do rio Grande no sudeste do Brasil e a do rio Orinoco na Venezuela, sujeitas às condições meteorológicas praticamente independentes, podem apresentar um grau maior de complementariedade hidrológica anual. Recentemente comprovou-se que condições da atmosfera e da superfície dos oceanos (temperatura, velocidade do vento, convergência, etc.) medidas em pontos distantes podem estar previsivelmente conectadas (*teleconexões meteorológicas*). Na América do Sul as teleconexões meteorológicas relacionadas com as flutuações da temperatura da superfície do oceano Pacífico Tropical (fenômeno do El Niño) são capazes de induzir correlações negativas entre vazões anuais de bacias distantes criando as condições para a existência de altos graus de complementariedade hidrológica anual. Por exemplo, tem-se observado a tendência de que em anos de El Niño ocorram secas no nordeste do Brasil e cheias no sul do Brasil e na costa do Peru.

Este trabalho tem como objetivo analisar o grau de complementariedade hidrológica anual apresentado por séries fluviométricas das principais bacias hidrográficas da América do Sul, tendo em vista a interconexão dos sistemas elétricos dos diferentes países deste continente.

DESCRIÇÃO DOS DADOS FLUVIOMÉTRICOS

Para o estudo de complementariedades hidrológicas na América do Sul, o sistema de drenagem natural do continente foi dividido em dez bacias, a saber:

1. *Magdalena-Cauca*: representando a parte mais importante do potencial hidroelétrico colombiano já aproveitado;
2. *Orinoco-Caroni*: representando o potencial hidroelétrico do leste colombiano e o total dos recursos venezuelanos;
3. *Marañon-Solimões*: representando os potenciais hidroelétricos do sul da Colômbia, Equador e Peru;
4. *Xingu*: representando o potencial hidroelétrico da bacia amazônica referente ao rio Xingu;
5. *Trombetas*: representando o potencial hidroelétrico da bacia amazônica referente ao rio Trombetas;
6. *Tocantins-Araguaia*: representando o potencial hidroelétrico do centro-oeste brasileiro;
7. *São Francisco*: representando o potencial hidroelétrico do nordeste brasileiro;
8. *Paraná-Paraguai*: representando os potenciais hidroelétricos do centro-sul brasileiro, Paraguai e noroeste argentino;
9. *Uruguai*: representando o potencial hidroelétrico de parte do sul brasileiro, do litoral argentino e de uma parcela do Uruguai;
10. *Negro (Argentina)*: representando o potencial hidroelétrico da região argentina de Comahue.

A Figura 1 ilustra a localização das bacias consideradas.

A Tabela 1 indica o posto fluviométrico cujos dados foram considerados representativos (Damázio et al., 1985) do regime hidrológico de cada bacia.

Tabela 1. Postos representativos de cada bacia.

Bacia	Sigla	Posto
Magdalena-Cauca	MC	Rio Magdalena em Puerto Berrio (COL)
Orinoco-Caroni	OC	Rio Caroni em Carhuachi (VEN)
Marañon-Solimões	MS	Rio Negro em Manaus (AM-BRA)
Trombetas	TR	Rio Trombetas em Cach. Porteira 1 (PA-BRA)
Xingu	XI	Rio Xingu em Belo Monte (PA-BRA)
Tocantins-Araguaia	TA	Rio Tocantins em Tucuruí (PA-BRA)
São Francisco	SF	Rio São Francisco em Sobradinho (BA-BRA)
Paraná-Paraguai	PP	Rio Paraná em Corrientes (ARG)
Uruguai	UR	Rio Uruguai em Salto Grande (ARG)
Negro	NE	Rio Negro em Primeira Angostura (ARG)

Para a bacia do Magdalena-Cauca os dados são posteriores ao ano de 1936, não existindo séries de postos a jusante da junção dos dois rios.

Para a bacia do Orinoco-Caroni os dados são do rio Caroni, não existindo dados para o período anterior a 1950 e para o período posterior a 1988. Considerou-se a série de 1953 a 1988 do posto de Carhuachi no rio Caroni e a sua extensão para 1950 a 1957 obtida com a série do posto de Morocure através de uma correção considerando a diferença de áreas de drenagem.

Para a bacia do Marañon-Solimões, as séries de vazões são, em geral, curtas e de pouca representatividade em termos de percentual de área de drenagem. A alternativa foi utilizar os dados de níveis do posto de Manaus, apesar de só estarem disponíveis dados até 1967.

Não se pôde considerar sub-bacias importantes como a do Madeira e a do Tapajós, que possuem significativo potencial hidroelétrico, pois os registros disponíveis ou apresentavam pouca representatividade em termos de percentual de área de drenagem ou

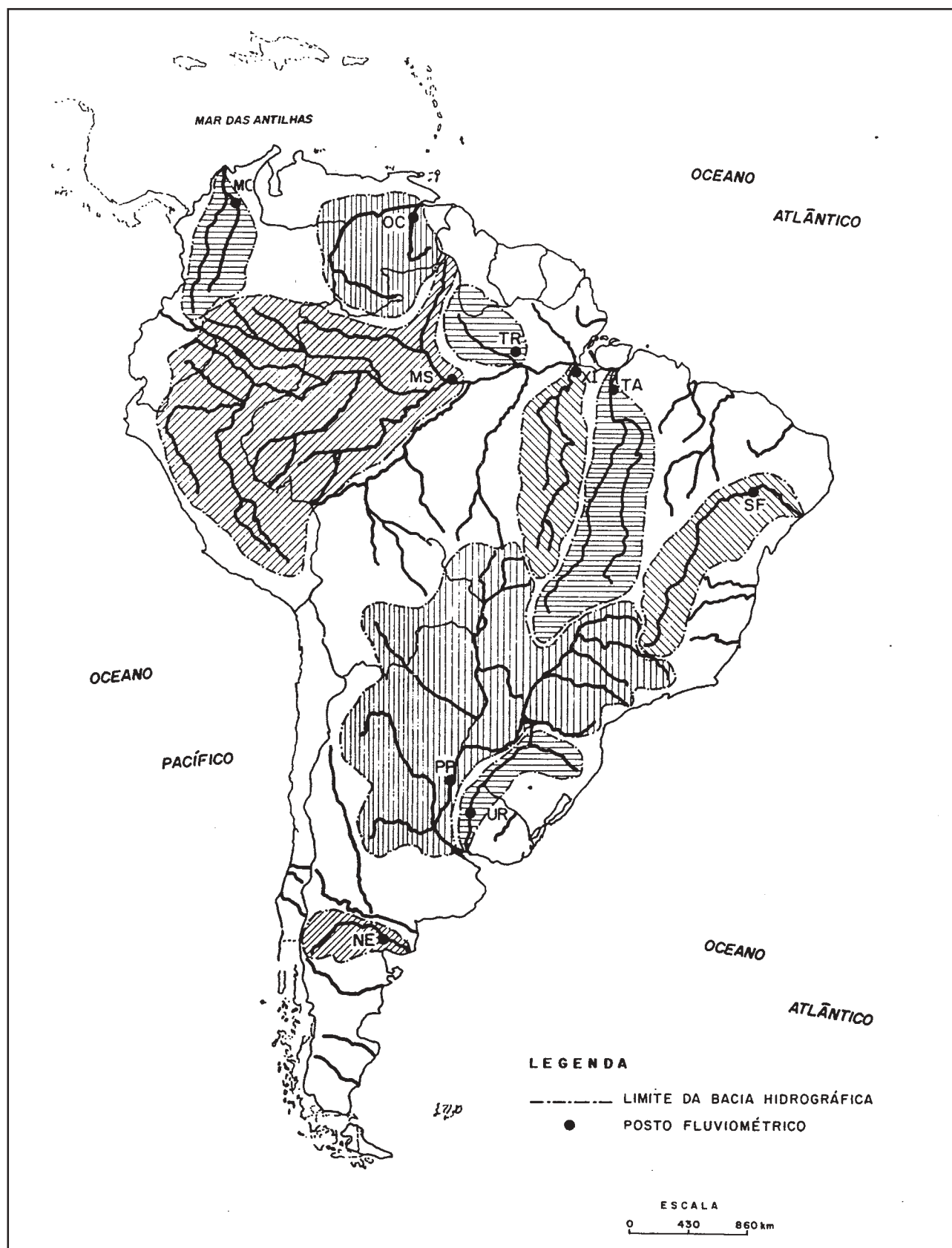


Figura 1. Bacias hidrográficas.

eram de má qualidade (registros curtos e com falhas de difícil preenchimento).

Para a bacia do Xingu, no registro de Belo Monte, os dados de 1969 a 1992 foram obtidos a partir do registro de medição feita em Altamira, posto este próximo a Belo Monte. Os dados de 1931 a 1968 haviam sido obtidos a partir de regressões com dados de precipitação. Maceira e Damázio, 1991, analisaram esta extensão do registro de Altamira e identificaram evidências que a estrutura de autocorrelação da série foi radicalmente modificada com esta extensão. Foram, então, calculados os coeficientes de autocorrelação lag-1 anual de vazões anuais de Belo Monte para a série realmente medida (1969 a 1992) e estendida (1931 a 1992), obtendo-se 0,15 e -0,02, o que confirma os resultados de Maceira e Damázio. Considerou-se, então, apenas os dados a partir de 1969.

Para as análises apresentadas a seguir, considerou-se as séries anuais correspondentes ao período de 1931 a 1992 (62 anos) à exceção dos postos de Puerto Berrio (1936 a 1992), Carhuachi (1950 a 1977 e 1979 a 1988), Manaus (1931 a 1966) e Belo Monte (1969 a 1992), conforme Tabela 2. Algumas falhas encontradas nos dados dos postos da Tabela 1 (dois meses em Puerto Berrio e um mês em Corrientes) foram preenchidas por regressão linear com dados de postos próximos. As falhas dos dados diários do posto de Manaus foram preenchidas interpolando-se níveis dos dias vizinhos.

Para verificar a estacionariedade dividiu-se cada série em duas sub-séries de comprimento igual e, aplicou-se um teste (Smirnov) de igualdade entre as distribuições de cada série. A Tabela 3 apresenta as estatísticas deste teste obtidas com estas séries. Pode-se notar o valor próximo do nível crítico de 5% da série da bacia do rio Negro, que apresenta uma leve tendência à redução das vazões com o tempo.

Principais estatísticas - A Tabela 4 apresenta as principais estatísticas das séries utilizadas, onde chama a atenção o reduzido número de anos da série da bacia do Xingu.

Pode-se notar o baixo coeficiente de variação da série de cotas da bacia Marañon-Solimões, posto Manaus, o que era esperado, tendo em vista a concavidade usualmente apresentada por curvas-chaves de seções naturais. Pode-se notar também, a assimetria da série do Paraná-Paraguai causada pelo ano atipicamente chuvoso de 1983.

COMPLEMENTARIEDADE HIDROLÓGICA ANUAL

Índices de complementariedade hidrológica

Suponha que se deseje estudar o grau de complementariedade hidrológica de duas bacias, i e j , e estejam disponíveis as séries hidrológicas de vazões anuais afluentes às duas bacias durante os anos 1 a T , $Q_i = \{q_i(t), t=1, \dots, T\}$ e $Q_j = \{q_j(t), t=1, \dots, T\}$.

Correlação cruzada lag-0 - O grau de complementariedade hidrológica entre duas bacias hidrográficas depende da estrutura de dependência cruzada entre as séries das duas bacias. A caracterização completa da estrutura de dependência entre as séries Q_i e Q_j pode ser feita através do cálculo da função de correlação cruzada, dada por:

$$r_{i,j}(k) = \text{corr}[q_i(t), q_j(t-k)], \\ k = -m, -m+1, \dots, -1, 0, 1, \dots, m-1, m \quad (1)$$

A correlação cruzada lag-0, $r_{i,j}(0)$, é o índice mais simples para a avaliação da complementariedade hidrológica entre as séries Q_i e Q_j .

Pode-se dizer que não existe complementariedade hidrológica entre duas bacias quando as suas vazões são perfeita e positivamente correlacionadas, $r_{i,j}=1$; a complementariedade hidrológica é bastante fraca quando $r_{i,j}(0)$ está próximo de 1 (caso de bacias muito próximas), mas se intensifica a medida que se reduz a dependência positiva entre as duas séries (bacias cada vez mais afastadas), atingindo-se a complementariedade máxima quando $r_{i,j}(0)$

Tabela 2. Período utilizado.

Bacia	Posto	Período utilizado						
		30	40	50	60	70	80	90
MC	Puerto Berrio		36					92
OC	Carhuachi			50			77 79	88
MS	Manaus	31				66		
TR	Cach. Porteira 1	31						92
XI	Belo Monte					69		92
TA	Tucuruí	31						92
SF	Sobradinho	31						92
PP	Corrientes	31						92
UR	Salto Grande	31						92
NE	Angostura	31						92

Tabela 3. Teste de estacionariedade; séries anuais.

MC	OC	MS	TR	XI	TA	SF	PP	UR	NE
0,874	0,365	0,667	0,762	0,816	0,635	0,508	1,143	1,143	1,397

Valores críticos: 5% → 1,628; 2,5% → 1,478; 1% → 1,224

Tabela 4. Principais estatísticas.

Bacia	Média (mm/ano)	Coeficiente de variação	Coeficiente de assimetria	$\rho(1)$	n (anos)
MC	1027,08	0,15	0,31	0,20	57
OC	1583,93	0,16	0,00	0,18	38
MS	1.568*	0,01	-0,14	0,23	36
TR	1124,01	0,32	-0,13	0,31	62
XI	587,90	0,20	0,24	0,15	24
TA	464,85	0,26	0,66	0,32	62
SF	177,19	0,27	0,91	0,37	62
PP	275,01	0,26	1,80	0,37	62
UR	603,45	0,39	0,50	0,18	62
NE	281,18	0,27	-0,07	0,27	62

* metros

torna-se nulo (grandes distâncias entre bacias).

Especula-se que, dada a existência de teleconexões meteorológicas, pode-se obter valores negativos para $r_{i,j}(0)$ se considerarmos bacias localizadas em regiões específicas, em geral muito distantes entre si. Vazões anuais negativamente correlacionadas apresentam um nível de complementariedade hidrológica superior ao obtido na situação de independência. Quanto mais forte for esta

dependência negativa maior o nível de complementariedade hidrológica (um teste de significância estatística de um valor negativo de $r_{i,j}(0)$ é portanto um teste da existência de um adicional de complementariedade), atingindo-se a complementariedade perfeita para $r_{i,j}(0)=-1$.

Frequência relativa de anos com complementariedade – O grau de complementariedade hidrológica entre duas

bacias hidrográficas depende da frequência relativa de ocorrência de coincidência cronológica entre estiagens em uma bacia e períodos mais molhados em outra obtida por:

$$f_{C_{i,j}} = \frac{\sum_t I(q_i(t) - \mu_i, q_j(t) - \mu_j)}{T} \quad (2)$$

onde $I(a,b) = 1$ se $a.b < 0$; $I(a,b) = 0$ se $a.b > 0$; T número de anos com observações conjuntas.

Valores de $r_{i,j}(0)$ próximos de 1,0 correspondem à frequências relativas de anos com complementariedade aproximadamente nulas. Para bacias independentes, ($r_{i,j}(0) = 0$), o valor da frequência relativa de anos com complementariedade atinge 0,5, crescendo até o valor 1,0 a medida que $r_{i,j}(0)$ torna-se negativa.

Fração evitada do déficit – Uma análise de complementariedade hidrológica pode ser feita de maneira mais prática se considerarmos apenas as situações de estiagem em alguma das bacias analisadas. Nesta situação se existir abundância de afluência em outra, em tese uma transferência de suas afluências para a bacia em situação de estiagem pode acontecer.

Seja D_i a demanda de água na bacia i definida por:

$$D_i = \mu_i - \alpha \sigma_i \quad (3)$$

onde μ_i e σ_i , são, respectivamente, a média e o desvio padrão das afluências da bacia i e α e o grau padronizado de utilização dos recursos hídricos na própria bacia. Define-se para cada ano t :

Excesso na bacia i :

$$exc_i(t) = \text{Max}[q_i^*(t) - \alpha, 0] \quad (4)$$

Déficit na bacia i :

$$def_i(t) = \text{Max}[\alpha - q_i^*(t), 0] \quad (5)$$

onde $q_i^*(t)$ é a vazão padronizada dada por:

$$q_i^*(t) = (q_i(t) - \mu_i) \sigma_i^{-1} \quad (6)$$

Transferência entre bacias i e j :

$$\text{transf}_{i,j}(t) = \text{Min}[def_j(t), exc_i(t)] - \text{Min}[def_i(t), exc_j(t)] \quad (7)$$

Quando $\text{transf}_{i,j}(t)$ for positivo, i transfere para j ; quando negativo, j transfere para i .

Fração evitada do déficit:

$$\text{compl}_{i,j}(t) = |\text{transf}_{i,j}(t)| / (def_i(t) + def_j(t)) \quad (8)$$

Um índice de complementariedade hidrológica é dado pela mediana dos valores de $\text{compl}_{i,j}(t)$. Este índice alcançará o seu valor máximo, 1, se $r_{i,j}(0) = -1$ e o seu valor mínimo, zero, se $r_{i,j} = 1$.

Complementação hidrológica defasada no tempo

- Em princípio existe sempre a possibilidade de que teleconexões meteorológicas atuem nas bacias com uma certa defasagem no tempo, o que se refletiria na função de correlação cruzada anual que passaria a apresentar o pico de correlação negativa em um lag diferente de zero.

A complementariedade defasada no tempo também pode ser aproveitada já que normalmente, em bacias de interesse energético, existem construídos (ou projetados) diversos reservatórios com capacidade de regularização plurianual.

O grau de complementariedade hidrológica defasada no tempo entre duas séries que sofram com defasagem no tempo os efeitos de teleconexões meteorológicas pode ser avaliado através do cálculo da correlação cruzada lag-1 ou da fração evitada do déficit de séries de afluências bianuais ou trianuais.

Obtenção dos índices de complementariedade hidrológica anual

Correlação cruzada lag-0 - A Tabela 5 apresenta os valores de correlação cruzada lag-0 entre as séries utilizadas.

Tabela 5. Coeficientes de correlação cruzada lag-0; séries anuais.

bacia	MC	OC	MS	TR	XI	TA	SF	PP	UR	NE
MC	1,00									
OC	0,54	1,00								
MS	0,35	0,42	1,00							
TR	0,56	0,12	0,20	1,00						
XI	-0,16	-0,57	-	0,09	1,00					
TA	-0,26	-0,26	-0,28	-0,23	0,71	1,00				
SF	-0,30	-0,18	-0,27	-0,20	0,21	0,62	1,00			
PP	-0,32	-0,23	-0,22	-0,45	0,09	0,26	0,33	1,00		
UR	-0,31	-0,15	-0,09	-0,42	-0,19	-0,09	-0,12	0,58	1,00	
NE	-0,17	-0,10	0,06	-0,23	-0,03	0,01	0,10	-0,08	-0,02	1,00

Observando-se a Tabela 5, nota-se que, desconsiderando-se a bacia do Negro que apresenta uma situação especial, existe uma clara divisão das bacias restantes em dois grupos: o grupo norte, formado pelas bacias de Magdalena-Cauca, Orinoco-Caroni, Maraón-Solimões e Trombetas e, o grupo sul, formado pelas bacias do Xingu, Tocantins-Araguaia, São Francisco, Paraná-Paraguai e Uruguai.

Se analisarmos apenas as correlações entre bacias pertencentes a um mesmo grupo, qualquer que seja ele, podemos verificar, em geral, o comportamento clássico: valores fortemente positivos para bacias mais próximas entre si, e valores decrescentes, tendendo a zero, para bacias mais distantes entre si, apenas verificando-se correlações levemente negativas entre a bacia extremo-sul do grupo sul, bacia do Uruguai, e as bacias mais ao norte do mesmo grupo, bacias do Xingu, Tocantins-Araguaia e São Francisco (ver Figura 2).

Já as correlações cruzadas entre bacias de grupos distintos apresentam o comportamento tipicamente induzido por teleconexões meteorológicas sugerido anteriormente com correlações negativas e independentes da distância (ver Figura 3). A única exceção é a correlação levemente positiva entre o Xingu e o Trombetas.

Em relação à bacia do Negro, ela não foi incluída no grupo sul por não apresentar

correlação claramente positiva com nenhuma das bacias deste grupo, apesar das correlações cruzadas dela com as bacias do grupo norte serem negativas, ainda que levemente. Na realidade, pode-se dizer que as correlações cruzadas desta bacia indicam que esta se situa numa posição mais independente em relação a todas as outras bacias incluídas no estudo (ver Figura 4), o que indica algum grau de complementariedade hidrológica entre esta bacia e as demais.

Correlação cruzada lag-1 - A Tabela 6 apresenta os valores de correlação cruzada lag-1 entre as séries utilizadas.

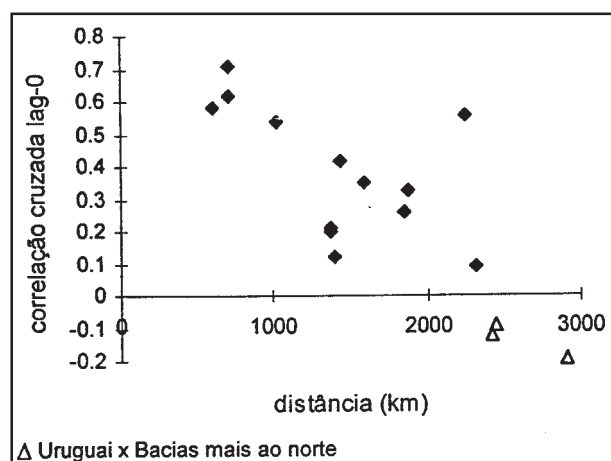


Figura 2. Correlações cruzadas lag-0 intragrupos; distância entre centros de gravidade das bacias.

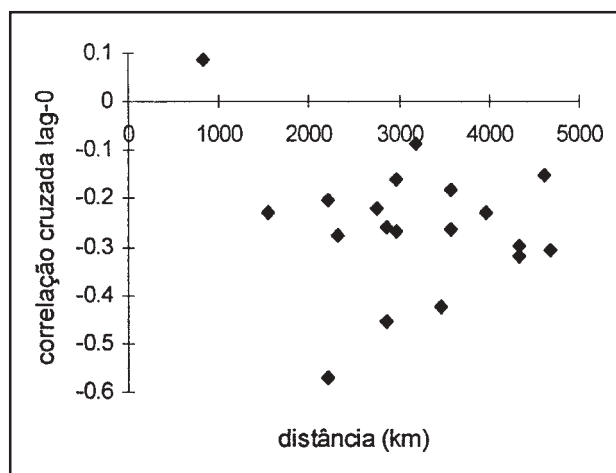


Figura 3. Correlações cruzadas lag-0 intergrupos.

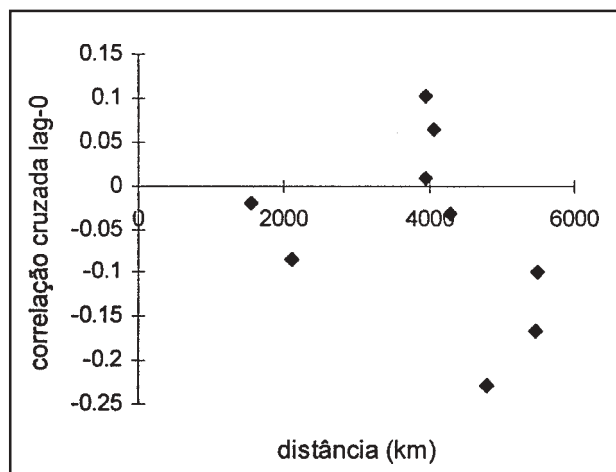


Figura 4. Correlações cruzadas lag-0; bacia do Negro.

Pode-se notar que as correlações cruzadas lag-1 entre bacias somente do grupo norte ou entre bacias somente do grupo sul se apresentam nulas ou menos positivas que as correspondentes correlações cruzadas lag-0.

Para bacias de grupos distintos as correlações cruzadas lag-1 são, em geral, nulas ou menos negativas que as lag-0. Por outro lado, pode-se notar, as correlações cruzadas fortemente negativas no caso das bacias mais ao norte do grupo sul (Xingu e Tocantins-Araguaia) com as bacias Magdalena-Cauca, Marañon-Solimões e Trombetas que chegam a ser mais negativas que as correspondentes correlações cruzadas lag-0, à exceção do caso do par Marañon-Solimões/Tocantins-Araguaia. Isto indica complementariedades hidrológicas adicionais

entre estas bacias se considerarmos séries bianuais. Vale notar que a correlação cruzada lag-0 entre as bacias do Xingu e do Trombetas é levemente positiva (ver Tabela 6), tendo se obtido uma correlação cruzada lag-1 entre estas bacias bastante negativa.

Frequência relativa de anos com complementariedade

A Tabela 7 apresenta os valores da frequência relativa aos anos com complementariedade obtidos para cada par de bacias. Pode-se observar valores superiores a 0,5 para pares de bacias de grupos distintos (norte/sul), valores em torno de 0,5 entre a bacia do rio Negro e as demais e valores inferiores a 0,5 para pares de bacia de mesmo grupo.

Fração evitada do déficit

A Tabela 8 apresenta os valores de fração evitada do déficit, com $\alpha = 0$, obtidos para cada par de bacia. Para os pares formados pelas bacias Magdalena-Cauca, Marañon-Solimões e Trombetas do grupo norte e a bacia do Xingu ou a do Tocantins-Araguaia, a Tabela 8 também apresenta a fração evitada do déficit obtida com séries bianuais, que conforme esperado, são superiores às correspondentes frações evitadas do déficit obtidas com séries anuais.

Em geral, os valores seguem as tendências apresentadas pelos coeficientes de correlação cruzada, notando-se altos índices de fração evitada do déficit entre bacias de grupos distintos (norte/sul, Negro/outras). O índice nulo de fração evitada do déficit entre as bacias Orinoco-Caroni e São Francisco já era esperado, tendo em vista a fraca correlação negativa apresentada por estas duas bacias (ver Tabela 5).

Chama a atenção os altos índices de fração evitada do déficit obtidos para os pares de bacias Xingu/Paraná-Paraguai, Xingu/Uruguai e São Francisco/Uruguai, muito embora os coeficientes de correlação cruzada lag-0 não sugerissem estes valores. Deve-se, no entanto, lembrar que no cálculo deste índice onde não se consideram os anos nos quais as duas bacias se apresentam em excesso, no caso destes pares de bacias, é relativamente alto.

Tabela 6. Coeficientes de correlação cruzada lag-1; séries anuais.

bacia	MC	OC	MS	TR	XI	TA	SF	PP	UR	NE
MC	0,20	0,02	0,23	0,31	-0,06	-0,11	-0,18	0,01	-0,03	-0,17
OC	0,12	0,18	-0,08	0,14	-0,04	0,22	0,22	0,12	-0,08	-0,27
MS	0,23	0,29	0,23	0,17	-	0,12	-0,08	-0,08	0,02	0,05
TR	-0,04	0,00	0,13	0,31	-0,34	-0,24	-0,09	-0,06	0,02	-0,23
XI	-0,33	-0,33	-	-0,33	0,15	0,26	0,29	0,39	0,16	0,08
TA	-0,22	-0,09	-0,26	-0,32	0,08	0,32	0,29	0,20	0,04	0,18
SF	-0,03	-0,04	-0,17	-0,21	-0,04	0,06	0,37	0,18	0,01	0,29
PP	-0,11	-0,10	0,01	-0,38	0,25	0,08	-0,02	0,37	0,30	-0,13
UR	-0,01	-0,01	0,08	-0,26	0,15	0,02	-0,14	0,10	0,18	-0,22
NE	-0,02	0,04	-0,13	-0,20	-0,003	0,00	0,19	0,01	-0,04	0,27

Tabela 7. Frequência relativa aos anos com complementariedade.

bacia	MC	OC	MS	TR	XI	TA	SF	PP	UR	NE
MC	0,00									
OC	0,29	0,00								
MS	0,29	0,41	0,00							
TR	0,37	0,39	0,33	0,00						
XI	0,54	0,53	-	0,46	0,00					
TA	0,56	0,63	0,53	0,63	0,25	0,00				
SF	0,53	0,47	0,53	0,60	0,50	0,29	0,00			
PP	0,61	0,58	0,56	0,73	0,50	0,32	0,42	0,00		
UR	0,68	0,55	0,58	0,60	0,54	0,48	0,55	0,35	0,00	
NE	0,56	0,47	0,53	0,55	0,54	0,56	0,53	0,53	0,47	0,00

Tabela 8. Fração evitada do déficit; séries anuais; $\alpha = 0$

bacia	MC	OC	MS	TR	XI	TA	SF	PP	UR	NE
MC	0,00									
OC	0,00	0,00								
MS	0,00	0,06	0,00							
TR	0,10	0,19	0,00	0,00						
XI	0,25 (0,35)	0,73	-	0,25 (0,31)	0,00					
TA	0,32 (0,71)	0,23	0,14 (0,63)	0,43 (0,55)	0,00	0,00				
SF	0,47	0,22	0,35	0,47	0,04	0,00	0,00			
PP	0,40	0,43	0,56	0,55	0,41	0,00	0,04	0,00		
UR	0,51	0,52	0,26	0,69	1,00	0,16	0,31	0,00	0,00	
NE	0,37	0,39	0,42	0,50	0,18	0,32	0,35	0,31	0,27	0,00

Entre parênteses valores para séries bianuais

Testes de significância - Para verificar a significância estatística das complementariedades hidrológicas anuais, identificadas no item anterior, entre bacias do rio Negro e bacias do grupo norte, foi desenvolvido um teste baseado em resultados de um experimento de Monte Carlo onde foram gerados 1000 conjuntos de séries anuais de 62 anos. Em cada série foram mantidas as ausências de observação dos registros históricos conforme Tabela 2.

As séries de cada posto foram geradas independentemente das séries dos demais postos. Foi incluída uma persistência temporal através de um modelo autorregressivo de ordem um especificado pelos coeficientes de autocorrelação lag-1 da Tabela 4. Para a distribuição marginal, utilizou-se a distribuição normal. Em cada conjunto gerado foram calculados os coeficientes de correlação cruzada lag-0 entre todos os pares de séries.

A Tabela 9 apresenta para cada par de bacias as frequências de correlações cruzadas lag-0 sintéticas maiores que as correspondentes históricas indicando, em geral, o alto grau de significância estatística dos valores históricos intergrupos entre as bacias do grupo norte e grupo sul. Quanto a bacia do Negro, os resultados corroboram as hipóteses de independência desta bacia em relação às bacias do grupo sul e de uma leve correlação cruzada lag-0 negativa com as bacias do grupo norte.

INFLUÊNCIAS MACRO-METEOROLÓGICAS

O significativo grau de complementariedade hidrológica anual identificado nos itens anteriores entre as bacias do grupo norte e do grupo sul e, entre a bacia do Negro e as outras bacias, pode ser explicado pela existência de teleconexões meteorológicas na América do Sul relacionadas com uma oscilação plurianual da circulação geral da atmosfera no Pacífico conhecida como ENOS (El Niño-Oscilação Sul).

O fenômeno do El Niño se manifesta através de um aquecimento da superfície do mar no Pacífico junto à costa da América Latina. Esta situação ocorre em decorrência de um enfraquecimento dos ventos alísios que dificulta o transporte das águas superficiais do Pacífico na direção oeste. Por outro lado, quando ao contrário, existe um fortalecimento dos alísios, este transporte é facilitado, ocorrendo ressurgências de águas profundas na costa oeste da América Latina, que vão provocar o resfriamento da temperatura da superfície do mar nesta região (Molion e Moraes, 1987). A oscilação entre estas duas situações é feita com uma periodicidade irregular, que nos últimos 40 anos, flutuou entre 3 e 7 anos (Bocanegra e Caicedo, 1992). A monitoração das condições da oscilação ENOS pode ser feita através de medidas no Pacífico de temperatura da superfície do mar, de velocidade do vento à superfície, ou de nível médio do mar; ou ainda, através das diferenças de pressão entre a ilha de Tahiti (Polinésia Francesa) e a localidade de Darwin (Austrália).

A Figura 5 ilustra os esquemas de circulação geral da atmosfera durante as duas fases da ENOS de acordo com Molion e Moraes, 1987. Durante a fase anti-El Niño da ENOS (como, por exemplo, o ano de 1975) existe um aumento da atividade convectiva ao norte da América Latina, cujos rios apresentam então vazões acima da média. Com o aumento dos movimentos ascendentes ao norte, se intensifica o ramo descendente da célula de Hadley produzindo alta pressão sobre as bacias do sudeste do continente, que passam então, por um período mais seco. Ao contrário, na fase El Niño, movimentos de ar descendentes sobre o norte do continente reduzem as chuvas nesta região. As altas pressões atmosféricas que se instalam então na Amazônia, bloqueiam a propagação das frentes polares vindas do sul que tendem a estacionarem sobre as bacias ao sul do continente provocando chuvas extensas e prolongadas. Um exemplo espetacular da fase El Niño foi o ano de 1983.

Estavam disponíveis para este estudo quatro séries mensais entre os anos de 1951 e 1992 relacionadas com a oscilação ENOS:

Tabela 9. Frequência de correlações cruzadas lag-0 cintéticas maiores que as correspondentes históricas.

bacia	MC	OC	MS	TR	XI	TA	SF	PP	UR	NE
MC	0,00									
OC	0,00	0,00								
MS	0,04	0,05	0,00							
TR	0,00	0,26	0,14	0,00						
XI	0,75	0,99	-	0,35	0,00					
TA	0,98	0,94	0,95	0,95	0,00	0,00				
SF	0,98	0,86	0,94	0,92	0,18	0,00	0,00			
PP	0,98	0,91	0,90	1,00	0,35	0,03	0,02	0,00		
UR	0,99	0,80	0,67	1,00	0,82	0,74	0,81	0,00	0,00	
NE	0,87	0,72	0,34	0,95	0,54	0,44	0,24	0,72	0,55	0,00

temperaturas na superfície do mar nas regiões Niño-1+2 (90°W ao continente, 0° a 10°5'S), Niño-3 a 90°W, 0° a 5°5'N) e Niño-4 (180°W a 150°W, 0° a 5°5'N) e diferenças de pressão entre a ilha de Tahiti e Danwin. Os resultados obtidos com os quatro tipos de série foram similares e só apresentamos a seguir os resultados com a série de temperaturas na superfície do mar Niño-4.

A Tabela 10 apresenta as correlações cruzadas lag-0 entre as séries anuais de vazões das bacias analisadas e a série de médias anuais de anomalias mensais entre 1951 e 1992 da temperatura da superfície do mar na região Niño-4, podendo-se notar os valores negativos para as bacias do grupo norte e positivos para as bacias ao sul do continente, o que era esperado, tendo em vista a descrição acima da circulação geral da atmosfera sobre a América do Sul durante as duas fases da oscilação ENOS.

A seguir, os anos entre 1951 e 1992 foram classificados em anos com temperaturas na região Niño-4 mais altas (El Niño) ou mais baixas (anti-El Niño) que a normal. Para cada par de bacias, classificou-se os mesmos anos conforme a situação da vazão de cada bacia (acima ou abaixo da média).

Em geral, observou-se que as bacias do grupo norte acompanham com bastante fidelidade as fases da oscilação ENOS, ou seja, nos anos de El Niño apresentam vazões

baixas e, nos anos anti-El Niño, vazões altas. Já as bacias do grupo sul tem o comportamento influenciado pela oscilação ENOS aparentemente apenas na fase anti-El Niño, quando geralmente apresentam-se sob estiagem. Na fase El Niño, estas bacias tanto podem apresentar-se sob estiagem ou sob cheia. Este fenômeno faz com que se observe uma maior frequência de anos com complementariedades a aproveitar na situação clássica da fase anti-El Niño (abundância hídrica ao norte do continente e estiagem ao sul). Um exemplo são as Tabelas 11, 12 e 13 correspondentes as bacias Magdalena-Cauca e São Francisco.

CONCLUSÕES

As recentes comprovações da existência de teleconexões meteorológicas atuantes no continente sul-americano relacionadas com o fenômeno do El Niño, levantam a possibilidade de existência de complementariedades hidrológicas anuais que favorecem à interconexão de sistemas elétricos do continente. Com o objetivo de investigar esta possibilidade, foram consideradas séries anuais fluviométricas referentes a dez importantes bacias da América do Sul: Magdalena-Cauca, Orinoco-Caroni, Marañon-Solimões, Trombetas, Xingu, Tocantins-Araguaia, São Francisco, Paraná-Paraguai, Uruguai e Negro.

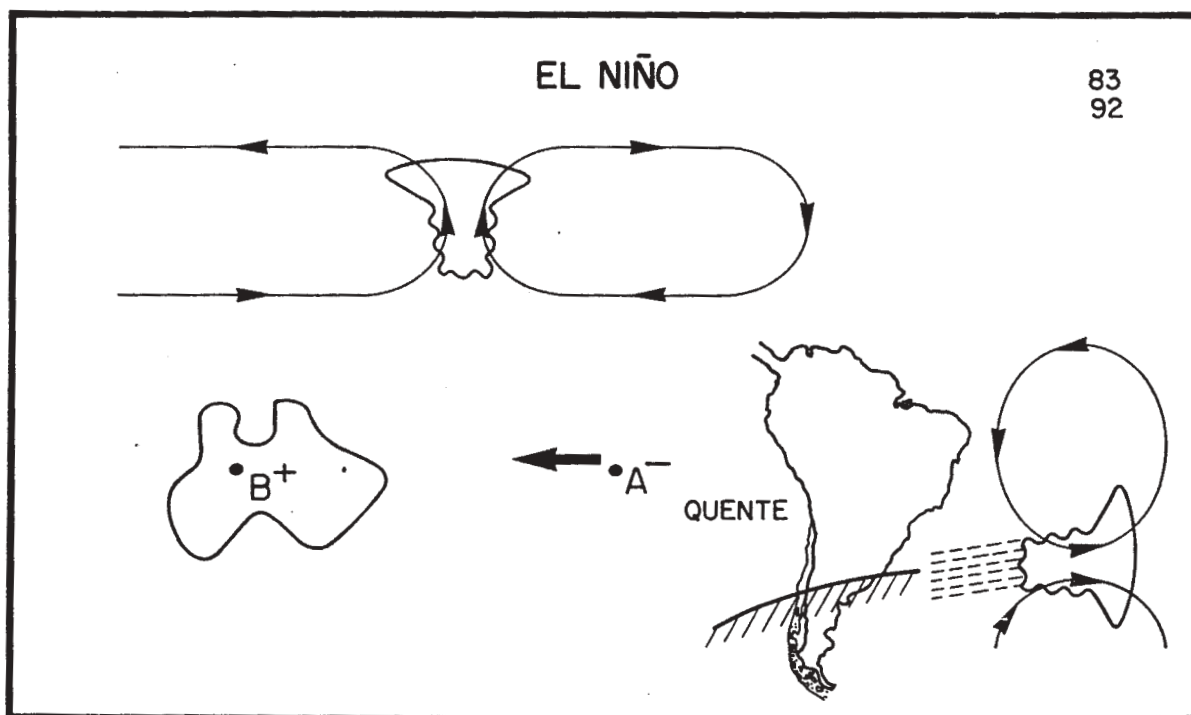
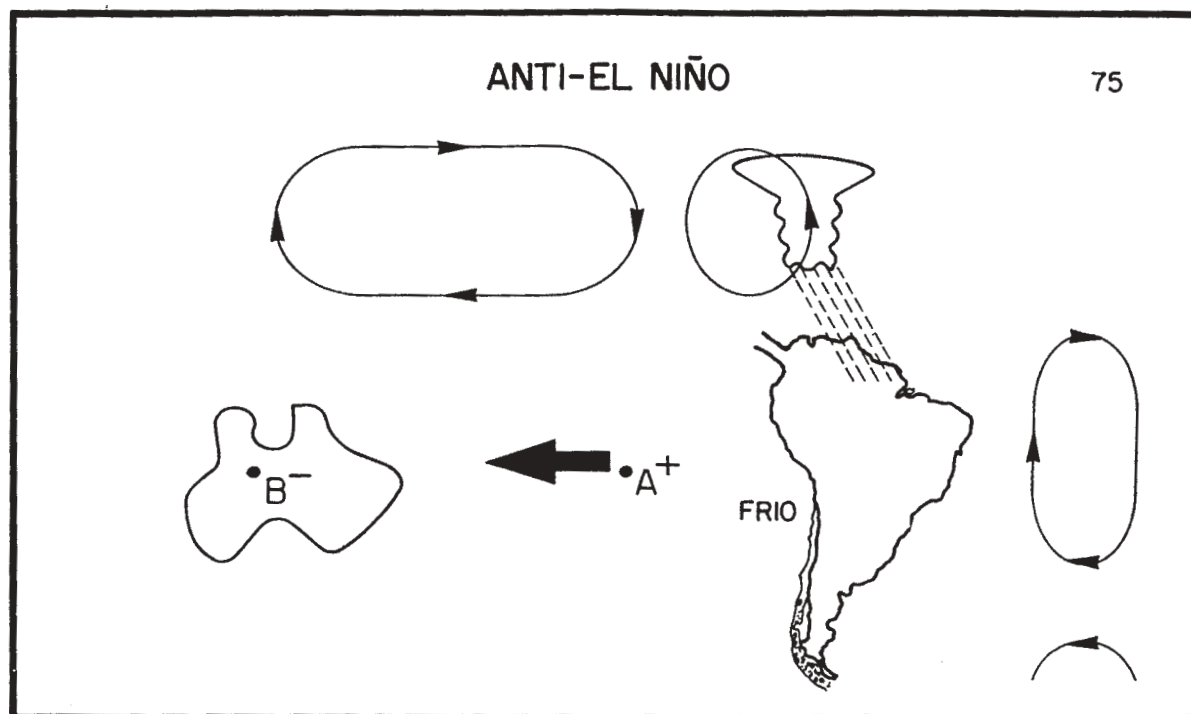


Figura 5. Circulação geral da atmosfera nas duas fases da ENOS.

Tabela 10. Correlações cruzadas lag-0 entre séries anuais de vazões e de médias anuais de anomalias mensais de temperatura da superfície do mar no Pacífico na região Niño-4.

MC	OC	MS	TR	XI	TA	SF	PP	UR	NE
-0,73	-0,21	-0,26	-0,45	-0,09	0,20	0,34	0,30	0,29	0,24

Tabela 11. Tabela de contingência; temperatura da superfície do mar na região Niño-4; $\chi^2 = 16,11$, nível de significância = 0,006%.

Situação Magdalena-Cauca	Temperatura		Total
	alta (El Niño)	baixa (anti-El Niño)	
seca	19	3	22
cheia	5	15	20
Total	24	18	42

Tabela 12. Tabela de contingência; temperatura da superfície do mar na região Niño-4; $\chi^2 = 2,50$, nível de significância = 10,7%.

Situação São Francisco	Temperatura		Total
	alta (El Niño)	baixa (anti-El Niño)	
seca	13	14	27
cheia	11	4	15
Total	24	18	42

Tabela 13. Tabela de contingência; temperatura da superfície do mar na região Niño-4; $\chi^2 = 16,82$, nível de significância = 0,071%.

Situação Magdalena-Cauca/São Francisco	Temperatura		Total
	alta (El Niño)	baixa (anti-El Niño)	
seca/cheia	9	1	10
seca/seca	10	2	12
cheia/cheia	2	3	5
cheia/seca	3	12	15
Total	24	18	42

Por insuficiência de dados, não se pôde considerar sub-bacias importantes como a do Madeira e a do Tapajós, que possuem significativo potencial hidrelétrico. Pela mesma razão, os dados utilizados para representar a bacia Magdalena-Cauca corresponderam somente ao rio Magdalena e, para representar a bacia Orinoco-Caroni, corresponderam somente ao rio Caroni. Outras limitações dos dados utilizados são as deficiências do preenchimento no período de 1931 a 1968 do posto de Belo Monte (Xingu) que obrigou que se descartasse todo este período; a ausência

de dados do registro de Manaus (Marañon-Solimões) após 1966; além das séries macro-meteorológicas relacionadas com a oscilação ENOS disponíveis para este estudo não abranger período anterior a 1951.

A análise permitiu agrupar as bacias num grupo ao norte (Magdalena-Cauca, Orinoco-Caroni, Marañon-Solimões e Trombetas) e num grupo ao sul (Xingu, Tocantins-Araguaia, São Francisco, Paraná-Paraguai e Uruguai). Durante os anos anti-El Niño, as bacias do grupo sul apresentam vazões baixas, enquanto que as bacias do

grupo norte, apresentam altas disponibilidades hídricas. Já nos anos El Niño, as bacias do grupo norte se apresentam secas enquanto que as bacias do grupo sul podem apresentar uma maior disponibilidade hídrica. A bacia do rio Negro parece sofrer os efeitos da oscilação ENOS de forma menos intensa.

Este fenômeno cria oportunidades de interligação entre o sistema de geração colombiano da bacia Magdalena-Cauca com o sistema brasileiro Tocantins-Araguaia e entre o sistema venezuelano Orinoco-Caroni com os brasileiros Xingu e Tocantins-Araguaia e, através destes, com os sistemas do São Francisco, do Paraná-Paraguai e do Uruguai. Estes últimos sistemas, apesar de não apresentarem entre si altos graus de complementariedades anuais, tendem a se interligar para aproveitar a complementariedade dos regimes sazonais das bacias do Uruguai com os regimes sazonais das bacias Paraná-Paraguai e São Francisco, identificada em IEE, 1992.

Para uma melhor avaliação das vantagens das oportunidades identificadas para intercâmbios energéticos norte-sul continental, recomenda-se uma segunda etapa desta investigação com ênfase nos aspectos energéticos.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto de pesquisa PON-1288 do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL – contratado pela Comisión de Integración Eléctric Regional – CIER.

REFERÊNCIAS

- BOCANEGRA, J. E. M.; CAICEDO, J. D. P. (1992). *Características Climáticas Relevantes Durante la Ocurrencia de Fenómenos ENOS en el Nor-Occidente Sudamericano*. Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras (HIMAT), Santafe de Bogotá, D.C.
- DAMÁZIO, J. M.; COSTA, F. S.; GHIRARDI, A. O. (1995). *Análise de Complementariedades Hidrológicas a Nível Continental na América do Sul*. CEPEL/CIER. Relatório Técnico CEPEL n. 857/95, Publicação CIER, Ano V, n. 16
- IEE. (1992). *Estudio Prospectivo de la Demanda y Oferta de Energía Eléctrica en el Mercosur*. Instituto de Economía Energética, Argentina, Julho.
- MACEIRA, M. E. P.; DAMÁZIO, J. M. (1991). *Analysis of the Streamflow Record Extension for the Xingu River at Babaquara*. In: *Water Management of the Amazon Basin*. UNESCO-PHI-UNEP-ABRH, Montevideo, Agosto.
- MOLION, L. C. B.; MORAES, J. C. (1987). *Oscilação Sul e Descarga de Rios na América do Sul Tropical*. Revista Brasileira de Engenharia, Caderno de Recursos Hídricos, v. 5, n. 1.

Hydrological Complementaries Analysis in South America

ABSTRACT

This paper presents the results of statistical analysis for identification of the complementarities caused by El Niño phenomenon in hydrological series of South America, meteorological teleconnections related to the interconnection of the electrical systems of the different countries of this continent.