

Implicação da oscilação El Niño sobre taxas de expansão de voçorocas em estações experimentais no sul do Brasil: 1995-1998

Marcelo Accioly Teixeira de Oliveira *

Resumo

Taxas de expansão de voçorocas foram estimadas a partir de experimentos de campo em três municípios dos estados do Paraná e Santa Catarina, no período entre os anos de 1995 e 1998. Esse período coincidiu com oscilação La Niña/El Niño, causando anomalias pluviométricas que influenciaram as taxas de erosão estimadas. Neste trabalho, discute-se o efeito de tal oscilação climática do hemisfério sul sobre o risco de taxas elevadas de erosão urbana e rural.

Palavras-chave: El Niño; Erosão; Experimentação.

Abstract

Gully erosion extension rates were obtained from field experimental sites, from 1995 to 1998, in the Southern Brazilian States of Paraná and Santa Catarina. By coincidence, this period was marked by the El Niño Southern Oscillation (ENSO), influencing local erosion rates. This paper discusses the effects of ENSO upon the risk of high erosion rates on rural and urban sites.

Key words: El Niño; Erosion; Experimentation.

* Doutor em Geografia, professor do Departamento de Geociências – CFH/UFSC (maroliv@cfh.ufsc.br).

Introdução

O episódio climático El Niño é tido como exemplo típico da interação entre o oceano e a atmosfera, associado a fenômenos de teleconexão cujos efeitos extrapolam a escala local ou regional, atingindo expressão global (DINGMAN, 1994). Na Região Sul do Brasil, o episódio é com frequência associado a precipitações importantes, constituindo anomalias pluviométricas significativas que podem ocasionar cheias nos rios e aceleração de processos erosivos nas encostas. Em geral, o fenômeno se estende por dois anos consecutivos, caracterizados por precipitações importantes (CPTEC, 1998; GRIMM et al., 2000).

No período entre os anos de 1995 e 1998 foi implementado nos estados de Santa Catarina e Paraná projeto de pesquisa voltado para o estudo da evolução de incisões erosivas em áreas de cabeceira de drenagem. O projeto tinha o objetivo de estimar taxas de erosão e de identificar os principais mecanismos em ação através de estações experimentais que foram paulatinamente instaladas em campo. Coincidentemente, a região Sul do Brasil foi influenciada por oscilação El Niño, durante o período de estudo.

Trabalhos recentes que discutem a natureza das forças envolvidas em mudanças climáticas globais têm colocado em evidência a associação entre períodos relativamente longos e recorrentes de episódios El Niño e o reaquecimento da atmosfera no hemisfério Sul (CLEMENT et al., 1999; TUDHOPE et al., 2001). Embora o processo permaneça ainda mal conhecido devido à complexidade dos mecanismos envolvidos (ADAMS et al., 2003), a sua influência sobre processos hidrológicos locais tem sido destacada (AALTO et al., 2003). No período em que foram implementados experimentos nas áreas estudadas por nosso projeto, foi possível constatar a influência de anomalias pluviométricas sobre os processos de erosão.

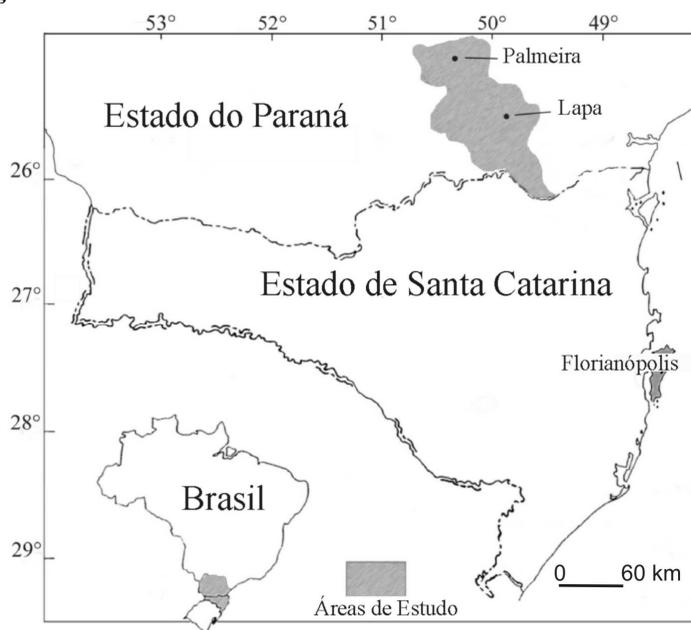
Neste trabalho é realizada, a título introdutório, breve análise temporal das precipitações associadas ao fenômeno El Niño/La Niña, destacando-se a identificação de períodos marcados por anomalias pluviométricas em série temporal de 78 anos. Tal análise

possibilitará reflexão sobre determinados períodos do ano em que podem ocorrer precipitações acima do normal, durante eventos El Niño. Em seguida são apresentados resultados de experimentos de campo realizados em voçorocas desconectadas e conectadas da rede hidrográfica (OLIVEIRA, 1990) nos estados de Santa Catarina e Paraná. Finalmente, através dos resultados obtidos será feita discussão da relação entre taxas de erosão e anomalias pluviométricas durante o período de monitoramento experimental.

Áreas estudadas

As áreas estudadas neste trabalho são estações experimentais situadas em localidades dos municípios paranaenses de Lapa e Palmeira e do município de Florianópolis, em Santa Catarina (Figura 1).

Figura 1: Áreas estudadas.



No Paraná, as áreas de estudo se localizam no Segundo Planalto Paranaense, uma das grandes unidades geomorfológicas do Estado, inseridos na chamada Depressão Periférica, cujo substrato é composto basicamente por sedimentos permo-carboníferos do grupo tubarão. A morfologia do terreno é dominada por colinas amplas, suavemente arredondadas, com vertentes convexas, intercaladas por mesetas estruturais preservadas nos arenitos mais resistentes à erosão. As altitudes predominantes se encontram entre 800 e 1100 metros. O clima é subtropical, com chuvas bem distribuídas durante o ano, com estações bem definidas, sendo classificado, segundo Köppen, como clima Cfb (mesotérmico, úmido o ano todo, com verões brandos) (CAMARGO, 1998). As médias de precipitação anual nas áreas onde foram instaladas as estações experimentais são de 1.575 mm para a Lapa e de 1.837 mm para Palmeira. As médias mensais oscilam entre 100 e 150 mm durante os meses mais quentes (de outubro a março) e em torno de 100 mm durante os meses mais frios (de abril a setembro).

Em Santa Catarina a área de estudo está situada na costa leste da Ilha de Santa Catarina, no município de Florianópolis. A estação experimental foi instalada em área degradada sobre duna de cavalgamento pleistocênica onde predominam areias quartzosas de origem eólica alternadas com paleossolos enterrados. Os sedimentos quaternários recobrem parcialmente granitos do Proterozóico Superior, da Suite Intrusiva Valsungana, intercalados com diques de diabásio, característicos dos morros que fazem parte da Unidade Geomorfológica Serras do Leste Catarinense. A altitude da área de estudo se situa em torno de 60 metros e o clima é caracterizado por temperaturas médias anuais em torno de 20,3°C, com amplitude de aproximadamente 8,0 graus anuais. A pluviosidade anual é de cerca de 1.600 mm, com chuvas mais intensas nos meses de verão e início da primavera (NASCIMENTO, 1998).

Métodos

A análise de séries temporais apresentada neste trabalho foi realizada no ano de 2000, após o encerramento do projeto no qual

estações experimentais foram usadas para o estudo da erosão por voçorocas, em Florianópolis e em dois municípios paranaenses. A análise foi norteada por estudo realizado pelo CPTEC-INPE relacionado à ocorrência de forte evento El Niño no ano de 1998 (CPTEC, 1998). Neste estudo, estão relacionados outros anos durante os quais o evento se manifestara de forma marcante. Esses anos, marcados por elevados totais pluviométricos acumulados, serviram de referência para a análise de dados pluviométricos a nossa disposição.

Inicialmente, foram selecionados em série temporal de 78 anos da estação de São José, anos nos quais, após somatório, foram constatados elevados totais pluviométricos acumulados. Os dados relativos aos anos selecionados foram então analisados em detalhe, através do cálculo de médias mensais e de desvios padrões, mensais e anuais. Em seguida, foram construídos gráficos de distribuição mensal dos desvios padrões, em milímetros acumulados de chuva, de modo a favorecer a observação de anomalias pluviométricas. Neste trabalho, a expressão “anomalia pluviométrica” se refere aos totais acumulados, superiores ou inferiores aos desvios padrões mensais da série, denominados, respectivamente, de anomalia positiva e anomalia negativa. Ainda no que toca ao vocabulário empregado, quando utilizamos o termo “voçoroca” estamos fazendo referência a incisões erosivas cuja profundidade seja superior a 0,5 metro, independente do tipo de escoamento que domine o trabalho erosivo.

Em seguida, foram calculadas taxas globais de erosão para diferentes períodos do monitoramento realizado nas três estações experimentais nas quais havia sido efetuado estudo de processos relacionados à erosão por voçorocas, no período entre 1995 e 1998. O período desse monitoramento de cunho experimental da erosão coincidiu com período de oscilação La Niña/El Niño no Sul do Brasil, possibilitando a estimativa de taxas de erosão variável durante o período. As taxas foram calculadas através de procedimentos diversos, publicados em trabalhos anteriores, aos quais será feita referência neste trabalho.

Precipitações associadas ao El Niño no Sul do Brasil: estudo de caso

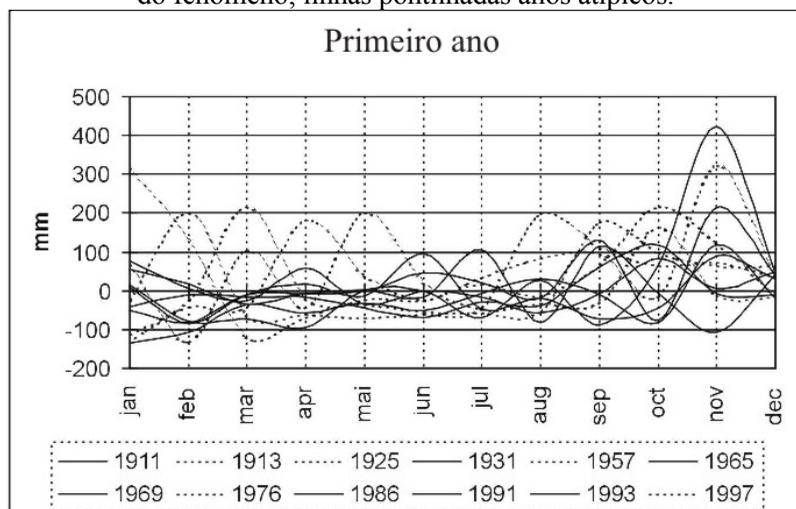
Efetuiu-se análise detalhada da precipitação nas áreas de estudo, tomando-se como exemplos base de dados da estação de São José (SC), da qual utilizamos série temporal de 78 anos, de 1911 a 1997, e base de dados da estação de Porto Amazonas (PR) com série temporal de 56 anos, de 1940 a 1997. As duas séries apresentam boa coincidência no que diz respeito ao padrão de distribuição geral de anomalias pluviométricas, acusando coeficiente de correlação de 0,58, quando comparados períodos equivalentes. O mesmo pode ser afirmado no que diz respeito ao número de anomalias pluviométricas positivas a partir de 1940. Neste trabalho analisaremos a série temporal mais longa, obtida a partir dos dados da estação de São José (SC).

Inicialmente, foram selecionados na referida série temporal todos os anos que apresentaram totais pluviométricos anormalmente elevados, ou seja, cujo total pluviométrico ultrapassou o desvio padrão, em milímetros de chuva, da série observada, cujo valor é de aproximadamente 300 milímetros. A análise detalhada dos totais acumulados durante esses anos permitiu caracterizar anos anormalmente chuvosos que, posteriormente, foram comparados com anos durante os quais a influência do fenômeno El Niño havia sido reconhecida (CPTEC, 1998). Desta forma, foi possível identificar 12 anos com características similares às que são reconhecidas como as do primeiro ano de atuação do El Niño e 17 anos com características similares às do segundo ano de El Niño. A falta de coincidência numérica entre as duas séries seria explicada pela variabilidade característica dos fenômenos meteorológicos, cuja análise está além do objeto deste estudo.

A análise realizada centrou-se inicialmente na identificação de anomalias pluviométricas mensais, caracterizadas por totais superiores ao desvio padrão obtido para os diferentes meses do ano da série temporal estudada. Os valores de desvio padrão mensal variam de 50 a 90 mm, de acordo com o mês em pauta. A

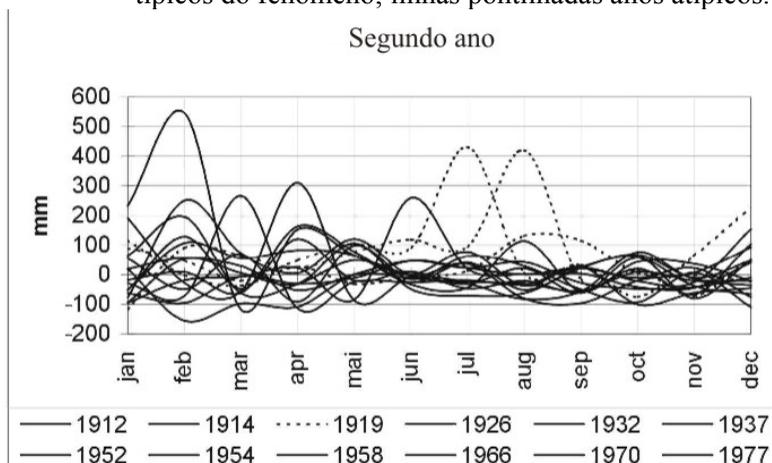
representação gráfica da variação dessas anomalias pluviométricas anuais, para os anos selecionados, tende a confirmar o padrão geral atribuído ao fenômeno El Niño (Figuras 2 e 3).

Figura 2: Séries anuais de anos anômalos com características de primeiro ano do evento El Niño. Notar tendência à concentração de maiores anomalias positivas nos últimos meses do ano. Linhas contínuas representam anos típicos do fenômeno; linhas pontilhadas anos atípicos.



Com efeito, inclusive para as exceções que confirmariam a regra (anos em pontilhado com fortes anomalias nos dois semestres), observa-se tendência de ocorrência de fortes anomalias positivas no segundo semestre do primeiro ano de atuação do fenômeno, seguidas de fortes anomalias positivas no primeiro semestre do segundo ano. Este resultado é apoiado por análises mais amplas do fenômeno, que apontam para distribuição temporal similar (GRIMM et. al., 2000).

Figura 3: Séries anuais de anos anômalos com características de segundo ano de evento El Niño. Notar tendência à concentração de maiores precipitações nos primeiros meses do ano. Linhas contínuas representam anos típicos do fenômeno; linhas pontilhadas anos atípicos.



Na série analisada, o primeiro ano de atuação do El Niño se caracteriza por totais anômalos concentrados no segundo semestre, especialmente nos meses de agosto, setembro, outubro e novembro, mesmo em anos nos quais houve anomalias positivas no primeiro semestre (Figura 2). Já o padrão do segundo ano do fenômeno sugere a concentração de elevados totais pluviométricos no primeiro semestre (Figura 3). Somados a totais pluviométricos normalmente elevados durante os meses de verão (médias mensais entre 130 e 190 mm), além de causarem importantes anomalias de verão, sobretudo no segundo ano (com valores entre 100 e 500 mm superiores ao desvio padrão da série analisada), anos de atuação do El Niño geram períodos de aproximadamente 11 meses de totais pluviométricos abundantes, entre agosto do primeiro ano de atuação e junho do segundo ano de ocorrência de El Niño. Ou seja, de acordo com o padrão mais freqüente de distribuição de

anomalias pluviométricas positivas associadas ao El Niño, áreas sob influência do fenômeno podem ser submetidas à praticamente um ano de chuvas abundantes consecutivas.

Devido à frequência de atuação do fenômeno na área estudada (pelo menos 40% da série de 78 anos pode ser reconhecido como associado ao fenômeno El Niño), o período entre julho e junho, ou entre agosto e julho de dois anos consecutivos deveria ser considerado como ano hidrológico local, para efeito de previsão de acidentes naturais e planejamento de obras envolvendo remoção de terra. Com efeito, durante períodos de manifestação do fenômeno El Niño, estes meses concentram as maiores anomalias pluviométricas positivas, trazendo sérias conseqüências quanto à exposição de formações superficiais aos processos erosivos. De fato, como enfatizado para a área conurbada de Florianópolis (OLIVEIRA e HERMANN, 2004), processos de erosão e sedimentação urbana estão com frequência associados a canteiros de obra completamente despreparados para as conseqüências de totais pluviométricos “anômalos”.

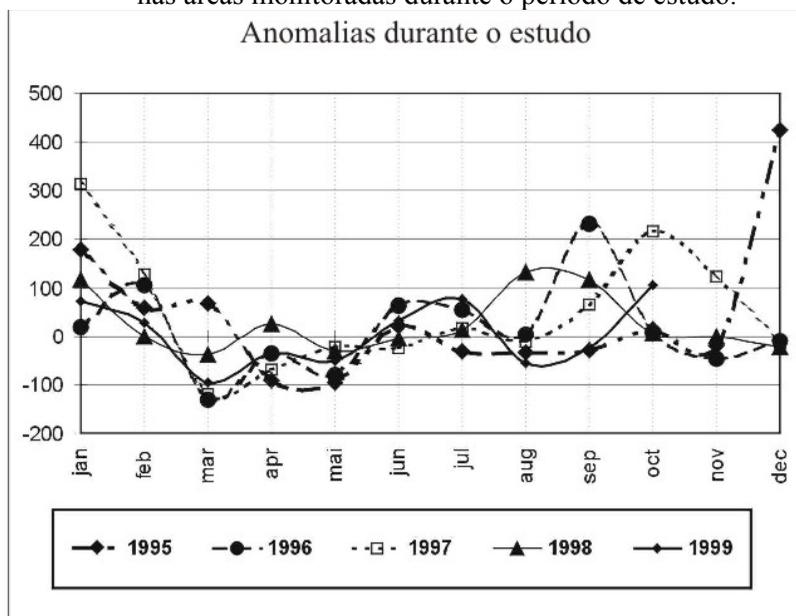
Precipitações verificadas durante o período de monitoramento da erosão em estações experimentais

O período de monitoramento da erosão em estações experimentais iniciou em 1995 sob a influência do fenômeno La Niña e terminou sob a influência de forte fenômeno El Niño entre 1997 e 1998 (Figura 4).

De 1995 a 1996 as precipitações ficaram próximas da média, com ligeiras anomalias negativas, acusando o déficit pluviométrico característico de episódios La Niña no Sul do Brasil. Em dezembro de 1995, forte instabilidade gerou precipitações locais anormais, ocasionando cheias, deslizamentos e aceleração brutal da expansão das voçorocas em início de monitoramento em Florianópolis. Setembro de 1996 foi caracterizado na área por forte anomalia positiva. O ano de 1997 iniciou com precipitações abundantes durante os meses de verão. Durante os meses seguintes, as precipitações se situam próximas à média e aumentam a partir de

setembro, para atingir fortes anomalias positivas em outubro e novembro. O ano de 1998 foi caracterizado por chuvas abundantes, porém dentro das médias para a região, com anomalias positivas nos meses de janeiro, agosto e setembro. Os dez primeiros meses de dados pluviométricos obtidos para o ano de 1999 indicam ano com totais próximos do normal, sem grandes oscilações em relação ao desvio padrão.

Figura 4: Anomalias pluviométricas, em milímetros, registradas nas áreas monitoradas durante o período de estudo.



As precipitações verificadas ao longo do período de monitoramento da erosão favoreceram a observação de mecanismos erosivos variados, permitindo a avaliação de taxas de erosão em voçorocas e a definição de processos erosivos pouco citados na literatura, como será exposto a seguir (OLIVEIRA, 1999).

Expansão de voçorocas, taxas de erosão e anomalias pluviométricas.

Três locais foram objeto do estudo de expansão de voçorocas em estações experimentais. O primeiro, situado no município de Florianópolis (SC), foi dedicado ao estudo da extensão de cabeceiras de voçorocas desconectadas da rede de drenagem, que se desenvolveram sobre material arenoso quaternário, alternadamente coesivo e não-coesivo, de origem eólica (NASCIMENTO, 1998; PAISANI, 2004). O segundo local, situado no município de Lapa (PR), foi dedicado ao estudo da erosão por percolação, da erosão em dutos e da evolução de voçorocas conectadas à rede de drenagem em área de substrato sedimentar permiano (CAMARGO, 1998). O terceiro local, situado no município de Palmeira (PR), foi dedicado ao estudo da formação do escoamento superficial concentrado e da evolução de voçorocas desconectadas da rede de drenagem em área de substrato sedimentar permiano (PAISANI, 1998).

A metodologia geral empregada nas estações experimentais e detalhes relativos às características locais podem ser consultados em trabalhos publicados em outros veículos (OLIVEIRA e NASCIMENTO, 1996; OLIVEIRA e CAMARGO, 1996; OLIVEIRA, 1997; PAISANI e OLIVEIRA, 1999; PAISANI e OLIVEIRA, 2001; OLIVEIRA 2001). Segue o sumário dos principais resultados considerados relevantes para a discussão desenvolvida neste trabalho.

Taxas de erosão por voçorocas desenvolvidas em sedimentos eólicos (Florianópolis, SC)

Em 1995 foi iniciado estudo de voçorocas desconectadas da rede de drenagem em duna de cavalgamento sobre substrato cristalino na localidade de Praia Mole, em Florianópolis. As taxas de erosão e o ritmo de expansão das cabeceiras das voçorocas variaram durante o período de estudo. Em 1995, apenas taxas globais foram estimadas através do emprego de procedimento de monitoramento expedito, denominado “poligonais planialtimétricas” (OLIVEIRA e

NASCIMENTO, 1996). Trata-se da obtenção de segmentos de reta que contornam a incisão erosiva, a partir de estacas fixas, materializados no campo em torno da incisão erosiva através de fio de nylon nivelado. Utilizando-se do ângulo horizontal formado entre cada segmento, obtém-se a forma planimétrica aproximada da incisão erosiva, com faixa de erro na ordem de 5 a 10 centímetros. A medição de profundidades da incisão permite avaliar volumes erodidos ao longo do tempo. O mesmo método foi aplicado entre 1996 e 1997 em outra incisão erosiva na área (NASCIMENTO, 1998). Duas cabeceiras de voçoroca foram estudadas por esse procedimento no local. Na primeira, de dimensões maiores, foram estimadas taxas globais de erosão. Na segunda, mais reduzida, medições de detalhe permitiram avaliar taxas de erosão pontuais associadas a mecanismos específicos (OLIVEIRA, 1999; OLIVEIRA, 2001). As taxas globais de erosão estimadas, convertidas em metros cúbicos e toneladas por ano como recomendado em estudos desta natureza, estão indicadas no quadro 1.

Quadro 1: Taxas globais de erosão estimadas em cabeceira de voçoroca, Florianópolis, SC. De acordo com Nascimento (1988).

Medição por poligonais	Taxa de Erosão m³.a⁻¹	Taxa de Erosão T.a⁻¹
23.05.96	2.993,2	7.039,7
28.06.96	320,4	768
10.07.96	3.600,0	8.640
09.09.96	529,2	1.270,1
04.10.96	1.180,8	2.833,9
03.01.97	673,2	1.615,7
11.01.97	2.185,2	5.244,5
23.01.97	2.952,0	7.084,8
27.01.97	21.430,8	51.433,9
31.01.97	21.942,0	52.660,8
03.02.97	9.324,0	22.377,6
23.07.97	34,2	82,1
14.09.97	486,0	1.166,4
10.10.97	1.267,2	3.041,3
30.10.97	1.072,8	2.754,7
Total no período	1.002,43	2.405,8

Comparando o quadro acima com a figura 4, observa-se que os momentos nos quais foram estimadas as maiores taxas de erosão ocorreram durante ou após meses nos quais totais pluviométricos importantes superaram os desvios padrões mensais discutidos anteriormente.

Os principais mecanismos observados na área são: a) dissecação e assoreamento pontual do fundo das voçorocas pelo escoamento superficial concentrado; b) movimentos de massa nas cabeceiras e bordas da voçoroca, associados a remobilização de material no canal; c) solapamento da base das cabeceiras por alcovas de regressão (Fotografia 1).

Fotografia 1: Processos erosivos em ação no interior de voçoroca em Florianópolis, SC. Notar: a) escoamento superficial no piso da incisão; b) alcovas de regressão na cabeceira da voçoroca; c) filete d'água, mergulhando da borda sobre alcovas e alimentando o escoamento superficial. Fotografia obtida em outubro 1995.



Por ser raramente mencionado na literatura, o terceiro mecanismo foi objeto de estudo exclusivo no interior de uma das voçorocas. Trata-se da formação de alcovas de regressão, que é determinada pelo chamado fluxo de adesão (OLIVEIRA, 1999). A metodologia de coleta e avaliação das taxas de erosão associadas ao fluxo de adesão pode ser consultada em trabalhos anteriores (OLIVEIRA, 1996; OLIVEIRA, 1997; OLIVEIRA, 2001). As taxas de erosão estimadas para o total da superfície das alcovas de regressão monitoradas são apresentadas no quadro 2.

Quadro 2: Taxas de erosão estimadas nas alcovas de regressão estudadas em Florianópolis, SC.

Períodos de Monitoramento	Taxa p/ Alcova (m³.a⁻¹)	Taxa extrapolada p/ Cabeceira (m³.a⁻¹)	Participação da Alcova na Expansão da cabeceira (%)
01/06/96 à 01/06/97	0,22	2.86	de 2.07 a 9.94
19/03/97 à 28/03/98	0,24	3.12	de 4.39 a 20.94
Mai-96 à Julho-97	0,22	31.51	de 0.14 a 92

Como se deduz da comparação entre a figura 4 e o quadro acima, a participação do fluxo de adesão tende a atingir valores máximos durante períodos de taxas de erosão globais moderadas e valores mínimos durante períodos de taxas de erosão global elevada, quando outros mecanismos se tornam mais efetivos. Isto se deve ao fato de o escoamento por adesão atuar a partir da formação de escoamento superficial que desemboque no interior da voçoroca (OLIVEIRA, 1997). Como verificado na área, esse escoamento é isoladamente mais efetivo durante eventos pluviométricos de intensidade moderada. Durante chuvas excepcionais o mecanismo também é verificado, porém sua participação sobre as taxas de erosão diminui em função da participação de outros mecanismos, como dissecação do piso da

incisão e início de movimentos de massa locais nos taludes (OLIVEIRA, 2001).

Apesar disto, as taxas de erosão mais elevadas durante o período de monitoramento foram associadas ao fluxo de adesão e ocorreram no período durante o qual o evento El Niño foi verificado, entre 1997 e 1998. Durante esse período eventos meteorológicos pontuais introduziram, através do fluxo de adesão, quantidades significativas de sedimentos nos coletores instalados (OLIVEIRA, 1996). As precipitações mensais no período representaram entre 25% e 64% do total de chuvas acumuladas. A associação entre o mecanismo de regressão das alcovas monitoras e as taxas de expansão da cabeceira da voçoroca podem ser consultados em Oliveira (2001).

Erosão em dutos e evolução de voçorocas conectadas à rede de drenagem (Lapa, PR)

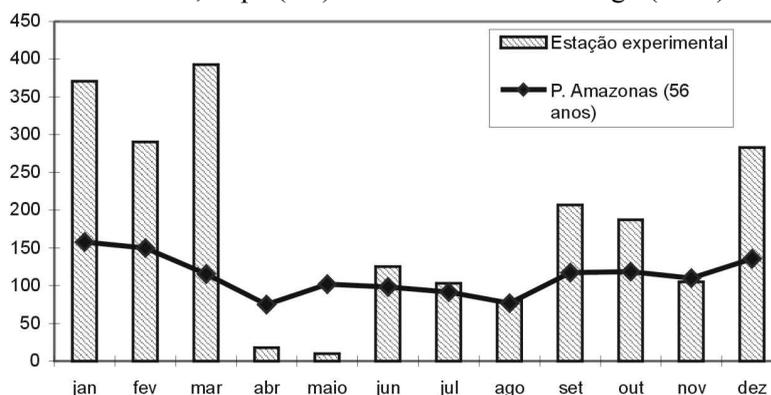
Entre 1995 e 1997 foi realizado trabalho de cadastramento e monitoramento de voçorocas no Centro Sul do Segundo Planalto Paranaense. Taxas globais de erosão foram estimadas ao longo da área e variaram, de acordo com o local estudado, entre mínimas de $6,61 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ e máximas de $177,46 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ no período (CAMARGO, 1998), o que equivaleria, em termos regionais, a aproximadamente 16 toneladas por ano para as mínimas e 426 toneladas por ano para as taxas máximas de remoção de terra por voçorocas.

O ano de 1996 foi o ano básico de estudo na área para efeito hidrológico, durante o qual foi realizado monitoramento específico de processo de erosão por percolação e erosão em dutos em estação experimental. Esse ano foi caracterizado por forte anomalia pluviométrica positiva local durante os primeiros três meses, com precipitações equivalentes a 48,5% do total anual acumulado (Figura 5).

O sítio no qual as maiores taxas de erosão foram verificadas ao longo da área estudada foi justamente o escolhido para a realização do monitoramento detalhado (CAMARGO, 1998). Tal monitoramento foi realizado através de poligonais plani-altimétricas

e da leitura de cargas piezométricas em torno da cabeceira da incisão erosiva. As taxas de expansão da cabeceira da voçoroca foram estimadas entre dois períodos específicos (Quadro 3).

Figura 5: Distribuição das chuvas em 1996, em relação às médias, Lapa (PR). De acordo com Camargo (1998).



Quadro 3: Taxas de erosão na voçoroca monitorada no município de Lapa (PR).

Períodos	Taxas ($m^3.a^{-1}$)
Entre 08/1995 e 12/1995	179,04
Entre 12/1995 e 02/1997	164,88

De dezembro de 1995 a junho de 1997 foram monitorados a variação de carga piezométrica acima da cabeceira da voçoroca estudada e o fluxo de percolação associado ao lençol subsuperficial. O quadro 4 apresenta síntese dos resultados obtidos.

Comparando-se os resultados do quadro 3 com os da última linha do quadro 4, observa-se que as taxas estimadas de erosão por fluxo de percolação são importantes e representam aproximadamente 80% das taxas de erosão globais estimadas para

a expansão da cabeceira da voçoroca (Quadro 3). Os demais mecanismos repertoriados são: erosão em dutos; desmoronamentos de fendas de dessecação; movimentos de massa e lavagem do material do piso da voçoroca por escoamento torrencial.

Quadro 4: Resultados globais obtidos no sítio experimental de Lapa (PR).

Variável Estimada	Valor Estimado
Gradientes hidráulicos estimados (1995/1997)	de 0,057 a 0,159
Condutividade hidráulica estimada	de 1.10^{-4} a 1.10^{-5}
Fluxo médio idealizado para toda a área exposta na cabeceira	$3,86 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Fluxo medido no duto	de 35 a $370 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Fluxo de percolação estimado	de 0,004 a $0,064 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
Concentração de sólidos no fluxo de percolação	$6,25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Taxa de erosão por fluxo de percolação na cabeceira da voçoroca	$1,65 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1} \Rightarrow \mathbf{141,5 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}}$

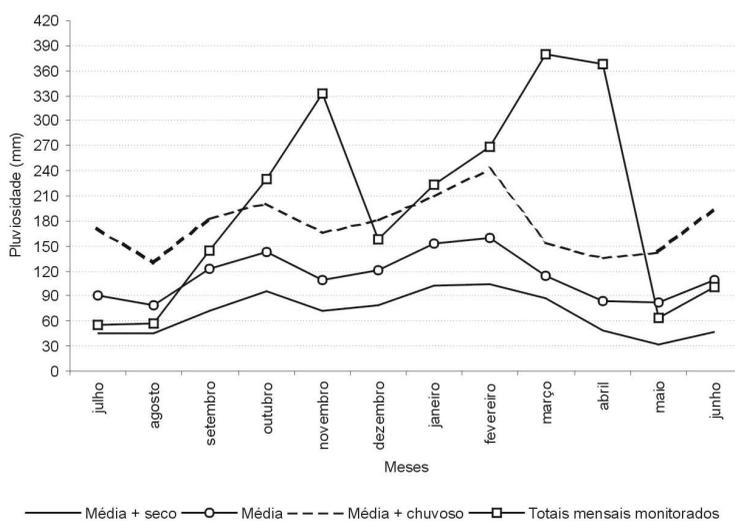
Embora o ano durante o qual foi realizado o monitoramento na área tenha sido excepcionalmente chuvoso, isto foi atribuído às fortes chuvas de verão, expressando mais fatores de ordem local do que o resultado de ano caracterizado por evento El Niño. Com efeito, o ano de 1996 pode ser considerado como ano normal, do ponto de vista hidrológico, excetuadas as referidas chuvas de verão (ver figura 5).

Formação de escoamento superficial concentrado e evolução de voçoroca desconectada da rede hidrográfica (Palmeira, PR)

Entre julho de 1997 e junho de 1998, resultados obtidos em estação experimental instalada na localidade de Quero-Quero, em

Palmeira (PR), possibilitaram a análise da formação do escoamento superficial concentrado e da expansão de voçoroca desconectada da rede de drenagem, associados à influência de forte evento El Niño sobre o Sul do Brasil (PAISANI, 1998). Resultados sintéticos desse experimento podem ser consultados em trabalhos já publicados (PAISANI e OLIVEIRA, 1999; PAISANI e OLIVEIRA, 2001). O período de experimentação foi marcado por importante anomalia pluviométrica na área de estudo (Figura 6).

Figura 6: Distribuição das chuvas entre julho de 1997 e junho de 1998, de acordo com Paisani (1998). Notar o padrão anteriormente mencionado de precipitações elevadas no segundo semestre do primeiro ano e no primeiro semestre do segundo ano de atuação do El Niño.



Pela distribuição das chuvas, observa-se o padrão típico do evento El Niño para o sul do Brasil, com anomalias pluviométricas

concentradas no segundo semestre do primeiro ano de atuação do evento e no primeiro semestre do segundo ano.

A voçoroca desconectada estudada apresenta área de contribuição bem definida a montante da cabeceira do canal, na qual foram instaladas estações tensiométricas. Dois vertedores, instalados na incisão erosiva, possibilitaram a medição de vazões máximas diárias, expressas em litros por segundo (PAISANI, 1998). Pela análise detalhada da zona de contribuição foi possível identificar a ocorrência esporádica do escoamento superficial saturado e do escoamento superficial hortoniano, sendo o último associado a chuvas intensas (PAISANI e OLIVEIRA, 1999; PAISANI e OLIVEIRA, 2001).

Durante os períodos de elevada umidade do solo, associada às chuvas abundantes do evento El Niño, o escoamento subsuperficial se associou ao escoamento superficial concentrado, propiciando erosão por fluxo de percolação ao longo das faces expostas da cabeceira da incisão erosiva. Importantes zonas de saturação subsuperficial se formaram ao longo da área de contribuição a montante, favorecendo o fluxo de retorno, ou escoamento superficial saturado (PAISANI e OLIVEIRA, 1999).

As taxas globais de erosão se intensificaram durante o evento El Niño, sob o efeito sinérgico do escoamento superficial, do escoamento subsuperficial e do fluxo de percolação (Quadro 5).

Quadro 5: Taxas de erosão estimadas no município de Palmeira (PR)

Taxas globais estimadas entre 1995 e 1997	7,8 m ³ .a ⁻¹
Taxas globais estimadas entre 1997 e 1998	38,2 m ³ .a ⁻¹

Os resultados obtidos nessa estação experimental fornecem um bom exemplo das possíveis conseqüências de chuvas excepcionais durante período relativamente longo. Com efeito, foi verificada interação sinérgica de mecanismos específicos, levando a quintuplicar as taxas de erosão que vinham sendo estimadas na estação experimental (Quadro 5). Ressalte-se ainda a

semelhança entre a distribuição da precipitação total durante o biênio 1997/1998 nessa área específica e o padrão geral de distribuição de anomalias pluviométricas evocado anteriormente para os anos de ocorrência do evento El Niño (ver figuras 2 e 3). De fato, as maiores anomalias pluviométricas nesta área do Paraná ocorreram entre o segundo semestre de 1997 e o primeiro semestre de 1998, reproduzindo o padrão de eventos El Niño quando este ocorre em dois anos consecutivos.

Considerações finais

Segundo os resultados obtidos, o padrão bi-anual de atuação do El Niño no Sul do Brasil tende ao estabelecimento de ano hidrológico anormalmente úmido entre agosto do primeiro ano e junho do segundo ano de atuação do evento. O padrão observado neste trabalho sugere que o período entre julho e junho, ou entre agosto e julho de dois anos consecutivos constitui período no qual deve ser dada atenção especial a eventos chuvosos volumosos, sobretudo durante anos para os quais haja previsão de manifestação do fenômeno El Niño.

Os estudos de caso enumerados neste trabalho foram expostos na ordem cronológica pela qual o projeto de monitoramento de erosão por voçorocas nos estados de Santa Catarina e Paraná foi desenvolvido. Esse desenvolvimento coincidiu, no início, em 1995, com ano sob influência do fenômeno La Niña. Em seguida, durante o ano de 1996, observou-se período cuja distribuição dos totais pluviométricos mensais poderia ser considerada normal, não fosse a ocorrência de precipitações sazonais excepcionais em uma localidade do Estado do Paraná. O período entre 1997 e 1998 foi caracterizado como período de forte anomalia climática associada ao fenômeno El Niño. Tal anomalia trouxe conseqüências sobre a erosão acelerada dos solos, tanto na estação experimental de Florianópolis (SC) quanto na de Palmeira (PR), aumentando a remoção de terra nas áreas monitoradas durante o projeto.

De acordo com os resultados apresentados neste trabalho, a ocorrência de chuvas recorrentes anormalmente elevadas na Região Sul do Brasil pode levar ao estabelecimento de interações sinérgicas entre mecanismos específicos, levando à intensificação de processos erosivos e de taxas de erosão global dos solos, sobretudo quando precipitações importantes se acumulam e se estendem durante vários meses seguidos.

Embora a discussão sobre as conseqüências de eventuais mudanças globais sobre a freqüência da Oscilação do Atlântico Sul (El Niño/La Niña) seja pautada pela incerteza, a associação entre o fenômeno e eventos climáticos excepcionais, tanto locais como globais, não causa mais surpresa no meio acadêmico. Apesar das dúvidas que subsistem, já foi formulada na literatura a hipótese de que períodos de aquecimento global da atmosfera terrestre estariam associados ao aumento da freqüência de eventos El Niño. Conseqüentemente, em persistindo a tendência atual de aquecimento global, é de se esperar que o fenômeno ocorra com mais freqüência. Independentes da confirmação ou rejeição de tal hipótese, as conseqüências do fenômeno El Niño sobre a erosão acelerada dos solos em áreas urbanas e rurais devem ser previstas. Com efeito, os estudos de caso expostos neste trabalho tendem a demonstrar os efeitos do fenômeno sobre taxas globais de erosão. O mesmo poderia ser verificado para eventos associados a outros desastres naturais, como deslizamentos e enchentes em áreas habitadas.

De qualquer forma, vivemos atualmente outro período da história da humanidade no qual mudanças climáticas globais ou locais podem levar a transformações imprevisíveis de natureza social, econômica e espacial. Longe de ser motivo de angústia e de discursos alarmistas, a incerteza em relação ao futuro deveria conduzir-nos à precaução e ao planejamento de ações que podemos antecipar. No que diz respeito à erosão acelerada dos solos, nas áreas urbanas e rurais dos estados de Santa Catarina e Paraná estudadas neste trabalho, a previsão de chuvas anormalmente elevadas durante praticamente 11 meses consecutivos, associadas

aos eventos El Niño, deve servir de referencial para o planejamento de atividades que envolvam a remoção de terra ou a exposição dos solos às chuvas. Com efeito, já seria uma forma de busca de solução para problemas associados à erosão urbana e rural, seja qual for a tendência futura das tão propaladas mudanças climáticas globais.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio nas modalidades de Bolsa de Pós-Doutorado no Exterior e Bolsa de Produtividade em Pesquisa. A Universidade Federal de Santa Catarina pelo apoio via FUNPESQUISA. Ao Programa de Pós-Graduação em Geografia pelo apoio a Dissertações de Mestrado.

Referências bibliográficas

AALTO, R.; MAURICE-BOURGOIN, L.; DUNNE, T.; MONTGOMERY, D.R.; NITTROUER, C.A; GUYOT J-L. Episodic sediment accumulation on Amazonian flood plains influenced by El Niño/Southern Oscillation, **Nature** 425, 493-497. 2003.

ADAMS, J.B.; MANN, M.E.; AMMANN, C.M. Proxy evidence for an El Niño-like response to volcanic forcing, **Nature** 426, 274-278. 2003.

CAMARGO, G. (1998) **Processos de erosão no Centro e Sul do Segundo Planalto paranaense: evolução de encostas e influência da erosão subterrânea na expansão de voçorocas**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geografia, UFSC.1998. 210 p.

CLEMENT, A.C.; SEAGER, R.; CANE, M.A. Orbital controls on the El Niño/Southern Oscillation and the tropical climate. **Paleoceanography**, vol.14, n.4, pp.441-456. 1999.

CPTEC-INPE. O El Niño. Conseqüências do fenômeno El Niño sobre o território brasileiro e perspectivas para 1998. Relatório elaborado pelo CPTEC-INPE em 15 de Janeiro de 1998. Disponível em: <<http://cptec.inpe.br/products/elniño/elniño3p.html>>. Acessado em: 03 mar. 2000.

DINGMAN, S.L. **Physical Hydrology**. Macmillian, New York: Macmillian, 1994.

GRIMM, A.M.; BARROS, V.R. E DOYLE, M.E. Climate variability in Southern South America associated with El Niño and La Niña events. **Journal of Climate**, 13, pp. 35-58. 2000.

NASCIMENTO, E.E.D.J. **Contribuição ao estudo de processos erosivos acelerados em áreas de rampas de dissipação - o caso da Praia Mole - Ilha de Santa Catarina**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geografia, UFSC. 1998. 180 p.

OLIVEIRA, M.A.T. Slope geometry and gully erosion development: Bananal, São Paulo. **Zeitschrift für Geomorphologie**, vol. 34, n.4, p. 423-434. 1990.

OLIVEIRA, M.A.T. Evolução de voçorocas e integração de canais em áreas de cabeceira de drenagem: modelo conceitual, taxas de erosão e sinergia de mecanismos. **Geosul**, vol. 19/20, pp. 153-182. 1996.

OLIVEIRA, M.A.T. Towards the integration of subsurface flow and overland flow in gully head extension: issues from a conceptual model for gully erosion evolution. **South African Journal of Geography**, vol. 79, fasc. 2, pp. 120-128. 1997.

OLIVEIRA, M. A. T. Processos erosivos e preservação de áreas de risco de erosão por voçoroca. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. B. (Organizadores). **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. Bertrand Brasil. Rio de Janeiro, p. 57-99. 1999.

OLIVEIRA, M.A.T. 'Adhesion flow' and regressive gully-head expansion in Southern Brazil: field experimetns results. In: Soil Erosin Research for the 21st Century. Honolulu, Hawaii, 2001. **Proceedings...** Honolulu, ASAE. P. 603-606. 2001.

OLIVEIRA, M.A.T. ET CAMARGO, G. Integração de estruturas de abatimento e erosão por voçorocas: município de Lapa (PR). **Sociedade e Natureza**, fasc. 15, pp. 118-121. 1996.

OLIVEIRA, M.A.T. ET NASCIMENTO, E.E.D.J. Alcovas de regressão e expansão de voçorocas em sedimentos inconsolidados: Praia Mole, Florianópolis, SC. **Sociedade e Natureza**, fasc. 15, pp. 206-210. 1996.

OLIVEIRA, M.A.T. E HERMANN, L.P. Ocupação do solo e riscos ambientais na área conurbada de Florianópolis. In: GUERRA, A.J.T. E CUNHA, S.B. (Orgs.) **Impactos ambientais urbanos no Brasil**. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro, Segunda Edição, p. 147-188. 2004.

PAISANI, J.C. **Descontinuidades hidrológicas, escoamento superficial e desenvolvimento de incisões erosivas em áreas de cabeceira de drenagem: estudo de caso na Colônia Quero-Quero, Palmeira (PR)**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geografia, UFSC. 1998. 184 p.

PAISANI, J.C. & OLIVEIRA, M.A.T. Dinâmica da área de contribuição para formação de escoamento superficial saturado - cabeceira de drenagem da Colônia Quero-Quero, Palmeira (PR). **Geociencias**, 18(2), p. 261-284. 1999.

PAISANI, J.C. & OLIVEIRA, M.A.T. Desenvolvimento de incisão erosiva (voçoroca) descontínua e desconectada da rede hidrográfica em área de cabeceira de drenagem: o caso da colônia Quero-Quero (Palmeira – PR). **Revista Brasileira de Geociências**, 31(1): 51-58. 2001.

PAISANI, J.C. **Estratigrafia, significado paleoambiental e evolução de rampa arenosa/dissipação no Balneário Praia Mole – Ilha de Santa Catarina.** Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geografia, UFSC. 2004. 255 p.

TUDHOPE, A.W.; CHILCOTT, C.P.; MCCULLOCH, M.T.; COOK, E.R.; CHAPPELL, R.M.E.; LEA, D.W. LOUGH, J.M.; SHIMMIELD, G.B. Variability in the El Niño-Southern Oscillation through a Glacial-Interglacial cycle. **Science**, vol. 291, pp. 1511-1517. 2001.

Recebido em março de 2004

Aceito em julho de 2004