



ANÁLISE DAS HISTERESES ENTRE TURBIDEZ E VAZÃO LÍQUIDA COM ÊNFASE EM EVENTOS COM DESLIZAMENTO

Simone Malutta¹; Nádia Bernardi Bonumá²; Pedro Luiz Borges Chaffe³; Aline de Almeida Mota⁴; Fernando Grison⁵ & Masato Kobiyama⁶

ABSTRACT – Landslide contribute significantly to the amount of sediment in rivers. This study aims to analyze the events with high turbidity values in which have occurred or not mass erosion in the Cubatão Norte river basin (BHRCN), Santa Catarina state, and the hysteresis formed (NTU-Q). It was evidenced that mass erosion events usually present counter-clockwise hysteresis following a hysteresis with no characteristic pattern.

Palavras-Chave – bacia hidrográfica do rio Cubatão Norte, histerese, concentração de sedimentos em suspensão

1 - INTRODUÇÃO

A turbidez é uma das mais importantes propriedades da qualidade da água (Walling, 1983). A turbidez (medida em NTU) no curso de água natural é determinada pela presença de sedimentos em suspensão (CSS) que impede a passagem de luz. O termo “sedimento” será aplicado, aqui, ao material erodido, transportado e depositado pela ação da água.

A análise dos padrões formados pelas curvas de histereses CSS (concentração de sedimento em suspensão)-Q ou *NTU-Q* é uma das maneiras de identificar o tipo de erosão que está ocorrendo e a área de maior produção de sedimento em uma bacia hidrográfica. Williams (1989) identificou cinco padrões comuns de histereses: (i) sentido horário, (ii) anti-horário, (iii) uma linha de um único valor, (iv) linha única além de um *loop*, (v) formato em “oito”. Além disso, há a possibilidade também de não formar nenhum padrão característico.

Os diferentes padrões de histereses têm sido atribuídos à fonte de sedimento, tempo de percurso do sedimento dentro da bacia e à defasagem entre o tempo do pico da vazão no hidrograma e do pico do *NTU* ou da *CSS* no sedimentograma (Klein, 1984; Williams, 1989, Wood, 1977).

1) Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia da Mobilidade – Campus Joinville, Simone.malutta@ufsc.br, 48 3721-7493
2) Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, nadia.bonuma@ufsc.br, 48 3721-2604
3) Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, pedro.chaffe@ufsc.br, 48 3721-7749
4) Universidade Federal da Fronteira Sul, Engenharia Ambiental e Sanitária – *campus* Chapecó, aline.mota@uffs.edu.br; 49 2049-6548
5) Universidade Federal da Fronteira Sul, Engenharia Ambiental e Sanitária – *campus* Chapecó, fernando.grison@uffs.edu.br; 49 2049-6569
6) Universidade Federal da Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas. masato.kobiyama@ufrgs.br, 51 3308-6324

Até o presente momento, há poucos estudos que analisam os padrões das histereses em eventos com deslizamento (eventos com sedimento provenientes de erosão por movimento de massa). Peart *et al.* (2005) analisaram, em suas áreas de estudo, dois eventos com este tipo de erosão - sendo que, nos dois eventos, houve formação de histereses com sentido anti-horário.

Dada a importância do entendimento do comportamento hidrossedimentológico para qualidade de água de uma bacia, o presente artigo tem como objetivos (i) investigar as histereses nos eventos de deslizamentos, e (ii) verificar os padrões de histereses nos eventos de altos valores de turbidez com e sem evidência de erosão em massa.

Para isso este estudo, foram selecionados eventos ocorridos entre o período de 2008 a 2015 na Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão Norte (BHRCN), localizada no estado de Santa Catarina. Kobiyama *et al.* (2010) e Kobiyama *et al.* (2011) já realizaram estudos a respeito dos eventos nos quais ocorreram deslizamentos em 2008.

2 - MATERIAL E MÉTODOS

2.1 - Área de Estudo

A BHRCN tem aproximadamente 395 km² e abrange os municípios de Joinville e Garuva no nordeste do Estado de Santa Catarina (Figura 1).

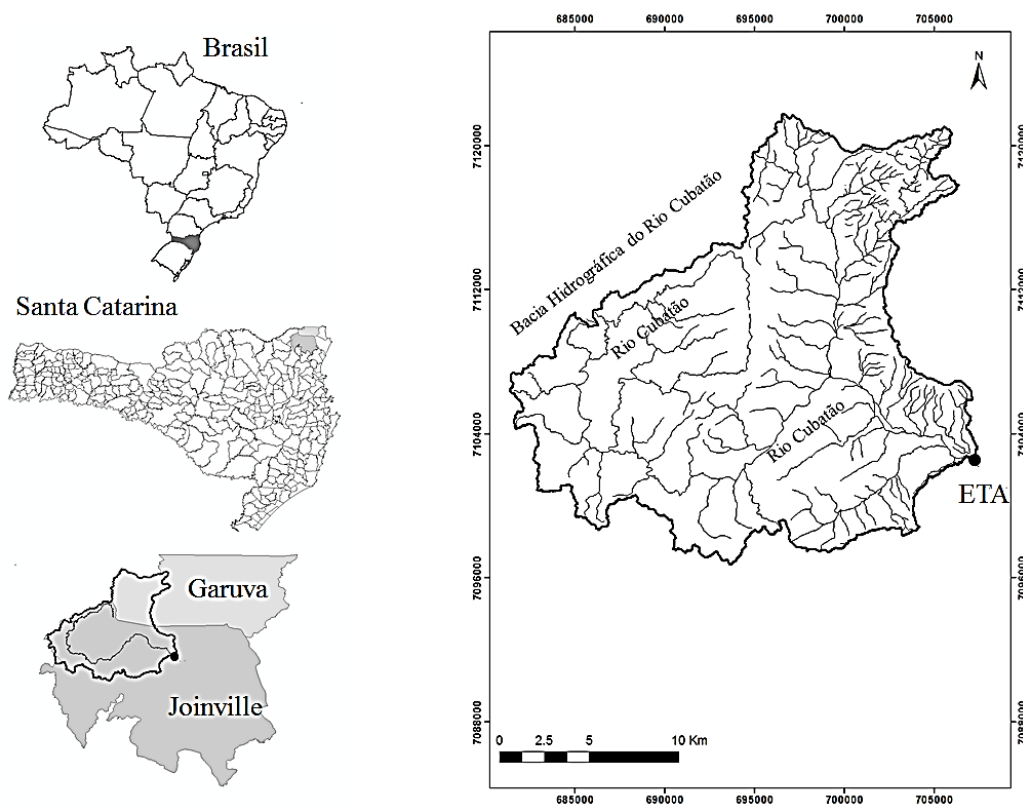


Figura 1 - Localização da BHRCN.



A Floresta Ombrófila Mista representa 97% da área da bacia. O tipo de solo predominante na BHRCN é o Cambissolos, Neossolos e Argilossos (Uberti, 2011)

A precipitação média anual é de 2.205,3 mm, sendo a menor média de precipitação no mês de junho, com 82,0 mm, e a maior média no mês de janeiro, com 355,6 mm.

A BHRCN é umas das mais importantes bacias hidrográficas do município de Joinville, abastecendo aproximadamente 80% do município. Outro fator importante é que o município tem sofrido desde o início da colonização com as inundações (Silveira *et al.*, 2009). Há registros de significativos eventos ligados a inundações e os danos à infraestrutura da cidade como, por exemplo, o rompimento de barragem do Rio Cubatão no ano de 1995.

2.2 - Identificação dos eventos

O termo “evento”, utilizado no presente trabalho, refere-se à delimitação temporal do fenômeno de precipitação, ascensão e decréscimo do hidrograma e dos valores de turbidez da água do rio. Os eventos “complexos” foram analisados separadamente em função dos picos da turbidez ou da vazão.

A identificação dos eventos foi feita no período de 2008 a 2015. O primeiro passo da seleção dos eventos foi verificar junto aos relatórios da Defesa Civil de Joinville os eventos registrados que causaram prejuízo (como destruição de pontes, assoreamento de canais, entre outros). Também foi feita uma análise visual da série de dados de turbidez, identificando os eventos que apresentavam altos dados de turbidez - alguns já coincidindo com os dados dos relatórios citados acima. A Figura 2 mostra a série de dados de vazão, turbidez, e chuva no período de 2008 a 2010 com indicação dos eventos com deslizamentos. O intervalo de medição das variáveis é de 30 minutos.

2.3 - Variáveis características de precipitação, vazão e turbidez

Para cada evento, foram calculadas as variáveis relacionadas a precipitação, vazão e turbidez indicadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Variáveis características calculadas para os eventos

Variável	Descrição	Variável	Descrição
P	Precipitação acumulada no evento (mm)	I_{max}	Intensidade máxima de precipitação no evento (mm/h)
I_{ev}	Intensidade média de precipitação no evento (mm/h)	$Pac30$	Precipitação acumulada nos últimos 30 dias (mm)
Q_{max}	Vazão máxima no evento (m^3/s)	Q_{med}	Vazão média no evento (m^3/s)
NTU_{med}	Turbidez média no evento (NTU)	NTU_{max}	Turbidez máxima no evento (NTU)



2.4 - Delimitação dos eventos e análise das histereses

Após identificar os eventos, foi feita a delimitação dos mesmos. A delimitação do início dos eventos para as variáveis relacionadas à vazão e a turbidez foi realizada a partir do momento em que o valor de uma dessas variáveis (vazão ou turbidez) começou a aumentar. A delimitação do término do evento foi feita de acordo com 2 critérios: (i) Único pico: quando houve o ponto de inflexão no hidrograma, mostrando o fim do escoamento superficial; (ii) Múltiplos picos: é delimitado pelo trecho descendente do hidrograma e pelo novo trecho ascendente do próximo evento. Com base na proposta de Aich *et al.* (2014), as variáveis relacionadas à precipitação foram consideradas a partir do início da chuva que gerou esses eventos.

Para análise e classificação dos padrões das histereses foi utilizada a metodologia e nomenclatura apresentada por Williams (1989), sendo ela composta pelos padrões: sentido horário (H), anti-horário (AH), uma linha de um único valor (SL), linha única além de um *loop* (SLL), formato em “oito”). Além disso, há mais uma modalidade de não formar nenhum padrão característico nítido (SEM).

3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 - Seleção dos Eventos

Analisando os eventos entre 2008 a 2015 foi possível verificar que em seis deles houve contribuição de produção de sedimento proveniente de deslizamentos. Nestes eventos, a NTU_{max} variou entre 1250 a 4200 NTU. Houve outros seis eventos que tiveram os valores de NTU_{max} superiores a 1200 NTU, podendo, assim, ser decorrente de eventos de erosão de movimento de massa. Porém não houve o registro ou notícia na mídia de tal fenômeno. Uma vasta área da bacia é formada pela Serra Dona Francisca e não possui habitações. Com isto, não há relato de dano material por parte Defesa civil. A Tabela 2 mostra as variáveis calculadas para os onze eventos que tiveram os valores de NTU_{max} maiores que 1200 NTU.

3.2 - Análise das histereses nos eventos

A análise das histereses somente foi possível em seis eventos, sendo que em quatro desses eventos foram relatados deslizamentos.

Os eventos de 29/11/2008 foi evidenciado uma histerese sem formato característico ($NTU_{max} = 35$ e $Q_{max} = 165 \text{ m}^3/\text{s}$) seguindo de uma histerese anti-horário ($NTU_{max} = 1250$ NTU e $Q_{max} = 119 \text{ m}^3/\text{s}$).

Os eventos dos dias 14 e 23/01/2010 (Figura 3) se caracterizaram por uma histerese anti-horária com menor pico de turbidez e outra sem padrão característico nítido, respectivamente. O



primeiro padrão de histerese normalmente está ligado à erosão no leito ou nas margens. O segundo evento, com pico de turbidez muito maior, chegando a 2000 NTU, que é possivelmente a evidência de sedimento derivado de deslizamento.

Portanto pode-se dizer que provavelmente tenha acontecido uma ruptura inicial do solo e, com a continuidade do evento de precipitação desencadeou o deslizamento. A precipitação no evento do dia 23/01/2010 foi de 295 mm, com Pac_{30} de 669 mm. No evento de 14/01/2010, a precipitação foi 183 mm e a Pac_{30} de 381 mm, evidenciando os altos índices pluviométricos nestes dias e similares aos outros eventos de deslizamentos cujas histereses não puderam ser analisadas (Tabela 2).

Assim como obtido na análise do evento do dia 14/01/2010, Peart *et al.* (2005) também identificaram histereses de formato anti-horário em dois eventos de deslizamento ocorridos em bacias hidrográficas na China.

Kobiyama *et al.* (2011) mostraram que para os eventos de deslizamento de 2008 a correlação linear NTU-Q antes do evento de deslizamento era de $R^2 = 0,749$ e depois do evento $R^2=0,001$. Concluindo, portanto que a erosão em decorrência deste tipo de fenômeno pode gerar uma não linearidade entre as duas variáveis.

Apesar de não haver registro de deslizamentos nos eventos do dia 24/03/2010, houve o valor de NTU_{max} de 1600 NTU - valor muito próximo dos eventos com deslizamento. A histerese formada foi horária e não havia eventos anteriores – isto pode ser observado pelo fato de a precipitação do evento ser muito próxima ao Pac_{30} . Portanto, praticamente o total precipitado nos últimos 30 dias foi durante o evento, que durou aproximadamente 12 horas. Devido à alta intensidade ($I_{max} = 112$ mm/h) e altas vazões ($Q_{max} = 350$ m³/s), é provável que este evento não tivesse contribuição de produção de sedimento de deslizamento. Somente houve uma grande produção de sedimento evidenciado pelas histereses no sentido horário (Figura 4).

Nos casos de histerese no sentido horário o pico de turbidez geralmente é causado pelo sedimento remobilizado do canal já erodido em outros eventos (Seeger *et al.*, 2004) e/ou produção de sedimento próximo da exutória (Hughes *et al.*, 2012).

O evento do dia 09/11/2012 também apresentou altos valores de NTU_{max} (1237 NTU), sendo que o formato de histerese formado foi no sentido anti-horário. Pode ter ocorrido uma grande erosão nas margens, como já evidenciado por Mukundan *et al.* (2013) ou inclusive erosão por movimento de massa (Peart *et al.*, 2005).

Tabela 2 - Eventos selecionados, cálculo de variáveis e classificação das histereses

Pico	NTU _{max}	NTU _{med}	Q _{max}	Q _{med}	P	Pac30	Histerese	lev	I _{max}	Obs
	NTU		(m ³ /s)		(mm)			(mm/h)		
23-Fev-08	2160	81,4	*	*	144,4	477,9	*	*	*	**D
29-Nov-08	1250	250,0	165,0	112,4	103,0	641,7	SEM/AH	2,7	18,8	**D
3-Dez-08	1320	102,6	74,0	71,0	0,8	777,2	AH/H/SEM	0,04	1,2	**D
14-Jan-10	1500	335,5	364,0	191,1	183,6	381,8	AH/SEM	2,1	60,8	**D
23-Jan-10	1960	387,9	227,9	159,6	295,4	669,2	AH/SEM	6,4	39,6	**D
24-Mar-10	1600	206,0	350,1	157,9	218,0	295,8	H	17,4	112,8	
20-Jan-11	1484	415	*	*	28,8	127,9	*	*	*	
21-Jan-11	1700	92,3	*	*	109,15	237,0	*	*	*	
10-Mar-11	4120	572,0	*	*	334,4***	408,0	*	*	*	**D
25-Dez-11	2100	61,2	*	*	98,0***	142,5	*	*	*	
25-Jan-12	2112	195,0	*	*	130,5***	317,3	*	*	*	
9-Nov-12	1237	263,2	140,9	78,8	97,9	337,7	AH	2,0	23,2	

*Não foi possível estimar devido ao intervalo da medição da vazão ser diário;

**D: Eventos com deslizamento;

***Este dado de precipitação foi estimado em intervalo diário, portanto pode não ter sido o total precipitado no evento e sim no dia do evento.

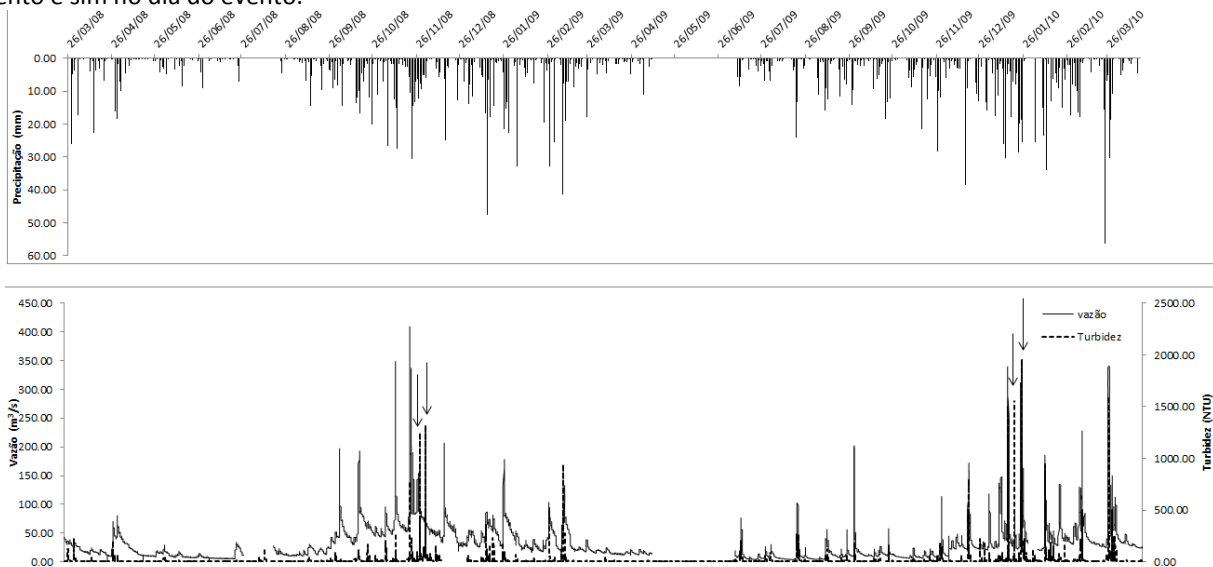


Figura 2– Série de dados de 2008 a 2010 na BHRC (as setas indicam os eventos de deslizamento)

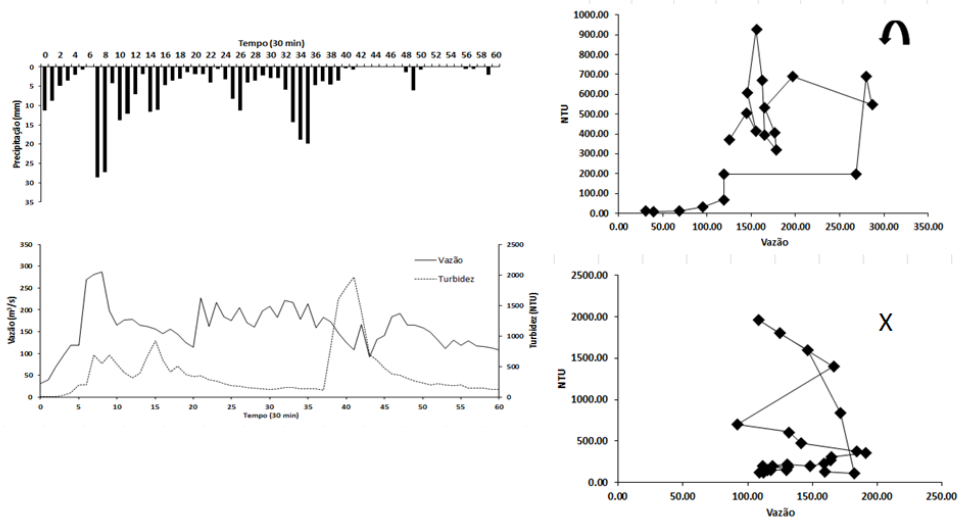


Figura 3 – Eventos e histereses formadas no evento do dia 24/01/2010.

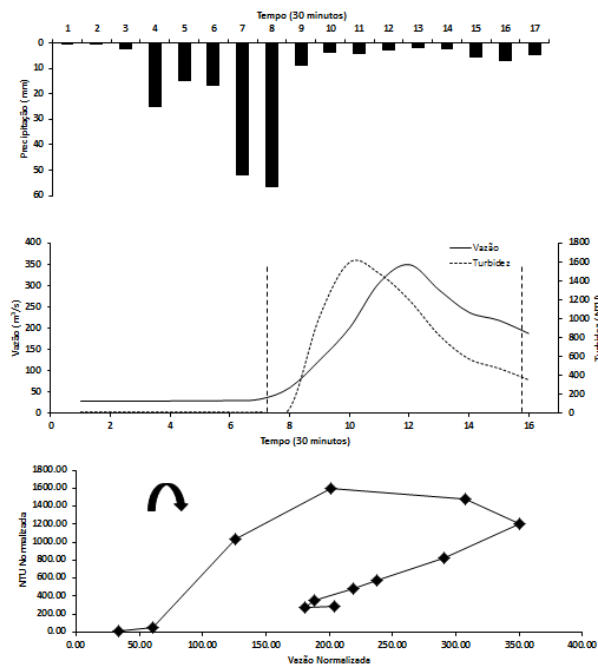


Figura 4 – Eventos e histereses formadas no evento no dia 24/03/2010

4 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente estudo foram analisados 12 eventos hidrológicos entre os anos de 2008 e 2015, identificando os formatos das histereses formadas entre vazão e turbidez, e algumas variáveis características de precipitação, vazão e turbidez. Verificou-se, em concordância com outros autores, que nos eventos em que houve contribuição de sedimento de deslizamentos não foi possível identificar histereses com padrão característico. Em eventos com NTU_{max} similares – mas



que não se têm registro de erosão em massa - os padrões de histereses foram horárias e anti-horárias.

5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AICH, V, ZIMMERMANN, A., ELSENBEER, H. (2014). "Quantification and interpretation of suspended-sediment discharge hysteresis patterns: How much data do we need?" *Catena* v.122, p. 120-129.
- HUGHES, A. O; QUINN, J. M; MCKERGOW, L. A. (2012). "Land use influences on suspended sediment yields and event sediment dynamics within two headwater catchments, Waikato, New Zealand" *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, v. 46:3, p. 315-333.
- KLEIN, M. (1984). "Anti clockwise hysteresis in suspended sediment concentration during individual storms". *Catena*. v.11, p. 251-257.
- KOBIYAMA, M.; MOTA, A.A.; MENEGHINI, P. (2010). "Influência do deslizamento em turbidez e sólidos totais na água do rio: estudo de caso da bacia do rio Cubatão do Norte, Santa Catarina" in: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Campo Grande/MS, Nov 2009, pp. 1-12.
- KOBIYAMA, M.; MOTA, A.A.; GRISON, F.; GIGLIO, J.N. (2011). "Landslide influence on turbidity and total solids in Cubatão do Norte River, Santa Catarina, Brazil" *Nat Hazards*. Vol. 59, n.2, p.1077-1086.
- MUKUNDAN, R.; PIERSON D.C.; SCHNEIDERMAN D.C.; O'DONNELL, D.M.; PRADHANANG, S.M.; ZION, M.S.; MATONSE, A.H. (2013). Factors affecting storm event turbidity in a New York City water supply stream. *Catena* v. 107, p. 80-88.
- PEART, M. R.; RUSE, M. E.; FOK, L. (2005). "Sediment delivery from a landslide to stream in drainage basin in Hong Kong" in: *Geomorphological Processes and Human Impacts in River Basins* (Proceedings of the International Conference held at Solsona, Catalonia, Spain, May 2004).
- SEEGER, M.; ERREA, M.P.; BEGUERÍA, S.; ARNÁEZ, J.; MARTÍ, C.; GARCÍA-RUIZ, J.M. (2004). "Catchment soil moisture and rainfall characteristics as determinant factors for discharge/suspended sediment hysteretic loops in a small headwater catchment in the Spanish Pyrenees". *Journal of Hydrology*, v. 288, p. 299-311.
- SILVEIRA, W.N.; KOBIYAMA, M.; GOERL, R.F.; BRANDENBURG, B. (2009). *História de Inundações em Joinville 1851 - 2008*. Curitiba: Ed. Organic Trading, 153p.
- WALLING, D.E. (1983). "The sediment delivery problem" *Journal of Hydrology*.v,69, p. 209-237.
- WILLIAMS, G.P. (1989). "Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers". *Journal of Hydrology*, v. 111, p. 89- 106.
- WOOD, P. A. (1977) "Controls of variation in suspended sediment concentration in the River Rother, West Sussex, England" *Sedimentology*, v. 24, p. 437-445.
- UBERTI, A. A. A. Boletim Técnico do Levantamento da Cobertura Pedológica do Município de Joinville . p. 1-159, 2011.