

## Índice de Dissipação de Erosividade



ISSN 1518-6512

Dezembro, 2017

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária*

*Embrapa Trigo*

*Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

# **Documentos** \_\_\_\_\_online **175**

## **Índice de Dissipação de Erosividade**

*Luiz Renato D'Agostini*

*José Eloir Denardin*

*Jorge Lemainski*

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na: **Tratamento editorial:** *Fátima Maria De Marchi*

**Embrapa Trigo**

Rodovia BR 285, Km 294

Caixa Postal 3081

Telefone: (54) 3316-5800

Fax: (54) 3316-5802

99050-970 Passo Fundo, RS

www.embrapa.br

https://www.embrapa.br/fale-conosco

**Capa:** *José Eloir Denardin*

**Diagramação eletrônica:** *Fátima Maria De Marchi*

**Ilustração capa:** *José Eloir Denardin*

**Normalização bibliográfica:** *Maria Regina Martins*

**1ª edição**

Versão on-line (2017)

**Unidade responsável pelo conteúdo e edição:**

Embrapa Trigo

**Comitê de Publicações**

**Vice-presidente**

*Leila Maria Costamilan*

**Membros**

*Anderson Santi*

*Genei Antonio Dalmago*

*Paulo Roberto Valle da Silva Pereira*

*Sandra Maria Mansur Scagliusi*

*Tammy Aparecida Manabe Kiihl*

*Vladirene Macedo Vieira*

**Todos os direitos reservados.**

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

Embrapa Trigo

---

D'Agostini, Luiz Renato.

Índice de dissipação de erosividade. / Luiz Renato D'Agostini, José Eloir Denardin, Jorge Lemainski. – Passo Fundo : Embrapa Trigo, 2017.

PDF (19p.). – (Documentos online / Embrapa Trigo, ISSN 1518-6512 ; 175)

1. Erosão. 2. Política ambiental. I. Denardin, José Eloir. II. Lemainski, Jorge. III. Título. IV. Série.

CDD: 631.45

---

© Embrapa, 2017

# **Autores**

**Jorge Lemainski**

Engenheiro-agrônomo, M.Sc. em Ciências Agrárias/Gestão de Solo e Água, analista da Embrapa Trigo, Passo Fundo, RS.

**José Eloir Denardin**

Engenheiro-agrônomo, D.Sc. em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas, pesquisador da Embrapa Trigo, Passo Fundo, RS.

**Luiz Renato D'Agostini**

Engenheiro-agrônomo, D.Sc. em Ciência do Solo, professor da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Agrárias, Florianópolis, SC.

# Apresentação

A abordagem que orienta esta proposição foi, talvez, pela primeira vez apresentada em Epistemologia da erosão – da crítica à proposição<sup>1</sup>. Com alguns avanços em sua operacionalização, a mesma abordagem orientou a organização da publicação Erosão: o problema mais que o processo<sup>2</sup>.

Problemas emergem a partir de processos. Decorre disso que não se poderia compreender e tratar de problemas sem compreender minimamente os processos, a partir dos quais os problemas surgem. De outro lado, saber tudo do processo em nada garante que ocorram encaminhamentos para evitar ou atenuar o problema.

Conservar a capacidade produtiva do solo seria uma necessidade para uma espécie, dele dependente, e que poderia se “perpetuar”. Utilizar o solo é uma oportunidade para efêmeros espécimes que se empenham em sobreviver e socialmente se diferenciar entre os semelhantes.

Prioridades legítimas podem ser diferentes, e eventualmente opostas. Mesmo quando essas prioridades habitam o mesmo ser – simultaneamente espécie e espécime.

Em algum grau o solo degradará...

Para combater a erosão hídrica bastaria impedir que água excessivamente veloz flua sobre e através do solo. Agricultores com baixa instrução formal também sabem disso – mesmo que nunca tenham ouvido ou lido sobre relações entre velocidade da água, energia cinética e trabalho mecânico que a erosão caracteriza.

Um instrumento de política de compensação, desde que tecnicamente fundado e socialmente justo, pode se constituir em efetivo incentivo individual e coletivo para melhor tratar do complexo problema erosão que emerge do intrincado processo erosivo.

É do que trata a presente proposição.

*Oswaldo Vasconcellos Vieira*  
Chefe-Geral da Embrapa Trigo

---

<sup>1</sup> D´Agostini, L. R. (1995) Epistemologia da erosão: da crítica a proposição. Imprensa Universitária da UFSC. 101 p.

<sup>2</sup> D´Agostini, L. R. (1999). Erosão: o problema mais que o processo. EDUFSC. 131 p.

# Sumário

<b>Resumo</b> .....	7
<b>Abstract</b> .....	7
<b>Introdução</b> .....	7
Elementos da proposição.....	8
Derivação do trabalho $W_s$ e do potencial energético $E$ .....	10
Derivação do coeficiente $\mu$ .....	11
Efetividade do regime do fluxo de energia.....	12
Exemplo ilustrativo.....	13
Energia cinética da chuva ( $E_cC$ ).....	14
Energia cinética máxima possível no escoamento ( $E_cE$ ).....	14
Trabalho ( $W_s$ ): a produção de sedimentos.....	15
Coeficiente efetividade do regime de energia.....	15
Índice de dissipação de erosividade (IDE).....	16
<b>Considerações finais e conclusão</b> .....	18
<b>Referências</b> .....	19

# Índice de Dissipação de Erosividade

---

*Luiz Renato D'Agostini*

*José Eloir Denardin*

*Jorge Lemainski*

## Resumo

Características de chuva e de bacia hidrográfica são entre si relacionadas para caracterizar potencial energético erosivo. A quantidade de sedimentos produzidos resulta caracterizada como trabalho mecânico. A partir do padrão geométrico do meio, é inferida a fração desse trabalho realizado exclusivamente por aquele potencial. A efetividade das condições presentes em evitar conversão de potencial erosivo em trabalho mecânico é então derivada em um índice de dissipação de erosividade (IDE): uma medida de desempenho socioambiental no controle da degradação do meio – útil em política ambiental.

**Palavras-chave:** sedimentos, erosão, política ambiental.

## Abstract

Rainfall and watershed characteristics are related to each other to characterize an erosive energy potential. The amount of sediment produced is characterized as mechanical work. From the geometric pattern of the landscape it is inferred the fraction of this work carried out exclusively by that potential. The effectiveness of the conditions present in avoiding conversion of erosive potential in mechanical work is then derived in an index of erosivity dissipation (IDE): a measure of socio-environmental performance in the control of environmental degradation – useful in environmental policy.

**Keywords:** sediment, erosion, environmental policy.

## Introdução

A Lei 9.433/97, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos, estabelece a bacia hidrográfica como unidade territorial. Em 2003, a Agência Nacional de Águas (2012) propôs, apropriadamente à natureza social da questão ambiental no manejo do meio, em especial da água, o Programa Produtor de Água (PPA).

Uma das intenções da Agência Nacional de Águas (ANA) foi premiar/compensar agricultores que adotassem práticas de controle da produção de sedimentos. O pressuposto, se não a evidência, é a correlação entre qualidade do manejo do solo, níveis de produção de sedimentos e implicações sobre poluição e disponibilidade de água à jusante. Todavia, ao mesmo tempo em que a bacia hidrográfica é, por lei, unidade de território para a política de recursos hídricos, estudos já realizados para identificar formas de premiação/compensação tomam a propriedade rural como unidade espacial (CHAVES et al., 2004a, 2004b; MARTINI; LANNA, 2003).

Com o intuito de operacionalizar o PPA, Chaves et al. (2004b) propuseram, a partir de relações entre valores atribuíveis a fatores da Equação Universal de Perdas de Solo (USLE) (WISCHMEIER; SMITH, 1978), procedimentos para quantificar “potencial de abatimento de erosão”. Para a operacionalização da intenção orientadora do programa é necessário procedimento para quantificar as evidentes relações entre qualidade do manejo do solo e níveis de erosão.

Ocorre, todavia, que a USLE e seus fatores são empiricamente derivados. Logo, a proposição de Chaves et al. (2004b) se aplica quando e onde for possível a derivação daqueles fatores. Enfim, usar fatores empíricos em condições diversas daquelas de sua derivação resultaria em perda de confiabilidade na inferência que é condição fundamental em relações de compensação entre interessados.

O objetivo geral deste documento é propor, teórica e metodologicamente, uma alternativa para a operacionalização de programas voltados a melhorar o desempenho ambiental no uso de extensões de terra. Os objetivos específicos são: desenvolver procedimento no qual a bacia hidrográfica – tanto como espaço de relações físicas quanto sociais – seja de fato a unidade territorial; e sistematizar relações que fundamentem e possibilitem avaliar o desempenho ambiental do componente consciente.

## Elementos da proposição

Uma bacia hidrográfica caracteriza um sistema termodinamicamente aberto. Em relação à água e para os propósitos deste estudo, as entradas no sistema ocorrem como precipitação pluvial. As saídas são na forma de evaporação, transpiração e vazão na foz. Provenientes do processo erosivo, nesta última saída se encontram sólidos em suspensão sendo transportados: um trabalho mecânico. Erosão é, portanto, trabalho mecânico.

A única causa fundamental da erosão e conseqüente produção de sedimentos é a força gravitacional terrestre. Macroscopicamente, essa causa manifesta-se como energia contida na água da gota da chuva e do escoamento (energia cinética em águas aceleradas pela gravidade).

De outro lado, são diversos os fatores que afetam a efetividade da gravidade em acelerar a água e assim produzir sedimentos. Os efeitos de alguns desses fatores não dependeriam da vontade ou do desempenho humano – é o caso do relevo e do regime de chuvas. Já outros sim, como é o caso das condições de superfície decorrentes da qualidade das relações intencionais mantidas com aquele meio.

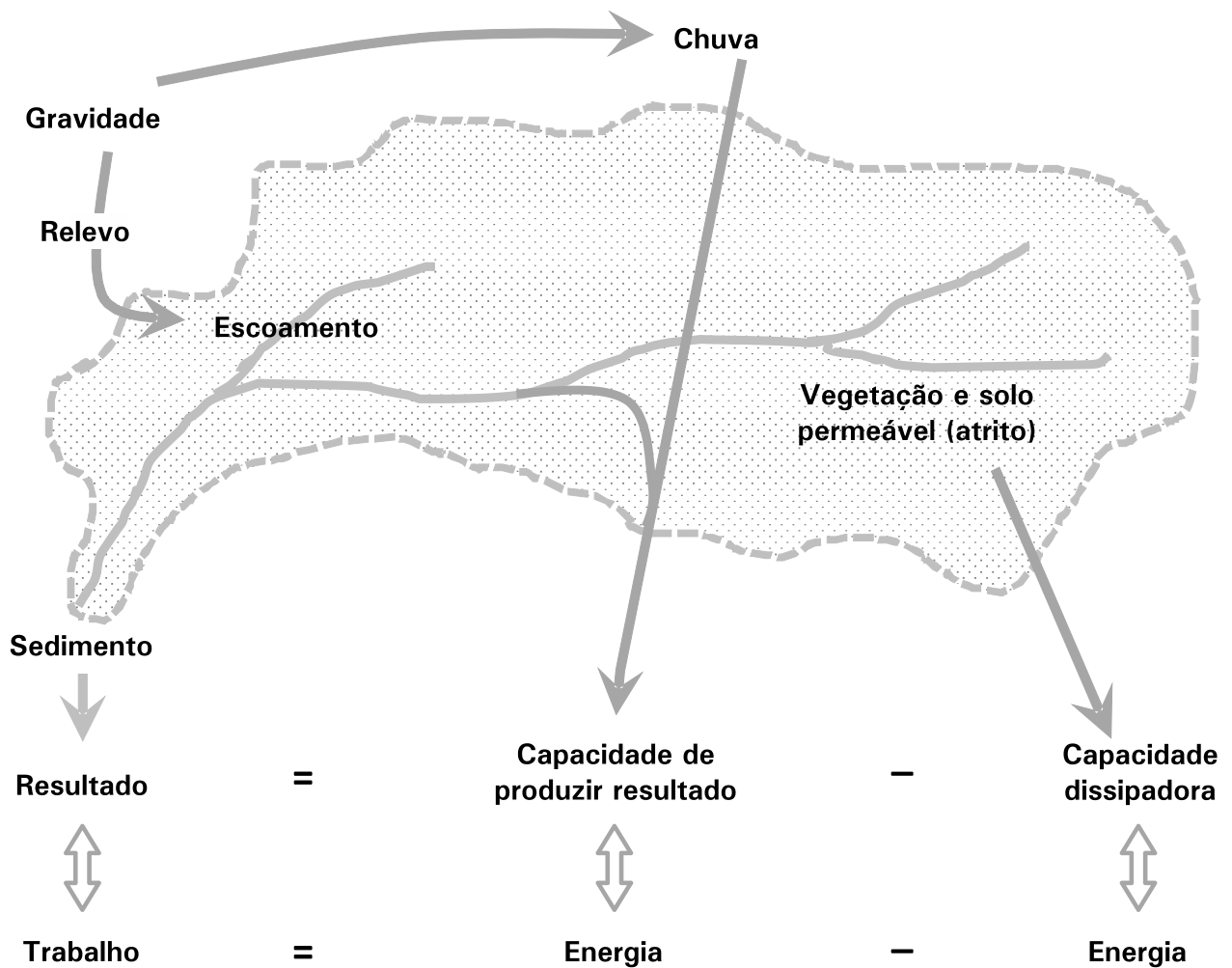
Fatores não controláveis, como chuva, área e relevo da bacia hidrográfica, podem ser associados à capacidade do sistema em produzir resultado. Já fatores manejáveis, como vegetação e permeabilidade do solo, são associáveis à capacidade do sistema em dissipar capacidade produtora de resultado (Figura 1).

A Figura 1 ilustra importante implicação do Segundo Princípio da Termodinâmica: uma quantidade de energia (Joules) não pode ser integralmente convertida em trabalho útil, ou seja:

$$W_s = E - d \quad (1)$$

em que  $d$  é a fração do potencial erosivo  $E$  que não é convertida em produção de sedimentos  $W_s$ .





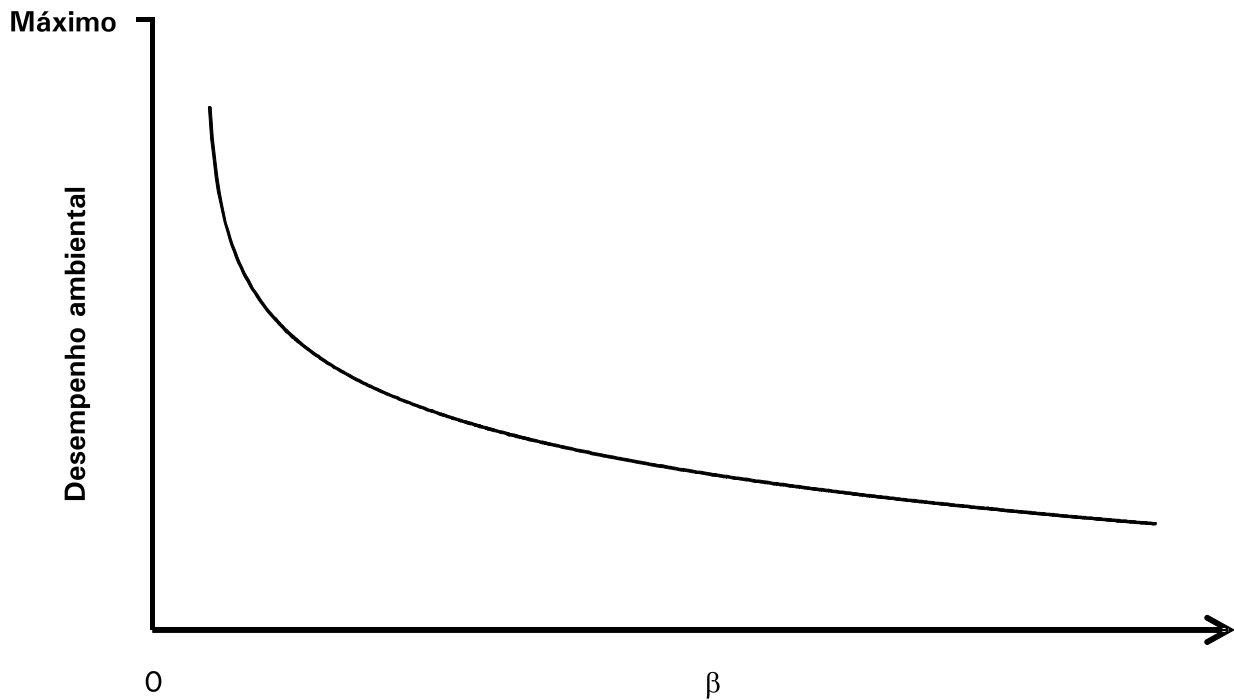
**Figura 1.** Bacia hidrográfica como sistema aberto, e sedimentos na foz como trabalho que o sistema realiza sobre o meio.

Como  $W_s$  e  $d$  são frações do potencial  $E$ , tem-se:

$$\frac{W_s}{E} = 1 - \frac{d}{E} \quad \text{ou} \quad \frac{W_s}{E} = \beta \quad (2)$$

em que  $\beta$  é coeficiente de efetividade da conversão. Quanto maior o valor de  $\beta$ , menor é a dissipação de energia erosiva em determinada extensão de terra com determinado padrão geométrico e sob um determinado regime pluvial.

Em processos muito afastados do equilíbrio termodinâmico, tal como a produção de sedimentos de solo erodido, a fração de energia convertida em trabalho é sempre muito pequena ou mesmo nula, ou seja,  $0 \leq \beta \ll 1$ . De outro lado, garantir produção de sedimentos igual a zero em terras sob uso é quase uma impossibilidade. Assume-se, assim, que a dificuldade de melhorar o desempenho ambiental na redução dos valores de  $\beta$  é maior quando os valores deste coeficiente já forem mais baixos. Por isso, e como sugere a Figura 2, o reconhecimento na avaliação de desempenho ambiental também deve crescer na medida em que  $\beta$  diminui.



**Figura 2.** Relação entre coeficiente de efetividade energética ( $\beta$ ) e desempenho ambiental no controle da produção de sedimentos.

Então, considerados os sempre baixos valores absolutos de  $\beta$  e a conveniência de se expressar o desempenho ambiental como índice objetivamente comparável, um Índice de Dissipação de Erosividade (IDE) pode ser proposto como:

$$\text{IDE} = (1 - \beta^{1/\nu})^\nu \quad (3)$$

em que  $\nu \geq 1$  desempenha funções que se apontam a seguir.

Em face do elevado grau de irreversibilidade da conversão de energia erosiva em trabalho de erosão, o coeficiente  $\beta$  sempre é da ordem  $10^{-3 \pm 1}$ . Isso impede a distinção de dois valores de IDE como índices expressos com um ou dois decimais. Uma função de  $\nu$  é, assim, assegurar significância a  $\beta$  em relação à unidade. Outra função é possibilitar selecionar a inclinação da função IDE( $\beta$ ) (Figura 2) em função do contexto em que se dá a avaliação de desempenho, i.e., função da qualidade média do manejo das terras na região.

### Derivação do trabalho $W_s$ e do potencial energético $E$

O termo  $W_s$  corresponde ao trabalho (J) realizado exclusivamente a expensas de potencial  $E$  (J). Esse trabalho consiste no transporte de sedimentos até cursos d'água. O transporte ocorre sobre plano de comprimento médio  $L$  (m) com inclinação média  $\theta$ . Assim,

$$W_s = M_s L g \cos\theta \quad (4)$$

em que  $M_s$  é massa (kg) de sedimentos e  $g$  é aceleração gravitacional ( $\text{m s}^{-2}$ ).

De acordo com Villela e Mattos (1975), o comprimento médio  $L$  pode ser obtido como,

$$L = \frac{A}{4 lw} \quad (5)$$

em que  $A$  é área ( $\text{m}^2$ ) da bacia hidrográfica e  $lw$  é comprimento (m) da sua rede de drenagem.

O potencial energético  $E$  é a quantidade de energia cinética idealmente possível de fluir, ou seja, a energia cinética de água que incidisse e fluísse em meio com comportamento equivalente ao de conjunto de planos perfeitamente lisos. O termo  $E$  é, assim, o somatório da energia cinética da chuva e da energia cinética máxima e idealmente possível no escoamento superficial. Nos dois casos, a energia cinética emerge da conversão de coordenadas de posição em coordenadas de movimento por ação gravitacional.

Tem-se então que:

$$E = EcC + EcE \quad (6)$$

em que  $E$  (J) é quantidade de energia adequada à realização de trabalho mecânico,  $EcC$  é energia cinética da chuva e  $EcE$  é energia cinética do escoamento (energia máxima possível no processo de conversão de coordenadas mecânicas sobre o plano inclinado perfeitamente liso).

Fortes relações entre a intensidade da chuva e o tamanho médio de gotas, e entre esse tamanho e a velocidade de sua queda (KOWAL; KASSAN, 1979), possibilitam a derivação de equações que, exclusivamente a partir da intensidade, estimam a energia cinética da chuva com precisão e exatidão (D'AGOSTINI, 1999). É o caso da equação proposta por Wischmeier e Smith (1978) na derivação do fator erosividade da USLE. Significa que, independentemente da quantidade de energia de posição não convertida em energia cinética por força de atrito com o ar, a energia cinética da chuva ( $EcC$ ) disponível à produção de trabalho erosivo pode ser estimada diretamente a partir da intensidade da chuva.

Enquanto que o componente  $EcC$ , estimado pela equação constante em Wischmeier e Smith (1978), é energia na forma adequada à realização de trabalho mecânico, o componente  $EcE$  resulta de produto entre a energia de posição ( $EpE$ ) idealmente possível de se converter em energia cinética no escoamento superficial e um coeficiente de propensão do fluido viscoso em converter coordenadas de posição em coordenadas de movimento sobre o plano, ou seja:

$$EpE = Ma g h \quad (7)$$

em que  $EpE$  é energia potencial ou de posição,  $Ma$  é massa de água (kg),  $g$  é aceleração gravitacional ( $ms^{-2}$ ) e  $h$  é altura média (m) em relação ao curso d'água para onde flui o escoamento. Logo,

$$EcE = Ma g h \mu \quad (8)$$

em que  $0 < \mu < 1$  é o referido coeficiente de propensão em converter coordenadas. Substituindo a altura  $h$  pela correspondente relação entre comprimento e inclinação, tem-se:

$$E = EcC + Ma g L \text{sen} \theta \mu \quad (9)$$

### Derivação do coeficiente $\mu$

A propensão de uma massa em converter suas coordenadas de posição em coordenadas de movimento por ação de gravidade é, evidentemente, inversamente proporcional ao tempo necessário para a conversão. Em trajetória vertical, o tempo é mínimo e, portanto, a propensão é máxima. Na medida em que o plano se aproxima da posição horizontal, o tempo tende a infinito e, assim, a propensão tende a um mínimo. Em outras palavras, há um tempo específico de conversão de coordenadas  $h$  correspondente a cada medida de propensão, e ambos variam segundo a inclinação  $\theta$  do plano, tal que  $0^\circ < \theta < 90^\circ$ .

Das equações fundamentais do movimento, em condições ideais e exclusivamente por ação da gravidade, o tempo  $t_h$  (s) para deslocamento vertical ao longo de uma altura  $h$  (m) e o tempo  $t_L$  (s) de deslocamento ao longo de plano com comprimento  $L$  (m) e inclinação  $\theta$  ( $^\circ$ ) são, respectivamente:

$$t_h = \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad \text{e} \quad t_L = \sqrt{\frac{2L}{g \text{sen} \theta}} \quad (10)$$

Dado que a propensão à conversão de coordenadas de posição em movimento é inversamente proporcional ao tempo dessa conversão, e que  $t_h$  é tempo referencial, ou seja, o menor tempo possível, a razão entre esse tempo e qualquer tempo  $t_L$  define coeficiente de propensão específica de conversão sobre plano de comprimento médio  $L$  e inclinação média  $\theta$ . Então,

$$\mu = \frac{t_h}{t_L} = \text{sen}\theta \quad (11)$$

em que  $\mu$  é o coeficiente de propensão em converter coordenadas.

Substituindo em (9), tem-se:

$$E = EcC + Ma g L \text{sen}^2\theta \quad (12)$$

A equação (12) define a quantidade de energia idealmente disponível. Todavia, uma quantidade de energia não define, por si só, a capacidade efetiva do sistema em produzir trabalho a partir dela. Na realização de um trabalho real, a forma que a energia flui pode ser mais determinante do que a quantidade, ou seja, a efetividade da energia mecânica realizar trabalho é fortemente determinada pelo produto duração x intensidade do fluxo dessa energia.

### Efetividade do regime do fluxo de energia

Uma determinada quantidade de energia pode fluir intensamente apenas por curto período de tempo. Ela poderia ser, então, apesar de por pouco tempo, muito efetiva em realizar trabalho mecânico. Já no caso de fluir durante longos períodos, sua intensidade pode ser insuficiente para realizar trabalho útil.

Na produção de trabalho em processo muito afastado do equilíbrio termodinâmico, como é a produção de sedimento, o regime de fluxo de energia pode ser tão ou mais importante do que sua quantidade. Quanto mais aproximado de estado estacionário puder operar o sistema, maior será sua efetividade na conversão de energia em trabalho útil.

Pelas mesmas razões, a energia encerrada na água revela-se tanto mais efetiva em produzir erosão quanto mais essa água fluir de forma a manter elevado o produto entre intensidade e duração do fluxo. Por isso é aqui proposto um coeficiente de efetividade do regime do fluxo de energia a partir da água de uma chuva como expressão do produto de dois quocientes: a soma de tempos de precipitação real ( $t_{\text{eventos}}$ ) dividida por todo o tempo ao longo do qual ocorrem eventos considerados de uma mesma chuva ( $t_{\text{total}}$ ), e a intensidade média ponderada  $i_{\text{mp}}$  de precipitação em cada evento, dividida pela intensidade máxima  $i_{\text{max}}$  de precipitação pluvial no evento correspondente. Tem-se então,

$$R = \frac{t_{\text{eventos}}}{t_{\text{total}}} \left( \frac{i_{\text{mp}}}{i_{\text{max}}} \right)_{\text{ponderado}} \quad (13)$$

em que o conjunto de coeficientes  $(i_{\text{mp}}/i_{\text{max}})$  resulta em um único coeficiente  $(i_{\text{mp}}/i_{\text{max}})_{\text{ponderado}}$ , ponderado pelo tempo total de eventos, e  $R$  é coeficiente redutor de efetividade decorrente do regime de fluxo de energia encerrada na água que incide e pode escoar sobre o solo.

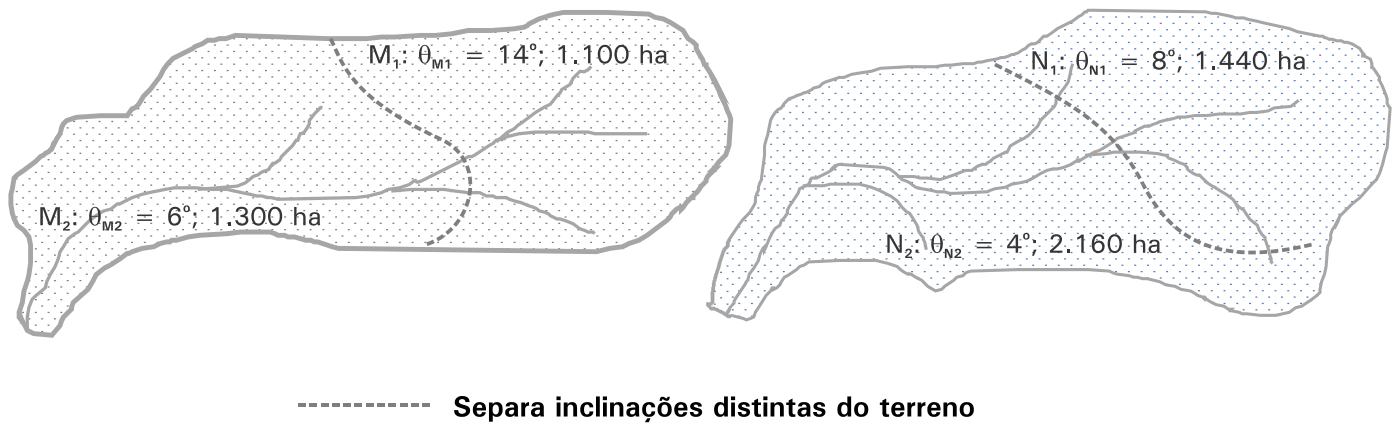
Incorporando a equação (13) à equação (12), e substituindo em (2),

$$\beta = \frac{Ws}{(EcC + Ma g L \text{sen}^2\theta) R} \quad (14)$$

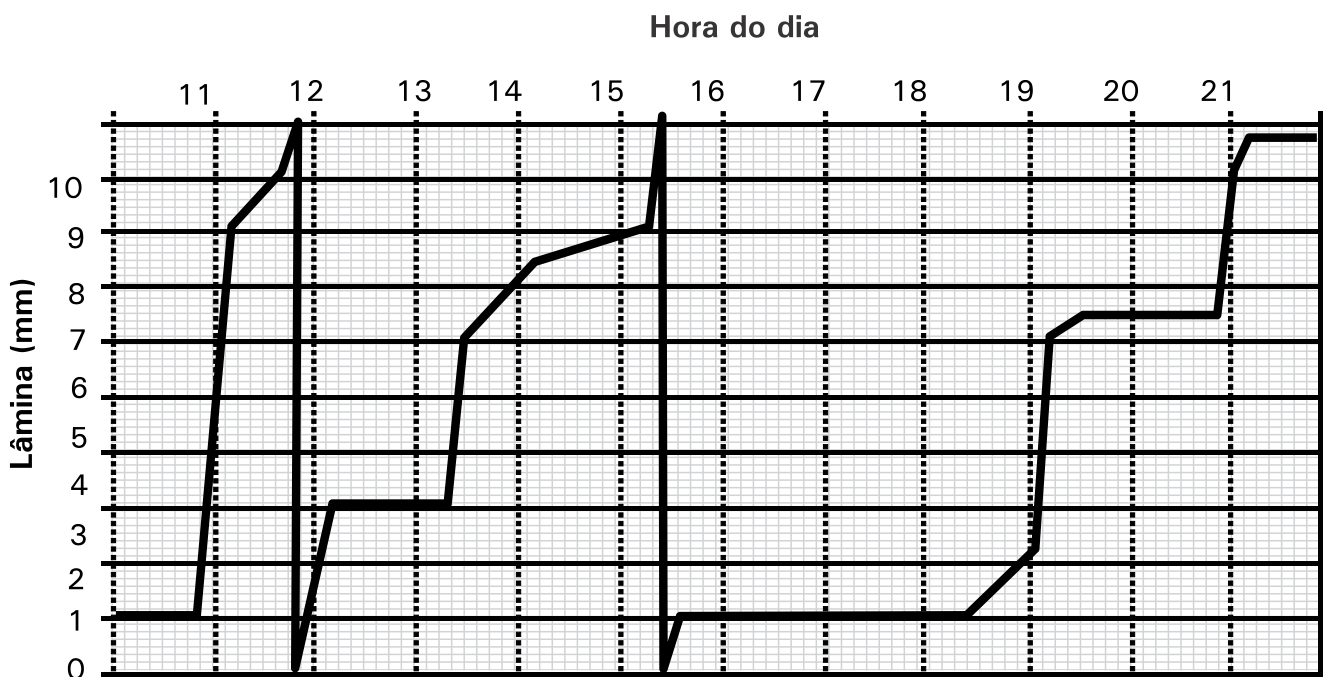
em que  $Ws$  é trabalho (J) correspondente ao sedimento carregado até cursos d'água,  $EcC$  é energia cinética da chuva (J),  $Ma$  é massa (kg) de água potencialmente passível de escoar superficialmente,  $g$  é a aceleração gravitacional ( $\text{m s}^{-2}$ ),  $L$  é comprimento médio (m) do trajeto de escoamento sobre o solo,  $\theta$  é inclinação média do terreno,  $R$  (adimensional) é termo de efetividade do regime do fluxo de energia, e  $\beta$  é coeficiente ( $\text{J J}^{-1}$ ) de efetividade de conversão de potencial energético em resultado produção de sedimentos.

### Exemplo ilustrativo

Valores de IDE (equação 3) são aqui obtidos para situações simuladas a fim de facilitar a exposição da proposição. As bacias hidrográficas M e N da Figura 3 são submetidas a uma chuva com eventos caracterizados no pluviograma representado na Figura 4.



**Figura 3.** Bacias hidrográficas cujas características implicam em diferentes potenciais energéticos para a produção de sedimentos a partir de mesmo regime pluviométrico.



**Figura 4.** Regime de chuva (pluviograma) ao longo de um período total ( $t_{total}$ ) de 630 minutos.

A bacia hidrográfica M possui área ( $A_M$ ) de 2.400 ha, sendo 1.100 ha com inclinação  $\theta_{M1}$  de  $14^\circ$  e 1.300 ha com inclinação  $\theta_{M2}$  de  $6^\circ$ . A bacia hidrográfica N possui área ( $A_N$ ) de 3.600 ha, sendo 1.440 ha com inclinação  $\theta_{N1}$  de  $8^\circ$  e 2.160 ha com inclinação  $\theta_{N2}$  de  $4^\circ$ .

Assume-se, ainda, que a densidade de drenagem dos sistemas é de  $1,50 \text{ km km}^{-2}$  e de  $1,31 \text{ km km}^{-2}$  para o sistema M e N, respectivamente. Então, de acordo com a equação (5), o comprimento médio  $L$  dos planos sobre os quais o sedimento é carreado até curso d'água é:

$$L_M = \frac{2.400 \times 10^4 \text{ m}^2}{4 (1,50 \times 24 \times 10^3 \text{ m})} \cong 167 \text{ m} \quad \text{e} \quad L_N = \frac{3.600 \times 10^4 \text{ m}^2}{4 (1,31 \times 36 \times 10^3 \text{ m})} \cong 191 \text{ m}$$

enquanto que a inclinação média  $\theta$  é:

$$\theta_M = \frac{(14 \times 1.100) + (6 \times 1.300)}{2.400} \quad \text{e} \quad \theta_N = \frac{(8 \times 1.440) + (4 \times 2.160)}{3.600}$$

em que

$$\theta_M = 9,7^\circ \quad \text{e} \quad \theta_N = 5,6^\circ$$

### Energia cinética da chuva ( $E_cC$ )

Os dados na Tabela 1 são obtidos a partir do processamento de dados do pluviograma na Figura 4 aplicados à equação de (WISCHMEIER; SMITH, 1978).

**Tabela 1.** Distribuição temporal e energia cinética de uma chuva ( $E_cC$ )\*.

Evento	Lâmina (cm)	Duração (min)	Intensidade (cm h <sup>-1</sup> )	$E_cC$ (MJ ha <sup>-1</sup> )	$E_cC_M$ (MJ)	$E_cC_N$ (MJ)
1	0,70	20	2,10	1,639	3.935	5.902
	0,10	30	0,20	0,145	348	522
	0,40	30	0,80	0,791	1.897	2.846
2	0,30	10	1,80	0,685	1.644	2.466
	0,14	40	0,21	0,206	494	741
	0,06	70	0,05	0,056	135	202
	0,30	20	0,90	0,606	1.455	2.183
3	0,12	40	0,18	0,169	406	610
	0,38	10	2,28	0,902	2.164	3.246
	0,04	20	0,12	0,050	121	181
4	0,26	10	1,56	0,580	1.391	2.087
	0,06	10	0,36	0,100	241	362
<b>Total</b>	<b>2,86</b>	<b>310</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>14.231</b>	<b>21.348</b>

\* A energia cinética em t m ha<sup>-1</sup> cm<sup>-1</sup> de chuva é obtida pela equação  $210,3 + 89 \log(i)$ , em que  $i$  é a intensidade da chuva em cm h<sup>-1</sup> (WISCHMEIER; SMITH, 1978). O resultado é multiplicado por 0,0098 para transformar em MJ ha<sup>-1</sup>.

### Energia cinética máxima possível no escoamento ( $E_cE$ )

A energia cinética potencialmente possível a partir de escoamento sobre plano perfeitamente liso, como apontado na equação (7), é produto da energia implicada em massa de água ( $Ma$ ), sob a ação da gravidade, e situada em altura média  $h$ . A partir da lâmina de precipitação pluviométrica, da área e da massa específica da água, obtém-se  $Ma$ . Já do comprimento médio  $L$  e da inclinação  $\theta$ , obtém-se  $h$ . A partir da mesma inclinação  $\theta$ , define-se o respectivo coeficiente de propensão  $\mu$  de conversão de coordenadas mecânicas. Ou seja:

$$E_cE_M = 0,0286 \times 24 \times 10^6 \times 10^3 \times 9,8 \times 167 \times \text{sen}^2 9,7 = 31.891 \text{ MJ}$$

e

$$E_cE_N = 0,0286 \times 36 \times 10^6 \times 10^3 \times 9,8 \times 191 \times \text{sen}^2 5,6 = 18.352 \text{ MJ}$$

## Trabalho ( $Ws$ ): a produção de sedimentos

Considere-se que as duas bacias hidrográficas  $M$  e  $N$  sejam submetidas a sete manejos distintos em relação à efetividade em controlar a produção de sedimentos (Tabela 2). A quantidade de sedimentos é estimada na saída da bacia hidrográfica. Supõe-se, por isso, que essa quantidade é, ao final de períodos adequados à avaliação, equivalente à quantidade de sedimentos produzidos no interior da bacia hidrográfica. A quantidade de trabalho correspondente (equação 4) é apresentada na mesma Tabela 2.

**Tabela 2.** Produção de sedimentos e trabalho mecânico correspondente, produzidos a partir de 2,86 cm de chuva, em duas bacias hidrográficas hipotéticas submetidas a sete manejos distintos.

Manejo	Bacia hidrográfica $M$ (2.400 ha)		Bacia hidrográfica $N$ (3.600 ha)	
	Sedimento* ( $10^3$ kg)	Trabalho (MJ)	Sedimento ( $10^3$ kg)	Trabalho (MJ)
A	26,57	42,86	33,21	61,86
B	53,14	85,73	66,42	123,73
C	79,71	128,59	99,63	185,60
D	106,28	171,45	132,84	247,46
E	132,85	214,31	166,05	309,33
F	159,42	257,18	199,26	371,19
G	185,99	300,04	232,47	433,06

\* Quantidade simulada para bem distinguir a efetividade de manejos.

## Coefficiente efetividade do regime de energia

Assume-se que, antes e depois do período considerado no pluviograma da Figura 4, não ocorreram eventos associados à mesma chuva. Portanto, o tempo de eventos  $t_{\text{eventos}}$  e o tempo total  $t_{\text{total}}$  foram, respectivamente, iguais a 310 minutos e a 630 minutos. O quociente entre  $t_{\text{eventos}}$  e  $t_{\text{total}}$  é, assim, igual a 0,49. Para a obtenção do quociente entre  $i_{\text{imp}}$  e  $i_{\text{max}}$  nos quatro eventos, procede-se:

$$i_{\text{imp1}} = \frac{(2,10 \times 20) + (0,20 \times 30) + (0,80 \times 30)}{80} = 0,90 \quad \therefore$$

$$\left( \frac{i_{\text{imp}}}{i_{\text{max}}} \right)_1 = \frac{0,90}{2,10} = 0,43$$

$$i_{\text{imp2}} = \frac{(1,80 \times 10) + (0,21 \times 40) + (0,05 \times 70) + (0,90 \times 20)}{140} = 0,34 \quad \therefore$$

$$\left( \frac{i_{\text{imp}}}{i_{\text{max}}} \right)_2 = \frac{0,34}{1,80} = 0,19$$

$$i_{\text{imp3}} = \frac{(0,18 \times 40) + (2,28 \times 10) + (0,12 \times 20)}{70} = 0,46 \quad \therefore$$

$$\left( \frac{i_{\text{imp}}}{i_{\text{max}}} \right)_3 = \frac{0,46}{2,28} = 0,20$$

$$i_{\text{imp}4} = \frac{(1,56 \times 10) + (0,36 \times 10)}{20} = 0,96 \quad \therefore$$

$$\left( \frac{i_{\text{imp}}}{i_{\text{max}}} \right)_4 = \frac{0,96}{1,56} = 0,62$$

Assim,

$$\left( \frac{i_{\text{imp}}}{i_{\text{max}}} \right)_{\text{ponderado}} = \frac{(0,43 \times 80) + (0,19 \times 140) + (0,20 \times 70) + (0,62 \times 20)}{310} = 0,28$$

e, portanto,

$$R = 0,49 \times 0,28 = 0,137$$

### Índice de dissipação de erosividade (IDE)

Os coeficientes de efetividade energética na produção de sedimento (equação 14) para os manejos A, B, C, D, E, F e G na bacia hidrográfica *M* são:

$$\beta_{\text{MA}} = \frac{42,86}{(14.231 + 31.891) 0,137} = 0,68 \times 10^{-2}$$

$$\beta_{\text{MB}} = \frac{85,73}{(14.231 + 31.891) 0,137} = 1,36 \times 10^{-2}$$

$$\beta_{\text{MC}} = \frac{128,59}{(14.231 + 31.891) 0,137} = 2,04 \times 10^{-2}$$

$$\beta_{\text{MD}} = \frac{171,45}{(14.231 + 31.891) 0,137} = 2,71 \times 10^{-2}$$

$$\beta_{\text{ME}} = \frac{214,31}{(14.231 + 31.891) 0,137} = 3,39 \times 10^{-2}$$

$$\beta_{\text{MF}} = \frac{257,18}{(14.231 + 31.891) 0,137} = 4,07 \times 10^{-2}$$

$$\beta_{\text{MG}} = \frac{300,04}{(14.231 + 31.891) 0,137} = 4,75 \times 10^{-2}$$

Da mesma forma, os coeficientes de efetividade energética na produção de sedimento (equação 14) para os manejos A, B, C, D, E, F e G na bacia hidrográfica *N* são:

$$\beta_{\text{NA}} = \frac{61,86}{(21.348 + 18.352) 0,137} = 1,14 \times 10^{-2}$$



$$\beta_{NB} = \frac{123,73}{(21.348 + 18.352) 0,137} = 2,27 \times 10^{-2}$$

$$\beta_{NC} = \frac{185,60}{(21.348 + 18.352) 0,137} = 3,41 \times 10^{-2}$$

$$\beta_{ND} = \frac{247,46}{(21.348 + 18.352) 0,137} = 4,55 \times 10^{-2}$$

$$\beta_{NE} = \frac{309,33}{(21.348 + 18.352) 0,137} = 5,69 \times 10^{-2}$$

$$\beta_{NF} = \frac{61,86}{(21.348 + 18.352) 0,137} = 6,82 \times 10^{-2}$$

$$\beta_{NG} = \frac{433,06}{(21.348 + 18.352) 0,137} = 7,96 \times 10^{-2}$$

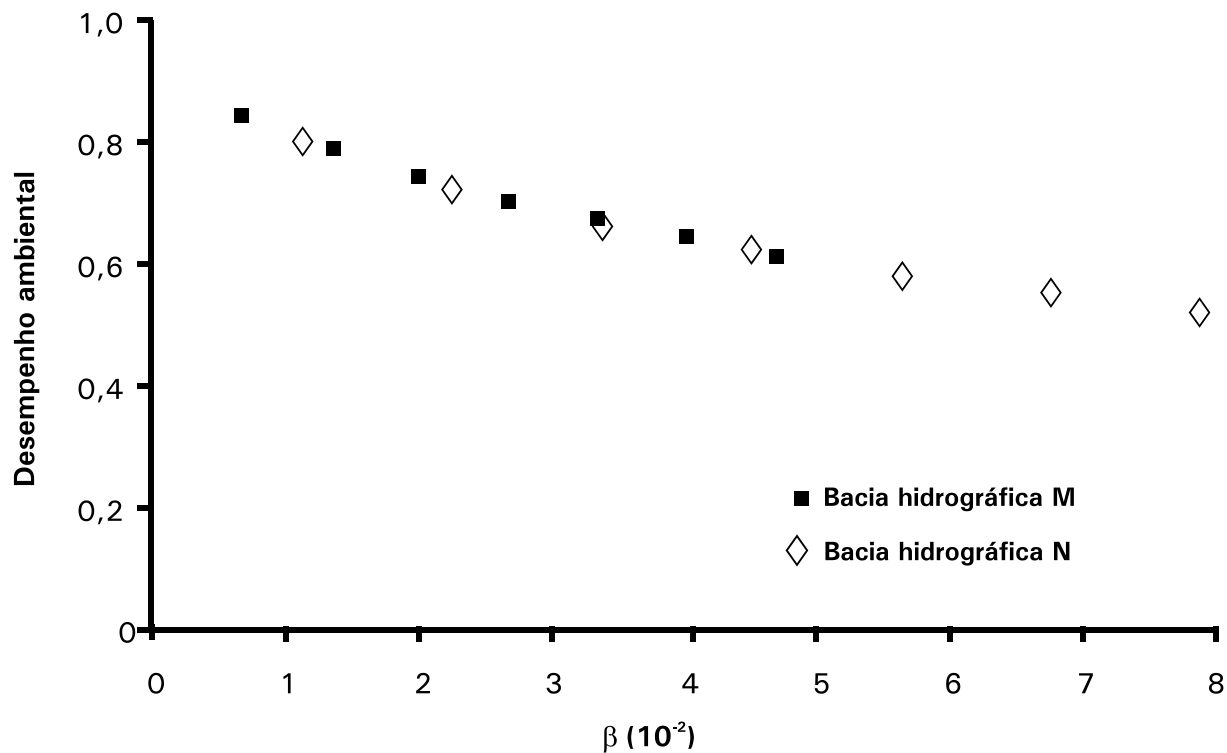
Assim, assumindo valor 2 para  $v$  (equação 3), obtém-se os correspondentes valores de  $\beta$  e de IDE, apresentados na Tabela 3 e entre si comparáveis na Figura 5. Esses resultados são muito conformes com as relações entre coeficientes de conversão de energia em trabalho erosivo e desempenho ambiental, conceitualmente ilustrados na Figura 2.

**Tabela 3.** Coeficiente de efetividade energética na produção de sedimentos ( $\beta$ ) e Índice de Dissipação de Erosividade (IDE) para os manejos A, B, C, D, E, F e G nas bacias hidrográficas hipotéticas M e N.

Manejo	Bacia hidrográfica M		Bacia hidrográfica N	
	$\beta_M$ (J J <sup>-1</sup> )*	IDE <sub>M</sub> **	$\beta_N$ (J J <sup>-1</sup> )*	IDE <sub>N</sub> **
A	$0,68 \times 10^{-2}$	0,84	$1,14 \times 10^{-2}$	0,80
B	$1,36 \times 10^{-2}$	0,78	$2,27 \times 10^{-2}$	0,72
C	$2,04 \times 10^{-2}$	0,74	$3,41 \times 10^{-2}$	0,66
D	$2,71 \times 10^{-2}$	0,70	$4,55 \times 10^{-2}$	0,62
E	$3,39 \times 10^{-2}$	0,67	$5,69 \times 10^{-2}$	0,58
F	$4,07 \times 10^{-2}$	0,64	$6,82 \times 10^{-2}$	0,55
G	$4,75 \times 10^{-2}$	0,61	$7,96 \times 10^{-2}$	0,52

\* $\beta_M$  e  $\beta_N$  são coeficiente de efetividade energética na produção de sedimentos.

\*\*IDE<sub>M</sub> e IDE<sub>N</sub> são Índices de Dissipação de Erosividade.



**Figura 5.** Índice de Dissipação de Erosividade (IDE) nas bacias hidrográficas M e N, em função da efetividade ( $\beta$ ) da energia contida na água da chuva e do escoamento superficial.

## Considerações finais e conclusão

Nas condições simuladas para obtenção de valores de Índice de Dissipação de Erosividade (IDE), a produção de sedimentos por unidade de área na bacia hidrográfica M foi 20% superior ao da bacia hidrográfica N. O controle do processo de conversão do potencial energético (E) em resultado produção de sedimentos (Ws), refletido nos valores de IDE, é sempre maior na bacia hidrográfica M para o manejo correspondente. Na forma como as relações são sistematizadas na obtenção do IDE, o resultado Ws é tomado e avaliado sempre em relação ao potencial energético disponível para sua produção. O potencial energético disponível por unidade de área é maior na bacia hidrográfica M do que na bacia hidrográfica N. Em outras palavras, é mais difícil controlar a erosão na bacia hidrográfica M.

O IDE é, portanto, e para além de um objetivo índice de transformação de potencial energético em trabalho, uma justa e objetiva referência ao desempenho de quem pode afetar significativamente aquela transformação. Coerente com o conteúdo comportamental humano na questão ambiental, tão importante quanto sua correção técnica, procedimentos na avaliação do desempenho ambiental necessitam ser justos, ou seja, levar em conta as condições sob as quais humanos desempenham.

O IDE é um índice que permite distinguir desempenhos levando em conta as características não manejáveis do meio. A distinção individual, quando justa, move o ser humano a desempenhar, cada vez melhor, em ações que beneficiam o coletivo. Em outras palavras, a intenção encerrada no IDE é voltada à promoção de justo reconhecimento daqueles que, adotando quaisquer e suficientes procedimentos, efetivamente controlam o processo que, em grande parte, quase todos já saberiam como reduzir significativamente. Enfim, a insuficiência no controle da erosão não é tanto produto de falta de conhecimento, quanto o é de insuficiente motivação para adotar procedimentos que já se sabe serem efetivos.

## Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Manual operativo do Programa Produtor de Água**. 2 ed. Brasília, DF, 2012. 84 p. Disponível em: <[http://produtordeagua.ana.gov.br/Portals/0/DocsDNN6/documentos/Manual%20Operativo%20Vers%C3%A3o%202012%20%2001\\_10\\_12.pdf](http://produtordeagua.ana.gov.br/Portals/0/DocsDNN6/documentos/Manual%20Operativo%20Vers%C3%A3o%202012%20%2001_10_12.pdf)>. Acesso em: 12/04/2017.
- CHAVES, H. M. L.; BRAGA JR, B.; DOMINGUES, A. F.; SANTOS, D. G. Quantificação dos benefícios e compensações do “Programa do Produtor de Água” (ANA): I. Teoria. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 9, n. 3, p. 5-14, 2004a.
- CHAVES, H. M. L.; BRAGA JR, B.; DOMINGUES, A. F.; SANTOS, D. G. Quantificação dos benefícios e compensações do “Programa do Produtor de Água” (ANA): II. Aplicação. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 9, n. 3, p. 15-21, 2004b.
- D’AGOSTINI, L. R. **Erosão: o problema mais que o processo**. Florianópolis: Edufsc, 1999. 131 p.
- KOWAL, J. M.; KASSAM, A. H. Energy load and instantaneous intensity of rainstorms at Samuru, Northern Nigeria. In: GREENLAND, D. J.; LAL, R. **Soil conservation and management in the humid tropics**. Chicester: J. Wiley, 1979. 283 p.
- MARTINI, L. C.; LANNA, A. E. Medidas compensatórias aplicáveis à questão da poluição hídrica de origem agrícola. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 9, n. 1, p. 111-136, 2003.
- VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw Hill, 1975. 245 p.
- WISCHMEIER, W.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning**. Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, 1978. 58 p. (Supersedes Agriculture Handbook, n. 282). Disponível em: <<https://naldc.nal.usda.gov/download/CAT79706928/PDF>>. Acesso em: 10/04/2017.

**Embrapa**  

---

**Trigo**