

## ESTIMATIVA DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL COM BASE NA EQUAÇÃO DE CHUVAS INTENSAS DO TIPO LNLN

ÁLVARO JOSÉ BACK<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Engenheiro Agrônomo, Dr. Engenharia, Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (Epagri), Estação Experimental de Urussanga, Fone 55(48)34031382, e-mail ajb@epagri.sc.gov.br

Apresentado no  
L Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2021  
08 a 10 de novembro de 2021 - Congresso On-line

**RESUMO:** A simulação do escoamento superficial é importante na modelagem de vários processos hidrológicos com aplicação na engenharia agrícola. A estimativa da lâmina de escoamento superficial pelo método do balanço de água no solo, desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos da Universidade Federal de Viçosa, é baseada na equação IDF. Este trabalho teve como objetivo adaptar a metodologia para uso em locais com a equação do tipo LnLn. Foram apresentadas as equações para estimativa da intensidade máxima instantânea da chuva e demais adaptações para estimativa da lâmina de escoamento superficial. Com base nas equações de chuvas intensas de Piracicaba, considerando solos com taxa de infiltração básica de 10 e 40 mm.h<sup>-1</sup>, foram apresentados os valores do método do balanço de água no solo. Os resultados mostraram que as diferenças obtidas se devem apenas aos erros na estimativa da intensidade da chuva devido ao método de ajuste dos parâmetros das equações de chuvas intensas e que as equações apresentadas neste artigo possibilitam o emprego do método de estimativa da lâmina máxima de escoamento superficial baseada no balanço hídrico da superfície para locais com a equação do tipo LnLn.

**PALAVRAS-CHAVE:** terraços; hidrologia; modelagem hidrológica

## ESTIMATING SURFACE FLOW BASED ON THE EQUATION OF HEAVY RAIN TYPE LNLN

**ABSTRACT:** Runoff simulation is important in modeling various hydrological processes with application in agricultural engineering. The estimate of the surface runoff by the soil water balance method, developed by the Research Group on Water Resources at the Federal University of Viçosa, is based on the IDF equation. This work aimed to adapt the methodology for use in locations with the LnLn-type equation. The equations for estimating the maximum instantaneous rainfall intensity and other adaptations for estimating the surface runoff were presented. Based on the intense rainfall equations of Piracicaba, considering soils with a basic infiltration rate of 10 and 40 mm.h<sup>-1</sup>, the values of the soil water balance method were presented. The results showed that the differences obtained are due only to errors in the estimation of rainfall intensity due to the method of adjusting the parameters of the intense rainfall equations and that the equations presented in this article allow the use of the maximum flow depth estimation method. surface water balance for sites with the LnLn type equation

**KEYWORDS:** terraces; hydrology; hydrological modeling

**INTRODUÇÃO:** A estimativa do escoamento superficial é importante na simulação de vários processos hidrológicos, tais como para a geração de hidrogramas de cheias, estimativa do volume de escoamento, dimensionamento de sistema de drenagem e dimensionamento de terraços (ALMEIDA *et al.* 2016). Nos modelos hidrológicos o escoamento superficial pode ser estimado com base as características das chuvas intensas do local, que por sua vez podem ser descritas pelas relações entre as grandezas Intensidade, Duração e Frequência, denominadas relações IDF. Essas relações podem ser expressas por meio de curvas IDF ou equações IDF. GRIEBELER *et al.* (2005) destacam que as equações IDF são importantes para o dimensionamento de obras de drenagem e de estruturas de controle de erosão. Algumas metodologias e alguns programas de cálculo da vazão de escoamento superficial baseiam-se na equação IDF representativa do local. PRUSKI *et al.* (1997) desenvolveram uma metodologia para determinar o volume de escoamento superficial baseado no balanço hídrico da superfície, que é empregada nos softwares para dimensionamento de terraços e para o cálculo das bacias de detenção em estradas (PRUSKI *et al.*, 1996; SILVA, 2011). Vários trabalhos mostram vantagens desta metodologia para estimativa de escoamento superficial comparada a outros métodos (PRUSKI *et al.*, 1997; PRUSKI *et al.*, 2001; ALMEIDA *et al.*, 2016). Uma limitação ao uso do método desenvolvido por PRUSKI *et al.* (1997) é a dependência das equações de chuvas intensas no modelo IDF. Embora as equações de chuvas intensas do modelo IDF sejam as mais usadas o Brasil e vários outros países (BACK & CADORIN, 2021), existem outros modelos de equação de chuvas intensas, ou mesmo outros métodos de obtenção de chuvas intensas pela desagregação da chuva diária (ARAGÃO *et al.*, 2013, RANGEL & HARTWIG, 2017; BACK, 2020). BACK *et al.* (2020) adaptaram o método de estimativa do escoamento superficial desenvolvido por PRUSKI *et al.* (1997) para ser aplicado ao modelo alternativo de equação de chuvas intensas baseado na desagregação da chuva máxima diária. No Estado de São Paulo é comum uso de um modelo de equação de chuvas intensas denominado tipo LnLn (MAGNI, 1984; MARTINEZ JUNIOR & MAGNI, 1999, 2014; MARTINS *et al.*, 2017). DAEE (1982) determinou as equações de chuvas intensas para o estado de São Paulo do tipo LnLn. Mais recentemente, DAEE (2018) apresentou a atualização de equações de chuvas intensas de 75 estações pluviográficas do Estado de São Paulo, usando equações no modelo LnLn. Nos locais onde somente se dispõe deste modelo de equação há dificuldade de aplicar os métodos de dimensionamento de estruturas de drenagem ou os programas que se baseiam no método do balanço hídrico da superfície. Dessa forma, este trabalho teve como objetivo adaptar e aplicar o método do balanço de água no solo para estimativa do escoamento superficial nos locais com as equações de chuvas intensas do tipo LnLn.

**MATERIAL E MÉTODOS:** O modelo de balanço de água na superfície do solo para a estimativa do volume máximo de escoamento superficial, foi descrito PRUSKI *et al.* (1997) pela equação:

$$R = P - I_a - L - E_v \quad (1)$$

em que:

R = lâmina de escoamento superficial máximo, mm;

P = precipitação total, mm;

I<sub>a</sub> = abstrações iniciais, mm;

L = infiltração de água no solo acumulada, mm; e

E<sub>v</sub> = evaporação, considerada nula, mm.

Na adaptação do método foi considerado o formato da equação para estimativa da intensidade máxima média das chuvas no modelo LnLn, dada por:

$$I_m = A(t + B)^C + D (t + E)^F \left[ G + H \ln \left( \ln \left( \frac{T}{T-1} \right) \right) \right] \quad (2)$$

Em que:

$I_m$  = intensidade média máxima (mm min<sup>-1</sup>);

$T$  = período de retorno (anos);

$t$  = duração da chuva (minutos);

A, B, C, D, E, F, G, H, coeficientes da equação a ser ajustada para cada local.

Foi utilizada equação de chuvas intensas de Piracicaba, SP (DAEE, 2018), dada por:

$$I_m = 44,52(t + 30)^{-0,8972} + 23,53 (t + 40)^{-0,9506} \left[ -0,4847 - 0,6062 \ln \left( \ln \left( \frac{T}{T-1} \right) \right) \right] \quad (3)$$

Em que:

$I_m$  = intensidade média máxima (mm min<sup>-1</sup>);

$T$  = período de retorno (anos);

$t$  = duração da chuva (minutos);

A, B, C, D, E, F, G, H, coeficientes da equação a ser ajustada para cada local.

Para a comparação do método foi ajustada a equação IDF a partir das estimativas de chuvas intensas obtidas com a equação LnLn, considerando período de retorno de 2 a 200 anos e duração de 10 a 1440 minutos, conforme usado por DAEE (2018). A equação ajustada foi

$$I_m = \frac{2787,15T^{0,211}}{(t+33,60)^{0,9169}} \quad (4)$$

Em que:

$I_m$  = intensidade média máxima (mm min<sup>-1</sup>);

$T$  = período de retorno (anos);

$t$  = duração da chuva (minutos).

Para a aplicação do método foram consideradas duas condições de taxa de infiltração básica (TIB), respectivamente 10 e 40 mm h<sup>-1</sup>.

**RESULTADOS E DISCUSSÃO:** Derivando a equação (2) em relação ao tempo obtém-se a equação para estimativa da intensidade máxima instantânea dada por:

$$I_i = AC(t + B)^{C-1} + DF(t + E)^{F-1} \left[ G + H \ln \left( \ln \left( \frac{T}{T-1} \right) \right) \right] + I_m \quad (5)$$

Em que:

$I_i$  = intensidade máxima instantânea (mm min<sup>-1</sup>);

$I_m$  = intensidade média máxima (mm min<sup>-1</sup>);

$T$  = período de retorno (anos);

$t$  = duração da chuva (minutos);

A, B, C, D, E, F, G, H, coeficientes da equação a ser ajustada para cada local.

Pruski et al. (1997) demonstraram que tanto  $I_m$  como  $I_i$  diminuem com o aumento da duração da chuva ( $t$ ), sendo o a lâmina de escoamento superficial máxima (LES) correspondente ao instante em que  $I_i$  iguala a taxa de infiltração de água no solo (TIB). Para essa condição, têm-se:

$$I_i60 - TIB = 0 \quad (6)$$

Que pode ser resolvida pelo método Newton-Raphson ou iniciando com pequeno valor de  $t$  e acrescentando pequenos incrementos no tempo até que  $I_i \leq TIB$ .

No balanço hídrico (equação 1) as abstrações iniciais ( $I_a$ ) são calculadas por meio do método Soil Conservation Service (SCS, 1972). Pruski *et al.* (1997) estabeleceram os valores de CN de acordo com o valor da taxa de infiltração básica de água no solo (TIB). O tempo correspondente à ocorrência das abstrações iniciais é obtido por meio da equação:

$$T_{Ia} = \frac{I_a}{I_m} 60 \quad (7)$$

em que:

$T_{Ia}$  é o intervalo de tempo compreendido entre o início da chuva e o início do escoamento superficial, em minutos.

A infiltração acumulada é calculada por meio da equação:

$$L = \frac{TIB T_{inf}}{60} \quad (8)$$

em que  $T_{inf}$  é duração da infiltração (min), a qual é obtida empregando-se:

$$T_{inf} = t - T_{Ia} \quad (9)$$

Uma vez determinados os valores de P,  $I_a$  e L para a duração da precipitação obtida pela equação 6, obtém-se o valor de R pela equação 1. Na Tabela 1 constam os valores dos parâmetros do balanço hídrico estimados com os dois métodos analisados.

TABELA 1. Resultados do balanço hídrico superficial calculado com a equação intensidade-duração-frequência - IDF e com a equação de chuvas intensas tipo LnLn. **Results of the surface water balance calculated with the intensity-duration-frequency equation - IDF and with the intense rainfall equation type LnLn**

Parâmetros do modelo do balanço de água na superfície do solo	Característica do solo			
	TIB de 10 mm.h <sup>-1</sup>		TIB de 40 mm.h <sup>-1</sup>	
	Equação IDF	Equação LnLn	Equação IDF	Equação LnLn
$I_a$ – Abstrações iniciais (mm)	1,6	1,6	3,2	3,2
$T_{Ia}$ – Duração da chuva para atingir as abstrações iniciais (min)	0,5	0,5	1,11	1,04
t – Duração da chuva para atingir o escoamento superficial máximo (min)	144,7	151,4	44,3	46,8
$I_m$ – Intensidade média máxima (mm.h <sup>-1</sup> )	39,1	40,0	83,6	85,9
P – Altura da chuva (mm)	94,3	100,9	61,7	67,0
L – Lâmina de infiltração (mm)	24,0	25,15	28,8	30,5
LES – Escoamento superficial máximo (mm)	68,7	74,21	29,6	33,2

Observa-se que os valores de abstrações iniciais foram 1,6 e 3,2 mm para os solos com TIB de 10 e 40 mm.h<sup>-1</sup>, respectivamente. Para solos com TIB de 10 mm.h<sup>-1</sup> o tempo para ocorrer o máximo de escoamento superficial foi de 144,7 min e 151,4 min, respectivamente para as equações dos modelos IDF e LnLn. O escoamento superficial estimado com a equação IDF foi de 68,7 mm e para a equação LnLn foi de 74,2 mm, o que representa uma diferença de 8,0%. Para solos com TIB de 40 mm.h<sup>-1</sup> as lâminas de escoamento superficial foram respectivamente de 26,6 e 33,2 mm, o que representa diferenças de 12,2%. Essas pequenas diferenças encontradas devem-se as diferenças nas estimativas das intensidades máximas médias por ambas as equações, que são resultados do método de ajuste dos parâmetros. Vários trabalhos

mostram que os métodos de ajuste dos coeficientes das equações de chuvas intensas determinam diferentes valores dos coeficientes das equações de chuvas intensas. Destaca-se que essas diferenças tendem a ser maiores para as menores durações de chuva. Dessa forma, alguns autores apresentam as equações de chuvas intensas válidas para durações maiores ou igual a 10 min, como foi o caso do DAEE (2018). Também deve-se destacar que a menor duração geralmente considerada na análise dos pluviogramas é de 5 min, e dessa forma, geralmente as equações de chuvas intensas são ajustadas para durações iguais ou superiores a 5 min. No método do balanço de água na superfície, para solos com baixa TIB, e consequentemente, alto valor de CN, o método adota baixos valores de abstrações iniciais ( $I_a$ ), e dessa forma os tempos de duração para atingir os valores de  $I_a$  são curtos. No exemplo em questão obteve-se os tempos de 0,5 a 1,1 minuto, bem inferiores aos limites da validade da equação de chuvas intensas. Essa observação não invalida o método, no entanto, destaca-se que estes valores podem estar envolvidos de certo grau de incerteza. Na Figura 1 observa-se a variação da intensidade média máxima e a intensidade instantânea da chuva ao longo da sua duração, para cada tipo de equação de chuva intensa. Fica evidenciado que  $I_m$  e  $I_i$  diminuem com o tempo de duração da chuva, conforme ressaltado por PRUSKI *et al.* (1997), e que a equação LnLn reproduz as características da equação IDF de tal forma que as diferenças no tempo para  $I_i$  igualar a TIB possa ser considerada insignificante.

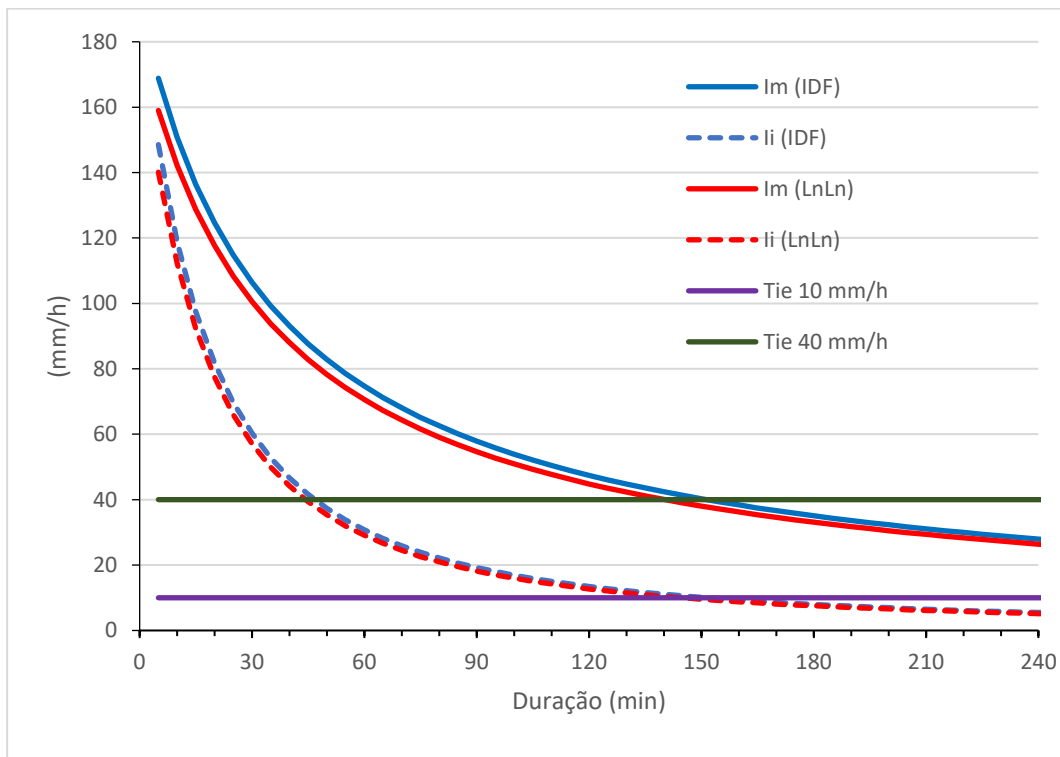


FIGURA 1. Intensidade média máxima ( $I_m$ ) e intensidade instantânea ( $I_i$ ) estimadas com a equação IDF e equação LnLn para Piracicaba, SP.

Nas Figura 2 e 3 estão representadas as alturas de precipitação total e a lâmina de escoamento superficial estimadas com os dois modelos de equação de chuvas intensas.

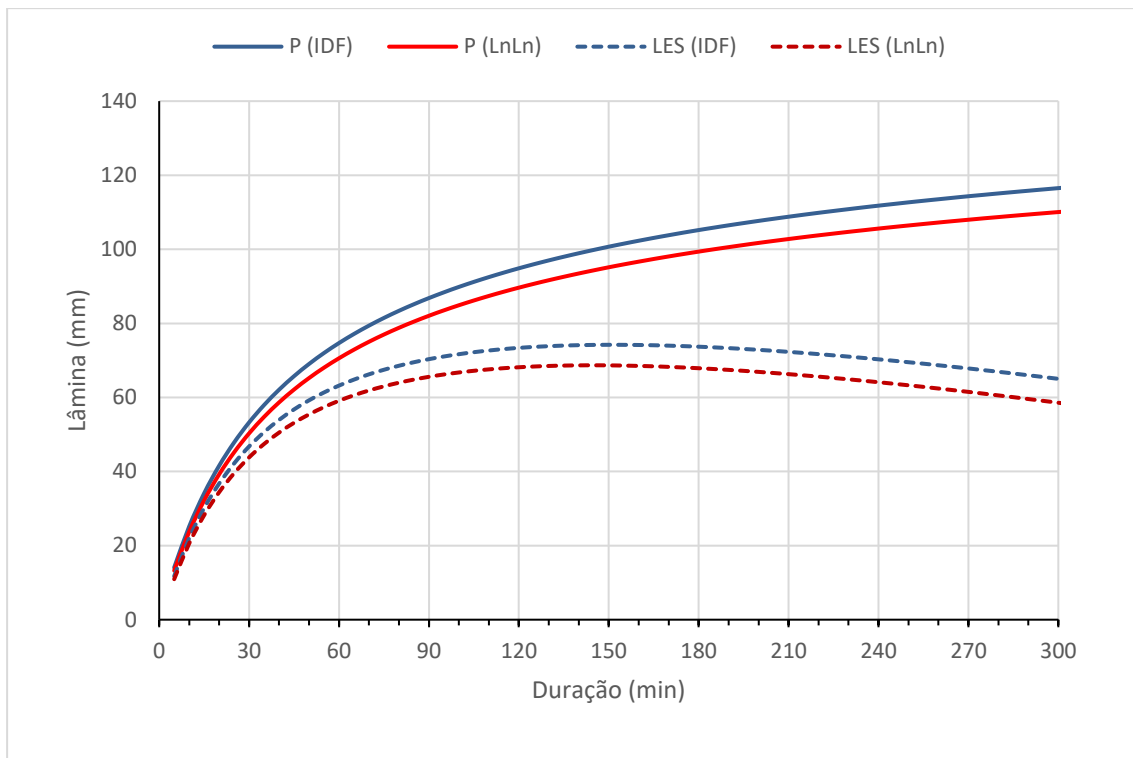


FIGURA 2. Precipitação total (P) e lâmina de escoamento superficial (R) estimadas com a equação IDF e equação LnLn para Piracicaba (SP) em solo com TIB de 10 mm.h<sup>-1</sup>.

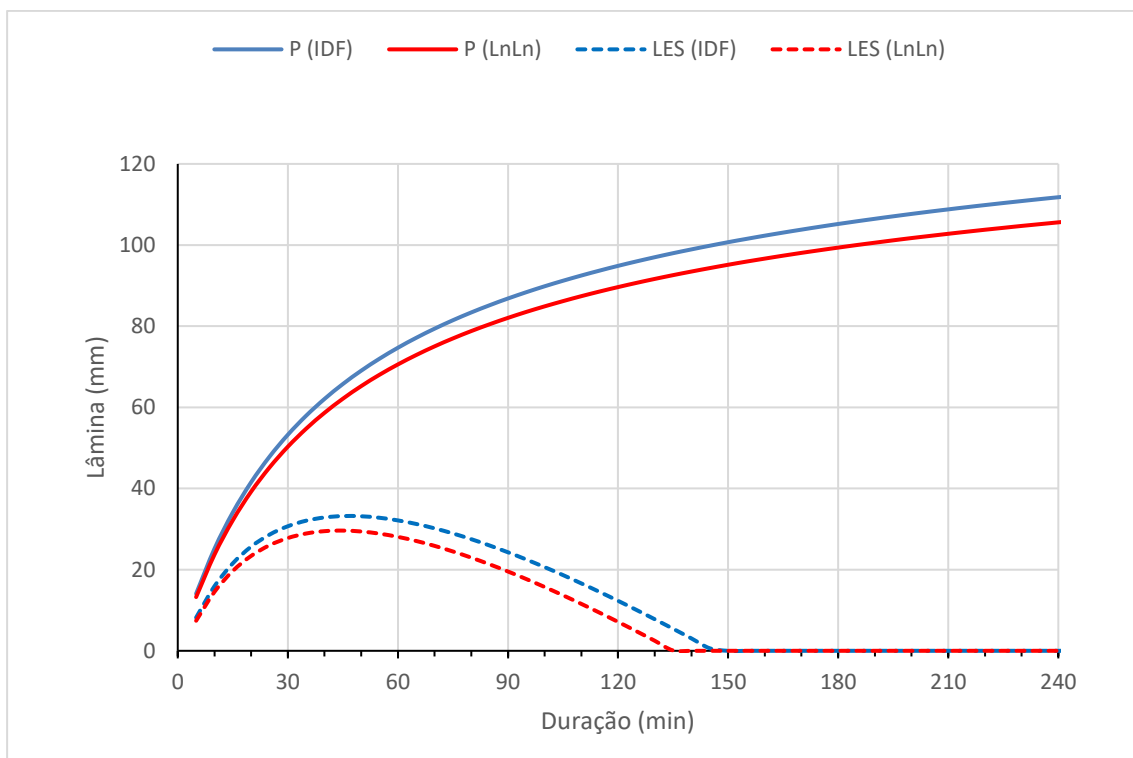


FIGURA 3. Precipitação total (P) e lâmina de escoamento superficial (R) estimadas com a equação IDF e equação LnLn para Piracicaba (SP) em solo com TIB de 40 mm.h<sup>-1</sup>.

A lâmina de escoamento superficial aumenta até atingir um valor máximo, passando a apresentar valores decrescentes. No solo com TIB de 40 mm h<sup>-1</sup> (Figura 2) pode-se observar que a duração da chuva onde ocorre o escoamento máximo é de aproximadamente 145 min para a equação IDF e 151 min para a equação LnLn. O valor a ser utilizado na modelagem hidrológica é o valor máximo (LES). Os valores obtidos com a equação LnLn estão coerentes com as hipóteses usadas na modelagem e com magnitudes semelhantes aos obtidos com a equação IDF. As diferenças observadas devem-se unicamente aos erros de estimativa da intensidade da chuva, que é decorrente do método de ajuste dos parâmetros das respectivas equações de chuvas intensas.

## CONCLUSÕES:

As equações apresentadas neste artigo permitem a utilização do método de estimativa da lâmina máxima de escoamento superficial baseada no balanço hídrico da superfície, para os locais em que estão disponibilizadas as equações de chuvas intensas do modelo LnLn.

## REFERÊNCIAS:

ALMEIDA, R.A.; ROSA, D.R.Q.; FERREIRA, R.G. Comparação entre diversas metodologias para a estimativa do escoamento superficial em uma pequena bacia hidrográfica. **Revista Científica Vozes dos Vales**, n.10, p.1-20, 2016.

ARAGÃO, R.; SANTANA, G. R.; COSTA, C. E. F. F.; CRUZ, M. A. S.; FIGUEIREDO, E. E.; SRINIVASAN, V. Chuvas intensas para o Estado de Sergipe com base em dados desagregados de chuva diária. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.3, p.243-252, 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662013000300001>

BACK, Á.J. Alternative model of intense rainfall equation obtained from daily rainfall disaggregation. **Revista Brasileira de Recursos Hídrico**, v.25, e.2, 2020; <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190031>

BACK, Á. J.; CADORIN, S. B. Heavy rain equations for Brazil. **International Journal of Development Research**, v.11, p.43332 - 43337, 2021.

BACK, Á. J.; WILDNER, L.P.; DENARDIN, J. E.; Surface runoff estimation based on the intense rainfall equation obtained by Disaggregating daily rainfall. **International Journal of Development Research**, v.10,n.12, p. 43070-43074, , 2020

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS D ENERGIA ELÉTRICA. CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS. **Precipitações intensas no Estado de São Paulo: apresentação prática das relações precipitação x duração x tempo de retorno obtidas para 11 cidades**. São Paulo: DAEE/CTH, 1982. 187p.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS. **Precipitações Intensas no estado de São Paulo**. 2018. 270 p.

GRIEBELER, N. P.; PRUSKI, F. F.; MARTINS JÚNIOR, D.; SILVA, D. D. Avaliação de um modelo para estimativa da lâmina máxima de escoamento superficial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.411-417, 2001

MAGNI, N. L. G. **Estudo pontual de chuvas intensas - proposição e análise de uma metodologia de estudo das relações intensidade duração frequência definidas para um**

**ponto.** 1984. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1984.

MARTINEZ JÚNIOR, F.; MAGNI, N. L. G. **Equações de chuvas intensas do Estado de São Paulo.** São Paulo: DAEE; EPUSP, 1999.

MARTINEZ JÚNIOR, F.; MAGNI, N. L. G. **Precipitações intensas no Estado de São Paulo.** São Paulo: DAEE; CTH, 2014.

MARTINS, D.; KRUK, N. S.; MAGNI, N. L.; QUEIROZ, P. I.B. Comparação de duas metodologias de obtenção e equação de chuvas intensas para a cidade de Caraguatatuba (SP). **Revista DAE**, p.34-49, 2017. DOI:10.4322/dae.2016.033

PRUSKI, F.F.; FERREIRA, P.A.; RAMOS, M.M.; CECON, P.R. Model to design level terraces. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.123, p.8-12, 1997.

PRUSKI, F.F.; GRIEBELER, N.P.; SILVA, D.D. Comparação entre dois métodos para a determinação do volume de escoamento superficial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.403-410, 2001.

PRUSKI, F.F.; SILVA, J.M.A.; CALIJURI, M.L.; BHERING, E.M. **Terraços for Windows v.1.0. Dimensionamento e manejo de sistemas de conservação de solos e drenagem de superfície – Manual do usuário.** Viçosa, Universidade Federal de Viçosa Departamento de Engenharia Agrícola, 1996. 38p.

RANGEL, E.M.; HARTWIG, M.P. Análises das curvas de intensidade-duração-frequência para a cidade de Pelotas através de uma função de desagregação. **Revista Thema**, v.14, n.2, p.63-77, 2016.

SCS. **National engineering handbook.** Washington, DC: U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service (SCS), 1972

SILVA, D.P. **Modelo para dimensionamento de sistemas de drenagem de superfície em estradas não pavimentadas.** 2011. Tese (Pós-Graduação em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.