

Bài báo khoa học

Nghiên cứu ứng dụng mô hình TRIGRS mô phỏng trượt lở khu vực Lào Cai, Việt Nam

Nguyễn Văn Nhật^{1*}, Đoàn Quang Trí¹, Quách Thị Thanh Tuyết¹, Trần Duy Hiền²

¹ Tạp chí Khí tượng Thủy văn, Tổng cục Khí tượng Thủy văn; vannhat.tv@gmail.com; doanquangtrikttv@gmail.com; tuyetkttv@gmail.com

² Vụ Khoa học và Công nghệ, Bộ Tài nguyên và Môi trường; tranhienvkttv@gmail.com; tdhien@monre.gov.vn

*Tác giả liên hệ: vannhat.tv@gmail.com; Tel.: +84-332321101

Ban Biên tập nhận bài: 15/8/2022; Ngày phản biện xong: 22/10/2022; Ngày đăng bài: 25/10/2022

Tóm tắt: Ảnh hưởng của mưa lớn và cấu trúc địa chất thay đổi là nguy cơ cao xảy ra trượt lở ở khu vực miền núi phía bắc Việt Nam trong đó Lào Cai là một trong những tỉnh chịu ảnh hưởng nặng nề và thường xuyên nhất. Nghiên cứu ứng dụng mô hình TRIGRS (*Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Model*) nhằm mô phỏng lượng thấm do mưa dựa trên độ dốc và tính ổn định địa hình của khu vực nghiên cứu. Mô hình được áp dụng để mô phỏng trượt lở đất sử dụng tài liệu địa chất-địa hình, số liệu khí tượng thủy văn và các đặc tính cơ học của khu vực nghiên cứu. Các phương trình được thiết lập để tính toán biến đổi độ sâu cột nước và tính ổn định của mái dốc. Kết quả nghiên cứu với trận mưa lớn đầu tháng 9 năm 2013 cho thấy, khi mưa lớn bắt đầu xảy ra, lượng thấm tăng dần kéo theo đó là độ ổn định mái dốc giảm, hệ số ổn định giảm dần và sau khoảng 24 giờ thì hiện tượng trượt lở đất đã diễn ra tại vị trí có FoS thấp nhất và mở rộng ra các vùng lân cận.

Từ khóa: Mô hình TRIGRS; Lào Cai; Trượt lở.

1. Giới thiệu

Trượt lở đất nguyên nhân do mưa là tai biến địa chất phổ biến trên thế giới có thể gây ra thiệt hại về người và tài sản. Hiện nay có hai cách tiếp cận chính để dự báo mưa gây ra trượt lở đất: (1) Sử dụng mô hình thống kê để xây dựng mối quan hệ giữa cường độ mưa-thời gian mưa với sự xuất hiện trượt lở đất [1–5]; (2) Thiết lập các mô hình vật lý về sự không ổn định của mái dốc dưới tác động của mưa [6–8]. Mô hình TRIGRS hiện nay đã và đang được sử dụng nhiều nơi trên thế giới [9–15], mô hình TRIGRS đã xem xét đến lượng thấm do mưa và mực nước ngầm thay đổi theo độ ổn định của mái dốc. Mô hình kết hợp mô phỏng lượng thấm do mưa và phương pháp cân bằng giới hạn, có thể dùng để tính toán mức độ không ổn định của mái dốc trong các điều kiện mưa khác nhau [16]. Nghiên cứu ứng dụng TRIGRS để xác định lở đất do mưa gây ra ở Banjarnegara, Trung tâm Java, Indonesia [16] để tính toán áp suất độ rỗng và hệ số an toàn FoS (*Factor of Safety*) suốt quá trình thấm do mưa. Giá trị FoS thấp nhất ở điều kiện ban đầu trước khi có thấm do mưa là 1–1,2 và phân bố gần khu vực có độ dốc lớn gần Jemblug. Kết quả mô phỏng cho thấy khu vực có độ dốc lớn với góc nghiêng lớn hơn 30° dễ bị trượt lở do mưa với FoS < 1,2 trong khi một số vị trí có độ dốc lớn có khả năng không bị ảnh hưởng nhiều với FoS > 1,2. Nghiên cứu này đưa ra kết luận rằng TRIGRS có thể dự đoán vị trí trượt lở đất do mưa. [17] nghiên cứu mô phỏng trượt lở đất do

mưa lớn dãy Himalaya, Ấn Độ, sử dụng mô hình TRIGRS, kết quả đánh giá mô phỏng từ mô hình với thực tế đạt gần 80%. Tuy nhiên, việc có thêm bộ dữ liệu như lượng mưa hàng giờ, thời gian chính xác của sự kiện trượt đất đã xảy ra trong thực tế sẽ nâng cao độ chính xác của kết quả nghiên cứu. Các kết quả từ nghiên cứu này có thể được nhân rộng và sử dụng ở các khu vực có địa chất không ổn định khác trên dãy Himalaya của Ấn Độ để thiết lập một hệ thống cảnh báo sớm trượt lở đất do mưa. Có thể nhận thấy kết quả đánh giá việc ứng dụng mô hình TRIGRS để cảnh báo sớm trượt lở do mưa lớn ở nhiều khu vực trên thế giới cho kết quả tương đối khả quan.

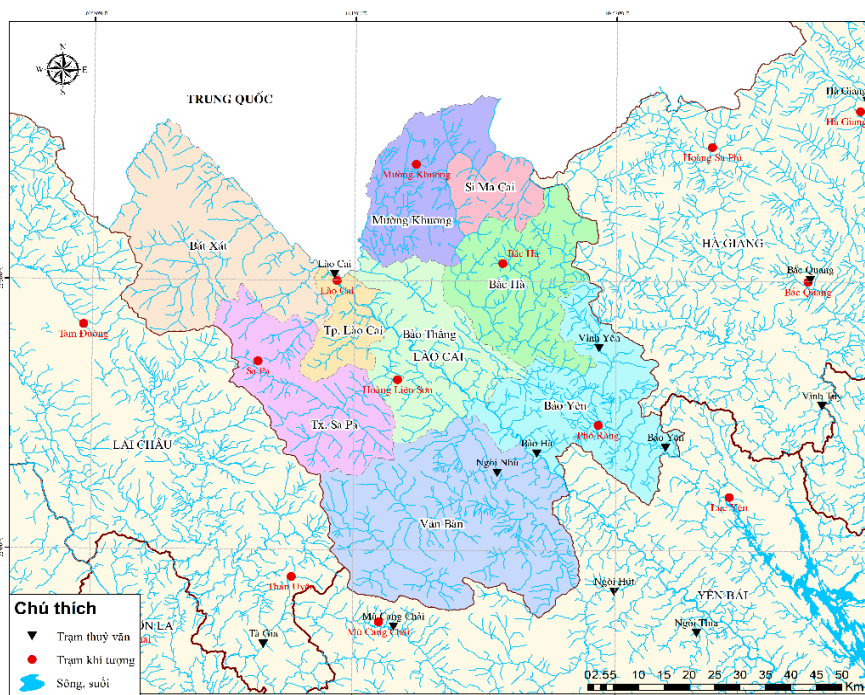
Hiện nay, vấn đề trượt lở đất do mưa lớn đã và đang nghiên cứu tại Việt Nam, thống kê đến năm 2020 thì nghiên cứu về trượt lở đất tập trung chủ yếu ở khu vực các tỉnh miền núi phía Bắc (Điện Biên, Hà Giang, Hòa Bình, Lai Châu, Lạng Sơn, Lào Cai, Sơn La, Yên Bái) và một số tỉnh ở khu vực miền Trung–Tây Nguyên (Bình Định, Đà Nẵng, Lâm Đồng, Quảng Nam, Quảng Ngãi, Quảng Trị, Thừa Thiên Huế). Trong đó, khu vực các tỉnh miền núi phía Bắc có nhiều công trình nghiên cứu hơn (chiếm 67%) so với các tỉnh miền Trung - Tây Nguyên (chiếm 33%) [18]. Cũng theo bài báo này thì có tất cả 67 mô hình đánh giá nguy cơ sạt lở, trượt lở đất đã được sử dụng ở 41 công trình nghiên cứu, trong đó có một số khu vực ứng dụng mô hình TRIGRS như Ba Vì, lưu vực sông Cầu... tuy nhiên chưa có nghiên cứu ứng dụng mô hình TRIGRS để mô phỏng trượt lở đất đá do mưa lớn ở tỉnh Lào Cai thuộc khu vực miền núi phía Bắc Việt Nam.

Lào Cai là một trong các tỉnh thuộc vùng miền núi Tây Bắc, tỉnh Lào Cai có độ dốc địa hình thay đổi khá lớn theo phân bố diện tích. Lào Cai là một trong những tỉnh thường xảy ra hiện tượng trượt lở đất đá, đặc biệt năm 2013 đã xảy ra trượt lở đất đá gây hậu quả nặng nề tại xã Thảm Dương, huyện Văn Bàn, xã Thanh Kim, huyện Sa Pa.... Thống kê đến năm 2013 cho thấy số điểm trượt lở đất đá ở Lào Cai là hơn 500 điểm. Do đó vấn đề trượt lở tại Lào Cai là vấn đề cần đặc biệt quan tâm, nghiên cứu. Mục đích nghiên cứu nhằm ứng dụng mô hình TRIGRS mô phỏng trượt lở đất đá do mưa áp dụng thí điểm cụ thể cho tỉnh Lào Cai.

2. Số liệu sử dụng và phương pháp nghiên cứu

2.1. Tổng quan khu vực nghiên cứu

Lào Cai là một trong các tỉnh thuộc vùng miền núi Tây Bắc, có diện tích tự nhiên là 6.357 km², được giới hạn bởi tọa độ địa lý từ 21°48' đến 22°50' vĩ độ Bắc và từ 102°32' đến 104°38' kinh độ Đông. Tỉnh Lào Cai có 10 đơn vị hành chính cấp huyện, bao gồm: Thành phố Lào Cai, Thị xã Cam Đường, và các huyện Bắc Hà, Bảo Thắng, Bảo Yên, Bát Xát,



Hình 1. Bản đồ khu vực nghiên cứu và hệ thống mạng lưới trạm KTTV tỉnh Lào Cai.

Mường Khương, Sa Pa, Si Ma Cai, và Văn Bàn (Hình 1). Hệ thống giao thông gồm 4 quốc lộ và 4 tỉnh lộ. Cấu trúc địa chất của khu vực tỉnh Lào Cai bao gồm các đá có tuổi từ Proterozoi đến Đệ tứ, phân bố trong 37 phân vị địa chất. Khu vực tỉnh Lào Cai nằm trong phạm vi của 4 đới cấu trúc lớn là đới cấu trúc Sông Chảy, đới cấu trúc Sông Hồng, đới cấu trúc Phan Xi Păng và đới Tú Lệ.

2.2. Thu thập số liệu nghiên cứu

a) Số liệu khí tượng thủy văn

Số liệu mưa, số liệu bốc hơi tại trạm khí tượng: Lào Cai, Sa Pa, Hoàng Liên Sơn, Mường Khương, Bắc Hà, Phố Ràng từ 01/08/2013 đến 30/09/2013.

b) Hiện trạng trượt lở đất đá

Theo kết quả điều tra, khảo sát và thành lập bản đồ hiện trạng trượt lở đất đá tỷ lệ 1:50.000 khu vực miền núi tỉnh Lào Cai (2014) [19] trên cơ sở công tác khảo sát thực địa đã thống kê được 534 vị trí đã xảy ra trượt lở đất đá được thống kê trong Bảng 1.

Bảng 1. Thống kê số lượng các điểm trượt lở đất đá trên địa bàn tỉnh Lào Cai.

STT	Huyện	Số điểm trượt lở đất đá
1	Bắc Hà	85
2	Bảo Thắng	34
3	Bảo Yên	55
4	Bát Xát	88
5	Cam Đường	10
6	Mường Khương	80
7	Văn Bàn	129
8	Sa Pa	53
Tổng cộng		534

Trượt lở đất đá tại Lào Cai thường khá nghiêm trọng và gây ra hậu quả thiệt hại về người và của, Hình 2 là một số hình ảnh trượt lở đất đá đã xảy ra tại Lào Cai.



Hình 2. Trượt lở đất tại tỉnh Lào Cai [20].

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Mô hình TRIGRS là một chương trình của Fortran được thiết kế để thiết lập và mô phỏng sự phân bố của các trận lở đất nông do mưa gây ra [21–22]. Chương trình cần nhiều thông số đầu vào, bao gồm cả sự thấm thấu, đặc tính thủy lực và các thông số đầu vào ổn định mái dốc [22], mô phỏng sự thay đổi áp suất lỗ rỗng qua bề mặt thoáng và sự thay đổi tương ứng trong hệ số an toàn do thấm nước mưa [23]. Các mô hình thấm trong TRIGRS với các điều kiện ban đầu dựa trên nghiệm tuyến tính của phương trình Richards [24].

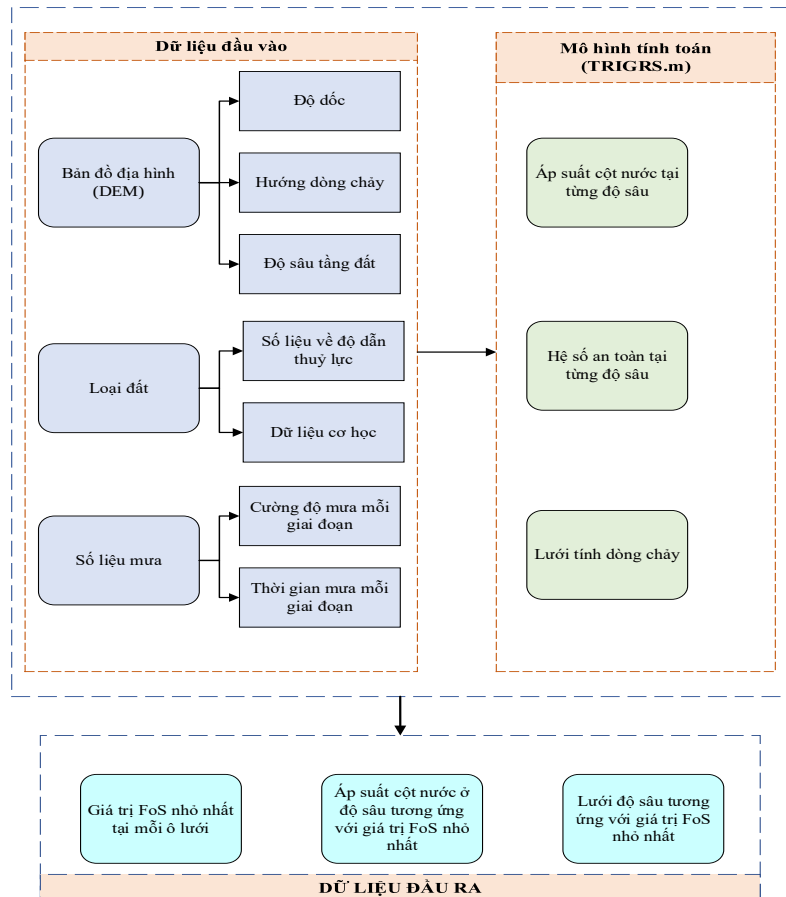
Mô hình bao gồm một thành phần ổn định và một thành phần thấm tạm thời. Độ thấm ổn định phụ thuộc vào độ sâu ban đầu đến mực nước ngầm và tốc độ thấm ổn định. Dưới sự thấm thấu ổn định, mái dốc sẽ không bị hư hại. Thấm nhất thời là sự thay đổi áp lực nước lỗ rỗng thoáng qua do lượng mưa gây ra trong thời gian ngắn. Nói chung, cường độ mưa càng lớn thì sự thấm nhất thời càng lớn [25–27]. Áp lực nước lỗ rỗng tạm thời được tính toán sau đó được sử dụng cho mô hình độ dốc vô hạn. Giải pháp tổng quát trong TRIGRS là:

$$\psi(Z, t) = (Z - d)\beta + 2 \sum_{n=1}^N \frac{I_{nz}}{K_s} H(t - t_n) \left[D_1(t - t_n) \right]^{\frac{1}{2}} \operatorname{ierfc} \left[\frac{Z}{2 \left[D_1(t - t_n) \right]^{\frac{1}{2}}} \right] - 2 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \times \sum_{n=1}^N \frac{I_{nz}}{K_s} H(t - t_{n+1}) \left[D_1(t - t_{n+1}) \right]^{\frac{1}{2}} \operatorname{ierfc} \left[\frac{Z}{2 \left[D_1(t - t_{n+1}) \right]^{\frac{1}{2}}} \right] \\ \psi(Z, t) = & (Z - d)\beta + 2 \sum_{n=1}^N \frac{I_{nz}}{K_s} H(t - t_n) \left[D_1(t - t_n) \right]^{\frac{1}{2}} \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \operatorname{ierfc} \left[\frac{(2m-1)d_{LZ} - (d_{LZ} - Z)}{2 \left[D_1(t - t_n) \right]^{\frac{1}{2}}} \right] + \operatorname{ierfc} \left[\frac{(2m-1)d_{LZ} + (d_{LZ} - Z)}{2 \left[D_1(t - t_n) \right]^{\frac{1}{2}}} \right] \right\} - 2 \quad (2) \\ & \times \sum_{n=1}^N \frac{I_{nz}}{K_s} H(t - t_{n+1}) \left[D_1(t - t_{n+1}) \right]^{\frac{1}{2}} \sum_{m=1}^{\infty} \left\{ \operatorname{ierfc} \left[\frac{(2m-1)d_{LZ} - (d_{LZ} - Z)}{2 \left[D_1(t - t_{n+1}) \right]^{\frac{1}{2}}} \right] + \operatorname{ierfc} \left[\frac{(2m-1)d_{LZ} + (d_{LZ} - Z)}{2 \left[D_1(t - t_{n+1}) \right]^{\frac{1}{2}}} \right] \right\} \end{aligned}$$

Trong đó Ψ là cột áp nước ngầm; t là thời gian; Z là độ sâu bên dưới mặt đất theo phương tọa độ thẳng đứng (đương hướng xuống); d là độ sâu trạng thái ổn định của mực nước ngầm; $\beta = \cos^2 \delta - (I_{ZLT}/K_s)$, δ là góc của hệ số góc; K_s là độ dẫn thủy lực bão hòa theo phương Z ; I_{ZLT} là thông lượng bề mặt ổn định; I_{nz} là thông lượng bề mặt hoặc cường độ mưa trong khoảng thời gian thứ n ; $D_1 = D_0/\cos^2 \delta$, D_0 là độ khuếch tán thủy lực bão hòa; N là tổng số khoảng thời gian; $H(t - t_n)$ là hàm bước Heaviside, trong đó t_n là thời điểm ở khoảng thời gian thứ n trong chuỗi lượng mưa xâm nhập; d_{LZ} là độ sâu của ranh giới cơ bản không thấm nước đo được.

Tiếp theo [24], chương trình thiết lập mô hình ổn định mái dốc bằng cách sử dụng



Hình 3. Sơ đồ cấu trúc nghiên cứu ứng dụng mô hình TRIGRS.

phương trình phân tích ổn định mái dốc vô hạn phương trình (3). Trong quá trình phân tích trượt lở, tính không ổn định của một độ dốc vô hạn được đặc trưng bởi tỷ số giữa lực chống ma sát Coulomb cơ bản và ứng suất truyền động cơ bản xuống dốc do trọng lực gây ra [27]. Tỷ lệ này, được gọi là FoS, được tính ở độ sâu Z bằng phương trình:

$$FoS(Z, t) = \frac{\tan \varphi'}{\tan \varphi} + \frac{c' - \psi(Z, t) \gamma_w \tan \varphi'}{\gamma_s Z \sin \delta \cos \delta} \quad (3)$$

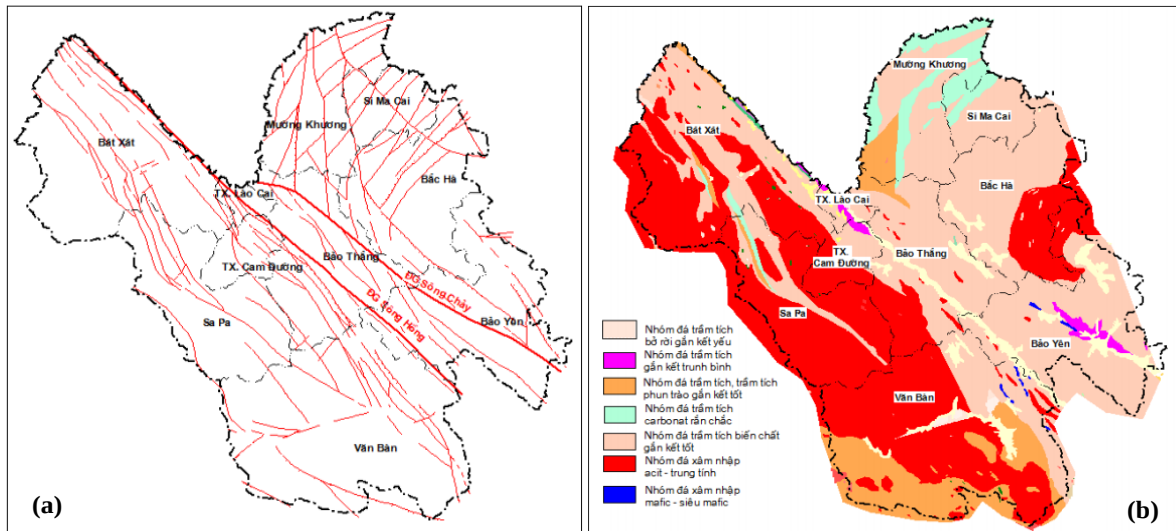
Trong đó c' là hệ số kết dính; φ' là hệ số góc ma sát mặt đất; γ_s là đơn vị trọng lượng; γ_w đơn vị trọng lượng của nước ngầm.

Nghiên cứu này trình bày kết quả ứng dụng mô hình TRIGRS mô phỏng trượt lở cho khu vực miền núi phía bắc tỉnh Lào Cai, Việt Nam. Sơ đồ cấu trúc nghiên cứu được triển khai thực hiện theo các bước miêu tả trên hình 3.

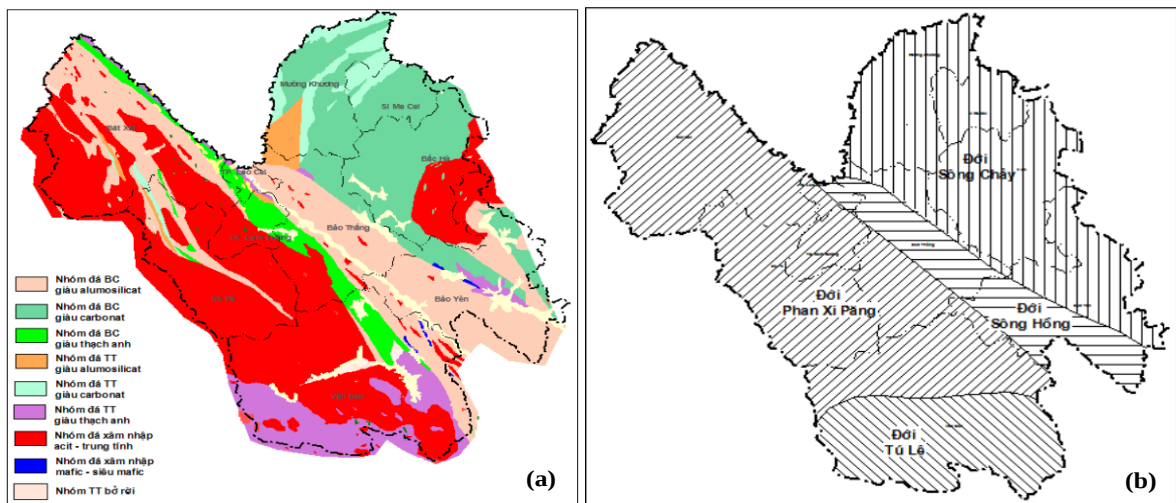
3. Kết quả và thảo luận

3.1. Thiết lập mô hình TRIGRS cho khu vực nghiên cứu

Các thông số mô hình TRIGRS được thiết lập dựa trên các tài liệu về địa chất, địa hình khu vực nghiên cứu. Hình 4–5 là bản đồ đặc trưng một số đặc điểm địa chất–địa mạo tỉnh Lào Cai.



Hình 4. (a) Sơ đồ phân bố hệ thống các đứt gãy trên địa bàn tỉnh Lào Cai; (b) Sơ đồ phân bố nhóm đá theo đặc điểm địa chất công trình tỉnh Lào Cai [18].



Hình 5. (a) Sự phân bố diện tích xuất lộ các nhóm đá gốc tỉnh Lào Cai; (b) Sự phân bố đới cấu trúc trên địa bàn tỉnh Lào Cai [18].

Bảng 1 là thông số chính thiết lập trong mô hình TRIGRS.

Bảng 1. Thông số cơ bản mô hình TRIGRS tỉnh Lào Cai.

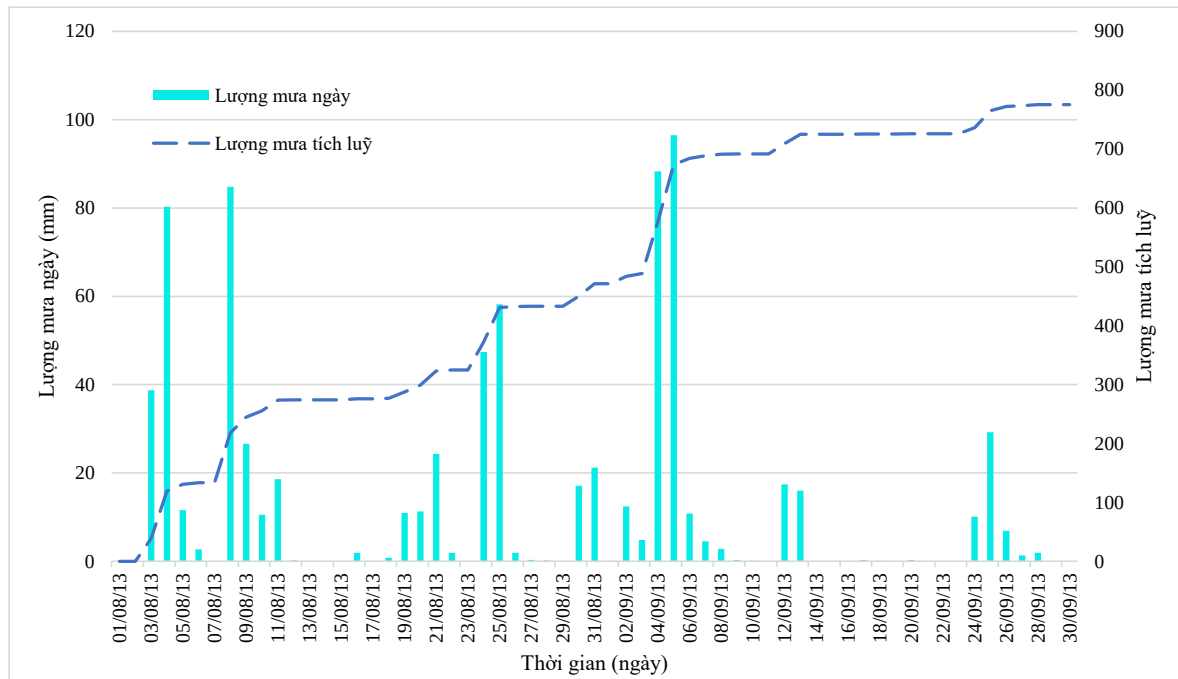
c_0 [kPa]	φ_0 [deg]	γ_s [kN m ⁻³]	K_s [m s ⁻¹]	D_0 [m ² s ⁻¹]	α [m ⁻¹]	θ_s	θ_r
3.50E+03	35	2.20E+04	1.00E-07	8.00E-04	-0.5	0.45	0.05

Số liệu độ cao triết xuất từ ALOS PALSAR DEM 12,5 m. Độ dốc và hướng dòng chảy được tính toán từ DEM khi đưa vào mô hình TRIGRS. Độ dày lớp đất được tính toán theo phương trình Z, căn cứ vào dữ liệu các lỗ khoan trong khu vực để xác định cáo trình trên và cáo trình dưới của lớp đất mô phỏng, do đó độ dày lớp đất có thể tính toán theo phương trình (4).

$$Z_i = Z_{\max} - \left(\frac{h_i - h_{\min}}{h_{\max} - h_{\min}} \right) (Z_{\max} - Z_{\min}) \quad (4)$$

Trong đó $Z_{\max}$ và $Z_{\min}$ là độ sâu lớn nhất và độ sâu nhỏ nhất tầng đất; $h_{\max}$ và $h_{\min}$ là độ cao lớn nhất và nhỏ nhất tương ứng; K_s là hệ số dẫn thủy lực bão hoà và D là hệ số khuếch tán thủy lực.

Hình 6 là đồ thị lượng mưa và tổng lượng mưa tích lũy tại trạm Sa Pa.



Hình 6. Đồ thị lượng mưa và tổng mưa tích lũy trạm Sa Pa tháng 9 năm 2013

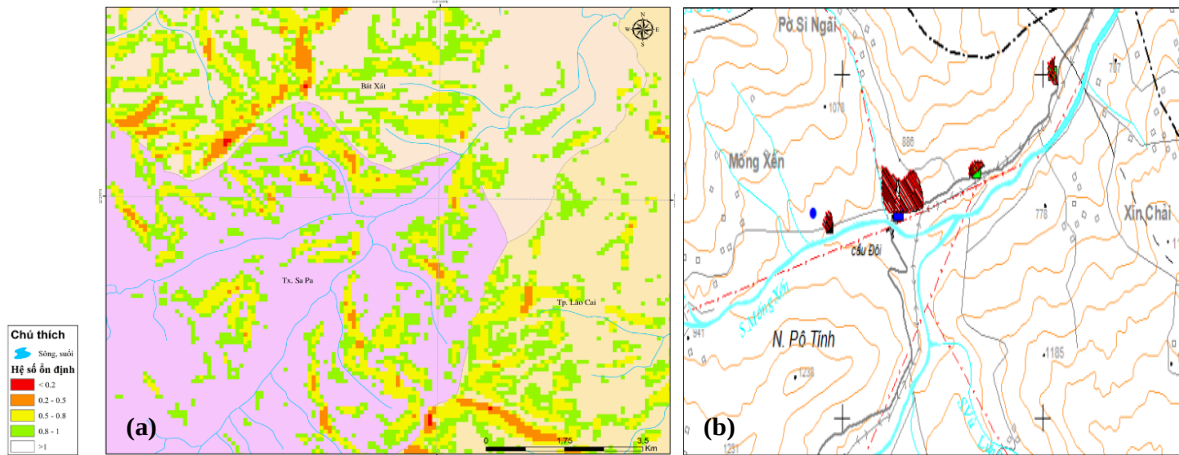
Hình trên là đồ thị thể hiện lượng mưa tại trạm khí tượng Sa Pa từ ngày 01/08/2013 đến ngày 30/09/2013, có thể nhận thấy tuần đầu tháng 8 có xuất hiện mưa lớn 80mm vào ngày 09/08/2013 sau đó mưa giảm dần và kết thúc mứ ngày 13/08/2013, từ 19/08/2013 bắt đầu đợt mưa tiếp theo với lượng mưa lớn nhất xảy ra ngày 25/08/2013 là gần 60mm, ngày 30/08 tiếp tục trận mưa lớn và kéo dài đến ngày 08/09/2013 với lượng mưa lớn nhất là gần 100mm ngày 05/09/2013. Có thể nhận thấy đây là đợt mưa kéo dài và liên tục, với tổng lượng mưa lũy tích lớn.

3.2. Kết quả mô hình mô phỏng

Mô hình TRIGRS được thiết lập mô phỏng sạt lở đất khu vực nghiên cứu thời đoạn mô phỏng từ 01/08 đến 30/09 năm 2013 để đánh giá bộ thông số mô hình, tổng lượng mưa tích lũy là 775,5 mm, cường độ mưa lớn nhất là 96,5 mm/ngày (ngày 05/09/2013).

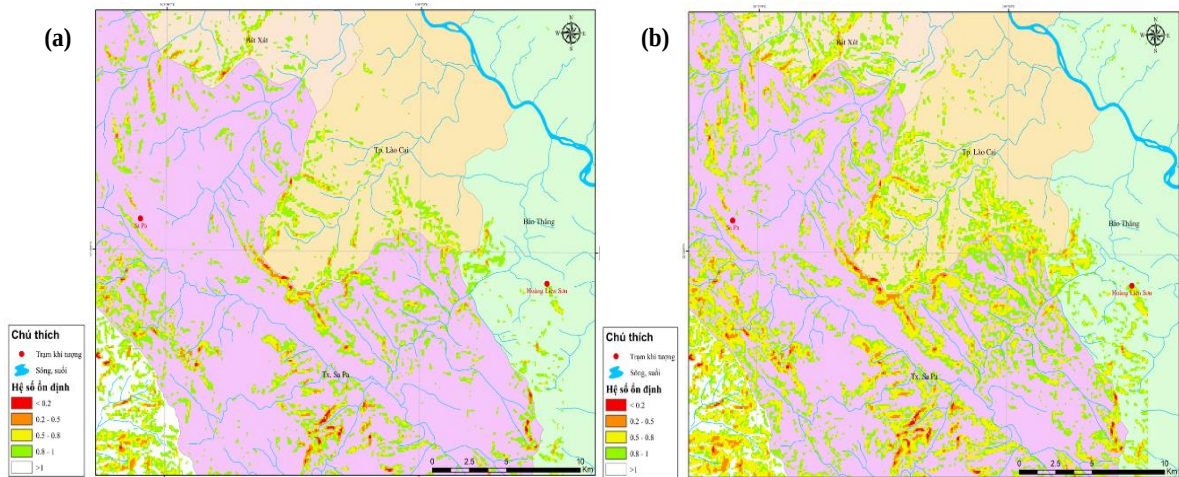
Nghiên cứu đã sử dụng vị trí trượt lở đất đá tại cầu Mống Sên trên quốc lộ 4D, xã Thanh Kim, huyện Sa Pa với trận mưa tháng 9 năm 2013 để đánh giá bộ thông số mô hình TRIGRS. Kết quả so sánh cho thấy, hệ số FoS tại khu vực sạt lở tại Cầu Mống Sên dao động trong khoảng từ 0,4 đến 0,7.

Kết quả mô phỏng cho thấy vị trí có hệ số an toàn thấp nhất trùng với vị trí xảy ra trượt lở đất đá tại Cầu Mống Sên tối ngày 4 tháng 9 năm 2013. Có thể nhận thấy bộ thông số mô hình tương đối phù hợp cho khu vực nghiên cứu.



Hình 7. (a) Kết quả FoS mô hình mô phỏng; (b) Sơ đồ vị trí điểm trượt lở đất đá tại Cầu Mống Sên, xã Thanh Kim, huyện Sa Pa.

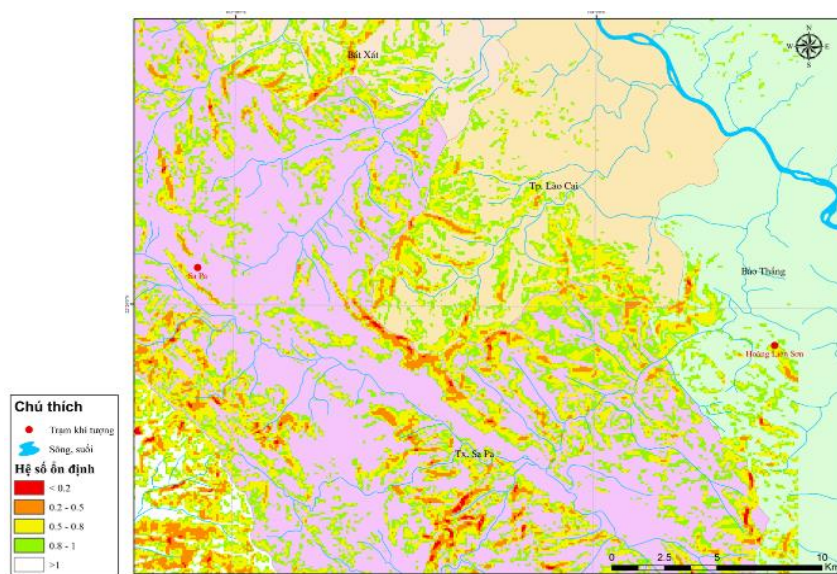
Nghiên cứu sử dụng bộ thông số của mô hình để mô phỏng khả năng trượt lở đất đá cho tỉnh Lào Cai. Kết quả đánh giá khả năng trượt lở đất đá khu vực nghiên cứu dựa vào kết quả hệ số an toàn do mô hình tính toán FoS (*Factor of Safety*), hệ số an toàn càng thấp thì khả năng trượt lở đất đá xảy ra càng lớn. Hình 8a–8c là kết quả FoS khu vực nghiên cứu tại một số thời điểm mô phỏng.



Hình 8. (a) Thay đổi của hệ số an toàn (FoS) tỉnh Lào Cai tại thời điểm ngày 03/09/2013; (b) Thay đổi của hệ số an toàn (FoS) tỉnh Lào Cai tại thời điểm ngày 04/09/2013.

Kết quả mô phỏng cho thấy 20 ngày trước ngày 04/09/2013, khu vực nghiên cứu xuất hiện mưa liên tiếp, tuy nhiên đến ngày 04/09/2013 lượng mưa trên 80 mm và gần 100 mm vào ngày 05/09/2013. Do đó báo cáo đánh giá sự thay đổi giá trị hệ số an toàn FoS từ ngày 03 đến ngày 05 năm 2013. Hình 8c thể hiện biến động hệ số FoS từ ngày 3/9/2013 đến ngày 5/9/2013. Có thể nhận thấy FoS giảm dần, 24h sau khi xả ra mưa lớn, nhiều khu vực có hệ số an toàn giảm, khả năng xuất hiện trượt lở đất cao và xu thế đó mở rộng sau 48 giờ, có thể nhận thấy tại những khu vực có địa hình dốc (độ dốc lớn hơn 50°) có hệ số an toàn thấp, dao

động từ 0,2–0,5. Thực tế cho thấy lượng mưa càng tăng thì độ ổn định mái dốc càng giảm, hệ số FoS giảm và đến tối 04/9/2013 đã mất kết dính gây trượt lở đất khả nghiêm trọng tại một số huyện của tỉnh Lào Cai như: Sa Pa, Văn Bàn.



Hình 8. (c) Thay đổi của hệ số an toàn (FoS) tỉnh Lào Cai tại thời điểm ngày 05/09/2013 (tiếp).

4. Kết luận

Mô hình TRIGRS cho phép nhận số liệu đầu vào dạng lưới (*TIF format*) và liên kết với các chương trình tính toán thám, kết quả đầu ra là giá trị áp suất, áp suất lỗ rỗng và hệ số an toàn tại bất cứ thời điểm nào. Kết quả mô phỏng cho thấy cường độ mưa tăng thì hệ số an toàn của các ô lưới xung quanh khu vực đó giảm. Cường độ mưa càng lớn thì sự biến đổi độ sâu mực nước ngầm và độ ổn định mái dốc càng lớn. Nghiên cứu đã ứng dụng thành công mô hình TRIGRS mô phỏng trượt lở đất tỉnh Lào Cai. Mô hình TRIGRS có đặc điểm xử lý số liệu đơn giản, hiệu quả tính toán cao có thể phát triển ứng dụng trong việc cảnh báo trượt lở đất do mưa lớn và có thể nghiên cứu phát triển xây dựng công cụ giám sát nguy cơ trượt lở đất theo thời gian thực. Tuy nhiên, hạn chế của mô hình mới chỉ tính toán riêng biệt cho từng ô lưới chưa tính đến trao đổi dòng chảy ngầm giữa các ô lưới đồng thời chưa tính đến lực tác động giữa các ô lưới gây trượt lở đất đá.

Đóng góp của tác giả: Xây dựng ý tưởng nghiên cứu: N.V.N., Đ.Q.T., Q.T.T.T.; Xử lý số liệu: N.V.N.; Viết bản thảo bài báo: N.V.N., Q.T.T.T., Đ.Q.T.; Chỉnh sửa bài báo: Đ.Q.T.

Lời cảm ơn: Bài báo đã kế thừa và sử dụng tài liệu và số liệu thuộc báo cáo kết quả điều tra và thành lập bản đồ hiện trạng trượt lở đất đá tỷ lệ 1:50.000 khu vực miền núi tỉnh Lào Cai (2014).

Lời cam đoan: Tập thể tác giả cam đoan bài báo này là công trình nghiên cứu của tập thể tác giả, chưa được công bố ở đâu, không được sao chép từ những nghiên cứu trước đây; không có sự tranh chấp lợi ích trong nhóm tác giả.

Tài liệu tham khảo

1. Frattini, P.; Crosta, G.; Sosio, R. Approaches for defining thresholds and return periods for rainfall – triggered shallow landslides. *Hydrol. Processes* **2009**, 23(10), 1444–1460.
2. Guzzetti, F.; Peruccacci, S.; Rossi, M.; Stark, C.P. Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. *Meteorol. Atmos. Phys.* **2007**, 98(3), 239–367.

3. Kanungo, D.P.; Sharma, S. Rainfall thresholds for prediction of shallow landslides around Chamoli-Joshimath region, Garhwal Himalayas, India. *Landslides* **2014**, 11(4), 629–638.
4. Tân, M.T.; Liêm, N.V.; Tuấn, Đ.A.; Tiến, N.V. Phân tích tương quan giữa trượt lở đất và lượng mưa khu vực Mai Châu - Hòa Bình. *Tạp chí Khoa học ĐHQGHN: Các Khoa học Trái đất và Môi trường* **2015**, 31(4), 51–63.
5. Thủy, N.T.; Hùng, N.S. Áp dụng phương pháp dùng các chỉ số lượng mưa ảnh hưởng ngắn hạn và dài hạn để cảnh báo thiên tai bùn đá ở một số khu vực của Việt Nam. *Tạp chí Khoa học biến đổi khí hậu* **2018**, 5, 1–10.
6. Alvioli, M.; Guzzetti, F.; Rossi, M. Scaling properties of rainfall induced landslides predicted by a physically based model. *Geomorphology* **2014**, 213, 38–47.
7. Wei, Y.; Xia, M.; Ye, F.; Fu, W. Effect of drag force on stability of residual soil slopes under surface runoff. *Geomatics Nat. Hazards Risk* **2018**, 9(1), 488–500.
8. Yuan, X.; Ye, F.; Fu, W.; Wen, L. Estimating the critical shear stress for incipient particle motion of a cohesive soil slope. *Sci. Rep.* **2022**, 12(1), 9736.
9. Peres, D.J.; Cancelliere, A. Accounting for Variability in Rain-Event Intensity and Initial Conditions in Landslide Triggering Return Period Mapping via a Monte Carlo Approach. In: Sassa, K., Canuti, P., Yin, Y. (Eds) *Landslide Science for a Safer Geoenvironment*. Springer, Cham. 2014, 499–505. https://doi.org/10.1007/978-3-319-05050-8_77.
10. Park, D.W.; Nikhil, N.V.; Lee, S.R. Landslide and debris flow susceptibility zonation using TRIGRS for the 2011 Seoul landslide event. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **2013**, 13, 2833–2849. doi:10.5194/nhess-13-2833-2013.
11. Viet, T.T.; Lee, G.; Thu, T.M.; An, H.U. Effect of digital elevation model resolution on shallow landslide modeling using TRIGRS. *Nat. Hazards Rev.* **2017**, 18, 04016011. doi:10.1061/(asce)nh.1527-6996.0000233.
12. Weidner, L.; Oommen, T.; Escobar-Wolf, R.; Sajinkumar, K.S.; Samuel, R.A. Regional-scale back-analysis using TRIGRS: An approach to advance landslide hazard modeling and prediction in sparse data regions. *Landslides* **2018**, 15, 2343–2356. doi:10.1007/s10346-018-1044-7.
13. Zhang, S.; Jiang, Q.; Xu, X.; Tao, G.; Zhang, Z.; Gao, X.; He, C. Influence of soil mechanical and hydraulic parameters on the definition of rainfall intensity and duration thresholds based on Transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability model (TRIGRS). *Front. Earth Sci.* **2022**, 10, 971655. doi: 10.3389/feart.2022.971655.
14. Ma, S.; Shao, X.; Xu, C.; He, X.; Zhang, P. MAT.TRIGRS (V1.0): A new open – source tool for predicting spatiotemporal distribution of rainfall – induced landslides. *Nat. Hazards Res.* **2021**, 1(4), 161–170.
15. Baum, R.L.; Savage, W.Z.; Godt, J.W. TRIGRS A Fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis, version 2.0: U.S. Geological Survey Open-File Report, 2008-1159, 2008, pp.75.
16. Muntohar, A.S.; Mavrouli, O.; Jetten, V.G.; van Westen, C.J.; Hidayat, R. Development of Landslide Early Warning System Based on the Satellite-Derived Rainfall Threshold in Indonesia . In: Casagli, N., Tofani, V., Sassa, K., Bobrowsky, P.T., Takara, K. (eds) *Understanding and Reducing Landslide Disaster Risk*. WLF 2020. ICL Contribution to Landslide Disaster Risk Reduction. Springer, Cham. 2021, pp. 227–235. https://doi.org/10.1007/978-3-030-60311-3_26.
17. Dikshit, A.; Sarkar, R.; Pradhan, B.; Segoni, S.; Alamri, A.M. Rainfall Induced Landslide Studies in Indian Himalayan Region: A Critical Review. *Appl. Sci.* **2020**, 10, 2466. <https://doi.org/10.3390/app10072466>.

18. Long, D.V.; Cong, N.C.; Binh, N.Q. Đánh giá thực trạng và giải pháp nghiên cứu về sạt lở đất ở Vĩt Nam giai đoạn 2010-2020. *Tạp chí khoa học và công nghệ thủy lợi* **2020**, *61*, 119–128.
19. Viện khoa học và địa chất khoáng sản. Báo cáo kết quả điều tra và thành lập bản đồ hiện trạng trượt lở đất đá tỷ lệ 1:50.000 khu vực miền núi tỉnh Lào Cai – sản phẩm bước I của Đề án Điều tra, đánh giá và phân vùng cảnh báo nguy cơ trượt lở đất đá các vùng miền núi Việt Nam, 2014.
20. vietnamplus.com
21. Alvioli, M.; Baum, R.L. Parallelization of the TRIGRS model for rainfall-induced landslides using the message passing interface. *Environ. Model. Software* **2016**, *81*, 122–135.
22. Baum, R.L.; Savage, W.Z.; Godt, J.W. TRIGRS—A Fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis, Version 2.0, U.S. Geol. Surv. Open File Rep., 2008, 2008-1159, pp. 81.
23. Berti, M.; Simoni, A. Field evidence of pore pressure diffusion in clayey soils prone to landsliding. *J. Geophys. Res.* **2010**, *115*, F03031. doi:10.1029/2009JF001463.
24. Iverson, R.M. Landslide triggering by rain infiltration. *Water Resour. Res.* **2000**, *36*(7), 1897–1910.
25. Baum, R.; Godt, J. Early warning of rainfall-induced shallow landslides and debris flows in the USA. *Landslides* **2010**, *7*, 259–272.
26. Baum, R.L.; Godt, J.W.; Savage, W.Z. Estimating the timing and location of shallow rainfall-induced landslides using a model for transient, unsaturated infiltration. *J. Geophys. Res.* **2010**, *115*(F3), 1–26.
27. Godt, J.W.; Baum, R.L.; Savage, W.Z.; Salciarini, D.; Schulz, W.H.; Harp, E.L. Transient deterministic shallow landslide modeling: Requirements for susceptibility and hazard assessments in a GIS framework. *Eng. Geol.* **2008**, *102*(3), 214–226.

Research and application TRIGRS model to simulate landslide in Lao Cai Province, Vietnam

Nguyen Van Nhat^{1*}, Doan Quang Tri¹, Quach Thi Thanh Tuyet¹, Tran Duy Hien²

¹ VietNam Journal of Hydrometeorology, Viet Nam Meteorological and Hydrological Administration; vannhat.tv@gmail.com; doanquangtrikttv@gmail.com; tuyetkttv@gmail.com

² Department of Science and Technology, Ministry of Natural Resources and Environment; tranhienvkttv@gmail.com; tdhien@monre.gov.vn

Abstract: Effectiveness of heavy rain and geological structure changes is a high risk of landslides in the mountainous areas of northern Vietnam in which Lao Cai is one of the most Provinces have severe and frequent effect. Research and application TRIGRS model (*Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Model*) model to simulate infiltration due to rain based on the slope stability and topographic of the study area. The model is applied to simulate landslide using geological - topographic data, hydrometeorological data of the study area. Equations are established to calculate the variation of pressure head and slope stability. Research results with heavy rain in early September 2013 show that when heavy rain begins, the pressure head increases rapidly. On these day, the slope stability of the study area changes greatly and FoS of most grid cells in the source area are decrease after about 24 hours, then the landslide occurred at the location that has lowest FoS and extended to the surrounding areas.

Keywords: TRIGRS model; Lao Cai; Landslide.