

NGHIÊN CỨU ĐÁNH GIÁ KHẢ NĂNG TÍCH HỢP MÔ HÌNH VẬT LÝ VỚI CÁC NGUỒN DỮ LIỆU MỞ PHỤC VỤ CẢNH BÁO SẠT LỞ ĐẤT THEO THỜI GIAN THỰC: THÍ ĐIỂM TRÊN ĐỊA BÀN HUYỆN BÁT XÁT (CŨ), TỈNH LÀO CAI

Trần Văn Tú⁽¹⁾, Trần Bảo Chung⁽¹⁾, Trần Anh Phương⁽¹⁾, Nguyễn Anh Đức⁽¹⁾, Vũ Đăng Tiếp⁽²⁾

⁽¹⁾Viện Khoa học tài nguyên nước

⁽²⁾Viện Chiến lược, chính sách nông nghiệp và môi trường

Ngày nhận bài: 11/5/2025; ngày chuyển phản biện: 12/5/2025; ngày chấp nhận đăng: 05/6/2025

Tóm tắt: Trong những năm vừa qua, sạt lở đất có xu hướng diễn biến theo hướng ngày càng nhiều và nghiêm trọng hơn, gây thiệt hại lớn về người và của, đặc biệt là ở các khu vực vùng núi có địa hình dốc, bị chia cắt mạnh như huyện Bát Xát (cũ), tỉnh Lào Cai. Tuy nhiên, công tác cảnh báo sạt lở đất ở các khu vực này gặp nhiều khó khăn do thiếu các nguồn dữ liệu đầu vào cho các mô hình cảnh báo. Nghiên cứu này áp dụng cách tiếp cận tích hợp mô hình vật lý TRIGRS với các nguồn dữ liệu mở để phục vụ công tác cảnh báo sạt lở đất trên địa bàn huyện Bát Xát (cũ). Các nguồn dữ liệu mở được sử dụng trong nghiên cứu bao gồm dữ liệu mưa vệ tinh CHIRPS, độ ẩm SMAP, địa hình, thành phần đất (cát, sét, hữu cơ). Từ dữ liệu thành phần đất, các đặc trưng thủy lực và cơ học của đất, yếu tố đầu vào rất quan trọng trong mô phỏng sạt lở đã được xác định. Đặc biệt, nghiên cứu đã tính toán được độ dày lớp đất nhờ kết hợp dữ liệu khảo sát thực địa bằng radar xuyên đất với độ dốc địa hình. Kết quả tính toán, mô phỏng cho trận lũ từ ngày 05/09/2024 đến 09/9/2024 cho thấy cách tiếp cận sử dụng trong nghiên cứu này cho độ chính xác tương đối cao. Chỉ số diện tích dưới đường cong (AUC), đạt giá trị 0,841, cho thấy khả năng phân biệt nguy cơ sạt lở ở mức độ cao. Đối chiếu với 157 điểm sạt lở thực tế được ghi nhận, mô hình đã dự báo chính xác 82 điểm (Tỷ lệ dương tính thực - TPR = 52,23%). Kết quả này cho thấy tiềm năng ứng dụng của mô hình TRIGRS trong việc xây dựng hệ thống cảnh báo sớm sạt lở đất tại các khu vực miền núi còn hạn chế về dữ liệu quan trắc truyền thống.

Từ khóa: Sạt lở đất, mô hình vật lý, mô hình Trigrs, dữ liệu mở, cảnh báo sớm.

1. Mở đầu

Sạt lở đất, một hiểm họa địa chất tự nhiên phổ biến, gây ra những tổn thất đáng kể về người và tài sản trên toàn cầu [1]. Tại các khu vực miền núi có điều kiện địa hình phức tạp và chịu tác động của các yếu tố khí hậu khắc nghiệt, nguy cơ sạt lở đất càng trở nên nghiêm trọng (Cruden & Varnes, 1996). Việt Nam, với địa hình đồi núi dốc và khí hậu nhiệt đới ẩm gió mùa, là một quốc gia thường xuyên phải đối mặt với hiện tượng sạt lở đất, đặc biệt ở các tỉnh miền núi phía Bắc và khu vực miền Trung - Tây Nguyên [2], [3]. Huyện Bát Xát (cũ), tỉnh Lào Cai, với đặc điểm địa hình dốc, bị chia cắt mạnh và chế độ

mưa cường độ lớn, là một ví dụ điển hình về khu vực thường xuyên phải đối mặt với nguy cơ này [4].

Một trong những thách thức lớn trong việc nghiên cứu và cảnh báo sạt lở đất tại các khu vực như Bát Xát là sự hạn chế về dữ liệu chi tiết và tin cậy tại địa phương. Việc thiếu các mạng lưới quan trắc về lượng mưa, độ ẩm đất và các thông số địa kỹ thuật khác gây khó khăn cho việc áp dụng các mô hình vật lý phức tạp đòi hỏi lượng dữ liệu đầu vào lớn (Anderson & Holcombe, 2013). Để giải quyết vấn đề này, việc khai thác và tích hợp các nguồn dữ liệu mở đã trở thành một xu hướng quan trọng trong nghiên cứu sạt lở đất [5]. Các nguồn dữ liệu như dữ liệu địa hình số, dữ liệu thăm phủ, thổ nhưỡng và đặc biệt là dữ liệu mưa vệ tinh đã chứng minh được tiềm năng

Tác giả liên hệ: Trần Anh Phương

Email: phuonngtran.monre@gmail.com

to lớn trong việc cung cấp thông tin cần thiết cho các mô hình cảnh báo sạt lở [6], [7]. Nhiều nghiên cứu đã thành công trong việc ứng dụng các nguồn dữ liệu mở này để xây dựng các hệ thống cảnh báo sạt lở đất hiệu quả ở nhiều khu vực trên thế giới, đặc biệt là những nơi có dữ liệu địa phương hạn chế [8]. Tại Việt Nam, mặc dù đã có một số nghiên cứu về sạt lở đất đã bắt đầu khai thác tiềm năng của dữ liệu viễn thám và các nguồn dữ liệu khác để đánh giá nguy cơ và xây dựng bản đồ phân vùng sạt lở [3], việc sử dụng các nguồn dữ liệu này để cảnh báo sạt lở theo thời gian thực còn tương đối hạn chế.

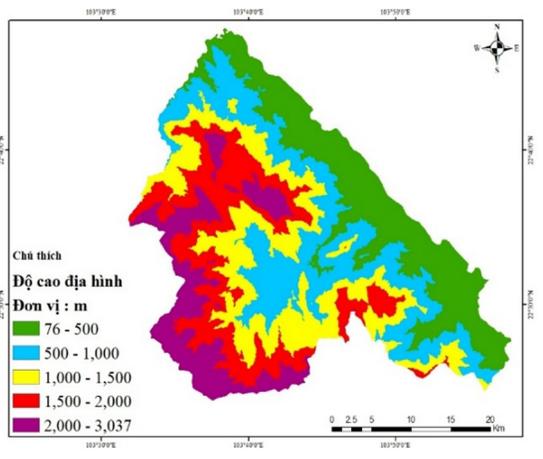
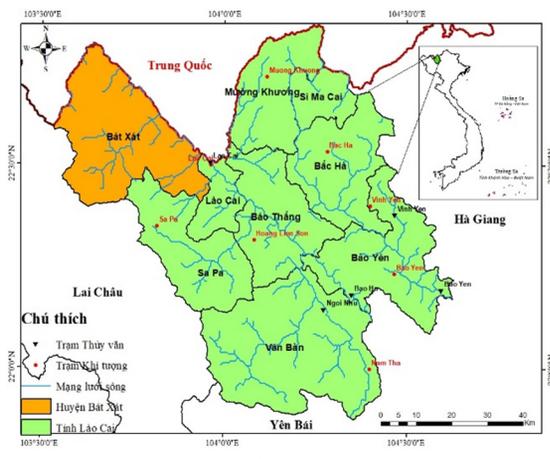
Dựa trên phân tích cơ chế vật lý ổn định sườn dốc, nhiều mô hình khác nhau đã được phát triển. Các mô hình như SHALSTAB (Shallow Landslide Stability Model) và SINMAP (Stability INdex MAPping) thường tập trung vào việc đánh giá sự ổn định tĩnh của mái dốc dựa trên địa hình và các đặc tính đất trung bình [9], [10]. Ngược lại, các mô hình phức tạp hơn như SCOOPS3D có khả năng phân tích ổn định ba chiều và xem xét các điều kiện không gian, nhưng lại đòi hỏi lượng dữ liệu đầu vào chi tiết, thường khó đáp ứng được ở các khu vực thiếu dữ liệu. Mô hình TRIGRS (Transient Rainfall Infiltration and Grid-based Regional Slope-stability analysis) mang lại sự cân bằng giữa tính phức tạp vật lý và yêu cầu dữ liệu. TRIGRS mô phỏng quá trình thấm nước mưa theo thời gian thực và tính toán sự thay đổi của áp lực nước lỗ rỗng, từ đó đánh giá sự thay đổi của hệ số an toàn mái dốc một cách động [11], [12]. Điều này cho phép TRIGRS dự đoán thời điểm và vị trí có khả năng xảy ra sạt lở cao hơn dưới tác động của mưa, một yếu tố quan trọng cho cảnh báo sớm mà các mô hình tĩnh như SHALSTAB và SINMAP thường không thể hiện được một cách trực tiếp. Mô hình TRIGRS đã được ứng dụng thành công trong nhiều nghiên cứu trên thế giới để đánh giá nguy cơ sạt lở đất ở các quy mô khác nhau [13], [14], [15]. Tại Việt Nam, dù chưa có nhiều nghiên cứu công bố việc sử dụng trực tiếp mô hình TRIGRS, các nghiên cứu về sạt lở đất đã nhấn mạnh vai trò của lượng mưa và điều kiện địa chất thủy văn trong việc kích hoạt sạt lở [16], [17], [18], cho thấy tiềm năng ứng dụng của các mô hình thấm và ổn định mái dốc như TRIGRS.

Trong bối cảnh đó, nghiên cứu này tập trung vào việc xây dựng một phương pháp tiếp cận tích hợp, kết hợp tính ưu việt của mô hình vật lý TRIGRS trong việc mô phỏng quá trình thấm và đánh giá ổn định mái dốc theo thời gian với các nguồn dữ liệu mở sẵn có như dữ liệu địa hình, thảm phủ, thổ nhưỡng và dữ liệu mưa CHIRPS cho khu vực huyện Bát Xát (cũ). Bằng cách tận dụng khả năng phân tích động của TRIGRS, kết hợp với thông tin chi tiết và cập nhật từ các bộ dữ liệu mở, nghiên cứu này hướng đến việc cung cấp một công cụ hỗ trợ hữu ích cho công tác phòng ngừa và giảm thiểu rủi ro thiên tai do sạt lở đất gây ra tại khu vực nghiên cứu, đặc biệt trong bối cảnh thiếu hụt dữ liệu địa phương. Kết quả của nghiên cứu này kỳ vọng sẽ đóng góp vào việc xây dựng một hệ thống cảnh báo sớm sạt lở đất khả thi và hiệu quả cho huyện Bát Xát (cũ), cũng như cung cấp một khung phương pháp luận có thể nhân rộng cho các khu vực khác có điều kiện tương tự.

2. Dữ liệu và phương pháp nghiên cứu

2.1. Giới thiệu khu vực nghiên cứu

Huyện Bát Xát (cũ) nằm ở phía Tây Bắc tỉnh Lào Cai, có tọa độ địa lý từ 22°19' đến 22°40' vĩ độ Bắc và từ 103°29' đến 104°15' kinh độ Đông (Hình 1a). Huyện giáp tỉnh Vân Nam (Trung Quốc) về phía Tây Bắc và Đông Bắc, giáp huyện Phong Thổ (Lai Châu) ở phía Tây, và tiếp giáp thành phố Lào Cai ở phía Nam và Đông Nam. Diện tích tự nhiên toàn huyện khoảng 1.035,68 km². Khu vực nghiên cứu nằm trên nền địa chất cổ, chủ yếu gồm đá biến chất, đá magma xâm nhập và đá trầm tích biến chất, bị chia cắt bởi các hệ thống đứt gãy sâu và cấu trúc kiến tạo phức tạp. Các thành tạo đá tại đây chịu phong hóa mạnh, hình thành lớp vỏ phong hóa dày, rời rạc gồm đất sét và đất pha sét lẫn vụn đá. Địa hình đặc trưng bởi kiểu núi cao, chia cắt sâu, với độ cao trung bình 1.000-2.000 m tại khu vực phía Tây và Tây Bắc, nơi có đỉnh cao trên 3.000 m (Hình 1.b). Bát Xát thuộc khu vực có địa mạo núi trung bình đến núi cao trong đó địa mạo núi cao bị cắt xẻ phân bố ở vùng Tây Bắc, sườn dốc lớn hơn 35°, địa mạo núi thấp xen lẫn đồi tròn đỉnh bằng có độ cao từ 500 -1.400 m, độ dốc trung bình từ 25-35°.



Hình 1. Bản đồ vị trí và độ cao địa hình huyện Bát Xát (cũ): (a) Vị trí khu vực nghiên cứu, (b) Phân bố không gian của độ cao địa hình khu vực nghiên cứu

2.2. Phương pháp nghiên cứu

Sơ đồ tích hợp mô hình TRIGRS với các nguồn dữ liệu mở được trình bày ở Hình 2.

Dữ liệu đầu vào chính của hệ thống bao gồm: Dữ liệu địa hình, thổ nhưỡng và dữ liệu mưa. Cụ thể như sau:

Dữ liệu địa hình: Dữ liệu địa hình với độ phân giải không gian 30x30 m. Từ dữ liệu này, sử dụng các công cụ phân tích không gian trong ArcGIS, nghiên cứu xây dựng các bản đồ độ dốc và hướng dòng chảy. Độ sâu của tầng đất được xác định từ bản đồ độ dốc bằng phương trình hồi quy tuyến tính sau:

$$y = a * x + b \tag{1}$$

Trong đó: y là độ dày lớp đất (cm), x là độ dốc bề mặt tại vị trí khảo sát (đơn vị: độ), a , b là các hệ số của phương trình hồi quy. Trong nghiên cứu này, các hệ số này sẽ được xác định bằng số liệu đo đạc độ dày lớp đất được đo bằng radar xuyên đất tại một số vị trí điển hình trên địa bàn huyện Bát Xát (cũ). Sau khi biết các hệ số a , b , bản đồ độ dày lớp đất sẽ được xác định từ bản đồ độ dốc địa hình. Phương trình dạng tuyến tính này đã được áp dụng thành công trong một số nghiên cứu quốc tế về mô phỏng độ dày đất theo địa hình như tại Nhật Bản và Hoa Kỳ. Chẳng hạn, Gessler và cộng sự (1995) đã sử dụng độ dốc và độ lồi lõm địa hình để ước lượng độ dày đất trong địa hình núi [19]; Heimsath và cộng

sự (1997) mô hình hóa sự phân bố độ dày đất theo độ dốc tại vùng đồi granit ở California [20]. Tran và cộng sự (2018), Luca Schiliro và cộng sự (2021), K Song và cộng sự (2023) đã so sánh một số mô hình phân bố độ dày và kết luận rằng độ dày đất tuyến tính với góc dốc theo một phương trình thống kê [21], [22], [23].

Dữ liệu đất: Dữ liệu đất sử dụng trong nghiên cứu này được lấy từ CSDL SoilGrids (<https://soilgrids.org/>) với độ phân giải không gian 250x250 m. Các dữ liệu được lấy từ CSDL này bao gồm hàm lượng cát, sét và hữu cơ trong đất cũng như mật độ khối của đất (bulk density). Sử dụng các dữ liệu này nghiên cứu sẽ xác định các đặc tính thủy lực (độ dẫn thủy lực bão hòa, hệ số khuếch tán thủy lực) và các đặc tính cơ học của đất (độ lỗ rỗng, độ ẩm dư).

Dữ liệu mưa: Dữ liệu mưa đóng vai trò quan trọng trong mô phỏng sạt lở đất bằng mô hình TRIGRS, là nhân tố kích hoạt sạt lở thông qua thay đổi áp suất nước lỗ rỗng và hệ số an toàn sườn dốc. Do mạng lưới trạm đo mưa ở huyện Bát Xát (cũ) (Lào Cai) còn thưa thớt, nghiên cứu sử dụng dữ liệu mưa vệ tinh CHIRPS, có độ phân giải không gian 0,05° làm dữ liệu mưa đầu vào.

Mô hình TRIGRS: Mô hình TRIGRS là một công cụ mô phỏng dựa trên ô lưới, được thiết kế để phân tích thời gian và không gian xảy ra sạt lở đất nông do mưa. TRIGRS kết hợp hai thành phần chính (Hình 2):

- Mô hình thấm: Mô hình này tính toán sự thay đổi áp suất nước lỗ rỗng trong đất theo

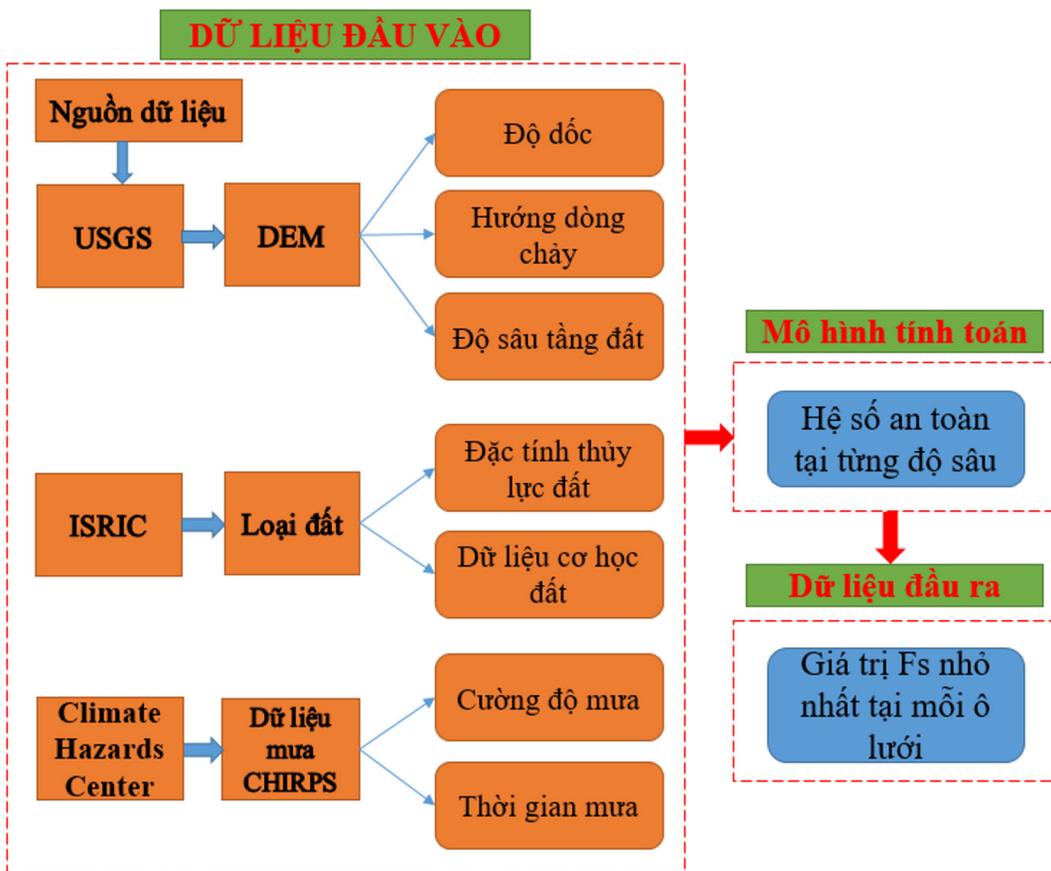
thời gian do quá trình thấm của nước mưa vào trong đất. Mô hình sử dụng các nghiệm giải tích của phương trình dòng chảy thấm một chiều trong môi trường đất đồng nhất, đẳng hướng, có thể là bão hòa hoặc chưa bão hòa. Mô hình có khả năng xử lý các chuỗi mưa có cường độ thay đổi theo thời gian.

- Mô hình ổn định sườn dốc: Mô hình này tính toán hệ số an toàn F_s (Factor of Safety) cho từng ô lưới dựa trên phương pháp cân bằng giới hạn. Mô hình xem xét các lực gây trượt (chủ yếu là trọng lực) và các lực chống trượt (chủ yếu là lực ma sát và lực dính của đất). Mô hình sử dụng giả định mặt trượt vô hạn để tính hệ số an toàn (F_s) cho từng ô lưới, dựa trên phương trình Richards được tuyến tính hóa theo đề xuất của Iverson [24]. Trong phân tích ổn định, F_s được định nghĩa là tỷ số giữa lực kháng ma sát Coulomb và lực trượt gây ra bởi trọng lực [11], được tính tại độ sâu Z theo công thức:

$$F_s(Z, t) = \frac{\tan\varphi'}{\tan\delta} + \frac{c' - \psi(Z, t)\gamma_w \tan\varphi'}{\gamma_s Z \sin\delta \cos\delta} \quad (2)$$

Trong đó: F_s là hệ số an toàn, γ_s là trọng lượng riêng của đất, γ_w là trọng lượng của nước ngầm, c' là độ kết dính, φ' là góc ma sát của đất, ψ áp suất nước lỗ rỗng, Z độ sâu mặt đất theo phương thẳng đứng, t là thời gian và δ là góc dốc. Sự thay đổi áp suất nước lỗ rỗng theo thời gian do thấm từ mưa sẽ ảnh hưởng trực tiếp đến ứng suất hiệu dụng và do đó tác động đến hệ số an toàn.

Đầu ra chính của mô hình là bản đồ ô lưới của hệ số an toàn cho biết mức độ ổn định của sườn dốc. $F_s < 1$ thường được coi là không ổn định và có khả năng xảy ra sạt lở. Độ phân giải của bản đồ hệ số an toàn có độ phân giải không gian 30x30 m do đó có thể đáp ứng yêu cầu về mức độ chi tiết của các cảnh báo sạt lở.



Hình 2. Sơ đồ khối cấu trúc mô hình TRIGRS trong tính toán

2.3. Dữ liệu nghiên cứu

a) Dữ liệu địa hình, loại đất, hướng dòng chảy

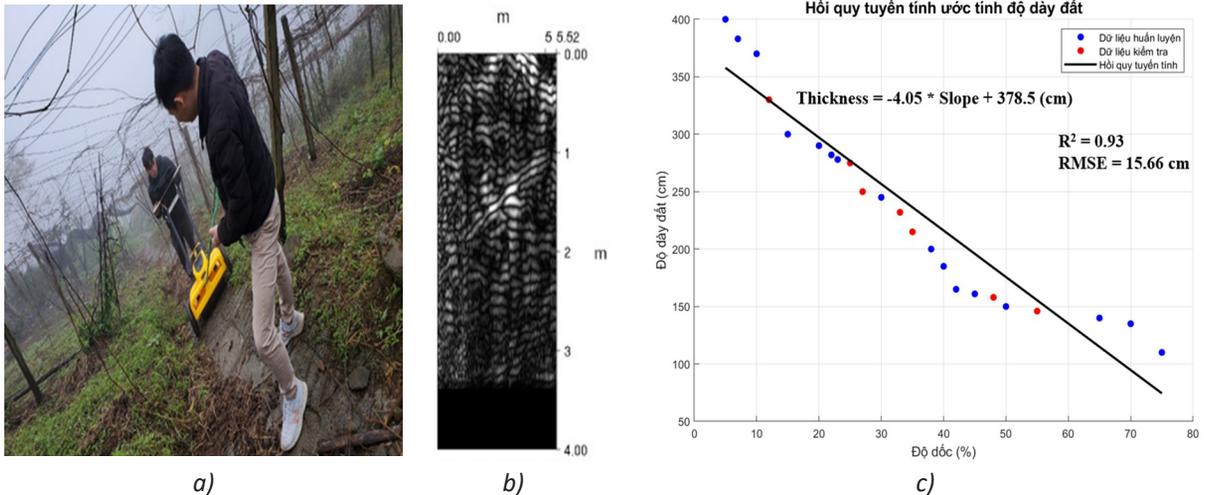
Dữ liệu địa hình: Dữ liệu địa hình DEM được sử dụng trong nghiên cứu cho huyện Bát Xát (cũ) có độ phân giải 30 m được tải từ CSDL của Cục địa chất mỹ (<https://earthexplorer.usgs.gov>). Từ dữ liệu này, độ dốc và hướng dòng chảy đã được xác định sử dụng các công cụ phân tích không gian trong ArcGIS.

- Độ dày đất (Zmax): Độ dày đất thay đổi do địa hình phức tạp ở huyện Bát Xát (cũ). Nếu độ dày là một giá trị không đổi được xác định bởi khu vực địa hình thoải thoải thì chắc chắn sẽ dẫn đến sai lệch trong tính toán mô hình dự đoán. Do vậy trong nghiên cứu đã đề xuất phương pháp xác định độ dày đất từ độ dốc địa hình bằng phương trình hồi quy tuyến tính (1). Để xác định các hệ số hồi quy a, b ở phương trình (1), dữ liệu độ dày lớp đất được tính từ dữ liệu tại 25 điểm khảo sát bằng thiết bị Radar xuyên đất (Ground Penetrating Radar - GPR) DS2000 được sử dụng (Hình 3a). Thiết bị cho phép xác định độ

sâu tầng đất phân biệt với tầng đá gốc dựa trên phản xạ điện từ, với độ chính xác cao trong điều kiện địa hình miền núi (Hình 3b). Đồng thời, tại mỗi điểm, giá trị độ dốc bề mặt được trích xuất từ mô hình số độ cao (DEM) độ phân giải 30 m. Tập dữ liệu 25 cặp độ dốc và độ dày lớp đất được chia thành hai phần để xác định các hệ số a, b: 70% dùng để xác định các hệ số và 30% còn lại để kiểm định. Kết quả hiệu chỉnh, kiểm định đã xác định được phương trình liên hệ độ dốc và độ dày lớp đất như sau:

$$y = -4,05x + 378,5 \text{ (cm)}$$

Kết quả hồi quy cho thấy (Hình 3c), có mối tương quan lớn giữa độ dày lớp đất và độ dốc địa hình (hệ số tương quan $R^2=0,93$). Mối tương quan này là mối quan hệ nghịch biến, phù hợp với nhiều nghiên cứu trước đây cho rằng ở những sườn dốc cao, quá trình xói mòn mạnh hơn dẫn đến tầng đất mỏng hơn [25]. Kết quả phân bố độ dày của đất được xác định tại (Hình 5a).



Hình 3. Khảo sát thực địa sử dụng máy radar xuyên đất xác định độ sâu lớp đất theo độ dốc (a); Một số kết quả đo từ máy tại 2 vị trí dốc (b); Kết quả hiệu chỉnh phương trình hồi quy tuyến tính ước tính độ dày đất (c)

- Loại đất và các thông số cơ học và thủy lực đất: Do khu vực nghiên cứu tại huyện Bát Xát (cũ) không có đủ dữ liệu thực đo về các thông số cơ học đất, nên trong nghiên cứu này bộ dữ liệu đất từ CSDL SoilGrids (<https://soilgrids.org/>) đã được sử dụng. Các thông số thu thập bao gồm: mật độ khối (bulk density, cg/cm^3) (Hình 4a),

hàm lượng đất sét (clay content, g/kg) (Hình 4b), hàm lượng cát (sand content, g/kg) (Hình 4c), hàm lượng bùn (silt content, g/kg) (Hình 4d) và hàm lượng cacbon hữu cơ (soil organic carbon, dg/kg) (Hình 4e). Từ các thông số này, các thông số thủy lực của đất làm đầu vào cho mô hình TRIGRS được xác định như sau:

+ Hệ số thấm nước bão hòa Ksat (mm/h) được ước tính từ các chỉ số hàm lượng cát và đất sét dựa trên phương trình thực nghiệm của Rawls & Brakensiek (1982) [26].

+ Độ kết dính (C, kPa) được tính toán theo phương trình hồi quy của Zhao et al. (2006), sử dụng hàm lượng đất sét và cacbon hữu cơ [27]

+ Góc ma sát trong (ϕ , độ) được tính toán từ tỷ lệ phần trăm đất sét và cát theo công thức thực nghiệm của Wegman (2008) [28], cho phép xác định khả năng chống trượt của đất.

+ Độ ẩm bão hòa (θ_{sat}) được xác định sử dụng mô hình của Cosby et al. (1984) [29]

+ Độ ẩm dư (θ_{res}) được xác định từ dữ liệu đầu vào hàm lượng cát và đất sét theo mô hình Clapp & Hornberger (1978) [30].

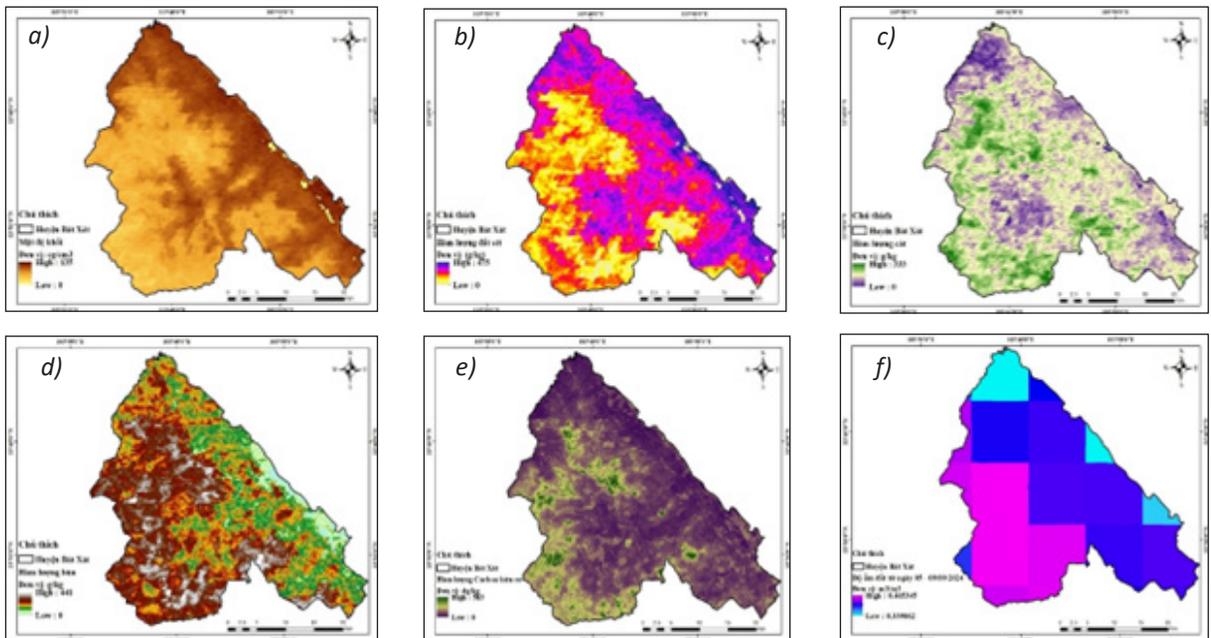
+ Trọng lượng của đất được tính toán dựa trên giá trị mật độ khối theo công thức: $\gamma_s = \rho_b \cdot g$ trong đó ρ_b là mật độ khối, g là gia tốc trọng trường tiêu chuẩn, lấy giá trị 9.81 m/s²) [31], [32].

- *Mưa vệ tinh CHIRPS*: Dữ liệu mưa CHIRPS giai đoạn 05-09/09/2024 được trích xuất và hiệu chỉnh bằng phương pháp phi tuyến $P_c = a \cdot P_{ob}$ [33], [34]. Các hệ số a và b được hiệu chỉnh sử dụng dữ liệu mưa thực đo tại trạm Lào Cai và dữ liệu mưa CHIRPS giai đoạn 2006-2023. Hình 6a và 6b cho thấy từ ngày 05/09 đến 09/09/2024,

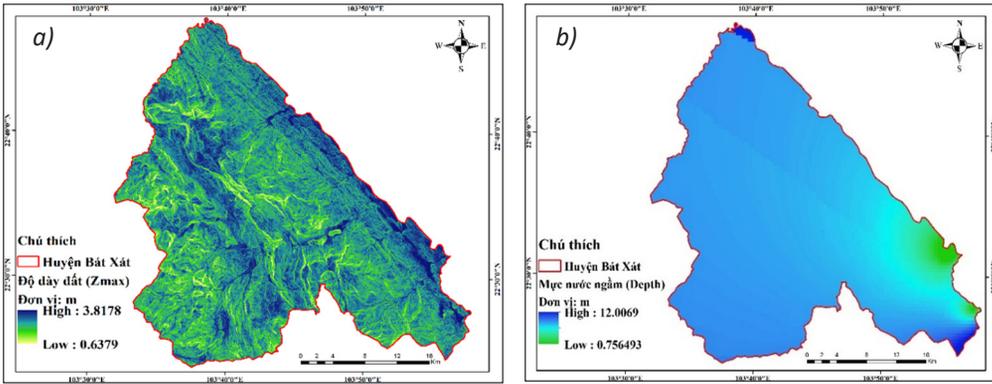
huyện Bát Xát (cũ) ghi nhận sự gia tăng rõ rệt về lượng mưa. Ngày 05/09 hoàn toàn không có mưa. Sang ngày 06/09, mưa bắt đầu xuất hiện, tập trung nhiều ở phía đông nam huyện. Ngày 07/09 mưa lan rộng hơn, với cường độ mạnh hơn ở phía Nam và Đông Nam. Cao điểm là ngày 08/09 và 09/09, mưa phân bố đều khắp huyện, đặc biệt mạnh ở phía nam và tây nam, với lượng mưa lớn nhất lên tới 129,75 mm/ngày và 124,41 mm/ngày. Đây là hai ngày các trận sạt lở đất được kích hoạt.

- *Mức nước ngầm ban đầu (Depth)*: Mức nước ngầm ban đầu tại huyện Bát Xát (cũ) được xác định dựa trên dữ liệu khảo sát từ 35 lỗ khoan địa chất thủy văn trên toàn tỉnh Lào Cai. Các số liệu độ sâu mực nước tĩnh được tổng hợp từ báo cáo điều tra tài nguyên nước dưới đất của tỉnh Lào Cai, sau đó nội suy không gian bằng phương pháp Kriging, tạo thành bản đồ raster mức nước ngầm, và cắt theo ranh giới hành chính huyện Bát Xát (cũ) để sử dụng làm đầu vào cho mô hình TRIGRS (Hình 5b).

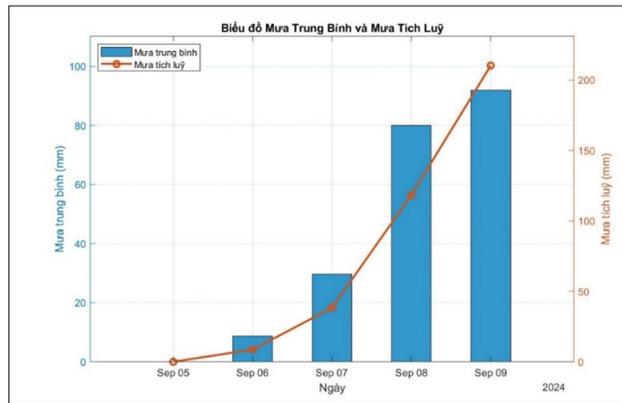
- *Độ ẩm ban đầu*: Độ ẩm ban đầu được triết xuất từ dữ liệu độ ẩm SMAP cho khu vực nghiên cứu (Soil Moisture Active Passive) được đo đạc và cung cấp bởi Cơ quan Hàng không và Vũ trụ Hoa Kỳ (NASA) (Hình 4e).



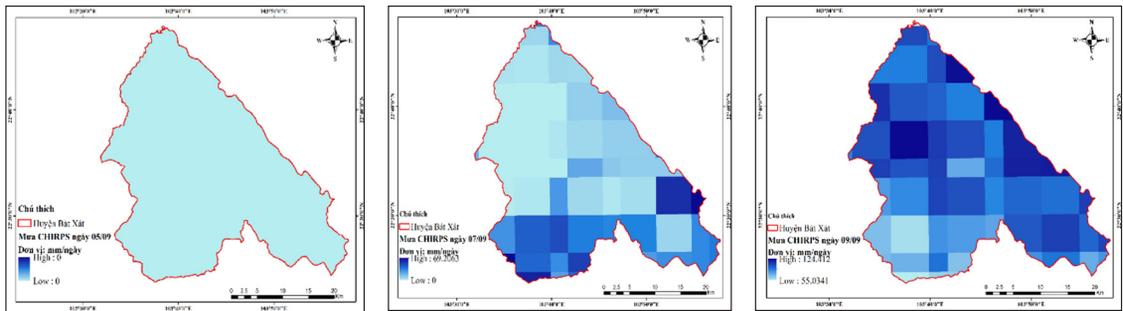
Hình 4. Dữ liệu tính chất vật lý, hóa học và độ ẩm SMAP của đất tại huyện Bát Xát (cũ) sử dụng tính toán thông số cơ học đất



Hình 5. Phân bố các thông số của khu vực nghiên cứu: (a) Phân bố độ dày của đất; (b) Phân bố độ sâu mực nước ngầm



a)



b)

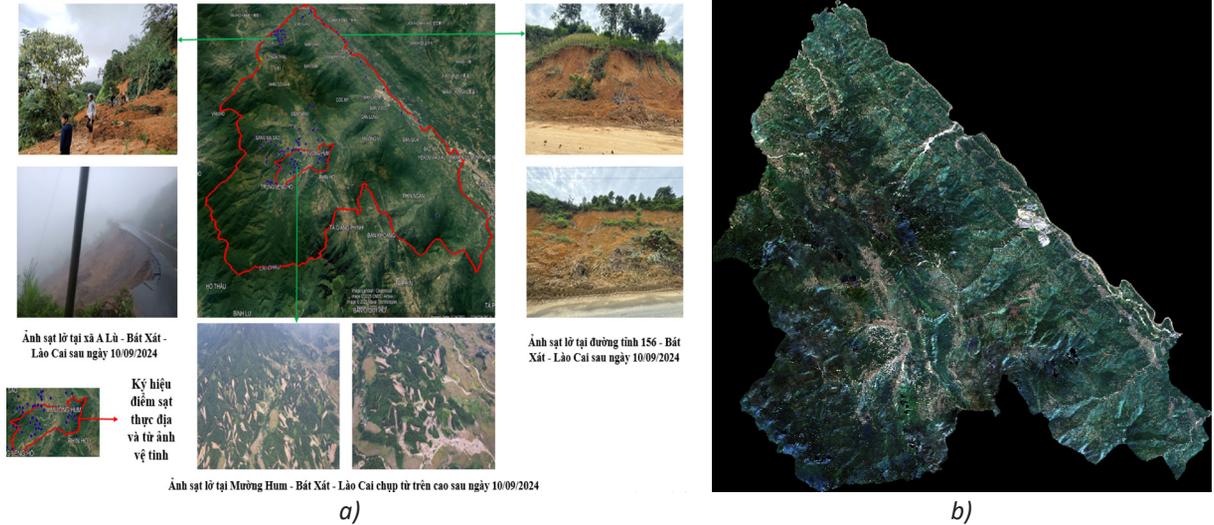
Hình 6. Biểu đồ so sánh lượng mưa CHIRPS hiệu chỉnh tại B và trạm đo mưa Lào Cai (Hình 6.a) và bản đồ phân bố không gian mưa trên huyện Bát Xát (cũ) (Hình 6.b) từ ngày 05/09/2024 đến ngày 09/09/2024

- Dữ liệu các điểm sạt lở: Để đánh giá độ tin cậy của mô hình TRIGRS trong mô phỏng nguy cơ sạt lở do mưa lớn tại huyện Bát Xát (cũ), nghiên cứu đã tiến hành kiểm chứng các kết quả mô phỏng trong giai đoạn từ 05/09/2024 đến 09/09/2024 với các vụ sạt lở thực tế ghi nhận trong cùng khoảng thời gian. Công tác kiểm chứng được thực hiện thông qua tổng hợp và biên tập bộ danh mục các vụ sạt lở xảy

ra trên địa bàn, bao gồm các thông tin về thời gian, vị trí (tọa độ), mức độ ảnh hưởng của từng vụ sạt lở. Dữ liệu kiểm chứng được thu thập từ nhiều nguồn đáng tin cậy: Khảo sát thực địa tại các xã trọng điểm như A Lù, Mường Hum, Y Tý, nơi ghi nhận thiệt hại đáng kể do mưa lớn; báo cáo từ UBND xã, huyện; phản ánh từ người dân địa phương thông qua các cuộc phỏng vấn (Hình 7a). Bên cạnh dữ liệu định tính, nhóm

ngiên cứu cũng sử dụng ảnh vệ tinh độ phân giải cao Sentinel-2 và Landsat thu nhận ngay sau sự kiện mưa (sau ngày 10/09/2024) để xác

định các dấu hiệu sạt lở mới hình thành, như bề mặt đất trống, vết xói mòn, dịch chuyển thảm thực vật (Hình 7b).



Hình 7. (a) Ảnh khảo sát thực địa các điểm sạt lở sau ngày 09/09/2024; (b) Ảnh vệ tinh thu thập sau ngày 09/09/2024

3. Kết quả và thảo luận

Để đánh giá hiệu quả của phương pháp đã trình bày ở trên, nghiên cứu tiến hành thử nghiệm cảnh báo sạt lở cho các trận sạt lở đất từ ngày 05/09/2024 đến ngày 09/09/2024 do ảnh hưởng của hoàn lưu cơn bão số 3 (Yagi) trên địa bàn tỉnh Bát Xát. Các trận sạt lở đất này là các trận sạt lở nghiêm trọng nhất trong những năm gần đây, đã gây nhiều thiệt hại lớn cho huyện Bát Xát (cũ) nói riêng và tỉnh Lào Cai nói chung.

Đánh giá kết quả mô hình TRIGRS

Diễn biến sự thay đổi của hệ số ổn định theo thời gian được trình bày ở Hình 8 và Bảng 1 dưới đây. Trong giai đoạn đầu của sự kiện (từ 0 h đến 24 h ngày 05/09/2024), khu vực nghiên cứu không ghi nhận mưa, mô hình TRIGRS cho thấy toàn bộ khu vực có hệ số an toàn (F_s) > 0,9, tỷ lệ % các ô pixel không ổn định là 0% phản ánh trạng thái ổn định của sườn dốc. Tại thời điểm $t = 48$ h (ngày 06/09), mưa bắt đầu xuất hiện với lượng trung bình 8,8 mm/ngày, cục bộ đạt 39 mm; các điểm có $F_s < 0,9$ có nguy cơ sạt lở bắt đầu hình thành, tập trung ở một số vùng có độ dốc lớn (Hình 8.a và Bảng 1) các ô pixel không ổn định tăng nhẹ 1,15%. Đến $t = 72$ h (ngày 07/09), lượng mưa tăng lên trung bình 29,7 mm, cục bộ

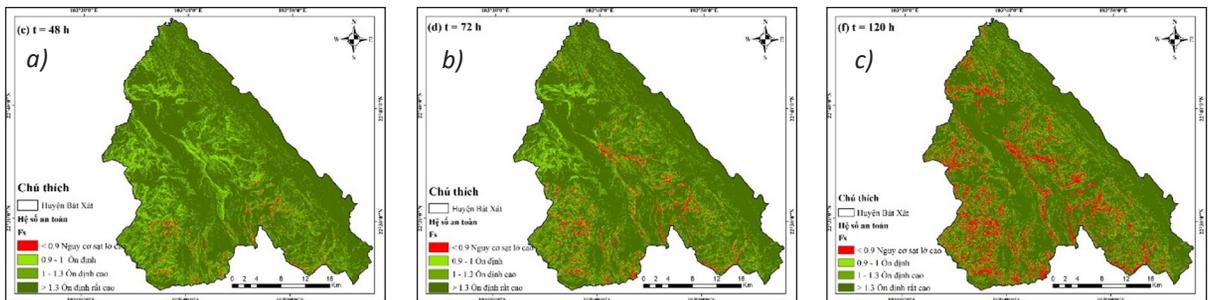
69,2 mm, khiến các vùng mất ổn định lan rộng rõ rệt, các ô pixel mất ổn định tăng lên gấp 3 lần 3,59% (Hình 8b và Bảng 1). Giai đoạn $t = 96$ h đến 120 h (ngày 08-09/09), mưa đạt đỉnh với trung bình 92 mm/ngày, tích lũy 210,3 mm, cục bộ 130 mm/ngày, dẫn đến sự gia tăng mạnh các ô lưới có $F_s < 0,9$ từ 3,59% lên tới 10,74%, phản ánh nguy cơ sạt lở cao trên diện rộng (Hình 8c và Bảng 1).

Để đánh giá định lượng hiệu suất của mô hình TRIGRS, nghiên cứu sử dụng phương pháp ROC. Đường cong ROC thể hiện mối quan hệ giữa tỷ lệ dương tính thực (TPR) và dương tính giả (FPR) tại nhiều ngưỡng khác nhau, trong đó diện tích dưới đường cong (AUC) cho biết độ chính xác tổng thể của mô hình. Bản đồ F_s vào ngày 09/09 được so sánh với 157 điểm sạt lở khảo sát thực tế tại huyện Bát Xát (cũ) để xác định khả năng phát hiện đúng các khu vực không ổn định (TP) và tránh cảnh báo sai (FP). Các pixel được phân loại thành bốn nhóm: TP, FP, TN, FN tương ứng với khả năng dự báo đúng hoặc sai. TPR và TNR lần lượt đánh giá độ nhạy và độ đặc hiệu của mô hình, được thể hiện trực quan qua đường cong ROC, giúp kiểm định khả năng cảnh báo không gian của TRIGRS.

Kết quả đánh giá hiệu suất mô hình ổn định

sườn dốc dựa trên ngưỡng $F_s < 0,9$ cho thấy mức độ phân loại khá tốt trong việc nhận diện các khu vực có nguy cơ sạt lở. Tổng số pixel có giá trị trong nghiên cứu là 1.169.235, trong đó 10,74% (125.558 pixel) được phân loại không ổn định theo ngưỡng F_s đã chọn. Trong tập dữ liệu kiểm chứng gồm 157 điểm sạt lở thực tế và 157 điểm ổn định (âm tính thực) mô hình đã dự đoán đúng 82 điểm sạt lở (TP) trong khi đó bỏ sót 75 điểm còn lại (FN), đạt tỷ lệ dự đoán đúng sạt lở (TPR) là 52,23% (Hình 9b). Đáng chú ý, mô hình không đưa ra bất kỳ dự đoán sau nào đối với điểm ổn định (FP = 0) dẫn đến tỷ lệ dự đoán

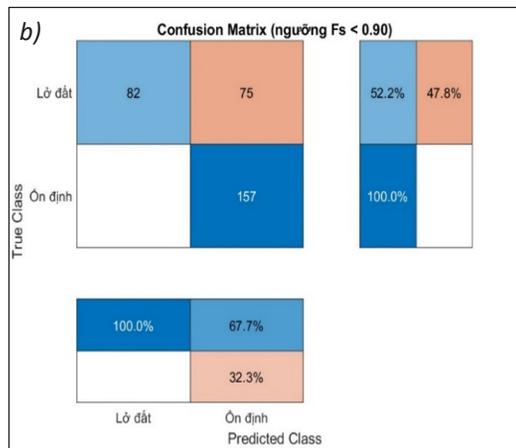
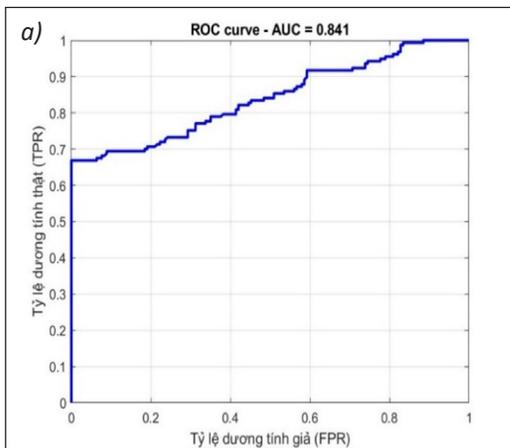
đúng điểm ổn định TNR đạt tuyệt đối. Chỉ số AUC (Area Under ROC Curve) đạt 0,841 (Hình 9a) cho thấy mô hình có khả năng phân biệt tốt giữa các điểm ổn định và không ổn định, phản ánh chất lượng phân loại tổng thể ở mức khá cao. Tuy nhiên, với tỷ lệ bỏ sót sạt lở (FN) còn tương đối lớn (47,77%), điều này cho thấy mô hình vẫn có xu hướng đánh giá thấp nguy cơ tại một số vị trí xảy ra sạt lở thực tế. Điều này có thể được cải thiện thông qua việc tinh chỉnh ngưỡng F_s tối ưu. Nhìn chung mô hình cho kết quả phân loại cao, ưu tiên giảm thiểu cảnh báo sai, điều này là phù hợp trong bối cảnh cảnh báo sớm.



Hình 8. Điều kiện ổn định mái dốc được thể hiện theo hệ số an toàn F_s , trong sự kiện mưa từ ngày 05/09/2024 đến 09/09/2024

Bảng 1. Tỷ lệ % số lượng pixel không ổn định được TRIGRS dự đoán tại các thời điểm khác nhau trong giai đoạn mưa nghiên cứu

Tỷ lệ phần trăm (%)	24 (h)	48 (h)	72 (h)	96 (h)	120 (h)
$F_s < 0,9$	0,00 %	1, 15 %	3,59 %	7,2%	10,74 %
$0,9 < F_s < 1$	7,59 %	6,82 %	5,94 %	5,35 %	5,65 %
$1 < F_s < 1,3$	25,65 %	25,32 %	24,41 %	23,21 %	22,19 %
$F_s > 1,3$	66,76 %	66,71 %	66,06 %	64,25 %	61,42 %



Hình 9. (a) Đường cong ROC được thực hiện bằng cách so sánh giữa bản đồ F_s và điểm sạt lở thực tế; (b) Các điểm sạt lở bị mô hình bỏ sót; (c) Bản đồ Confusion Matrix dự đoán đúng và sai từ mô phỏng TRIGRS

4. Kết luận

Nghiên cứu này đã triển khai ứng dụng mô hình TRIGRS cho huyện Bát Xát (cũ) tỉnh Lào Cai với hai đóng góp chính. Thứ nhất, bằng cách tích hợp có hệ thống các nguồn dữ liệu mở uy tín toàn cầu với khảo sát thực địa chuyên sâu, chúng tôi đã xây dựng được một quy trình xác định tham số đầu vào đáng tin cậy cho mô hình TRIGRS, góp phần khắc phục hiệu quả tình trạng thiếu hụt dữ liệu tại các khu vực miền núi Việt Nam. Thứ hai, mô hình TRIGRS cho thấy hiệu suất dự báo không gian cao, tái hiện thành công các trận sạt lở đất xảy ra vào tháng 9 năm 2024 do ảnh hưởng của hoàn lưu cơn bão số 3. Phân tích đường cong ROC ghi nhận giá trị AUC đạt 0,841, phản ánh năng lực phân biệt tương đối tốt giữa các khu vực có nguy cơ sạt lở và khu vực ổn định. Ngoài ra, mô hình đã mô tả sát diễn biến theo thời gian của hệ số ổn định (F_s) dưới tác động của mưa, qua đó khẳng định tiềm năng ứng dụng TRIGRS như một công cụ cảnh báo sớm trượt lở đất theo thời gian thực

tại các khu vực miền núi còn thiếu dữ liệu. Các kết quả đạt được xác nhận tính khả thi của TRIGRS không chỉ trong công tác nghiên cứu mà còn có thể áp dụng trong vận hành các hệ thống cảnh báo sớm trượt lở đất tại các quốc gia đang phát triển.

Trong tương lai, các nghiên cứu tiếp theo nên tập trung hoàn thiện chất lượng các tham số đầu vào cho mô hình TRIGRS bằng cách tích hợp dữ liệu viễn thám độ phân giải cao và mở rộng các đợt khảo sát thực địa nhằm nâng cao khả năng hiệu chuẩn mô hình cho nhiều điều kiện địa chất và khí hậu khác nhau. Bên cạnh đó, việc tích hợp đầu ra của TRIGRS với các mô hình dự báo mưa và mạng lưới cảm biến IoT có thể giúp cải thiện đáng kể tính kịp thời và độ tin cậy của các hệ thống cảnh báo sớm. Khả năng khai thác hiệu quả các nguồn dữ liệu mở được chứng minh trong nghiên cứu này mở ra cơ hội nhân rộng các chiến lược quản lý rủi ro trượt lở đất cho những khu vực thiếu dữ liệu khác, đóng góp vào việc xây dựng cơ sở hạ tầng bền vững và giảm thiểu rủi ro thiên tai.

Đóng góp của tác giả: Xây dựng ý tưởng và phương pháp nghiên cứu: Trần Anh Phương, Trần Văn Tú, Trần Bảo Chung, Nguyễn Anh Đức, Vũ Đăng Tiếp; Xử lý số liệu: Trần Văn Tú, Trần Bảo Chung, Vũ Đăng Tiếp; Tính toán: Trần Bảo Chung; Phân tích kết quả và viết bản thảo bài báo: Trần Anh Phương, Trần Văn Tú, Trần Bảo Chung; Chỉnh sửa bài báo: Trần Văn Tú, Trần Bảo Chung; Kiểm soát, định hướng nghiên cứu: Trần Anh Phương, Nguyễn Anh Đức.

Lời cảm ơn: Bài báo hoàn thành nhờ vào kết quả của đề tài khoa học công nghệ cấp bộ “Nghiên cứu công nghệ tích hợp số liệu độ ẩm đất viễn thám SMAP, mô hình mô phỏng dòng chảy và biến động sườn dốc phục vụ xây dựng hệ thống cảnh báo sạt lở đất và lũ bùn đá” do Viện Khoa học tài nguyên nước chủ trì thực hiện.

Lời cam đoan: Tập thể tác giả cam đoan bài báo này là công trình nghiên cứu của mình, chưa từng công bố trước đó, không sao chép, đạo văn; không có sự tranh chấp lợi ích trong nhóm tác giả.

Tài liệu tham khảo

- [1] I. Alcántara-Ayala, “Landslides in a changing world,” *Landslides*, pp. 1-15, 2025. <https://doi.org/10.1007/s10346-024-02451-1>.
- [2] V. C. Đạt và cộng sự, “Xây dựng bản đồ phân vùng nguy cơ sạt lở đất tại huyện Mường Chà, tỉnh Điện Biên sử dụng các kỹ thuật phân loại K-Nearest-Neighbor và Gradient Boosting,” *Tạp chí Khí tượng Thủy văn*, tập 744, số 1, trang 81-90, 2022. [https://doi.org/10.36335/VNJHM.2022\(744\(1\)\).81-90](https://doi.org/10.36335/VNJHM.2022(744(1)).81-90)
- [3] H. N. Tuấn và V. T. Tuyết, “Nghiên cứu xây dựng bản đồ phân vùng nguy cơ sạt lở đất cho khu vực miền núi tỉnh Quảng Nam,” *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi*, tập 68, trang 1-9, 2021.
- [4] A. V. Tran et al., “Landslides detection in Bat Xat district, Lao Cai province, Vietnam using the ALOS PALSAR time-series imagery by the SBAS method,” *Journal of Mining and Earth Sciences*, vol. 61, no. 4, pp. 1-10, 2020.
- [5] E. Arnone et al., “Physically-based and distributed approach to analyze rainfall-triggered

- landslides at watershed scale,” *Geomorphology*, vol. 133, no. 3-4, pp. 121-131, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.03.019>.
- [6] C. Funk et al., “The climate hazards infrared precipitation with stations-A new environmental record for monitoring extremes,” *Scientific Data*, vol. 2, no. 1, pp. 1-21, 2015. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>.
- [7] M. García et al., “Multispectral and LiDAR data fusion for fuel type mapping using Support Vector Machine and decision rules,” *Remote Sensing of Environment*, vol. 115, no. 6, pp. 1369-1379, 2011. Ghi chú: DOI gốc: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.01.017>.
- [8] S. Segoni, D. Lagomarsino, R. Fanti, S. Moretti và N. Casagli, “Integration of rainfall thresholds and susceptibility maps in the Emilia Romagna (Italy) regional-scale landslide warning system,” *Landslides*, vol. 12, pp. 773-785, 2015.
- [9] D. R. Montgomery và W. E. Dietrich, “A physically based model for the topographic control on shallow landsliding,” *Water Resources Research*, vol. 30, no. 4, pp. 1153-1171, 1994.
- [10] R. T. Pack et al., *SINMAP: A Stability Index Approach to Terrain Stability Hazard Mapping - User's Manual*. Terratech Consulting Ltd., 1998.
- [11] R. L. Baum et al., *TRIGRS-A Fortran Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis*. USGS Open-File Report 02-424, 2002.
- [12] R. L. Baum et al., *TRIGRS: A Fortran Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis, Version 2.0*. Reston, VA: U.S. Geological Survey, 2008.
- [13] A. Dikshit et al., “Estimation of rainfall-induced landslides using the TRIGRS model,” *Earth Systems and Environment*, vol. 3, pp. 575-584, 2019.
- [14] M. Bordoni et al., “Site-specific to local-scale shallow landslides triggering zones assessment using TRIGRS,” *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 15, no. 5, pp. 1025-1050, 2015.
- [15] L. Fang, “Prediction of rainfall-induced landslide-mudslide hazard chain using coupled TRIGRS and RAMMS models,” *International Journal of Information System Modeling and Design*, vol. 16, no. 1, pp. 1-23, 2025.
- [16] N. Đ. Đảm và cộng sự, “Phát triển mô hình học máy cây quyết định và cây quyết định xen kẽ thành lập bản đồ dự báo không gian sạt lở đất tại huyện Mường Nhé, tỉnh Điện Biên, Việt Nam,” *Tạp chí Điện tử Khoa học và Công nghệ Giao thông*, tập 2, số 1, trang 36-56, 2022.
- [17] H. Đ. Bảo và cộng sự, “Phân vùng và dự báo nguy cơ sạt lở đất trên địa bàn huyện Krông Bông, tỉnh Đắk Lắk trong điều kiện biến đổi khí hậu,” *Tạp chí Khoa học Tây Nguyên*, tập 17, số 59, trang 40-50, 2023.
- [18] L. T. M. Đạt và cộng sự, “Dự báo nguy cơ trượt lở đất cho huyện A Lưới, tỉnh Thừa Thiên Huế sử dụng mô hình Logistic regression,” *Tạp chí Khoa học và Công nghệ - Đại học Đà Nẵng*, tập 20, số 9, trang 5-10, 2022.
- [19] P. E. Gessler et al., “Modeling soil-landscape and ecosystem properties using terrain attributes,” *Soil Science Society of America Journal*, vol. 64, no. 6, pp. 2046-2056, 2000.
- [20] A. M. Heimsath et al., “The soil production function and landscape equilibrium,” *Nature*, vol. 388, no. 6640, pp. 358-361, 1997.
- [21] T. V. Tran et al., “Three-dimensional, time-dependent modeling of rainfall-induced landslides over a digital landscape: A case study,” *Landslides*, vol. 15, pp. 1071-1084, 2018.
- [22] L. Schilirò et al., “Regional analyses of rainfall-induced landslide initiation in Upper Gudbrandsdalen (South-Eastern Norway) using TRIGRS model,” *Geosciences*, vol. 11, no. 1, p. 35, 2021.
- [23] K. Song et al., “Stability prediction of rainfall-induced shallow landslides: A case study of mountainous area in China,” *Water*, vol. 15, no. 16, p. 2938, 2023.
- [24] R. M. Iverson, “Landslide triggering by rain infiltration,” *Water Resources Research*, vol. 36, no. 7, pp. 1897-1910, 2000.
- [25] T. K. Tesfa et al., “Modeling soil depth from topographic and land cover attributes,” *Water Resources Research*, vol. 45, no. 10, pp. 1-16, 2009.

- [26] W. J. Rawls và D. L. Brakensiek, "Estimating soil water retention and hydraulic properties," *Advances in Soil Science*, vol. 1, pp. 213-234, 1982.
- [27] Y. Zhao et al., "Spatial variability of soil properties affected by grazing intensity in Inner Mongolia grassland," *Ecological Modelling*, vol. 198, no. 1-2, pp. 178-189, 2006.
- [28] K. Wegman, "Mechanics of materials and soils in mountainous terrain," *Journal of Geotechnical Studies*, vol. 12, no. 3, pp. 145-158, 2008.
- [29] B. J. Cosby et al., "A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils," *Water Resources Research*, vol. 20, no. 6, pp. 682-690, 1984.
- [30] R. B. Clapp và G. M. Hornberger, "Empirical equations for some soil hydraulic properties," *Water Resources Research*, vol. 14, no. 4, pp. 601-604, 1978.
- [31] B. M. Das, *Principles of Geotechnical Engineering*, 8th ed. Boston: Cengage Learning, 2013.
- [32] D. P. Coduto, M. R. Yeung và W. A. Kitch, *Geotechnical Engineering: Principles and Practices*, 2nd ed. Pearson Education, 2010.
- [33] R. R. E. Vernimmen et al., "Evaluation and bias correction of satellite rainfall data for drought monitoring in Indonesia," *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 16, no. 1, pp. 133-146, 2012.
- [34] T. Lafon et al., "Bias correction of daily precipitation simulated by a regional climate model: A comparison of methods," *International Journal of Climatology*, vol. 33, no. 6, pp. 1367-1381, 2013.

STUDY ON THE INTEGRATION POTENTIAL OF PHYSICAL MODELS WITH OPEN DATA SOURCES FOR LANDSLIDE EARLY WARNING: A PILOT IN THE FORMER BAT XAT DISTRICT, LAO CAI PROVINCE

Tran Van Tu⁽¹⁾, Tran Bao Chung⁽¹⁾, Tran Anh Phuong⁽¹⁾, Nguyen Anh Duc⁽¹⁾, Vu Dang Tiep⁽²⁾

⁽¹⁾Water Resources Institute

⁽²⁾Institute of Strategy and Policy on Agriculture and Environment

Received: 11/5/2025; Accepted: 05/6/2025

Abstract: In recent years, landslides have become increasingly frequent and severe, causing significant losses in both human lives and property, particularly in mountainous areas with steep, highly fragmented terrain such as Bat Xat District (former), Lao Cai Province. However, landslide early warning efforts in these areas face many challenges due to a lack of input data for warning models. This study proposes an integrated approach that combines the TRIGRS physical model with open datasets to support landslide early warning in Bat Xat District (former). The open data sets used in the study include CHIRPS satellite rainfall data, SMAP soil moisture, topography, and soil composition (sand, clay, organic matter). Based on soil composition, key hydraulic and mechanical soil parameters required for landslide simulation were derived. Notably, soil layer thickness was estimated by integrating ground-penetrating radar (GPR) field survey data with terrain slope information. The model was applied to simulate landslide conditions during the flood event from 5 to 9 September 2024. The results show that the proposed approach achieves relatively high predictive performance, with an area under the curve (AUC) score reached 0.841, indicating strong discrimination of landslide susceptibility. Compared to 157 actual recorded landslide points, the model accurately predicted 82 points (True Positive Rate, TPR = 52.23%). These results demonstrate the potential application of the TRIGRS model in developing early warning systems for landslides in mountainous areas with limited access to traditional observational data.

Keywords: Landslide, physical modeling, TRIGRS model, open datasets, early warning system.