

Bài báo khoa học

## **Phân vùng nguy cơ trượt lở đất ứng dụng GIS, viễn thám và kỹ thuật đa yếu tố tại huyện Bù Đăng, tỉnh Bình Phước, Việt Nam**

**Nguyễn Thị Kim Trang<sup>1</sup>, Phạm Khắc Khoa<sup>1</sup>, Nguyễn Nhật Nguyên<sup>1</sup>, Ngô Trần Sang<sup>1</sup>, Lê Trọng Diệu Hiền<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup> Trường Đại học Thủ Dầu Một; 2128501010189@student.tdmu.edu.vn;  
phamkhoa855@gmail.com; 2128501010079@student.tdmu.edu.vn;  
2128501010073@student.tdmu.edu.vn; hienltd@tdmu.edu.vn

\*Tác giả liên hệ: hienltd@tdmu.edu.vn; Tel.: +84–372831517

Ban Biên tập nhận bài: 12/9/2024; Ngày phản biện xong: 18/10/2024; Ngày đăng bài: 25/3/2025

**Tóm tắt:** Nghiên cứu này đã vận dụng kỹ thuật GIS và viễn thám kết hợp với phân tích nhiều yếu tố và thống kê chỉ số tại biến nhằm xác định mối quan hệ giữa các yếu tố chính ảnh hưởng trượt lở đất bao gồm thổ nhưỡng, lượng mưa, chỉ số thực vật (NDVI), chỉ số nước (NDWI), địa hình (độ cao, hướng sườn, độ cong tiếp tuyến, và độ cong địa hình), khoảng cách tới đường giao thông, và khoảng cách tới mặt nước. Bản đồ phân vùng nguy cơ trượt lở đất hình thành từ quá trình chồng xếp của 10 bản đồ phân lớp yếu tố ảnh hưởng, phân chia thành 3 mức độ: Thấp (1), trung bình (2), cao (3). Kết quả nghiên cứu chỉ ra rằng, nguy cơ trượt lở đất thấp với diện tích 73.273,5 ha, tiếp đến là nguy cơ trượt lở trung bình và cao với diện tích 44.884,6 ha và 29.886,8 ha lần lượt chiếm 49,5%; 30,3% và 20,2% diện tích tự nhiên. Bản đồ nguy cơ trượt lở đất được xác định bằng đường cong ROC sử dụng dữ liệu thử nghiệm 30%. Kết quả đối với diện tích dưới đường cong (AUC) tỷ lệ dự đoán là 50% đối với độ nguy cơ trượt lở đất cao, thấp và trung bình với độ chính xác là 75%. Bản đồ nhạy cảm trượt lở đất là công cụ hỗ trợ giám sát dự báo trượt lở đất cho người dân và chính quyền địa phương, hữu ích trong công tác quy hoạch và quản lý đất đai, nhằm giảm thiểu đáng kể rủi ro thiên tai do trượt lở gây ra.

**Từ khóa:** GIS; Viễn thám; Kỹ thuật đa yếu tố; Trượt lở đất; Bình Phước.

### **1. Đặt vấn đề**

Trượt lở đất (*Landslide*), loại hình thiên tai phổ biến nhất ở các quốc gia trên thế giới bao gồm Việt Nam. Các tác động tiêu cực từ thiên tai trượt lở đất gây ảnh hưởng lớn đến đời sống người dân, tổn thất về tài sản, đặc biệt khiến môi trường cảnh quan bị hủy hoại, ô nhiễm môi trường ảnh hưởng đến hệ sinh thái. Trượt lở đất còn được xem là một trong những tai biến địa chất phổ biến, với khoảng 9% thảm họa thiên nhiên xảy ra trên thế giới liên quan đến dạng tai biến này [1]. Căn cứ theo 5 loại tai biến địa chất, trượt lở đất được xếp thứ 4 sau động đất, núi lửa phun trào, tuyết lở và đứng trước hồ sụt. Trước thực trạng trên, cần có biện pháp phòng chống và ứng phó với tai biến trượt lở đất, giảm thiểu thiệt hại do trượt lở đất gây ra ở những khu vực có nguy cơ trượt lở cao. Ngày nay, ứng dụng hệ thống thông tin địa lý (GIS) và viễn thám (RS) để đánh giá mức độ trượt lở đất có tầm quan trọng rất lớn, giúp nâng cao hiệu quả công tác phòng chống, ứng phó và giảm thiểu thiệt hại từ thiên tai trượt lở đất. Sử dụng ảnh viễn thám giúp các nhà nghiên cứu xác định các thông tin về vị trí trượt lở đất, theo dõi sự biến đổi của các khu vực có nguy cơ trượt lở đất. Điều này giúp phát hiện sớm các dấu hiệu trượt lở đất, từ đó có biện pháp ứng phó kịp thời. Ngoài ra, sử dụng ảnh viễn thám giúp các nhà nghiên cứu quan sát khu vực trượt lở đất một cách tổng thể, dự báo

nhANH mức độ trượt lở đất tại khu vực. Bên cạnh đó khi tích hợp viễn thám với công nghệ GIS nhằm xây dựng bản đồ về địa hình, địa chất và bản đồ nguy cơ trượt lở dựa trên dữ liệu ảnh vệ tinh đã thu thập, xử lý và xây dựng thành cơ sở dữ liệu không gian GIS.

Đã có nhiều nhà khoa học ngoài nước tiếp cận nghiên cứu nguy cơ trượt lở đất bằng nhiều cách khác nhau như nghiên cứu thực hiện lập bản đồ nhạy cảm trượt lở đất (LSM) tại Thành phố Sidi Abdellah, Bắc Algeria [2]; bằng cách sử dụng các phương pháp quy trình phân tích thứ bậc (AHP) và tỷ lệ tần số (FR) cho tiểu lưu vực sông Chemoga (CRSB) [3] đã thành lập bản đồ mức độ nhạy cảm với lở đất dựa trên GIS. Bên cạnh đó, nghiên cứu xây dựng bản đồ nhạy cảm trượt lở đất khu vực Thành phố Bắc Kạn bằng việc sử dụng phương pháp ứng dụng công nghệ hệ thống thông tin địa lý (GIS) kết hợp với phương pháp thống kê để xây dựng bản đồ nhạy cảm trượt lở đất trên khu vực Thành phố Bắc Kạn. Bản đồ được xây dựng dựa trên các yếu tố và nguyên nhân xảy ra trượt lở bao gồm: độ cao, độ dốc, địa chất công trình, địa mạo, thạch học,... và một số hoạt động từ con người trong quá trình sử dụng đất [4]; sử dụng phương pháp GIS kết hợp phương pháp ứng dụng mô hình TRIGRS để mô phỏng trượt lở khu vực Lào Cai, Việt Nam [5]; sử dụng công cụ GIS kết hợp với sử dụng mô hình trọng số dẫn chứng (WOE) xây dựng bản đồ nguy cơ trượt lở đất tại tỉnh Quảng Nam [6].

Hiện nay phương pháp học máy, học sâu, trí tuệ nhân tạo đang phát triển mạnh mẽ. Do đó, những phương pháp này cũng đã được ứng dụng trong việc thành lập các bản đồ phân vùng trượt lở đất. Nghiên cứu [7] đã sử dụng 5 mô hình học máy bao gồm Support vector machine (SVM), hồi quy logistic (*Logistic Regression - LR*), phân tích phân biệt tuyến tính (*Linear Discriminant Analysis - LDA*), rừng ngẫu nhiên (*Random Forest - RF*), và *Extreme Gradient Boosting (XGBoost)* để thành lập bản đồ phân vùng trượt lở ở Quận Polk ở Tây Bắc Carolina. Kết quả cho thấy rằng XGBoost có độ chính xác cao nhất trong kịch bản 1 (dựa vào độ dốc), trong khi đó RF là mô hình phân vùng trượt lở tốt nhất trong kịch bản 2 (dựa vào vùng đệm). Nghiên cứu [8] cũng sử dụng 5 phương pháp học máy bao gồm Bagging, Random Forests, AdaBoost, Gradient Tree Boosting, and Neural Networks để phân vùng trượt lở cho vùng Lombardy, phía Bắc Italy. Kết quả cho thấy rằng Neural Networks đạt độ chính xác cao nhất với độ chính xác là 0,93. Trong một nghiên cứu khác [9] đã so sánh các phương pháp LR, mạng thần kinh nhân tạo (*ANN - Artificial Neural Network*) và SVM để phân vùng trượt lở bằng cơ sở dữ liệu không gian thông qua 11 yếu tố. Kết quả cho thấy ANN có độ chính xác cao nhất với giá trị AUC là 0,846. Ngoài ra còn nhiều nghiên cứu khác [10–12] đã ứng dụng công nghệ AI kết hợp với viễn thám để giải quyết bài toán trượt lở đất.

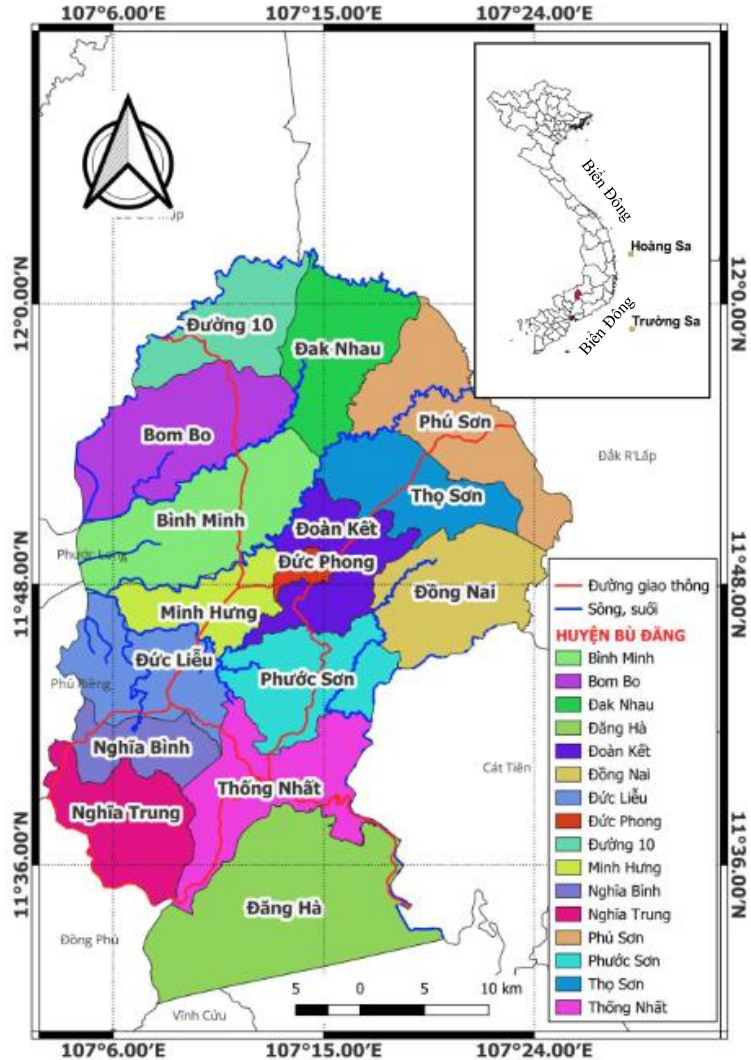
Việt Nam là một quốc gia ven biển, thường xuyên hứng chịu thiên tai và biến đổi khí hậu, chính vì vậy nghiên cứu về nguy cơ trượt lở đất có vai trò quan trọng. Huyện Bù Đăng thuộc địa phận của tỉnh Bình Phước có địa hình trung du miền núi với địa hình dốc bị chia cắt mạnh mẽ, nhiều dãy núi cao có độ dốc trung bình 15°-25°, trong đó một số khu vực có độ dốc > 25°. Địa hình và độ dốc này khiến cho đất đá dễ bị xói mòn, mất ổn định dễ trượt lở khi có mưa lớn kéo dài. Hiện nay vẫn chưa có nghiên cứu thực hiện đánh giá nguy cơ trượt lở đất tại huyện Bù Đăng, tỉnh Bình Phước. Nghiên cứu này tập trung vào nguy cơ trượt lở tại huyện Bù Đăng nhằm đưa ra biện pháp ứng phó kịp thời, giảm thiểu thiệt hại do trượt lở đất gây ra là điều vô cùng cấp thiết, đồng thời giúp các nhà quản lý và hỗ trợ địa phương thực hiện tốt trong công tác quy hoạch, quản lý tài nguyên đất, phòng tránh thiên tai nói chung và trượt lở đất nói riêng.

Nghiên cứu có mục tiêu xây dựng bản đồ phân vùng trượt lở đất huyện Bù Đăng trong năm 2023, xác định các vị trí trượt lở với các mục tiêu: (1) Xác định các yếu tố ảnh hưởng đến trượt lở đất, (2) xây dựng các bản đồ phân lớp từng nhân tố ảnh hưởng gây trượt lở đất, (3) xây dựng bản đồ phân vùng trượt lở đất từ các bản đồ thành phần. Qua đó, làm cơ sở để thực hiện các nghiên cứu đưa ra dự báo, cảnh báo, giám sát trượt lở đất, giảm thiểu và thích ứng với nguy cơ trượt lở đất.

## 2. Dữ liệu và phương pháp nghiên cứu

### 2.1. Khu vực nghiên cứu

Bù Đăng là huyện trung du miền núi, nằm ở phía Đông Nam tỉnh Bình Phước, trên tuyến đường Quốc lộ 14 có trung tâm hành chính huyện là thị trấn Đức Phong, cách thành phố Đồng Xoài khoảng 50 km về phía Tây và cách thành phố Hồ Chí Minh khoảng 165 km về phía Nam. Huyện có tọa độ địa lí 106°85' đến 107°67' độ kinh Đông và 11°71' đến 11,97° độ vĩ Bắc [13] (Hình 1). Bù Đăng là huyện trung du miền núi, địa hình dốc và bị chia cắt mạnh, nghiêng dần theo hướng từ Đông sang Tây; có độ cao bình quân so với mực nước biển khoảng 319 m, biến động từ 144-576 m. Nằm trong vành đai khí hậu nhiệt đới gió mùa, cận xích đạo nên Bù Đăng có nền nhiệt cao quanh năm, ít gió bão và không có mùa đông lạnh. Khí hậu phân hóa thành hai mùa rõ rệt, mùa mưa từ tháng 5 đến tháng 11 và mùa khô từ tháng 11 đến tháng 4 năm sau. Lượng mưa bình quân năm tương đối cao, khoảng 2400 mm/năm. Nhiệt độ bình quân năm khoảng 24°C. Mùa mưa có lượng mưa chiếm 85-90% tổng lượng mưa cả năm. Tổng số giờ nắng trong năm từ 2.400-2.500 giờ. Số giờ nắng bình quân trong ngày từ 6,2-6,6 giờ [14].



Hình 1. Bản đồ hành chính huyện Bù Đăng, tỉnh Bình Phước.

### 2.2. Dữ liệu sử dụng

#### 2.2.1. Dữ liệu vệ tinh

Nghiên cứu sử dụng ảnh vệ tinh Sentinel -2 thời gian thu thập vào 3 giờ 10 phút 49 giây ngày 28/11/2023; độ che phủ mây dưới 30%. Ảnh Sentinel- 2 trong nghiên cứu có độ phân giải không gian của ảnh là 10m×10m. Từ dữ liệu ảnh vệ tinh Sentinel-2, nghiên cứu thu thập dữ liệu và trích xuất chỉ số thực vật khác biệt được chuẩn hóa (NDVI) và chỉ số nước chênh lệch chuẩn hóa (NDWI) của huyện Bù Đăng được trích xuất.

#### 2.2.2. Mô hình độ cao số (DEM)

Dữ liệu Mô hình độ cao số (DEM) được tải xuống từ Hoa Kỳ Cơ quan Hàng không và Vũ trụ NASA Trình duyệt dữ liệu Trái đất. Các thông tin của hình ảnh DEM thuộc loại hình ảnh ASTER với độ phân giải 30m×30m. Từ DEM, chúng tôi rút ra các yếu tố như độ dốc,



hướng, độ cong tiếp tuyến, độ cong mặt cắt và khoảng cách tới sông. Ngoài ra, DEM Dữ liệu ảnh độ cao được sử dụng để thành lập bản đồ lưu vực sông, mạng lưới suối và hướng dòng chảy từ nơi có độ dốc cao đến nơi có độ dốc thấp.

### 2.2.3. Dữ liệu mạng lưới giao thông

Nguồn dữ liệu mạng lưới giao thông chính cho nghiên cứu được lấy từ Công cụ OpenStreetMap (OSM) trên QGIS là công cụ hỗ trợ cho việc nghiên cứu tạo ra các tuyến giao thông chạy qua huyện Bù Đăng, tỉnh Bình Phước.

### 2.3.4. Dữ liệu đất

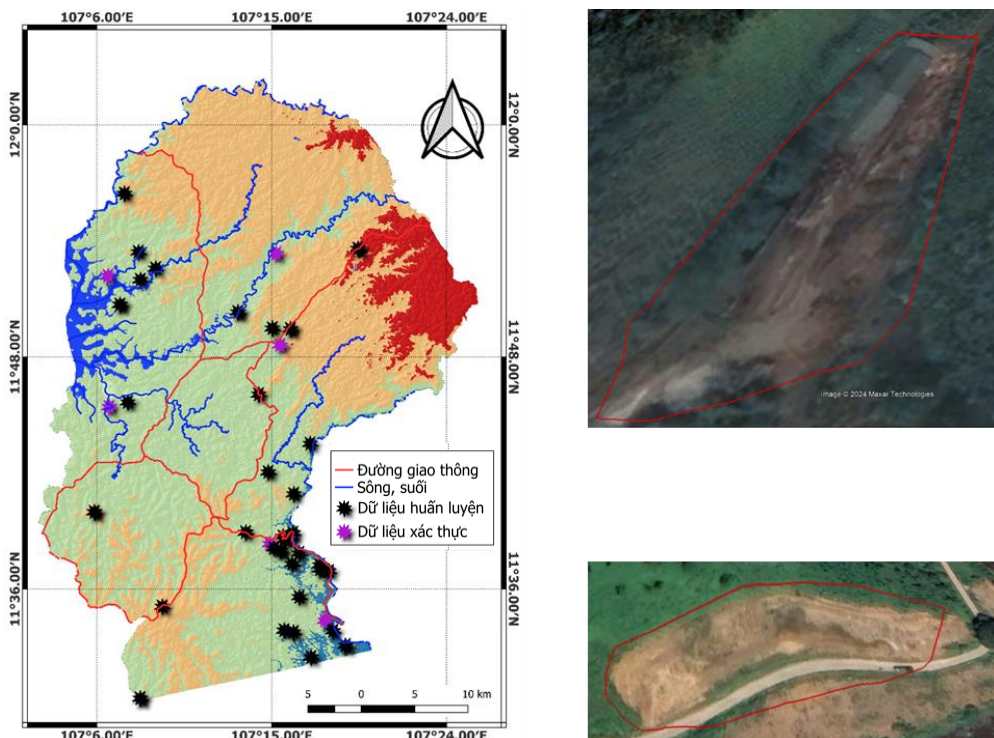
Đất Việt Nam bao gồm việc phân loại đất theo phân loại của ngành Thực phẩm và Tổ chức Nông nghiệp Liên hợp quốc (FAO). FAO phân loại được chia theo tính chất của đá mẹ, điều kiện về thời tiết và địa hình. Nguồn số liệu đất đai trong đề tài nghiên cứu được lấy từ Đất Việt do Open Development Vietnam xuất bản. Dữ liệu đất được thu thập có thuộc tính dữ liệu vector và định dạng shapefile.

### 2.3.5. Dữ liệu mưa

Dữ liệu lượng mưa được sử dụng trong nghiên cứu này được lấy từ lượng mưa gần như toàn cầu bộ dữ liệu, nhóm nguy hiểm khí hậu lượng mưa hồng ngoại với trạm (CHIRPS) [15], kéo dài hơn 35 năm. Độ phân giải dữ liệu ở độ phân giải không gian  $0,5^\circ$  ( $\sim 5$  km) được cung cấp bởi CHIRPS. Tập dữ liệu sử dụng dữ liệu vệ tinh cùng với thông tin từ các trạm quan sát thời tiết để ước tính lượng mưa Trong nghiên cứu thủy văn, dữ liệu CHIRPS có thể khá hữu ích vì nó cung cấp chuỗi thời gian dài và đáng tin cậy với ước tính lượng mưa ở mức độ phân giải không gian tương đối cao. Dữ liệu có thể được truy cập trong khoảng thời gian từ hàng ngày đến hàng năm. Dữ liệu mưa đưa cung cấp trong bảng S1 tài liệu bổ sung kèm theo.

### 2.3.6. Lấy mẫu trượt lở đất

Việc lấy mẫu trượt lở đất được chuẩn bị bằng cách sử dụng khảo sát thực địa và hình ảnh Google Earth [16–18]. Trong nghiên cứu này, 50 mẫu trượt lở đất được thu thập từ nghiên



Hình 2. Vị trí lấy mẫu trượt lở đất.

cứ thực địa, hồ sơ trượt lở lịch sử được cung cấp bởi Sở Tài nguyên tỉnh Bình Phước. Phân tích hình ảnh Google Earth (Hình 2). Trong đó 50 mẫu, 70% điểm mẫu (35 mẫu) được sử dụng làm dữ liệu huấn luyện để xây dựng trượt lở bản đồ thông qua kết quả xếp lớp bản đồ được thực hiện trong dạng bản đồ số: 30% điểm mẫu còn lại (15 mẫu) được sử dụng đánh giá khả năng dự báo trượt lở đất ở vùng nguy hiểm có mức độ trượt lở cao rủi ro. Các dữ liệu được sử dụng trong nghiên cứu được tóm tắt trong Bảng 1.



**Hình 3.** Một số hình ảnh trượt lở đất điển hình ở huyện Bù Đăng.

**Bảng 1.** Tổng hợp dữ liệu đầu vào của nghiên cứu.

| STT | Dữ liệu                | Đặc điểm                                                                                     | Nguồn                                                                                                                                                                                                     |
|-----|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1   | Ảnh vệ tinh Sentinel-2 | + Độ phân giải: 10m×10m<br>+ Thuộc tính: Raster<br>+ Định dạng: GeoTIFF<br>+ Thời gian: 2023 | + Trình duyệt Copernicus (Copernicus Browser) thuộc Chương trình của Cơ quan Không gian Châu Âu (ESA) ( <a href="https://dataspace.copernicus.eu/browser/">https://dataspace.copernicus.eu/browser/</a> ) |
| 2   | Mô hình độ cao số DEM  | Độ phân giải: 30m×30m<br>Thuộc tính: Raster<br>Định dạng: GeoTIFF                            | Trình duyệt EarthData của Cơ quan Hàng không và vũ trụ Hoa Kỳ (NASA) ( <a href="https://search.earthdata.nasa.gov">https://search.earthdata.nasa.gov</a> )                                                |
| 3   | Giao thông             | Thuộc tính: Vector<br>Định dạng: Shapefile                                                   | Open street map                                                                                                                                                                                           |
| 4   | Thổ nhưỡng             | Thuộc tính: Vector<br>Định dạng: Shapefile                                                   | Phát hành bởi Open Development VietNam ( <a href="https://data.opendevlopmentmekong.net/">https://data.opendevlopmentmekong.net/</a> )                                                                    |
| 5   | Lượng mưa              | Thuộc tính: Vector<br>Định dạng: Shapefile                                                   | Trình duyệt Power Data Access Viewer của Cơ quan Hàng không và Vũ trụ Hoa Kỳ (NASA) ( <a href="https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/">https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/</a> )     |
| 6   | Mẫu trượt lở           | Thuộc tính: Vector (Polygon)<br>Định dạng: kml                                               | Phần mềm Google Earth Pro, mẫu thực địa, tài liệu thu thập từ các phương tiện truyền thông                                                                                                                |

### 2.3. Phương pháp thực hiện

Nghiên cứu sử dụng dữ liệu đầu vào kết hợp với 10 yếu tố được lựa chọn gây ra trượt lở đất ở huyện Bù Đăng, tỉnh Bình Phước [1, 4, 5, 19]. NDVI (sự khác biệt chuẩn hóa chỉ số thực vật), chỉ số nước chênh lệch chuẩn hóa NDWI (độ lệch chuẩn hóa chỉ số nước), độ dốc (slope), hướng sườn, độ cong tiếp tuyến, độ cong địa hình, khoảng cách tới nước bề mặt, khoảng cách tới đường, đất và lượng mưa. Từ đó, tạo lớp và phủ lên bản đồ cho từng yếu tố ảnh hưởng, xây dựng bản đồ phân vùng trượt lở hoàn chỉnh. Tổng thể Quy trình nghiên cứu được thể hiện trên Hình 4. Lý do 10 yếu tố được chọn lựa đưa vào mô hình trượt lở đất:

**Độ dốc:** Khu vực có độ dốc lớn hơn thường có nguy cơ trượt lở cao hơn do trọng lực dễ dàng kéo vật liệu xuống [20, 21].

**Hướng sườn:** Các sườn dốc quay về hướng mưa gió thường dễ bị ảnh hưởng hơn do xói mòn và lượng nước thấm nhiều hơn.

**Mưa:** Lượng mưa nhiều và kéo dài làm gia tăng độ ẩm trong đất, làm giảm lực ma sát và dẫn đến trượt lở.

**Thành phần đất:** Một số loại đất, như đất sét, dễ bị trượt lở do khả năng hấp thụ nước và trở nên trơn trượt.

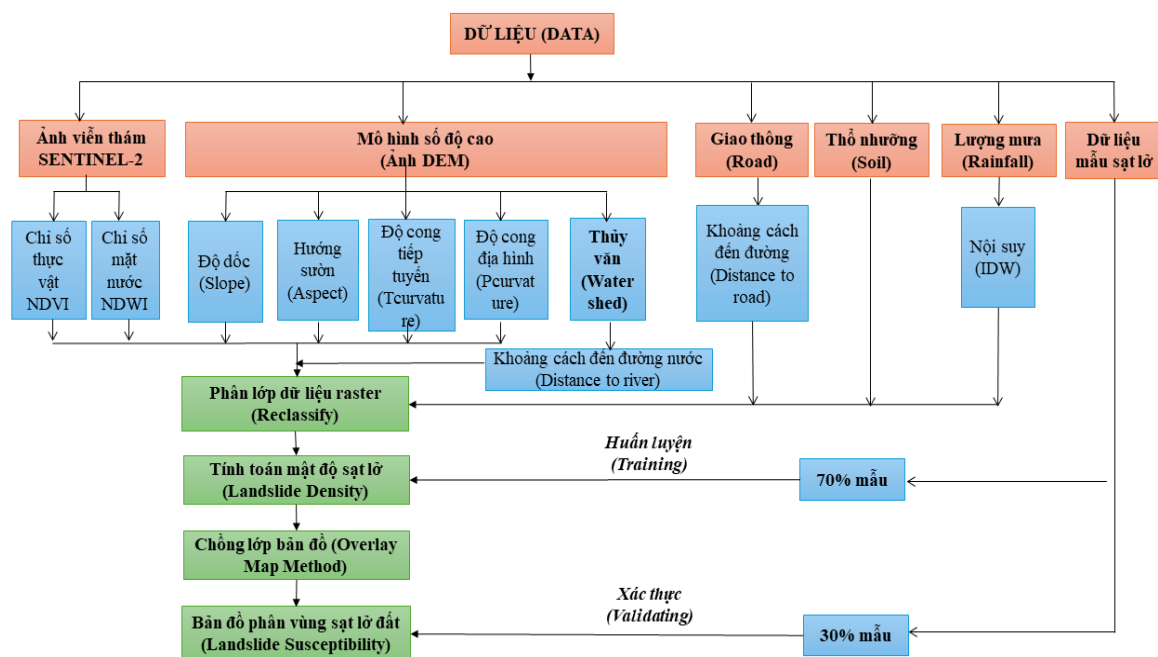
**NDVI:** là chỉ số độ che phủ thực vật. NDVI  $\rightarrow$  1 vị trí có độ che phủ thực vật dày đặc. Rễ cây giúp giữ đất lại, do đó, vùng có thảm thực vật dày đặc thường ít có nguy cơ trượt lở hơn. Tuy nhiên, khi cây bị chặt phá, sự bảo vệ này sẽ giảm đi.

**Khoảng cách tới đường giao thông:** Xây dựng đường giao thông làm thay đổi thảm thực vật, độ che phủ thực vật [22, 23]. Sự rung động giao thông thường xuyên do các phương tiện giao thông gây ra [24, 25] khiến đá bị vỡ vụn [26] và nổ tung không kiểm soát được.

**Khoảng cách đến sông:** Sông có thể cắt và xói mòn bờ sông, biến động mực nước sông có thể làm thay đổi địa hình và ảnh hưởng [27].

**NDWI là chỉ số - NDWI:** đóng một vai trò quan trọng trong việc ảnh hưởng đến khả năng xảy ra lở đất bằng cách cung cấp những hiểu biết quan trọng về hàm lượng nước và điều kiện thủy văn của cảnh quan. NDWI rất nhạy cảm với những thay đổi về hàm lượng nước, có thể ảnh hưởng đến độ ổn định của đất và do đó có nguy cơ lở đất. Chỉ số này đặc biệt hữu ích trong việc theo dõi và dự đoán các điều kiện môi trường có thể dẫn đến lở đất.

**Độ cong tiếp tuyến:** được xác định bởi [28]. Đây là độ cong dọc theo đường trục giao với đường có độ dốc lớn nhất. Giá trị này cho biết các chất đang chảy sẽ hội tụ hay phân kỳ khi của vật liệu trượt lở và nước theo hướng chuyển động trượt lở đất [28, 29].



Hình 4. Tiến trình thực hiện nghiên cứu.



Độ cong địa hình đến đường đi và khả năng chống trượt trong trượt lở đất theo hướng chuyển động. Độ cong địa hình kiểm soát sự hội tụ hoặc phân kỳ của vật liệu trượt lở và nước theo hướng chuyển động trượt lở đất [30].

Dựa trên dữ liệu khảo sát, 10 yếu tố ảnh hưởng đến trượt đất đã được lựa chọn: chỉ số thực vật (NDVI), chỉ số mặt nước (NDWI), độ dốc, hướng sườn, độ cong tiếp tuyến, độ cong địa hình, khoảng cách đến sông, khoảng cách đến đường, đất và lượng mưa. Nghiên cứu được thực hiện bằng cách chia dữ liệu raster thành các lớp dựa trên phạm vi giá trị của 10 yếu tố. Phân loại dữ liệu cho từng yếu tố là dựa trên các nghiên cứu trước đây về đánh giá mức độ nhạy cảm với lở đất bằng cách chia dữ liệu raster theo phạm vi giá trị ở mức tỷ lệ từ 1 đến 8. Từ đó có thể thấy giá trị thấp nhất là 1 và giá trị cao nhất là 8 tương ứng với mỗi raster lớp dữ liệu. Công thức phân lớp được thể hiện chi tiết trong Bảng 2.

**Bảng 2.** Phân loại các yếu tố.

| TT | Yếu tố ảnh hưởng | Phân lớp dữ liệu    | TT | Yếu tố ảnh hưởng          | Phân lớp dữ liệu    |
|----|------------------|---------------------|----|---------------------------|---------------------|
| 01 | NDVI             | -1 đến 0 → 1        | 06 | Độ cong địa hình          | -0,1 đến -0,05 → 1  |
|    |                  | 0,001 đến 0,1 → 2   |    |                           | -0,05 đến -0,01 → 2 |
|    |                  | 0,1 đến 0,2 → 3     |    |                           | -0,01 đến 0 → 3     |
|    |                  | 0,2 đến 0,3 → 4     |    |                           | 0 đến 0,01 → 4      |
|    |                  | 0,3 đến 0,4 → 5     |    |                           | 0,01 đến 0,05 → 5   |
|    |                  | 0,4 đến 0,5 → 6     |    |                           | 0,05 đến 0,1 → 6    |
|    |                  | 0,5 đến 0,6 → 7     |    |                           | > 0,1 → 7           |
|    |                  | > 0,6 → 8           |    |                           |                     |
| 02 | NDWI             | -0,6 đến -0,4 → 1   | 07 | Khoảng cách đến sông, (m) | 0 đến 100 → 1       |
|    |                  | -0,4 đến -0,2 → 2   |    |                           | 100 đến 200 → 2     |
|    |                  | -0,2 đến 0 → 3      |    |                           | 200 đến 500 → 3     |
|    |                  | 0 đến 0,2 → 4       |    |                           | 500 đến 1000 → 4    |
|    |                  | 0,2 đến 0,3 → 5     |    |                           | 1000 đến 2000 → 5   |
|    |                  | > 0,3 → 6           |    |                           | > 2000 → 6          |
|    |                  | 0° đến 15° → 1      |    |                           | 0 đến 100 → 1       |
|    |                  | 15° đến 30° → 2     |    |                           | 100 đến 200 → 2     |
| 03 | Độ dốc           | 30° đến 45° → 3     | 08 | Khoảng cách đến đường (m) | 200 đến 500 → 3     |
|    |                  | 45° đến 60° → 4     |    |                           | 500 đến 1000 → 4    |
|    |                  | 60° đến 75° → 5     |    |                           | 1000 đến 2000 → 5   |
|    |                  | 75° đến 90° → 6     |    |                           | > 2000 → 6          |
|    |                  | 0 → 0               |    |                           |                     |
|    |                  | 0,0001 đến 22,5 → 1 |    |                           |                     |
|    |                  | 22,5 đến 67,5 → 2   |    |                           |                     |
|    |                  | 67,5 đến 112,5 → 3  |    |                           |                     |
| 04 | Hướng sườn       | 112,5 đến 157,5 → 4 | 09 | Thổ nhưỡng                | Fr33-3ab → 1        |
|    |                  | 157,5 đến 202,5 → 5 |    |                           | Ao90-2/3c → 2       |
|    |                  | 202,5 đến 247,5 → 6 |    |                           | Af60-1/2ab → 3      |
|    |                  | 247,5 đến 292,5 → 7 |    |                           |                     |
|    |                  | 292,5 đến 337,5 → 8 |    |                           |                     |
|    |                  | 337,5 đến 360 → 1   |    |                           |                     |
|    |                  |                     |    |                           |                     |
|    |                  |                     |    |                           |                     |

| TT | Yếu tố ảnh hưởng   | Phân lớp dữ liệu     | TT | Yếu tố ảnh hưởng | Phân lớp dữ liệu  |
|----|--------------------|----------------------|----|------------------|-------------------|
| 05 | Độ cong tiếp tuyến | -0,2 đến -0,05 → 1   | 10 | Lượng mưa (mm)   | 1650 đến 1750 → 1 |
|    |                    | -0,05 đến -0,01 → 2  |    |                  | 1750 đến 1850 → 2 |
|    |                    | -0,01 đến -0,005 → 3 |    |                  | 1850 đến 1950 → 3 |
|    |                    | -0,005 đến 0 → 4     |    |                  | 1950 đến 2050 → 4 |
|    |                    | 0 đến 0,1 → 5        |    |                  | 2050 đến 2150 → 5 |
|    |                    | 0,1 đến 0,2 → 6      |    |                  |                   |
|    |                    | > 0,2 → 7            |    |                  |                   |

Sau đó, áp dụng chỉ số nguy hiểm để tính toán khả năng xảy ra trượt lở đất dựa trên công thức của nghiên cứu [31]:

$$W_{ij} = \ln \left( \frac{\text{Densclass}}{\text{Densmap}} \right) = \ln \left( \frac{\frac{\text{Area}(S_i)}{\text{Area}(N_i)}}{\frac{\sum \text{Area}(S_i)}{\sum \text{Area}(N_i)}} \right) \quad (1)$$

Trong đó  $W_{ij}$  là trọng số được gán cho một loại tham số nhất định; Densclass là mật độ trượt lở trong lớp tham số; Densmap là mật độ trượt lở trên toàn bộ bản đồ;  $\text{Area}(S_i)$  là diện tích chứa trượt lở đất, trong một lớp tham số nhất định;  $\text{Area}(N_i)$  là tổng diện tích trong một lớp tham số nhất định.

Cuối cùng, việc tính toán chỉ số nhạy cảm trượt lở đất (LSI) được thực hiện bằng cách xếp chồng giá trị trọng số của các yếu tố liên quan với nhau trong GIS bằng phương trình dưới đây [32]:

$$LSI = \sum_{i=1}^n W_{ij} \quad (2)$$

Trong đó  $W_{ij}$  là trọng số cuối cùng của lớp thứ j trong hệ số  $X_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ , n là yếu tố liên quan).

Nghiên cứu đã kiểm tra tầm quan trọng của mô hình bằng cách kiểm tra mô hình với việc xác nhận tập dữ liệu. Phân tích đường cong ROC là một phương pháp tiêu chuẩn để kiểm tra mức độ hiệu quả của mô hình công trình. Đường cong ROC cho thấy tỷ lệ dương thực sự (Trục Y) so với tỷ lệ dương tính giả (trục X) khi ngưỡng thay đổi. AUC là diện tích bên dưới toàn bộ đường cong ROC và giúp đo lường độ chính xác của mô hình. Giá trị AUC đi từ 0,5 khi AUC 1 là 0,5, mô hình này không hữu ích cho mục đích thực tế. Giá trị AUC gần 1 có nghĩa là mô hình dự đoán hoạt động rất tốt.

### 3. Kết quả và thảo luận

#### 3.1. Phân lớp các yếu tố gây ra trượt lở đất

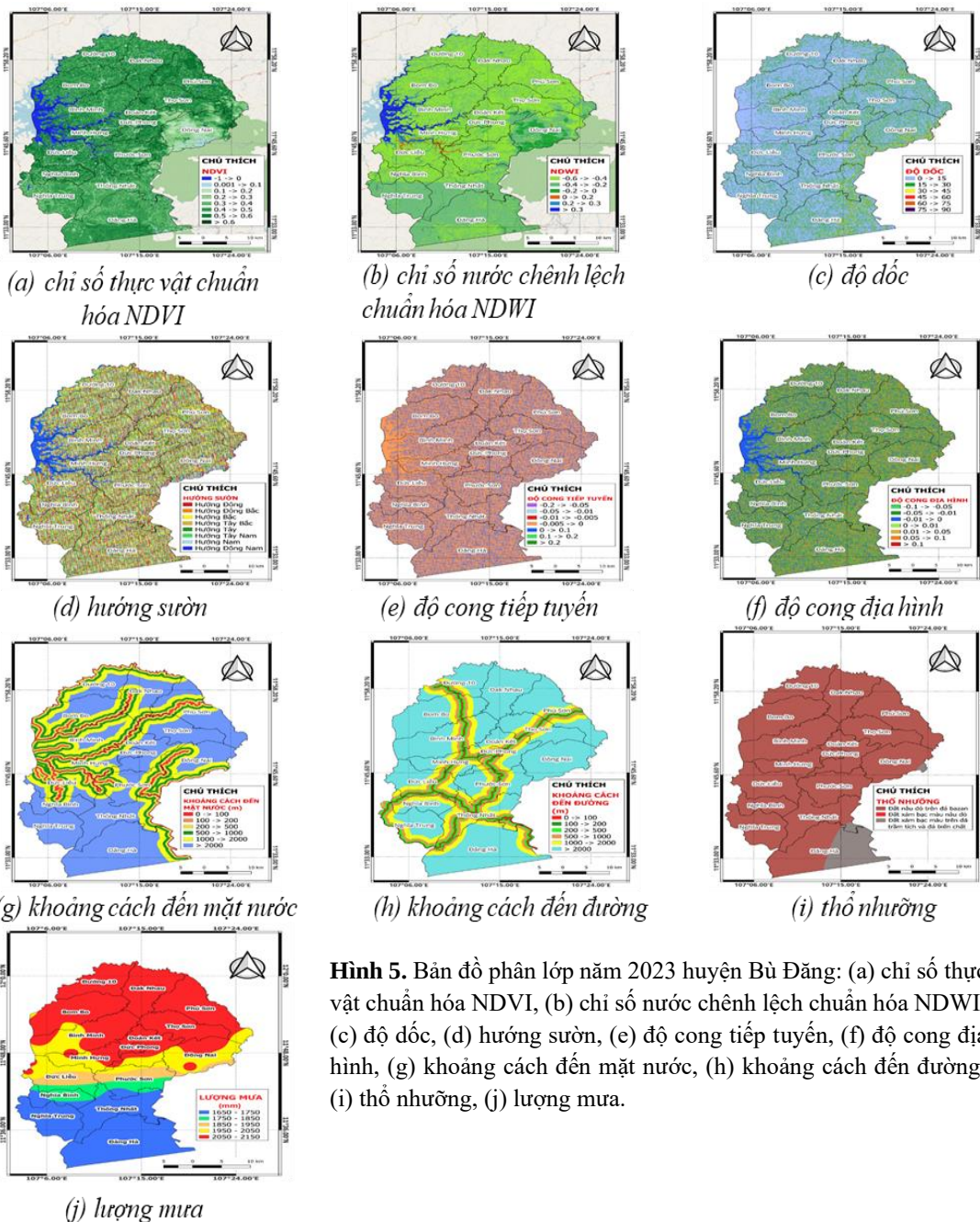
Mưa: Các yếu tố liên quan đến trượt lở đất bao gồm các yếu tố tự nhiên và hoạt động của con người. Khu vực Bù Đăng có nguy cơ xảy ra lở đất do mưa lớn. Do đó, lượng mưa là yếu tố chính để xác định các khu vực có khả năng xảy ra lở đất và điều quan trọng là phải xem xét nguyên nhân gây ra các vụ lở đất này. Để xác định mức độ ảnh hưởng trượt lở đất từ yếu tố lượng mưa tại khu vực huyện Bù Đăng, nghiên cứu phân thành 5 khoảng giá trị lượng mưa trung bình năm 2023 theo kết quả nội suy IDW tương ứng với khoảng giá trị thấp nhất (min) = 1.652,37 mm và khoảng giá trị cao nhất (max) = 2.134,99 mm. Hình 5 thể hiện bản đồ phân lớp lượng mưa huyện Bù Đăng năm 2023 cho thấy tổng lượng mưa trung bình năm lớn nhất ở huyện Bù Đăng từ 2050-2150 mm/năm chiếm tỷ lệ 46,89%, ở các xã Bình Minh, Bom Bo, Đường 10, Đắk Nhau, Phú Sơn, Thọ Sơn, Đoàn Kết và thị trấn Đức Phong.



Các đợt mưa lớn tập trung trong một số tháng trong năm, điển hình là đỉnh điểm lượng mưa của tháng 8 và tháng 9 của năm 2023. Tổng lượng mưa trung bình năm ít nhất ở huyện từ 1650-1750 mm/năm chiếm tỷ lệ 28,12% phân bố ở xã Nghĩa Trung, Thống Nhất và Đăng Hà.

Khoảng cách đến sông suối: Ngoài ra, sông suối có vai trò thiết yếu trong việc quyết định đất trở nên bão hòa, ảnh hưởng trực tiếp áp lực của nước trong đất, một yếu tố quan trọng ảnh hưởng đến sự ổn định của sườn dốc [33]. Hình 5g thể hiện bản đồ phân lớp khoảng cách đến mặt nước năm 2023 huyện Bù Đăng được chia thành 6 nhóm: 0-100, 100-200, 200-500, 500-1000, 1000-2000 và cách suối > 2000 m.

Khoảng cách đến đường giao thông: Yếu tố khoảng cách đến đường cũng được xem là một trong những yếu tố đóng vai trò quan trọng đến các điểm xuất hiện trượt lở đất. Hình 5 (h) thể hiện bản đồ phân lớp khoảng cách đến đường của huyện Bù Đăng phân thành 6 lớp trong việc mở rộng khoảng cách đường tương ứng với khoảng giá trị thấp nhất (min) = 0m và giá trị cao nhất (max) = 2000 m. Qua đó, thấy được một số tuyến đường giao thông chính của huyện Bù Đăng như đường Quốc lộ 14, đường ĐT760, đường ĐT755B, đường Sao Bông



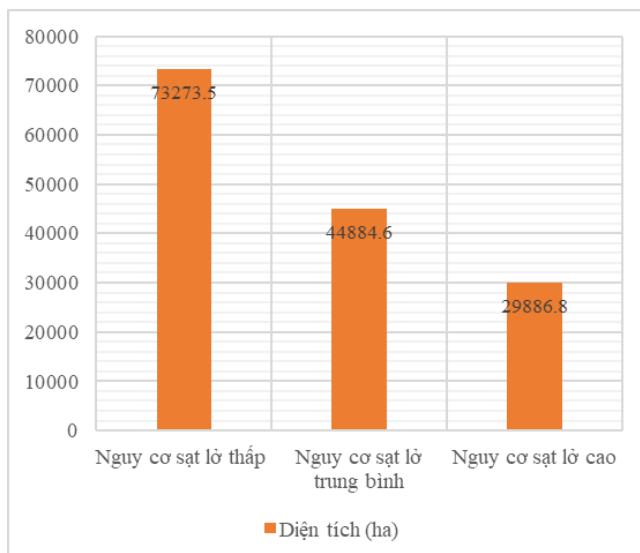
**Hình 5.** Bản đồ phân lớp năm 2023 huyện Bù Đăng: (a) chỉ số thực vật chuẩn hóa NDVI, (b) chỉ số nước chênh lệch chuẩn hóa NDWI, (c) độ dốc, (d) hướng sườn, (e) độ cong tiếp tuyến, (f) độ cong địa hình, (g) khoảng cách đến mặt nước, (h) khoảng cách đến đường, (i) thổ nhưỡng, (j) lượng mưa.

- Đẳng Hà có địa hình độ dốc cao do đó hoạt động xây dựng đường giao thông ở những tuyến đường này ảnh hưởng trực tiếp đến sự ổn định của độ dốc.

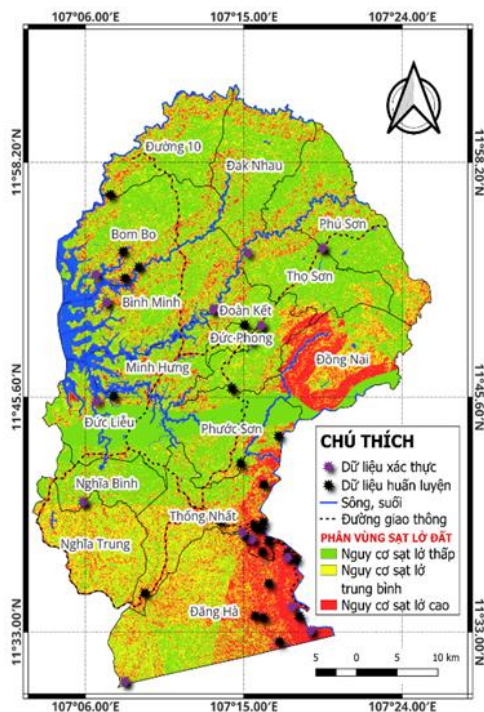
Thổ nhưỡng: yếu tố đóng vai trò quan trọng nhằm đánh giá nguy cơ trượt lở đất bởi chúng ảnh hưởng đến độ ổn định của dốc. Ngoài ra, các đặc tính của đất như thành phần hạt, cấu trúc, độ ẩm, khả năng thấm thấu đều có thể ảnh hưởng đến khả năng chống trượt lở của đất. Để xác định mức độ ảnh hưởng mạnh đến trượt lở đất của từng loại thổ nhưỡng tại huyện Bù Đăng, nghiên cứu thực hiện phân lớp yếu tố thổ nhưỡng theo tiêu chí, kết cấu loại đất có khả năng trượt lở mạnh theo mức độ sạt tăng dần từ thấp đến cao. Kết quả phân lớp yếu tố thổ nhưỡng huyện Bù Đăng (Hình 5i) cho thấy trên địa bàn nghiên cứu, có 3 loại nhóm đất chính bao gồm: đất nâu đỏ trên đá bazan (Fr33-3ab), đất xám bạc màu trên đá trầm tích và đá biến chất (Ao90-2/3c) và đất xám bạc màu nâu đỏ (Af60-1/2ab) chiếm lần lượt các tỷ lệ 96,217%; 3,782% và 0,002% tổng diện tích đất tự nhiên của huyện. Trong 3 loại đất trên, đất xám bạc màu trên đá trầm tích và đá biến chất (Ao90-2/3c), thuộc nhóm đất có khả năng trượt lở cao nhất. Các kết quả và thảo luận của các yếu tố (độ dốc, đường cong tiếp tuyến, đường cong địa hình, hướng sườn, NDVI, và NDWI).

### 3.2. Phân vùng trượt lở

Bản đồ đánh giá và phân vùng nguy cơ trượt lở đất huyện Bù Đăng, tỉnh Bình Phước là kết quả cuối cùng của việc chồng lớp từ các bản đồ đã phân loại 10 yếu tố theo trọng số của từng yếu tố. Bản đồ hỗ trợ đánh giá các khu vực, vị trí có nguy cơ trượt lở đất và cũng là công cụ để đánh giá khả năng hiện diện và nguy cơ trượt lở đất tại khu vực nghiên cứu. Vùng nhạy cảm của khu vực trượt lở được phân tích thành 3 cấp độ: rủi ro cao, rủi ro trung bình và rủi ro từ quá trình phân bổ trọng số của các tham số. Bản đồ nguy cơ trượt lở đất huyện Bù Đăng Dương năm 2023 được xây dựng và trình bày chi tiết trên Hình 6.



Hình 7. Biểu đồ thể hiện diện tích trượt lở đất huyện Bù Đăng năm 2023.



Hình 6. Bản đồ phân vùng trượt lở đất huyện Bù Đăng năm 2023.

Theo kết quả từ bản đồ phân vùng trượt lở đất Hình 6 cho thấy những khu vực có nguy cơ trượt lở cao tập trung ở 3 xã Đẳng Hà, Thống Nhất và Đồng Nai. Kết quả này cũng trùng hợp với các báo cáo và thông tin tuyên thông về trượt lở đất của Tỉnh Bình Phước [34]. Phần lớn, các vụ trượt lở xảy ra trên địa bàn huyện Bù Đăng dọc trên tuyến đường giao thông gồm 2 điểm trượt lở nặng: điểm trượt lở tại Dốc Khi thuộc

tuyến đường ĐT753B của địa phận thôn 2 xã Đẳng Hà, đoạn đường ngã ba Ông Tám thôn 9 đi sóc Ông La thuộc thôn 10, xã Thống Nhất; điểm trượt lở tại dốc 5 Cây thuộc tuyến đường Sao Bọng - Đẳng Hà địa phận xã Thống Nhất. Ngoài ra, khu vực gần đường nước cũng có 2

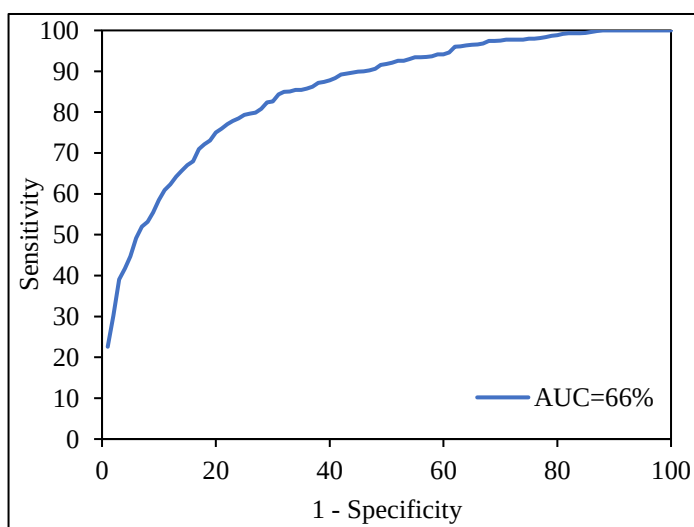
điểm sạt: điểm trượt lở gần sông Đồng Nai đoạn thuộc xã Đăng Hà, Thống Nhất, và Đồng Nai; điểm trượt lở tại khu vực cầu 38 thuộc địa phận xã Đức Liễu.

Do yếu tố địa hình phức tạp đồi núi nhiều bị chia cắt, độ dốc dọc địa hình  $> 25^\circ$  do đó thường xuyên xảy ra trượt lở đất vào mùa mưa tại điểm trượt lở tại tuyến đường ĐT753B đoạn qua Dốc Khỉ thuộc địa phận thôn 2, xã Đăng Hà. Điểm trượt lở tại đoạn đường ngã ba Ông Tám thôn 9 đi sóc Ông La thuộc thôn 10, xã Thống Nhất. Nguyên nhân gây ra trượt lở đất, nứt, gãy mặt đường do mưa lớn kéo dài trong nhiều ngày, mạch nước ngầm trong đồi nhiều, tạo thành khe nước làm nền đất yếu gây trượt lở. Mặt khác, dư địa chất làm tụt nền tạo ra các vết gãy ngang có chiều rộng khe khoảng 2-3 cm nằm lệch nhau. Ngoài ra, tại điểm trượt lở tại tuyến đường huyết mạch nối liền tỉnh Bình Phước và Lâm Đồng thuộc đường Sao Bông - Đăng Hà, đoạn qua dốc 5 cây trên tuyến đường ĐT755B thuộc địa phận thôn 10, xã Thống Nhất. Nguyên nhân xảy ra trượt lở đất tại khu vực do mưa lớn nhiều ngày liên tục, khiến đất đá trên đỉnh đồi trượt lở xuống đường, gây cản trở giao thông. Cũng tại điểm trượt lở tập trung tại vị trí gần bờ sông Đồng Nai, đoạn sông tiếp giáp tỉnh Lâm Đồng và xã Đăng Hà thuộc địa phận của huyện Bù Đăng. Nguyên nhân gây ra trượt lở gần bờ sông do địa hình thấp, độ dốc cao, ảnh hưởng trực tiếp từ yếu tố lượng mưa gia tăng nguy cơ trượt lở mỗi khi có lũ lớn do đó đồng thời tác động của con người bởi hoạt động khai thác khoáng sản, cụ thể khai thác tài nguyên cát trái phép, tập kết cát dọc sông Đồng Nai dẫn đến hiện tượng trượt lở đất tại bờ sông. Ngoài ra, điểm trượt lở tại khu vực Cầu 38, xã Đức Liễu thuộc địa phận huyện Bù Đăng có nguy cơ xảy ra trượt lở cao cũng do hoạt động san gạt, khai thác đất trái phép thường xuyên xảy ra, phục vụ cho việc xây dựng các công trình trên địa bàn huyện. Một lượng đất lớn đổ xuống lấn chiếm lòng hồ thủy điện Thác Mơ, chưa được xử lý triệt để. Khai thác đất trái phép không những làm thất thoát nguồn tài nguyên khoáng sản, mà còn trực tiếp tàn phá hủy hoại môi trường xung quanh, gây nguy cơ trượt lở đất cao mỗi khi vào mùa mưa.

Kết quả thống kê diện tích trượt lở theo bản đồ phân vùng trượt lở đất huyện Bù Đăng thể qua biểu đồ Hình 7. Tổng diện tích khu vực toàn huyện Bù Đăng tương ứng 148.044,9 ha. Khu vực thuộc nguy cơ trượt lở thấp có diện tích tương ứng 73.273,5 ha chiếm 49,5% diện tích toàn huyện, khu vực có nguy cơ trượt lở trung bình có diện tích tương ứng 44.884,6 ha chiếm 30,3% và khu vực có nguy cơ trượt lở cao có diện tích 29.886,8 ha chiếm 20,2% diện tích.

### 3.3. Thẩm định bản đồ nguy cơ trượt lở đất

Để xác nhận tính hiệu quả của bản đồ nguy cơ trượt lở đất được tạo ra, 30% các mẫu còn lại, không được sử dụng để xây dựng bản đồ, được sử dụng để phủ lên bản đồ trích xuất xác suất trượt lở đất theo từng mức độ nhạy cảm của bản đồ. Kết quả về tỷ lệ thành công chỉ ra rằng AUC là 0,66 cho thấy sự phù hợp của bản đồ nhạy cảm trượt lở đất (Hình 8). Diện tích dưới đường cong (AUC) của tỷ lệ dự báo là 50% đối với độ nhạy trượt lở cao, thấp và trung bình với độ chính xác 75%. Bản đồ nhạy cảm trượt lở đất rất hữu ích cho việc quy hoạch và quản lý tài nguyên đất đai, giảm thiểu rủi ro do thiên tai do lở đất.



Hình 8. Bản đồ trích xuất xác suất trượt lở đất.



#### 4. Kết luận

Nghiên cứu thực hiện xây dựng bản đồ phân vùng trượt lở đất tại huyện Bù Đăng qua việc ứng dụng hệ thống thông tin địa lý (GIS) và viễn thám (RS) nhằm xác định vị trí có nguy cơ trượt lở đất qua 10 yếu tố ảnh hưởng đã được phân tích phục vụ quản lý điều hành công tác phòng chống giảm nhẹ thiên tai của huyện. Kết quả phân vùng diện tích trượt lở đất năm 2023 trên địa bàn huyện Bù Đăng thể hiện: tổng diện tích toàn huyện 148.044,9 ha trong đó mức độ trượt lở thấp với diện tích 73.273,5 ha chiếm 49,5% diện tích tự nhiên; mức độ trượt lở trung bình với diện tích 44.884,6 ha chiếm 30,3% diện tích tự nhiên và mức độ trượt lở cao chiếm diện tích 29.886,8 ha chiếm 20,2% diện tích tự nhiên, phân bố ở các xã Thống Nhất, Đăng Hà, Đồng Nai của huyện với địa hình đồi núi cao, có độ dốc  $> 25^\circ$ . Nghiên cứu sử dụng 30% mẫu xác thực mô hình dự báo từ bản đồ phân vùng trượt lở, cho tỷ lệ thành công giải đoán những ở khu vực trượt lở cao có độ chính xác đạt 66,67%. Kết quả phân loại này chưa cao do những giới hạn của đề tài như chưa sử dụng các phương pháp chuyên gia hay phân tích thứ bậc cho các yếu tố ảnh hưởng đến nguy cơ trượt lở. Trong những nghiên cứu tiếp theo chúng tôi sẽ xem xét tính ưu tiên của các yếu tố và sử dụng phương pháp máy học để nâng cao độ chính xác trong phân vùng trượt lở.

**Đóng góp của tác giả:** Xây dựng ý tưởng nghiên cứu: N.T.K.T., P.K.K., N.N.N., N.T.S., L.T.D.H.; Viết bản thảo bài báo: T.K.T., P.K.K., N.N.K., N.T.S., L.T.D.H.; Chỉnh sửa bài báo: N.T.K.T., L.T.D.H.

**Lời cam đoan:** Tập thể tác giả cam đoan nghiên cứu 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. Chalkias, C.; Ferentinou, M.; Polykretis, C. GIS-Based landslide susceptibility mapping on the peloponnese peninsula, Greece. *Geosciences* **2014**, 4, 176–190. <https://doi.org/10.3390/geosciences4030176>.
2. Hamid, B.; Massinissa, B.; Nabila, G. Landslide susceptibility mapping using GIS-based statistical and machine learning modeling in the city of Sidi Abdellah, Northern Algeria. *Model. Earth Syst. Environ.* **2023**, 9, 2477–2500. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01633-x>.
3. Asmare, D.; Terefe, C.; Zewdie, M. A GIS-based landslide susceptibility assessment and mapping around the Aba Libanos area, Northwestern Ethiopia. *Appl. Geomatics*. **2023**, 15, 265–280. <https://doi.org/10.1007/s12518-023-00499-7>.
4. Tân, N.T.; Trường, N.H.; Vững, Đ.V. Ứng dụng GIS và phương pháp chỉ số thống kê trong xây dựng bản đồ nhạy cảm trượt lở đất khu vực thành phố Bắc Kạn. *Tạp chí Khoa học và Công nghệ Thủy lợi* **2020**, 62, 1–12.
5. Nhật, N.V.; Trí, Đ.Q.; Tuyết, Q.T.T.; Hiền, T.D. Nghiên cứu ứng dụng mô hình TRIGRS mô phỏng trượt lở khu vực Lào Cai, Việt Nam. *Tạp chí Khí tượng Thủy văn* **2022**, 742, 65–74.
6. Thành, Đ.C.; Bình, P.T.; Đâm, N.Đ. Ứng dụng mô hình trọng số dẫn chứng (WOE) trong xây dựng bản đồ nguy cơ sạt lở tại tỉnh Quảng Nam. *Tạp chí Khoa học Công nghệ Xây dựng* **2022**, 16, 139–152. doi:10.31814/stce.huce(nuce)2022-16(2V)-12.
7. Agboola, G.; Beni, L.H.; Elbayoumi, T.; Thompson, G. Optimizing landslide susceptibility mapping using machine learning and geospatial techniques. *Ecol. Inf.* **2024**, 81, 102583. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102583>.
8. Xu, Q.; Yordanov, V.; Amici, L.; Brovelli, M.A. Landslide susceptibility mapping using ensemble machine learning methods: a case study in Lombardy, Northern Italy. *Int. J. Digital Earth* **2024**, 17, 2346263. doi:10.1080/17538947.2024.2346263.



9. Yilmaz, I. Comparison of landslide susceptibility mapping methodologies for Koyulhisar, Turkey: conditional probability, logistic regression, artificial neural networks, and support vector machine. *Environ. Earth Sci.* **2010**, 61, 821–836. <https://doi.org/10.1007/s12665-009-0394-9>.
10. Adnan, M.S.G.; Rahman, M.S.; Ahmed, N.; Ahmed, B.; Rabbi, M.F.; Rahman, R.M. Improving spatial agreement in machine learning-based landslide susceptibility mapping. *Remote Sens.* **2020**, 12(20), 3347. <https://doi.org/10.3390/rs12203347>.
11. Chang, Z.; Catani, F.; Huang, F.; Liu, G.; Meena, S.R.; Huang, J.; Zhou, C. Landslide susceptibility prediction using slope unit-based machine learning models considering the heterogeneity of conditioning factors. *J. Rock Mech. Geotech. Eng.* **2022**, 15(5), 1127–1143. <https://doi.org/10.1016/J.JRMGE.2022.07.009>.
12. Zhao, Z.; Liu, Z.Y.; Xu, C. Slope unit-based landslide susceptibility mapping using certainty factor, support vector machine, random forest, CF-SVM and CF-RF models. *Front. Earth Sci.* **2021**, 9. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.589630>.
13. Trang thông tin huyện Bù Đăng, tỉnh Bình Phước. Giới thiệu sơ lược về diện tích và lịch sử huyện Bù Đăng. Huyện Bù Đăng - Bình Phước. 2024. Trục tuyến: <https://budang.binhphuoc.gov.vn/vi/about/Gioi-thieu-so-luot-ve-dien-tich-va-lich-su-huyen-Bu-Dang.html> (Cập nhật 6/10/2024).
14. Cục thống kê tỉnh Bình Phước. Niên giám thống kê tỉnh Bình Phước 2022. Bình Phước: Cổng thông tin điện tử. 2023. Trục tuyến: <https://binhphuoc.gov.vn/vi/ctk/an-pham-thong-ke/nien-giam-thong-ke-tinh-binh-phuoc-2022-598.html> (Cập nhật 6/10/2024).
15. Funk, C.; et al. The climate hazards infrared precipitation with stations—A new environmental record for monitoring extremes. *Sci. Data.* **2015**, 2, 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>.
16. Wubalem, A. Landslide susceptibility mapping using statistical methods in Uatza catchment area, northwestern Ethiopia. *Geoenviron. Disasters* **2021**, 8, 1. <https://doi.org/10.1186/s40677-020-00170-y>.
17. Meten, M.; Bhandary, N.P.; Yatabe, R. GIS-based frequency ratio and logistic regression modelling for landslide susceptibility mapping of Debre Sina area in central Ethiopia. *J. Mt. Sci.* **2015**, 12, 1355–1372. doi:10.1007/s11629-015-3464-3.
18. Roy, J.; Saha, S. Landslide susceptibility mapping using knowledge driven statistical models in Darjeeling District, West Bengal, India. *Geoenviron. Disasters*. **2019**, 6, 11. <https://doi.org/10.1186/s40677-019-0126-8>.
19. Wang, Q.; Li, W.; Chen, W.; Bai, H. GIS-based assessment of landslide susceptibility using certainty factor and index of entropy models for the Qianyang County of Baoji city, China. *J. Earth Syst. Sci.* **2015**, 124, 1399–1415. <https://doi.org/10.1007/s12040-015-0624-3>.
20. Dragičević, S.; Lai, T.; Balram, S. GIS-based multicriteria evaluation with multiscale analysis to characterize urban landslide susceptibility in data-scarce environments. *Habitat Int.* **2015**, 45, 114–125. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2014.06.031>.
21. Chen, W.; Pourghasemi, H.R.; Kornejady, A.; Zhang, N. Landslide spatial modeling: Introducing new ensembles of ANN, MaxEnt, and SVM machine learning techniques. *Geoderma* **2017**, 305, 314–327. doi:10.1016/j.geoderma.2017.06.020.
22. Achour, Y.; Boumezbeur, A.; Hadji, R.; Chouabbi, A.; Cavaleiro, V.; Bendaoud, E.A. Landslide susceptibility mapping using analytic hierarchy process and information value methods along a highway road section in Constantine, Algeria. *Arab. J. Geosci.* **2017**, 10, 94. <https://doi.org/10.1007/s12517-017-2980-6>.
23. Fransen, P.J.B.; Phillips, C.J.; Fahey, B.D. Forest road erosion in New Zealand: Overview. *Earth Surf. Processes Landforms* **2001**, 26, 165–174.

24. Wu, Y.; Li, W.; Liu, P.; Bai, H.; Wang, Q.; He, J.; Liu, Y.; Sun, S. Application of analytic hierarchy process model for landslide susceptibility mapping in the Gangu County, Gansu Province, China. *Environ Earth Sci.* **2016**, *75*, 422. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-5194-9>.
25. Guri, P.K.; Champati, P.K.; Patel, R.C. Spatial prediction of landslide susceptibility in parts of Garhwal Himalaya, India, using the weight of evidence modelling. *Environ. Monit. Assess.* **2015**, *187*, 324. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4535-1>.
26. Jebur, M.N.; Pradhan, B.; Tehrany, M.S. Manifestation of LiDAR-derived parameters in the spatial prediction of landslides using novel ensemble evidential belief functions and support vector machine models in GIS. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* **2015**, *8*, 674–690. doi:10.1109/JSTARS.2014.2341276.
27. Guo, Z.; Tian, B.; Li, G.; Huang, D.; Zeng, T.; He, J.; Song, D. Landslide susceptibility mapping in the Loess Plateau of northwest China using three data-driven techniques-a case study from middle Yellow River catchment. *Front. Earth Sci.* **2023**, *10*. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.1033085>.
28. Wilson, J.P.; Gallant, J.C. Terrain analysis: Principles and applications. John Wiley & Sons, 2000.
29. Sobrino, J.A.; Rodríguez, J.A.S. Recent advances in quantitative remote sensing. Universitat de València, 2002.
30. Sonker, I.; Tripathi, J.N.; Swarnim. Remote sensing and GIS-based landslide susceptibility mapping using frequency ratio method in Sikkim Himalaya. *Quat. Sci. Adv.* **2022**, *8*, 100067. <https://doi.org/10.1016/j.qsa.2022.100067>.
31. Van, W.C. Statistical landslide hazard analysis ILWIS 2.1 for windows application guide. ITC Publication, 1997.
32. Voogd, J.H. Multicriteria evaluation for urban and regional planning. PhD Thesis 1 (Research TU/e / Graduation TU/e), Delftsche Uitgevers Maatschappij, Delft, 1982. doi:10.6100/IR102252.
33. Gorum, T.; Fan, X.; van Westen, C.J.; Huang, R.Q.; Xu, Q.; Tang, C.; Wang, G. Distribution pattern of earthquake-induced landslides triggered by the 12 May 2008 Wenchuan earthquake. *Geomorphology* **2011**, *133*, 152–167. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.12.030>.
34. Phạm, Q. Bù Đãng: Thiệt hại do thiên tai ước tính hơn 6,650 tỷ đồng. Trực tuyến: <https://baobinhphuoc.com.vn/news/9/147469/bu-dang-thiet-hai-do-thien-tai-uoc-tinh-hon-6-650-ty-dong> (Cập nhật 7/10/2024).

## **Landslide risk zoning using GIS, remote sensing and multi-factor techniques in Bu Bang District, Binh Phuoc Province, Vietnam**

**Nguyen Thi Kim Trang<sup>1</sup>, Pham Khac Khoa<sup>1</sup>, Nguyen Nhat Nguyen<sup>1</sup>, Ngo Tran Sang<sup>1</sup>, Le Trong Dieu Hien<sup>1\*</sup>**

<sup>1</sup> Thu Dau Mot University; 2128501010189@student.tdmu.edu.vn; pham-khoa855@gmail.com; 2128501010079@student.tdmu.edu.vn; 2128501010073@student.tdmu.edu.vn; hienltd@tdmu.edu.vn

**Abstract:** This study applied techniques GIS and remote sensing combined with multiple factors analysis, and hazard index statistics were used to determine the relationship between major factors controlling landslides including soil properties, precipitation, normalized difference vegetation index (NDVI), normalized difference water index (NDWI), topography (slope, aspect, tangential curvature, and profile curvature), distance to roads, and distance to water surface. The landslide map was formed from the overlaying process of ten controlling factor classification maps, divided into three levels: low (1), medium (2), high

(3). The analysis results showed that low susceptibility of landslides with an area of 73,273.5 hectares, following by medium and high susceptibility of landslide with an area of 44,884.6 hectares, and 29,886.8 hectares occupied for 30.3%, and 20.2% of the natural area, respectively. The landslide susceptibility map was validated by the ROC curve using 30% of the testing data. The results for the area under the curve (AUC) of prediction rate are 50% for the high susceptibility landslide, low and medium with an accuracy of 75%. The landslide susceptibility maps are useful for planning and managing land resources, minimizing risks from natural disasters from landslides.

**Keywords:** GIS; Remote sensing; Multifactorial technique; Landslide; Binh Phuoc.