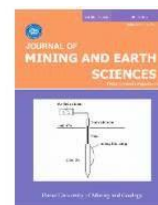




Journal of Mining and Earth Sciences

Website: <https://jmes.humg.edu.vn>



Developing an open source application on estimating potential of soil erosion based cloud computing



Hoa Thi Tran *, Ngoc Thi Tran

Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam

ARTICLE INFO

Article history:

Received 16th May 2025

Revised 21st Aug. 2025

Accepted 08th Sept. 2025

Keywords:

Coastal region,
GEE,
Remote Sensing,
Soil erosion,
USLE.

ABSTRACT

Soil erosion is one of the most serious environmental issues, significantly affecting agricultural practices and productivity, water quality, and ecosystem sustainability. The Universal Soil Loss Equation (USLE) model is a widely used tool for studying soil erosion in a specific area, based on influencing factors such as rainfall, topographic features, soil type, vegetation cover, and human impact through farming practices. However, access to this model has traditionally been limited to researchers or technicians with expertise in data extraction and model processing technologies. With the advancement of information technology and the aim of making the model more accessible to a wider range of users, this study focuses on developing an open-source application to estimate soil erosion based on the USLE model. The application is deployed on the Google Earth Engine (GEE) platform, which enables large-scale and near real-time data processing and analysis without the need for local computing infrastructure. In addition, the application features a single-page interface, allowing users to interact easily without complex operations or page transitions. The computed results are visualized directly on the interface, displaying the spatial distribution of areas at risk of erosion. Users can export the results for further analysis or to generate reports in different formats.

Copyright © 2025 Hanoi University of Mining and Geology. All rights reserved.

*Corresponding author

E - mail: tranthihoa@humg.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.2025.66(5).03



Tạp chí Khoa học Kỹ thuật Mỏ - Địa chất

Trang điện tử: <https://tapchi.humg.edu.vn>



Phát triển ứng dụng mã nguồn mở đánh giá nguy cơ xói mòn đất từ ảnh vệ tinh trên nền tảng điện toán đám mây

Trần Thị Hòa *, Trần Thị Ngọc

Trường Đại học Mỏ - Địa chất, Hà Nội, Việt Nam

THÔNG TIN BÀI BÁO

Quá trình:

Nhận bài 16/5/2025

Sửa xong 21/8/2025

Chấp nhận đăng 08/9/2025

Từ khóa:

GEE,
USLE,
Ven biển,
Viễn thám,
Xói mòn đất.

TÓM TẮT

Hiện tượng xói mòn đất một trong những vấn đề môi trường nghiêm trọng, gây ảnh hưởng lớn đến hoạt động canh tác và năng suất nông nghiệp, chất lượng nguồn nước và tính bền vững của hệ sinh thái. Mô hình USLE (Universal Soil Loss Equation) là một mô hình phổ biến trong nghiên cứu về hiện tượng xói mòn đất ở một khu vực xác định dựa trên các yếu tố ảnh hưởng như lượng mưa, đặc điểm địa hình, loại đất, thực vật che phủ và tác động của con người qua biện pháp canh tác. Tuy nhiên, đối tượng tiếp cận được với mô hình này thường là những nhà nghiên cứu hay kỹ thuật viên am hiểu về quá trình chiết tách và công nghệ xử lý mô hình. Với sự phát triển của công nghệ thông tin, cũng như hướng đến khả năng tiếp cận cho nhiều nhóm đối tượng, nghiên cứu này tập trung vào việc phát triển ứng dụng mã nguồn mở nhằm đánh giá nguy cơ xói mòn đất dựa trên mô hình USLE. Ứng dụng được triển khai trên nền tảng Google Earth Engine (GEE) cho phép xử lý và phân tích dữ liệu trên quy mô lớn và gần với thời gian thực mà không cần hạ tầng tính toán tại chỗ. Ngoài ra, với thiết kế giao diện dưới dạng một trang (single page), cho phép người dùng tương tác mà không cần nhiều thao tác hay chuyển trang phức tạp. Kết quả tính toán được trực quan hóa trên giao diện, và thể hiện sự phân bố của khu vực có nguy cơ xói mòn. Bên cạnh đó, người dùng có thể xuất kết quả để thực hiện đánh giá sâu hơn hoặc để tạo lập báo cáo những dưới định dạng khác nhau.

© 2025 Trường Đại học Mỏ - Địa chất. Tất cả các quyền được bảo đảm.

*Tác giả liên hệ

E - mail: tranthihoa@humg.edu.vn

DOI: 10.46326/JMES.2025.66(5).03

1. Mở đầu

Xói mòn đất là một quá trình tự nhiên, trong đó lớp đất bề mặt bị bào mòn và cuốn trôi dưới tác động của các yếu tố khí hậu như nắng, mưa hay gió, hoặc do hoạt động của cửa dòng chảy hay các hoạt động của con người (canh tác, xây dựng) (Lal, 2001; Pimentel & Burgess, 2013). Mức độ và tốc độ xói mòn đất có sự biến thiên đáng kể giữa các khu vực địa lý. Các vùng có địa hình dốc, phức tạp, khu vực thiếu lớp thực vật che phủ, khu vực ven biển hay nơi áp dụng các phương thức canh tác không bền vững thường có nguy cơ xói mòn hơn so với các khu vực khác.

Xói mòn đất được xem là một trong những dạng suy thoái đất phổ biến và nghiêm trọng nhất trên toàn cầu, đặc biệt tại các khu vực đồi núi nhiệt đới, nơi có địa hình dốc và lượng mưa lớn (Pimentel & Burgess, 2013). Quá trình xói mòn không chỉ làm mất lớp đất mặt giàu dinh dưỡng mà còn gây ra các hệ quả tiêu cực như sa bồi lòng hồ, suy giảm chất lượng nước, và giảm năng suất cây trồng (Lal, 2001). Trong bối cảnh biến đổi khí hậu và áp lực gia tăng từ hoạt động canh tác, nhu cầu giám sát và đánh giá xói mòn đất một cách hiệu quả ngày càng trở nên cấp thiết.

Mô hình USLE (Universal Soil Loss Equation) là một công cụ được ứng dụng rộng rãi để ước tính lượng đất bị mất do xói mòn trên bề mặt dốc (Wischmeier & Smith, 1978). Tuy nhiên, việc triển khai mô hình này trên diện rộng thường đối mặt nhiều khó khăn do hạn chế về dữ liệu đầu vào, năng lực xử lý và thiếu các công cụ phân tích chuyên sâu.

Mặc dù mô hình USLE có giới hạn nhất định trong việc phản ánh chính xác các quá trình vật lý, ưu điểm lớn của nó là yêu cầu dữ liệu đầu vào tương đối đơn giản và khả năng tích hợp hiệu quả với dữ liệu viễn thám và dữ liệu địa không gian khác. Bên cạnh đó, dù ra đời năm 1965, mô hình USLE vẫn giữ vững tính ứng dụng trong nhiều nghiên cứu hiện đại, chẳng hạn như việc tùy chỉnh và thử nghiệm cho các khu vực cụ thể (Ben Cheikha và nnk., 2025; Tung và nnk., 2025), và dùng để so sánh với những mô hình xói mòn (Kinnell, 2025). Hơn nữa, việc tận dụng các nền tảng điện toán đám mây như Google Earth Engine (GEE) đã cho phép xử lý và phân tích các yếu tố trong mô hình USLE trên quy mô lớn, liên tục và không cần hạ tầng máy chủ cục bộ (Gorelick và nnk., 2017).

Việc xây dựng các ứng dụng mã nguồn mở với

khả năng xử lý dữ liệu lớn trên nền tảng đám mây không chỉ góp phần giảm thiểu chi phí đầu tư hạ tầng mà còn tăng cường khả năng tiếp cận cho nhiều đối tượng sử dụng, bao gồm các nhà nghiên cứu, cơ quan quản lý địa phương, cộng đồng quản lý tài nguyên đất và người dùng phổ thông khác. Bài báo đề xuất và triển khai một ứng dụng web mã nguồn mở sử dụng Google Earth Engine nhằm ước tính nguy cơ xói mòn đất theo mô hình USLE, cho phép người dùng tương tác trực quan, chọn khu vực nghiên cứu, thời gian, thêm dữ liệu tùy biến khi cần thiết, và đồng thời dễ dàng xuất kết quả phân tích để nghiên cứu chuyên sâu hơn. Kết quả được cung cấp dưới dạng bản đồ trực quan, hỗ trợ đắc lực cho công tác quản lý đất đai, quy hoạch nông nghiệp, và đánh giá rủi ro môi trường.

2. Cơ sở lý thuyết và phương pháp nghiên cứu

2.1. Mô hình USLE

Mô hình USLE (Universal Soil Loss Equation) do Wischmeier và Smith phát triển là một trong những mô hình thực nghiệm đơn giản và phổ biến nhất được áp dụng để ước tính lượng đất bị mất do xói mòn do nước mưa trên các bề mặt canh tác (Wischmeier, 1965; Wischmeier & Smith, 1978). Mô hình tính toán xói mòn dựa trên công thức (1) - công thức ước tính lượng đất bị mất dựa trên công thức công bố ban đầu năm 1965 của tác giả Wischmeier và cải tiến năm 1978. Bảng 1 thể hiện bảng phân lớp giá trị USLE (ký hiệu A trong công thức 1) theo ước tính lượng mất đất hàng năm.

Bảng 1. Bảng phân lớp giá trị USLE (A) (Phạm Gia và nnk., 2017).

Phân loại	USLE (A) (tấn/ha/năm)
Xói mòn rất thấp	0÷1
Xói mòn thấp	1÷5
Xói mòn trung bình	5÷10
Xói mòn cao	10÷50
Xói mòn rất cao	>50

$$A = 2,47 * R * K * LS * C * P \quad (1)$$

Trong đó: A (USLE) - Lượng đất bị mất trung bình hàng năm (tấn/ha/năm); R - Hệ số mưa (Rainfall erosivity); K - Hệ số xói mòn đất (Soil erodibility); LS - Yếu tố địa hình (Slope Length and Steepness); C - Hệ số che phủ thực vật (Cover management); P - Hệ số biện pháp canh tác (Support practice).

2.1.1. Hệ số mưa R

Hệ số R biểu thị khả năng gây xói mòn của lượng mưa và thường được xác định dựa trên các đặc điểm mưa dài hạn như cường độ và tần suất (Angulo-Martínez & Beguería, 2009). Ngoài ra, sự xuất hiện của các trận mưa bão cũng được xem xét vì chúng có thể làm tăng đột ngột cường độ mưa, từ đó làm gia tăng mức độ xói mòn đất. Ở nhiều khu vực, các công thức thực nghiệm được sử dụng để ước tính mức độ gây xói mòn dựa trên lượng mưa hàng năm hoặc hàng tháng. Tuy nhiên, dữ liệu từ các trạm khí tượng tuy có độ chính xác cao nhưng lại thiếu tính liên tục về không gian. Do đó, các bộ dữ liệu mưa dưới dạng raster như TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission - Chương trình đo mưa vùng nhiệt đới) được xem là giải pháp tiềm năng ở quy mô khu vực. Một lựa chọn khác là bộ dữ liệu CHIRPS (Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Station Data - Dữ liệu mưa tích hợp từ ảnh vệ tinh hồng ngoại và trạm đo mặt đất của Trung tâm Khí hậu và Thiên tai), kết hợp với ảnh vệ tinh và quan trắc tại chỗ để tạo ra chuỗi thời gian lượng mưa phục vụ cho các phân tích sâu hơn. Giá trị của yếu tố R thường dao động từ 100 đến 7000, thấp ở các khu vực khô hạn và cao ở vùng nhiệt đới nơi có lượng mưa lớn.

Công thức tính R cho khu vực Việt Nam được thể hiện ở công thức (2) dưới đây (Nguyễn và nnk, 1996):

$$R = 0,548257 \times P - 59,9 \quad (2)$$

Đơn vị: (MJ.mm/ha/giờ/năm).

Trong đó: P - lượng mưa trung bình năm (mm/năm).

2.1.2. Hệ số xói mòn đất K

Thành phần cơ giới đất, cấu trúc đất, hàm lượng chất hữu cơ và khả năng thấm nước cũng ảnh hưởng đến khả năng giữ nước và chất dinh dưỡng của đất, từ đó góp phần xác định hệ số K, hay còn gọi là khả năng xói mòn của đất. Giá trị K được ước tính thông qua một mô hình thực nghiệm dựa trên thành phần kích thước hạt đất (tỷ lệ cát, limon và sét), hàm lượng hữu cơ và cấu trúc đất theo phương trình (3) (Liu và nnk, 2000; Wischmeier & Mannering, 1969).

$$K = (0,2 + 0,3 \exp(-0,0256 \times Sand)) \times \left(\frac{Silt \times (Silt + Clay)^{0,3}}{100} \right) \quad (3)$$

Dữ liệu đất thường được cung cấp bởi cơ quan chuyên ngành về điều tra đất đai, bản đồ đất hoặc từ công bố của Tổ chức Lương thực và Nông nghiệp Liên Hợp Quốc (FAO). Giá trị K thường nằm trong khoảng từ 0,02÷0,7.

Đối với đặc điểm đất đai ở Việt Nam, Nguyễn và nnk. (1998) đã làm thống kê và xác định hệ số K dành cho các loại đất ở Việt Nam được trình bày ở Bảng 2.

Bảng 2. Giá trị của K theo loại đất (Nguyễn và nnk, 1998).

Loại đất	Hệ số K
Cồn cát đỏ	0,30
Đất lầy thụt	0,10
Đất cát	0,30
Đất cát biển	0,30
Đất đá bột điển hình	0,39
Đất đỏ và xám nâu	0,24
Đất clay chua	0,10
Đất mặn nhiều	0,10
Đất mặn sú vẹt	0,10
Đất mặn trung bình	0,10
Đất mùn alit trên núi	0,15
Đất mùn vàng đỏ trên núi	0,15
Đất nâu đỏ	0,22
Đất nâu thẫm trên bazan	0,24
Đất nâu vàng	0,23
Đất phèn hoạt động	0,10
Đất phèn tiềm năng	0,10
Đất phù sa	0,40
Đất phù sa có tầng đốm rỉ	0,40
Đất phù sa chua	0,40
Đất phù sa clay	0,40
Đất xám bạc màu	0,22
Đất xám có tầng loang lổ	0,25
Đất xám Feralit	0,23
Đất xám mùn trên núi	0,19
Đất xói mòn tro sỏi đá	0,53
Núi đá	0,53
Sông hồ	0

2.1.3. Yếu tố địa hình LS

Yếu tố LS mô tả đặc điểm địa hình, phản ánh tác động của yếu tố địa hình (chiều dài và độ dốc của sườn dốc) đến quá trình xói mòn đất. Tại các khu vực nghiên cứu, địa hình dốc thường làm gia tăng dòng chảy bề mặt, dẫn đến hiện tượng rửa trôi lớp đất mặt. Thông thường, mô hình số độ cao (DEM) của khu vực nghiên cứu được sử dụng để tính toán độ dốc và tích lũy dòng chảy, được thể

hiện theo công thức (4) dưới đây (Desmet & Govers, 1996; McCool và nnk, 1989).

$$LS = \left(\frac{\text{Slope Length}}{22,13} \right)^m \times (0,065 + 0,045 \times \text{Slope} + 0,0065 \times \text{Slope}^2) \quad (4)$$

Trong đó: “slope length” - chiều dài dốc (m) và “slope” độ dốc (%). Các giá trị này được tính từ mô hình số độ cao DEM.

Giá trị LS thường nằm trong khoảng từ 0,01÷20, trong đó các giá trị cao hơn xuất hiện ở những khu vực có địa hình dốc hoặc đồi núi.

2.1.4. Hệ số che phủ thực vật C

Hệ số che phủ C có mối quan hệ chặt chẽ với mức độ che phủ thực vật hoặc loại cây trồng, vì các yếu tố này ảnh hưởng đến quá trình xói mòn đất thông qua việc làm giảm sự tiếp xúc trực tiếp của đất với tác động của mưa. Vì thế, các loại hình lớp phủ bề mặt là nguồn dữ liệu chính để ước tính hệ số C.

Những khu vực có mật độ che phủ thực vật cao thường được phân loại với giá trị C thấp, trong khi đất trống hoặc khu vực trồng cây có mức độ che phủ thấp thường có giá trị C cao (Thúy và nnk, 2019). Ảnh vệ tinh như Landsat, Sentinel hoặc các bộ dữ liệu lớp phủ đất hiện có có thể được sử dụng để xây dựng hệ số C. Chỉ số thực vật tiêu chuẩn (NDVI - Normalized Diffent Vegetation Index) được sử dụng để tính toán hệ số này theo công thức (5) (Durigon và nnk, 2014).

$$C = \exp \left(-\alpha * \frac{NDVI}{\beta} \right) \quad (5)$$

Thông thường, $\alpha = 2$, $\beta = 1$ (tùy biến).

Theo Van der Knijff và nnk. (1999), đối với khu vực nhiệt đới, có thể áp dụng công thức tính C theo công thức (6):

$$C = \frac{1-NDVI}{2} \quad (6)$$

Dựa trên bản đồ lớp phủ thực vật, có thể xác định giá trị của C thể hiện trên Bảng 3.

Bảng 3. Giá trị của C theo loại lớp phủ (Pham Gia và nnk, 2017)

Lớp phủ	Giá trị C
Rừng	0,001÷0,05
Đồng cỏ	0,01÷0,05
Đất trồng trọt	0,2÷0,5
Đất trống	0÷1,0
Đô thị (bê tông)	0

2.1.5. Hệ số biện pháp canh tác P

Các biện pháp quản lý và bảo tồn đất như canh tác theo đường đồng mức, làm ruộng bậc thang hoặc trồng xen theo dải được thể hiện thông qua hệ số P nhằm giảm thiểu xói mòn đất. Việc xác định giá trị hệ số P dựa trên loại hình sử dụng đất, các biện pháp bảo tồn đất được cung cấp bởi chính quyền địa phương hoặc thu thập từ hồ sơ nông nghiệp và khảo sát thực địa (Panagos, 2017; Panagos và nnk, 2016).

Ví dụ, canh tác theo đường đồng mức trên địa hình dốc vừa có thể có giá trị P là 0.5, trong khi làm ruộng bậc thang có thể giảm xói mòn mạnh hơn, với hệ số P chỉ còn khoảng 0. Giá trị hệ số P cũng có thể được ước tính dựa trên giả định từ chỉ số NDVI. Những khu vực có áp dụng biện pháp bảo tồn thường được gán giá trị P thấp hơn. Bảng 4 cung cấp các ví dụ minh họa cho hệ số P.

Bảng 4. Giá trị hệ số P cho các loại hình canh tác nông nghiệp (Renard, 1997).

Loại hình	Giá trị P
Canh tác theo cao độ	0,5÷0,9
Trồng theo dải	0,3÷0,8
Ruộng bậc thang	0,1÷0,5
Không phải đất nông nghiệp	1,0

Hoặc tác giả Wischmeier và Renard cũng đề cập đến chiết xuất P từ giá trị độ dốc nếu thông tin về sử dụng đất hay loại hình canh tác không khả dụng. Bảng 5 trình bày giá trị P theo độ dốc như sau:

Bảng 5. Giá trị hệ số P tính theo độ dốc (Renard, 1997; Wischmeier & Smith, 1978)

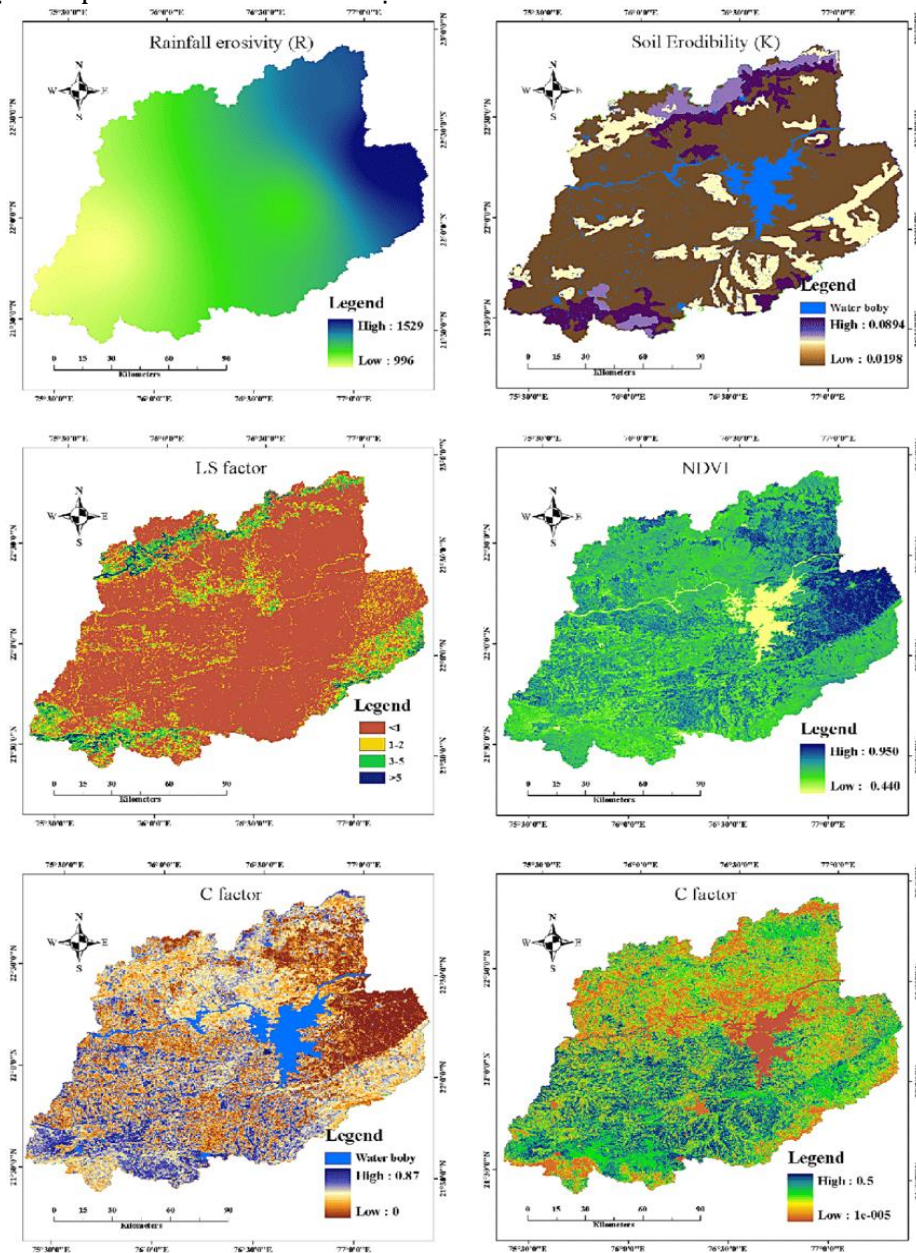
Độ dốc (%)	Giá trị P
0,0 ÷ 1,0	0,60
1,1 ÷ 2,0	0,50
2,1 ÷ 7,0	0,50
7,1 ÷ 12,0	0,60
12,1 ÷ 18,0	0,80
18,1 ÷ 24,0	0,90
> 24,0	1,00

2.2. Ứng dụng ảnh vệ tinh trong nghiên cứu xói mòn đất

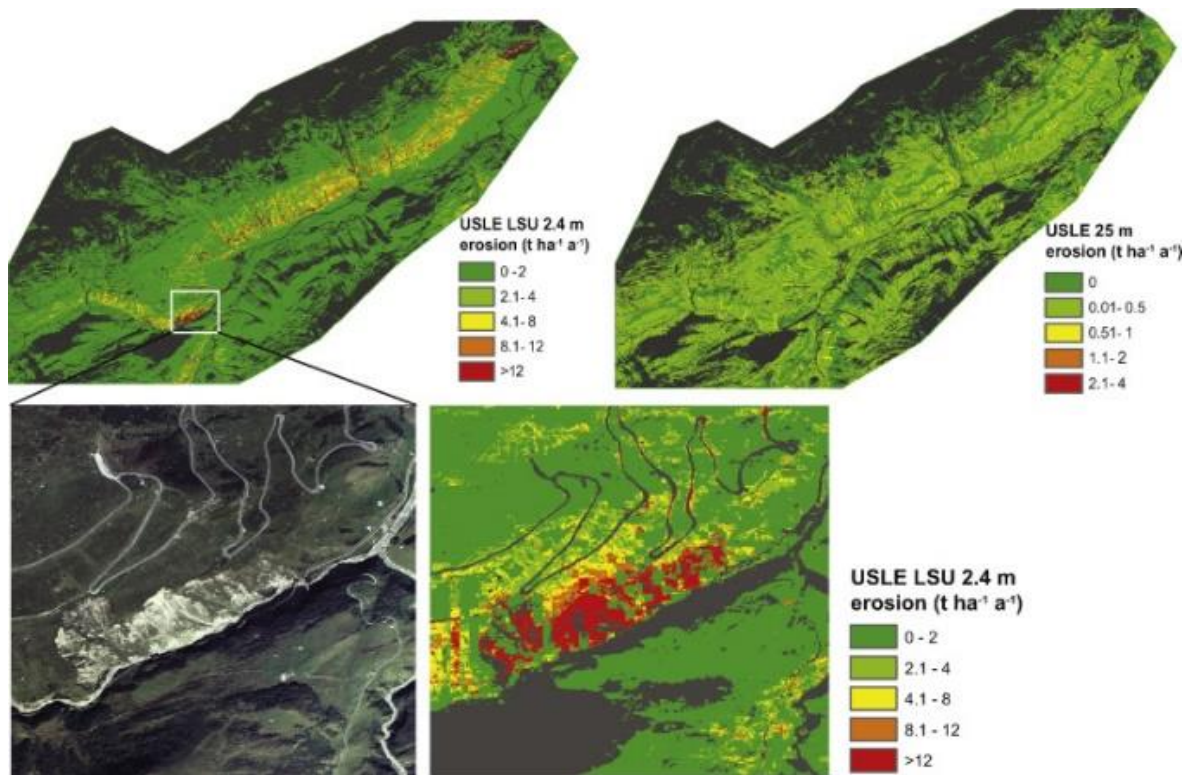
Ảnh viễn thám hiện đại đóng vai trò ngày càng quan trọng trong nghiên cứu và giám sát hiện tượng xói mòn đất nhờ khả năng cung cấp thông tin liên tục, phủ rộng và gần thời gian thực. Với các đặc điểm về phổ, không gian và thời gian ngày càng được cải thiện, dữ liệu ảnh vệ tinh đã và đang được sử dụng rộng rãi để tính toán các yếu tố đầu vào cho các mô hình như USLE (Universal Soil Loss Equation) và RUSLE (Revised USLE), bao gồm các yếu tố lượng mưa (R), khả năng bị xói mòn của đất (K), độ dốc và chiều dài sườn dốc (LS), lớp phủ bề mặt (C), và biện pháp canh tác hoặc bảo tồn đất (P). Hình 1 minh họa sản phẩm trích xuất từ dữ liệu

Landsat tính toán các chỉ số cho mô hình RUSLE. Hình 2 thể hiện việc ứng dụng ảnh QuickBird ở độ phân giải cao trong xây dựng mô hình USLE minh chứng cho khả năng ứng dụng của đa dạng về độ phân giải của các loại ảnh trong phân tích xói mòn.

Hệ số C của mô hình USLE hay hệ số che phủ thực vật phản ánh ảnh hưởng của lớp phủ bề mặt đối với xói mòn đất, có thể được ước tính thông qua các chỉ số thực vật phổ biến như NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Chỉ số này được tính



Hình 1. Tính toán các chỉ số R, K, LS, NDVI, từ dữ liệu viễn thám (Mondal và nnk, 2018).



Hình 2. Ước tính USLE từ ảnh vệ tinh có độ phân giải cao QuickBird (Meusburger và nnk, 2010).

từ nhiều loại ảnh vệ tinh quang học có độ phân giải khác nhau như Landsat (30 m), Sentinel-2 (10 m) hoặc MODIS (250 m, 500 m), cho phép đánh giá mức độ che phủ thực vật và biến động theo thời gian và không gian, từ đó xác định được khu vực có nguy cơ xói mòn cao (Panagos, 2017). Trong đó, khu vực có mật độ thực vật cao thường có hệ số C thấp, ngược lại với đất trống hoặc cây trồng ngắn ngày (Devine & Harrington, 2007). Dữ liệu phân loại lớp phủ mặt đất từ ảnh vệ tinh cũng hỗ trợ trong việc xác định hệ số này một cách định lượng.

Bên cạnh đó, yếu tố địa hình - cụ thể là hệ số LS - cũng được tính toán hiệu quả từ mô hình số độ cao (DEM) tạo bởi dữ liệu vệ tinh như SRTM hoặc ALOS PALSAR. DEM cho phép trích xuất độ dốc và tích lũy dòng chảy, hai thành phần quan trọng trong việc ước tính mức độ xói mòn do địa hình gây ra (Dang và nnk, 2021). Song song với đó, lượng mưa - yếu tố quyết định hệ số R - có thể được ước tính thông qua dữ liệu thu nhận được từ các vệ tinh TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) hoặc CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data), giúp cải thiện độ phủ và độ chính xác của dữ liệu khí tượng, đặc biệt ở các khu vực ít trạm đo (Jain và nnk, 2001).

Gần đây, sự phát triển của các nền tảng điện toán đám mây như Google Earth Engine (GEE) đã góp phần đáng kể vào việc tối ưu hóa và nâng cao hiệu quả ứng dụng ảnh vệ tinh trong nghiên cứu xói mòn đất. GEE cho phép người dùng có thể truy cập, xử lý và phân tích khối lượng lớn dữ liệu viễn thám một cách nhanh chóng và trực tuyến, loại bỏ nhu cầu về cơ sở hạ tầng phần cứng phức tạp. Việc tích hợp mô hình USLE trên GEE còn mở ra khả năng xây dựng ứng dụng bản đồ đánh giá nguy cơ xói mòn sơ bộ có tính tương tác, hỗ trợ công tác quy hoạch sử dụng đất, bảo vệ tài nguyên và phát triển bền vững (Panagos, 2017).

Tóm lại, với những lợi thế vượt trội về mặt dữ liệu và công cụ hỗ trợ, dữ liệu ảnh vệ tinh ngày càng đóng nhiều hơn trong các nghiên cứu hiện đại về xói mòn đất nói riêng, và quản lý tài nguyên thiên nhiên nói chung.

2.3. Tổng quan về Google Earth Engine (GEE)

Google Earth Engine (GEE) là một nền tảng điện toán đám mây chuyên dùng để lưu trữ, xử lý và phân tích dữ liệu viễn thám và địa không gian ở quy mô toàn cầu và cục bộ. Ra đời năm 2010, GEE đã trở thành một trong những công cụ quan trọng nhất trong lĩnh vực khoa học Trái Đất. Nền tảng này

nổi bật nhờ khả năng truy cập nhanh chóng và xử lý hiệu quả hàng petabyte dữ liệu ảnh vệ tinh và sản phẩm GIS từ nhiều nguồn khác nhau, bao gồm Landsat, MODIS, Sentinel, SRTM, CHIRPS và nhiều bộ dữ liệu khác (Gorelick và nnk, 2017).

Điểm khác biệt so với các công cụ tính toán truyền thống đòi hỏi cài đặt phần mềm và phần cứng mạnh mẽ là GEE cho phép người dùng thao tác trực tiếp trên trình duyệt thông qua giao diện lập trình JavaScript hoặc Python API. Nhờ hạ tầng tính toán mạnh mẽ của Google, GEE hỗ trợ xử lý dữ liệu trên quy mô lớn mà không yêu cầu người dùng phải tải dữ liệu về hoặc sử dụng máy tính hiệu năng cao. Điều này đặc biệt hữu ích đối với các quốc gia đang phát triển, nơi điều kiện tính toán và lưu trữ còn hạn chế (Mutanga & Kumar, 2019).

Một trong những điểm mạnh vượt trội của GEE là khả năng xử lý chuỗi thời gian dữ liệu viễn thám. Người dùng có thể phân tích biến động sử dụng đất, theo dõi thay đổi lớp phủ rừng, ước tính chỉ số thực vật (NDVI), đánh giá ảnh hưởng của hạn hán, lũ lụt hoặc nguy cơ xói mòn đất. Các ứng dụng có thể mở rộng từ cấp địa phương đến toàn cầu, từ dành cho người dùng phổ thông tới các chuyên gia phân tích dữ liệu viễn thám và GIS với khả năng phân tích và trình bày kết quả dưới dạng bản đồ, biểu đồ trực quan hoặc dữ liệu số phục vụ cho các nghiên cứu chuyên sâu và ra quyết định quản lý tài nguyên (Tamiminia và nnk., 2020).

Ngoài ra, GEE còn cho phép phát triển các ứng dụng web tương tác (web apps) để chia sẻ kết quả phân tích với cộng đồng hay nhà quản lý. Điều này giúp chuyển giao công nghệ nhanh chóng từ nghiên cứu đến thực tiễn, góp phần nâng cao hiệu quả giám sát tài nguyên thiên nhiên, quy hoạch sử dụng đất và ứng phó với biến đổi khí hậu (Amani và nnk., 2020).

3. Phân tích và thiết kế ứng dụng

3.1. Yêu cầu đặt ra

Việc tính toán mô hình xói mòn đất USLE có thể được tự động hóa hoàn toàn bằng cách tận dụng dữ liệu viễn thám miễn phí và công cụ điện toán đám mây trên nền tảng Google Earth Engine. Giải pháp này giúp người dùng không cần sử dụng phần mềm chuyên dụng, không cần kiến thức chuyên sâu về mô hình hay kỹ năng lập trình phức tạp để ước tính các chỉ số. Điều này sẽ tạo điều kiện dễ dàng hơn cho các đối tượng người dùng phổ thông, hay các

nhà quản lý tiếp cận thông tin nhanh chóng, có được cái nhìn tổng quan về các khu vực có nguy cơ hay đang chịu ảnh hưởng, từ đó hỗ trợ quá trình phân tích, giám sát và đề xuất phương án quản lý hiệu quả. Ngoài ra, kết quả chiết xuất có thể được dùng để đối chiếu với các báo cáo thực tế góp phần nâng cao độ tin cậy của dữ liệu.

Do đó, ứng dụng này được thiết kế để không đặt ra yêu cầu cụ thể nào về chuyên môn cho người dùng. Bất cứ cá nhân nào cũng có thể sử dụng máy tính cá nhân, kết nối internet, truy cập theo đường dẫn của ứng dụng và thực hiện thao tác trực tiếp để thu kết quả phân tích. Tuy nhiên, người dùng cần đăng nhập tài khoản Google Drive để nhận dữ liệu.

Mã nguồn của ứng dụng có thể được cung cấp cho nhà phát triển hay lập trình viên để có thể phát triển và triển khai tối ưu hóa về chức năng, giao diện, hoặc ước tính độ chính xác của kết quả thực hiện. Hiện tại, trọng tâm phát triển của ứng dụng là xây dựng và triển khai ý tưởng ở dạng sơ bộ, chưa tập trung vào việc đánh giá độ chính xác chi tiết hay thử nghiệm các mô hình xói mòn khác nhau. Tuy nhiên, người dùng có thể đưa dữ liệu tùy biến vào mô hình USLE được thiết kế sẵn để nâng cao độ tin cậy của kết quả.

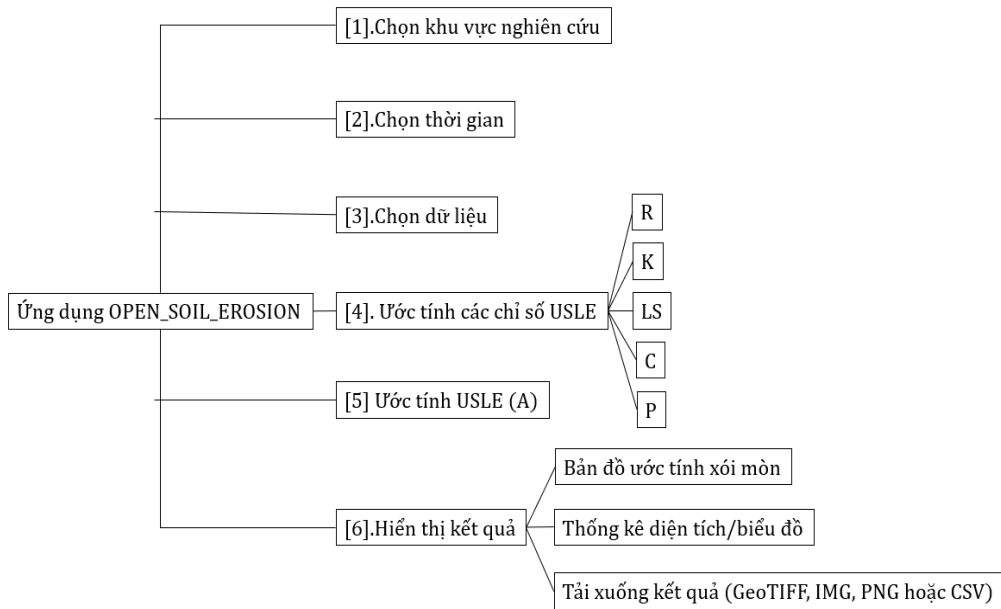
3.2. Chức năng của ứng dụng

Hình 3 minh họa sơ đồ chức năng cơ bản của ứng dụng. Dưới đây là mô tả chi tiết các chức năng:

[1] Chọn khu vực nghiên cứu (vẽ đa giác/ chọn tỉnh): người dùng có thể tùy chọn một tỉnh ở Việt Nam, hoặc dùng công cụ vẽ trên bản đồ để xác định khu vực quan tâm. Dữ liệu ranh giới các tỉnh được khai thác từ dữ liệu ranh giới hành chính cấp 1 của FAO. Hiện tại, trong phần thực nghiệm, dữ liệu giới hạn ở khu vực thực nghiệm là tỉnh Quảng Nam.

[2] Chọn thời gian (năm hoặc khoảng năm): Khả năng truy xuất dữ liệu viễn thám theo thời gian phụ thuộc vào nguồn dữ liệu lựa chọn. Ví dụ với dữ liệu Landsat 8, việc truy cập có thể từ năm 2013 đến nay. Việc lựa chọn ảnh dựa trên thuật toán xác suất, ưu tiên chọn ảnh có chất lượng tốt nhất trong năm.

[3] Chọn nguồn dữ liệu ảnh vệ tinh (Landsat / Sentinel): Người dùng có thể chọn nguồn dữ liệu ảnh vệ tinh quang học mong muốn. Cần lưu ý đến khoảng thời gian và khu vực phù hợp với nguồn dữ liệu đã chọn. Trong trường hợp, không có ảnh phù hợp, hệ thống sẽ có thông báo yêu cầu người dùng "Chọn lại thời gian/hoặc nguồn dữ liệu".



Hình 3. Sơ đồ chức năng cơ bản của ứng dụng.

[4] Ước tính các yếu tố USLE: Các chỉ số đầu vào của mô hình được tính toán và hiển thị trên bản đồ bao gồm:

- R (Hệ số mưa): dựa trên dữ liệu lượng mưa từ dữ liệu CHIRPS. Dữ liệu CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data) cung cấp thông tin ước tính lượng mưa dựa trên dữ liệu vệ tinh hồng ngoại kết hợp với dữ liệu từ các trạm đo mưa ở mặt đất. Dữ liệu có phạm vi bao trùm rộng, cập nhật liên tục, với độ phân giải không gian 5,5 km, độ phân giải thời gian có thể theo ngày, 5 ngày hoặc hàng tháng với thời gian cung cấp dữ liệu là từ 1981 đến nay. Mặc dù độ phân giải 5,5 km tương đối tốt cho dữ liệu phân bố lượng mưa, khi tích hợp vào mô hình USLE, dữ liệu cần đồng bộ về độ phân giải 30 m thông qua phương pháp tái phân chia mẫu (resampling). Công thức (2) được dùng để ước tính hệ số R.

- K (Hệ số xói mòn đất): dựa trên bản đồ phân bố loại đất của Soil Grids 250 m (Hengl và nnk., 2017). Bộ dữ liệu cung cấp đầy đủ thông tin các thành phần cơ giới đất như sét, bùn, cát, hàm lượng chất hữu cơ và pH. Hệ số K được tính toán theo công thức (3). Hệ số K có thể được tính toán ở bên ngoài, sau đó được nhập vào GEE dưới dạng asset/geotif và được tái phân chia mẫu ở độ phân giải 30m.

- LS (Hệ số địa hình): được chiết xuất từ mô hình số độ cao STRM GL1 có độ phân giải là 30 m. Dữ liệu độ dốc và chiều dài sườn dốc được tính dựa

trên số liệu từ mô hình số độ cao như ở công thức (4).

- C (Hệ số che phủ thực vật): được chiết xuất từ dữ liệu ảnh vệ tinh quang học lựa chọn ở chức năng [3] và công thức (6). Với lựa chọn ảnh Landsat độ phân giải 30m, không cần phải tái phân chia mẫu. Tuy nhiên nếu lựa chọn là ảnh Sentinel 2 có độ phân giải 10m, chương trình sẽ tự động tái phân chia mẫu về độ phân giải 30m.

- P (Hệ số canh tác): được ước tính từ dữ liệu độ dốc chiết xuất từ DEM có độ phân giải là 30m tính toán và gán giá trị gán theo Bảng 5.

Chức năng [4] là chức năng tốn nhiều tài nguyên và tốn nhiều thời gian nhất, đôi khi có thể dẫn tới quá tải khi nhập dữ liệu hoặc khi dữ liệu cho khu vực và thời gian lựa chọn không tồn tại

[5] Ước tính xói mòn đất (lượng đất bị mất chỉ số A): Từ các chỉ số R, K, LS, C, P đã xác định, chỉ số USLE (A) ước tính lượng đất có khả năng bị mất hàng năm cho từng pixel thuật toán nhân theo mảng. Độ phân giải của kết quả là 30m. Công thức (1) dùng để tính toán A.

[6] Hiển thị kết quả:

- Bản đồ raster (tương tác): hiển thị phân bố của các pixel sau khi ước tính xói mòn hàng năm. Sử dụng thang màu biến thiên từ xanh lá tới đỏ để biểu thị 05 cấp độ xói mòn (từ rất nhẹ đến nghiêm trọng) theo Bảng 1.

- Thống kê (tổng diện tích xói mòn theo mức độ): thực hiện thống kê diện tích và xây dựng biểu

đồ xói mòn, hiển thị trực quan trên bản đồ.

- Tải xuống kết quả (GeoTIFF, PNG, CSV). Người dùng có thể lựa chọn độ phân giải theo mong muốn, tuy nhiên ứng dụng để mặc định là 30m để đồng bộ với độ phân giải của các giá trị đầu vào.

3.3. Kịch bản sử dụng tổng quát (usecase)

Dựa trên các chức năng đã thiết kế cho ứng dụng, nhóm tác giả đã xây dựng được một số kịch bản sử dụng chính. Ứng dụng được thiết kế cho mọi đối tượng người dùng; bất kỳ ai có đường dẫn truy cập đều có thể thực hiện các chức năng được mô tả trong các trường hợp sử dụng (usecase - UC) dưới đây. Tuy nhiên, để xuất kết quả, người dùng cần phải đăng nhập tài khoản Google Drive.

UC1 - Lựa chọn khu vực: Người dùng có thể vẽ trực tiếp trên bản đồ hoặc danh sách tỉnh có sẵn.

UC2 - Lựa chọn thời gian: Người dùng xác định năm hoặc khoảng thời gian cụ thể cho phân tích.

UC3 - Lựa chọn nguồn dữ liệu và tính toán A: Người dùng chọn nguồn dữ liệu ảnh vệ tinh mong muốn; sau đó, chương trình sẽ tự động tính toán các thành phần mô hình USLE để tính chỉ số A. Người dùng có thể tùy biến đưa dữ liệu hệ số P hoặc K nhập vào chương trình.

UC4 - Hiển thị bản đồ xói mòn đất: Ứng dụng sẽ hiển thị bản đồ xói mòn đất dựa trên tính toán dựa trên nền tảng GEE.

UC5 - Người dùng xuất kết quả dưới dạng ảnh, raster hoặc số liệu thống kê.

Nhận xét: về cơ bản người dùng chỉ cần lựa chọn khu vực (tỉnh) và thời gian (năm), hoặc thêm

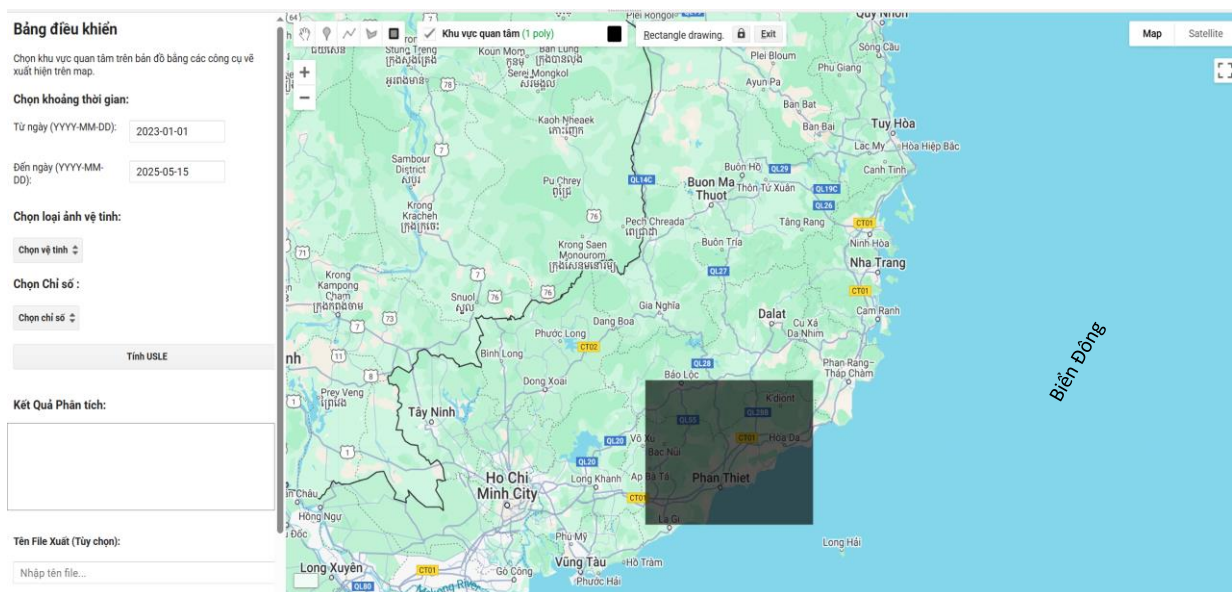
Đồng dữ liệu hệ số P hoặc K nếu cần thiết, mà không cần khởi tạo thêm công thức hay can thiệp vào quá trình tính toán và hiển thị. Sau khi có kết quả, người dùng có thể tùy chọn tải kết quả xuống để thực hiện phân tích chuyên sâu hơn.

3.3. Thiết kế giao diện

Giao diện của ứng dụng được thiết kế theo dạng trang đơn (single page), hiển thị toàn bộ các chức năng được trên cùng một màn hình. Khung cơ bản của ứng dụng được minh họa ở Hình 4 và Hình 5. Cụ thể, phần chức năng được bố trí phía bên trái trong khu vực “Bảng điều khiển”, trong khi phần hiển thị được đặt ở phía bên phải và chiếm diện tích lớn hơn. Không gian hiển thị bao gồm các nút chức năng mặc định của GEE như chọn vùng, thu phóng hay di chuyển bản đồ. Ngoài ra, không gian biểu thị còn tích hợp phần chú giải và đồ thị thống kê diện tích khu vực nghiên cứu.

Logo Tên ứng dụng	
Bảng điều khiển [] Chọn khu vực [] Chọn khoảng thời gian [] Chọn nguồn dữ liệu [] Tính chỉ số USLE [Button: Phân tích] [Button: Tải kết quả]	Bản đồ GEE (mặc định) Không gian chính biểu thị kết quả phân tích

Hình 4. Thiết kế giao diện của ứng dụng.



Hình 5. Wireframe của thiết kế với lựa chọn khu vực theo công cụ drawing tool của GEE.

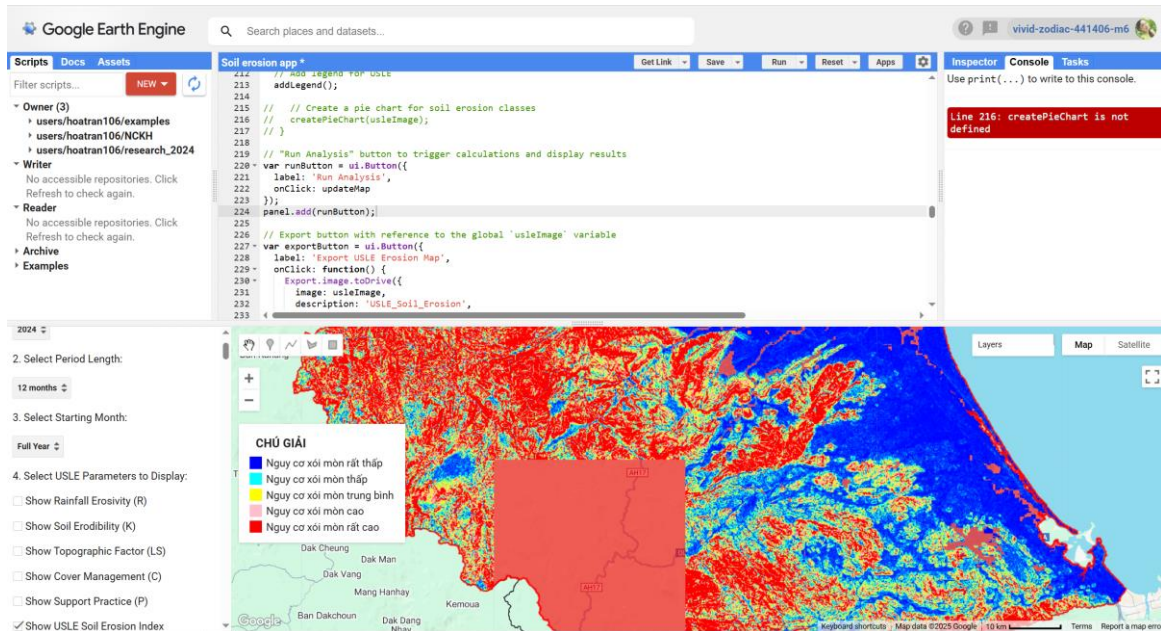
4. Kết quả và thảo luận

Nhóm tác giả lựa chọn tỉnh Quảng Nam cũ (nay đã sáp nhập với thành phố Đà Nẵng) thuộc vùng duyên hải Nam Trung Bộ làm khu vực thực nghiệm minh họa hoạt động của ứng dụng. Đây là khu vực đa dạng về địa hình, từ đồng bằng ven biển đến các vùng đồi núi phức tạp. Sự đa dạng này tạo điều kiện thuận lợi để ứng dụng có thể kiểm nghiệm khả năng xử lý các yếu tố địa hình khác nhau trong mô hình USLE. Hơn nữa, khu vực này cũng thường xuyên chịu tác động của lượng mưa lớn và các hình thái thời tiết khắc nghiệt, vốn là yếu tố chính gây ra xói mòn đất. Việc áp dụng mô hình USLE và công nghệ viễn thám tại đây sẽ cung cấp cái nhìn sơ bộ về nguy cơ xói mòn ở đây.

Ứng dụng hiện đã được phát triển với các mô-đun mã nguồn cho phép truy cập và tính toán cần tính và ước tính sơ bộ chỉ số USLE, cũng như hiển

thị và trình bày dữ liệu một cách trực quan. Hình 6 minh họa môi trường phát triển của ứng dụng bao gồm có phần soạn thảo mã (code editor), khu vực hiển thị kết quả và các công cụ quản lý tập lệnh (scripts) cùng kiểm tra tác vụ.

Sau khi chạy thử nghiệm, mã nguồn có thể được hỗ trợ để xây dựng thành ứng dụng hoàn chỉnh thông qua mô-đun phát hành ứng dụng của GEE. Tại đây, nhà phát triển tùy chỉnh tên cho ứng dụng, tạo đường dẫn URL riêng, lựa chọn chế độ cập nhật mã nguồn liên tục sau mỗi lần chỉnh sửa hoặc duy trì các phiên bản khác nhau, và thiết kế biểu tượng (logo) cho ứng dụng. Hình 7 mô phỏng quá trình phát hành ứng dụng trên nền tảng GEE và giao diện quản lý ứng dụng sau khi được phát hành. Nhà phát triển có thể chia sẻ đường dẫn của ứng dụng đến người dùng.



Hình 6. Môi trường phát triển ứng dụng.

Hình 7. Giao diện khởi tạo ứng dụng mới.

Hình 8 trình bày giao diện trang đơn của ứng dụng khi chạy trên trình duyệt Microsoft Edge (ME). Người dùng cũng có thể thao tác trực tiếp mà không cần tải khoản Google hay truy cập vào GEE để thực hiện phân tích. Phần bản đồ hiển thị với không gian rộng, tích hợp với các công cụ mặc định của Google Maps như phóng to, thu nhỏ, di chuyển, lựa chọn vùng hay điểm, bật/tắt các lớp dữ liệu và chuyển đổi bản đồ nền sang ảnh vệ tinh.

Về đánh giá độ tin cậy và độ chính xác của kết quả mô hình gặp phải những thách thức đáng kể do khó khăn trong việc thu thập dữ liệu thực tế và sự hạn chế của các công bố trên tạp chí trong nước về khu vực nghiên cứu. Nhiều nghiên cứu hiện có chỉ dừng lại ở việc thống kê diện tích xói mòn và mô tả phân bố không gian mà không có ước tính độ chính xác của kết quả, ví dụ với các nghiên cứu của Trần (2021), Vũ và nnk. (2019).

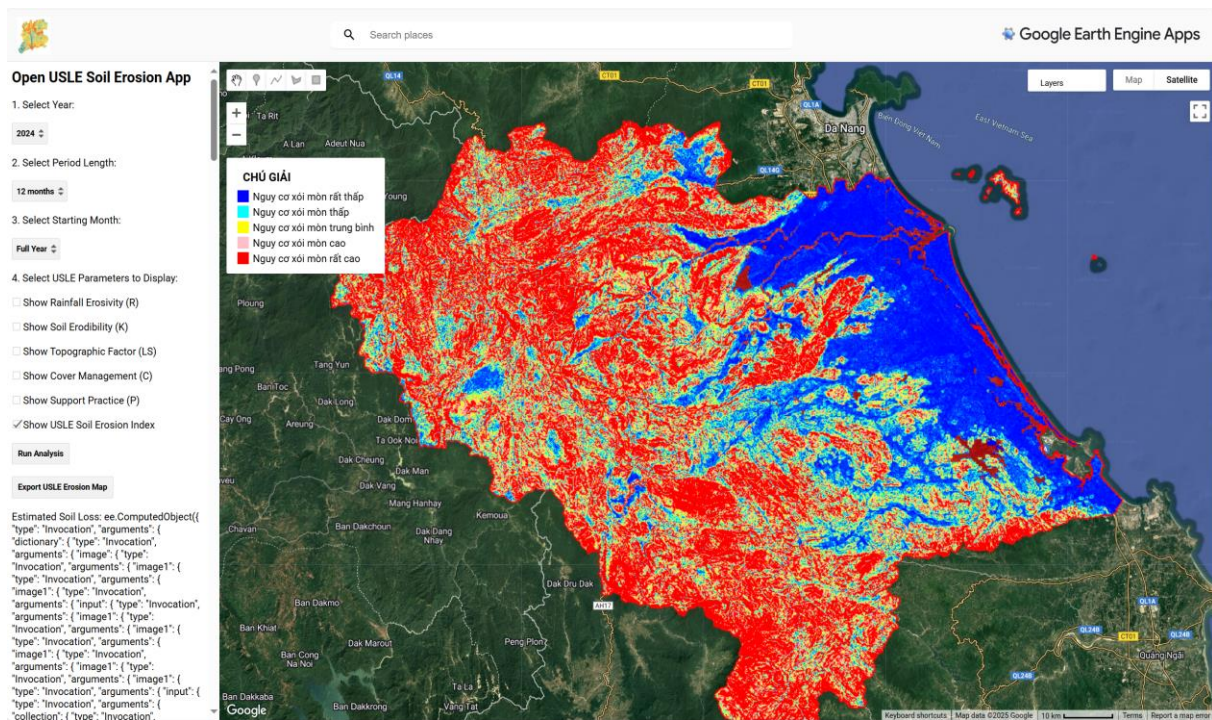
Cùng hướng nghiên cứu, Đặng (2022) đã ứng dụng mô hình USLE đánh giá nguy cơ xói mòn khu vực duyên hải Nam Trung Bộ năm 2020 (trên các phần mềm viễn thám và hệ thống tin địa lý chuyên dụng). Kết quả cho thấy, mô hình USLE phù hợp và có độ tin cậy với khu vực nghiên cứu. Trên cơ sở đó, nhóm tác giả đã so sánh kết quả trích xuất từ nghiên cứu của Đặng (2022) được trình bày trong Hình 9 và kết quả phân tích từ mô hình mà nhóm phát triển trình bày trong Hình 10, cho thấy sự tương

đồng đáng kể về phân bố không gian của bản đồ xói mòn năm 2020. Tuy nhiên để đánh giá sâu hơn về mặt định lượng, cần có thêm các phương pháp kiểm định và dữ liệu thực địa chi tiết.

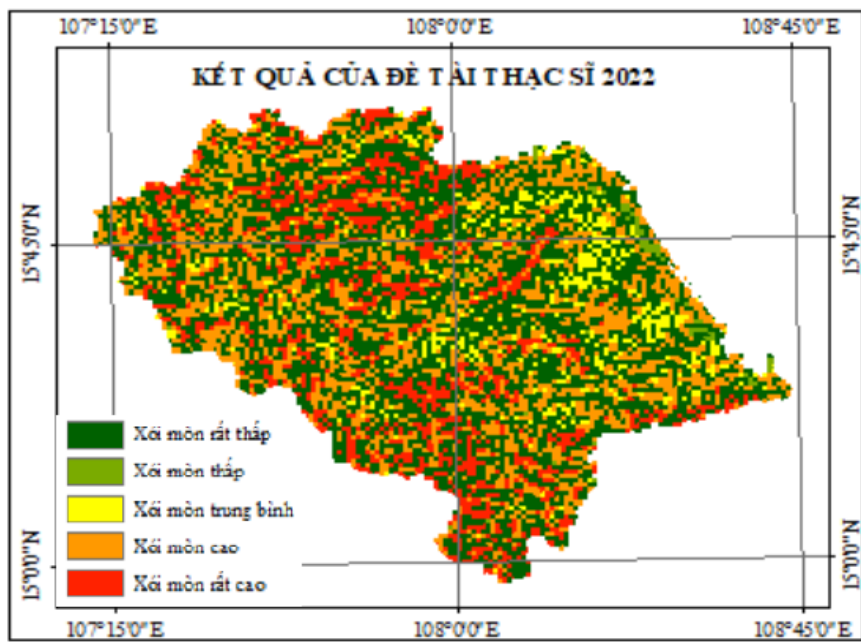
Do đó, bài báo này chỉ tập trung vào việc đảm bảo rằng thông tin được chiết xuất từ mô hình hoàn toàn dựa trên các công thức tính toán đã được thiết lập và sử dụng nguồn dữ liệu đáng tin cậy - được khai thác từ các dữ liệu phổ biến, có chọn lọc trên Google Earth Engine.

Kết quả thu được cung cấp một ước tính sơ bộ tổng quát về các khu vực có nguy cơ xói mòn, đóng vai trò định hướng cho các nghiên cứu chuyên sâu hơn trong tương lai.

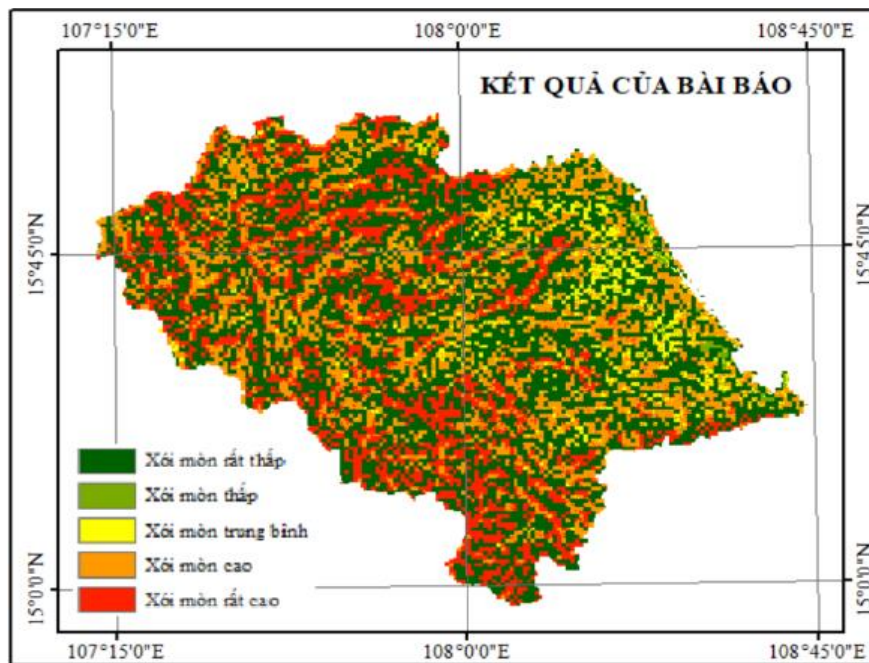
Người dùng hiện có thể truy cập vào đường dẫn của ứng dụng: OpenSourceUSLE App để trải nghiệm. Tuy nhiên, có một số lưu ý quan trọng về các hạn chế hiện tại của ứng dụng. Cụ thể, việc xuất dữ liệu/kết quả sau khi phân tích đang gặp một số vướng mắc, hạn chế liên quan đến chính sách sử dụng dữ liệu và chính sách quản lý về quyền riêng tư. Thông thường, trước khi phát hành, các ứng dụng sẽ cần phải xác định rõ ràng các loại giấy phép theo quy định để đảm bảo an toàn về mặt thông tin và giảm thiểu rủi ro cho cả người phát triển và người dùng, đặc biệt khi kết quả có thể bị sử dụng sai mục đích.



Hình 8. Giao diện ứng dụng chạy trên ME.



Hình 9. Trích xuất bản đồ nguy cơ xói mòn 2020 từ khu vực nghiên cứu tài liệu tham khảo của Đặng (2022) (độ phân giải 100 m).



Hình 10. Trích xuất kết quả nghiên cứu từ ứng dụng của bài báo về bản đồ xói mòn năm 2020.

Hình 11 minh họa các quy định của Google liên quan đến việc xuất dữ liệu được phân tích từ ứng dụng, bao gồm: điều khoản dịch vụ (Terms of Service) và chính sách riêng tư (Privacy Policy). Tuy nhiên, bài báo này tập trung vào khía cạnh kỹ thuật của giải pháp, do đó các quy định và chính sách không phải là đối tượng nghiên cứu chính.

Mặc dù GEE cung cấp nền tảng miễn phí, Google hiện tại đã áp dụng chính sách tính phí đối với các ứng dụng khai thác dịch vụ, tài nguyên tính toán và API. Mỗi nhà phát triển được cung cấp số lượt khai thác dịch vụ miễn phí khai thác dịch vụ trong một ngày, và việc vượt quá giới hạn này sẽ phát sinh chi phí. Đây cũng là một yếu tố quan trọng

Hình 11. Yêu cầu về chính sách sử dụng ứng dụng và công bố kết quả.

cần được cân nhắc kỹ lưỡng khi có kế hoạch quảng bá rộng rãi ứng dụng và dự kiến có lượng lớn người dùng.

5. Kết luận và kiến nghị

Việc xây dựng ứng dụng mã nguồn mở dựa trên nền tảng hạ tầng có sẵn là mang lại nhiều lợi ích thiết thực. Đây là giải pháp hiệu quả giúp tăng cường khả năng tiếp cận ứng dụng cho nhiều đối tượng người dùng, đồng thời giảm thiểu đáng kể chi phí đầu tư cho các nhà phát triển, vì không cần đầu tư quá nhiều vào nền tảng tính toán, máy chủ hay hệ thống tương tác. Điều này tạo điều kiện thuận lợi cho cả nhà phát triển và người dùng cùng nhau thử nghiệm, trao đổi và cải tiến ứng dụng. Phương pháp này đặc biệt phù hợp với các ứng dụng chuyên ngành trong lĩnh vực quản lý tài nguyên môi trường, vốn thường là các phần mềm thương mại với chi phí tương đối cao.

Mặc dù đạt được những kết quả sơ bộ ban đầu, độ chính xác của kết quả cần phải được kiểm nghiệm một cách cụ thể. Đây một hạn chế hiện tại khi thực hiện phân tích trên GEE, bởi việc tính toán độ chính xác với dữ liệu hiện thực hoặc dữ liệu đã được kiểm nghiệm còn gặp nhiều khó khăn và phức tạp trong quá trình triển khai.

Ngoài ra, nhóm tác giả đang tiếp tục phát triển ứng dụng để tích hợp các tính năng mới, bao gồm:

- Cho phép người dùng lựa chọn các khu vực khác nhau trên lãnh thổ đất liền Việt Nam;
- Hỗ trợ tải lên các dữ liệu đã chuẩn bị sẵn để đối sánh, nâng cao độ tin cậy của mô hình;

- Cung cấp tùy chọn lựa chọn các tham số đầu vào cho hệ số R và C sao cho phù hợp với đặc điểm khí hậu của từng khu vực nghiên cứu;

- Bổ sung thêm những mô hình khác như RUSLE hay USLE-M, cho phép tăng sự đa dạng trong lựa chọn mô hình.

Bên cạnh đó, trong quá trình nghiên cứu và xây dựng ứng dụng, nhà phát triển cũng cần tìm hiểu các quy định và ban hành các quy định rõ ràng về việc sử dụng ứng dụng, quyền riêng tư về dữ liệu, cũng như việc phát triển và phân phối mã nguồn. Hiện tại, những tài liệu về các quy định này đối với ứng dụng vẫn còn hạn chế và cần được nghiên cứu bổ sung thêm.

Lời cảm ơn

Nghiên cứu được hoàn thành dưới sự tài trợ của Trường Đại học Mỏ - Địa chất thông qua đề tài nghiên cứu cấp cơ sở, mã số T24-02.

Đóng góp của các tác giả

Trần Thị Hòa - thực hiện phương pháp nghiên cứu, nội dung thực nghiệm, viết bài; Trần Thị Ngọc - nghiên cứu cơ sở lý thuyết, chỉnh sửa bài báo.

Tài liệu tham khảo

- Amani, M., Ghorbanian, A., Ahmadi, S. A., Kakooei, M., Moghimi, A., Mirmazloumi, S. M., Moghaddam, S. H. A., Mahdavi, S., Ghahremanloo, M., & Parsian, S. (2020). Google earth engine cloud computing platform for remote sensing big data applications: A comprehensive review. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 5326-5350.
- Angulo-Martínez, M., & Beguería, S. (2009). Estimating rainfall erosivity from daily precipitation records: A comparison among methods using data from the Ebro Basin (NE Spain). *Journal of Hydrology*, 379(1-2), 111-121.
- Ben Cheikha, L., Mabrouk El Asmi, A., Askri, B., Oueslati, M., Gharbi, F., Attia, R., & Aouedi, T. (2025). Soil Erosion Rates Via 210Pbex, 137Cs and USLE Model in El Rmel Watershed, NE Tunisia. *Land degradation & development*, 36(6), 2125-2143.

- Dang, A. T., Kumar, L., Reid, M., & Mutanga, O. (2021). Fire danger assessment using geospatial modelling in Mekong delta, Vietnam: Effects on wetland resources. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 21, 100456.
- Desmet, P. J., & Govers, G. (1996). A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of soil and water conservation*, 51(5), 427-433.
- Devine, W. D., & Harrington, C. A. (2007). Influence of harvest residues and vegetation on microsite soil and air temperatures in a young conifer plantation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 145(1-2), 125-138.
- Durigon, V., Carvalho, D., Antunes, M., Oliveira, P., & Fernandes, M. (2014). NDVI time series for monitoring RUSLE cover management factor in a tropical watershed. *International journal of remote sensing*, 35(2), 441-453.
- Đặng, X. T. (2022). Nghiên cứu ứng dụng công nghệ GIS, Viễn thám và mô hình USLE trong đánh giá nguy cơ xói mòn đất tại khu vực Tây Nguyên giai đoạn 2000-2020. *Luận văn thạc sĩ kỹ thuật*, Trường Đại học Mỏ-Địa Chất.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote sensing of Environment*, 202, 18-27.
- Hengl, T., Mendes de Jesus, J., Heuvelink, G. B., Ruiperez Gonzalez, M., Kilibarda, M., Blagotić, A., Shangquan, W., Wright, M. N., Geng, X., & Bauer-Marschallinger, B. (2017). SoilGrids250m: Global gridded soil information based on machine learning. *PLoS one*, 12(2), e0169748.
- Jain, S. K., Kumar, S., & Varghese, J. (2001). Estimation of soil erosion for a Himalayan watershed using GIS technique. *Water resources management*, 15, 41-54.
- Kinnell, P. (2025). Comparing WEPP with USLE based models: The role of bare fallow runoff and soil loss plots. *Soil and Tillage Research*, 248, 106413.
- Lal, R. (2001). Soil degradation by erosion. *Land degradation & development*, 12(6), 519-539.
- Liu, B., Nearing, M., Shi, P., & Jia, Z. (2000). Slope length effects on soil loss for steep slopes. *Soil science society of America journal*, 64(5), 1759-1763.
- McCool, D. K., Foster, G. R., Mutchler, C., & Meyer, L. (1989). Revised slope length factor for the Universal Soil Loss Equation. *Transactions of the ASAE*, 32(5), 1571-1576.
- Meusburger, K., Konz, N., Schaub, M., & Alewell, C. (2010). Soil erosion modelled with USLE and PESERA using QuickBird derived vegetation parameters in an alpine catchment. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12(3), 208-215.
- Mondal, A., Khare, D., & Kundu, S. (2018). A comparative study of soil erosion modelling by MMF, USLE and RUSLE. *Geocarto International*, 33(1), 89-103.
- Mutanga, O., & Kumar, L. (2019). Google earth engine applications. In (Vol. 11, pp. 591): MDPI.
- Nguyễn, T. H., Nguyễn, T. S., & Thái, P. (1996). Xác định các yếu tố gây xói mòn và khả năng dự báo xói mòn trên đất dốc. *Luận án tiến sĩ kỹ thuật trường Đại học Thủy Lợi, Hà Nội*.
- Nguyễn, T. H., Nguyễn, T. S., & Thái, P. (1998). Xác định các yếu tố gây xói mòn và khả năng dự báo xói mòn trên đất dốc. In *Canh tác nông nghiệp bền vững trên đất dốc ở Việt Nam* (pp. 149-165). Nhà xuất bản Nông nghiệp Hà Nội.
- Panagos, P. (2017). An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion.
- Panagos, P., Imeson, A., Meusburger, K., Borrelli, P., Poesen, J., & Alewell, C. (2016). Soil conservation in Europe: wish or reality? *Land degradation & development*, 27(6), 1547-1551.
- Pham Gia, T., Degener, J., & Kappas, M. (2017). Integrated universal soil loss equation (USLE) and geographical information system (GIS) for soil erosion measurement in basin of Asap River, Central Vietnam. EGU General Assembly Conference Abstracts,

- Pimentel, D., & Burgess, M. (2013). Soil erosion threatens food production. *Agriculture*, 3(3), 443-463.
- Renard, K. G. (1997). *Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service.
- Tamiminia, H., Salehi, B., Mahdianpari, M., Quackenbush, L., Adeli, S., & Brisco, B. (2020). Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 164, 152-170.
- Tung, P. G., Linh, N. H. K., & Chau, T. T. M. (2025). Ten-Year Changes in Soil Erosion in Nam Dong District, Central Vietnam Using USLE and GIS Techniques. *International Journal of Environmental Sciences*, 11(5s), 539-545.
- Trần, C. M. (2021). Nghiên cứu đề xuất áp dụng phương trình mất đất phổ dụng (USLE) trong dự báo xói mòn do hoạt động sản xuất nông nghiệp vùng núi phía Bắc Việt Nam.
- Van der Knijff, J., Jones, R., & Montanarella, L. (1999). *Soil erosion risk assessment in Italy*. Citeseer.
- Vũ, T. T., Nguyễn, T. V., & Pham, L.T. H. (2019). Ứng dụng phương trình USLE và GIS xây dựng bản đồ xói mòn đất khu vực Tây Nguyên. *Khoa học Kỹ Thuật Thủy Lợi và Môi Trường*, 66, 100-107.
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D (1965). Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: Guide for selection of practices for soil and water conservation. *Agricultural Research Service, US Department of Agriculture*.
- Wischmeier, W. H., & Mannering, J. (1969). Relation of soil properties to its erodibility. *Soil science society of America journal*, 33(1), 131-137.
- Wischmeier, W. H., & Smith, D. D. (1978). *Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning*. Department of Agriculture, Science and Education Administration.