



EVALUASI DAN PERBANDINGAN METODE PREDIKSI EROSI TANAH: USLE, RUSLE, MUSLE, KONSEP NILAI EROSI TOLERANSI, SERTA PENGUKURAN PADA TINGKAT PETAK DAN WATERSHED

EVALUATION AND COMPARISON OF SOIL EROSION PREDICTION METHODS: USLE, RUSLE, MUSLE, THE EROSION TOLERANCE VALUE CONCEPT, AND MEASUREMENTS AT THE PLOT AND WATERSHED LEVELS

Muhammad Dhany Rafly¹, Zulzain Ilahude², Nurmi³

¹Mahasiswa, Universitas Negeri Gorontalo

²Dosen Pengampuh Mata Kuliah, Universitas Negeri Gorontalo

³Dosen Pengampuh Mata Kuliah, Universitas Negeri Gorontalo

*E-mail Korespondensi: m.dhanyrafly@gmail.com

ABSTRACT

Soil erosion prediction is a key component of land conservation planning, with the Universal Soil Loss Equation (USLE) family of models being the most widely used globally. This systematic literature review evaluates and compares the performance of the three main variants—USLE, RUSLE, and MUSLE—and examines their integration with the concept of erosion tolerance (T) and the influence of the measurement scale (plot vs. watershed). Through a synthesis of 25 articles selected from reputable databases, it was found that RUSLE offers higher accuracy at the plot scale due to more detailed factors, while MUSLE performs better for event-based erosion predictions and at the watershed scale because it integrates surface runoff. The T value concept serves as a critical benchmark for assessing land sustainability, yet it is often exceeded on conventional agricultural lands. Significant differences between plot- and watershed-scale measurements underscore the role of sediment delivery ratios and scale-dependent geomorphological processes. These findings emphasize the need for hybrid approaches and multi-scale validation to enhance the reliability of future erosion predictions.

Keywords: USLE, RUSLE, MUSLE, erosion tolerance value, watershed scale.

PENDAHULUAN

Erosi tanah merupakan ancaman global terhadap produktivitas pertanian, kualitas air, dan stabilitas ekosistem (Borrelli et al., 2021; Montgomery, 2007). Diperkirakan lebih dari 75 miliar ton tanah hilang setiap tahun akibat erosi yang dipercepat oleh aktivitas manusia, dan sebagian besar terjadi di lahan pertanian (García-Ruiz et al., 2015). Oleh karena itu, prediksi laju erosi secara akurat menjadi landasan untuk merancang praktik konservasi yang efektif dan mengevaluasi keberlanjutan penggunaan lahan.

Sejak diperkenalkan oleh Wischmeier dan Smith pada 1965, USLE (Universal Soil Loss Equation) dan turunannya telah menjadi kerangka kerja dominan untuk memodelkan erosi lembar dan alur (sheet and rill erosion) di berbagai belahan dunia (Benavidez et al., 2018; Kinnell, 2010). USLE merupakan model empiris yang menghitung rata-rata tahunan kehilangan tanah (A) sebagai produk dari erosivitas hujan (R), erodibilitas tanah (K), faktor panjang dan kemiringan lereng (LS), penutupan dan pengelolaan tanaman (C), serta praktik konservasi (P). Model ini dirancang berdasarkan ribuan data petak erosi standar di Amerika Serikat dan mengasumsikan bahwa limpasan permukaan tidak membatasi secara terpisah.

Revisi menjadi RUSLE (Revised USLE) membawa penyempurnaan dalam algoritma setiap faktor, khususnya LS, C, dan P, serta memungkinkan integrasi dengan sistem informasi geografis (GIS) untuk analisis spasial (Alewell et al., 2019; Ganasri & Ramesh, 2016). Sementara itu, MUSLE (Modified USLE) yang dikembangkan oleh Williams (1975) menggantikan faktor R dengan faktor energi limpasan (volume dan debit puncak) sehingga dapat memprediksi kehilangan tanah per peristiwa hujan, lebih cocok untuk skala DAS kecil hingga menengah (Kinnell, 2010; Saputra & Abdurrosyid, 2022).

Meskipun variasi model ini telah diterapkan secara luas, evaluasi perbandingan ketiganya masih terfragmentasi. Beberapa studi lokal di Indonesia telah membandingkan USLE, RUSLE, dan MUSLE secara langsung (Nugraheni et al., 2013; Saputra & Abdurrosyid, 2022; Titing et al., 2025), namun belum ada sintesis yang menyeluruh tentang kondisi di mana suatu metode lebih unggul. Di sisi lain, interpretasi hasil prediksi seringkali tidak terintegrasi dengan konsep nilai erosi toleransi (T), yaitu batas maksimum kehilangan tanah tahunan yang dapat ditoleransi tanpa mengorbankan produktivitas jangka panjang (Li et al., 2009; Verheijen et al., 2009). Nilai T menjadi krusial untuk menentukan apakah lahan tergolong terdegradasi atau berkelanjutan, namun penerapannya sangat bervariasi antar wilayah.

Kompleksitas lain muncul dari perbedaan skala. Model-model dalam keluarga USLE dikembangkan dari data petak berskala plot (< 100 m²), tetapi sering diaplikasikan pada skala watershed (DAS) yang luasnya ribuan hektar. Skala mempengaruhi proses erosi secara fundamental: laju erosi bruto di lereng belum tentu sama dengan hasil sedimen di outlet DAS karena adanya pengendapan (deposition) dan sediment delivery ratio (Cammeraat, 2002; Cantón et al., 2011). Akibatnya, validasi model tanpa mempertimbangkan perbedaan skala dapat menghasilkan estimasi yang bias.

Berdasarkan latar belakang tersebut, kajian ini bertujuan untuk melakukan tinjauan literatur sistematis yang mengevaluasi dan membandingkan kinerja USLE, RUSLE, dan MUSLE, mengkaji peran konsep nilai erosi toleransi sebagai tolok ukur, serta menganalisis pengaruh skala pengukuran (petak vs. watershed) terhadap performa prediksi.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan studi literatur sistematis yang menghimpun dan menganalisis berbagai jurnal nasional serta internasional

terkait prediksi erosi tanah. Pencarian literatur dilakukan pada database Scopus, Web of Science, Google Scholar, SINTA, dan Garuda menggunakan kombinasi kata kunci: (“USLE” OR “RUSLE” OR “MUSLE”) AND (“validasi” OR “perbandingan” OR “accuracy”) AND (“erosi tanah” OR “soil erosion”) AND (“petak” OR “plot” OR “watershed” OR “DAS”). Untuk menangkap isu nilai toleransi, ditambahkan string (“soil loss tolerance” OR “T-value” OR “erosi toleransi”). Filter tahun publikasi adalah 2002–2025, bahasa Indonesia dan Inggris, dengan tipe dokumen artikel jurnal, prosiding, dan laporan teknis yang memiliki data empiris.

Kriteria inklusi meliputi: (1) studi yang membandingkan setidaknya dua dari tiga metode (USLE, RUSLE, MUSLE) atau memvalidasi satu metode dengan data erosi terukur; (2) studi yang membahas atau menerapkan nilai erosi toleransi (T); (3) studi yang melaporkan metrik akurasi kuantitatif atau perbandingan kualitatif berbasis data; (4) studi yang secara jelas menyebutkan skala (petak atau *watershed*). Kriteria eksklusi: artikel ulasan tanpa data primer/sekunder yang membandingkan metode, studi yang hanya membahas erosi parit atau longsor tanpa kaitan dengan USLE, serta publikasi yang tidak tersedia teks penuhnya. Berdasarkan kriteria tersebut, 25 artikel terpilih dianalisis secara kualitatif untuk menghasilkan sintesis yang komprehensif dan terstruktur mengenai topik prediksi erosi tanah.

HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Perbandingan Akurasi USLE, RUSLE, dan MUSLE

Studi yang membandingkan langsung ketiga metode secara simultan masih jarang. Titing et al., (2025) melakukan perbandingan di lahan pertanian Kalimantan Utara menggunakan platform SIG dan menemukan bahwa RUSLE menghasilkan estimasi erosi rata-rata terendah (22,1 ton/ha/tahun) dibanding USLE (37,8 ton/ha/tahun) dan MUSLE (31,5 ton/ha/tahun). Perbedaan utama disebabkan oleh faktor LS yang lebih rinci pada RUSLE, yang mampu

mengoreksi overestimasi pada lereng panjang, serta faktor P yang lebih spesifik. Nugraheni et al., (2013) di DAS Keduang, Jawa Tengah, melaporkan urutan berbeda: RUSLE memberikan erosi tertinggi (86,3 ton/ha/tahun), diikuti USLE (72,4 ton/ha/tahun) dan MUSLE (47,2 ton/ha/tahun). Penyebabnya adalah RUSLE di DAS Keduang menggunakan persamaan LS yang memperhitungkan bentuk lereng (cekung/cembung), yang pada topografi kompleks meningkatkan panjang lereng efektif.

Saputra & Abdurrosyid, (2022) hanya membandingkan USLE dan MUSLE di daerah tangkapan air Waduk Cengklik. MUSLE menghasilkan laju erosi sekitar 40% lebih rendah daripada USLE. Hal ini wajar karena MUSLE menggunakan limpasan aktual sebagai pengganti faktor R; pada DAS dengan banyak sawah dan kolam retensi, debit puncak teredam sehingga energi angkut sedimen lebih kecil. Temuan ini konsisten dengan Kinnell, (2010) yang menyatakan bahwa MUSLE lebih akurat untuk peristiwa individual dan DAS kecil yang didominasi limpasan permukaan terkonsentrasi, sedangkan USLE cenderung overestimasi jika diterapkan langsung pada DAS tanpa koreksi nisbah hantar sedimen (Sediment Delivery Ratio/SDR).

Secara umum, RUSLE dianggap lebih baik untuk estimasi spasial tahunan di lahan-lahan heterogen karena fleksibilitasnya dalam memperbarui faktor C dan P dari citra satelit (Ganasri & Ramesh, 2016; Koirala et al., 2019; Thapa, 2020). MUSLE unggul ketika data hidrologi (volume limpasan, debit puncak) tersedia dan tujuan prediksi adalah hasil sedimen per kejadian atau tahunan di outlet DAS, seperti pada DAS Lancang-Mekong (Chuenchum et al., 2019). USLE asli, meskipun sederhana, masih sering digunakan pada studi dengan keterbatasan data, misalnya di lokasi tambang (Lesmana et al., 2021) atau plot percobaan (Andriyani & Fadila, 2024), dengan catatan dilakukan kalibrasi lokal.

3.2 Integrasi dengan Konsep Nilai Erosi Toleransi (T)

Nilai erosi toleransi (T) merupakan batas laju kehilangan tanah tahunan yang dapat ditoleransi tanpa menyebabkan penurunan produktivitas jangka panjang. Montgomery, (2007) menunjukkan bahwa rata-rata laju pembentukan tanah hanya sekitar 0,1–1,0 ton/ha/tahun, jauh di bawah laju erosi di lahan pertanian konvensional yang seringkali di atas 10 ton/ha/tahun. Dengan demikian, penggunaan T sebagai tolok ukur keberlanjutan sangat kritis.

Di Eropa, (Verheijen et al., (2009) mengungkapkan bahwa sebagian besar negara belum menetapkan T-value legal, dan di wilayah yang sudah ada (misalnya Inggris, 1–2 ton/ha/tahun), erosi aktual di lahan tanam sering melebihi ambang tersebut dua hingga sepuluh kali lipat. Di India, Bhattacharyya et al., (2015) menekankan perlunya pengembangan T-value berbasis zona agroekologi karena tanah tropis memiliki laju pelapukan yang berbeda. Li et al., (2009) mengusulkan agar T tidak hanya mempertimbangkan ketebalan solum, tetapi juga fungsi tanah lainnya seperti penyimpanan karbon, kapasitas menahan air, dan habitat biota.

Beberapa studi dalam review ini telah mengintegrasikan T secara langsung dalam evaluasi model. Titing et al., (2025) membandingkan hasil USLE, RUSLE, dan MUSLE dengan T-value yang ditetapkan oleh pemerintah Indonesia (berkisar 10–25 ton/ha/tahun tergantung kedalaman tanah). Hasilnya, hanya RUSLE yang menunjukkan bahwa sebagian besar area (62%) masih berada di bawah T, sedangkan USLE dan MUSLE mengindikasikan >50% area melebihi T. Paroissien et al., (2015) menggunakan skenario perubahan iklim dan menunjukkan bahwa tanpa konservasi, erosi akan melampaui T di 35% sub-DAS. Gelagay & Minale, (2016) di DAS Koga, Ethiopia, menggunakan T lokal 10 ton/ha/tahun dan menemukan 47% area DAS berada dalam status bahaya tinggi, sehingga diperlukan intervensi konservasi.

Integrasi T dalam kerangka USLE/RUSLE/MUSLE terbukti membantu mengubah angka erosi menjadi informasi kebijakan yang lebih mudah dipahami. Namun, tantangannya adalah belum adanya standar perhitungan T yang seragam, terutama untuk tanah tropis seperti di Indonesia (Cantik et al., 2023).

3.3 Pengaruh Skala: Petak vs. Watershed

Semua model dalam keluarga USLE pada dasarnya dikembangkan dari data petak erosi standar (panjang 22,1 m, lebar 1,8 m, kemiringan 9%). Ketika diterapkan pada watershed luas, muncul permasalahan representasi proses yang bekerja pada skala berbeda. García-Ruiz et al., (2015) melalui meta-analisis global menemukan bahwa laju erosi rata-rata yang diukur dari petak adalah 10–100 kali lebih besar dibandingkan dengan hasil sedimen di outlet DAS untuk luas yang sama. Perbedaan ini dijelaskan oleh sediment delivery ratio (SDR), yaitu proporsi tanah tererosi yang benar-benar mencapai saluran air. SDR menurun secara eksponensial dengan bertambahnya luas DAS karena adanya pengendapan di cekungan, kaki lereng, dan dataran banjir.

Cammeraat, (2002) menekankan bahwa proses geomorfologi sangat tergantung skala: erosi lembar dan alur mendominasi di petak, sedangkan di DAS terjadi interaksi antara erosi tebing sungai, pengendapan, dan transportasi sedimen. Cantón et al., (2011) membuktikan secara eksperimental di Spanyol tenggara bahwa koefisien limpasan dan konsentrasi sedimen menurun tajam dari plot (skala m²) ke sub-DAS (skala km²), terutama karena infiltrasi di saluran ephemeral dan retensi oleh vegetasi riparian.

Dalam konteks pemodelan, USLE yang diaplikasikan langsung di DAS tanpa koreksi SDR akan menghasilkan overestimasi erosi bruto. Oleh karena itu, banyak peneliti mengalihkan hasil USLE/RUSLE dengan SDR untuk memperkirakan hasil sedimen. (Cantik et

al., 2023) di DAS Mrica menggunakan RUSLE dan mengoreksi hasilnya dengan SDR yang dihitung dari data sedimentasi waduk, menghasilkan estimasi yang sesuai dengan pengukuran aktual ($R^2 = 0,81$). Sebaliknya, MUSLE secara inheren sudah memperhitungkan transportasi sedimen melalui faktor limpasan, sehingga seringkali tidak memerlukan SDR terpisah (Chuenchum et al., 2019; Kinnell, 2010).

Perbedaan skala juga menuntut resolusi data yang berbeda. RUSLE membutuhkan DEM resolusi tinggi (misalnya 10–30 m) untuk menangkap variasi LS di lereng, sementara untuk MUSLE diperlukan data debit dari stasiun hidrometri yang biasanya hanya tersedia di outlet DAS besar. Thapa, (2020) menunjukkan bahwa penggunaan DEM 30 m menghasilkan estimasi LS yang lebih realistis untuk DAS pegunungan di Nepal, sedangkan DEM 90 m cenderung meratakan variasi lereng dan menghasilkan erosi yang underestimate. Stewart et al., (2015) menekankan pentingnya pengukuran limpasan dan erosi di petak dengan instrumen akurat sebagai dasar validasi, karena kesalahan kecil di skala plot dapat membesar di skala DAS.

3.4 Faktor-Faktor Lingkungan dan Metodologis yang Memengaruhi Keunggulan Metode

Beberapa faktor utama yang menentukan performa relatif suatu metode antara lain:

1. Ketersediaan dan resolusi data hujan. USLE dan RUSLE menggunakan faktor R berbasis data hujan jangka panjang. Di wilayah tropis dengan kerapatan stasiun rendah, estimasi R seringkali tidak akurat, sehingga hasil model menjadi bias (Alewell et al., 2019). MUSLE bergantung pada data debit, yang jika tidak tersedia, harus dibangkitkan dari model hidrologi, menambah ketidakpastian.
2. Kemiringan dan kompleksitas lereng. RUSLE memiliki algoritma LS yang

lebih sensitif terhadap bentuk lereng dan konsentrasi aliran (Benavidez et al., 2018), sehingga lebih unggul pada topografi kompleks. USLE dengan LS tunggal cenderung overestimasi pada lereng panjang seragam. Wahyuni (2013) mendemonstrasikan hal ini di DAS Keduang.

3. Tutupan lahan dan praktik konservasi. Faktor C dan P sangat dinamis. RUSLE memungkinkan pembaruan faktor C dari NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) citra satelit secara temporal (Ganasri & Ramesh, 2016), sementara USLE menggunakan tabel statis. MUSLE biasanya mengasumsikan faktor C konstan untuk setiap peristiwa, kecuali jika dilakukan perhitungan terpisah.
4. Skala waktu. USLE dan RUSLE dirancang untuk rata-rata tahunan, sedangkan MUSLE dapat digunakan untuk peristiwa tunggal. Di daerah dengan hujan sangat intens dan terkonsentrasi pada beberapa kejadian, MUSLE lebih mampu menangkap variabilitas tersebut (Kinnell, 2010).
5. Karakteristik tanah. Andriyani & Fadila, (2024) menunjukkan bahwa perubahan karakteristik tanah akibat pengolahan (peningkatan bulk density, penurunan bahan organik) secara signifikan meningkatkan faktor K dan estimasi erosi USLE. Oleh karena itu, validitas model bergantung pada seberapa mutakhir data tanah yang digunakan.

3.5 Tren Penelitian Terbaru dan Hibridisasi Metode

Tinjauan ini mengidentifikasi beberapa tren terkini. Pertama, integrasi model

USLE/RUSLE/MUSLE dengan GIS dan penginderaan jauh telah menjadi standar de facto, memungkinkan analisis spasial multi-temporal dan skala luas (Borrelli et al., 2021; Koirala et al., 2019; Thapa, 2020) Kedua, pendekatan hibrida mulai dikembangkan, misalnya menggabungkan keunggulan RUSLE dalam estimasi faktor-faktor biofisik dengan kemampuan MUSLE dalam merespons limpasan per peristiwa. Meskipun belum banyak dipublikasikan, Kinnell, (2010) mengindikasikan bahwa memodifikasi USLE/RUSLE dengan faktor limpasan merupakan jalan tengah yang menjanjikan, khususnya untuk DAS kecil. Ketiga, penggunaan data real-time dari sensor dan radar cuaca mulai diuji untuk estimasi faktor R dan volume limpasan secara lebih presisi. Keempat, pemodelan skenario perubahan iklim dengan USLE/RUSLE semakin marak (Parioisien et al., 2015) seiring kebutuhan perencanaan adaptasi jangka panjang. Terakhir, pendekatan big data dan machine learning mulai digunakan untuk mengestimasi faktor K, LS, dan C dari data crowdsourced atau global products, meskipun masih memerlukan validasi lapangan yang ketat (Alewell et al., 2019).

PEMABAHASAN

Hasil sintesis ini menegaskan bahwa tidak ada satu metode pun yang secara universal terbaik; keunggulan masing-masing sangat kontekstual. RUSLE merupakan pilihan tepat ketika data spasial rinci tersedia dan tujuannya adalah pemetaan bahaya erosi tahunan pada bentang lahan heterogen. Kelebihannya dalam mengakomodasi variasi C dan P membuatnya cocok untuk perencanaan konservasi berbasis lahan. MUSLE lebih direkomendasikan ketika fokusnya adalah peristiwa erosi ekstrem atau prediksi hasil sedimen di watershed yang memiliki data hidrologi terukur. USLE, sebagai model paling sederhana, masih relevan untuk skala kecil atau studi pendahuluan asal dilakukan kalibrasi lokal.

Integrasi dengan nilai erosi toleransi (T) memberikan makna kebijakan yang kuat. Tanpa

T, angka kehilangan tanah hanya menjadi statistik tanpa tolok ukur keberlanjutan. Temuan bahwa banyak lahan pertanian, termasuk di Indonesia (Titing et al., 2025), melampaui T-value menandakan perlunya perubahan praktik budidaya secara mendesak. Pemerintah perlu menetapkan T-value berbasis ilmiah yang disesuaikan dengan karakteristik tanah dan iklim setempat, bukan sekadar mengadopsi nilai dari literatur internasional. Hal ini telah ditekankan oleh Li et al., (2009; Verheijen et al., (2009) dalam konteks global.

Isu skala tetap menjadi tantangan utama. Menggunakan model yang dikembangkan dari data petak untuk DAS tanpa koreksi SDR akan menghasilkan kesalahan prediksi yang substansial. Para peneliti harus secara eksplisit menyertakan SDR atau menggunakan MUSLE jika memungkinkan. Validasi model sebaiknya dilakukan pada skala yang sama dengan penerapannya. Pengukuran erosi di petak standar seperti yang dilakukan oleh Stewart et al. (2015) tetap penting sebagai baseline, namun harus dikombinasikan dengan monitoring sedimen di sungai untuk memahami konektivitas aliran dan pengendapan.

Keterbatasan SLR ini terletak pada jumlah studi yang relatif kecil dan dominasi studi dari wilayah tertentu. Banyak studi validasi hanya mengandalkan data sekunder tanpa verifikasi lapangan langsung. Selain itu, sebagian besar artikel tidak melaporkan metrik akurasi yang seragam (RMSE, NSE, R^2) sehingga meta-analisis kuantitatif sulit dilakukan. Riset selanjutnya disarankan untuk melakukan validasi komparatif multi-skala yang terpadu: membangun petak erosi, mengukur limpasan dan sedimen di beberapa titik DAS, dan menjalankan USLE, RUSLE, MUSLE secara paralel. Pengembangan model hibrida yang secara eksplisit menangani perubahan skala juga menjadi kebutuhan mendesak, terutama di wilayah tropis dengan curah hujan tinggi dan lahan kritis.

KESIMPULAN

USLE, RUSLE, dan MUSLE adalah alat prediksi erosi yang saling melengkapi. RUSLE memberikan estimasi tahunan yang lebih akurat di lahan kompleks dengan dukungan data spasial; MUSLE unggul untuk prediksi peristiwa dan skala DAS berkat faktor limpasan; USLE tetap bermanfaat sebagai pendekatan sederhana dengan syarat kalibrasi lokal. Konsep nilai erosi toleransi (T) menjadi komponen esensial untuk mengevaluasi keberlanjutan lahan, tetapi implementasinya perlu disesuaikan dengan kondisi lokal. Perbedaan mendasar antara erosi yang diukur pada petak dan hasil sedimen di watershed mengharuskan penggunaan Sediment Delivery Ratio atau model berbasis limpasan untuk menghindari bias. Rekomendasi ke depan mencakup pengembangan model hibrida USLE/RUSLE-MUSLE, standarisasi validasi multi-skala, dan penetapan T-value nasional berbasis agroekologi. Hanya dengan pendekatan yang terintegrasi, prediksi erosi tanah dapat memberikan kontribusi nyata terhadap konservasi lahan dan ketahanan pangan.

DAFTARPUSTAKA

- Alewell, C., Borrelli, P., Meusburger, K., & Panagos, P. (2019). Using the USLE: Chances, challenges and limitations of soil erosion modelling. *International Soil and Water Conservation Research*, 7(3), 203–225.
<https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.05.004>
- Andriyani, I., & Fadila, Y. Z. (2024). The Influence of Soil Characteristic Changes on Erosion Rates Based on the Universal Soil Loss Equation (USLE) Method. *Jurnal Teknik Pertanian Lampung (Journal of Agricultural Engineering)*, 13(1), 278.
<https://doi.org/10.23960/jtep-l.v13i1.278-287>
- Benavidez, R., Jackson, B., Maxwell, D., & Norton, K. (2018). A review of the (Revised) Universal Soil Loss Equation ((R)USLE): with a view to increasing its global applicability and improving soil loss estimates. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(11), 6059–6086.
<https://doi.org/10.5194/hess-22-6059-2018>
- Bhattacharyya, R., Ghosh, B., Mishra, P., Mandal, B., Rao, C., Sarkar, D., Das, K., Anil, K., Lalitha, M., Hati, K., & Franzluebbers, A. (2015). Soil Degradation in India: Challenges and Potential Solutions. *Sustainability*, 7(4), 3528–3570.
<https://doi.org/10.3390/su7043528>
- Borrelli, P., Alewell, C., Alvarez, P., Anache, J. A. A., Baartman, J., Ballabio, C., Bezak, N., Biddoccu, M., Cerdà, A., Chalise, D., Chen, S., Chen, W., De Girolamo, A. M., Gessesse, G. D., Deumlich, D., Diodato, N., Efthimiou, N., Erpul, G., Fiener, P., ... Panagos, P. (2021). Soil erosion modelling: A global review and statistical analysis. *Science of The Total Environment*, 780, 146494.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146494>
- Cammeraat, L. H. (2002). A review of two strongly contrasting geomorphological systems within the context of scale. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27(11), 1201–1222.
<https://doi.org/10.1002/esp.421>
- Cantik, B. K. P., Ramon Putra, Elenora Gita Alamanda Sapan, Djoko Legono, & Kisindi Nur Afifah. (2023). Assessment of Soil Loss Using RUSLE Method in Mrica Reservoir Catchment, Central Java, Indonesia. *LIMNOTEK Perairan Darat Tropis Di Indonesia*, 32.
<https://doi.org/10.55981/limnotek.2023.2210>
- Cantón, Y., Solé-Benet, A., de Vente, J., Boix-Fayos, C., Calvo-Cases, A., Asensio, C., & Puigdefábregas, J. (2011). A review of runoff generation and soil erosion across scales in semiarid south-eastern Spain. *Journal of Arid Environments*, 75(12),

- 1254–1261.
<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2011.03.004>
- Cerdan, O., Govers, G., Le Bissonnais, Y., Van Oost, K., Poesen, J., Saby, N., Gobin, A., Vacca, A., Quinton, J., Auerswald, K., Klik, A., Kwaad, F. J. P. M., Raclot, D., Ionita, I., Rejman, J., Rousseva, S., Muxart, T., Roxo, M. J., & Dostal, T. (2010). Rates and spatial variations of soil erosion in Europe: A study based on erosion plot data. *Geomorphology*, *122*(1–2), 167–177.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.06.011>
- Chuenchum, P., Xu, M., & Tang, W. (2019). Estimation of Soil Erosion and Sediment Yield in the Lancang–Mekong River Using the Modified Revised Universal Soil Loss Equation and GIS Techniques. *Water*, *12*(1), 135. <https://doi.org/10.3390/w12010135>
- Ganasri, B. P., & Ramesh, H. (2016). Assessment of soil erosion by RUSLE model using remote sensing and GIS-A case study of Nethravathi Basin. *Geoscience Frontiers*, *7*(6), 953–961.
<https://doi.org/10.1016/j.gsf.2015.10.007>
- García-Ruiz, J. M., Beguería, S., Nadal-Romero, E., González-Hidalgo, J. C., Lana-Renault, N., & Sanjuán, Y. (2015). A meta-analysis of soil erosion rates across the world. *Geomorphology*, *239*, 160–173.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.008>
- Gelagay, H. S., & Minale, A. S. (2016). Soil loss estimation using GIS and Remote sensing techniques: A case of Koga watershed, Northwestern Ethiopia. *International Soil and Water Conservation Research*, *4*(2), 126–136.
<https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2016.01.002>
- Kinnell, P. I. A. (2010). Event soil loss, runoff and the Universal Soil Loss Equation family of models: A review. *Journal of Hydrology*, *385*(1–4), 384–397.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.01.024>
- Koirala, P., Thakuri, S., Joshi, S., & Chauhan, R. (2019). Estimation of Soil Erosion in Nepal Using a RUSLE Modeling and Geospatial Tool. *Geosciences*, *9*(4), 147.
<https://doi.org/10.3390/geosciences9040147>
- Lesmana, D. M. M., Cahyadi, T. A., & Sulistyana, W. (2021). Analisis Laju Erosi Menggunakan Metode USLE pada Studi Kasus Penambangan Sirtu, Selo, Boyolali. *Jurnal Sostech*, *1*(3), 200–208.
<https://sostech.greenvest.co.id/index.php/sostech/article/view/35>
- Li, L., Du, S., Wu, L., & Liu, G. (2009). An overview of soil loss tolerance. *CATENA*, *78*(2), 93–99.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2009.03.007>
- Montgomery, D. R. (2007). Soil erosion and agricultural sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *104*(33), 13268–13272.
<https://doi.org/10.1073/pnas.0611508104>
- Nugraheni, A., Sobriyah, S., & Susilowati, S. (2013). Perbandingan Hasil Prediksi Laju Erosi dengan Metode USLE, MUSLE, RUSLE di DAS Keduang. *E-Jurnal Matriks Teknik Sipil*, *1*(3), 318–325.
<https://doi.org/https://doi.org/10.20961/ma.teksi.v1i3.37537>
- Paroissien, J.-B., Darboux, F., Couturier, A., Devillers, B., Mouillot, F., Raclot, D., & Le Bissonnais, Y. (2015). A method for modeling the effects of climate and land use changes on erosion and sustainability of soil in a Mediterranean watershed (Languedoc, France). *Journal of Environmental Management*, *150*, 57–68.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.10.034>

- Saputra, K. D. A., & Abdurrosyid, J. (2022). Perbandingan Antara Metode USLE dan MUSLE dalam Analisis Erosi Lahan pada Daerah Tangkapan Air Waduk Cengklik. *Dinamika Teknik Sipil*, 15(1), 54–61. <https://journals.ums.ac.id/index.php/DTS/article/view/18531>
- Stewart, R. D., Liu, Z., Rupp, D. E., Higgins, C. W., & Selker, J. S. (2015). A new instrument to measure plot-scale runoff. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 4(1), 57–64. <https://doi.org/10.5194/gi-4-57-2015>
- Thapa, P. (2020). Spatial estimation of soil erosion using RUSLE modeling: a case study of Dolakha district, Nepal. *Environmental Systems Research*, 9(1), 15. <https://doi.org/10.1186/s40068-020-00177-2>
- Titing, D., Pudjiwati, E. H., & Mansyur, N. I. (2025). Tingkat Bahaya Erosi Berbasis USLE, MUSLE, dan RUSLE dengan Penerapan SIG pada Lahan Pertanian di Provinsi Kalimantan Utara. *Perbal: Jurnal Pertanian Berkelanjutan*, 13(2), 142–155. <https://e-journal.my.id/perbal/article/view/6370>
- Verheijen, F. G. A., Jones, R. J. A., Rickson, R. J., & Smith, C. J. (2009). Tolerable versus actual soil erosion rates in Europe. *Earth-Science Reviews*, 94(1–4), 23–38. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2009.02.003>