

Analisis Estimasi Sumberdaya Tanah Urug di Kecamatan Singosari, Kabupaten Malang, Indonesia

Muhammad Tri Aditya¹, Helik Susilo², Gregorius Aryoko Gautama³, Raja Haibah Shidqu⁴

¹⁻⁴ Politeknik Negeri Malang

Article Info

Article history:

Received Jun, 2026

Revised Jun, 2026

Accepted Jun, 2026

Kata Kunci:

Estimasi Sumberdaya, Tanah Urug, IDW, MAPE, Eksplorasi Tambang

Keywords:

Resource Estimation, Fill Material, IDW, MAPE, Mining Exploration

ABSTRAK

Indonesia adalah negara dengan potensi sumberdaya mineral yang melimpah, menjadikan sektor pertambangan sebagai salah satu pilar utama perekonomian nasional. Akan tetapi, beberapa kegiatan pertambangan masih memiliki nilai ekonomi rendah karena gagal memenuhi standar teknis dan kriteria kelayakan pertambangan. Oleh karena itu, kegiatan eksplorasi diperlukan untuk menentukan potensi sumberdaya secara lebih akurat. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis distribusi dan mengestimasi sumberdaya tanah urug di Desa Toyomarto, Kecamatan Singosari, Kabupaten Malang, Provinsi Jawa Timur, dengan luas area penelitian 2,7 hektar. Metode penelitian yang digunakan meliputi pengumpulan data melalui observasi lapangan dan studi literatur, analisis data spasial, pembuatan peta topografi, dan perhitungan volume tanah urug menggunakan perangkat lunak pertambangan. Proses estimasi sumberdaya dilakukan menggunakan metode *Inverse Distance Weighting* (IDW) dengan beberapa variasi parameter pangkat untuk mendapatkan hasil interpolasi yang paling akurat. Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) terkecil diperoleh pada parameter power 3, dengan nilai prediksi 47,32 dan tingkat kesalahan minimum 1,06%. Berdasarkan perhitungan ini, estimasi volume sumberdaya tanah urug di lokasi penelitian diperkirakan mencapai 258.912 m³. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan dasar untuk perencanaan kegiatan penambangan tanah urug yang lebih optimal dan mendukung pengelolaan sumberdaya mineral yang efisien dan berkelanjutan.

ABSTRACT

Indonesia is a country with abundant mineral resource potential, making the mining sector one of the main pillars of the national economy. However, some mining activities still have low economic value because they fail to meet technical standards and mining feasibility criteria. Therefore, exploration activities are needed to determine resource potential more accurately. This study aims to analyze the distribution and estimate fill material resources in Toyomarto Village, Singosari District, Malang Regency, East Java Province, with a research area of 2.7 hectares. The research methods used include data collection through field observations and literature studies, spatial data analysis, topographic map creation, and landfill volume calculation using mining software. The resource estimation process was carried out using the *Inverse Distance Weighting* (IDW) method with several variations of rank parameters to obtain the most accurate interpolation results. The analysis results show that the smallest *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE) value was obtained at rank 3 parameters, with a predicted value of 47.32 and a minimum

error rate of 1.06%. Based on these calculations, the estimated volume of fill material resources at the research site is estimated to reach 258,912 m³. The results of this study are expected to provide a basis for more optimal fill mining planning and support efficient and sustainable mineral resource management.

This is an open access article under the [CC BY-SA](#) license.



Corresponding Author:

Name: Muhammad Tri Aditya, S.T., M.T

Institution: Program Studi D-III Teknologi Pertambangan, Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Malang

Email: muhammadtri@polinema.ac.id

1. PENDAHULUAN

Sumberdaya alam di Indonesia memainkan peran strategis dalam pembangunan ekonomi negara. Selain memberikan kontribusi finansial kepada negara, sektor pertambangan juga mendorong pembangunan daerah dengan menyediakan bahan baku industri dan pengembangan infrastruktur (Jowitt & McNulty, 2025; Sonderegger et al., 2020). Namun, pengelolaan sumberdaya mineral, khususnya manajemen sumberdaya mineral, masih menghadapi banyak tantangan dalam mengelola sumberdaya yang ada secara optimal. Banyak kegiatan pertambangan mungkin masih memiliki nilai tambah nol. Hal ini seringkali disebabkan oleh kurangnya data eksplorasi, perkiraan sumberdaya yang tidak akurat, dan analisis geospasial yang tidak memadai (Lindi et al., 2024; Umam et al., 2020).

Selain mineral logam, bahan galian industri dan batuan seperti pasir batu, kerikil, andesit, serta tanah urug (fill material) memiliki peran yang sangat penting dalam mendukung pembangunan infrastruktur. Dalam pengembangan transportasi, perumahan, dan kawasan industri, material yang digunakan sebagai urugan juga memainkan peran penting. Oleh karena itu, sangat penting untuk secara akurat menentukan keberadaan dan kuantitas material ini melalui metode ilmiah yang terukur.

Estimasi sumberdaya sangat penting untuk perencanaan pertambangan, karena estimasi yang akurat memberikan informasi komprehensif tentang volume dan distribusi, yang kemudian dapat menjadi dasar untuk evaluasi ekonomi dan keputusan investasi (Dumakor-Dupey & Arya, 2021; Savolainen et al., 2022). Dalam praktiknya, berbagai metode telah dikembangkan untuk meningkatkan ketepatan estimasi, mulai dari metode konvensional hingga pendekatan dengan geostatistik dan berbasis kecerdasan buatan (Soulaïmani et al., 2024)(Abuntori et al., 2021).

Metode yang paling populer untuk estimasi spasial adalah Inverse Distance Weighting (IDW). Ini adalah metode interpolasi deterministik berbasis jarak. IDW menyimpulkan bahwa nilai pada suatu titik dipengaruhi oleh nilai titik-titik di sekitarnya dengan bobot yang berbanding terbalik dengan jarak (Chen et al., 2015; Qiao et al., 2019). Di sektor sumberdaya mineral, IDW sering digunakan untuk memodelkan distribusi sumberdaya karena dapat memberikan distribusi sumberdaya yang sederhana namun representatif dan baik untuk data minimal (Cotrina-teatino et al., 2025). Namun, metode ini sangat bergantung pada parameter yang tepat untuk memberikan estimasi yang akurat, khususnya nilai daya, yang mengukur pengaruh jarak pada nilai interpolasi (Masoudi, 2021; Qiao et al., 2021).

Beberapa penelitian terbaru menunjukkan bahwa pemilihan parameter yang tepat dalam metode IDW dapat secara signifikan meningkatkan akurasi estimasi sumberdaya dan mengurangi kesalahan prediksi (Matos et al., 2024). Di sisi lain, meskipun metode geostatistik seperti kriging dianggap lebih kompleks dan akurat, metode IDW tetap menjadi alternatif yang efisien dan praktis pada tahap eksplorasi awal karena implementasinya yang lebih mudah dan persyaratan data yang relatif lebih sederhana (Rafi et al., 2023). Oleh karena itu, evaluasi parameter dalam metode IDW merupakan aspek penting dalam menghasilkan estimasi optimal.

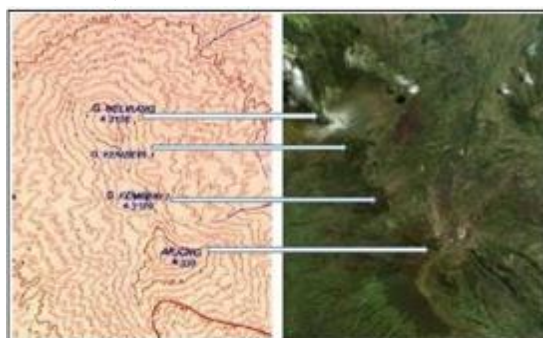
Penelitian ini dilakukan di Desa Toyomarto, Kecamatan Singosari, Kabupaten Malang, Provinsi Jawa Timur, yang memiliki potensi eksploitasi sumberdaya material tanah, meliputi area seluas kurang lebih 2,7 hektar. Meskipun memiliki potensi yang signifikan, studi tentang estimasi sumberdaya material ini masih terbatas, khususnya yang mengintegrasikan pendekatan geospasial dan analisis kesalahan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis distribusi spasial material tanah urug, memperkirakan volume sumberdaya material tanah urug menggunakan metode IDW, dan mengevaluasi akurasi model berdasarkan parameter daya menggunakan indikator Mean Absolute Percentage Error (MAPE).

Diharapkan hasil penelitian ini dapat berkontribusi pada pengembangan metode estimasi sumberdaya spasial dan memberikan dasar untuk perencanaan operasi penambangan material tanah yang lebih efisien, ekonomis, dan berkelanjutan..

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Fisiografi Gunung Berapi Kelud, Arjuno, dan Kawi

Kompleks Gunung Berapi Kelud, Arjuno, dan Kawi secara administratif terletak di Kabupaten Malang, Kota Malang, Kota Batu, Kabupaten Mojokerto, Kabupaten Kediri, dan Kabupaten Blitar. Kondisi morfologi umum yang ditemukan di kompleks gunung berapi ini dikendalikan oleh keberadaan bentuk lahan asal vulkanik, fluvial, denudasi, dan struktural. Salah satu gunung berapi di Kompleks Gunung Berapi Kelud adalah Gunung Arjuno. Secara administratif gunung ini terletak di perbatasan Kota Batu, Kabupaten Mojokerto, dan Kabupaten Pasuruan. Gunung Arjuno-Welirang memiliki ketinggian puncak 3.339 meter di atas permukaan laut dengan karakteristik gunung berapi tipe A. Kompleks Gunung Berapi Arjuno-Welirang memiliki beberapa kerucut termasuk Kerucut Gunung Arjuno (3339 m), Gunung Bakal (2960 m), Gunung Kembar II (3126 m), Gunung Bakal (2960 m), Gunung Kembar I (3030 m), dan Gunung Welirang (3126 m) (Suharno et al., 2013).



Gambar 1. Kenampakan Morfologi dan Geologi Gunungapi Arjuno-Welirang

Jumlah kerucut vulkanik di Kawasan Pegunungan Arjuno-Welirang disebabkan oleh pergeseran erupsi yang dikendalikan oleh sesar normal. Formasi geologi Gunung Arjuno-Welirang termasuk dalam Formasi Qvaw (Kuarter Vulkanik Arjuno-Welirang) yang terdiri dari breksi vulkanik, lava, breksi tuf, dan tuf. Pembentukan Gunung Arjuno-Welirang lebih tua daripada Gunung Kelud, hal ini dapat diidentifikasi melalui Peta Geologi Malang Lembar (1608-1), yang terbentuk pada periode Kuarter, yaitu pada masa Pleistosen Awal.

2.2 *Studi Geologi Regional*

Daerah penelitian di Desa Toyomarto, Kecamatan Singosari, Kabupaten Malang, secara regional termasuk dalam Kompleks Gunungapi Arjuno–Welirang yang merupakan bagian dari jalur vulkanik Kuarter Jawa Timur. Litologi penyusun wilayah ini didominasi oleh breksi vulkanik, tuf, lava andesit, dan material piroklastik hasil aktivitas vulkanisme yang telah mengalami pelapukan intensif sehingga membentuk endapan tanah penutup dan material lepas yang berpotensi sebagai sumberdaya tanah urug (Harijoko et al., 2017) (Daud et al., 2019). Kondisi geomorfologi wilayah berupa lereng vulkanik landai hingga bergelombang turut mendukung akumulasi material pelapukan vulkanik pada area penelitian.

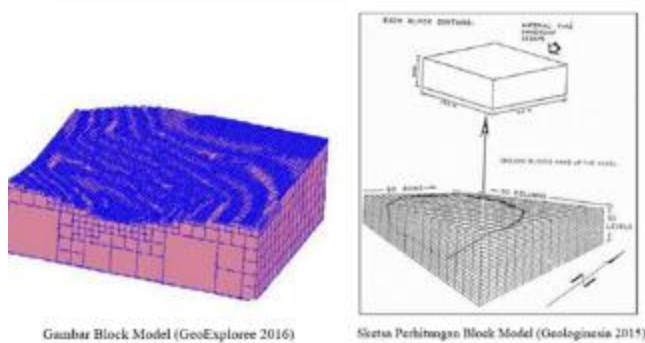
2.3 *Genesa Tanah Urug*

Proses pembentukan tanah urug pada daerah penelitian berkaitan erat dengan aktivitas vulkanisme Kompleks Gunungapi Arjuno–Welirang. Satuan batuan vulkanik Arjuno–Welirang tersusun oleh material hasil erupsi berupa breksi vulkanik, lava, breksi tuf, dan tuf yang termasuk dalam satuan batuan gunungapi Kuarter. Material tuf yang berasal dari endapan abu vulkanik kemudian mengalami proses pelapukan fisik dan kimia secara intensif sehingga berubah menjadi tanah residual bertekstur padat yang umum dimanfaatkan sebagai material tanah urug (Indrawan et al., 2024).

Tanah hasil pelapukan tuf vulkanik umumnya memiliki tekstur yang relatif padat, kandungan bahan organik rendah, permeabilitas rendah, serta kemampuan menyerap air yang terbatas akibat dominasi material lempungan dan hasil alterasi mineral vulkanik (Purwanto et al., 2021). Selain itu, material ini umumnya ditemukan pada lapisan tanah bagian bawah yang terbentuk melalui proses pelapukan lanjutan dan sedimentasi material vulkanik.

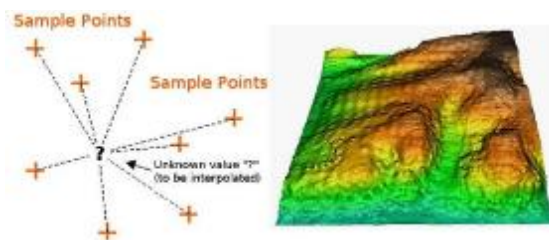
2.4 *Metode Estimasi Sumberdaya*

Estimasi sumberdaya merupakan proses perhitungan volume dan distribusi material berdasarkan data eksplorasi yang tersedia. Pada endapan batuan, perhitungan sumberdaya umumnya lebih sederhana dibandingkan endapan mineral logam karena geometri endapannya relatif homogen dan sederhana. Oleh karena itu, estimasi dapat dilakukan menggunakan berbagai metode, seperti metode poligon, penampang melintang (*cross section*), model blok (*block model*), *isoline* (kontur), maupun metode geometri lainnya sesuai karakteristik data dan endapan (Bazania & Boisvert, 2025)(Jowitt & McNulty, 2025).



Gambar 2. Model blok tiga dimensi (block model)

Seiring perkembangan teknologi, metode estimasi sumberdaya tidak hanya menggunakan pendekatan geometrik konvensional, tetapi juga metode interpolasi spasial, geostatistik, dan kecerdasan buatan untuk meningkatkan akurasi model sumberdaya (Dumakor-Dupey & Arya, 2021). Pada penelitian ini, estimasi sumberdaya dilakukan menggunakan metode *Inverse Distance Weighting* (IDW), yaitu metode interpolasi deterministik yang mengasumsikan bahwa nilai pada suatu lokasi dipengaruhi oleh titik pengamatan di sekitarnya dengan bobot yang berbanding terbalik terhadap jarak. Metode ini digunakan untuk memodelkan distribusi spasial ketebalan lapisan hasil interpretasi geolistrik sehingga dapat digunakan dalam perhitungan volume sumberdaya tanah urug (Lawal et al., 2021).



Gambar 3. Ilustrasi Perhitungan IDW

Estimasi sumberdaya yang baik harus mampu merepresentasikan kondisi geologi sebenarnya, menggunakan data yang memadai dan berkualitas, serta dilakukan secara objektif dan terdokumentasi. Selain itu, metode yang digunakan harus dapat diverifikasi sehingga hasil estimasi dapat diuji ulang dan dipertanggungjawabkan secara ilmiah maupun teknis (CRIRSCO, 2019; Stephenson, 2001). Estimasi juga harus disesuaikan dengan tujuan evaluasi, baik untuk eksplorasi, perencanaan penambangan, maupun kajian ekonomi sumberdaya (Savolainen et al., 2022).

2.5 Mean Absolute Percentage Error

Mean Absolute Percentage Error (MAPE) merupakan ukuran statistik yang digunakan untuk mengevaluasi tingkat akurasi suatu model dengan menghitung rata-rata persentase kesalahan absolut antara nilai aktual dan nilai hasil estimasi. Nilai MAPE yang semakin kecil menunjukkan bahwa model memiliki tingkat kesalahan yang lebih rendah dan akurasi yang lebih tinggi (de Myttenaere et al., 2016; Hyndman & Koehler, 2006).

Tabel 1. Range Nilai MAPE

Range MAPE	Arti Nilai
<10%	Kemampuan model peramalan sangat baik
10 – 20 %	Kemampuan model peramalan baik
20 – 50 %	Kemampuan model peramalan cukup
>50%	Kemampuan model peramalan buruk

Pada penelitian ini, MAPE digunakan untuk mengevaluasi akurasi hasil interpolasi Inverse Distance Weighting (IDW) dan menentukan nilai parameter daya (power) yang menghasilkan estimasi paling mendekati kondisi aktual.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode deskriptif kuantitatif dengan pendekatan geolistrik (Urruela et al., 2025) untuk menentukan distribusi, ketebalan, dan estimasi volume sumberdaya tanah urug. Pengumpulan data dilakukan melalui survei *Vertical Electrical Sounding* (VES) menggunakan konfigurasi Schlumberger yang umum digunakan dalam investigasi bawah permukaan dan mampu mengidentifikasi lapisan geologi bawah permukaan secara efektif (Baharlu, 2026; Omeje et al., 2021) pada enam (6) jalur geolistrik yang tersebar di area penelitian seluas kurang lebih 2,7 hektar. Setiap jalur memiliki jarak elektroda spesifik sesuai dengan persyaratan penetrasi, dengan hasil pengukuran berupa nilai resistivitas dan kedalaman semu untuk setiap lapisan bawah permukaan.

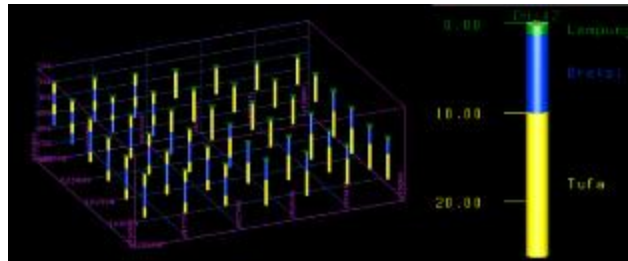


Gambar 4. Titik Lintasan Geolistrik (Google Earth).

Tahap pengolahan data dilakukan melalui beberapa langkah sistematis. Data pengukuran lapangan pertama-tama dianalisis secara geologis untuk mengidentifikasi litologi dan struktur bawah permukaan. Selanjutnya, data resistivitas dan ketebalan diolah menggunakan metode *Interpolasi Inverse Distance Weighted* (IDW) untuk menentukan distribusi spasial dan zona pengaruh setiap titik geolistrik (Lawal et al., 2020). Hasil interpolasi kemudian diintegrasikan ke dalam basis data geologis yang terdiri dari tabel *Collar*, *Survey*, *Assay*, dan *Lithology*. Nilai MAPE digunakan untuk mengevaluasi akurasi model dan menentukan bobot (pangkat) terbaik untuk metode IDW (Maksoud et al., 2025).

Pada tahap pemodelan sumberdaya, dilakukan pembuatan grid lubang bor dummy di perangkat lunak ArcGIS berdasarkan hasil interpolasi IDW, yang kemudian diimpor ke Surpac untuk membangun model blok tiga dimensi (block model). Proses ini menghasilkan visualisasi

spasial endapan tanah urug serta estimasi volume berdasarkan parameter resistivitas dan ketebalan yang telah divalidasi.

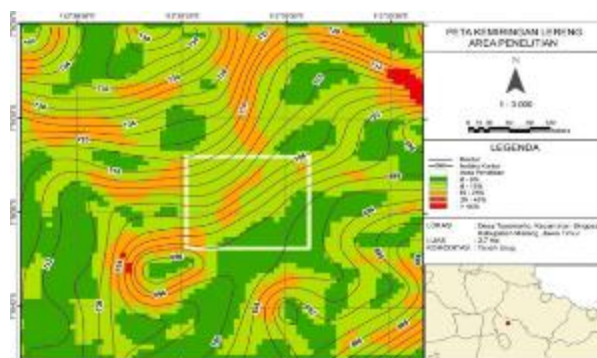


Gambar 5. Lubang Bor Dummy (Surpac).

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian dilakukan di Desa Toyomarto, Kecamatan Singosari, Kabupaten Malang, Provinsi Jawa Timur, yang secara geografis berada di lereng timur Gunung Arjuno–Welirang. Secara administratif, wilayah ini dapat diakses dengan mudah dari pusat Kota Malang melalui jalur utama Surabaya–Malang. Morfologi kawasan didominasi oleh dataran landai hingga bergelombang dengan ketinggian sekitar 696–720 mdpl. Kondisi tersebut mendukung keberadaan material hasil pelapukan vulkanik, termasuk tanah urug, yang tersebar pada bagian kaki gunung dan lembah kecil di sekitarnya.

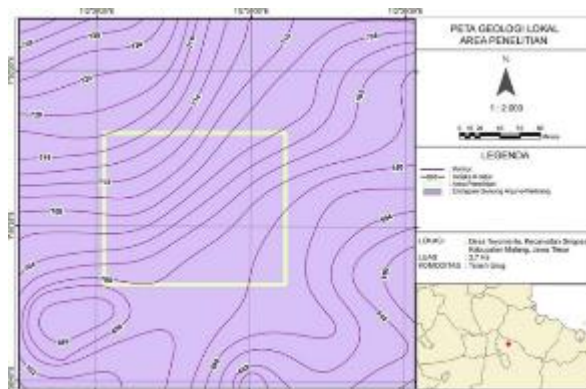
Karakteristik permukaan daerah penelitian menunjukkan dominasi tanah berwarna kecokelatan hingga kelabu, dengan tekstur lempung berpasir dan lapisan bawah berupa tufa serta breksi gunungapi. Keberadaan material vulkanik hasil pelapukan, seperti tuf, breksi vulkanik, dan endapan piroklastik, merupakan indikasi adanya potensi sumberdaya tanah urug karena material tersebut umumnya memiliki sifat fisik yang sesuai untuk kebutuhan konstruksi, penimbunan lahan, dan reklamasi (Daud et al., 2019)(Indrawan et al., 2024).



Gambar 6. Peta Kemiringan Lereng Daerah Penelitian

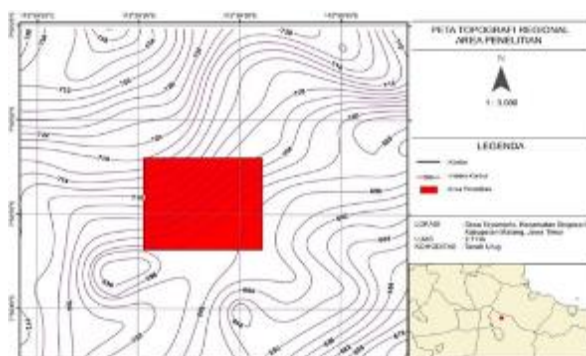
4.1 Kondisi Geologi Area Penelitian

Secara geologi, wilayah Singosari merupakan bagian dari kompleks gunungapi Arjuno–Welirang yang tersusun oleh produk erupsi gunungapi tua dan muda. Berdasarkan peta geologi lembar Malang, batuan penyusunnya terdiri atas breksi gunungapi, lava andesit, tuf, serta endapan piroklastik. Proses vulkanik yang berulang dan aktivitas erupsi samping menghasilkan endapan pelapukan yang tebal di bagian kaki gunung, sehingga membentuk lapisan tanah urug alami yang kaya akan material lepas.



Gambar 7. Peta Geologi Daerah Penelitian

Hasil observasi lapangan memperlihatkan bahwa litologi di sekitar lokasi penelitian terdiri atas tufa lapuk, lempung, dan breksi halus, dengan warna dominan abu-abu kecokelatan. Bahan ini mudah digali dan memiliki daya ikat sedang, menjadikannya potensial sebagai material urug.



Gambar 8. Peta Topografi Daerah Penelitian

Kondisi topografi yang relatif landai juga menunjukkan bahwa akumulasi material pelapukan berlangsung cukup stabil tanpa adanya erosi besar, sehingga volume tanah urug dapat terjaga dan mudah dimodelkan secara geospasial.

4.2 Data dan Analisis Geolistrik

Pengambilan data geolistrik dilakukan pada 6 lintasan dengan luas area pengukuran sekitar 2,7 hektar. Tujuan pengukuran ini adalah untuk mengetahui ketebalan lapisan tanah urug serta karakteristik resistivitas batuan bawah permukaan. Data hasil pengukuran kemudian diolah menggunakan metode Inverse Distance Weighting (IDW) untuk memperoleh sebaran nilai resistivitas dan ketebalan secara spasial. Hasil yang didapat yaitu data ketebalan dan resistivitas semu yang kemudian diolah menjadi nilai resistivitas serta ketebalan menjadi terukur. Berikut hasil data geolistrik terukur:

Tabel 2. Litologi Hasil Survei Geolistrik

Lintasan 1			
Resistivitas (Ω meter)	Ketebalan (m)	Kedalaman (m)	Keterangan
43.5	0.4	0.4	Tufa/Padas
3109	1.03	1.43	Andesit
196	9.53	10.96	Breksi

22.8	15.6	26.56	Tufa/Padas
Lintasan 2			
Resistivitas (Ω meter)	Ketebalan (m)	Kedalaman (m)	Keterangan
64.52	0.7	0.7	Tufa/Padas
548.1	3.3	4	Breksi
36.31	8.5	12.5	Tufa/Padas
437.6	14.13	26.63	breksi
Lintasan 3			
Resistivitas (Ω meter)	Ketebalan (m)	Kedalaman (m)	Keterangan
99	2.16	2.16	Tufa/Padas
45.3	1.97	4.13	Tufa/Padas
86.3	7.79	11.92	Tufa/Padas
272	13.2	25.12	Breksi
Lintasan 4			
Resistivitas (Ω meter)	Ketebalan (m)	Kedalaman (m)	Keterangan
154	0.38	0.38	Lempung
228.2	1.62	2	Breksi
214.9	3.7	5.7	Breksi
59.97	18.89	24.59	Tufa/Padas
Lintasan 5			
Resistivitas (Ω meter)	Ketebalan (m)	Kedalaman (m)	Keterangan
114	0.6	0.6	Lempung
71.65	1.1	1.7	Tufa/Padas
45.37	5.3	7	Tufa/Padas
99.44	29.98	36.98	Tufa/Padas
Lintasan 6			
Resistivitas (Ω meter)	Ketebalan (m)	Kedalaman (m)	Keterangan
29.07	0.77	0.77	Lempung
150	0.98	1.75	Breksi
18.42	2.86	4.61	Tufa/Padas
338.2	18.71	23.32	Breksi

Interpretasi geolistrik lintasan 1 mengungkapkan litologi berlapis dengan resistivitas yang bervariasi yang mencerminkan heterogenitas bawah permukaan. Lapisan permukaan, yang terdiri dari tufa/padas, memiliki resistivitas rendah sebesar 43,5 Ω m dan ketebalan 0,4 m. Di bawah lapisan ini terdapat lapisan andesit dengan resistivitas sangat tinggi (3109 Ω m) dan ketebalan 1,03 m, yang menunjukkan batuan yang sangat kompak. Lapisan berikutnya adalah breksi dengan resistivitas sedang (196 Ω m) dan ketebalan signifikan \pm 9,53 m, yang berpotensi digunakan sebagai material pengisi. Lapisan terdalam kembali didominasi oleh tufa/batuan keras dengan resistivitas rendah (22,8 Ω m) dan ketebalan \pm 15,6 m hingga kedalaman 26,56 m.

Secara keseluruhan, pada area ini dikendalikan oleh keberadaan lapisan Tufa/padas dan breksi yang cukup tebal, dengan batas litologi yang terdiri dari andesit yang dipadatkan di bagian atas dan tuf berdaya tahan rendah di bagian bawah.

4.3 Pemodelan Sumberdaya Tanah Urug

Pemodelan sumberdaya tanah urug dilakukan menggunakan pendekatan grid spasial tiga dimensi yang dibangun berdasarkan hasil survei resistivitas dan ketebalan tanah. Teknik Interpolasi Inverse Distance Weighting (IDW) diterapkan untuk mengestimasi nilai antar titik pengamatan dengan mempertimbangkan kedekatan spasial antar data. Pendekatan ini dipilih karena mampu

menghasilkan model distribusi bawah permukaan yang halus dan representatif pada wilayah penelitian yang memiliki kerapatan titik ukur sedang hingga tinggi.

4.4.1 Evaluasi Ketelitian dan Optimasi Parameter

Evaluasi ketelitian model dilakukan menggunakan indikator MAPE untuk mengukur deviasi antara nilai prediksi dan nilai aktual. Berdasarkan hasil pengujian beberapa parameter power, diperoleh bahwa penggunaan power sebesar 3 menghasilkan nilai MAPE terkecil yaitu 1,06%. Nilai ini berada pada kategori “sangat baik” (<10%), yang menunjukkan bahwa model memiliki tingkat akurasi tinggi dan dapat digunakan sebagai dasar dalam estimasi sumberdaya. Hasil ini konsisten dengan prinsip bahwa peningkatan nilai power pada IDW akan memperbesar pengaruh titik terdekat sehingga menghasilkan estimasi yang lebih representatif terhadap kondisi lokal. Analisis terhadap data resistivitas menunjukkan adanya variasi yang cukup signifikan antara nilai aktual dan nilai prediksi pada beberapa titik, terutama pada data dengan selisih besar.

Tabel 3. Data Resistivitas

No	Nilai Aktual	Nilai prediksi	Nilai eror
1	37.4	52.97	19.82
2	50.41	48.62	1.78
3	76.86	32.99	43.86
4	18.42	63.08	44.66
5	58.51	44.54	13.96
6	59.97	58.6	12.49
	50.27	50.13	

Meskipun demikian, nilai rata-rata resistivitas aktual sebesar 50,27 Ω m dan nilai prediksi sebesar 50,13 Ω m menunjukkan kesesuaian yang sangat dekat. Hal ini mengindikasikan bahwa secara umum model mampu merepresentasikan kondisi bawah permukaan dengan baik, meskipun terdapat anomali lokal yang kemungkinan dipengaruhi oleh heterogenitas litologi atau kondisi kelembapan tanah.

Pengujian lebih lanjut pada data lubang bor menunjukkan bahwa parameter power 1 menghasilkan error sebesar 4,64%, power 2 sebesar 8,95%, dan power 3 sebesar 13,26%.

Tabel 4. Resistivitas Lubang Bor

Parameter Power	Rata-rata		Error (%)	Keterangan
	Nilai Aktual	Nilai Prediksi		
1	50.27	50.13	4.64%	Prediksi sangat baik
2	50.27	50	8.95%	Prediksi sangat baik
3	50.27	49.87	13.26%	Prediksi baik

Meskipun nilai error terkecil diperoleh pada power 1, pemilihan parameter optimum tetap mempertimbangkan konsistensi hasil secara keseluruhan, termasuk pada validasi menggunakan data dummy. Hal ini menunjukkan bahwa evaluasi parameter tidak hanya bergantung pada satu dataset, tetapi harus mempertimbangkan performa model secara menyeluruh.

Pada parameter ketebalan tanah urug, hasil interpolasi menunjukkan tingkat akurasi yang sangat tinggi. Nilai rata-rata ketebalan aktual sebesar 13,67 m dan nilai prediksi berkisar antara 13,49 m hingga 13,66 m.

Tabel 5. Data Ketebalan

No	Nilai Aktual	Nilai prediksi	Nilai eror
1	13	12.66	4.66
2	9	14.55	4.83
3	11	7.75	5.22
4	3	15.68	11.68
5	29	10.84	28.08
6	17	19.55	2.19
	13.67	13.66	

Pada interpolasi ketebalan Tanah urug, Nilai error terkecil diperoleh pada parameter power 5 sebesar 0,012%, yang termasuk kategori sangat baik.

Tabel 6. Interpolasi Ketebalan Tanah Urug

Parameter Power	Rata-rata			Keterangan
	Nilai Aktual	Nilai Prediksi	Error (%)	
1	13.67	13.49	0,20%	Prediksi layak
2	13.67	13.53	0,15%	Prediksi baik
3	13.67	13.58	0,09%	Prediksi baik
4	13.67	13.6	0,07%	Prediksi sangat baik
5	13.67	13.66	0,012%	Prediksi sangat baik

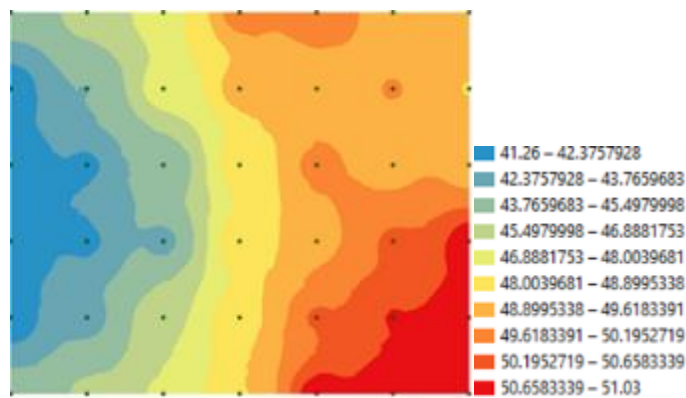
Tren ini menunjukkan bahwa peningkatan nilai power pada interpolasi ketebalan memberikan hasil yang semakin mendekati nilai aktual, mengindikasikan bahwa distribusi ketebalan relatif homogen dan dipengaruhi kuat oleh titik-titik terdekat.

Integrasi data resistivitas dan ketebalan dengan informasi litologi menunjukkan bahwa material penyusun didominasi oleh tufa/padas, breksi, dan lempung.

Tabel 7. Kode Susunan Litologi

Kode	Susunan Litologi	Kode	Susunan Litologi
1	Tufa/Padas	4	Lempung
	Andesit		Breksi
	Breksi		Breksi
2	Tufa/Padas	5	Tufa/Padas
	Tufa/Padas		Lempung
	Breksi		Tufa/Padas
	Tufa/Padas		Tufa/Padas
3	breksi	6	Tufa/Padas
	Tufa/Padas		Lempung
	Tufa/Padas		Breksi
	Breksi		Tufa/Padas

Pola susunan litologi yang relatif berulang dan homogen memperkuat interpretasi bahwa material tanah urug berasal dari hasil pelapukan batuan vulkanik. Dominasi tufa/padas yang bersifat lunak dan mudah terfragmentasi menjadi faktor utama terbentuknya lapisan tanah urug dengan ketebalan yang cukup signifikan. Validasi model menggunakan data lubang bor dummy memberikan hasil yang konsisten dengan tingkat kesalahan yang relatif kecil.



Gambar 9. Interpolasi Resistivitas Lubang Bor dummy Tabel (ArcGIS)

Nilai error pada 42 titik data umumnya berada di bawah 2%, dengan rata-rata nilai aktual sebesar 47,35 Ωm dan nilai prediksi sebesar 50,43 Ωm. Perbandingan nilai MAPE menunjukkan bahwa parameter power 3 kembali menghasilkan nilai error terkecil sebesar 1,06%, dibandingkan power 1 sebesar 4,01% dan power 2 sebesar 1,41%. Hal ini menguatkan bahwa parameter power 3 merupakan konfigurasi optimal dalam pemodelan resistivitas pada penelitian ini.

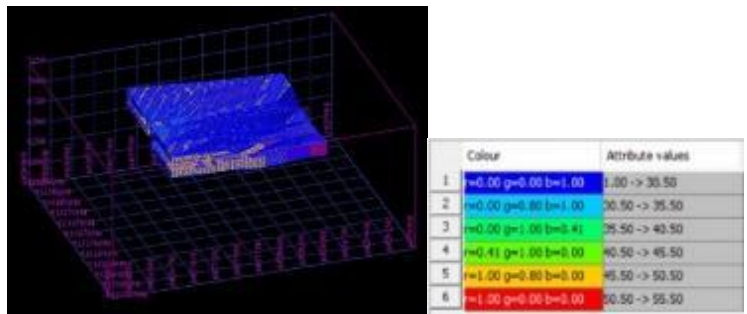
Tabel 8. Perbandingan Nilai MAPE Dengan Power Nilai Tahanan Jenis Pada Lubang Bor Dummy

Parameter Power	Rata-rata		Error (%)	Keterangan
	Nilai Aktual	Nilai Prediksi		
1	47.35	58.76	4,01%	Prediksi Baik
2	47.35	51.31	1,41%	Prediksi Baik
3	47.35	50,43	1.06%	Prediksi Baik

Secara keseluruhan, hasil pemodelan menunjukkan bahwa metode IDW mampu menghasilkan estimasi yang akurat dan konsisten untuk parameter resistivitas maupun ketebalan tanah urug. Variasi nilai yang terjadi pada beberapa titik lebih mencerminkan kondisi geologi yang heterogen dibandingkan kelemahan metode interpolasi itu sendiri. Keterpaduan antara data geolistrik, analisis statistik, dan pemodelan spasial memberikan gambaran yang komprehensif mengenai distribusi sumberdaya. Implikasi dari hasil ini menunjukkan bahwa pendekatan IDW dengan parameter yang tepat dapat digunakan sebagai metode yang efektif dalam eksplorasi awal sumberdaya tanah urug. Dengan tingkat akurasi yang tinggi, metode ini dapat mengurangi ketergantungan terhadap pemboran intensif, sehingga lebih efisien dari segi waktu dan biaya, tanpa mengurangi kualitas hasil estimasi.

4.4.2 Pembuatan Model Tiga Dimensi

Pemodelan tiga dimensi (3D) dilakukan berdasarkan hasil interpolasi resistivitas dan ketebalan tanah urug menggunakan titik bor dummy yang diolah dalam perangkat lunak Surpac menjadi block model. Setiap blok merepresentasikan volume material tertentu sehingga estimasi sumberdaya dapat dihitung secara sistematis.

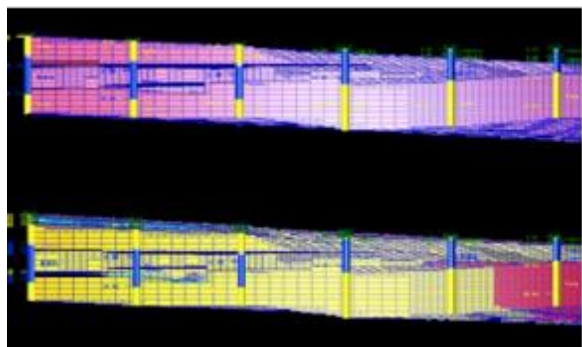


Gambar 10. Blok Model Sumberdaya Tanah Urug (*Surpac*)

Hasil model menunjukkan variasi distribusi resistivitas yang divisualisasikan melalui gradasi warna. Zona berwarna biru-hijau menunjukkan resistivitas rendah hingga sedang, sedangkan kuning-merah menunjukkan resistivitas lebih tinggi. Rentang resistivitas dominan berada pada nilai 30,50–55,50 Ω m yang diinterpretasikan sebagai material tufa/padas dan breksi lapuk yang berpotensi sebagai tanah urug.

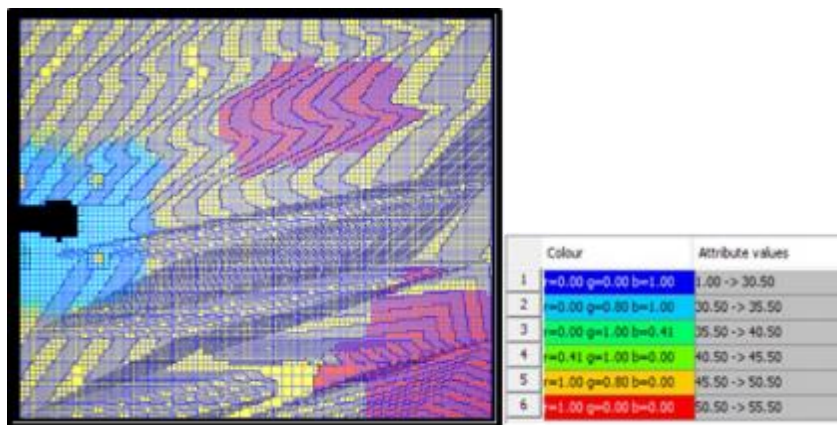
4.4.3 Pola Sebaran dan Ketebalan Tanah Urug

Hasil visualisasi model menunjukkan bahwa distribusi tanah urug di wilayah penelitian memiliki variasi ketebalan yang cukup signifikan. Lapisan dengan ketebalan lebih besar umumnya ditemukan di bagian barat laut lokasi penelitian, sedangkan lapisan yang lebih tipis cenderung berada di bagian timur. Pola ini diduga dipengaruhi oleh kondisi topografi lokal, proses sedimentasi alami, serta perbedaan karakteristik litologi bawah permukaan.



Gambar 11. Gambar Blok Model Tampak Samping (*Surpac*)

Model tampak samping memperlihatkan bahwa ketebalan tanah urug cenderung lebih besar pada bagian barat laut dan menipis ke arah timur. Pola ini dipengaruhi oleh kondisi topografi serta akumulasi material hasil pelapukan vulkanik.



Gambar 12. Blok Model Dengan Resistivitas (ArcGIS)

Gambar blok model resistivitas menunjukkan distribusi nilai tahanan jenis bawah permukaan hasil interpolasi IDW dengan rentang 30,50–55,50 Ωm. Warna biru menunjukkan resistivitas rendah sebesar 30,50–35,50 Ωm yang diinterpretasikan sebagai lempung atau tufa lapuk, sedangkan warna kuning hingga merah menunjukkan resistivitas tinggi sebesar 45,50–55,50 Ωm yang merepresentasikan material lebih kompak seperti breksi. Dominasi nilai resistivitas sedang hingga tinggi menunjukkan potensi tanah urug yang cukup baik pada daerah penelitian.

Tabel 9. Interpolasi Ketebalan Tanah Urug

Parameter Power	Volume (m ³)	Tonase (ton)
1	258.496	453.660.48
2	258.763	454.129.06
3	258.912	454.390.56

Berdasarkan hasil estimasi volume, parameter power 1 menghasilkan volume sebesar 258.496 m³ dengan tonase 453.660,48 ton, power 2 sebesar 258.763 m³ dengan tonase 454.129,06 ton, dan power 3 sebesar 258.912 m³ dengan tonase 454.390,56 ton. Parameter power 3 dipilih sebagai model terbaik karena memiliki nilai error terkecil berdasarkan evaluasi MAPE, sehingga dianggap paling representatif dalam menggambarkan kondisi bawah permukaan daerah penelitian.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa metode geolistrik resistivitas yang dipadukan dengan interpolasi IDW dan pemodelan tiga dimensi mampu menggambarkan pola sebaran serta potensi sumberdaya tanah urug di Desa Toyomarto dengan tingkat akurasi yang baik. Sebaran tanah urug dipengaruhi oleh proses pelapukan batuan vulkanik Arjuno–Welirang, kondisi topografi, dan variasi litologi bawah permukaan. Estimasi sumberdaya menunjukkan volume sebesar ±258.912 m³ dengan total tonase sekitar 454.390 ton, sehingga wilayah penelitian memiliki potensi yang cukup besar untuk mendukung kebutuhan material konstruksi. Selain memberikan estimasi yang akurat dan efisien, pendekatan ini juga dapat menjadi acuan dalam eksplorasi lanjutan dan perencanaan pengelolaan sumberdaya tanah urug secara lebih efektif dan berkelanjutan

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, metode geolistrik resistivitas yang dikombinasikan dengan interpolasi Inverse Distance Weighting (IDW) dan pemodelan tiga dimensi terbukti mampu

mengidentifikasi serta memodelkan sebaran sumberdaya tanah urug di Desa Toyomarto secara efektif. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa parameter power 3 memberikan tingkat akurasi terbaik dengan nilai MAPE sebesar 1,06%, sehingga model yang dihasilkan dinilai representatif terhadap kondisi aktual bawah permukaan.

Distribusi resistivitas berada pada rentang 30,50–55,50 Ωm yang didominasi oleh material tufa/padas dan breksi hasil pelapukan vulkanik. Sebaran ketebalan tanah urug menunjukkan pola yang bervariasi, dengan akumulasi material lebih tebal pada bagian barat laut wilayah penelitian. Berdasarkan hasil pemodelan tiga dimensi, diperoleh estimasi volume sumberdaya tanah urug sebesar $\pm 258.912 \text{ m}^3$ dengan total tonase sekitar 454.390 ton.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi data geolistrik, analisis statistik, dan pemodelan geospasial dapat menjadi metode yang efisien dan akurat dalam kegiatan estimasi sumberdaya tanah urug. Pendekatan ini juga berpotensi diterapkan pada wilayah lain dengan karakteristik geologi yang serupa sebagai alternatif eksplorasi awal yang lebih ekonomis dan terukur.

DAFTAR PUSTAKA

- Abuntori, C. A., Al-Hassan, S., & Mireku-Gyimah, D. (2021). *Assessment of Ore Grade Estimation Methods for Structurally Controlled Vein Deposits - A Review*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:237380724>
- Baharlu, Z. (2026). Groundwater Exploration Using the Vertical Electrical Sounding at Semi-Arid Region; West of Rezevi Khorasan, Iran. *Hittite Journal of Science and Engineering*, 13(1), 29–41. <https://doi.org/10.17350/HJSE19030000370>
- Bazania, J., & Boisvert, J. (2025). Current state of industry practice in mineral resource estimation and classification. *CIM Journal*, 16(3), 162–178. <https://doi.org/10.1080/19236026.2025.2465091>
- Chen, C., Zhao, N., Yue, T., & Guo, J. (2015). A generalization of inverse distance weighting method via kernel regression and its application to surface modeling. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(9), 6623–6633. <https://doi.org/10.1007/s12517-014-1717-z>
- Cotrina-teatino, M. A., Marquina-araujo, J. J., Mamani-quispe, J. N., & Vega-, J. A. (2025). *Data-Driven Machine Learning Techniques for Metal Resource Estimation at Quiulacocha Tailings Deposit , Peru*. <https://doi.org/10.22044/jme.2026.16818.3299>
- CRIRSCO. (2019). *International Reporting Results , Mineral Resources and Mineral*. November.
- Daud, Y., Nuqramadha, W. A., Fahmi, F., Sesesege, R. S., Fitrianita, Pratama, S. A., & Munandar, A. (2019). Resistivity characterization of the Arjuno-Welirang volcanic geothermal system (Indonesia) through 3-D Magnetotelluric inverse modeling. *Journal of Asian Earth Sciences*, 174, 352–363. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2019.01.033>
- de Myttenaere, A., Golden, B., Le Grand, B., & Rossi, F. (2016). Mean Absolute Percentage Error for regression models. *Neurocomputing*, 192, 38–48. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.12.114>
- Dumakor-Dupey, N. K., & Arya, S. (2021). Machine Learning – A Review of Applications in Mineral Resource Estimation. *Energies*, 14(14). <https://doi.org/10.3390/en14144079>
- Harijoko, A., Utama, H. W., & Husein, S. (2017). Volcanism and Structural Geology on Geothermal Area of the Arjuno Welirang Volcanic Complex , East Java. *Proceedings The 5th Indonesia International Geothermal Convention & Exhibition 2017*, 2(August), 1–9.
- Hyndman, R. J., & Koehler, A. B. (2006). Another look at measures of forecast accuracy. *International Journal of Forecasting*, 22(4), 679–688. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2006.03.001>
- Indrawan, I. G. B., Tamado, D., Abrar, M., & Warmada, I. W. (2024). Mineralogical and Engineering Properties of Soils Derived from In Situ Weathering of Tuff in Central Java, Indonesia. *Geosciences*, 14(8). <https://doi.org/10.3390/geosciences14080213>
- Jowitt, S. M., & McNulty, B. A. (2025). Mineral Resources and Reserves: Their Estimation, Use, and Abuse. *Geology and Mining: Evolution of Best Practice*, 16, 161–170. <https://doi.org/10.5382/com.16.13>
- Lawal, A., Tijani, M. N., & D'Alessio, M. (2020). Geoelectrical characterisation of aquifers in Bauchi-Alkaleri-Kirfi geological transition zones, Northeast Nigeria. *Environmental Earth Sciences*, 79(10), 224. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-08978-5>
- Lawal, A., Tijani, M. N., D'Alessio, M., & Maigari, A. S. (2021). Application of geographical information system

- to geoelectrical data for evaluation of the vulnerability of aquifers in parts of Bauchi, Northeastern Nigeria. *Environmental Earth Sciences*, 80(1), 16. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09308-5>
- Lindi, O. T., Aladejare, A. E., Ozoji, T. M., & Ranta, J. P. (2024). Uncertainty Quantification in Mineral Resource Estimation. *Natural Resources Research*, 33(6), 2503–2526. <https://doi.org/10.1007/s11053-024-10394-6>
- Maksoud, T., Alkhawaga, A., & Mohamed, M. (2025). Optimal interpolation methods for predicting groundwater levels in Abu Dhabi Emirate using ArcGIS. *Scientific Reports*, 16(1), 194. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-29131-x>
- Masoudi, M. (2021). Estimation of the spatial climate comfort distribution using tourism climate index (TCI) and inverse distance weighting (IDW) (case study: Fars Province, Iran). *Arabian Journal of Geosciences*, 14(5), 363. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06605-6>
- Matos, A. C. de S., Silva, F. E. O. E., & Corrêa, G. de O. (2024). Estimating the parameters of a monthly hydrological model using hydrological signatures. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 29, 1–11. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.292420230121>
- Omeje, E. T., Ugbor, D. O., Ibuot, J. C., & Obiora, D. N. (2021). Assessment of groundwater repositories in Edem, Southeastern Nigeria, using vertical electrical sounding. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(6), 421. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06769-1>
- Purwanto, S., Gani, R. A., & Suryani, E. (2021). Characteristics of Ultisols derived from basaltic andesite materials and their association with old volcanic landforms in Indonesia. *Sains Tanah*, 17(2), 135–143. <https://doi.org/10.20961/STJSSA.V17I2.38301>
- Qiao, P., Li, P., Cheng, Y., Wei, W., Yang, S., Lei, M., & Chen, T. (2019). Comparison of common spatial interpolation methods for analyzing pollutant spatial distributions at contaminated sites. *Environmental Geochemistry and Health*, 41(6), 2709–2730. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00328-0>
- Qiao, P., Yang, S., Wei, W., Li, P., Cheng, Y., Liang, S., Lei, M., & Chen, T. (2021). Effectiveness of predicting spatial contaminant distributions at industrial sites using partitioned interpolation method. *Environmental Geochemistry and Health*, 43(1), 23–36. <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00673-5>
- Rafi, A., Dauji, S., & Keesari, T. (2023). Evaluation of simple algorithms for spatial interpolation of salinity hazard parameter in natural waters. *Journal of Earth System Science*, 132(4), 162. <https://doi.org/10.1007/s12040-023-02170-6>
- Savolainen, J., Rakhsha, R., & Durham, R. (2022). Simulation-based decision-making system for optimal mine production plan selection. *Mineral Economics*, 35(2), 267–281. <https://doi.org/10.1007/s13563-021-00297-w>
- Sonderegger, T., Berger, M., Alvarenga, R., Bach, V., Cimprich, A., Dewulf, J., Frischknecht, R., Guinée, J., Helbig, C., Huppertz, T., Jolliet, O., Motoshita, M., Northey, S., Rugani, B., Schrijvers, D., Schulze, R., Sonnemann, G., Valero, A., Weidema, B. P., & Young, S. B. (2020). Mineral resources in life cycle impact assessment—part I: a critical review of existing methods. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(4), 784–797. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01736-6>
- Soulaimani, S., Soulaimani, A., Abdelrahman, K., Miftah, A., Fnais, M. S., & Mondal, B. K. (2024). Geostatistics and artificial intelligence coupling: advanced machine learning neural network regressor for experimental variogram modelling using Bayesian optimization. *Frontiers in Earth Science*, Volume 12. <https://doi.org/10.3389/feart.2024.1474586>
- Stephenson, P. R. (2001). The JORC code. *Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy, Section B: Applied Earth Science*, 110(SEPTEMBER/DECEMBER), 1–44. <https://doi.org/10.1179/aes.2001.110.3.121>
- Suharno, Nindya, F., Rustadi, Zaenuddin, A., & Mulyatno, B. S. (2013). Characteristics of Mountain Arjuno-Welirang Geothermal Jawa Timur Province, Indonesia. *13th Indonesia International GEOTHERMAL Convention & Exhibition*.
- Umam, A. K., Mayasari, I., Wijanarko, A. A., Radhiansyah, E., Faris Budiman Annas, Siraj, F. M., Idris, H. R., Chrisharyanto, H., Idris, I. K., & Hendrowati, R. (2020). *Tantangan Integritas Bisnis Tambang di Indonesia*. 1–237. [http://repository.paramadina.ac.id/151/%0Ahttp://repository.paramadina.ac.id/151/1/Tantangan Integritas Bisnis Tambang di Indonesia %28New Version%29.pdf](http://repository.paramadina.ac.id/151/%0Ahttp://repository.paramadina.ac.id/151/1/Tantangan%20Integritas%20Bisnis%20Tambang%20di%20Indonesia%20New%20Version%29.pdf)
- Urruela, A., Casas-Ponsatí, A., Lima-Filho, F. P., Himi, M., & Rivero, L. (2025). Characterization of Microbialites Using ERT and GPR: Insights from Neoproterozoic and Mesozoic Carbonate Systems. *Geosciences*, 15(12). <https://doi.org/10.3390/geosciences15120475>