Jurnal Biologi Tropis

Original Research Paper

Mapping Agricultural Drought-Prone Areas in Malang Regency Using MODIS and CHIRPS Data for Mitigation Planning

Utik Tri Wulan Cahya[1*], Erwin Ismu Wisnubroto[1], Razhika Faradila[2]

[1]Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Tribhuwana Tunggadewi, Malang, Indonesia;

[2]Program Studi Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Teknik dan Teknologi, Universitas Tribhuwana Tunggadewi, Malang, Indonesia;

Article History

Received : October 31th, 2026

Revised : November 08th, 2026

Accepted : November 12th, 2026

*Corresponding Author: **Utik Tri Wulan Cahya,** Program Studi Agroteknologi, Universitas Tribhuwana Tunggadewi, Malang, Indonesia; Program Studi Teknologi Industri Pertanian, Universitas Tribhuwana Tunggadewi, Malang, Indonesia;

Email: utiktriwulancahya@gmail.com

Abstract: Agricultural drought is a recurring threat to food production in Malang Regency, yet monitoring at the subdistrict level is still hampered by the scarcity of rain gauges. This study aimed to map the frequency and spatial distribution of agricultural drought, examine its trends over 2001–2025, and assess how cropland vegetation responds to rainfall deficits across the 33 subdistricts of Malang Regency. Vegetation condition was expressed by the Vegetation Condition Index (VCI) derived from 250 m MODIS MOD13Q1 NDVI over cropland, while meteorological drought was expressed by the Standardized Precipitation Index (SPI) at 1, 3, and 6 month scales computed from CHIRPS rainfall. All images were processed in Google Earth Engine and analysed in R using the Mann–Kendall test, Sen's slope, and Spearman correlation. Agricultural drought tended to decline: the number of drought months decreased by 0.088 months per year and dry-season VCI increased by 0.96 per year, both statistically significant, whereas the annual rainfall trend was not significant. The year 2003 was the driest on record. Agricultural drought frequency ranged from 4.1 to 22.1% among subdistricts and was not related to rainfall, suggesting that local land and water management conditions play a role; the highest frequencies occurred in Kalipare, Donomulyo, Gedangan, and Pujon. Vegetation responded to rainfall deficits within the same month, with weaker responses in subdistricts served by irrigation networks. The interannual correlation between VCI and SPI-3 remained strong after detrending ($\rho = 0.833$), indicating that VCI is suitable for subdistrict-level drought monitoring and for identifying priority areas for further mitigation planning.

Keywords: Agricultural drought; CHIRPS; Google Earth Engine; MODIS; Vegetation Condition Index.

Pendahuluan

Kekeringan pertanian merupakan kondisi saat lengas tanah tidak lagi mencukupi kebutuhan tanaman sehingga pertumbuhan terganggu dan hasil panen berpotensi menurun. Kondisi ini biasanya berawal dari kekeringan meteorologis, yakni kondisi dimana curah hujan tahunan di bawah normal, namun hal ini bukan menjadi salah satu factor karena ketersediaan air bagi tanaman juga dipengaruhi oleh sifat lahan dan pengelolaan air (Wilhite & Glantz, 1985). Di Indonesia, kekeringan pertanian merupakan salah satu bencana hidrometeorologis yang paling sering mengganggu produksi pangan. Pulau Jawa, sebagai lumbung padi nasional, sangat rentan terhadap ancaman ini karena variabilitas curah hujannya dikendalikan kuat oleh *El Niño–Southern Oscillation* (ENSO) dan Indian Ocean Dipole (IOD).

Naylor *et al.* (2001) menunjukkan bahwa anomali suhu muka laut mampu menjelaskan sebagian besar keragaman luas tanam dan produksi padi musim hujan di Jawa, sedangkan

This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

© 2026 The Author(s). This article is open access

Surmaini *et al.,* (2015) melaporkan bahwa El Niño lemah hingga sedang sudah mampu menurunkan hasil padi di wilayah terdampak hingga 40%. Tingkat keparahan kekeringan meteorologis di Jawa ditentukan oleh kombinasi El Niño dan IOD positif yang terjadi bersamaan (Siswanto *et al.*, 2022), dan kekeringan pada 2015 serta 2019 tercatat melanda ratusan ribu hektare sawah (Pratiwi, Murti & Widiastuti, 2023). Di Jawa Timur, keterkaitan antara El Niño dan kekeringan berpengaruh nyata di kawasan sentra padi beririgasi (Mulyanti *et al.*, 2023).

Kabupaten Malang adalah salah satu daerah penyangga pangan di Jawa Timur dengan kondisi biofisik yang sangat beragam. Wilayahnya membentang dari lereng gunung api di bagian utara, barat, dan timur hingga bentang lahan karst di bagian selatan (Sahrina *et al.*, 2022), sehingga kemampuan lahan dalam menyimpan dan menyediakan air bagi tanaman sangat berbeda antar wilayah. Sebagai contoh, di Sub DAS Brantas Hulu, kemiringan lereng dan kadar pasir tanah meningkatkan koefisien limpasan, sedangkan tutupan lahan yang rapat menurunkannya (Cahya *et al.*, 2025). Artinya, sebagian hujan yang jatuh di lahan miring dengan tutupan jarang akan mengalir sebagai limpasan sebelum sempat tersimpan sebagai lengas tanah. Variabilitas semacam ini menuntut pemantauan kekeringan hingga tingkat kecamatan. Di sisi lain, pos hujan yang tersedia belum tersebar merata dan datanya sering tidak lengkap.

Penginderaan jauh menawarkan jalan keluar bagi keterbatasan data lapang tersebut. *Vegetation Condition Index* (VCI) menormalisasi NDVI terhadap rentang historisnya, sehingga perubahan kondisi vegetasi akibat cuaca dapat dipisahkan dari perbedaan jenis ekosistem (Kogan, 1995). Indeks ini telah digunakan untuk memetakan kekeringan pertanian di Jawa Timur (Amalo *et al.*, 2018) dan untuk mengungkap tren kekeringan selama dua dekade di Asia Tenggara (Ha *et al.*, 2023). Dari sisi meteorologis, Standardized Precipitation Index (SPI) (McKee *et al.*, 1993) yang dihitung dari data Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station (CHIRPS) (Funk *et al.*, 2015) terbukti andal di DAS Lesti, hulu DAS Brantas (Auliyani *et al.*, 2021), Kabupaten Tulungagung (Ma'ruf, Astuti & Masitoh, 2023), dan Papua Barat (Faisol *et al.*, 2022). Kedua jenis data ini dapat diolah secara efisien untuk periode puluhan tahun melalui Google Earth Engine (Gorelick *et al.*, 2017).

Meskipun demikian, kekeringan meteorologis dan kekeringan pertanian tidak selalu terjadi bersamaan. Di hilir DAS Citarum, kekeringan pertanian muncul beberapa waktu setelah kekeringan meteorologis dengan jeda yang bergantung pada jarak sawah dari jaringan irigasi utama (Dimyati *et al.,* 2024), sedangkan di Kabupaten Karawang jeda tersebut mencapai dua hingga tiga bulan (Rais *et al.*, 2026). Kajian kekeringan pertanian di Jawa Timur sejauh ini umumnya dilakukan pada skala provinsi, berfokus pada lahan sawah, dan belum menguji kesesuaian indeks vegetasi dengan indeks curah hujan (Amalo *et al.,* 2018; Mulyanti *et al.,* 2023). Akibatnya, informasi kekeringan pertanian pada tingkat kecamatan, yang menjadi satuan perencanaan pertanian daerah, belum tersedia untuk Kabupaten Malang.

Kebaruan penelitian ini terletak pada tiga hal. Pertama, kekeringan pertanian dipetakan pada tingkat kecamatan dengan deret waktu 25 tahun (2001–2025) dan hanya pada piksel lahan pertanian, baik sawah maupun lahan kering, sehingga tidak tercampur dengan respons hutan atau permukiman. Kedua, VCI dan SPI dianalisis bersama untuk mengetahui seberapa cepat vegetasi merespons defisit hujan di setiap kecamatan. Ketiga, kesesuaian VCI dengan SPI diuji pada skala antartahun, termasuk setelah pengaruh tren dihilangkan, sehingga keandalan VCI sebagai indikator kekeringan dapat dinilai meskipun tanpa data lapang.

Penelitian ini bertujuan untuk memetakan frekuensi dan sebaran wilayah rawan kekeringan pertanian di 33 kecamatan Kabupaten Malang selama 2001–2025 menggunakan VCI, mengkaji tren kekeringan pertanian dan curah hujan, serta menilai hubungan dan jeda waktu respons vegetasi lahan pertanian terhadap defisit curah hujan yang dinyatakan dengan SPI. Hasil penelitian diharapkan menjadi dasar penentuan wilayah prioritas mitigasi dan perancangan sistem peringatan dini kekeringan di Kabupaten Malang.

Bahan dan Metode

Lokasi Penelitian

Penelitian dilakukan di Kabupaten Malang, Provinsi Jawa Timur, yang terletak antara 7°44′–8°26′ LS dan 112°17′–112°57′ BT dengan luas sekitar 3.530 km² dan terbagi ke dalam 33 kecamatan. Wilayah ini beriklim monsun dengan musim kemarau yang umumnya berlangsung dari Mei atau Juni hingga September atau Oktober. Berdasarkan data CHIRPS periode 2001–2025, rerata curah hujan tahunannya mencapai 2.243 mm. Batas kecamatan diperoleh dari peta Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) Kabupaten Malang; diperoleh 33 unit analisis.

Data dan Pra-pemrosesan

Seluruh data diakses dan diolah melalui Google Earth Engine (Gorelick *et al.*, 2017). Penelitian ini memanfaatkan tiga jenis data penginderaan jauh dan satu data vektor batas administrasi (Tabel 1).

Tabel 1. Data yang digunakan dalam penelitian

Data	Produk, resolusi, dan periode	Kegunaan
Indeks vegetasi	MODIS Terra MOD13Q1 v6.1 (Didan, 2021); 250 m, 16 hari; 2001–2025	NDVI dan VCI
Curah hujan	CHIRPS Daily v2.0 (Funk *et al.*, 2015); 0,05°, harian; 1981–2025	SPI
Tutupan lahan	ESA WorldCover v200 (Zanaga *et al.*, 2022); 10 m; 2021	Masker lahan pertanian
Batas wilayah	Peta RTRW Kabupaten Malang; vektor	Unit analisis kecamatan

Data NDVI MOD13Q1 disaring menggunakan lapisan SummaryQA sehingga hanya piksel berkualitas baik dan marginal yang dipertahankan. Komposit NDVI bulanan disusun dengan metode maximum value composite untuk mengurangi pengaruh awan. Lahan pertanian ditentukan berdasarkan kelas cropland (kelas 40) pada *ESA WorldCover* 2021, yaitu lahan tanaman semusim yang ditanam dan dipanen setidaknya sekali dalam 12 bulan; tanaman tahunan berkayu seperti kebun dan agroforestri tidak termasuk dalam kelas ini (Zanaga et al., 2022). Piksel MODIS 250 m dikategorikan sebagai lahan pertanian apabila minimal 50% luasnya tergolong kelas cropland. Batas ini dipilih agar nilai NDVI piksel didominasi oleh tanaman pertanian dan pengaruh tutupan lain dalam piksel campuran dapat dikurangi. Peta WorldCover hanya tersedia untuk tahun 2020 dan 2021, dengan akurasi keseluruhan peta 2021 sebesar 76,7% (Zanaga et al., 2022), sehingga satu masker yang sama digunakan untuk seluruh periode 2001–2025. Konsekuensinya, lahan yang berubah fungsi selama periode pengamatan tetap diperlakukan sebagai lahan pertanian, dan hal ini menjadi keterbatasan metodologis penelitian. Curah hujan harian CHIRPS diakumulasikan menjadi curah hujan bulanan, lalu nilai VCI, NDVI, dan curah hujan bulanan dirata-ratakan untuk setiap kecamatan (*zonal statistics*). Tabel hasil ekstraksi dianalisis menggunakan R versi 4.6.1.

Vegetation Condition Index (VCI)

VCI dihitung untuk setiap piksel dan bulan dengan membandingkan NDVI pada bulan tersebut terhadap nilai minimum dan maksimum NDVI pada bulan kalender yang sama selama 2001–2025 (Kogan, 1995):

$$VCI_{\mathrm{i,m}} = \frac{NDVI_{\mathrm{i,m}} - NDVI_{\mathrm{min,m}}}{NDVI_{\mathrm{max,m}} - NDVI_{\mathrm{min,m}}} \times 100 \qquad \textbf{(1)}$$

$NDVI_{i,m}$ adalah NDVI pada tahun ke-*i* bulan ke-*m*, sedangkan $NDVI_{min,m}$ dan $NDVI_{max,m}$ adalah nilai NDVI terendah dan tertinggi pada bulan ke-*m* selama periode pengamatan. Nilai VCI berkisar antara 0 dan 100; semakin rendah nilainya, semakin buruk kondisi vegetasi dibandingkan dengan kondisi historisnya. Bulan dengan VCI kurang dari 35 dikategorikan sebagai bulan kering. Ambang ini mengikuti Kogan (1995, 1997), yang menunjukkan bahwa nilai indeks kondisi vegetasi di bawah 35–40 berkaitan dengan cekaman kekeringan dan penurunan hasil tanaman. Nilai 35 juga digunakan sebagai batas kritis dalam sistem pemantauan cekaman pertanian FAO (Rojas, Vrieling & Rembold, 2011), sehingga hasil penelitian ini dapat dibandingkan dengan kajian lain yang menggunakan ambang yang sama. Karena normalisasi dilakukan per bulan kalender, nilai VCI sudah terbebas dari pengaruh pola musiman pertumbuhan tanaman.

Standardized Precipitation Index (SPI)

SPI dihitung untuk setiap kecamatan pada skala waktu 1, 3, dan 6 bulan (SPI-1, SPI-3, dan SPI-6) menggunakan deret curah hujan bulanan CHIRPS 1981–2025 (McKee *et al.*, 1993). Curah hujan kumulatif dicocokkan dengan distribusi gamma berdasarkan periode acuan 1991–2020, kemudian peluang kumulatifnya ditransformasikan ke distribusi normal baku. Nilai SPI ≤ −1 menunjukkan kondisi kering. SPI-3 digunakan sebagai indikator utama kekeringan meteorologis karena mencerminkan ketersediaan air selama kurang lebih satu siklus pertumbuhan tanaman semusim.

Analisis Data

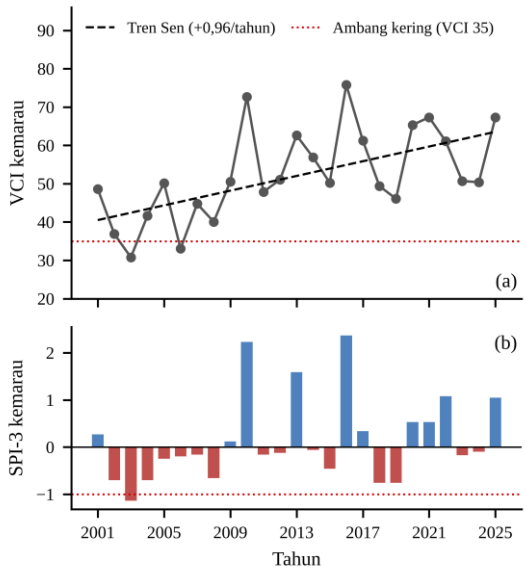
Analisis dilakukan dalam empat tahap. Pertama, frekuensi kekeringan pertanian setiap kecamatan dihitung sebagai persentase bulan dengan VCI < 35 terhadap seluruh bulan pengamatan dan bulan-bulan pada musim kemarau (Juni-September). Frekuensi kekeringan meteorologis dihitung dengan cara yang sama berdasarkan SPI-3 ≤ −1. Kedua, untuk setiap kecamatan dan untuk kabupaten disusun tiga deret tahunan, yaitu jumlah bulan kering, rerata VCI musim kemarau, dan curah hujan tahunan. Tren ketiga deret diuji dengan uji Mann–Kendall (Mann, 1945) dan besarnya diestimasi dengan Sen's slope (Sen, 1968) pada taraf nyata 5%. Karena deret tahunan berpotensi mengandung autokorelasi, hasil uji tren tingkat kabupaten diperiksa ulang dengan uji Mann–Kendall termodifikasi (Hamed & Rao, 1998).

Ketiga, respons vegetasi terhadap defisit hujan dikaji melalui korelasi peringkat Spearman antara VCI pada bulan *t* dengan SPI-1, SPI-3, dan SPI-6 pada bulan *t* hingga *t*−3, lalu korelasi setiap kecamatan dihitung pada kombinasi skala dan jeda terbaik. Keempat, konsistensi VCI sebagai indikator kekeringan diuji dengan mengorelasikan rerata VCI dan rerata SPI-3 musim kemarau tingkat kabupaten antar tahun (n = 25). Uji ini diulang pada residual regresi linear masing-masing deret terhadap tahun (*detrending*) untuk memastikan bahwa korelasi tidak semata-mata ditimbulkan oleh tren yang sama, kemudian autokorelasi lag-1 residualnya diperiksa untuk memastikan bahwa pengamatan antar tahun saling bebas.

Hasil dan Pembahasan

Dinamika Temporal Kekeringan Pertanian

Selama 2001–2025, kekeringan pertanian di Kabupaten Malang lebih banyak terjadi pada dekade pertama periode pengamatan (Gambar 1). Tahun 2003 merupakan tahun terkering, ditandai oleh rerata VCI musim kemarau sebesar 30,8 dan SPI-3 musim kemarau sebesar −1,14. Pada tahun tersebut hampir separuh kecamatan (48,5%) mengalami VCI di bawah ambang kering lebih dari separuh bulan kemarau. Kondisi kering yang cukup berat juga terjadi pada Tahun 2006, 2002, 2008, dan 2004. Setelah periode tersebut kekeringan pertanian semakin jarang; rerata jumlah bulan kering per tahun turun dari 2,9 bulan pada 2001–2008 menjadi 0,8 bulan pada 2017–2025. Kondisi vegetasi terbaik tercatat pada 2016 dan 2010, yang sekaligus merupakan tahun dengan curah hujan tahunan tertinggi, yaitu sekitar 3.240 mm dan 3.500 mm.



Gambar 1. Rerata VCI musim kemarau (a) dan SPI-3 musim kemarau (b) Kabupaten Malang, 2001–2025

Tahun El Niño kuat 2015 dan 2023 tidak tergolong kering, baik menurut VCI musim kemarau (sekitar 50) maupun SPI-3 Juni–September (−0,46 dan −0,17). Sebaliknya, kekeringan pertanian pada 2006 terjadi ketika SPI-3 musim kemarau mendekati normal (−0,20). Kondisi vegetasi yang baik pada periode

akhir pengamatan juga bertepatan dengan rangkaian tahun basah 2020-2022, saat SPI-3 musim kemarau bernilai positif (Gambar 1).

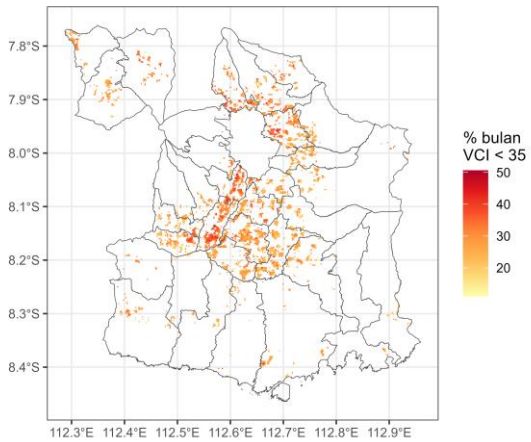
Tren Kekeringan Pertanian dan Curah Hujan

Pada tingkat kabupaten, jumlah bulan kering berkurang nyata sebesar 0,088 bulan per tahun (τ = −0,392; p = 0,007), atau sekitar 2,2 bulan selama 25 tahun, sementara rerata VCI musim kemarau meningkat nyata sebesar 0,96 per tahun (τ = 0,440; p = 0,002). Curah hujan tahunan cenderung meningkat sekitar 26 mm per tahun, tetapi kecenderungan ini tidak nyata pada taraf 5% (p = 0,080). Uji Mann-Kendall termodifikasi Hamed-Rao, yang mengkoreksi autokorelasi deret (koefisien autokorelasi lag-1 sebesar 0,45 untuk jumlah bulan kering dan 0,37 untuk VCI musim kemarau), memberikan Kesimpulan yang sama (p=0,007 dan p=0,002). Pada tingkat kecamatan, penurunan jumlah bulan kering nyata di 21 kecamatan dan peningkatan VCI musim kemarau nyata di 26 kecamatan, sedangkan tren curah hujan tahunan hanya nyata di enam kecamatan, yaitu Jabung, Kasembon, Ngantang, Pujon, Wagir, dan Wajak. Tujuh kecamatan tidak menunjukkan tren VCI yang nyata, yaitu Dau, Karangploso, Kasembon, Kepanjen, Ngajum, Pakisaji, dan Wagir (Tabel 2).

Pola Spasial Kekeringan Pertanian

Frekuensi kekeringan pertanian sangat bervariasi antarkecamatan, dari terendah di Kromengan hingga tertinggi di Kalipare, dengan rerata 12,7% dari seluruh bulan pengamatan (Tabel 2). Pada musim kemarau, kekeringan pertanian di Kalipare, Gedangan, dan Pujon terjadi pada hampir sepertiga bulan. Sebaliknya, frekuensi kekeringan meteorologis relatif seragam di seluruh kecamatan, dan frekuensi kekeringan pertanian tidak berkorelasi dengan curah hujan tahunan (ρ = −0,09). Kecamatan dengan frekuensi tertinggi membentuk dua kelompok, yaitu kecamatan di Malang Selatan (Kalipare, Donomulyo, Gedangan, Tirtoyudo, dan Sumbermanjing Wetan) serta kecamatan dataran tinggi di barat laut (Pujon dan Dau) yang justru menerima curah hujan tahunan tertinggi. Frekuensi terendah dijumpai di Kromengan, Sumberpucung, dan Pagak.

Pada tingkat piksel (Gambar 2), frekuensi kekeringan pertanian berkisar antara 10 dan 50% dan terkonsentrasi pada dua sabuk lahan pertanian intensif, yaitu koridor tengah di selatan hingga barat daya Kota Malang dan sabuk utara–timur laut di kaki Gunung Arjuno. Nilai pada tingkat piksel lebih tinggi daripada nilai kecamatan karena perhitungan kecamatan menggunakan rerata VCI seluruh piksel pertanian, sehingga kekeringan yang bersifat lokal teredam oleh piksel di sekitarnya. Piksel lahan pertanian di Malang Selatan juga relatif jarang.



Gambar 2. Frekuensi kekeringan pertanian (persentase bulan dengan VCI < 35) pada piksel lahan pertanian MODIS 250 m di Kabupaten Malang, 2001–2025

Tabel 2. Frekuensi kekeringan, tren, dan respons VCI per kecamatan di Kabupaten Malang (2001–2025), diurutkan dari frekuensi kekeringan pertanian tertinggi

No	Kecamatan	Bulan VCI < 35 (%)	Kemarau VCI < 35 (%)	Bulan SPI-3 ≤ −1 (%)	Hujan tahunan (mm)	Tren VCI kemarau (/tahun)	ρ VCI–SPI-1
1	Kalipare	22,1	31	10,5	2.305	1,61*	0,45
2	Donomulyo	20,3	24	10,2	2.094	1,79*	0,45
3	Gedangan	19,5	30	10,1	1.877	1,38*	0,48
4	Pujon	19,5	31	10,8	2.671	1,25*	0,50
5	Dau	19,4	21	10,1	2.585	−0,11	0,31

No	Kecamatan	Bulan VCI < 35 (%)	Kemarau VCI < 35 (%)	Bulan SPI-3 ≤ −1 (%)	Hujan tahunan (mm)	Tren VCI kemarau (/tahun)	ρ VCI–SPI-1
6	Tirtoyudo	18,6	21	10,5	1.874	1,02*	0,33
7	Jabung	16,5	19	10,4	2.299	1,37*	0,46
8	Gondanglegi	15,3	20	9,8	2.085	1,14*	0,49
9	Sumbermanjing Wetan	14,8	16	10,4	1.880	1,36*	0,36
10	Poncokusumo	14,5	22	10,1	2.459	1,79*	0,38
11	Ngajum	13,9	13	10,2	2.456	0,41	0,21
12	Bululawang	13,9	19	10,1	2.156	0,81*	0,43
13	Tumpang	13,8	21	10,4	2.258	1,43*	0,44
14	Tajinan	13,2	19	10,2	2.183	1,16*	0,40
15	Pakisaji	13,1	20	10,4	2.251	0,11	0,18
16	Kepanjen	12,8	15	9,8	2.214	0,40	0,09
17	Wajak	12,5	12	10,1	2.152	1,36*	0,42
18	Pakis	12,4	20	10,7	2.268	0,82*	0,48
19	Wonosari	12,2	13	10,2	2.558	0,92*	0,24
20	Kasembon	11,9	13	11,2	2.316	0,56	0,40
21	Turen	11,9	12	10,2	1.996	1,15*	0,46
22	Bantur	11,8	14	10,1	1.963	1,25*	0,46
23	Lawang	11,7	12	11,1	2.299	0,84*	0,42
24	Ngantang	10,0	14	10,0	2.648	0,99*	0,35
25	Wagir	9,6	8	9,9	2.439	0,45	0,23
26	Pagelaran	9,5	9	10,1	2.085	0,72*	0,41
27	Singosari	9,4	15	11,1	2.380	0,81*	0,47
28	Dampit	8,1	9	9,7	1.915	0,78*	0,43
29	Pagak	7,2	6	10,9	2.085	0,95*	0,35
30	Sumberpucung	7,1	7	10,5	2.316	0,88*	0,31
31	Ampelgading	5,1	4	9,5	1.964	0,93*	0,39
32	Karangploso	4,4	5	10,8	2.486	0,26	0,44
33	Kromengan	4,1	4	10,1	2.488	0,76*	0,29

Keterangan: * tren nyata pada uji Mann–Kendall ($p < 0,05$); kemarau = Juni–September; ρ = koefisien korelasi Spearman antara VCI dan SPI-1 pada bulan yang sama.

Respons Vegetasi terhadap Defisit Curah Hujan

Hubungan antara VCI dan SPI paling kuat pada bulan yang sama dan berangsur melemah seiring bertambahnya jeda waktu hingga tiga bulan, baik pada SPI-1, SPI-3, maupun SPI-6 (Tabel 3). Korelasi pada SPI-1 dan SPI-3 tanpa jeda hampir setara, sedangkan SPI-6 menghasilkan korelasi yang lebih lemah. Kekuatan respons juga berbeda antar kecamatan (Tabel 2). Korelasi terlemah dijumpai di Kepanjen, Pakisaji, Ngajum, dan Wagir, sedangkan yang terkuat di Pujon.

Tabel 3. Koefisien korelasi Spearman (ρ) antara VCI dan SPI pada jeda waktu 0–3 bulan

Skala SPI	Jeda 0	Jeda 1	Jeda 2	Jeda 3
SPI-1	0,375	0,307	0,231	0,183
SPI-3	0,370	0,294	0,246	0,193
SPI-6	0,314	0,246	0,208	0,160

Keterangan: jeda dalam bulan; seluruh nilai nyata pada $p < 0,001$.

Konsistensi VCI dan SPI

Pada skala antartahun, rerata VCI musim kemarau berkorelasi sangat kuat dengan rerata SPI-3 musim kemarau ($\rho = 0,863$; $p < 0,001$; $n = 25$), dan korelasi ini tetap tinggi setelah tren linear pada kedua deret dihilangkan ($\rho = 0,833$; $p < 0,001$). Autokorelasi lag-1 residual kedua deret mendekati nol (0,006 untuk VCI dan -0,03 untuk SPI-3).

Pembahasan

Kekeringan Pertanian dan Variabilitas Iklim

Tidak tergolongnya tahun 2015 dan 2023 sebagai tahun kering berbeda dengan laporan Amalo *et al.* (2018) yang mencatat kekeringan pertanian sekitar lima bulan di Jawa Timur pada 2015 berdasarkan VHI. Perbedaan tersebut dapat dipahami dari dua sisi. Pertama, pengaruh El

Niño dan IOD positif terhadap curah hujan di Jawa umumnya memuncak pada Agustus–Oktober dan menunda awal musim hujan (Siswanto *et al.*, 2022; Rais *et al.*, 2026), sedangkan jendela kemarau dalam penelitian ini adalah Juni–September, ketika curah hujan normal di Kabupaten Malang memang sudah sangat rendah sehingga defisit tambahan tidak banyak mengubah nilai SPI. Kedua, VHI memasukkan komponen cekaman suhu yang tidak tercakup dalam VCI. Kekeringan pertanian pada 2006 yang terjadi saat SPI-3 mendekati normal mengisyaratkan bahwa kondisi tanaman pada musim kemarau juga dipengaruhi oleh cadangan lengas dari musim hujan sebelumnya serta oleh pengelolaan lahan.

Faktor Pengendali Tren Kekeringan Pertanian

Penurunan kekeringan pertanian terjadi ketika tren curah hujan tahunan tidak nyata. Hal ini menunjukkan bahwa membaiknya VCI musim kemarau tidak dapat dijelaskan oleh total hujan tahunan saja. Terdapat beberapa kemungkinan penyebab yang belum diuji secara langsung dalam penelitian ini. Pertama, curah hujan tahunan tidak menggambarkan sebaran hujan antarmusim. Periode akhir pengamatan diwarnai oleh La Niña berturut-turut pada 2020–2023 yang meningkatkan curah hujan Juni–November di sebagian wilayah Indonesia, termasuk Jawa bagian barat (Destyano *et al*., 2025), dan hal ini sejalan dengan SPI-3 musim kemarau yang bernilai positif pada 2020–2022.

Kedua, perbaikan pengelolaan air dan budidaya, seperti perluasan irigasi, intensifikasi pola tanam, dan penggunaan varietas yang lebih adaptif, dapat meningkatkan kehijauan tanaman pada musim kemarau. Di lahan pertanian kering Tiongkok utara, irigasi meredam sekitar 60% dampak negatif kekeringan terhadap produktivitas vegetasi (Zhu et al., 2021), dan di kawasan irigasi Hetao, irigasi mempercepat kenaikan NDVI sekaligus melemahkan ketergantungan vegetasi pada curah hujan (Zhou et al., 2026). Ketiga, penggunaan masker lahan pertanian tahun 2021 untuk seluruh periode dapat ikut memengaruhi tren, karena piksel yang baru diusahakan secara intensif pada periode akhir akan tampak semakin hijau. Pemisahan peran ketiga faktor tersebut memerlukan data irigasi, pola tanam, dan perubahan tutupan lahan tahunan.

Sebagian besar kecamatan tanpa tren VCI yang nyata berbatasan dengan Kota Malang atau berada di koridor pertumbuhan permukiman, tempat alih fungsi lahan pertanian diduga berlangsung pesat. Di Desa Karangwidoro, Kecamatan Dau, sekitar 193 ha lahan pertanian telah berubah menjadi permukiman selama 2003–2017 (Haris *et al.*, 2018). Tekanan alih fungsi lahan semacam ini dapat menahan kenaikan indeks vegetasi meskipun kondisi iklim membaik.

Karakteristik Lahan dan Kerawanan Kekeringan

Frekuensi kekeringan pertanian yang tidak berkaitan dengan curah hujan tahunan menunjukkan bahwa perbedaan kerawanan antarkecamatan tidak dapat dijelaskan oleh jumlah hujan. Penelitian ini belum menguji faktor tanah, topografi, dan irigasi secara statistik, sehingga penjelasan berikut merupakan kemungkinan interpretasi yang didukung oleh kajian terdahulu. Kecamatan rawan di Malang Selatan sebagian wilayahnya merupakan bentang lahan karst (Sahrina *et al.,* 2022). Lahan pertanian di kawasan ini umumnya berupa lahan kering tadah hujan, sehingga ketersediaan air bagi tanaman sangat bergantung pada hujan yang baru turun dan tanaman lebih cepat tertekan ketika hujan berkurang.

Kecamatan rawan di barat laut kemungkinan menghadapi persoalan yang berbeda. Lahan pertanian di Pujon dan Ngantang berada pada lereng kompleks gunung api, dan lebih dari 35% wilayahnya tergolong rawan longsor (Zairina *et al.,* 2025). Pada lahan miring, sebagian hujan berpotensi hilang sebagai limpasan permukaan. Cahya *et al.* (2025) menunjukkan bahwa kemiringan lereng meningkatkan dan tutupan lahan menurunkan koefisien limpasan di Sub DAS Brantas Hulu, sehingga air yang tersedia bagi tanaman dapat lebih kecil daripada yang ditunjukkan oleh total hujan. Di Dau, tingginya frekuensi VCI rendah diduga juga berkaitan dengan alih fungsi lahan (Haris *et al.,* 2018), karena hilangnya vegetasi akibat konversi terbaca sebagai penurunan VCI. Sebaliknya, rendahnya frekuensi kekeringan di Kromengan, Sumberpucung, dan Pagak kemungkinan berkaitan dengan letaknya di

sekitar Waduk Karangkates dan jaringan irigasi Brantas.

Jarangnya piksel lahan pertanian di Malang Selatan disebabkan oleh lahan kering campuran dan agroforestri di wilayah ini yang banyak terklasifikasi sebagai tutupan pohon atau semak pada ESA WorldCover. Oleh karena itu, nilai kecamatan di wilayah selatan dihitung dari jumlah piksel yang lebih sedikit dan sebaiknya ditafsirkan bersama informasi lapang. Untuk menguji interpretasi tersebut, penelitian lanjutan perlu menghubungkan frekuensi kekeringan setiap kecamatan dengan data jenis tanah, kemiringan lereng, dan luas lahan beririgasi melalui analisis regresi dan spasial.

Respons Vegetasi dan Peran Irigasi

Respons vegetasi yang paling kuat pada bulan yang sama menunjukkan bahwa lahan pertanian di Kabupaten Malang bereaksi cepat terhadap defisit hujan jangka pendek. Hal ini kemungkinan berkaitan dengan dominasi tanaman semusim berakar dangkal yang sangat bergantung pada lengas tanah lapisan atas. Temuan ini sejalan dengan Sun *et al.* (2024) yang melaporkan bahwa NDVI lahan pertanian di sebagian wilayah Tiongkok merespons curah hujan dalam satu hingga tiga bulan. Jeda tersebut lebih pendek dibandingkan dengan di hilir DAS Citarum dan Kabupaten Karawang, tempat kekeringan pertanian baru muncul dua hingga tiga bulan setelah kekeringan meteorologis karena adanya penyangga air irigasi dari waduk (Dimyati *et al.*, 2024; Rais *et al.*, 2026).

Lemahnya korelasi di Kepanjen, Pakisaji, Ngajum, dan Wagir diduga berkaitan dengan sebagian lahannya yang dilayani jaringan irigasi, termasuk Daerah Irigasi Molek di Kepanjen (Limantara & Narulita, 2019). Di lahan beririgasi, pasokan air tidak sepenuhnya bergantung pada hujan, sehingga hubungan antara indeks kekeringan dan kondisi tanaman menjadi lebih lemah dibandingkan dengan di lahan tadah hujan (Zhu *et al.*, 2021; Zhou *et al.*, 2026). Di wilayah seperti ini, VCI lebih tepat dibaca sebagai indikator kondisi pertanaman yang juga dipengaruhi jadwal irigasi dan masa bera.

Korelasi bulanan (ρ = 0,375) jauh lebih rendah daripada korelasi antartahun (ρ = 0,863) karena keduanya mengukur hal yang berbeda. Korelasi bulanan dihitung dari setiap pasangan kecamatan dan bulan, sehingga ikut memuat variasi yang tidak berkaitan dengan hujan, seperti waktu tanam dan panen, masa bera, gangguan awan pada citra, dan pemberian air irigasi. Korelasi antartahun menggunakan rerata musim kemarau tingkat kabupaten, sehingga variasi lokal tersebut saling meredam dan yang tersisa terutama sinyal iklim antartahun. Selain itu, data bulanan mengandung autokorelasi temporal.

Nilai VCI cenderung bertahan dari satu bulan ke bulan berikutnya, SPI-3 dan SPI-6 disusun dari jendela waktu yang tumpang tindih, dan data kecamatan yang berdekatan juga saling berkorelasi. Akibatnya, jumlah pengamatan yang benar-benar bebas jauh lebih kecil daripada sekitar 9.700 pasangan data, sehingga nilai $p < 0,001$ pada Tabel 3 cenderung terlalu optimistis. Oleh karena itu, hasil bulanan lebih tepat dibaca dari besaran dan pola korelasinya, yaitu paling kuat pada bulan yang sama dan melemah seiring bertambahnya jeda, bukan dari tingkat signifikansinya. Pada skala antartahun, autokorelasi residual setelah detrending mendekati nol, sehingga korelasi sebesar 0,833 tidak dipengaruhi oleh ketergantungan antartahun.

Keandalan VCI dan Implikasi bagi Mitigasi

Korelasi antartahun yang tetap kuat setelah *detrending* menunjukkan bahwa VCI benar-benar menangkap naik-turunnya kekeringan dari tahun ke tahun, bukan sekadar mengikuti tren jangka panjang yang kebetulan sama dengan curah hujan. Kesesuaian yang kuat antara indeks vegetasi berbasis MODIS dan indeks curah hujan juga dilaporkan oleh de Lima *et al.* (2023) di wilayah semi-arid Brasil. Karena penelitian ini tidak menggunakan data lapang, SPI dari data CHIRPS yang telah tervalidasi di DAS Lesti (Auliyani *et al.*, 2021) berperan sebagai pembanding independen yang memperkuat keandalan VCI.

Hasil ini dapat dimanfaatkan sebagai dasar awal dalam menentukan wilayah prioritas mitigasi kekeringan pertanian di Kabupaten Malang. Kecamatan dengan frekuensi kekeringan tertinggi, yaitu Kalipare, Donomulyo, Gedangan, Pujon, Dau, dan Tirtoyudo, perlu mendapat perhatian lebih dalam pemantauan dan perencanaan pengelolaan air. Bentuk intervensi yang sesuai, seperti embung, sumur dangkal, mulsa, penyesuaian kalender

tanam, atau tindakan konservasi tanah dan air, perlu ditentukan melalui kajian lapang di setiap kecamatan karena faktor penyebab kekeringan belum diuji dalam penelitian ini. Respons vegetasi yang terjadi pada bulan yang sama menunjukkan bahwa SPI-1 dan SPI-3 dari data CHIRPS, yang tersedia hampir waktu nyata, berpotensi digunakan sebagai indikator awal dalam sistem peringatan dini kekeringan.

Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, satu piksel MODIS 250 m mencakup sekitar 6,25 ha, lebih luas daripada sebagian besar petak lahan pertanian di Kabupaten Malang, sehingga banyak piksel berisi campuran sawah, tegalan, permukiman, dan vegetasi lain. Pada wilayah dengan lahan pertanian yang terfragmentasi, kondisi ini dapat membuat kekeringan pada petak kecil tidak terdeteksi, atau sebaliknya, penurunan VCI akibat tutupan nonpertanian terbaca sebagai kekeringan. Kedua, masker lahan pertanian bersifat statis (kondisi 2021). Lahan yang beralih fungsi selama 2001–2025 tetap dianalisis sebagai lahan pertanian, sehingga ketepatan identifikasi kekeringan dapat menurun, terutama di kecamatan sekitar Kota Malang yang mengalami konversi lahan. Ketiga, VCI belum dapat membedakan penurunan kehijauan akibat kekeringan dari penurunan akibat panen, bera, atau alih fungsi lahan, dan hasil penelitian belum divalidasi dengan data luas tanaman puso tingkat kecamatan. Keempat, faktor tanah, topografi, dan irigasi belum dianalisis secara kuantitatif. Penelitian lanjutan disarankan memanfaatkan citra Sentinel-2 atau Landsat, menggunakan masker lahan pertanian tahunan, menggabungkan VCI dengan indeks suhu permukaan menjadi VHI, serta memvalidasi hasil dengan data kekeringan tanaman dari Dinas Pertanian.

Kesimpulan

Kekeringan pertanian di Kabupaten Malang cenderung menurun selama 2001–2025. Jumlah bulan kering berkurang dan VCI musim kemarau meningkat secara nyata, sedangkan tren curah hujan tahunan tidak nyata. Kekeringan terberat terjadi pada 2003. Frekuensi kekeringan pertanian sangat beragam antarkecamatan dan tidak berkaitan dengan jumlah curah hujan tahunan; frekuensi tertinggi dijumpai di Kalipare, Donomulyo, Gedangan, Pujon, Dau, dan Tirtoyudo. Vegetasi lahan pertanian merespons defisit hujan pada bulan yang sama, dan korelasi VCI dengan SPI-3 antartahun tetap kuat setelah tren dihilangkan. Dengan demikian, VCI berbasis MODIS layak digunakan untuk memantau kekeringan pertanian tingkat kecamatan di wilayah dengan data lapang terbatas. Kecamatan dengan frekuensi kekeringan tertinggi dapat dijadikan prioritas pemantauan dan kajian lapang untuk merancang bentuk mitigasi yang sesuai, sedangkan SPI dari data CHIRPS berpotensi dikembangkan sebagai indikator peringatan dini.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada NASA Land Processes Distributed Active Archive Center, Climate Hazards Center University of California Santa Barbara, dan European Space Agency atas penyediaan data MODIS, CHIRPS, dan WorldCover secara terbuka, serta kepada Google atas akses platform Google Earth Engine.

Referensi

Amalo, L. F., Hidayat, R., & Sulma, S. (2018). Analysis of agricultural drought in East Java using vegetation health index. *AGRIVITA Journal of Agricultural Science, 40*(1), 63–73. https://doi.org/10.17503/agrivita.v40i1.1080

Auliyani, D., & Wahyuningrum, N. (2021). Rainfall variability based on the Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station Data (CHIRPS) in Lesti watershed, Java Island, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 874*, Article 012003. https://doi.org/10.1088/1755-1315/874/1/012003

Beguería, S., & Vicente-Serrano, S. M. (2023). *SPEI: Calculation of the standardized precipitation-evapotranspiration index* [R package]. https://CRAN.R-project.org/package=SPEI

Cahya, U. T. W., Utomo, W. H., Nugroho, W. H., & Suharyanto, A. (2025). Effects of land cover, slope, and soil physical properties on runoff coefficient in Upper Brantas Sub-watershed. *Journal of Degraded and Mining Lands Management, 12*(5), 8593–8603. https://doi.org/10.15243/jdmlm.2025.125.8593

de Lima, S. C., Dantas Neto, J., Lima, J. P., de Lima, F. C., & Saboya, L. M. F. (2023). Response of semi-arid vegetation to agricultural drought determined by indices derived from MODIS satellite. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 27*(8), 632–642. https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v27n8p632-642

Destyano, G. D., Wirasatriya, A., Zainuri, M., Wijaya, Y. J., Munandar, B., & Helmi, M. (2025). Comparison of triple-dip La Niña in 2020–2023 with strong and weak La Niña events on Indonesian rainfall and SST. *Geographia Technica, 20*(2), 319–335. https://doi.org/10.21163/GT_2025.202.20

Didan, K. (2021). *MODIS/Terra vegetation indices 16-day L3 global 250m SIN grid V061*. NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center. https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13Q1.061

Dimyati, M., Rustanto, A., Shidiq, I. P. A., Indratmoko, S., Siswanto, Dimyati, R. D., Nurlambang, T., Zubair, A., Fakhruddin, A., Siddiq, A., Adhanto, D. H., Maulidina, K., & Auni, R. (2024). Spatiotemporal relation of satellite-based meteorological to agricultural drought in the downstream Citarum watershed, Indonesia. *Environmental and Sustainability Indicators, 22*, Article 100339. https://doi.org/10.1016/j.indic.2024.100339

Faisol, A., Indarto, I., Novita, E., & Budiyono, B. (2022). Assessment of agricultural drought based on CHIRPS data and SPI method over West Papua – Indonesia. *Journal of Water and Land Development, 52*, 44–52. https://doi.org/10.24425/jwld.2021.139942

Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—A new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data, 2*, Article 150066. https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66

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. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031

Ha, T. V., Uereyen, S., & Kuenzer, C. (2023). Agricultural drought conditions over mainland Southeast Asia: Spatiotemporal characteristics revealed from MODIS-based vegetation time-series. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 121*, Article 103378. https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103378

Hamed, K. H., & Rao, A. R. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology, 204*(1–4), 182–196. https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X

Haris, A., Subagio, L. B., Santoso, F., & Wahyuningtyas, N. (2018). Identifikasi alih fungsi lahan pertanian dan kondisi sosial ekonomi masyarakat Desa Karangwidoro Kecamatan Dau Kabupaten Malang. *Media Komunikasi Geografi, 19*(1), 114–120. https://ejournal.undiksha.ac.id/index.php/MKG/article/view/13967

Kogan, F. N. (1995). Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research, 15*(11), 91–100. https://doi.org/10.1016/0273-1177(95)00079-T

Kogan, F. N. (1997). Global drought watch from space. *Bulletin of the American Meteorological Society, 78*(4), 621–636. https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<0621:GDWFS>2.0.CO;2

Limantara, L. M., & Narulita, S. (2019). Optimization of water allocation at irrigation area of Molek-Kepanjen

Regency of Indonesia using dynamic programming. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering, 8*(11), 850–855. https://doi.org/10.35940/ijitee.K1534.0981119

Ma'ruf, A., Astuti, I. S., & Masitoh, F. (2023). Penilaian kekeringan meteorologi menggunakan metode SPI dengan citra satelit CHIRPS di Kabupaten Tulungagung. *Jurnal Integrasi dan Harmoni Inovatif Ilmu-Ilmu Sosial, 3*(6), 682–696. https://doi.org/10.17977/um063v3i6p682-696

Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica, 13*(3), 245–259. https://doi.org/10.2307/1907187

McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology* (pp. 179–184). American Meteorological Society. https://clima.cptec.inpe.br/pdfs/paper_spi.pdf

Mulyanti, H., Istadi, I., & Gernowo, R. (2023). Historical, recent, and future threat of drought on agriculture in East Java, Indonesia: A review. *E3S Web of Conferences, 448*, Article 03016. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202344803016

Naylor, R. L., Falcon, W. P., Rochberg, D., & Wada, N. (2001). Using El Niño/Southern Oscillation climate data to predict rice production in Indonesia. *Climatic Change, 50*(3), 255–265. https://doi.org/10.1023/A:1010662115348

Pohlert, T. (2023). *trend: Non-parametric trend tests and change-point detection* [R package]. https://CRAN.R-project.org/package=trend

Pratiwi, E. P. A., Murti, C. K. W., & Widiastuti, E. I. (2023). Assessment of the 2015 and 2019 droughts in the rice agriculture sector in Java. In *Proceedings of the International Conference on Sustainable Environment, Agriculture and Tourism (ICOSEAT 2022)* (pp. 352–359). Atlantis Press. https://doi.org/10.2991/978-94-6463-086-2_46

Rais, A. F., Sari, M. M., & Asminar. (2026). A comparative study of the effects of the Indian Ocean Dipole and the El Niño in 2019 and 2023 on agricultural drought in Karawang Regency, Indonesia. *MAUSAM, 77*(2), 601–612. https://doi.org/10.54302/mausam.v77i2.6750

Rojas, O., Vrieling, A., & Rembold, F. (2011). Assessing drought probability for agricultural areas in Africa with coarse resolution remote sensing imagery. *Remote Sensing of Environment, 115*(2), 343–352. https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.09.006

Sahrina, A., Safitri, F. D., Withuda, F. A., Satriyo, A., & Gabriele, M. T. (2022). Use of karst caves in Malang Regency and the possible challenges to their existence. *KnE Social Sciences, 7*(16), 438–449. https://doi.org/10.18502/kss.v7i16.12187

Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association, 63*(324), 1379–1389. https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934

Siswanto, S., Wardani, K. K., Purbantoro, B., Rustanto, A., Zulkarnain, F., Anggraheni, E., Dewanti, R., Nurlambang, T., & Dimyati, M. (2022). Satellite-based meteorological drought indicator to support food security in Java Island. *PLOS ONE, 17*(6), Article e0260982. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0260982

Sun, Y., Zhong, H., Ding, Y., Cai, H., & Peng, X. (2024). Exploring the diverse response of cropland vegetation to climatic factors and irrigation across China. *Agronomy, 14*(1), Article 188. https://doi.org/10.3390/agronomy14010188

Surmaini, E., Hadi, T. W., Subagyono, K., & Puspito, N. T. (2015). Early detection of drought impact on rice paddies in Indonesia by means of Niño 3.4 index. *Theoretical and Applied Climatology, 121*, 669–684. https://doi.org/10.1007/s00704-014-1258-0

Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). Understanding the drought phenomenon:

The role of definitions. *Water International, 10*(3), 111–120. https://doi.org/10.1080/02508068508686328

Zairina, A., Soemarno, Rachmansyah, A., Yanuwiadi, B., Purwanti, G. A., Leksono, A. S., & Abdullah, S. A. (2025). Sustainability of agricultural land management in critical areas in Malang Regency, Indonesia. *Malaysian Journal of Science, 44*(4), 31–39. https://doi.org/10.22452/mjs.vol44no4.4

Zanaga, D., Van De Kerchove, R., Daems, D., De Keersmaecker, W., Brockmann, C., Kirches, G., Wevers, J., Cartus, O., Santoro, M., Fritz, S., Lesiv, M., Herold, M., Tsendbazar, N.-E., Xu, P., Ramoino, F., & Arino, O. (2022). *ESA WorldCover 10 m 2021 v200* [Data set]. Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.7254221

Zhou, X., He, M., Tong, X., Liu, T., Duan, L., Liu, X., Li, J., Ji, J., Zhu, G., & Singh, V. P. (2026). Irrigation reshapes vegetation dynamics and their environmental controls in the Hetao Irrigation District watershed, Inner Mongolia, China. *Land, 15*(5), Article 892. https://doi.org/10.3390/land15050892

Zhu, X., Liu, Y., Xu, K., & Pan, Y. (2021). Effects of drought on vegetation productivity of farmland ecosystems in the drylands of northern China. *Remote Sensing, 13*(6), Article 1179. https://doi.org/10.3390/rs13061179