



PEMANFAATAN DRONE DAN CITRA SATELIT UNTUK ANALISIS PERTUMBUHAN TANAMAN DAN MANAJEMEN HAMA

Luluk¹⁾

¹⁾ Agroteknologi , Fakultas Pertanian, Universitas Trunojoyo, Madura, Indonesia
Email: luluk111@gmail.com

Abstract

The rapid development of remote sensing technologies has opened new opportunities for precision agriculture, particularly in monitoring crop growth and managing pest outbreaks. This study explores the integration of unmanned aerial vehicles (drones) and satellite imagery to analyze vegetation health and detect pest infestations in paddy fields. Multispectral drone data and Sentinel-2 imagery were processed to generate vegetation indices such as NDVI and EVI, which serve as indicators of plant physiological status. Field validation confirmed that anomalies in vegetation indices corresponded with pest attacks, particularly brown planthoppers and stem borers, as well as environmental stress factors such as drought and nutrient deficiencies. The results indicate that drones provide high-resolution data capable of capturing micro-variations within small-scale fields, while satellites offer broader coverage and temporal consistency. The integration of both data sources, combined with Geographic Information System (GIS) analysis, enabled the creation of spatial distribution maps for crop growth and pest occurrence. These maps facilitate site-specific management strategies, improving the efficiency of fertilizer and pesticide application, and supporting sustainable agricultural practices. Overall, this research highlights the strategic role of drones and satellite imagery in advancing precision farming in Indonesia. Despite challenges such as operational costs and technical capacity, the findings demonstrate the potential of remote sensing technologies to enhance productivity, reduce risks, and strengthen national food security. Future directions include the application of artificial intelligence and machine learning to further optimize remote sensing-based agricultural monitoring systems.

Keywords: Drone, Satellite Imagery, Precision Agriculture, Crop Monitoring, Pest Management

Abstrak

Perkembangan teknologi penginderaan jauh telah membuka peluang baru bagi pertanian presisi, khususnya dalam pemantauan pertumbuhan tanaman dan pengelolaan serangan hama. Penelitian ini mengeksplorasi integrasi antara pesawat tanpa awak (drone) dan citra satelit untuk menganalisis kesehatan vegetasi serta mendeteksi infestasi hama pada tanaman padi. Data multispektral dari drone dan citra Sentinel-2 diproses untuk menghasilkan indeks vegetasi seperti NDVI dan EVI yang berfungsi sebagai indikator status fisiologis tanaman. Validasi lapangan mengonfirmasi bahwa anomali pada nilai indeks vegetasi berkorelasi dengan serangan hama, khususnya wereng coklat dan penggerek batang, serta faktor stres lingkungan seperti kekeringan dan kekurangan nutrisi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa drone mampu memberikan data beresolusi tinggi yang dapat menangkap variasi mikro antarpetak lahan, sementara citra satelit memberikan cakupan luas dengan konsistensi temporal yang baik. Integrasi keduanya, yang dipadukan dengan analisis Sistem Informasi Geografis (SIG), memungkinkan pembuatan peta distribusi pertumbuhan tanaman dan sebaran hama. Peta ini bermanfaat dalam perumusan strategi manajemen berbasis lokasi spesifik sehingga penggunaan pupuk dan pestisida dapat lebih efisien serta mendukung praktik pertanian berkelanjutan. Secara keseluruhan, penelitian ini menegaskan peran strategis drone dan citra satelit dalam mendorong pertanian presisi di Indonesia. Meskipun terdapat tantangan seperti biaya operasional dan keterbatasan kapasitas teknis, temuan ini membuktikan potensi teknologi penginderaan jauh untuk meningkatkan produktivitas, mengurangi risiko, serta memperkuat ketahanan pangan nasional. Arah penelitian ke depan mencakup pemanfaatan kecerdasan buatan dan machine learning untuk lebih mengoptimalkan sistem pemantauan berbasis penginderaan jauh dalam mendukung pertanian modern.

Kata Kunci: Drone, Citra Satelit, Pertanian Presisi, Pemantauan Tanaman, Manajemen Hama



PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi digital dalam sektor pertanian telah menghadirkan peluang baru untuk meningkatkan produktivitas sekaligus efisiensi lahan. Salah satu terobosan yang semakin banyak dimanfaatkan adalah penggunaan drone dan citra satelit sebagai alat pemantauan pertumbuhan tanaman secara real-time. Teknologi ini memungkinkan petani dan peneliti memperoleh data spasial yang akurat, sehingga pengelolaan pertanian dapat dilakukan secara presisi (Zhang et al., 2019). Transformasi digital ini juga mendukung praktik pertanian modern yang lebih adaptif terhadap perubahan iklim dan kebutuhan pangan global.

Drone dengan sensor multispektral dan hiperspektral dapat memberikan informasi detail mengenai kondisi fisiologis tanaman, seperti tingkat klorofil, kelembaban, hingga deteksi stres tanaman. Informasi ini sangat penting untuk menentukan pola pemupukan dan irigasi yang lebih tepat sasaran (Hunt et al., 2018). Di sisi lain, citra satelit berperan dalam pemantauan skala luas, misalnya dalam mendeteksi perubahan vegetasi, produktivitas tanaman, serta pergerakan hama dan penyakit tanaman (Arvor et al., 2013). Kombinasi keduanya memungkinkan pemetaan kondisi lahan secara komprehensif, baik di tingkat mikro maupun makro.

Selain untuk pertumbuhan tanaman, teknologi ini juga relevan dalam manajemen hama. Deteksi dini serangan hama melalui perubahan pola spektral daun dapat membantu petani melakukan tindakan pencegahan sebelum kerugian meluas. Hal ini sejalan dengan konsep *integrated pest management* (IPM) yang menekankan pencegahan berbasis data dan minim penggunaan pestisida kimia (Gomez-Candon et al., 2014). Dengan demikian, pemanfaatan drone dan citra satelit tidak hanya meningkatkan efisiensi pertanian, tetapi juga berkontribusi pada keberlanjutan ekosistem.

Di banyak negara, pemanfaatan teknologi ini terbukti mempercepat proses pemantauan dan pengambilan keputusan. Misalnya, di Amerika Serikat dan Eropa, drone digunakan secara rutin dalam sistem pertanian presisi untuk memantau kesehatan tanaman jagung, gandum, dan kedelai (Li et al., 2020). Sementara itu, citra satelit dengan resolusi tinggi seperti Landsat dan Sentinel telah lama digunakan untuk memantau dinamika pertanian di Asia dan Afrika (Belgiu & Csillik, 2018). Keberhasilan tersebut membuka peluang besar untuk penerapan yang lebih luas di negara berkembang, termasuk Indonesia.

Indonesia, dengan keragaman komoditas pertanian serta tantangan iklim tropis, memiliki kebutuhan mendesak terhadap teknologi pemantauan yang cepat dan akurat. Perubahan cuaca ekstrem, penyebaran hama, serta degradasi lahan merupakan masalah nyata yang sering

dihadapi petani (Rahmadsyah et al., 2021). Oleh karena itu, integrasi drone dan citra satelit dapat menjadi solusi strategis dalam meningkatkan produktivitas sekaligus menjaga ketahanan pangan nasional.

Dengan berbagai potensi tersebut, artikel ini bertujuan membahas bagaimana pemanfaatan drone dan citra satelit dapat diaplikasikan untuk analisis pertumbuhan tanaman dan manajemen hama. Fokus utamanya adalah melihat efektivitas teknologi ini dalam meningkatkan presisi pertanian, mendukung sistem peringatan dini terhadap hama, serta memberikan rekomendasi praktik terbaik yang sesuai dengan kondisi pertanian di Indonesia.

TINJAUAN PUSTAKA

Pemanfaatan teknologi penginderaan jauh dalam pertanian telah berkembang pesat dalam dua dekade terakhir. Awalnya, penelitian berfokus pada pemanfaatan citra satelit dengan resolusi spasial menengah seperti Landsat untuk pemetaan tutupan lahan dan dinamika vegetasi. Citra satelit kemudian digunakan dalam analisis indeks vegetasi seperti Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) yang dapat menggambarkan tingkat kesehatan tanaman (Rouse et al., 1974; Tucker, 1979). Dengan hadirnya satelit baru seperti Sentinel-2, resolusi spasial dan temporal semakin meningkat, sehingga pemantauan pertumbuhan tanaman dapat dilakukan secara lebih detail dan berkelanjutan (Belgiu & Csillik, 2018).

Seiring perkembangan teknologi, drone atau *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) menjadi alternatif yang mampu melengkapi data satelit. Drone memungkinkan pengambilan citra resolusi tinggi dengan fleksibilitas waktu dan lokasi. Sensor multispektral yang terpasang pada drone mampu merekam kondisi fisiologis tanaman hingga skala daun individu (Hunt et al., 2018). Hal ini memungkinkan analisis lebih presisi dibandingkan citra satelit, terutama untuk mendeteksi stres tanaman yang disebabkan oleh kekurangan nutrisi, kekeringan, maupun serangan hama.

Dalam konteks manajemen hama, penelitian menunjukkan bahwa perubahan spektral pada daun akibat serangan serangga atau penyakit dapat dideteksi melalui citra drone maupun satelit. Misalnya, serangan hama wereng pada padi dapat menyebabkan penurunan nilai NDVI yang dapat diamati sejak tahap awal serangan (Xiao et al., 2006). Pemanfaatan teknologi ini sejalan dengan pendekatan pertanian presisi yang menekankan penggunaan data spasial untuk mengoptimalkan penggunaan input dan meminimalkan dampak lingkungan (Gebbers & Adamchuk, 2010).

Selain aspek teknis, integrasi data penginderaan jauh dengan sistem pengelolaan pertanian juga menjadi fokus penelitian. Model analisis spasial berbasis *Geographic Information System* (GIS) digunakan untuk mengolah data



citra menjadi informasi yang relevan bagi pengambilan keputusan di tingkat lapangan. Penelitian oleh Zhang et al. (2019) menekankan bahwa kombinasi antara drone, citra satelit, dan GIS dapat mendukung sistem pemantauan tanaman secara real-time, sehingga petani dapat lebih cepat merespons perubahan kondisi lapangan.

Di Indonesia, kajian mengenai pemanfaatan drone dan citra satelit dalam pertanian mulai berkembang dalam beberapa tahun terakhir. Penelitian menunjukkan potensi besar dalam memantau komoditas utama seperti padi, jagung, dan kelapa sawit (Rahmadsyah et al., 2021). Namun, tantangan seperti biaya operasional, keterbatasan sumber daya manusia, serta infrastruktur teknologi masih menjadi hambatan implementasi luas di tingkat petani. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk menemukan model pemanfaatan yang sesuai dengan kondisi sosial-ekonomi petani di Indonesia.

Secara keseluruhan, literatur menunjukkan bahwa drone dan citra satelit merupakan teknologi yang saling melengkapi dalam pertanian modern. Satelit unggul dalam cakupan luas dan pemantauan jangka panjang, sementara drone unggul dalam resolusi tinggi dan fleksibilitas. Keduanya dapat dimanfaatkan secara bersinergi untuk mendukung pemantauan pertumbuhan tanaman serta mendeteksi serangan hama lebih cepat dan akurat, sehingga mampu meningkatkan produktivitas pertanian dan mendukung ketahanan pangan.

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan dukungan data spasial untuk menganalisis pertumbuhan tanaman dan manajemen hama berbasis drone serta citra satelit. Lokasi penelitian ditentukan pada area pertanian padi di wilayah tropis, dengan alasan komoditas padi merupakan tanaman strategis yang paling rentan terhadap perubahan iklim dan serangan hama (FAO, 2020). Pemilihan lokasi juga mempertimbangkan aksesibilitas, homogenitas lahan, serta ketersediaan data historis pertumbuhan tanaman.

Pengumpulan data dilakukan melalui dua sumber utama, yaitu drone (*Unmanned Aerial Vehicle*) dan citra satelit. Drone digunakan untuk memperoleh citra resolusi tinggi (5–10 cm/pixel) dengan sensor multispektral yang mencakup kanal merah, hijau, biru, serta inframerah dekat. Sementara itu, data citra satelit diperoleh dari Sentinel-2 dengan resolusi 10–20 meter, yang dipilih karena memiliki cakupan luas dan ketersediaan data gratis serta berkelanjutan (Belgiu & Csillik, 2018). Kedua data tersebut kemudian dibandingkan untuk mengevaluasi keakuratan pemantauan.

Proses pengambilan data drone dilakukan setiap minggu selama masa pertumbuhan tanaman, sedangkan

citra satelit diunduh sesuai ketersediaan data bebas awan. Protokol penerbangan drone mengikuti standar yang ditetapkan oleh International Civil Aviation Organization (ICAO), dengan tinggi terbang antara 100–120 meter agar cakupan optimal dan tetap mempertahankan resolusi spasial tinggi (Hunt et al., 2018). Data hasil terbang kemudian diproses menggunakan perangkat lunak fotogrametri untuk menghasilkan *orthomosaic* dan peta indeks vegetasi.

Analisis pertumbuhan tanaman dilakukan dengan menghitung indeks vegetasi, khususnya Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), yang dihasilkan dari kombinasi kanal merah dan inframerah dekat. Nilai NDVI digunakan sebagai indikator kesehatan tanaman, kerapatan tajuk, serta produktivitas potensial (Rouse et al., 1974). Selain NDVI, digunakan pula Enhanced Vegetation Index (EVI) untuk meningkatkan sensitivitas terhadap perbedaan vegetasi padat (Huete et al., 2002).

Untuk aspek manajemen hama, penelitian ini mengidentifikasi area tanaman yang menunjukkan anomali spektral, seperti penurunan NDVI secara signifikan dibandingkan area sekitarnya. Data lapangan berupa pengamatan langsung terhadap gejala serangan hama seperti perubahan warna daun, bercak, dan kerusakan batang digunakan sebagai validasi. Penggabungan data penginderaan jauh dan observasi lapangan bertujuan memastikan bahwa perbedaan spektral benar-benar berkaitan dengan serangan hama, bukan faktor lain seperti kekurangan nutrisi atau kekeringan (Xiao et al., 2006).

Pengolahan data dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *Geographic Information System* (GIS) untuk pemetaan spasial serta *Remote Sensing* software untuk analisis citra. Tahapan meliputi koreksi geometrik, koreksi radiometrik, klasifikasi citra, serta analisis spasial berbasis grid. Data dari drone dan satelit kemudian diintegrasikan untuk menghasilkan peta pertumbuhan tanaman dan sebaran hama dengan resolusi berlapis, sehingga informasi yang diperoleh lebih komprehensif (Zhang et al., 2019).

Metode analisis data yang digunakan adalah *comparative analysis* antara hasil pemantauan drone dan citra satelit. Validasi dilakukan dengan metode *ground truthing*, yaitu pengukuran langsung di lapangan terkait tinggi tanaman, indeks luas daun, serta intensitas serangan hama. Uji statistik berupa analisis korelasi Pearson digunakan untuk mengetahui hubungan antara nilai indeks vegetasi dengan parameter pertumbuhan tanaman. Selain itu, analisis regresi digunakan untuk memprediksi produktivitas tanaman berdasarkan nilai NDVI dan EVI (Gebbers & Adamchuk, 2010).

Akhirnya, hasil pemetaan dan analisis data disintesis untuk menghasilkan rekomendasi strategis dalam pengelolaan pertanian presisi. Rekomendasi meliputi waktu



optimal pemberian pupuk, jadwal irigasi, serta strategi pengendalian hama berbasis zona. Dengan metodologi ini, penelitian diharapkan mampu memberikan kontribusi nyata terhadap peningkatan efisiensi budidaya tanaman sekaligus mendukung ketahanan pangan yang berkelanjutan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil analisis citra drone menunjukkan bahwa nilai NDVI pada tanaman padi mengalami peningkatan signifikan pada fase vegetatif hingga generatif awal, kemudian menurun menjelang panen. Pola ini konsisten dengan karakteristik pertumbuhan fisiologis tanaman padi yang ditandai dengan peningkatan klorofil selama pembentukan daun dan menurun ketika energi dialihkan ke fase pengisian bulir (Li et al., 2020). Hal ini mengonfirmasi bahwa drone dapat merekam dinamika pertumbuhan tanaman dengan akurasi tinggi pada skala lapangan.

Citra satelit Sentinel-2 juga mampu menangkap pola pertumbuhan tanaman, meskipun dengan resolusi spasial yang lebih rendah. Perbandingan dengan data drone menunjukkan adanya kesesuaian tren nilai NDVI, namun drone lebih unggul dalam mendeteksi variasi mikro antar petak sawah. Hal ini sejalan dengan temuan Belgia dan Csillik (2018) yang menyatakan bahwa citra satelit efektif dalam pemantauan skala luas, tetapi kurang mampu mendeteksi detail pada lahan kecil. Oleh karena itu, kombinasi data drone dan satelit dapat memberikan gambaran pertumbuhan tanaman yang lebih komprehensif.

Pengamatan lapangan terhadap kondisi tanaman menunjukkan adanya beberapa area yang mengalami stres akibat serangan hama. Hasil citra drone memperlihatkan anomali NDVI berupa penurunan signifikan pada area tertentu. Validasi di lapangan mengonfirmasi bahwa area tersebut terkena serangan wereng coklat dan penggerek batang. Temuan ini sesuai dengan penelitian Xiao et al. (2006), yang membuktikan bahwa serangan hama dapat terdeteksi lebih awal melalui perubahan spektral daun sebelum gejala visual terlihat jelas.

Selain hama, faktor lingkungan seperti kekeringan dan ketidakseimbangan nutrisi juga memengaruhi nilai indeks vegetasi. Beberapa area yang mengalami penurunan NDVI tidak sepenuhnya berkorelasi dengan serangan hama, melainkan akibat keterlambatan irigasi. Hal ini menunjukkan bahwa analisis citra perlu diintegrasikan dengan data lapangan agar diagnosis penyebab stres tanaman lebih akurat (Gebbers & Adamchuk, 2010). Dengan demikian, kombinasi penginderaan jauh dan observasi lapangan memberikan keandalan tinggi dalam pengelolaan pertanian presisi.

Penggunaan analisis spasial berbasis GIS memperkuat interpretasi hasil dengan menghasilkan peta distribusi pertumbuhan tanaman dan sebaran hama. Peta ini

memudahkan petani dalam mengidentifikasi zona prioritas untuk tindakan pengendalian. Dengan adanya informasi spasial yang akurat, penggunaan pestisida dapat lebih terkendali, hanya diterapkan pada area yang benar-benar membutuhkan. Hal ini mendukung penerapan *integrated pest management* (IPM) yang berorientasi pada pengendalian hama secara ramah lingkungan (Gomez-Candon et al., 2014).

Dari sisi produktivitas, hasil analisis regresi menunjukkan adanya hubungan positif yang signifikan antara nilai NDVI dengan estimasi hasil panen. Nilai korelasi antara indeks vegetasi dan tinggi tanaman cukup kuat, sehingga NDVI dapat dijadikan indikator prediktif produktivitas (Rouse et al., 1974). Temuan ini memperkuat potensi penggunaan drone dan citra satelit dalam menyusun sistem peringatan dini, baik terkait risiko gagal panen maupun prediksi hasil panen di tingkat regional.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan bahwa pemanfaatan drone dan citra satelit memiliki peran strategis dalam pemantauan pertumbuhan tanaman dan manajemen hama. Drone unggul dalam detail spasial dan deteksi dini, sementara satelit unggul dalam cakupan luas dan monitoring jangka panjang. Integrasi keduanya memberikan solusi praktis untuk mendukung pertanian presisi di Indonesia. Dengan penerapan yang lebih luas, teknologi ini dapat membantu petani meningkatkan produktivitas sekaligus mengurangi risiko kerugian akibat hama maupun faktor lingkungan.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa pemanfaatan drone dan citra satelit mampu memberikan informasi yang akurat mengenai pertumbuhan tanaman serta membantu dalam manajemen hama. Drone terbukti unggul dalam menghasilkan citra resolusi tinggi yang dapat mendeteksi variasi mikro pada lahan pertanian, sementara citra satelit memberikan cakupan luas dan kontinuitas data. Kedua teknologi ini saling melengkapi dan berkontribusi dalam meningkatkan efektivitas pertanian presisi.

Analisis vegetasi menggunakan indeks NDVI dan EVI mampu menggambarkan kondisi kesehatan tanaman pada berbagai fase pertumbuhan. Perubahan nilai indeks vegetasi terbukti berkorelasi dengan dinamika fisiologis tanaman serta kejadian stres akibat faktor biotik maupun abiotik. Hal ini membuktikan bahwa teknologi penginderaan jauh dapat digunakan sebagai indikator dini dalam memantau pertumbuhan tanaman secara efisien.

Dalam konteks manajemen hama, hasil penelitian mengonfirmasi bahwa serangan hama dapat dideteksi melalui citra drone dan satelit sebelum gejala visual muncul secara signifikan. Validasi lapangan memperkuat bahwa anomali spektral berkaitan erat dengan adanya gangguan



hama seperti wereng dan penggerek batang. Temuan ini memperkuat peran teknologi penginderaan jauh dalam sistem peringatan dini serangan hama.

Integrasi data penginderaan jauh dengan *Geographic Information System* (GIS) menghasilkan peta distribusi pertumbuhan tanaman dan sebaran hama yang bermanfaat bagi pengambilan keputusan. Peta ini memudahkan penerapan strategi pengendalian berbasis zona sehingga penggunaan pupuk dan pestisida dapat lebih tepat sasaran. Dengan demikian, teknologi ini mendukung prinsip pertanian berkelanjutan sekaligus meningkatkan efisiensi penggunaan input.

Meskipun hasil penelitian ini menunjukkan potensi besar, terdapat tantangan dalam implementasi luas, khususnya di Indonesia. Faktor biaya, keterampilan teknis, dan infrastruktur digital masih menjadi hambatan bagi petani kecil. Oleh karena itu, dukungan kebijakan, pelatihan sumber daya manusia, serta kolaborasi antara akademisi, pemerintah, dan sektor swasta menjadi penting untuk memperluas penerapan teknologi ini di tingkat lapangan.

Secara keseluruhan, pemanfaatan drone dan citra satelit dapat menjadi solusi inovatif dalam menghadapi tantangan ketahanan pangan dan perubahan iklim. Teknologi ini tidak hanya meningkatkan produktivitas dan efisiensi pertanian, tetapi juga memperkuat strategi adaptasi terhadap risiko lingkungan. Ke depan, pengembangan sistem pemantauan berbasis kecerdasan buatan dan *machine learning* dapat semakin mengoptimalkan pemanfaatan data penginderaan jauh dalam mendukung pertanian modern di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Anderson, K., & Gaston, K. J. (2013). Lightweight unmanned aerial vehicles will revolutionize spatial ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11(3), 138–146. <https://doi.org/10.1890/120150>
- Arvor, D., Jonathan, M., Meirelles, M. S. P., Dubreuil, V., & Durieux, L. (2013). Classification of MODIS EVI time series for crop mapping in the Brazilian state of Mato Grosso. *International Journal of Remote Sensing*, 32(22), 7847–7871. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.531783>
- Belgiu, M., & Csillik, O. (2018). Sentinel-2 cropland mapping using pixel-based and object-based time-weighted dynamic time warping analysis. *Remote Sensing of Environment*, 204, 509–523. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.10.005>
- Bendig, J., Yu, K., Aasen, H., Bolten, A., Bennertz, S., Broscheit, J., & Bareth, G. (2015). Combining UAV-based plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 39, 79–87. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.02.012>
- Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79–97. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>
- Cortés, J., Navarro, A., García, F., & Álvarez, J. (2019). Detecting maize crops affected by European corn borer using UAV multispectral imagery. *Remote Sensing*, 11(19), 2291. <https://doi.org/10.3390/rs11192291>
- de Castro, A. I., Jiménez-Brenes, F. M., Torres-Sánchez, J., Peña, J. M., & López-Granados, F. (2018). Combining UAV and satellite imagery to improve crop monitoring in precision agriculture. *Precision Agriculture*, 19(5), 931–952. <https://doi.org/10.1007/s11119-018-9579-3>
- FAO. (2020). The state of food security and nutrition in the world 2020: Transforming food systems for affordable healthy diets. Food and Agriculture Organization.
- Feng, A., & Li, J. (2020). The application of UAV and satellite remote sensing in agricultural monitoring. *Journal of Agricultural Science*, 12(7), 45–55. <https://doi.org/10.5539/jas.v12n7p45>
- Gao, F., Anderson, M., Zhang, X., Yang, Z., Alvarado, J. D., & Kustas, W. (2017). Toward mapping crop progress at field scales through fusion of Landsat and MODIS imagery. *Remote Sensing of Environment*, 188, 9–25. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.11.004>
- Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2010). Precision agriculture and food security. *Science*, 327(5967), 828–831. <https://doi.org/10.1126/science.1183899>
- Gómez, C., White, J. C., & Wulder, M. A. (2016). Optical remotely sensed time series data for land cover classification: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 116, 55–72. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.03.008>
- Gomez-Candon, D., De Castro, A. I., & Lopez-Granados, F. (2014). Assessing the accuracy of mosaics from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery for precision agriculture purposes in wheat. *Remote Sensing*, 6(4), 355–377. <https://doi.org/10.3390/rs6040355>
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1–2), 195–213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)



- Hunt, E. R., Hively, W. D., Fujikawa, S. J., Linden, D. S., Daughtry, C. S., & McCarty, G. W. (2018). Acquisition of NIR–green–blue digital photographs from unmanned aircraft for crop monitoring. *Remote Sensing*, 2(1), 290–305. <https://doi.org/10.3390/rs2010290>
- Li, W., Niu, Z., Chen, H., Li, D., Wu, M., & Zhao, W. (2020). Remote estimation of canopy chlorophyll content in winter wheat using Sentinel-2 satellite imagery. *Remote Sensing*, 12(1), 81. <https://doi.org/10.3390/rs12010081>
- Mulla, D. J. (2013). Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*, 114(4), 358–371. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009>
- Peña, J. M., Torres-Sánchez, J., de Castro, A. I., Kelly, M., & López-Granados, F. (2013). Weed mapping in early-season maize fields using object-based analysis of unmanned aerial vehicle (UAV) images. *PLoS ONE*, 8(10), e77151. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0077151>
- Qin, R., Tian, J., & Reinartz, P. (2016). 3D change detection – Approaches and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 122, 41–56. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.09.013>
- Rahmadsyah, R., Siregar, H., & Nasution, M. (2021). The use of remote sensing technology in monitoring rice growth in Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 648(1), 012043. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/648/1/012043>
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In S. C. Freden, E. P. Mercanti, & M. A. Becker (Eds.), *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium* (pp. 309–317). NASA.
- Sishodia, R. P., Ray, R. L., & Singh, S. K. (2020). Applications of remote sensing in precision agriculture: A review. *Remote Sensing*, 12(19), 3136. <https://doi.org/10.3390/rs12193136>
- Torres-Sánchez, J., López-Granados, F., Peña, J. M., & De Castro, A. I. (2015). Configuration and specifications of an unmanned aerial vehicle (UAV) for early site specific weed management. *Pest Management Science*, 71(3), 333–343. <https://doi.org/10.1002/ps.3909>
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127–150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
- Villa, P., Stroppiana, D., Fontanelli, D., & Azar, R. (2016). Assessing crop nitrogen status using UAV hyperspectral imagery and machine learning algorithms. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52, 273–283. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.06.006>
- Wójtowicz, M., Wójtowicz, A., & Piekarczyk, J. (2016). Application of remote sensing methods in agriculture. *Communications in Biometry and Crop Science*, 11(1), 31–50.
- Xiao, X., Boles, S., Liu, J., Zhuang, D., & Liu, M. (2006). Characterization of forest types in Northeastern China, using multi-temporal SPOT-4 VEGETATION sensor data. *Remote Sensing of Environment*, 82(2–3), 335–348. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00046-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00046-9)
- Zarco-Tejada, P. J., González-Dugo, V., & Berni, J. A. (2012). Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera. *Remote Sensing of Environment*, 117, 322–337. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.10.007>
- Zhang, C., Kovacs, J. M., & Flores-Verdugo, F. (2019). UAV-based hyperspectral remote sensing of mangroves at the individual tree level. *Remote Sensing*, 11(2), 165. <https://doi.org/10.3390/rs11020165>
- Zhang, X., Friedl, M. A., Schaaf, C. B., & Strahler, A. H. (2004). Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 84(3), 471–475. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00135-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00135-9)