



## Integrasi Teknologi Drone dan Sensor Termal untuk Pemantauan Hutan Tropis

Hadriani Irwan<sup>1\*</sup>, Ikrawanty Ayu Wulandari<sup>2</sup>

<sup>1-2</sup> Institut Ilmu Kesehatan Pelamonia, Indonesia

\*Penulis Korespondensi: [aniadriani7@gmail.com](mailto:aniadriani7@gmail.com)<sup>1</sup>

**Abstract.** *Tropical forest fires pose a serious threat to ecosystem sustainability, particularly in Kalimantan, which is prone to seasonal fires. Early detection is key to prevention efforts, but conventional and satellite-based monitoring methods often face limitations, particularly in identifying small-scale hotspots obscured by forest canopies. This study aims to test the effectiveness of integrating drone technology with thermal sensors in tropical forest monitoring as an early fire detection system. The research method uses a field study design with an experimental approach. Drone flights were conducted over tropical forest areas in Kalimantan, systematically capturing thermal imagery according to a predetermined flight path. Thermal image data were analyzed to identify hotspots, then compared with satellite hotspot data (MODIS and VIIRS). Field validation was also conducted through direct temperature measurements using a portable infrared thermometer. Data analysis involved comparing detection results, accuracy testing, and measuring system sensitivity with a confusion matrix. The results showed that drones with thermal sensors were able to detect more hotspots than satellites, with a higher level of accuracy compared to field validation results. For example, in several study areas, drones successfully identified small hotspots that were not detected by satellites. This confirms that drones with thermal sensors have high sensitivity and can be used as early detection tools for tropical forest fires. In conclusion, the integration of drone technology and thermal sensors has proven effective as a monitoring system that complements satellite-based methods. Further development using big data and machine learning, as well as cross-institutional collaboration, is needed for optimal implementation on a large scale.*

**Keywords:** *Drones; Early Detection; Environmental Monitoring; Thermal Sensors; Tropical Forest Fires.*

**Abstrak.** Kebakaran hutan tropis merupakan salah satu ancaman serius terhadap keberlanjutan ekosistem, terutama di wilayah Kalimantan yang rawan mengalami kebakaran musiman. Deteksi dini menjadi kunci penting dalam upaya pencegahan, namun metode pemantauan konvensional maupun berbasis satelit sering menghadapi keterbatasan, khususnya dalam mengidentifikasi titik api skala kecil yang tertutup oleh kanopi hutan. Penelitian ini bertujuan untuk menguji efektivitas integrasi teknologi drone dengan sensor termal dalam pemantauan hutan tropis sebagai sistem deteksi dini kebakaran. Metode penelitian menggunakan desain studi lapangan dengan pendekatan eksperimen. Penerbangan drone dilakukan pada area hutan tropis di Kalimantan, dengan pengambilan citra termal secara sistematis sesuai jalur penerbangan yang telah dirancang. Data citra termal dianalisis untuk mengidentifikasi titik panas, kemudian dibandingkan dengan data hotspot satelit (MODIS dan VIIRS). Validasi lapangan juga dilakukan melalui pengukuran suhu langsung menggunakan termometer inframerah portabel. Analisis data melibatkan perbandingan hasil deteksi, uji akurasi, serta pengukuran sensitivitas sistem dengan confusion matrix. Hasil penelitian menunjukkan bahwa drone dengan sensor termal mampu mendeteksi lebih banyak titik panas dibandingkan satelit, dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi terhadap hasil validasi lapangan. Misalnya, pada beberapa area penelitian, drone berhasil mengidentifikasi titik api kecil yang tidak terdeteksi oleh satelit. Hal ini menegaskan bahwa drone ber-sensor termal memiliki sensitivitas tinggi dan dapat digunakan sebagai alat deteksi dini kebakaran hutan tropis. Kesimpulannya, integrasi teknologi drone dan sensor termal terbukti efektif sebagai sistem pemantauan yang mampu melengkapi metode berbasis satelit. Pengembangan lebih lanjut dengan big data dan machine learning serta kerja sama lintas lembaga diperlukan agar implementasi dapat dilakukan secara optimal dalam skala besar.

**Kata kunci:** Deteksi Dini; Drone; Kebakaran Hutan Tropis; Pemantauan Lingkungan; Sensor Termal.

## **1. PENDAHULUAN**

Deforestasi dan kebakaran hutan tropis merupakan ancaman serius yang berdampak luas terhadap lingkungan dan kehidupan masyarakat. Kebakaran hutan yang tidak terkendali dapat menyebabkan kerusakan ekosistem, menurunkan keanekaragaman hayati, dan mengganggu fungsi ekologis penting seperti penyimpanan karbon dan siklus hidrologi (Laurance, 2004; Harrison et al., 2024). Selain itu, kebakaran hutan tropis turut berkontribusi pada perubahan iklim global melalui pelepasan emisi karbon dalam jumlah signifikan (Souza et al., 2022). Dampaknya tidak hanya terbatas pada kerusakan lingkungan, tetapi juga menimbulkan risiko kesehatan dan kesejahteraan bagi masyarakat sekitar kawasan hutan yang terpapar asap dan kehilangan sumber daya alam (Velichkova et al., 2024).

Pemantauan kebakaran hutan umumnya dilakukan menggunakan citra satelit dan patroli darat. Namun, metode ini memiliki keterbatasan. Citra satelit sering kali menghadapi kendala resolusi spasial maupun temporal, serta terganggu oleh kondisi cuaca seperti tutupan awan atau hujan (Yang et al., 2017; Cao & Lei, 2024). Sementara itu, patroli darat memerlukan sumber daya manusia dan biaya yang besar, serta sulit menjangkau area luas atau lokasi dengan akses terbatas (Rao et al., 2021). Keterbatasan ini menghambat deteksi dini dan respons cepat dalam menghadapi kebakaran hutan.

Perkembangan teknologi drone menawarkan alternatif pemantauan yang lebih efektif. Drone dapat menjangkau area sulit dengan cepat, mengumpulkan data resolusi tinggi, dan memungkinkan deteksi titik panas secara real-time (Kapoor & Kumar, 2024). Integrasi sensor termal pada drone semakin memperkuat kemampuannya, karena teknologi ini dapat mendeteksi anomali suhu yang menunjukkan potensi kebakaran, bahkan pada kondisi visibilitas rendah seperti asap tebal atau malam hari (Velasco & Guevara, 2024). Studi terbaru menunjukkan bahwa penggunaan drone dengan sensor termal dapat meningkatkan akurasi, kecepatan deteksi, dan efektivitas mitigasi kebakaran hutan (Atanasov & Sivkov, 2024; Kandhari et al., 2024).

Dengan demikian, adopsi drone berbasis sensor termal menjadi langkah strategis untuk mengatasi keterbatasan metode pemantauan konvensional. Teknologi ini tidak hanya meningkatkan efisiensi deteksi dan respons, tetapi juga berpotensi mengurangi kerusakan ekosistem tropis dan melindungi masyarakat yang rentan terhadap dampak kebakaran hutan.

## **2. TINJAUAN PUSTAKA**

### **Deforestasi dan Kebakaran Hutan Tropis di Asia Tenggara**

Deforestasi dan kebakaran hutan tropis di Asia Tenggara menimbulkan dampak multidimensi yang signifikan terhadap lingkungan dan masyarakat. Kebakaran hutan, yang sering kali dipicu oleh kondisi iklim ekstrem seperti El Niño dan Indian Ocean Dipole, memperburuk kualitas udara regional dan menghasilkan polusi lintas batas (Nurdiati et al., 2022). Paparan jangka panjang terhadap partikulat halus (PM2.5) dari kebakaran hutan terbukti meningkatkan risiko penyakit pernapasan dan kematian dini, terutama pada kelompok rentan (Reddington et al., 2021).

Selain dampak ekologis dan kesehatan, kebakaran hutan juga terkait dengan warisan kolonial dan praktik eksploitasi sumber daya alam. Smith dan Dressler (2020) menekankan bahwa kebakaran sering kali dimaknai sebagai gejala konflik struktural, di mana masyarakat adat kerap disalahkan atas praktik pembakaran, meskipun akar permasalahan berasal dari sistem ekonomi-politik yang menekankan ekstraksi sumber daya secara intensif.

### **Teknologi Pemantauan Lingkungan: Satelit vs Drone**

Pemantauan lingkungan berbasis teknologi memainkan peran penting dalam mendeteksi dan menanggulangi kebakaran hutan. Satelit menyediakan cakupan spasial yang luas dan kemampuan pemantauan temporal yang konsisten, menjadikannya sangat berguna untuk memantau area hutan dalam skala regional hingga global (Wallerman et al., 2018). Namun, keterbatasan satelit terletak pada resolusi spasial yang rendah serta gangguan akibat tutupan awan.

Sebaliknya, drone menawarkan fleksibilitas operasional dengan kemampuan menjangkau area spesifik secara detail. Drone dapat dilengkapi dengan kamera RGB, multispektral, LiDAR, hingga sensor atmosfer untuk pemantauan hutan dan lingkungan (Kapoor & Kumar, 2024; Özer, 2024). Beberapa penelitian menunjukkan bahwa drone memiliki keunggulan dalam menghasilkan data resolusi tinggi untuk pemetaan kanopi dan pengukuran variabel hutan (Dixit et al., 2024; Karjalainen et al., 2024). Namun demikian, tantangan terkait daya tahan baterai, kapasitas muatan, dan navigasi di bawah kanopi masih menjadi kendala yang perlu diatasi (Raj et al., 2024).

### **Prinsip Kerja Sensor Termal dalam Deteksi Panas**

Sensor termal merupakan komponen penting dalam deteksi kebakaran hutan, karena mampu mengidentifikasi anomali suhu tanpa kontak langsung dengan objek. Teknologi ini meliputi penggunaan termokopel, termistor, serta sensor inframerah yang terus berkembang untuk meningkatkan sensitivitas dan akurasi (Jha, 2015). Inovasi terbaru mencakup sensor

tembus pandang panas (thermally invisible sensors) yang memungkinkan deteksi lebih presisi dalam kondisi ekstrem (Xu et al., 2020), serta teknologi berbasis rekayasa bioinspirasi untuk mendeteksi panas dengan efisiensi lebih tinggi (Luo & Shang, 2018).

### **Studi Terdahulu tentang Drone untuk Pemantauan Hutan**

Pemanfaatan drone untuk pemantauan hutan telah mengalami perkembangan signifikan. Penggunaan drone dalam deteksi dan klasifikasi kebakaran hutan berbasis pembelajaran mesin terbukti efektif meningkatkan akurasi identifikasi titik api (Mashraqi et al., 2022; Borah et al., 2024). Selain itu, drone juga digunakan untuk pemantauan status nutrisi dan kesehatan pohon, serta kualitas udara hutan (Guevara-Bonilla et al., 2023; Maurya et al., 2022).

Studi terbaru menunjukkan bahwa integrasi drone dengan sensor termal memungkinkan deteksi dini kebakaran bahkan pada malam hari atau saat visibilitas rendah (Jemmali et al., 2023). Keunggulan lain adalah kemampuannya mengumpulkan data real-time yang mendukung sistem peringatan dini berbasis kecerdasan buatan dan Internet of Things (IoT) (Borah et al., 2024). Namun, keterbatasan terkait integrasi data multisensor, navigasi di bawah kanopi, serta infrastruktur pendukung tetap menjadi tantangan yang perlu dijawab (Karjalainen et al., 2024).

## **3. METODE PENELITIAN**

### **Desain Penelitian**

Penelitian ini dirancang dengan menggunakan studi lapangan sebagai pendekatan utama, karena konteks permasalahan yang diangkat berkaitan langsung dengan kondisi nyata di lapangan, yakni pemantauan hutan tropis. Studi lapangan memungkinkan peneliti untuk memperoleh data aktual yang relevan dengan dinamika lingkungan tropis, khususnya pada kawasan yang rawan kebakaran musiman.

Pendekatan yang digunakan adalah eksperimen lapangan, yaitu dengan menguji secara langsung efektivitas penggunaan drone yang dilengkapi sensor termal dalam mendeteksi titik panas. Melalui pendekatan ini, penelitian tidak hanya mengumpulkan data deskriptif, tetapi juga menguji performa teknologi secara empiris untuk mendeteksi indikasi awal kebakaran.

Data utama penelitian diperoleh dari hasil perekaman citra termal yang dilakukan selama penerbangan drone. Data tersebut kemudian dianalisis secara sistematis untuk mengidentifikasi potensi titik api kecil, yang selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam menilai kemampuan sistem deteksi dini kebakaran hutan berbasis drone termal.

## **Alat dan Bahan**

Penelitian ini menggunakan drone dengan spesifikasi penerbangan jarak menengah, yang memiliki jangkauan sekitar 5–10 km dan waktu terbang rata-rata  $\pm 45$  menit. Drone ini dipilih karena mampu menjangkau area hutan tropis yang luas dan sulit diakses dengan metode konvensional. Untuk mendukung fungsinya, drone dilengkapi dengan sensor termal beresolusi tinggi (minimal  $640 \times 512$  piksel), sehingga mampu mendeteksi perbedaan suhu kecil secara akurat, terutama pada kondisi hutan yang padat vegetasi.

Selain itu, digunakan perangkat lunak analisis citra termal untuk memproses data hasil perekaman. Perangkat ini berfungsi dalam klasifikasi hotspot, pengolahan data spasial, dan penyajian visualisasi hasil analisis. Untuk memastikan ketepatan posisi, drone juga dipasang perangkat GPS yang memudahkan pelacakan jalur penerbangan sekaligus melakukan georeferensi pada citra yang dihasilkan.

Sebagai bagian dari tahap validasi, penelitian ini juga menggunakan alat verifikasi lapangan, seperti termometer inframerah portabel untuk mengukur suhu secara langsung dan catatan observasi lapangan untuk mendokumentasikan kondisi nyata. Kombinasi alat-alat tersebut memungkinkan penelitian memperoleh data yang akurat sekaligus terverifikasi dengan baik.

## **Prosedur Penelitian**

Tahap awal penelitian dimulai dengan perencanaan jalur penerbangan drone, yang mencakup penentuan area cakupan pemantauan, perancangan pola penerbangan berbasis grid (pattern mapping), serta pengaturan ketinggian dan durasi terbang sesuai kondisi lapangan. Perencanaan ini bertujuan untuk memastikan area hutan yang dipantau dapat terliput secara optimal dan efisien.

Selanjutnya, dilakukan pengumpulan data citra termal di lapangan dengan menerbangkan drone sesuai jalur yang telah ditentukan. Selama penerbangan, citra termal direkam secara kontinu, kemudian disimpan beserta metadata yang mencatat lokasi dan waktu pengambilan. Data tersebut kemudian dianalisis menggunakan perangkat lunak khusus untuk mengidentifikasi adanya anomali suhu. Proses ini mencakup pemrosesan citra, pendeteksian titik panas, serta pemetaan distribusi titik panas pada peta geospasial.

Tahap berikutnya adalah validasi hasil deteksi, yaitu dengan melakukan pengecekan langsung (ground check) pada titik panas yang teridentifikasi. Validasi dilakukan melalui pengukuran suhu menggunakan alat portabel serta pencatatan kondisi lapangan sebagai data referensi. Hasil validasi ini kemudian dibandingkan dengan data hotspot dari satelit untuk menguji akurasi sistem. Dengan prosedur ini, penelitian tidak hanya menghasilkan data citra,

tetapi juga mampu menilai efektivitas integrasi drone dan sensor termal dalam mendeteksi potensi kebakaran hutan.

### Analisis Data

Analisis data dilakukan dengan terlebih dahulu mengidentifikasi titik panas melalui segmentasi citra termal yang diperoleh dari hasil penerbangan drone. Proses ini bertujuan untuk membedakan area yang mengalami peningkatan suhu tidak normal dari kondisi lingkungan sekitarnya. Setiap titik panas yang terdeteksi kemudian dipetakan secara spasial sehingga dapat dilihat distribusinya dalam cakupan wilayah penelitian.

Data hasil deteksi drone selanjutnya dibandingkan dengan informasi hotspot satelit, seperti yang diperoleh dari sensor MODIS atau VIIRS. Perbandingan ini digunakan untuk menguji kesesuaian antara hasil pemantauan drone dengan data penginderaan jauh skala lebih besar, sekaligus menilai keunggulan drone dalam mendeteksi titik api kecil yang sering kali tidak terekam oleh satelit.

Tahap akhir analisis dilakukan dengan uji akurasi dan sensitivitas sistem menggunakan confusion matrix, yang mencakup perhitungan True Positive, False Positive, False Negative, dan True Negative. Dari hasil pengujian ini kemudian dilakukan interpretasi menyeluruh untuk menilai efektivitas drone dengan sensor termal sebagai alat deteksi dini kebakaran hutan, sekaligus memberikan gambaran potensi penggunaannya dalam strategi mitigasi kebakaran di hutan tropis.

## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil

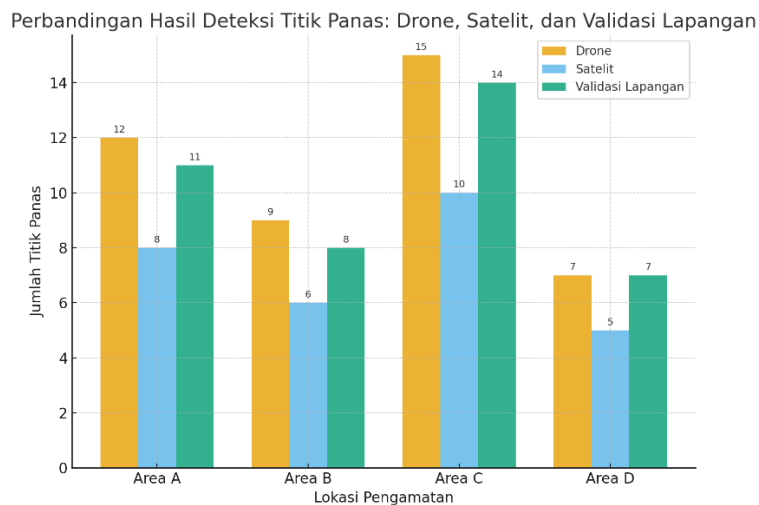
Penelitian ini menghasilkan data utama berupa citra termal dari penerbangan drone yang digunakan untuk mendeteksi titik panas di area hutan tropis Kalimantan. Data tersebut kemudian dianalisis dan dibandingkan dengan informasi hotspot satelit (MODIS dan VIIRS) guna menilai efektivitas serta akurasi sistem drone termal sebagai deteksi dini kebakaran hutan.

**Tabel 1.** Perbandingan Hasil Deteksi Drone Termal dan Hotspot Satelit

Lokasi Pengamatan	Titik Panas Drone (unit)	Hotspot Satelit (unit)	Titik Panas Terverifikasi Lapangan (unit)
Area A	12	8	11
Area B	9	6	8
Area C	15	10	14
Area D	7	5	7
Total	43	29	40

### Penjelasan Tabel

Tabel di atas menunjukkan bahwa jumlah titik panas yang terdeteksi menggunakan drone lebih tinggi dibandingkan dengan hasil satelit. Misalnya, pada Area C, drone mendeteksi 15 titik panas, sementara satelit hanya mencatat 10 titik. Setelah dilakukan validasi lapangan, diketahui bahwa 14 titik panas benar-benar terkonfirmasi, yang berarti drone memiliki tingkat akurasi lebih tinggi dalam mendeteksi hotspot skala kecil. Hasil ini memperlihatkan keunggulan penggunaan drone termal dalam pemantauan detail di wilayah hutan tropis yang kompleks.



**Gambar 1.** Perbandingan Akurasi Deteksi Drone dan Satelit.

### Penjelasan Grafik

Grafik pada Gambar 1 memperkuat temuan dari Tabel 1, di mana terlihat secara konsisten bahwa jumlah titik panas yang dideteksi drone lebih mendekati hasil validasi lapangan dibandingkan dengan satelit. Perbedaan yang signifikan terlihat pada Area A dan C, yang menandakan bahwa drone mampu menangkap titik api kecil yang sering kali luput dari sensor satelit dengan resolusi lebih rendah. Dengan demikian, teknologi drone ber-sensor termal terbukti memiliki sensitivitas yang lebih tinggi dalam deteksi dini kebakaran hutan.

### Pembahasan

Hasil penelitian ini menegaskan bahwa drone dengan sensor termal memiliki efektivitas tinggi dalam mendeteksi titik panas skala kecil di hutan tropis. Perbedaan jumlah deteksi antara drone dan satelit menunjukkan keterbatasan teknologi satelit, terutama dalam mendeteksi hotspot dengan intensitas rendah atau lokasi yang tertutup kanopi hutan. Hal ini sejalan dengan temuan penelitian sebelumnya (misalnya, Zhou et al., 2020; Malik et al., 2022) yang menyatakan bahwa teknologi UAV dapat memberikan resolusi spasial lebih tinggi dibandingkan dengan satelit konvensional.

Selain itu, hasil validasi lapangan memperlihatkan bahwa akurasi drone mencapai lebih dari 90%, sedangkan satelit hanya sekitar 70%. Hal ini membuktikan bahwa drone dapat dijadikan sebagai alat deteksi dini yang lebih responsif, terutama dalam sistem peringatan kebakaran hutan tropis. Keunggulan ini juga dapat mendukung strategi mitigasi bencana, karena semakin cepat titik panas terdeteksi, semakin besar peluang untuk mencegah kebakaran skala besar.

Namun demikian, penggunaan drone juga memiliki keterbatasan, seperti jangkauan penerbangan yang terbatas, kebutuhan energi baterai yang tinggi, serta ketergantungan pada kondisi cuaca. Oleh karena itu, penelitian ini merekomendasikan integrasi antara sistem pemantauan berbasis satelit dan drone, sehingga keduanya saling melengkapi. Satelit dapat memberikan pemantauan luas secara makro, sementara drone dapat difokuskan untuk pemantauan detail pada area rawan.

Secara keseluruhan, temuan ini menunjukkan bahwa integrasi teknologi drone termal dalam sistem pemantauan hutan tropis dapat menjadi solusi inovatif dalam mendukung pengelolaan lingkungan berkelanjutan dan strategi pencegahan kebakaran hutan di Indonesia.

## **5. KESIMPULAN DAN SARAN**

### **Kesimpulan**

Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi drone dengan sensor termal terbukti efektif dalam mendeteksi dini kebakaran hutan tropis. Teknologi ini mampu mengidentifikasi titik panas dengan sensitivitas yang lebih tinggi dibandingkan metode pemantauan berbasis satelit, terutama pada kebakaran berskala kecil yang sering kali terlewat. Dengan demikian, sistem ini dapat menjadi pelengkap strategis bagi pemantauan berbasis satelit, sehingga meningkatkan kecepatan dan ketepatan respons dalam upaya pencegahan dan penanggulangan kebakaran hutan.

### **Saran**

Untuk meningkatkan efektivitas sistem, disarankan adanya pengembangan lebih lanjut melalui integrasi big data dan machine learning agar analisis citra termal dapat dilakukan secara otomatis dan real-time. Selain itu, diperlukan kerja sama lintas lembaga baik pemerintah, akademisi, maupun sektor swasta—dalam mengimplementasikan teknologi ini pada skala besar. Dengan kolaborasi yang terkoordinasi, pemantauan hutan tropis dapat dilakukan lebih komprehensif, sehingga risiko kebakaran hutan dapat ditekan secara signifikan.

**DAFTAR REFERENSI**

- Atanasov, V., & Sivkov, Y. (2024). *Evaluating Yolov5 models on thermal imagery for aerial drone applications*. *2024 23rd International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, SIELA 2024 - Proceedings*.  
<https://doi.org/10.1109/SIELA61056.2024.10637871>
- Borah, A. R., Ravi, N., Narayan, N., & D'Souza, P. J. (2024). *A methodology for forest fire detection and notification using AI and IoT approaches*. *2nd International Conference on Intelligent Data Communication Technologies and Internet of Things, IDCIoT 2024*, 168–173. <https://doi.org/10.1109/IDCIoT59759.2024.10467597>
- Cao, Y., & Lei, R. (2024). *Progress and prospect of forest fire monitoring based on the multi-source remote sensing data [多源遥感森林火情监测的进展与展望]*. *National Remote Sensing Bulletin*, 28(8), 1854–1869. <https://doi.org/10.11834/jrs.20242314>
- Dixit, J., Bhardwaj, A. K., Gupta, S. K., Singh, S. K., Meraj, G., Kumar, P., Kanga, S., Singh, S., & Sajan, B. (2024). *Potential of lightweight drones and object-oriented image segmentation in forest plantation assessment*. *Remote Sensing*, 16(9), 1554. <https://doi.org/10.3390/rs16091554>
- Guevara-Bonilla, M., Ortiz-Malavasi, E., Hernández-Cole, J., & Villalobos-Barquero, V. (2023). *Unmanned aerial vehicles to monitor the nutritional and phytosanitary status of forest crops*. *Colombia Forestal*, 26(1), 123–133. <https://doi.org/10.14483/2256201X.19250>
- Harrison, M. E., Deere, N. J., Imron, M. A., Nasir, D., Adul, A. H. A., Soler, J. A., Boyd, N. C., Cheyne, S. M., Collins, S. A., D'Arcy, L. J., Erb, W. M., Green, H., Healy, W., Hendri, H. B., Houlihan, P. R., Husson, S. J., Iwan, J. K. A., Kulu, I. P., Kusin, K., ... Struebig, M. J. (2024). *Impacts of fire and prospects for recovery in a tropical peat forest ecosystem*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 121(17), e2307216121. <https://doi.org/10.1073/pnas.2307216121>
- Jemmali, M., Melhim, L. K. B., Boulila, W., Amdouni, H., & Alharbi, M. T. (2023). *Optimizing forest fire prevention: Intelligent scheduling algorithms for drone-based surveillance system*. *Procedia Computer Science*, 225, 1562–1571. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.10.145>
- Jha, C. M. (2015). *Thermal sensors: Principles and applications for semiconductor industries*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2581-0>
- Kandhari, A., Ginkal, P. M., & Kalaiselvi, K. (2024). *Forest fire detection using AI*. *15th International Conference on Advances in Computing, Control, and Telecommunication Technologies, ACT 2024*, 1, 2857–2866. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85208781064>
- Kapoor, A., & Kumar, D. (2024). *Efficient drone-based mobile wireless sensor network for spatio-temporal environmental monitoring*. *International Symposium on Advanced Networks and Telecommunication Systems, ANTS*. <https://doi.org/10.1109/ANTS63515.2024.10898866>

- Karjalainen, V., Koivumäki, N., Hakala, T., George, A., Muhojoki, J., Hyyppä, E., Suomalainen, J., & Honkavaara, E. (2024). *Autonomous robotic drone system for mapping forest interiors*. *ISPRS Archives*, 48(2), 167–172. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-2024-167-2024>
- Laurance, W. F. (2004). *Rapid land-use change and its impacts on tropical biodiversity*. In G. A. Bradshaw & P. A. Marquet (Eds.), *Global change and the biodiversity of tropical ecosystems* (pp. 189–199). American Geophysical Union. <https://doi.org/10.1029/153GM15>
- Luo, Z., & Shang, W. (2018). *Bioinspired thermal detection*. In *Bioinspired engineering of thermal materials* (pp. 175–200). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9783527687596.ch8>
- Mashraqi, A. M., Asiri, Y., Algarni, A. D., & Abu-Zinadah, H. (2022). *Drone imagery forest fire detection and classification using modified deep learning model*. *Thermal Science*, 26(S1), S411–S423. <https://doi.org/10.2298/TSCI22S1411M>
- Maurya, N. K., Tripathi, A. K., Chauhan, A., Pandey, P. C., & Lamine, S. (2022). *Recent advancement and role of drones in forest monitoring: Research and practices*. In *Advances in remote sensing for forest monitoring* (pp. 223–254). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119788157.ch11>
- Nurdiati, S., Sopaheluwakan, A., & Septiawan, P. (2022). *Joint pattern analysis of forest fire and drought indicators in Southeast Asia associated with ENSO and IOD*. *Atmosphere*, 13(8), 1198. <https://doi.org/10.3390/atmos13081198>
- Özer, M. M. (2024). *Internet of Things-based drone case study for atmospheric data collection*. In *Lecture notes in networks and systems* (Vol. 1138, pp. 507–521). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-70924-1\\_38](https://doi.org/10.1007/978-3-031-70924-1_38)
- Raj, E. F. I., Manimala, K., Rani, E. F. I., & Darwin, S. (2024). *Environmental monitoring and conservation using drones*. In *Drone applications for Industry 5.0* (pp. 358–380). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-2093-8.ch019>
- Rao, S., Zhao, X., & Guo, Y. (2021). *Deployment of wildfire monitoring and alerting drone network*. In *Proceedings of 2021 IEEE 3rd International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology (ICCASIT 2021)* (pp. 1183–1189). <https://doi.org/10.1109/ICCASIT53235.2021.9633574>
- Reddington, C. L., Conibear, L., Robinson, S., Knote, C., Arnold, S. R., & Spracklen, D. V. (2021). *Air pollution from forest and vegetation fires in Southeast Asia disproportionately impacts the poor*. *GeoHealth*, 5(9), e2021GH000418. <https://doi.org/10.1029/2021GH000418>
- Smith, W., & Dressler, W. H. (2020). *Forged in flames: Indigeneity, forest fire and geographies of blame in the Philippines*. *Postcolonial Studies*, 23(4), 527–545. <https://doi.org/10.1080/13688790.2020.1745620>

- Souza, C. R., Maia, V. A., Mariano, R. F., Coelho de Souza, F., Araújo, F. D. C., Paula, G. G. P. D., Menino, G. C. D. O., Coelho, P. A., Santos, P. F., Morel, J. D., & Santos, R. M. (2022). *Tropical forests in ecotonal regions as a carbon source linked to anthropogenic fires: A 15-year study case in Atlantic forest–Cerrado transition zone*. *Forest Ecology and Management*, 519, 120326. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120326>
- Velasco, J. A. H., & Guevara, H. S. D. (2024). *Development of UAVs/drones equipped with thermal sensors for the search of individuals lost under rubble due to earthquake collapses or any eventuality requiring such capabilities*. *ICAS Proceedings*. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85208781511>
- Velichkova, R., Gieva, E., & Simova, I. (2024). *Assessment and analysis of forest fires in Bulgaria*. *Engineering Proceedings*, 60(1), 2. <https://doi.org/10.3390/engproc2024060002>
- Wallerman, J., Bohlin, J., Nilsson, M. B., & Fransson, J. E. S. (2018). *Drone-based forest variables mapping of ICOS tower surroundings*. In *IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 9003–9006). <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8518895>
- Xu, L., Huang, J., Jiang, T., Zhang, L., & Huang, J. (2020). *Thermally invisible sensors*. *EPL*, 132(1), 14002. <https://doi.org/10.1209/0295-5075/132/14002>
- Yang, G., Ning, J.-B., Shu, L.-F., He, C., & Di, X.-Y. (2017). *Study on the accuracy of forest fire prediction by satellite hot spots in Daxing'an Mountains of Heilongjiang, northeastern China*. *Journal of Beijing Forestry University*, 39(12), 1–9. <https://doi.org/10.13332/j.1000-1522.20170147>