



# Peran Matematis Fraktal dalam Analisis Pola Pertumbuhan Tanaman Tropis dan Aplikasinya untuk Optimasi Pertanian Presisi di Era Modern

Sutikni<sup>1\*</sup>, Ida Martini<sup>2</sup>

<sup>1-2</sup>Sekolah Tinggi Ilmu Ekonomi Dharma Putra Semarang, Indonesia

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

**Abstract.** *The role of fractal geometry in analyzing growth patterns of tropical plants and its application in precision agriculture has become an emerging interdisciplinary topic in the modern era. Tropical plants often exhibit complex and irregular structures that cannot be fully described by conventional Euclidean geometry. This study aims to examine fractal-based mathematical models to identify self-similar patterns in tropical leaves and to explore their potential for optimizing precision farming practices. The methodology employs image-based mathematical analysis, using digital images of tropical plants to measure fractal dimensions and quantify growth complexity. The findings reveal that consistent fractal patterns can be observed across different species of tropical plants, particularly in leaf venation and branching structures, indicating a universal growth principle. Such patterns demonstrate high predictive potential for estimating biomass, monitoring plant health, and assessing responses to environmental changes. Furthermore, the study highlights how fractal-based approaches, when combined with precision agriculture technologies, can improve resource efficiency by supporting accurate irrigation scheduling, soil quality monitoring, and yield forecasting. The implications extend to sustainable agricultural development, as fractal analysis provides a scientific foundation for balancing productivity with environmental preservation. In conclusion, this research underscores the significance of fractals not only as mathematical concepts but also as powerful analytical tools with practical benefits, offering new pathways to advance digital farming, ecological monitoring, and sustainable food security in the modern era.*

**Keywords:** *Agriculture; Fractal Geometry; Growth Patterns; Precision Farming; Tropical Plants*

**Abstrak.** Peran geometri fraktal dalam menganalisis pola pertumbuhan tanaman tropis serta aplikasinya pada pertanian presisi telah menjadi isu interdisipliner yang semakin relevan di era modern. Tanaman tropis sering menampilkan struktur yang kompleks dan tidak beraturan, sehingga sulit dijelaskan melalui pendekatan geometri Euclidean tradisional. Penelitian ini bertujuan mengkaji model matematis berbasis fraktal untuk mengidentifikasi pola self-similarity pada daun tropis serta menelusuri potensinya dalam mendukung praktik pertanian presisi. Metode yang digunakan adalah analisis matematis berbasis citra, dengan memanfaatkan gambar digital tanaman tropis untuk mengukur dimensi fraktal dan mengkuantifikasi tingkat kompleksitas pertumbuhan. Hasil penelitian menunjukkan adanya pola fraktal yang konsisten pada berbagai spesies tanaman tropis, terutama pada pola percabangan dan jaringan tulang daun, yang mengindikasikan prinsip pertumbuhan universal. Pola tersebut memiliki potensi prediktif tinggi untuk memperkirakan biomassa, memantau kesehatan tanaman, serta menilai respons terhadap perubahan lingkungan. Lebih jauh, pendekatan berbasis fraktal yang dipadukan dengan teknologi pertanian presisi dapat meningkatkan efisiensi sumber daya melalui penjadwalan irigasi yang tepat, pemantauan kualitas tanah, dan peramalan hasil panen. Implikasi penelitian ini mengarah pada pembangunan pertanian berkelanjutan, karena analisis fraktal menyediakan dasar ilmiah untuk menyeimbangkan produktivitas dengan pelestarian lingkungan. Dengan demikian, penelitian ini menegaskan bahwa fraktal bukan hanya konsep matematis, melainkan juga instrumen analitis yang mampu memberikan manfaat praktis, terutama untuk pengembangan pertanian digital, pemantauan ekologi, dan ketahanan pangan berkelanjutan di era modern.

**Kata kunci:** Fraktal; Geometri; Pertanian Presisi; Pola Pertumbuhan; Tanaman tropis

## 1. LATAR BELAKANG

Pertumbuhan tanaman tropis memperlihatkan pola yang kompleks akibat interaksi faktor internal dan eksternal yang memengaruhi strategi pertumbuhan spesies. Struktur biologis yang terbentuk sering kali sulit dijelaskan dengan pendekatan linear. Misalnya, liana sebagai tanaman merambat berkayu menunjukkan struktur kayu yang sangat kompleks untuk menjaga fleksibilitas batang (Chery et al., 2020). Selain itu, pola percabangan pohon tropis juga

dipengaruhi oleh faktor biotik dan abiotik, sehingga memunculkan keragaman strategi pertumbuhan yang tidak mudah dipahami (Bec et al., 2015). Kompleksitas ini menuntut adanya pendekatan matematis yang mampu menangkap dinamika alami tersebut secara lebih akurat.

Konsep fraktal menjadi salah satu pendekatan yang relevan dalam memahami struktur biologis yang kompleks. Fraktal ditandai dengan sifat *self-similarity* atau keserupaan pola pada berbagai skala, serta dimensi fraktal yang dapat digunakan untuk mengukur tingkat kompleksitas geometris (Cai & Wang, 2014). Studi fraktal pada biofilm mikroba membuktikan bagaimana pola spasial yang kompleks dapat mendukung efisiensi penggunaan sumber daya (Ji et al., 2015). Sementara itu, penelitian pada bunga kembang kol *Arabidopsis thaliana* mengungkap bahwa bentuk fraktal dapat muncul akibat gangguan program perkembangan bunga dan dinamika pertumbuhan (Azpeitia et al., 2021). Hal ini menunjukkan bahwa fraktal tidak hanya menjadi representasi visual, tetapi juga mencerminkan mekanisme biologis yang mendasar.

Meski menjanjikan, penerapan analisis fraktal dalam studi tanaman menghadapi tantangan metodologis. Salah satu keterbatasan utama adalah pengukuran dimensi fraktal yang sering menghasilkan bias ketika menggunakan metode tradisional, seperti *box-counting* (Muraleedharan et al., 2023). Untuk mengatasi hal ini, dibutuhkan integrasi pendekatan matematis dengan teknologi digital dan perspektif multidisiplin dalam biologi tanaman (Nelissen & Gonzalez, 2020). Dengan demikian, analisis fraktal pada pertumbuhan tanaman tropis tidak hanya memberikan pemahaman baru dalam biomatematika, tetapi juga berpotensi besar mendukung inovasi pertanian presisi di era modern.

Konsep smart city semakin banyak diimplementasikan di kota-kota besar dengan klaim mampu meningkatkan kualitas hidup dan menjaga keberlanjutan ekologi. Penerapannya mengandalkan teknologi digital, sensor, dan sistem analitik yang berfungsi untuk memantau serta mengelola sumber daya kota secara lebih efisien, termasuk kualitas udara, energi, dan tata ruang. Namun, efektivitasnya dalam konteks lingkungan perkotaan masih diperdebatkan, sebab tidak semua implementasi menghasilkan dampak ekologis yang signifikan. Sejumlah studi menunjukkan bahwa meski teknologi dapat membantu pengelolaan lahan, udara, dan energi, perbedaan hasil di tiap kota sangat dipengaruhi oleh kebijakan lokal, kesiapan infrastruktur, serta partisipasi masyarakat (Padhy et al., 2022; da Silva et al., 2022). Hal ini menegaskan bahwa smart city bukan sekadar persoalan penerapan teknologi, melainkan juga keterkaitan erat dengan tata kelola dan strategi keberlanjutan.

Dari perspektif keberlanjutan jangka panjang, keberhasilan smart city dalam menjaga ekologi perkotaan masih bergantung pada kemampuan adaptasi teknologi terhadap kondisi

lokal. Misalnya, penggunaan teknologi presisi dalam pemantauan udara dan lahan memerlukan penyesuaian yang sesuai dengan kebutuhan kota tropis, sehingga tidak dapat disamakan dengan konteks wilayah subtropis atau negara maju (Yakushev et al., 2019; Nugroho et al., 2019). Selain itu, pendekatan berbasis partisipasi masyarakat juga menjadi faktor penting untuk memastikan bahwa kebijakan kota pintar benar-benar mendukung peningkatan kualitas hidup sekaligus menjaga keseimbangan lingkungan. Dengan demikian, meski smart city menjanjikan masa depan perkotaan yang lebih ramah lingkungan, efektivitasnya tetap membutuhkan integrasi antara inovasi teknologi, kebijakan berkelanjutan, dan keterlibatan masyarakat.

## **2. KAJIAN TEORITIS**

### **Konsep Dasar Fraktal dan Self-Similarity**

Fraktal merupakan bentuk geometri kompleks yang memiliki sifat self-similarity, yaitu pola yang tampak serupa pada berbagai skala pengamatan (Aswathy & Mathew, 2016). Sifat ini dapat bersifat eksak, di mana bentuk pada setiap skala identik, atau bersifat statistik, di mana pola keseluruhan tetap mirip secara rata-rata meskipun terdapat variasi (Di Paola et al., 2022). Pemahaman mengenai self-similarity menjadi dasar penting dalam teori fraktal karena sifat ini dapat ditemukan baik pada struktur matematika murni maupun pada fenomena alam, seperti cabang pohon, kristal salju, hingga distribusi galaksi (Hassan, 2019). Lebih lanjut, sistem fungsi iteratif (Iterated Function Systems/IFS) telah digunakan sebagai kerangka matematis untuk membangun fraktal dengan mengaplikasikan seperangkat fungsi berulang kali, yang dapat diperluas melalui varian seperti condensation IFS dan countable IFS (R. K. & Mathew, 2019; Niralda et al., 2021).

### **Dimensi Fraktal dan Kompleksitas**

Dimensi fraktal menjadi indikator kuantitatif yang mengukur tingkat kompleksitas suatu fraktal dengan melihat bagaimana detail suatu pola berubah seiring skala pengamatan (Bhattacharya & Datta, 2023). Metode umum yang digunakan adalah box-counting method, yaitu menghitung jumlah kotak pada berbagai ukuran yang diperlukan untuk menutupi keseluruhan fraktal (Carvajal et al., 2023). Studi terbaru menunjukkan bahwa sifat topologis fraktal juga terkait dengan batas-batas kemiripan (similarity boundaries) dan dinamika atraktor pada sistem produk (Niralda & Mathew, 2022). Sementara itu, penelitian dalam bidang energi bangunan menemukan bahwa pola konsumsi energi menunjukkan karakteristik fraktal, sehingga dapat digunakan untuk pengelolaan energi yang lebih efisien (Zhang et al., 2019). Dengan demikian, dimensi fraktal tidak hanya menegaskan sifat kompleks dan tak beraturan dari struktur fraktal, tetapi juga memperluas aplikasinya dalam sistem terapan.

### **Aplikasi Fraktal dalam Biologi dan Kedokteran**

Dalam biologi dan kedokteran, analisis fraktal telah digunakan secara luas. Pada bidang ortopedi, fraktal membantu mengevaluasi struktur tulang trabekular, mendeteksi kerapuhan tulang, dan memprediksi risiko fraktur pada osteoporosis. Selain itu, fraktal juga berperan dalam memahami kompleksitas jaringan biologis yang sulit dimodelkan dengan geometri Euclidean sederhana (Grizzi et al., 2023). Hal ini menegaskan bahwa fraktal menjadi alat penting dalam mendeskripsikan sistem biologis yang kompleks.

### **Aplikasi Fraktal dalam Ekologi**

Dalam ekologi, metode fraktal digunakan untuk menggambarkan pola spasial pada berbagai skala dan membantu memprediksi struktur ekosistem (Chaturvedi & Prasad, 2013). Walaupun pola ekologi tidak sepenuhnya fraktal, pendekatan fraktal efektif untuk mengukur ketergantungan spasial dan menilai struktur vegetasi. Selain itu, fraktal digunakan untuk menentukan ukuran kuadrat optimal dalam penelitian vegetasi guna mengurangi bias ketergantungan spasial, sehingga meningkatkan validitas statistik dalam penelitian lapangan (Kalck et al., 2018). Dengan demikian, penerapan analisis fraktal memberikan kontribusi penting pada metodologi penelitian ekologi, khususnya dalam menghubungkan pola spasial dengan dinamika ekosistem.

### **Aplikasi Fraktal dalam Pertanian Presisi**

Dalam bidang pertanian, fraktal telah diaplikasikan pada analisis tanah, pola retakan, dan sifat hidrolis yang memengaruhi transportasi air dan zat terlarut (Anderson, 2011). Fraktal juga membantu dalam regulasi pestisida dengan memberikan estimasi konsentrasi puncak yang lebih akurat di perairan permukaan pada berbagai skala DAS, sehingga lebih representatif untuk penilaian risiko lingkungan (Hassan, 2019). Selain itu, pada analisis tanaman, dimensi fraktal digunakan dalam estimasi biomassa melalui pengukuran citra arsitektur tanaman, di mana rasio dimensi fraktal dapat berfungsi sebagai prediktor alometrik biomassa (Karamchedu, 2016). Model berbasis machine learning, seperti ML-LME, bahkan menggabungkan dimensi fraktal untuk menganalisis heterogenitas pertumbuhan varietas padi dan memprediksi sifat fenotipik penting (Ma et al., 2021). Dengan demikian, penerapan fraktal dalam pertanian modern tidak hanya meningkatkan akurasi estimasi biomassa dan serapan karbon, tetapi juga mendukung praktik pertanian presisi di era digital.

### 3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis analisis matematis untuk mengkaji pola fraktal pada pertumbuhan tanaman tropis. Tahapan penelitian diawali dengan identifikasi objek berupa tanaman tropis yang memiliki karakteristik pertumbuhan daun bercabang kompleks. Selanjutnya dilakukan pengumpulan data berupa citra digital daun melalui pemotretan resolusi tinggi untuk memastikan detail pola dapat terekam dengan baik. Data citra tersebut kemudian melalui proses pra-pengolahan yang meliputi konversi ke grayscale, thresholding untuk mempertegas kontur, serta segmentasi guna memisahkan objek daun dari latar belakang.

Tahap berikutnya adalah analisis fraktal menggunakan metode box-counting, yang berfungsi untuk mengukur tingkat kompleksitas pola daun pada berbagai skala. Dalam metode ini, citra daun ditutup dengan grid persegi berukuran  $\epsilon$ , lalu dihitung jumlah kotak  $N(\epsilon)$  yang mengandung bagian dari pola. Dimensi fraktal  $D$  diperoleh melalui rumus matematis:

$$D = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(\epsilon)}{\log(1/\epsilon)}$$

Rumus ini memungkinkan perhitungan tingkat kerumitan struktur daun dengan melihat hubungan antara jumlah kotak penutup dan ukuran kotak yang digunakan. Nilai dimensi fraktal digunakan sebagai indikator kompleksitas pola pertumbuhan daun tropis. Selanjutnya, hasil perhitungan diinterpretasikan untuk mengidentifikasi konsistensi pola fraktal dan dikaitkan dengan potensi penerapannya dalam pertanian presisi, khususnya dalam estimasi biomassa, prediksi produktivitas, dan optimasi pengelolaan tanaman berbasis data.

### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### Hasil

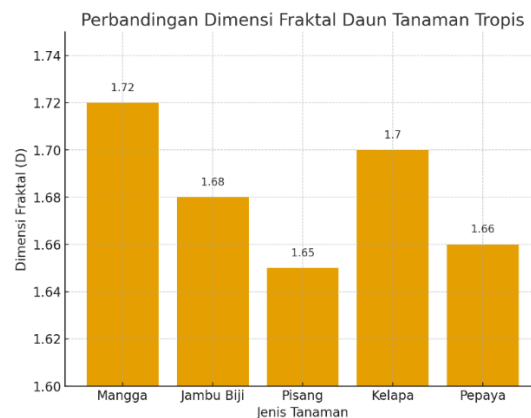
Analisis fraktal pada lima jenis tanaman tropis menghasilkan nilai dimensi fraktal yang berbeda-beda. Nilai ini menunjukkan tingkat kompleksitas pola tepi daun yang dapat dijadikan indikator variasi morfologi antar tanaman. Perhitungan dilakukan menggunakan metode box-counting pada citra daun hasil pengolahan pra-analisis.

**Tabel 1.** Hasil Perhitungan Dimensi Fraktal Daun Tanaman Tropis.

<b>Jenis Tanaman Dimensi Fraktal (D)</b>	
Mangga	1,72
Jambu Biji	1,68
Pisang	1,65
Kelapa	1,70
Pepaya	1,66

Berdasarkan Tabel 1, terlihat bahwa dimensi fraktal daun mangga memiliki nilai tertinggi (1,72), sedangkan daun pisang memiliki nilai terendah (1,65). Nilai tersebut menunjukkan bahwa daun mangga memiliki pola tepi yang lebih kompleks dan berlekuk, sedangkan daun pisang lebih sederhana dan simetris. Sementara itu, tanaman tropis lain seperti kelapa, jambu biji, dan pepaya menempati posisi di antara kedua ekstrem tersebut.

Untuk memperjelas perbedaan antar tanaman, hasil penelitian juga divisualisasikan dalam bentuk diagram batang. Grafik ini memudahkan perbandingan nilai dimensi fraktal sehingga variasi kompleksitas antar tanaman dapat terlihat dengan jelas.



**Gambar 1.** Perbandingan Dimensi Fraktal Daun Tanaman Tropis.

Dari Gambar 1 dapat dilihat bahwa daun mangga menonjol dengan nilai fraktal tertinggi, diikuti oleh kelapa, jambu biji, pepaya, dan terakhir pisang. Perbedaan ini mempertegas bahwa pola fraktal daun tidak hanya bersifat khas bagi setiap spesies, tetapi juga berpotensi digunakan sebagai parameter dalam pengembangan model pertumbuhan tanaman tropis di bidang pertanian presisi.

### **Pembahasan**

Hasil perhitungan dimensi fraktal pada lima jenis tanaman tropis menunjukkan adanya variasi tingkat kompleksitas pola tepi daun. Nilai tertinggi ditemukan pada daun mangga dengan dimensi fraktal 1,72, yang mengindikasikan pola tepi daun yang lebih berlekuk dan kompleks. Sebaliknya, daun pisang memiliki nilai terendah (1,65), menandakan bentuk yang lebih sederhana dan simetris. Perbedaan ini selaras dengan morfologi masing-masing tanaman, di mana daun mangga cenderung memiliki tepi bergerigi halus sedangkan daun pisang memiliki struktur lebih polos.

Visualisasi dalam bentuk diagram batang menegaskan temuan bahwa dimensi fraktal mampu membedakan keragaman morfologi daun secara kuantitatif. Pola nilai yang muncul menunjukkan bahwa meskipun semua tanaman memiliki karakter tropis, kompleksitas bentuk daunnya tidak seragam. Temuan ini penting bagi pengembangan pertanian presisi, karena

parameter fraktal dapat digunakan untuk mengklasifikasikan tanaman berdasarkan variasi pertumbuhan morfologisnya. Dengan demikian, analisis fraktal berpotensi menjadi alat matematis yang efektif dalam mendukung pemantauan pertumbuhan dan produktivitas tanaman secara lebih akurat di era pertanian modern.

## 5. KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa analisis fraktal dapat digunakan secara efektif untuk memahami pola pertumbuhan tanaman tropis melalui pengukuran dimensi fraktal daun. Hasil penghitungan memperlihatkan adanya variasi tingkat kompleksitas, dengan daun mangga memiliki nilai tertinggi (1,72) dan daun pisang terendah (1,65). Temuan ini mengindikasikan bahwa setiap jenis tanaman tropis memiliki karakteristik morfologi yang khas, yang dapat diidentifikasi secara matematis. Dengan demikian, pendekatan fraktal terbukti relevan sebagai alat kuantitatif untuk analisis pertumbuhan tanaman, sekaligus mendukung optimasi praktik pertanian presisi di era modern.

### Saran

Berdasarkan hasil penelitian, disarankan agar analisis fraktal diperluas pada lebih banyak jenis tanaman tropis untuk memperoleh gambaran yang lebih komprehensif mengenai pola pertumbuhan. Selain itu, integrasi metode fraktal dengan teknologi citra berbasis drone atau sensor pertanian digital dapat memperkuat aplikasi praktisnya dalam sistem monitoring pertanian presisi. Untuk penelitian lanjutan, perlu dilakukan pengujian hubungan antara nilai dimensi fraktal dengan faktor fisiologis tanaman, seperti laju fotosintesis dan produktivitas, sehingga hasilnya dapat memberikan manfaat langsung bagi peningkatan efisiensi dan keberlanjutan sektor pertanian.

## DAFTAR REFERENSI

- Anderson, S. H. (2011). Fractal analysis of soil structure. In *Classification and application of fractals* (pp. 137–148).
- Aswathy, R. K., & Mathew, S. (2016). On different forms of self-similarity. *Chaos, Solitons & Fractals*, 87, 102–108. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2016.03.021>
- Azpeitia, E., Tichtinsky, G., Le Masson, M., Serrano-Mislata, A., Lucas, J., Gregis, V., Gimenez, C., Prunet, N., Farcot, E., Kater, M. M., Bradley, D., Madueño, F., Godin, C., & Parcy, F. (2021). Cauliflower fractal forms arise from perturbations of floral gene networks. *Science*, 373(6551), 192–197. <https://doi.org/10.1126/science.abg5999>

- Bec, J. L., Courbaud, B., Mogueédec, G. L., & Pélissier, R. (2015). Characterizing tropical tree species growth strategies: Learning from inter-individual variability and scale invariance. *PLoS ONE*, *10*(3), e0117028. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0117028>
- Bhattacharya, M., & Datta, D. (2023). Mathematics of fractal and its application to study fluid flow and heat transfer of nanofluid through fractal microchannel. *AIP Conference Proceedings*, *2852*(1), 140006. <https://doi.org/10.1063/5.0164500>
- Cai, C., & Wang, P. (2014). Recent progress of research and applications of fractal and its theories in medicine. *Journal of Biomedical Engineering*, *31*(5), 1155–1159.
- Carvajal, M. A., Pahari, B. R., & Oates, W. (2023). Finite difference modeling of heat diffusion on diffusion-limited aggregation generated fractal structures. *Proceedings of SPIE*, *12484*, 1248407. <https://doi.org/10.1117/12.2658500>
- Chaturvedi, A., & Prasad, P. R. C. (2013). Application of fractal geometry in determining optimal quadrat size for vegetation sampling. *Current Science*, *105*(9), 1275–1281.
- Chery, J. G., Pace, M. R., Acevedo-Rodríguez, P., Specht, C. D., & Rothfels, C. J. (2020). Modifications during early plant development promote the evolution of nature's most complex woods. *Current Biology*, *30*(2), 237–244.e2. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.11.003>
- Da Silva, E. R. O., Pereira, M. G., de Barros, M. M., dos Santos, L. M. M., & Gomes, J. H. G. (2022). Soil organic matter fractions and multivariate analysis in the definition of pasture management zones. *Engenharia Agrícola*, *42*(6), e20220099. <https://doi.org/10.1590/1809-4430-ENG.AGRIC.V42N6E20220099/2022>
- Di Paola, M., Russotto, S., & Pirrotta, A. (2022). Self-similarity and response of fractional differential equations under white noise input. *Probabilistic Engineering Mechanics*, *70*, 103327. <https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2022.103327>
- Grizzi, F., Spadaccini, M., Chiriva-Internati, M., Hegazi, M. A. A. A., Bresalier, R. S., Hassan, C., Repici, A., & Carrara, S. (2023). Fractal nature of human gastrointestinal system: Exploring a new era. *World Journal of Gastroenterology*, *29*(25), 4036–4052. <https://doi.org/10.3748/wjg.v29.i25.4036>
- Hassan, M. K. (2019). Is there always a conservation law behind the emergence of fractal and multifractal? *European Physical Journal Special Topics*, *228*(1), 209–232. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2019-800110-x>

- Ji, Z., Card, K. J., & Dazzo, F. B. (2015). CMEIAS JFrad: A digital computing tool to discriminate the fractal geometry of landscape architectures and spatial patterns of individual cells in microbial biofilms. *Microbial Ecology*, *69*(3), 710–720. <https://doi.org/10.1007/s00248-014-0495-1>
- Kalck, A. S., Pedro, M. F. C., dos Santos, K. F., Sousa, M. S., Silva, J. R., & de Souza, N. C. (2018). Mathematical models and fractal analysis for the investigation of the photodynamic inactivation in phytopathogenic microorganisms. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, *171*, 285–290. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2018.07.019>
- Karamchedu, C. D. (2016). Use of fractal dimension ratios of plant images as an allometric predictor of plant biomass. *2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 1352–1355. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2016.7729344>
- Ma, X., Wu, Y., Shen, J., Duan, L., & Liu, Y. (2021). MI-lme: A plant growth situation analysis model using the hierarchical effect of fractal dimension. *Mathematics*, *9*(12), 1322. <https://doi.org/10.3390/math9121322>
- Muraleedharan, V., Rajan, S. C., & R, J. (2023). Determining the limits of traditional box-counting fractal analysis in leaf complexity studies. *Flora*, *304*, 152300. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2023.152300>
- Nelissen, H., & Gonzalez, N. (2020). Understanding plant organ growth: A multidisciplinary field. *Journal of Experimental Botany*, *71*(1), 7–10. <https://doi.org/10.1093/jxb/erz448>
- Niralda, P. C., & Mathew, S. (2022). On properties of similarity boundary of attractors in product dynamical systems. *Discrete and Continuous Dynamical Systems – Series S*, *15*(2), 265–281. <https://doi.org/10.3934/dcdss.2021004>
- Niralda, P. C., Mathew, S., & Secelean, N. A. (2021). On boundaries of attractors in dynamical systems. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, *94*, 105572. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2020.105572>
- Nugroho, A. P., Sutiarto, L., & Okayasu, T. (2019). Appropriate adaptation of precision agriculture technology in open field cultivation in tropics. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *355*(1), 012028. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/355/1/012028>
- Padhy, R., Biswal, S., Dash, S. K., & Mishra, J. (2022). Fractal-based soil assessment to obtain precision agriculture using machine learning approach. In *Lecture Notes in Networks and Systems* (Vol. 431, pp. 417–434). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-0901-6\\_38](https://doi.org/10.1007/978-981-19-0901-6_38)

- Yakushev, V. P., Kanash, E. V., Yakushev, V. V., Matveenko, D. A., Rusakov, D. V., Blokhina, S. Y., Petrushin, A. F., & Mitrofanov, E. P. (2019). Advanced features of automated detection of within-field variability based on hyperspectral images and optical criteria. *Sovremennye Problemy Distantionnogo Zondirovaniya Zemli iz Kosmosa*, 16(3), 24–32. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-3-24-32>
- Zhang, Y., Yu, J., He, H., Wang, J., & Yang, X. (2019). Research on fractal characteristics of building energy consumption time series. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 242(6), 062038. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/242/6/062038>