Dinamika Spasio-Temporal Kualitas Ekologi Perkotaan Berbasis *Remote Sensing Ecological Index* di Kota Pekanbaru Tahun 2017–2025

Ilham Guntara[1]
[1]Program Studi Magister Ilmu Lingkungan, Program Pascasarjana, Universitas Riau, Indonesia
Email korespondensi: ilham.guntara6113@grad.unri.ac.id

Abstrak

Perubahan kualitas ekologi perkotaan di Kota Pekanbaru perlu dipantau secara konsisten antartahun agar arah perubahannya tidak bercampur dengan perbedaan skala normalisasi. Penelitian ini bertujuan menganalisis dinamika spasio-temporal kualitas ekologi Kota Pekanbaru pada tahun 2017, 2021, dan 2025 berbasis *Remote Sensing Ecological Index* (RSEI) temporal terpadu. Tiga citra Landsat 8 dan 9 diolah di *Google Earth Engine*. Indikator kehijauan, kelembapan, kekeringan, dan suhu dinormalisasi dengan persentil ke-1 dan ke-99 gabungan tiga tahun, lalu disintesis melalui analisis komponen utama dari matriks kovarians gabungan sehingga satu set bobot berlaku untuk semua tahun. Komponen utama pertama menjelaskan 73,79% varians. Kelas Sangat Baik berubah dari 38,11% (2017) menjadi 42,03% (2021) dan 24,35% (2025), sedangkan kelas Baik meningkat menjadi 38,60% pada 2025. Penurunan periode 2021–2025 didominasi perpindahan satu kelas dari Sangat Baik ke Baik, dan 41,59% luas wilayah mengalami penurunan nilai RSEI lebih dari 0,05. Hasil ini menunjukkan penurunan kualitas ekologi yang bertahap, dan bukan degradasi masif, yang perlu dibaca bersama keterbatasan citra satu tanggal per tahun.

Kata kunci: Dinamika Spasio-Temporal; Kota Pekanbaru; Kualitas Ekologi; Landsat; *Remote Sensing Ecological Index*

I. PENDAHULUAN

Aktivitas urbanisasi yang pesat dan eksploitasi ruang fisik secara masif di kawasan perkotaan merupakan pemicu utama dinamika perubahan ekosistem lingkungan perkotaan modern. Lingkungan perkotaan dipandang sebagai suatu sistem sosial-ekologis (*socio-ecological system*) yang kompleks, di mana alih fungsi tutupan lahan alami menjadi kawasan terbangun secara langsung memengaruhi siklus biogeokimia, aliran energi permukaan, dan ketersediaan jasa ekosistem (Pickett dkk., 2001). Tekanan antropogenik yang melampaui batas daya dukung lingkungan perkotaan memicu kerentanan ekologi biofisik, seperti penurunan kerapatan vegetasi, peningkatan kekeringan tanah, serta degradasi ruang terbuka hijau (Wang & Mohamed Afla, 2024). Fenomena ini juga memicu lonjakan suhu permukaan tanah (*Land Surface Temperature* / LST) yang mempercepat pembentukan pulau panas perkotaan (*Urban Heat Island* / UHI) (Zafar dkk., 2024).

Dinamika tekanan ekologi tersebut terjadi secara nyata di Kota Pekanbaru, Provinsi Riau, sebagai salah satu pusat pertumbuhan ekonomi utama di Pulau Sumatra (Giofandi dkk., 2024). Berdasarkan Laporan Rencana Aksi Mitigasi dan Adaptasi Perubahan Iklim Kota Pekanbaru, proporsi area belum terbangun (*non-built-up areas*) sejatinya masih mendominasi sebesar 76% (Pekanbaru, 2025). Namun, pesatnya ekspansi permukiman dan infrastruktur telah mendorong konversi lahan terbangun (*built-up area*) mencapai 24% dari total luas wilayah kota (Giofandi dkk., 2024; Pekanbaru, 2025). Data inventarisasi Gas Rumah Kaca (GRK) mencatat alih fungsi lahan ini memicu pelepasan emisi karbon biomassa hingga 148.326,73 ton CO_2eq pada sektor AFOLU (Pekanbaru, 2025). Ketimpangan ekologis ini berimplikasi pada eskalasi bencana hidrometeorologis, dengan terekamnya 113 kejadian

banjir dan 135 kejadian kebakaran hutan/lahan sepanjang rentang tahun 2021 hingga 2023 (Pekanbaru, 2025).

Pemantauan kualitas ekologi perkotaan secara konvensional sering kali hanya mengandalkan indikator spektral tunggal, seperti *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) (Mahendra dkk., 2024). Padahal, kompleksitas interaksi biofisik ekosistem perkotaan tidak dapat dijelaskan secara utuh hanya melalui aspek kehijauan semata (Xu, 2013). Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, instrumen *Remote Sensing Ecological Index* (RSEI) dikembangkan sebagai indeks komposit kuantitatif yang mengintegrasikan empat indikator spektral biofisik utama: Kehijauan (*Greenness* via NDVI), Kelembapan (*Wetness* via WET), Kekeringan (*Dryness* via NDBSI), dan Suhu (*Heat* via LST) (Mahendra dkk., 2025; Xu, 2013). Keunggulan utama RSEI terletak pada penggunaan *Principal Component Analysis* (PCA), di mana penentuan bobot indikator ditentukan secara objektif berdasarkan variansi data melalui *eigenvector* Komponen Utama Pertama (PC1) tanpa campur tangan persepsi atau bobot subjektif peneliti (Mahendra dkk., 2024; Xu, 2013).

Meskipun RSEI telah banyak diterapkan, kajian di Kota Pekanbaru yang dapat dirujuk pada naskah ini, yaitu Giofandi dkk. (2024), mencakup periode 2018–2021 sehingga belum menjangkau kondisi terbaru. Studi di Kota Bandung oleh Mahendra dkk. (2024) berfokus pada satu tahun (2023) sehingga tidak menunjukkan perubahan antartahun. Pemantauan perubahan kualitas ekologi perkotaan memerlukan rangkaian multitemporal yang dapat dibandingkan secara langsung antartahun (Sidiq dkk., 2025).

RSEI telah dikembangkan menjadi deret waktu untuk mendeteksi perubahan ekologi (Xu dkk., 2019). Namun, praktik umum menghitung RSEI untuk setiap tahun secara terpisah, dengan batas normalisasi dan PCA yang dihitung ulang pada setiap citra. Pada praktik ini, bobot indikator dan batas normalisasi berbeda antartahun, sehingga selisih nilai RSEI antartahun mencampurkan perubahan lingkungan yang sebenarnya dengan perubahan skala. Akibatnya, kelas kualitas yang sama pada dua tahun tidak selalu mewakili kondisi biofisik yang sama. Persoalan keterbandingan ini penting bagi pemantauan multitemporal di kota yang berkembang cepat seperti Pekanbaru, karena arah perubahan kelas menjadi dasar penilaian kebijakan penataan ruang.

Aspek lain yang kerap luput adalah kesesuaian koefisien transformasi *tasseled cap* dengan jenis data. Koefisien Baig dkk. (2014) diturunkan dari reflektans puncak atmosfer (TOA), sedangkan koefisien reflektans permukaan (SR) Landsat 8 diturunkan oleh Zhai dkk. (2022). Penerapan koefisien TOA pada data SR berpotensi menggeser nilai kelembapan (WET) dan, melalui PCA, bobot seluruh indikator. Selain itu, rangkaian waktu penelitian ini melintasi dua sensor (Landsat 8 OLI dan Landsat 9 OLI-2), sehingga kontinuitas radiometrik antarsensor perlu diperhitungkan (Masek dkk., 2020; Xu dkk., 2023).

Dalam naskah ini, kualitas ekologi mengacu pada kondisi biofisik permukaan yang diukur melalui empat indikator RSEI, yaitu kehijauan, kelembapan, kekeringan, dan suhu. RSEI tidak mengukur kapasitas ekosistem untuk pulih dari gangguan, sehingga istilah ketangguhan (*resilience*) tidak digunakan. Kualitas ekologi dalam pengertian ini adalah ukuran kondisi pada satu waktu, dan perubahannya pada beberapa waktu menunjukkan arah perubahan kondisi tersebut, bukan penyebabnya.

Penelitian ini tidak mengklaim sebagai kajian RSEI pertama di Indonesia. Kontribusinya adalah menyajikan RSEI temporal terpadu Kota Pekanbaru, yaitu RSEI dengan satu kerangka normalisasi dan satu set bobot PCA untuk tahun 2017, 2021, dan 2025, sehingga nilai dan kelas antartahun dapat dibandingkan langsung. Tujuan penelitian ini adalah (1) menyusun RSEI temporal terpadu Kota Pekanbaru tahun 2017, 2021, dan 2025; (2) mengukur distribusi luas kelas RSEI pada setiap tahun; dan (3) memetakan arah dan besaran perubahan nilai RSEI serta transisi antarkelas pada periode 2017–2021, 2021–2025, dan 2017–2025. Hasilnya diharapkan menjadi data dasar kualitas ekologi perkotaan yang dapat direplikasi dan dirujuk dalam kajian penataan ruang berikutnya.

II. METODE

Penelitian ini merupakan studi kuantitatif keruangan dengan unit analisis piksel 30 m. Alur kerja terdiri atas lima tahap. Tahap pertama adalah pengumpulan citra Landsat 8 dan 9 *Collection* 2 untuk tiga tahun pengamatan dan pemotongan citra dengan batas wilayah analisis. Tahap kedua adalah penapisan awan dan pengisian piksel tidak valid sehingga masker valid sama untuk ketiga tahun. Tahap ketiga adalah ekstraksi empat indikator biofisik. Tahap keempat adalah penetapan parameter terpadu (persentil dan bobot PC1) dari gabungan data tiga tahun, kemudian penghitungan RSEI akhir dan klasifikasinya. Tahap kelima adalah analisis luas kelas, selisih nilai, dan transisi antarkelas. Penelitian ini tidak melibatkan pengambilan data lapangan; seluruh hasil berasal dari citra satelit sehingga interpretasi penyebab perubahan bersifat dugaan yang perlu dikonfirmasi dengan data lain.

Penelitian dilaksanakan di Kota Pekanbaru, Provinsi Riau (0°25'–0°45' LU dan 101°14'–101°34' BT). Batas wilayah analisis bersumber dari [sebutkan sumber dan tahun data batas administrasi]. Luas wilayah analisis yang dihitung di GEE adalah 64.118,03 ha (641,18 km²), sedikit berbeda dari luas administratif 632,26 km² karena perbedaan sumber dan tingkat generalisasi batas. Luas yang terpetakan setelah penapisan piksel tidak valid adalah 63.899,11 ha (638,99 km²), dan angka inilah yang dipakai sebagai dasar seluruh perhitungan luas. Evaluasi mencakup tiga tahun pengamatan, yaitu 2017, 2021, dan 2025.

Kota Pekanbaru terdiri atas 15 kecamatan dan dilintasi Sungai Siak yang membagi wilayah menjadi bagian utara (Rumbai) dan selatan. Wilayah ini berada di kawasan tropis lembap tanpa musim kering yang tegas, sehingga istilah periode kering pada naskah ini merujuk pada bulan-bulan yang relatif lebih kering (April–September). Pemilihan periode tersebut bertujuan mengurangi tutupan awan dan pengaruh kelembapan tanah yang berlebihan terhadap indikator, tetapi tidak menghilangkan perbedaan fenologi antarbulan akuisisi, sehingga hal ini dibahas sebagai keterbatasan.

Data yang digunakan adalah citra Landsat *Collection* 2 *Tier* 1 pada *Path*/*Row* 127/060 beresolusi 30 m: Landsat 8 OLI/TIRS tanggal 24 September 2017 dan 30 Mei 2021, serta Landsat 9 OLI-2/TIRS-2 tanggal 2 Juni 2025. NDVI, WET, dan NDBSI dihitung dari produk reflektans permukaan Level-2 (faktor skala 0,0000275 dan offset −0,2), sedangkan LST dihitung dari suhu kecerlangan (brightness temperature, dalam Kelvin) Band 10 pada produk Level-1 TOA yang dikonversi ke °C. *Scene* dipilih pada periode relatif lebih kering (April–September) dengan tutupan awan *scene* terendah yang tersedia; nilai CLOUD_COVER seluruh *scene* adalah 40,84% (2017), 23,69% (2021), dan 12,96% (2025), tetapi di dalam batas kota piksel valid setelah penapisan awan, awan tipis, dan bayangan awan (QA_PIXEL) mencapai 99,81%, 99,87%, dan 99,87%. Piksel tidak valid diisi dengan rata-rata fokal dari piksel valid di sekitarnya sehingga ketiga tahun memiliki *masker* valid yang sama (99,88% dari ROI); porsi piksel hasil pengisian hanya 0,07% (2017), 0,004% (2021), dan 0,01% (2025). Rincian *scene* disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi *scene* Landsat dan kualitas piksel

No	Tanggal akuisisi	Satelit (set koefisien WET)	CLOUD_COVER scene (%)	Piksel valid asli (%)	Piksel valid setelah pengisian (%)
1	24 September 2017	Landsat 8 (L8)	40,84	99,81	99,88
2	30 Mei 2021	Landsat 8 (L8)	23,69	99,87	99,88
3	2 Juni 2025	Landsat 9 (L9)	12,96	99,87	99,88

Prosedur ekstraksi *Remote Sensing Ecological Index* (RSEI) diawali dengan mengkalkulasi empat indikator spektral biofisik utama: Kehijauan (*Greenness* via NDVI), Kelembapan (*Wetness* via WET), Kekeringan (*Dryness* via NDBSI), dan Suhu Permukaan (*Heat* via LST) (Mahendra dkk., 2024; Xu, 2013). Keempat indikator mewakili aspek yang berbeda dari kondisi ekologi permukaan. NDVI mewakili kerapatan dan kesehatan vegetasi, WET mewakili kelembapan tanah dan kanopi, NDBSI mewakili tekanan akibat lahan terbangun

dan tanah terbuka, dan LST mewakili panas permukaan. NDVI dan WET bersifat mendukung kualitas ekologi, sedangkan NDBSI dan LST bersifat menekan, sehingga muatannya pada PC1 diharapkan berlawanan tanda. Kombinasi keempatnya mengikuti rancangan RSEI (Xu, 2013) dan dipakai tanpa pembobotan subjektif karena bobot ditentukan oleh PCA. Indikator NDVI dihitung dari rasio saluran *Near-Infrared* (NIR) dan Merah (*RED*) untuk mengukur kerapatan vegetasi dengan formula $\mathrm{NDVI} = (\mathrm{NIR} - \mathrm{RED})/(\mathrm{NIR} + \mathrm{RED})$.

Indikator kelembapan (WET) dihitung dengan transformasi *tasseled cap*: WET = c1·BLUE + c2·GREEN + c3·RED + c4·NIR + c5·SWIR1 + c6·SWIR2. Karena masukan adalah reflektans permukaan, koefisien yang dipakai adalah set SR Landsat 8 dan Landsat 9 hasil Zhai dkk. (2022) yaitu B3: 0.2254, B4: 0.3681, B5: 0.2250, B6: -0.6053, dan B7: -0.6298. Norma kuadrat koefisien diperiksa mendekati satu (0,99996 untuk set Landsat 8 dan 1,00002 untuk set Landsat 9) untuk memastikan tidak ada kesalahan pengetikan. Kontinuitas radiometrik antara OLI dan OLI-2 didukung oleh Xu dkk. (2023), tetapi tetap diperlakukan sebagai sumber ketidakpastian pada pembahasan.

NDBSI dihitung sebagai (IBI + SI)/2 (Xu, 2013). Indeks lahan terbangun IBI = [2·SWIR1/(SWIR1 + NIR) − (NIR/(NIR + RED) + GREEN/(GREEN + SWIR1))] / [2·SWIR1/(SWIR1 + NIR) + (NIR/(NIR + RED) + GREEN/(GREEN + SWIR1))] (Xu, 2008), dan indeks tanah terbuka SI = [(SWIR1 + RED) − (NIR + BLUE)] / [(SWIR1 + RED) + (NIR + BLUE)]. Suhu permukaan (LST) diturunkan dari suhu kecerlangan Band 10 (TB) dengan koreksi emisivitas yang diestimasi dengan metode ambang NDVI (Sobrino dkk., 2004): $\mathrm{LST} = \mathrm{TB} / [1 + (\lambda \cdot \mathrm{TB}/\varrho)\cdot \ln \varepsilon] - 273{,}15$, dengan λ panjang gelombang efektif Band 10 dan $\varrho = 1{,}438 \times 10^{-2}$ m·K. Hasil LST dinyatakan dalam °C; koreksi atmosfer pada LST tidak dilakukan sehingga nilainya diperlakukan sebagai suhu permukaan relatif.

Agar nilai RSEI antartahun sebanding, batas normalisasi ditetapkan satu kali dari gabungan tiga tahun, bukan per tahun. Batas bawah dan atas setiap indikator adalah persentil ke-1 dan ke-99 dari 236.721 titik sampel gabungan, kemudian $\mathrm{NI} = (\mathrm{I} - \mathrm{P1})/(\mathrm{P99} - \mathrm{P1})$ dibatasi pada rentang 0–1 (NDVI 0,147–0,903; WET −0,323 sampai −0,061; NDBSI −0,399 sampai 0,133; LST 20,10–29,07 °C). Matriks kovarians 4 × 4 dihitung dari seluruh piksel ketiga tahun (urutan NDVI, WET, NDBSI, LST), lalu dilakukan PCA satu kali sehingga satu set muatan PC1 berlaku untuk semua tahun. Tanda PC1 diorientasikan agar NDVI dan WET bermuatan positif serta NDBSI dan LST negatif; pemeriksaan tanda lulus pada keempat indikator. Skor PC1 (RSEI0) diskalakan ke rentang 0–1 dengan batas gabungan (RSEI0 minimum −0,936 dan maksimum 0,867) menjadi RSEI akhir, kemudian diklasifikasikan dalam lima kelas berinterval 0,2: Sangat Buruk (0,0–0,2), Buruk (0,2–0,4), Sedang (0,4–0,6), Baik (0,6–0,8), dan Sangat Baik (0,8–1,0). Seluruh parameter dibekukan pada satu evaluasi, dan evaluasi ulang menghasilkan selisih parameter nol.

Kualitas perhitungan diperiksa pada lima titik. Pertama, norma kuadrat koefisien WET dipastikan mendekati satu. Kedua, tanda muatan PC1 diperiksa terhadap makna ekologis indikator. Ketiga, korelasi antarindikator pada data gabungan diperiksa dan dilaporkan apa adanya. Keempat, korelasi RSEI0 dengan NDVI dihitung pada setiap tahun dan harus positif. Kelima, porsi piksel valid sebelum dan sesudah pengisian rata-rata fokal diaudit untuk memastikan pengisian tidak memengaruhi hasil. Selain itu, seluruh parameter akhir (persentil, bobot, dan batas skala) dihitung satu kali, dibekukan, lalu dihitung ulang untuk memastikan selisihnya nol.

Perubahan RSEI dianalisis dengan tiga cara. Pertama, luas setiap kelas dihitung dari jumlah piksel dikalikan luas piksel (900 m^2) dan dinyatakan dalam hektare serta persentase. Kedua, selisih nilai $\Delta\mathrm{RSEI}$ = RSEI tahun akhir − RSEI tahun awal dihitung per piksel untuk periode 2017–2021, 2021–2025, dan 2017–2025, lalu dikelompokkan menjadi Penurunan ($\Delta\mathrm{RSEI} < -0{,}05$), Relatif stabil ($-0{,}05 \le \Delta\mathrm{RSEI} \le 0{,}05$), dan Peningkatan ($\Delta\mathrm{RSEI} > 0{,}05$). Ambang ±0,05 adalah ambang operasional (seperempat lebar kelas), bukan hasil uji statistik.

Ketiga, matriks transisi 5 × 5 disusun dengan tabulasi silang kelas tahun awal dan tahun akhir untuk mengukur persistensi kelas serta perpindahan satu kelas atau lebih. Seluruh perhitungan dijalankan di *Google Earth Engine* (Gorelick dkk., 2017).

III. HASIL DAN DISKUSI

A. Hasil

Analisis komponen utama dari matriks kovarians gabungan ketiga tahun menghasilkan satu set bobot PC1 yang menjelaskan 73,79% varians (Tabel 2). Muatan NDVI (+0,627) dan WET (+0,312) bernilai positif, sedangkan NDBSI (−0,656) dan LST (−0,281) bernilai negatif, sehingga arah muatan sesuai dengan makna ekologis keempat indikator. Berdasarkan nilai mutlak muatan, NDBSI menyumbang 35,0% dan NDVI 33,4% dari total bobot, sedangkan WET dan LST masing-masing 16,6% dan 15,0%.

Tabel 2. Muatan PC1 dan kontribusi indikator

Indikator	Muatan PC1	Kontribusi bobot mutlak (%)	Persentil ke-1	Persentil ke-99
NDVI	+0,627	33,4	0,147	0,903
WET	+0,312	16,6	−0,323	−0,061
NDBSI	−0,656	35,0	−0,399	0,133
LST (°C)	−0,281	15,0	20,10	29,07

Korelasi antarindikator (Tabel 3) menunjukkan NDVI berkorelasi negatif sangat kuat dengan NDBSI (−0,887) dan positif sedang dengan WET (0,488), sedangkan WET berkorelasi negatif dengan NDBSI (−0,667). Korelasi RSEI0 dengan NDVI positif pada setiap tahun, yaitu 0,954 (2017), 0,962 (2021), dan 0,951 (2025).

Tabel 3. Korelasi antarindikator pada data gabungan tiga tahun

	NDVI	WET	NDBSI	LST
NDVI	1,000	0,488	−0,887	−0,430
WET	0,488	1,000	−0,667	−0,221
NDBSI	−0,887	−0,667	1,000	0,514
LST	−0,430	−0,221	0,514	1,000

Ketiga scene memiliki CLOUD_COVER tingkat scene sebesar 40,84% (2017), 23,69% (2021), dan 12,96% (2025) (Tabel 1). Di dalam batas kota, piksel valid asli mencapai 99,81%, 99,87%, dan 99,87%, dan setelah pengisian rata-rata fokal seluruhnya menjadi 99,88%. Pengaruh pengisian terhadap hasil karenanya sangat kecil, yaitu 0,07% luas wilayah pada 2017, 0,004% pada 2021, dan 0,01% pada 2025.

Pada data gabungan tiga tahun, persentil ke-1 dan ke-99 menunjukkan rentang NDVI 0,147–0,903, WET −0,323 sampai −0,061, NDBSI −0,399 sampai 0,133, dan LST 20,10–29,07 °C (Tabel 2). Rentang NDVI yang lebar menunjukkan bahwa wilayah studi mencakup lahan terbangun hingga vegetasi rapat. Nilai WET negatif pada seluruh rentang karena nilai kelembapan *tasseled cap* pada permukaan darat umumnya di bawah nol; yang bermakna adalah perbedaan relatifnya antarpiksel, bukan tanda nilainya.

Tabel 4. Luas dan persentase kelas RSEI temporal terpadu Kota Pekanbaru

No	Kelas	Rentang	2017 (ha)	2017 (%)	2021 (ha)	2021 (%)	2025 (ha)	2025 (%)
1	Sangat Buruk	0,0–0,2	1.808,25	2,83	4.720,40	7,39	3.762,18	5,89
2	Buruk	0,2–0,4	8.212,17	12,85	7.919,22	12,39	9.139,50	14,30
3	Sedang	0,4–0,6	10.982,24	17,19	9.184,45	14,37	10.772,20	16,86
4	Baik	0,6–0,8	18.542,25	29,02	15.216,93	23,81	24.664,19	38,60
5	Sangat Baik	0,8–1,0	24.354,19	38,11	26.858,11	42,03	15.561,05	24,35
	Total		**63.899,11**	**100,00**	**63.899,11**	**99,99***	**63.899,11**	**100,00**

*Selisih 0,01 karena pembulatan. Total luas terpetakan 63.899,11 ha dari luas ROI 64.118,03 ha.

Distribusi luas kelas RSEI disajikan pada Tabel 4. Pada tahun 2017, kelas Sangat Baik mencakup 24.354,19 ha (38,11%) dan kelas Baik 18.542,25 ha (29,02%). Pada tahun 2021, kelas Sangat Baik meningkat menjadi 26.858,11 ha (42,03%), tetapi kelas Sangat Buruk juga naik dari 2,83% menjadi 7,39% dan kelas Baik turun dari 29,02% menjadi 23,81%. Pada tahun 2025, kelas Sangat Baik turun menjadi 15.561,05 ha (24,35%), kelas Baik naik menjadi 24.664,19 ha (38,60%), dan gabungan kelas Sedang dan Buruk mencapai 31,16% (2017: 30,04%; 2021: 26,77%). Sepanjang 2017–2025, kelas Sangat Baik berkurang 8.793,10 ha (13,76 poin persentase), sedangkan kelas Baik bertambah 6.121,90 ha.

Tabel 5. Perubahan luas kelas RSEI, dalam ha (poin persentase)

Kelas	2017–2021	2021–2025	2017–2025
Sangat Buruk	+2.912,15 (+4,56)	−958,23 (−1,50)	+1.953,92 (+3,06)
Buruk	−292,96 (−0,46)	+1.220,28 (+1,91)	+927,33 (+1,45)
Sedang	−1.797,80 (−2,81)	+1.587,75 (+2,48)	−210,04 (−0,33)
Baik	−3.325,32 (−5,20)	+9.447,25 (+14,78)	+6.121,94 (+9,58)
Sangat Baik	+2.503,92 (+3,92)	−11.297,06 (−17,68)	−8.793,14 (−13,76)

Perubahan luas kelas disajikan pada Tabel 5. Pada 2017–2021, kelas Sangat Buruk bertambah 2.912,15 ha atau 161,0% dari luas semula, perubahan relatif terbesar pada periode itu, sedangkan kelas Baik berkurang 3.325,32 ha. Pada 2021–2025, perubahan terbesar adalah penurunan kelas Sangat Baik sebesar 11.297,06 ha (42,1% dari luas semula) yang diimbangi kenaikan kelas Baik sebesar 9.447,25 ha (62,1%). Selama 2017–2025, kelas Sangat Buruk bertambah 108,1% dari luas awal, tetapi kelas ini hanya 2,83% dari wilayah pada 2017 dan 5,89% pada 2025, sehingga kenaikan relatifnya yang besar berasal dari basis yang kecil.

Selisih nilai RSEI (Tabel 6) menunjukkan bahwa pada 2017–2021, 27,19% luas wilayah (173,76 km²) mengalami penurunan, 48,39% relatif stabil, dan 24,42% meningkat, dengan selisih bersih luas peningkatan dikurangi penurunan sebesar −17,74 km². Pada 2021–2025, penurunan meluas menjadi 41,59% (265,73 km²), sedangkan peningkatan hanya 21,08% (134,68 km²), sehingga selisih bersih menjadi −131,05 km². Untuk keseluruhan periode 2017–2025, 45,36% luas wilayah (289,86 km²) mengalami penurunan, 35,34% relatif stabil, dan 19,29% meningkat.

Tabel 6. Luas perubahan nilai RSEI (ambang ±0,05)

Periode	Penurunan (km², %)	Relatif stabil (km², %)	Peningkatan (km², %)
2017–2021	173,76 (27,19)	309,21 (48,39)	156,02 (24,42)
2021–2025	265,73 (41,59)	238,59 (37,34)	134,68 (21,08)
2017–2025	289,86 (45,36)	225,84 (35,34)	123,29 (19,29)

Matriks transisi (Tabel 7 dan Tabel 8) memperlihatkan bahwa 64,39% luas wilayah bertahan pada kelas yang sama pada 2017–2021, 55,97% pada 2021–2025, dan 52,42% pada 2017–2025. Perpindahan ke kelas yang lebih rendah mencakup 19,50% luas wilayah pada 2017–2021 dan 29,33% pada 2021–2025, sedangkan perpindahan ke kelas yang lebih tinggi masing-masing 16,12% dan 14,69%. Sekitar 84–85% perpindahan ke kelas lebih rendah pada kedua periode hanya turun satu kelas. Pada 2021–2025, dari 268,58 km² kelas Sangat Baik tahun 2021, 49,2% (132,04 km²) bertahan, 43,6% (117,12 km²) turun ke Baik, dan 7,2% (19,42 km²) turun ke Sedang atau lebih rendah. Kelas Baik 2021 seluas 152,17 km² terbagi menjadi 65,5% bertahan, 13,4% naik ke Sangat Baik, dan 21,2% turun ke Sedang atau lebih rendah.

Tabel 7. Matriks transisi kelas RSEI 2021–2025

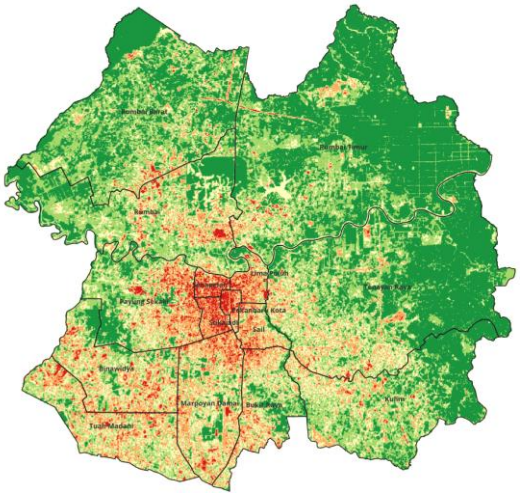
Kelas 2025 (kolom) Kelas 2021 (baris) dalam satuan km²	Sangat Buruk	Buruk	Sedang	Baik	Sangat Baik	Jumlah
Sangat Buruk	28,07	17,23	1,50	0,35	0,06	47,20
Buruk	4,88	47,68	21,69	4,22	0,72	79,19
Sedang	1,36	12,47	50,24	25,33	2,44	91,84
Baik	1,65	6,15	24,38	99,63	20,35	152,17
Sangat Baik	1,66	7,85	9,91	117,12	132,04	268,58
Jumlah	**37,62**	**91,39**	**107,72**	**246,64**	**155,61**	**638,99**

Tabel 8. Ringkasan transisi kelas (% dari luas terpetakan 638,99 km²)

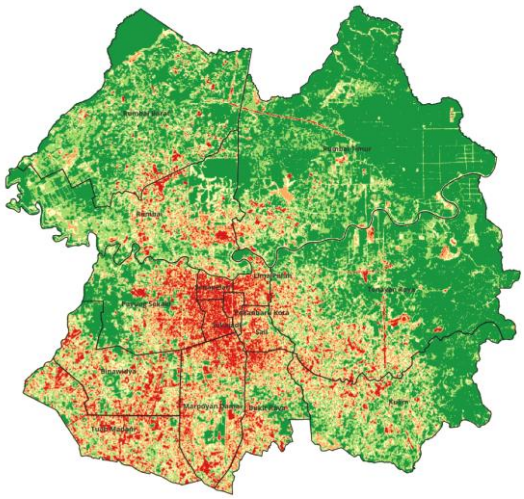
Periode	Bertahan	Turun kelas	Naik kelas	Turun hanya satu kelas (% dari yang turun)
2017–2021	64,39	19,50	16,12	83,9
2021–2025	55,97	29,33	14,69	84,7
2017–2025	52,42	33,46	14,12	82,5

Pada 2017–2021, kelas Sangat Baik 2017 (243,54 km²) sebagian besar bertahan (83,9%), 12,2% turun ke Baik, dan 3,9% turun ke Sedang atau lebih rendah. Kelas Baik 2017 (185,42 km²) justru terbelah: 50,9% bertahan, 31,4% naik ke Sangat Baik, dan 17,7% turun ke Sedang atau lebih rendah. Kelas Sedang 2017 (109,82 km²) berpindah ke dua arah, yaitu 22,5% ke Buruk dan 23,0% ke Baik, sedangkan 30,9% kelas Buruk 2017 (82,12 km²) turun ke Sangat Buruk. Pola ini, yaitu kelas menengah yang menipis dan kedua ujung yang membesar, menjelaskan polarisasi pada Tabel 2.

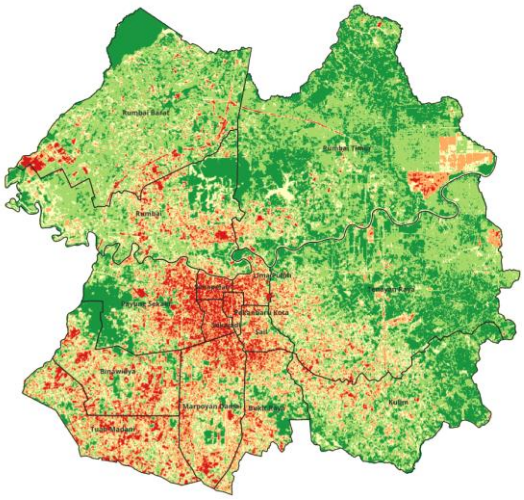
Pada 2017–2025, 47,6% luas kelas Sangat Baik 2017 bertahan, 43,2% turun ke Baik, dan 9,2% turun ke Sedang atau lebih rendah. Kelas Baik 2017 bertahan 58,3%, naik ke Sangat Baik 17,9%, dan turun ke Sedang atau lebih rendah 23,7%. Kelas Sangat Buruk 2017 bertahan 78,6%, yang menunjukkan bahwa kelas terendah relatif menetap, sementara 20,6% luas kelas Buruk 2017 turun ke Sangat Buruk pada 2025. Secara keseluruhan, 33,46% luas wilayah turun kelas dan 14,12% naik kelas selama delapan tahun.



Gambar 1. Peta Kelas RSEI Kota Pekanbaru Tahun 2017 (merah: Sangat Buruk; oranye: Buruk; kuning: Sedang; hijau muda: Baik; hijau tua: Sangat Baik). Sumber: pengolahan citra Landsat 8, proyeksi UTM Zona 47N. Ganti tahun dan satelit untuk Gambar 2 (2021, Landsat 8) dan Gambar 3 (2025, Landsat 9).



Gambar 2. Peta Kelas RSEI Kota Pekanbaru Tahun 2021



Gambar 3. Peta Kelas RSEI Kota Pekanbaru Tahun 2025

Pada 2017 (Gambar 1), kelas Sangat Baik membentuk hamparan hampir kontinu di timur laut dan timur (Rumbai Timur dan Tenayan Raya) serta blok di barat laut (Rumbai Barat). Kelas Sangat Buruk dan Buruk terkonsentrasi di inti kota (Senapelan, Sukajadi, Pekanbaru Kota, dan Sail). Wilayah barat daya dan selatan (Binawidya, Tuah Madani, dan Marpoyan Damai) pada tahun ini masih didominasi kelas Sedang dan Baik dengan bercak kelas rendah yang terpisah.

Pada 2021 (Gambar 2), hamparan kelas Sangat Baik semakin luas dan menyatu di bagian timur laut, timur, dan Kulim. Pada saat yang sama, kelas Sangat Buruk tampak melebar di inti kota dan di koridor barat daya hingga selatan (Binawidya, Tuah Madani, Marpoyan Damai, dan Bukit Raya) dalam bentuk bercak merah yang lebih besar dan lebih rapat daripada 2017. Pola ini sejalan dengan kenaikan kelas Sangat Buruk dari 2,83% menjadi 7,39% dan kelas Sangat Baik menjadi 42,03% (Tabel 4), yaitu polarisasi antara pinggiran yang bernilai RSEI tinggi dan pusat serta koridor selatan yang bernilai rendah.

Pada 2025 (Gambar 3), warna dominan di Rumbai Barat, Rumbai, dan sebagian besar Rumbai Timur bergeser dari hijau tua ke hijau muda, yang menggambarkan penurunan satu kelas dari Sangat Baik ke Baik (Tabel 6). Kelas Sangat Baik bertahan sebagai hamparan di Tenayan Raya bagian timur dan Kulim serta beberapa blok yang lebih kecil di barat. Bercak kelas Sangat Buruk di barat daya dan selatan tampak lebih sedikit dibandingkan 2021, sejalan dengan penurunan kelas Sangat Buruk menjadi 5,89%, sedangkan inti kota tetap berkelas rendah. Dua gugus bercak kelas rendah yang terpisah tampak di ujung barat laut Rumbai Barat dan pada blok berbentuk persegi panjang di timur laut. Bentuk geometrisnya menunjukkan kemungkinan pembukaan atau pemanenan lahan, tetapi dugaan ini perlu dipastikan dengan citra resolusi tinggi atau data tutupan lahan. Uraian pola spasial di atas bersifat deskripsi visual dan belum dikuantifikasi per kecamatan; secara keseluruhan perubahan antarkelas yang berdekatan lebih dominan daripada hilangnya kawasan berkualitas baik secara menyeluruh.

B. Diskusi

Arah muatan PC1 menegaskan bahwa NDVI dan WET berperan sebagai indikator kondisi baik, sedangkan NDBSI dan LST sebagai indikator tekanan. Namun, bobot tidak terbagi merata: NDBSI dan NDVI menyumbang sekitar 68% dari total bobot mutlak dan keduanya berkorelasi sangat kuat (−0,887). Korelasi RSEI0 dengan NDVI sebesar 0,95–0,96 pada setiap tahun menunjukkan bahwa RSEI dalam penelitian ini terutama mencerminkan gradien antara vegetasi rapat dan lahan terbangun atau tanah terbuka, sedangkan kontribusi

kelembapan dan suhu lebih kecil. Korelasi NDVI–NDBSI yang tinggi sebagian muncul karena NDBSI dibangun dari pita merah dan inframerah dekat yang juga membentuk NDVI, sehingga kedua indikator tidak sepenuhnya independen. PC1 yang menjelaskan 73,79% varians menunjukkan bahwa sebagian besar variasi keempat indikator dapat diringkas dalam satu komponen.

Periode 2017–2021 tidak menunjukkan pemulihan yang merata. Kelas Sangat Baik memang bertambah 3,92 poin persentase, tetapi kelas Sangat Buruk juga bertambah 4,56 poin dan kelas Baik berkurang 5,20 poin, sehingga distribusi menjadi lebih terpolarisasi. Secara spasial, kenaikan kelas Sangat Buruk tampak terkonsentrasi di inti kota dan koridor barat daya hingga selatan (Gambar 2), sedangkan kenaikan kelas Sangat Baik tampak di bagian timur laut dan timur. Pada tingkat piksel, 27,19% luas wilayah menurun dan 24,42% meningkat, dengan selisih bersih mendekati nol (−17,74 km²). Pertambahan kelas Sangat Baik terutama berasal dari perpindahan kelas Baik (58,20 km²), sedangkan pertambahan kelas Sangat Buruk terutama berasal dari kelas Buruk (25,35 km²). Peran pembatasan mobilitas masa pandemi tidak dapat diuji dengan data penelitian ini. Perbedaan bulan akuisisi (24 September 2017 dan 30 Mei 2021) juga dapat mengubah fenologi vegetasi, kelembapan tanah, dan suhu permukaan, sehingga penjelasan pandemi hanya dapat diajukan sebagai hipotesis yang memerlukan data tutupan lahan atau citra bulan yang sama.

Penurunan paling jelas terjadi pada 2021–2025: kelas Sangat Baik turun 17,68 poin persentase, sedangkan kelas Baik naik 14,78 poin. Matriks transisi menunjukkan bahwa penurunan ini sebagian besar berupa penurunan satu kelas (43,6% luas kelas Sangat Baik 2021 menjadi Baik) dan hanya 7,2% yang turun ke Sedang atau lebih rendah. Gabungan kelas Sedang dan Buruk hanya bertambah dari 26,77% menjadi 31,16%. Karena itu, gambaran yang sesuai adalah penurunan bertahap yang meluas, dengan 41,59% luas wilayah mengalami penurunan nilai lebih dari 0,05 dan 21,08% meningkat. Penurunan satu kelas pada nilai yang dekat batas kelas (0,8) dapat dipicu perubahan kecil pada indikator, termasuk perbedaan tanggal akuisisi (30 Mei 2021 dan 2 Juni 2025) dan sensor (Landsat 8 dan 9), sehingga temuan ini dibaca sebagai indikasi penurunan kualitas, bukan bukti tunggal konversi lahan.

Perbedaan sensor juga perlu dibaca terhadap arah penurunan yang ditemukan. Xu dkk. (2024) melaporkan bahwa LST Landsat 9 rata-rata 0,24 °C lebih rendah daripada Landsat 8, dan hingga 0,58 °C lebih rendah pada area dominan lahan terbangun, berdasarkan lima area uji di dunia. Karena LST bermuatan negatif pada PC1, suhu yang sedikit lebih rendah pada citra 2025 cenderung menaikkan nilai RSEI, bukan menurunkannya. Dengan demikian, perbedaan sensor pada indikator suhu tidak menjelaskan penurunan kelas Sangat Baik pada 2021–2025, meskipun pengaruh pada indikator lain tetap tidak dapat dikesampingkan dan besarnya tidak dihitung dalam penelitian ini.

Arah umum ini, yaitu tekanan yang lebih tinggi di sekitar inti kota dan ruang transisinya, sejalan secara kualitatif dengan temuan Giofandi et al. (2024) mengenai kerentanan ekologi wilayah peri-urban Pekanbaru. Perbandingan kuantitatif langsung tidak dapat dilakukan karena periode, citra, dan skema normalisasi berbeda. Hasil penelitian ini lebih tepat dipakai sebagai data dasar untuk menentukan kawasan yang perlu dipantau, misalnya piksel kelas Sangat Baik 2021 yang turun pada 2025. Pengaitan dengan arahan pemanfaatan ruang dalam RTRW memerlukan tumpang susun dengan peta pola ruang dan data perubahan tutupan lahan, yang berada di luar cakupan naskah ini.

Proporsi kelas Baik dan Sangat Baik pada 2025 (62,95%) lebih kecil daripada proporsi area belum terbangun sebesar 76% yang dilaporkan Pemerintah Kota Pekanbaru (2025). Perbedaan ini wajar karena kedua ukuran tidak setara: RSEI menilai kondisi biofisik, sehingga lahan belum terbangun yang bervegetasi rendah, terbuka, atau panas tetap dapat berkelas Sedang atau lebih rendah. Dengan demikian, kelas RSEI tidak boleh dibaca sebagai peta tutupan lahan, dan angka RSEI saja tidak dapat menyimpulkan perubahan luas kawasan terbangun.

Dari sisi pengelolaan, hasil menunjukkan dua kelompok kawasan dengan kebutuhan berbeda. Kawasan kelas Sangat Baik 2021 yang turun ke Baik pada 2025 (117,12 km²) menjadi kandidat pemantauan prioritas karena penurunannya masih satu kelas dan penyebabnya dapat ditelusuri sebelum berlanjut. Kawasan kelas Sangat Buruk dan Buruk yang bertahan pada 2021–2025 (28,07 km² dan 47,68 km²) menunjukkan area yang konsisten bernilai rendah dan lebih sesuai dikaji sebagai target peningkatan ruang hijau. Kedua pembacaan ini bersifat indikatif dan baru dapat menjadi dasar kebijakan setelah dikonfirmasi dengan data tutupan lahan dan observasi lapangan.

Pendekatan terpadu membuat nilai RSEI dan kelasnya memiliki arti yang sama pada ketiga tahun, karena batas normalisasi dan bobot PC1 tidak berubah. Perbedaan kelas antartahun karenanya mencerminkan perbedaan nilai indikator, bukan perbedaan skala. Kelemahannya, hanya tiga *scene* yang membentuk kerangka gabungan, sehingga *scene* yang menyimpang (misalnya karena kondisi atmosfer atau fenologi) dapat menggeser batas persentil dan bobot untuk semua tahun. Selain itu, nilai RSEI menjadi sensitif terhadap perbedaan kondisi akuisisi karena perbedaan tersebut tidak lagi diserap oleh normalisasi per tahun. Oleh sebab itu, citra pada bulan yang sama dan lebih dari satu tanggal per tahun akan memperkuat keterbandingan.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, setiap tahun diwakili satu tanggal akuisisi pada bulan yang berbeda (September, Mei, dan Juni), sehingga selisih RSEI dapat mengandung pengaruh fenologi dan kelembapan musiman. Kedua, tahun 2025 memakai sensor Landsat 9 sedangkan dua tahun lainnya Landsat 8; meskipun kontinuitas kedua sensor telah dikaji (Xu dkk., 2023), selisih kecil tetap dapat memengaruhi piksel yang dekat batas kelas. Ketiga, LST dihitung tanpa koreksi atmosfer sehingga diperlakukan sebagai suhu permukaan relatif. Keempat, ambang perubahan ±0,05 dan interval kelas 0,2 bersifat operasional dan belum diuji sensitivitasnya. Kelima, hasil belum divalidasi dengan observasi lapangan atau data tutupan lahan.

Penelitian lanjutan sebaiknya menambahkan (1) citra pada bulan yang sama atau komposit multitanggal per tahun, (2) uji sensitivitas ambang perubahan dan batas kelas, (3) statistik zonal per kecamatan agar kawasan penurunan dapat dirujuk secara administratif, dan (4) validasi dengan observasi lapangan atau data tutupan lahan. Rangkaian RSEI terpadu juga dapat diperpanjang dengan memakai parameter yang sama (persentil, bobot, dan batas skala), sehingga tahun baru dapat dibandingkan langsung dengan 2017, 2021, dan 2025 tanpa menghitung ulang seluruh rangkaian.

IV. KESIMPULAN

RSEI temporal terpadu Kota Pekanbaru, dengan satu kerangka normalisasi dan satu set bobot PC1 (varians 73,79%; muatan NDVI +0,627, WET +0,312, NDBSI −0,656, LST −0,281), menunjukkan perubahan kualitas ekologi yang bertahap pada 2017–2025. Kelas Sangat Baik berubah dari 38,11% (2017) menjadi 42,03% (2021) dan 24,35% (2025), sedangkan kelas Baik naik menjadi 38,60% pada 2025; periode 2017–2021 bersifat terpolarisasi dan periode 2021–2025 didominasi penurunan satu kelas dari Sangat Baik ke Baik (43,6% luas kelas Sangat Baik 2021). Sebanyak 41,59% luas wilayah mengalami penurunan nilai RSEI lebih dari 0,05 pada 2021–2025 dan 45,36% pada 2017–2025, sedangkan hanya 19,29% meningkat pada 2017–2025. Temuan ini menjawab tujuan penelitian dan menjadi data dasar untuk menentukan kawasan yang perlu dipantau, dengan keterbatasan berupa satu tanggal akuisisi per tahun, perbedaan sensor, dan belum adanya validasi lapangan.

ACKNOWLEDGEMENT

Penulis menyampaikan apresiasi dan ucapan terima kasih sebesar-besarnya kepada Program Studi Magister Ilmu Lingkungan, Program Pascasarjana, Universitas Riau atas dukungan akademis selama pelaksanaan penelitian ini, serta kepada panitia Seminar Nasional LPPM Universitas Jenderal Soedirman XVI Tahun 2026 atas kesempatan untuk mendiseminasikan hasil riset ini.

REFERENCES

Baig, M. H. A., Zhang, L., Shuai, T., & Tong, Q. (2014). Derivation of a tasselled cap transformation for Landsat-8 OLI Operational Land Imager. *Remote Sensing Letters*, *5*(5), 423–431. https://doi.org/10.1080/2150704X.2014.915434

Giofandi, E. A., Syahzaqi, I., Sekarjati, D., Putriana, A. M., Putti, H. M. D. M., & Sekarrini, C. E. (2024). Assessment of remote sensing approach for urban ecological quality evaluation in Pekanbaru City, Riau Province Indonesia. *Geography, Environment, Sustainability*, *17*(1), 28–35. https://doi.org/10.24057/2071-9388-2023-2640

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

Mahendra, A. I., Santosa, S. H. M. B., & Widayani, P. (2024). Analisis kualitas ekologi perkotaan berbasis data penginderaan jauh di Kota Bandung tahun 2023. *Geomedia: Majalah Ilmiah dan Informasi Kegeografian*, *22*(1), 60–72. https://doi.org/10.21831/gm.v22i1.70337

Mahendra, A. I., Widayani, P., & Murti, S. H. (2025). Monitoring changes in ecological quality of land cover using Landsat-8 OLI imagery in Semarang City. *International Journal of Geoinformatics*, *21*(8), 67–77. https://doi.org/10.52939/ijg.v21i8.4367

Masek, J. G., Wulder, M. A., Markham, B., McCorkel, J., Crawford, C. J., Storey, J., & Jenstrom, D. T. (2020). Landsat 9: Empowering open science and applications through continuity. *Remote Sensing of Environment*, *248*, 111968. https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111968

Pekanbaru, P. K. (2025). *Laporan Rencana Aksi Mitigasi dan Adaptasi Perubahan Iklim Kota Pekanbaru*. Pemerintah Kota Pekanbaru & UCLG ASPAC.

Pickett, S. T. A., Cadenasso, M. L., Grove, J. M., Nilon, C. H., Pouyat, R. V., Zipperer, W. C., & Costanza, R. (2001). Urban ecological systems: Linking terrestrial ecological, physical, and socioeconomic components of metropolitan areas. *Annual Review of Ecology and Systematics*, *32*, 127–157. https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.32.081501.114012

Sidiq, W. A. B. N., Sanjoto, T. B., & Jabbar, A. (2025). Assessing environmental quality using the Risk Screening Environmental Indicators (RSEI) method: A multi-year remote sensing approach. *Advance Sustainable Science, Engineering and Technology*, *7*(3), 0250302-01-0250302–018. https://doi.org/10.26877/asset.v7i3.1766

Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., & Paolini, L. (2004). Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment*, *90*(4), 434–440. https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.02.003

Wang, Y., & Mohamed Afla, M. R. B. (2024). Evaluation of urban ecological benefits utilizing vegetated areas metrics in Nanjing, China. *Geocarto International*, *39*(1), 2395321. https://doi.org/10.1080/10106049.2024.2395321

Xu, H. (2008). A new index for delineating built-up land features in satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, *29*(14), 4269–4276. https://doi.org/10.1080/01431160802039957

Xu, H. (2013). A remote sensing urban ecological index and its application. *Acta Ecologica Sinica*, *33*(24), 7853–7862. https://doi.org/10.5846/stxb201212131797

Xu, H., Ren, M., & Lin, M. (2024). Cross-comparison of Landsat-8 and Landsat-9 data: A three-level approach based on underfly images. *GIScience & Remote Sensing*, *61*(1), 2318071. https://doi.org/10.1080/15481603.2024.2318071

Xu, H., Ren, M., & Yang, L. (2023). Evaluating the consistency of surface brightness, greenness, and wetness observations between Landsat-8 OLI and Landsat-9 OLI2 through underfly images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, *124, Article 103546*. https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103546

Xu, H., Wang, Y., Guan, H., Shi, T., & Hu, X. (2019). Detecting ecological changes with a remote sensing based ecological index (RSEI) produced time series and change vector analysis. *Remote Sensing*, *11*(20), 2345. https://doi.org/10.3390/rs11202345

Zafar, Z., Zha, Y. Y., Fahd, S., & Ji, Y. Z. (2024). The interplay between urbanization, vegetation loss and surface heat island in cities: Two decadal empirical evidence from Pakistan. *Theoretical and Applied Climatology*, *155*(12), 9911–9928. https://doi.org/10.1007/s00704-024-05038-w

Zhai, Y., Roy, D. P., Martins, V. S., Zhang, H. K., Yan, L., & Li, Z. (2022). Conterminous United States Landsat-8 top of atmosphere and surface reflectance tasseled cap transformation coefficients. *Remote Sensing of Environment*, *274*, 112992. https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.112992