

LAPORAN PENELITIAN MANDIRI

**EMISI CO₂-eq AKIBAT PERUBAHAN TUTUPAN LAHAN DI
KECAMATAN CISARUA KABUPATEN BOGOR**

Tim Penyusun:

Nining Puspaningsih
Sri Rahayu
Risty Aji Dwi Wahyuningtyas



**DEPARTEMEN MANAJEMEN HUTAN
FAKULTAS KEHUTANAN DAN LINGKUNGAN
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR, JUNI 2024**

LEMBAR PENGESAHAN

Judul Penelitian : Estimasi emisi Co₂e_q akibat perubahan tutupan lahan di Kecamatan Cisarua, Kabupaten Bogor

Ketua Tim Peneliti :
Nama Lengkap : Dr. Nining Puspaningsih, M.Si.
Jenis Kelamin : Perempuan
Email : n_puspaningsih@apps.ipb.ac.id

Anggota Tim Peneliti 1 :
Nama Lengkap : Dra. Sri Rahayu, M.Si.
Jenis Kelamin : Perempuan
Email : srira_mnh@apps.ipb.ac.id

Anggota Tim Peneliti 2 :
Nama Lengkap : Risty Aji Dwi Wahyuningtyas
Jenis Kelamin : Perempuan
Email : ristyawahyuningtyas@apps.ipb.ac.id

Bogor, 2 Mei 2024

Mengetahui
a.n Dekan
Wakil Dekan
Bidang Akademik dan Kemahasiswaan
Fakultas Kehutanan dan Lingkungan IPB,



Prof. Dr. Ir. Noor Farikhah Haneda, M.Si.
NIP. 19660921199003200

Ketua Tim Peneliti

Dr. Nining Puspaningsih, M.Si.
NIP. 196306121990032014

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kami panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat-Nya, sehingga pembuatan laporan penelitian mandiri dapat terlaksana dengan baik. Shalawat dan salam semoga tetap tercurahkan kepada Rasulullah SAW.

Laporan penelitian ini merupakan hasil awal penelitian yang merupakan kegiatan penelitian Divisi bagi skripsi mahasiswa program sarjana (S1) Departemen Manajemen Hutan. Penelitian mandiri ini merupakan salah satu rangkaian kegiatan akademik untuk mengembangkan kemampuan dasar kompetensi mahasiswa dan dosen Divisi Perencanaan Kehutanan IPB.

Bogor, Mei 2024

Tim Penyusun

EMISI CO₂-eq AKIBAT PERUBAHAN TUTUPAN LAHAN DI KECAMATAN CISARUA KABUPATEN BOGOR

Nining Puspaningsih*, Sri Rahayu, Risty Aji Dwi Wahyuningtyas

Departemen Manajemen Hutan Fakultas Kehutanan IPB, Jl. Huni Kampus
IPB Dramaga, Bogor, Jawa Barat, Indonesia 16680

*Email: n_puspaningsih@apps.ipb.ac.id

ABSTRACT

The population increase is a factor contributing to land cover change in Cisarua District. Monitoring these changes is carried out using remote sensing technology. Land cover change, especially the conversion of forested land to non-forest, has an impact on CO₂e emissions. The study aimed to evaluate land cover changes using Landsat 8 imagery from 2015 and 2022 and estimate CO₂e emissions due to these land cover changes. The classification method of land cover used digital classification specifically maximum likelihood classification and CO₂e emission estimation used secondary data on carbon values for each land cover class. The research results show that land cover classification produced nine land cover classes: built-up land, water bodies, open land, primary forest, secondary forest, plantations, dry land agriculture, wet land agriculture and shrubs. Changes in land cover from 2015 to 2022 indicate that the area of built-up land has increased by 1414.60 ha. However, in Cisarua District, the dominant land cover from 2015 to 2022 is primary forest, although its area has decreased. As a result of land cover change from 2015 to 2022, the estimated CO₂-eq emissions are 185,790.1 tons or 25,641 tons/year.

Keywords: Landsat 8 imagery, maximum likelihood classification, land cover, remote sensing, CO₂-eq emissions

PENDAHULUAN

Land Use Land Cover (LULC) atau yang disebut dengan penggunaan lahan dan tutupan lahan merupakan dua terminologi yang saling berkaitan. Tutupan lahan adalah gambaran mengenai bagaimana permukaan bumi terlihat secara fisik seperti distribusi tumbuhan, air, dan tanah termasuk juga sesuatu hal yang dihasilkan dari aktivitas manusia seperti hutan. Sementara itu, penggunaan lahan merupakan penggunaan lahan oleh manusia yang memfokuskan pada peran penting lahan untuk kegiatan ekonomi dan sosial seperti pertanian (Rawat dan Kumar 2015). Perubahan tutupan lahan merupakan perubahan yang terjadi dari satu jenis tutupan lahan ke tutupan lahan lainnya sebagai akibat dari aktivitas manusia baik melalui tindakan langsung maupun tidak langsung (Kullo *et al.* 2021).

Faktor yang menyebabkan perubahan tutupan lahan adalah dinamika pertumbuhan perkotaan, perubahan demografis, dan kepadatan penduduk (Kaswanto *et al.* 2021). Pertambahan penduduk menimbulkan efek yang serius terhadap keseimbangan sumber daya alam seperti meningkatnya permintaan terhadap sumber daya alam yang berdampak pada perubahan tutupan lahan. Pertambahan penduduk juga meningkatkan kebutuhan pangan, air bersih, udara bersih, dan pemukiman yang akan mengakibatkan menurunnya kualitas lingkungan (Akhirul *et al.* 2020). Dampak pertambahan penduduk terhadap lingkungan lainnya yaitu kerusakan ekosistem seperti perubahan iklim, degradasi lahan, dan deforestasi. Perubahan penggunaan lahan dan tutupan lahan khususnya perubahan tutupan lahan hutan menjadi bukan hutan berdampak kepada lingkungan seperti perubahan kualitas tanah, sumber daya air, dan meningkatnya emisi gas rumah kaca yang dapat berakibat pada perubahan iklim (Chatterjee dan Majumdar 2022). Selain itu, perubahan penggunaan lahan dan tutupan lahan juga berdampak pada hilangnya keanekaragaman hayati dan menurunnya serapan carbondioksida (Seto *et al.* 2012). Jumlah penduduk di Kabupaten Bogor menunjukkan peningkatan dari tahun 2020 ke 2022 yaitu tahun 2020 sebesar 5.427.068 jiwa dan tahun 2022 sebesar 5.566.840 jiwa. Sedangkan Kecamatan Cisarua merupakan salah satu kecamatan di Kabupaten Bogor yang berada di hulu DAS Ciliwung. Lokasi ini menunjukkan adanya peningkatan jumlah penduduk dari tahun 2020 ke 2022 yaitu tahun 2020 sebesar 127.096 jiwa dan tahun 2022 sebesar 130.060 jiwa. Hal tersebut dapat mengakibatkan perubahan jenis penggunaan dan tutupan lahan khususnya tutupan lahan hutan menjadi bukan hutan yang pada akhirnya dapat menurunkan serapan carbondioksida di udara.

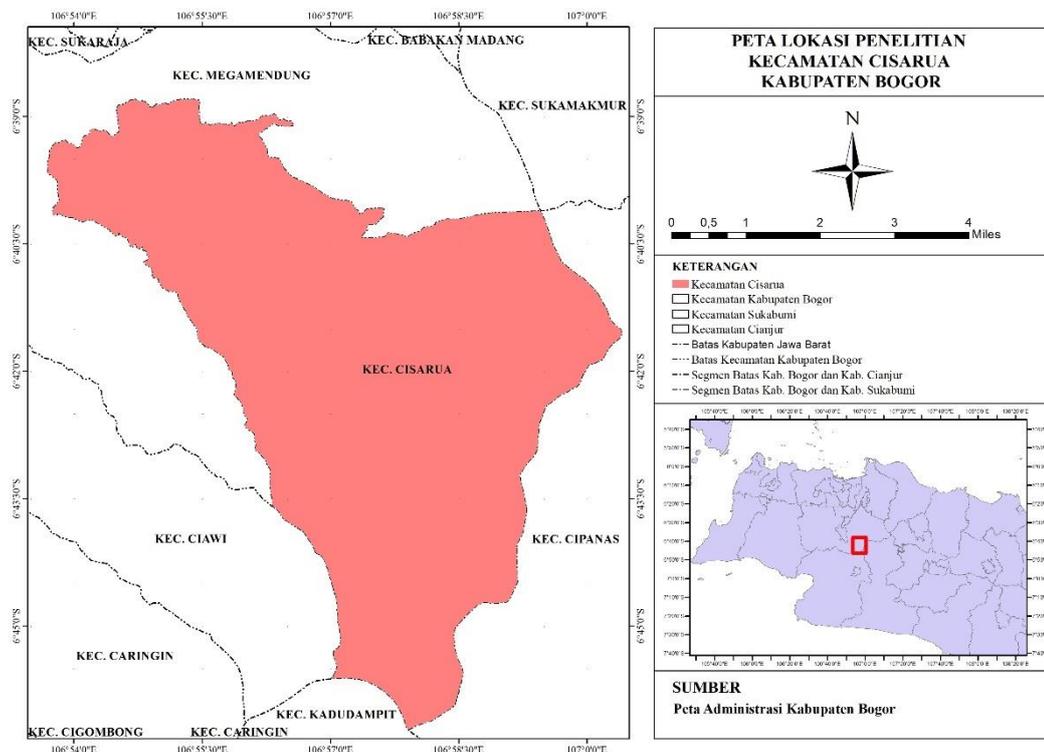
Citra Landsat-8 merupakan generasi baru dari seri citra Landsat yang diluncurkan pada tahun 2013 oleh *United States Geological Survey* (USGS) yang bekerja sama dengan *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) dan NASA *Goddard Space Flight Center*. Citra Landsat-8 dilengkapi dengan *Operational Land Imager* (OLI) dan *Thermal Infrared Sensor* (TIRS). Citra Landsat-8 memiliki *bandwidth* yang lebih sempit dan dua *band* spektral baru yaitu untuk awan *cirrus* dan aerosol pantai dibandingkan dengan satelit Landsat seri sebelumnya (Lu *et al.* 2022). Citra Landsat-8 memiliki resolusi temporal setiap enam belas hari dan resolusi spasial hingga 30 meter (Wulder *et al.* 2019). Citra Landsat-8 tersedia untuk diunduh secara gratis dalam beberapa format di portal online sehingga data Landsat mudah untuk diakses. Oleh karena itu, citra Landsat-8 sangat baik digunakan untuk memonitoring perubahan tutupan lahan khususnya

perubahan tutupan lahan hutan menjadi bukan hutan. Penelitian bertujuan mengidentifikasi dan menganalisis perubahan tutupan lahan pada Kecamatan Cisarua tahun 2015 dan 2022 menggunakan citra Landsat, serta menganalisis Estimasi Emisi CO₂-eq Akibat Perubahan Penggunaan Lahan.

METODE

Loasi Penelitian

Penelitian dilaksanakan pada bulan Januari sampai dengan Mei 2023. Lokasi lokasi penelitian berada di Kecamatan Cisarua. Secara geografis Kecamatan Cisarua berada antara 6°38'48" - 6°46'16" Lintang Selatan dan 106°53'40" - 107°00'23" Bujur Timur dan secara administratif memiliki batas wilayah sebelah Utara adalah Kecamatan Megamendung, sebelah Timur berbatasan dengan Kecamatan Cipanas. Sebelah Selatan Kecamatan Kadudampit, dan sebelah Barat adalh Kecamatan Ciawi (Gambar 1).



Gambar 1 Peta lokasi penelitian

Peralatan dan Data

Peralatan yang digunakan dalam pengolahan data adalah laptop yang dilengkapi dengan program *software* ArcGIS 10.8, Erdas Imagine 2015, Microsoft Office berupa Excel dan Word. Sedangkan alat yang digunakan untuk pengambilan data lapangan yaitu alat tulis, kamera *handphone* yang digunakan sebagai alat dokumentasi, dan Avenza Maps. Data yang digunakan dalam penelitian ini meliputi

data primer dan data sekunder. Data utama yang digunakan adalah data yang diperoleh langsung dari hasil pengambilan lapangan berupa *ground check* lokasi penelitian. dan citra Landsat 8 tahun 2015 dan 2022 yang diperoleh dari *website Earthexplorer.usgs.gov*, data pendukung adalah Peta Administrasi Kabupaten Bogor dan nilai biomasa pada setiap kelas tutupan lahan.

Pengolahan dan analisis data

Kegiatan pada penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan yaitu pra-pengolahan citra dilanjutkan dengan interpretasi citra awal Landsat 8 tahun 2022 dan tahun 2015, pengambilan data lapangan (*ground check*), pengolahan citra secara digital citra Landsat 8 tahun 2022 dan tahun 2015, dan analisis data berupa uji akurasi, analisis perubahan tutupan lahan tahun 2022 dan tahun 2015, serta analisis estimasi emisi CO₂ akibat perubahan tutupan lahan tahun 2022 dan tahun 2015.

Pra-pengolahan citra merupakan kegiatan sebelum melakukan proses pengolahan citra. Data citra satelit yang diperoleh tidak terlepas dari gangguan sehingga dilakukan restorasi dan koreksi. Kegiatan pra pengolahan citra yang dilakukan adalah koreksi radiometrik dan koreksi geometrik.

Interpretasi visual citra dilakukan sebelum melakukan pengambilan data lapangan untuk mengetahui lokasi serta tutupan lahan yang terlihat pada citra. Interpretasi citra merupakan proses menganalisis dan memahami informasi dalam sebuah data citra untuk mengidentifikasi dan menginterpretasikan objek di dalamnya. Kelas tutupan lahan yang digunakan mengikuti Badan Standarisasi Nasional tahun 2015 dengan skala 1:250.000. Kelas yang diperoleh adalah lahan terbangun, badan air, lahan terbuka, hutan primer, hutan sekunder, perkebunan, pertanian lahan kering, pertanian lahan basah, dan semak belukar. Dalam menginterpretasikan citra didasarkan pada pengidentifikasian ciri suatu objek spasial dengan menggunakan delapan elemen penafsiran. Elemen penafsiran tersebut sebagai berikut.

Warna atau rona adalah tingkat kecerahan suatu objek pada citra yang tampak oleh mata,

- 1) Bentuk adalah konfigurasi atau kerangka objek yang mencirikan suatu objek sehingga citra dapat diidentifikasi langsung berdasarkan kriteria,
- 2) Pola adalah susunan keruangan yang mencirikan objek bentukan manusia atau objek bentukan alamiah,
- 3) Tekstur menunjukkan halus atau tidaknya suatu objek dalam tampilan citra yang terlihat oleh mata,
- 4) Ukuran objek berupa jarak, luas, tinggi, lereng, dan volume yang harus dipertimbangkan sehubungan dengan skala citra,
- 5) Bayangan adalah elemen yang membantu dalam memberikan gambaran suatu objek dari bentuk atau kerangka bayangan,
- 6) Lokasi adalah letak suatu objek terhadap objek lain di sekitarnya, dan
- 7) Asosiasi adalah keterkaitan objek terhadap objek lainnya.

Tahap interpretasi visual citra sebagai berikut (Arsy 2014).

- 1) Deteksi merupakan upaya untuk mengamati data secara komprehensif baik yang dapat dilihat maupun tidak terlihat yang bertujuan menentukan keberadaan suatu objek,
- 2) Identifikasi merupakan proses untuk mengenali objek yang tergambar dalam citra menggunakan ciri-ciri yang terekam oleh sensor yaitu ciri spektral, spasial, dan temporal,
- 3) Analisis merupakan proses mendeliniasi berdasarkan dengan tahap sebelumnya sehingga citra dapat digunakan dalam berbagai kepentingan.
- 4) Interpretasi visual yang dilakukan pada penelitian ini baru pada tahap deteksi dan identifikasi citra.

Pengambilan data lapangan (*ground check*)

Pengambilan data lapangan dilakukan di Kecamatan Cisarua Kabupaten Bogor setelah mengidentifikasi melalui citra satelit. Pengambilan data lapangan merupakan kegiatan pengamatan serta pencatatan informasi penting dari objek yang diamati. Kegiatan ini bertujuan menentukan koordinat masing-masing klasifikasi tutupan lahan dengan menggunakan GPS (*Global Positioning System*). Selain itu, pengambilan data lapangan ini untuk memvalidasi mengenai keadaan tutupan lahan yang sebenarnya. Dalam kegiatan ini, juga dilakukan wawancara untuk mengetahui perubahan tutupan lahan di lokasi pengamatan. Titik *ground check* yang diperoleh sebanyak 62 titik dengan menggunakan metode *purposive sampling* dengan tujuan mewakili setiap jenis tutupan lahan dan aksesibilitas di lapangan.

Pengolahan citra secara digital

Pengolahan citra pada tahun 2022 secara digital pada tahap ini menggunakan *software* Erdas Imagine 2015. Analisis citra secara digital dilakukan pada dua tahun yang berbeda yaitu 2015 dan 2022. Pengolahan citra pada tahun 2015 dilakukan dengan tahap yang sama dengan citra tahun 2022 hanya penentuan *training area* dilakukan pada tutupan lahan yang tidak berubah. Pengolahan citra secara digital dilakukan melalui berbagai tahapan sebagai berikut.

1) Penentuan area contoh (*training area*)

Penentuan area contoh merupakan suatu proses memilih sampel dari citra yang digunakan untuk membangun model klasifikasi. Penentuan dan pemilihan area contoh didasarkan pada hasil pengamatan di lapangan. Pengambilan data statistik (nilai *digital number*) dengan cara mengambil contoh piksel dari setiap kelas tutupan lahan dan menentukan lokasi pada citra. Informasi statistik tersebut dilakukan untuk melakukan analisis separabilitas dan akurasi

2) Analisis separabilitas

Analisis separabilitas merupakan analisis yang digunakan untuk mengukur tingkat keterpisahan area contoh dari setiap kelas tutupan lahan (Kosasih *et al.* 2019). Analisis ini dilakukan setelah pembuatan area contoh (*training area*) dengan metode yang digunakan yaitu transformasi divergensi. Metode ini mengukur tingkat keterpisahan antar kelas tutupan lahan menggunakan elemen dan matriks (Jaya 2010). Nilai transformasi divergen memiliki skala 0 – 2000 dalam menunjukkan tingkat keterpisahan antar kelas dan nilai tersebut dapat ditentukan dengan menggunakan rumus sebagai berikut (Jensen 2005).

$$TD_{ij} = 2000 \left[1 - \exp \left[\frac{D_{ij}}{8} \right] \right]$$

Keterangan:

TD_{ij} = separabilitas antara kelas i dengan kelas j
 \exp = -2,718

Kriteria tingkat keterpisahan antar kelas dari nilai transformasi divergensi sebagai berikut (Jaya 2010).

- a. Tidak terpisah (*unseparable*) = <1600
- b. Kurang keterpisahannya = 1600 – <1800
- c. Cukup keterpisahannya = 1800 – <1900
- d. Baik keterpisahannya = 1900 – <2000
- e. Sangat baik keterpisahannya = 2000

3) Klasifikasi terbimbing (*supervised classification*)

Klasifikasi citra yang digunakan dalam penelitian ini adalah klasifikasi citra secara terbimbing dengan metode *Maximum Likelihood Classification* (MLC). Metode ini didasarkan pada faktor probabilitas dari suatu piksel yang dimiliki oleh setiap kelas yang telah ditentukan sebelumnya dan dikelaskan ke dalam kelas tertentu. Metode ini memiliki keunggulan memiliki kemampuan interpretasi parameter yang jelas dan mudah dilakukan (Shujun Liang *et al.* 2020). Namun, apabila peluang tidak diketahui maka besar peluang dinyatakan sama untuk semua kelas (satu per jumlah kelas yang dibuat) (Jaya 2010).

4) Reklasifikasi

Reklasifikasi merupakan klasifikasi ulang peta hasil kelas tutupan lahan. Reklasifikasi dilakukan ketika hasil klasifikasi terdapat kesalahan seperti adanya

lahan terbangun yang terbaca di areal pertanian lahan basah. Tahap ini dilakukan berdasarkan hasil *ground check*, *google earth pro*, interpretasi visual citra, dan hasil wawancara pada lokasi penelitian untuk tahun.

Uji Akurasi

Analisis data dengan melakukan uji akurasi untuk mengetahui akurasi hasil klasifikasi metode *maximum likelihood* dengan membandingkan hasil klasifikasi citra dengan kelas yang didapatkan pada *ground check*. Analisis tersebut dilakukan menggunakan *confusion matrix* atau matriks kontingensi yang disajikan pada Tabel 1. Analisis penilaian akurasi dilakukan pada peta hasil klasifikasi 2022 sedangkan untuk peta hasil klasifikasi tahun 2015 menggunakan kunci penafsiran pada hasil klasifikasi tahun 2022.

Tabel 1 Matriks kesalahan (*confusion matrix*)

Kelas Referensi	Dikelaskan ke Kelas			Jumlah	<i>Producer's Accuracy</i>
	A	B	C		
A	X11	X12	X13	X1+	X11/X1+
B	X21	X22	X23	X2+	X22/X2+
C	X231	X32	X33	X3+	X33/X3+
Jumlah	X+1	X+2	X+3	N	
<i>User's Accuracy</i>	X11/X+1	X22/X+2	X33/X+3		

Sumber: Jaya (2010)

Informasi yang diperoleh dari analisis ini yaitu *overall accuracy*, *user accuracy*, dan *producer accuracy* (Simamora *et al.* 2015). Selain itu, dalam matriks kontingensi juga diperoleh *kappa accuracy*. Jenis akurasi tersebut dapat dinyatakan secara matematis sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \text{Producer's Accuracy} &= \frac{X_{11}}{X_{1+}} & \text{User's Accuracy} &= \frac{X_{11}}{X_{+1}} \\ \text{Overall Accuracy} &= \frac{\sum_{i=1}^r X_{ii}}{N} \times 100\% & \text{Kappa Accuracy} &= \frac{N \sum_{i=1}^r X_{ii} - \sum_{i=1}^r X_{i+} X_{+i}}{N^2 \sum_{i=1}^r X_{i+} X_{+i}} \end{aligned}$$

Keterangan:

- X_{ii} = Nilai diagonal dan matriks kontingensi baris ke-i dan kolom ke-i
- N = Jumlah titik *ground check* yang diambil di lapangan
- R = Jumlah baris atau kolom pada matriks kesalahan (jumlah kelas)
- X_{i+} = Jumlah titik *ground check* dalam baris ke-i
- X_{+i} = Jumlah titik *ground check* dalam kolom ke-i

Perubahan Tutupan Lahan

Analisis perubahan tutupan lahan bertujuan menentukan perubahan yang terjadi pada masing-masing kelas tutupan lahan. Perubahan tutupan lahan yang akan dianalisis adalah hasil pemetaan tutupan lahan tahun 2015 dan 2022 dari hasil klasifikasi citra. Hasil tersebut dilakukan menggunakan *tools intersect* dengan analisis *overlay*. Selanjutnya, menambahkan kolom pada *attribute table* pada hasil *intersect* untuk menentukan tutupan lahan berubah atau tidak.

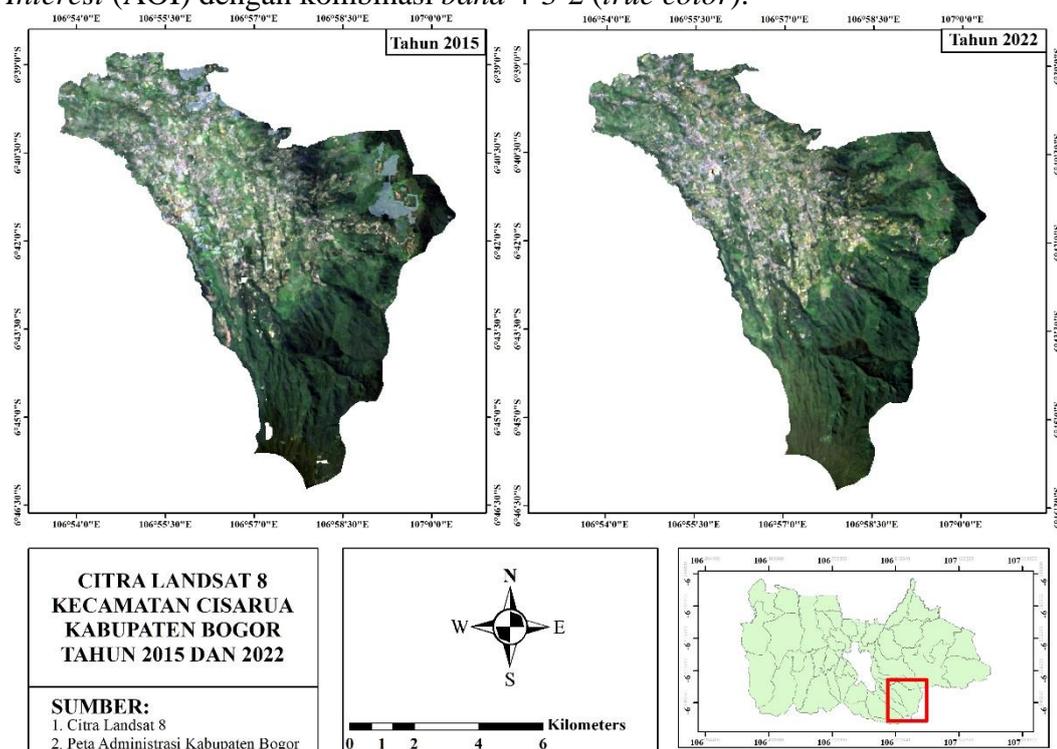
Estimasi Emisi CO₂-eq Akibat Perubahan Penggunaan Lahan

Analisis estimasi CO₂-eq dilakukan berdasarsarkan analisis nilai carbon pada tutupan lahan tahun 2015 dan tahun 2022. Analisis CO₂ eq yang digunakan pada penelitian ini menggunakan data simpanan Carbon (C) dari data sekunder. Nilai carbon (C) yang digunakan adalah nilai carbon (C) pada setiap jenis penggunaan lahan yaitu nilai carbon untuk hutan primer 147.06 ton/ha (Arfianti, 2014), hutan Sekunder 113.20 ton/ha (Darmawan, 2010), Kebun Sawah 5.24 ton/ha Semak dan pertanian lahan kering 35 ton/ha (IPCC 2003), Kebun Teh 22.13 ton/ha (Haryadi, 2005) Selanjutnya nilai Nilai serapan CO₂-eq dihitung menggunakan rumus CO₂eq = C x 3,67 * C. dan menghitung emisi CO₂ eq pada setiap perubahan tutupan lahan dari tahun 2015 sampai dengan tahun 2022 = Nilai CO₂-eq tahun 2015 - Nilai CO₂-eq tahun 2022.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Klasifikasi tutupan lahan dilakukan pada data citra tahun 2015 dan 2022. Hal tersebut bertujuan agar memperoleh hasil perubahan tutupan lahan yang signifikan. Data citra yang digunakan merupakan data citra yang memiliki tutupan awan yang relatif sedikit. Hal tersebut bertujuan agar awan dan bayangan tidak mengganggu selama klasifikasi tutupan lahan. Citra tahun 2015 memiliki awan yang relatif sedikit sebesar kurang dari 10% di wilayah penelitian. Sedangkan citra pada tahun 2022 dapat dikatakan bersih dari gangguan awan dan bayangannya. Gambar 2

merupakan citra tahun 2015 dan 2022 yang telah dipotong sesuai dengan *Area of Interest* (AOI) dengan kombinasi *band 4-3-2* (*true color*).



Gambar 2 Citra Landsat 8 tahun 2015 dan 2022

Karakteristik Tutupan Lahan di Lapangan

Pengamatan lapangan bertujuan untuk mengamati tutupan lahan secara langsung di lapangan sehingga data yang diperoleh akurat. Selain itu, pengamatan di lapangan juga membantu dalam mengidentifikasi objek tutupan lahan yang tidak terlihat jelas pada citra sehingga dalam penentuan kelas tutupan lahan tetap akurat. Hasil pengamatan di lapangan terdapat sembilan kelas tutupan lahan berdasarkan klasifikasi SNI 7645-1:2014 yang terdiri dari lahan terbangun, badan air, lahan terbuka, hutan primer, hutan sekunder, perkebunan, pertanian lahan kering, pertanian lahan basah, dan semak belukar. Deskripsi mengenai penutupan lahan di Kecamatan Cisarua tahun 2022 menggunakan klasifikasi dari Badan Standarisasi Nasional tahun 2014 yang disajikan pada Tabel 2

Tabel 2 Karakteristik tutupan lahan di lapangan

No	Tutupan Lahan	Keterangan	Foto Lapangan
1	Lahan terbangun	Areal atau lahan yang digunakan untuk lingkungan tempat dan tempat kegiatan yang mendukung kehidupan orang. Areal ini umumnya memiliki tutupan lahan buatan yang relatif permanen. Lahan terbangun yang ditemukan di lapangan berupa perumahan, pasar, dan pemerintahan.	 <p data-bbox="1002 607 1219 674">Gambar 3 Lahan terbangun</p>
2	Badan air	Daerah yang tergenang oleh air secara alami. Badan air yang ditemukan di lapangan yaitu danau dan sungai.	 <p data-bbox="979 1003 1241 1032">Gambar 4 Badan air</p>
3	Lahan terbuka	Lahan tanpa tutupan baik yang bersifat alami maupun buatan sehingga memungkinkan untuk melakukan pembangunan dan menciptakan tutupan lahan buatan di atasnya. Lahan terbuka di lokasi penelitian berupa lahan bekas galian pasir.	 <p data-bbox="948 1361 1273 1391">Gambar 5 Lahan terbuka</p>
4	Hutan primer	Suatu lahan yang didominasi oleh pepohonan yang tumbuh secara alami dengan kerapatan tajuk >70%.	 <p data-bbox="954 1727 1267 1756">Gambar 6 Hutan primer</p>

Tabel 2 Karakteristik tutupan lahan di lapangan (*lanjutan*)

No	Tutupan Lahan	Keterangan	Foto Lapangan
5	Hutan sekunder	Lahan yang ditanami dengan tanaman kehutanan dengan kerapatan tajuk 40-70%. Hutan sekunder yang ditemukan di lapangan berupa hutan yang didominasi oleh pohon pinus.	 <p>Gambar 7 Hutan sekunder</p>
6	Perkebunan	Lahan yang digunakan untuk kegiatan pertanian tanpa pergantian tanaman selama dua tahun. Perkebunan yang berada di lokasi penelitian berupa lahan yang ditanami dengan tanaman teh.	 <p>Gambar 8 Perkebunan</p>
7	Pertanian lahan kering	Lahan yang diperuntukan pertanian tetapi bukan sawah dengan tanaman semusim yang ditanam di lahan kering seperti tegalan atau ladang. Umumnya pertanian lahan kering ini ditandai dengan adanya mulsa. Tanaman yang ditemukan di lapangan berupa bawang merah (<i>Allium cepa</i>), cabai (<i>Capsicum frutescens</i>), sawi (<i>Brassica chinensis</i>) dan timun (<i>Cucumis sativus</i>).	 <p>Gambar 9 Pertanian lahan kering</p>
8	Pertanian lahan basah	Areal pertanian yang digenangi air atau diberi air baik dengan teknologi pengairan, tadah hujan maupun pasang surut. Areal ini yaitu sawah. Tanaman yang ditemukan di lapangan adalah padi (<i>Oryza sativa</i>).	 <p>Gambar 10 Pertanian lahan basah</p>

Tabel 2 Karakteristik tutupan lahan di lapangan (*lanjutan*)

No	Tutupan Lahan	Keterangan	Foto Lapangan
9	Semak belukar	Kawasan lahan kering yang telah ditumbuhi dengan berbagai vegetasi alami heterogen dan homogen dengan tingkat kerapatan jarang hingga rapat. Kawasan tersebut didominasi vegetasi rendah (alami)	

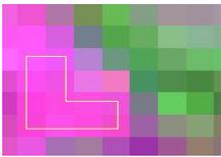
Gambar 11 Semak belukar

Sumber : Badan Standarisasi Nasional 2014 dan pengamatan lapang

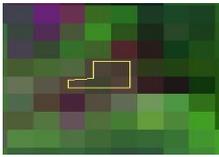
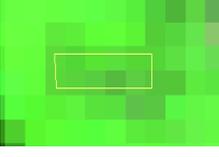
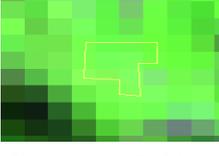
Karakteristik Spasial Tutupan Lahan

Tutupan lahan di Kecamatan Cisarua diidentifikasi menggunakan citra Landsat 8 dengan resolusi spasial 30 meter. Menurut Peraturan Pemerintahan Nomor 8 Tahun 2013, dalam menyajikan peta untuk memantau tingkat kota dan unit pengelolaan yang luasnya sampai dengan 50.000 hektar maka skala penyajiannya sebesar 1:25.000 (Perdirjen Planologi Kehutanan tahun 2017). Hasil identifikasi tutupan lahan pada citra Landsat-8 diperoleh 9 kelas tutupan lahan yaitu pemukiman, badan air, lahan terbuka, hutan primer, hutan sekunder, perkebunan, pertanian lahan kering, pertanian lahan basah, dan semak belukar. Karakteristik setiap kelas tutupan lahan memiliki perbedaan berdasarkan kunci penafsiran citra. Identifikasi tutupan lahan pada citra Landsat-8 menggunakan kombinasi *band 7-5-3 (shortwave infrared)* karena dinilai lebih jelas dalam melakukan interpretasi visual. Karakteristik tutupan lahan pada citra Landsat-8 tahun 2022 disajikan Tabel 3.

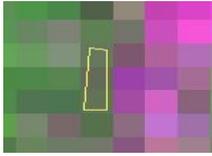
Tabel 3 Karakteristik spasial tutupan lahan pada citra Landsat 8

No	Tutupan Lahan	Keterangan	Foto Citra
1	Lahan Terbangun	Berwarna merah muda terang maupun gelap. Bertekstur kasar dan bentuk beragam.	
			Gambar 12 Citra lahan terbangun
2	Badan air	Berwarna biru baik terang maupun gelap. Bertekstur halus. Umumnya berasosiasi dengan lahan terbangun.	
			Gambar 13 Citra badan air

Tabel 3 Karakteristik spasial tutupan lahan pada citra Landsat 8 (*lanjutan*)

No	Tutupan Lahan	Keterangan	Foto Citra
3	Lahan terbuka	Berwarna coklat muda hingga coklat tua. Berpola tidak beraturan. Bertekstur kasar.	 Gambar 14 Citra lahan terbuka
4	Hutan primer	Berwarna hijau tua. Pola tidak beraturan. Bertekstur kasar.	 Gambar 15 Citra hutan primer
5	Hutan sekunder	Berwarna hijau muda. Pola tidak beraturan. Bertekstur kasar. Umumnya berasosiasi dengan perkebunan.	 Gambar 16 Citra hutan sekunder
6	Perkebunan	Berwarna hijau muda. Pola tidak beraturan. Bertekstur halus.	 Gambar 17 Citra perkebunan
7	Pertanian lahan kering	Berwarna keabu-abuan. Pola tidak teratur. Bertekstur kasar. Umumnya berasosiasi dengan pertanian lahan basah.	 Gambar 18 Citra pertanian lahan kering
8	Pertanian lahan basah	Berwarna ungu baik ungu muda maupun tua. Pola tidak teratur. Bertekstur kasar. Umumnya berasosiasi dengan pemukiman.	 Gambar 19 Citra pertanian lahan basah

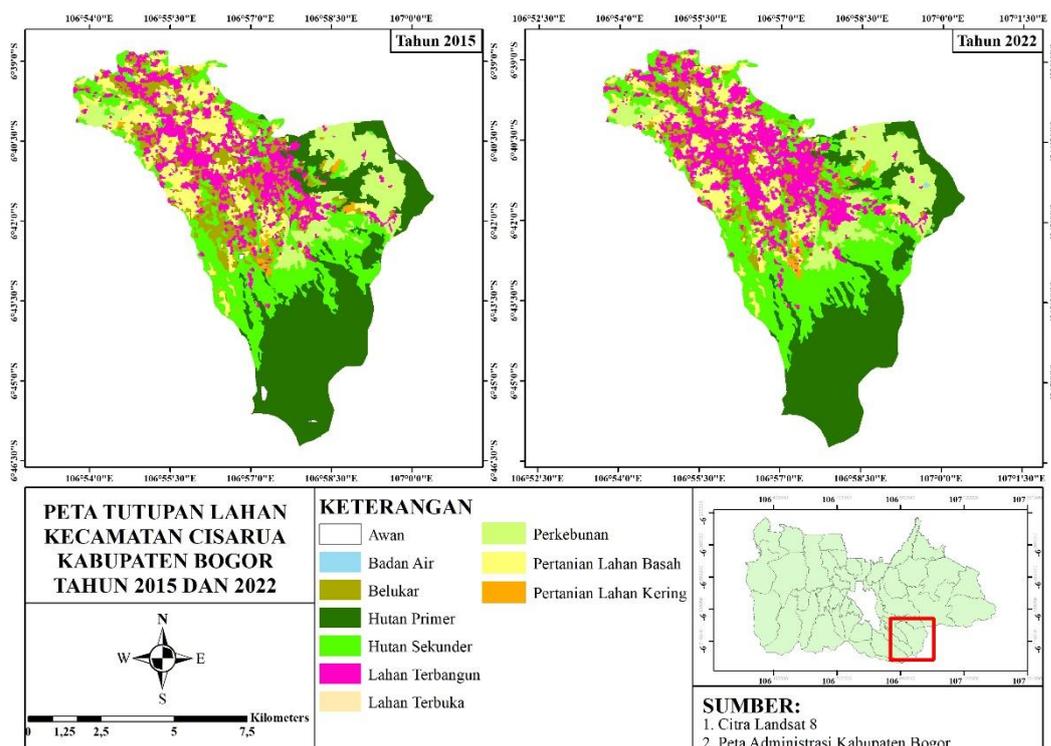
Tabel 3 Karakteristik spasial tutupan lahan pada citra Landsat 8 (*lanjutan*)

No	Tutupan Lahan	Keterangan	Foto Citra
9	Semak belukar	Berwarna coklat kehijauan. Pola tidak teratur. Bertekstur kasar. Umumnya berasosiasi dengan pertanian lahan basah dan pertanian lahan kering.	 Gambar 20 Citra semak belukar

Sumber: Hasil analisis

Klasifikasi Tutupan Lahan secara Digital

Hasil klasifikasi dengan metode *maximum likelihood* pada citra Landsat-8 tahun 2015 dan 2022 diperoleh klasifikasi tutupan lahan sebanyak 9 kelas yaitu lahan terbangun, badan air, lahan terbuka, hutan primer, hutan sekunder, perkebunan, pertanian lahan kering, pertanian lahan basah, dan belukar. Gambar 3 menyajikan peta tutupan lahan pada tahun 2015 dan tahun 2022 yang memuat informasi mengenai sebaran tutupan lahan di Kecamatan Cisarua. Tutupan lahan di Kecamatan Cisarua pada tahun 2015 didominasi oleh hutan primer. Luas pada masing-masing kelas tutupan lahan disajikan pada Tabel 4.



Gambar 3 Peta tutupan lahan tahun 2015 dan tahun 2022

Tabel 4 Luas tutupan lahan tahun 2015 dan tahun 2022

No	Tutupan Lahan	Luas Tahun 2015		Luas Tahun 2022	
		Hektar (ha)	Persen (%)	Hektar (ha)	Persen (%)
1	Awan	20,37	0,28	0,00	0,00
2	Lahan terbangun	1047,54	14,17	1414,60	19,13
3	Badan air	6,58	0,09	9,27	0,13
4	Lahan terbuka	1,56	0,02	4,92	0,07
5	Hutan primer	2198,07	29,72	1934,33	26,16
6	Hutan sekunder	1527,40	20,66	1867,66	25,26
7	Perkebunan	813,67	11,00	810,66	10,96
8	Pertanian lahan kering	67,77	0,92	62,24	0,84
9	Pertanian lahan basah	880,40	11,91	775,20	10,48
10	Belukar	831,34	11,24	515,82	6,98
Total		7394,70	100	7349,70	100

Sumber: Hasil analisis

Tabel 4 menunjukkan total luas Kecamatan Cisarua seluas 7.394,70 ha. Luas tutupan lahan yang dominan tahun 2015 pada wilayah penelitian ini adalah hutan primer dengan luas 2198,07 ha. Sedangkan tutupan lahan yang memiliki luas terkecil adalah lahan terbuka dengan luas 1,56 ha. Tahun 2015 terdapat tutupan awan dengan luas daerah yang tertutup sebesar 20,37 ha. Selanjutnya, akan dilakukan perbandingan antara hasil klasifikasi tutupan lahan tahun 2015 dengan hasil klasifikasi tahun 2022 untuk melihat perubahan yang terjadi pada wilayah penelitian. Hasil klasifikasi menunjukkan bahwa luas Kecamatan Cisarua pada tahun 2022 sama dengan luas pada tahun 2015. Tutupan lahan tahun 2022 yang mendominasi Kecamatan Cisarua adalah hutan primer dengan luas 1934,33 ha atau sekitar 26,16% dari luas keseluruhan Kecamatan Cisarua. Tutupan lahan pada tahun 2022 yang memiliki luas terkecil adalah lahan terbuka dengan luas 4,92 ha.

Evaluasi Separabilitas dan Akurasi

Evaluasi separabilitas adalah sebuah metode kuantitatif yang memberikan informasi mengenai evaluasi keterpisahan *training area* dari setiap kelas tutupan lahan (Sampurno dan Thoriq 2016). Analisis tersebut dilakukan berdasarkan nilai statistik *training area* pada setiap band (Richards dan Jia 2006). Sistematisa metode ini adalah mengukur jarak antar *training area* karena jarak tersebut mencerminkan tingkat keseragaman *training area* yang digambarkan oleh nilai keragamannya yang rendah. Jika jarak antar *training area* semakin besar maka *training area* yang diambil cukup homogen sehingga nilai keragamannya menjadi kecil (Tso dan Mather 2009). Analisis separabilitas dilakukan sebelum melakukan proses klasifikasi pada kelas tutupan lahan yang berasal dari *training contoh* yang telah dipilih. Hasil deliniasi pada *training area* dimasukkan ke dalam tabel *signature editor* yang nantinya akan dievaluasi menggunakan metode transformasi divergensi untuk menilai tingkat keterpisahannya.

Hasil analisis separabilitas menunjukkan bahwa semua kelas tutupan lahan memiliki tingkat keterpisahan yang jelas dan dapat dibedakan dengan mudah. Hasil

analisis separabilitas pada tahun 2015 memiliki nilai rata-rata keterpisahan sebesar 1995,61 dengan nilai separabilitas tertinggi sebesar 2000 dan nilai separabilitas terendah sebesar 1947,24. Nilai separabilitas terendah tersebut pada kelas tutupan lahan perkebunan dan lahan terbuka. Secara umum, nilai separabilitas terbaik dimiliki oleh kelas tutupan lahan badan air dengan nilai sebesar 2000 pada semua tutupan lahan. Hasil analisis separabilitas pada tahun 2022 menunjukkan penurunan rata-rata nilai separabilitas. Nilai rata-rata separabilitas pada tahun 2022 sebesar 1980,33. Nilai separabilitas tertinggi pada tahun 2022 sebesar 2000 sedangkan nilai separabilitas terendah sebesar 1860,56. Nilai separabilitas terendah tersebut berada pada kelas tutupan lahan lahan terbuka dan belukar. Nilai separabilitas terbaik secara umum dimiliki oleh lahan terbangun dengan sebagian besar nilai separabilitas pada kelas tutupan lahan sebesar 2000. Berdasarkan uraian tersebut, hasil separabilitas pada tahun 2015 dan tahun 2022 dilihat dari nilai rata-rata separabilitasnya dapat dikatakan bahwa keterpisahan antar *training area* baik karena memiliki nilai antara 1900 sampai dengan 2000 sesuai dengan pendapat yang dikemukakan oleh Jaya (2010). Nilai separabilitas tersebut secara lengkap dari semua kelas tutupan lahan dapat dilihat pada Lampiran 2 dan 3.

Evaluasi akurasi dilakukan untuk memperoleh informasi mengenai keakuratan hasil klasifikasi dalam memetakan tutupan lahan. Salah satu metode yang sering digunakan untuk mengukur tingkat akurasi adalah menggunakan matriks kesalahan atau disebut juga dengan matriks kontingensi. Matriks kesalahan (*confusion matrix*) adalah sebuah tabel yang digunakan untuk membandingkan antara data lapangan dengan hasil klasifikasi yang sesuai. Matriks ini berbentuk bujursangkar dan berfungsi untuk memvisualisasikan perbedaan antara klasifikasi yang dilakukan dengan keadaan sebenarnya di lapangan (Lillesand dan Kiefer 1990). Pada matriks kesalahan, barisnya mewakili hasil klasifikasi dan kolomnya mewakili data acuan. Sedangkan baris terakhir merupakan jumlah dari semua baris sebelumnya dan kolom terakhir adalah jumlah dari semua kolom sebelumnya (Bai *et al.* 2021). Matriks kontingensi tersebut memuat beberapa informasi yaitu *producer's accuracy*, *user's accuracy*, *overall accuracy* (Simamora *et al.* 2015), dan *kappa accuracy*.

Producer's accuracy adalah probabilitas rata-rata sebuah piksel yang menunjukkan distribusi setiap kelas yang telah diklasifikasikan di lapangan, dan *user's accuracy* adalah probabilitas rata-rata bahwa suatu pixel mewakili kelas secara aktual (Selamat *et al.* 2012). Selain itu, *producer's accuracy* dapat dikatakan sebagai akurasi yang dilihat dari sisi penghasil peta sedangkan *user's accuracy* sebagai akurasi yang dilihat dari sisi pengguna peta (Wulansari 2017). Nilai *producer's accuracy* terkecil pada kelas tutupan lahan perkebunan sebesar 77,78%. Pada kelas tutupan lahan perkebunan dari sembilan titik pengamatan terdapat kesalahan klasifikasi kelas tutupan lahan sebanyak dua titik dimana titik tersebut masuk ke kelas hutan sekunder. Sedangkan nilai *user's accuracy* terkecil terdapat pada kelas hutan sekunder sebesar 75%. Hal tersebut dikarenakan dari delapan titik pengamatan terdapat dua titik yang masuk ke dalam kelas perkebunan.

Overall accuracy adalah persentase piksel yang dapat dikelaskan dengan tepat (Selamat *et al.* 2012). Namun, akurasi tersebut cenderung memberikan hasil yang bersifat *overestimate* sehingga jarang digunakan sebagai indikator keberhasilan utama dalam klasifikasi citra (Jaya 2010). Akurasi yang dianjurkan dalam perhitungan adalah *kappa accuracy* (Jaya 2010). Hal tersebut dikarenakan *kappa*

accuracy mempertimbangkan seluruh elemen yang ada dalam matriks kontingensi (Muhammad *et al.* 2016). Hasil uji akurasi diperoleh nilai *overall accuracy* sebesar 91,94% dan *kappa accuracy* sebesar 90,75%. Nilai akurasi dikatakan baik apabila nilai *kappa accuracy* lebih dari 85% (Simamora *et al.* 2015). Hal tersebut menunjukkan bahwa hasil klasifikasi dapat digunakan karena memiliki nilai *kappa accuracy* lebih besar dari 85%. Hasil uji akurasi tersebut dapat dilihat pada Lampiran 4. Pengujian akurasi hanya dilakukan untuk hasil klasifikasi citra tahun 2022. Hal ini disebabkan karena dalam mengklasifikasi citra tahun 2015 menggunakan informasi yang didasarkan pada karakteristik visual atau kunci interpretasi yang sebelumnya digunakan dalam klasifikasi citra tahun 2022.

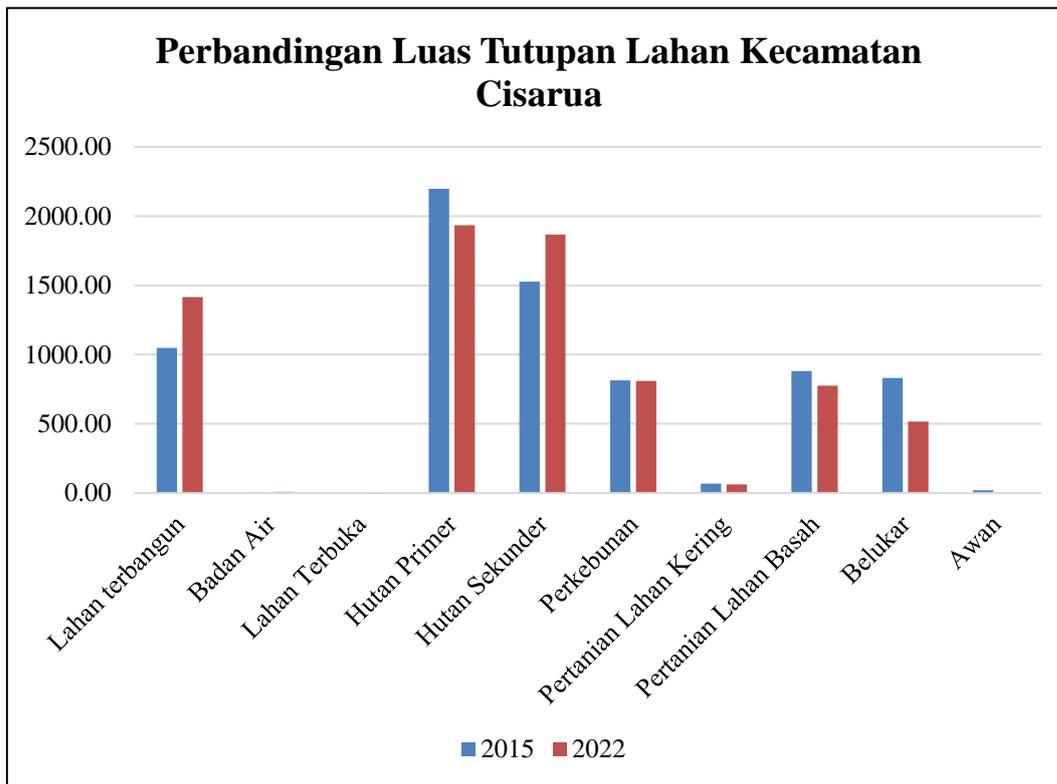
Perubahan Tutupan Lahan

Perubahan tutupan lahan merupakan suatu keadaan lahan yang mengalami perubahan dalam waktu yang berbeda karena aktivitas manusia (Lillesand dan Kiefer 1990). Peningkatan pertumbuhan penduduk menjadi salah satu faktor pendorong perubahan tutupan lahan (Sitorus *et al.* 2012). Analisis perubahan tutupan lahan dilakukan pada peta klasifikasi yang diperoleh pada dua waktu yang berbeda. Citra yang digunakan diproses dengan cara yang sama sehingga tidak terjadi interpretasi yang salah dalam analisis perubahan tutupan lahan. Analisis perubahan tutupan lahan di Kecamatan Cisarua dilakukan pada dua waktu yang berbeda sehingga dapat terlihat perubahan tutupan lahan yang terjadi. Analisis ini dilakukan pada citra tahun 2015 dan tahun 2022. Hasil analisis perubahan disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5 Perubahan tutupan lahan tahun 2015-2022

Tutupan Lahan	Luas (ha)		Perubahan (ha)	
	2015	2022	+	-
Lahan terbangun	1047,54	1414,60	367,06	
Badan air	6,58	9,27	2,69	
Lahan terbuka	1,56	4,92	3,36	
Hutan primer	2198,07	1934,33		263,74
Hutan sekunder	1527,40	1867,66	340,26	
Perkebunan	813,67	810,66		3,01
Pertanian lahan kering	67,77	62,24		5,53
Pertanian lahan basah	880,40	775,20		105,20
Belukar	831,34	515,82		315,52
Awan	20,37	0,00		20,37
Total	7394,70	7394,70		

Sumber: Hasil analisis



Gambar 4 Grafik perbandingan luas kelas tutupan lahan Kecamatan Cisarua tahun 2015 dan 2022

Berdasarkan Gambar 4, terlihat secara jelas bahwa tutupan lahan dari tahun 2015 ke tahun 2022 mengalami perubahan. Luas hutan primer pada tahun 2015 sebesar 2198,07 ha. Luas hutan primer ini mengalami penurunan pada tahun 2022 menjadi 1934,33 ha. Penurunan luas hutan primer tersebut disebabkan adanya aktivitas manusia baik penebangan atau yang lainnya yang menyebabkan penurunan luasan. Penurunan luas hutan primer tersebut membuat luas hutan sekunder mengalami peningkatan pada tahun 2022 sebesar 340,26 ha.

Luas belukar mengalami penurunan sebesar 315,52 ha pada tahun 2022. Hal ini disebabkan karena adanya peningkatan pembangunan dan semakin meningkatnya aktivitas masyarakat yang memanfaatkan lahan menjadi lebih baik. Tutupan lahan yang mengalami penurunan luas cukup besar adalah pertanian lahan basah. Luas pertanian lahan basah pada tahun 2022 mengalami penurunan sebesar 105,20. Perubahan tersebut disebabkan karena keberadaannya yang berdekatan dengan lahan terbangun. Hal ini membuat pertanian lahan basah menjadi rentan mengalami konversi lahan menjadi lahan terbangun. Perubahan lahan cenderung terjadi di daerah yang berdekatan dengan aktivitas ekonomi atau perkotaan (Lisnawati dan Wibowo 2007).

Tutupan lahan yang mengalami peningkatan besar adalah lahan terbangun. Luas lahan terbangun pada tahun 2022 menjadi 1414,60 ha. Hal ini dikarenakan banyaknya sarana publik berupa perumahan, villa, pasar, dan fasilitas yang menunjang kehidupan lainnya. Selain itu, penambahan jumlah penduduk juga menjadi sebab adanya peningkatan luas terhadap lahan terbangun. Luas lahan terbuka juga mengalami peningkatan sebesar 3,36 ha.

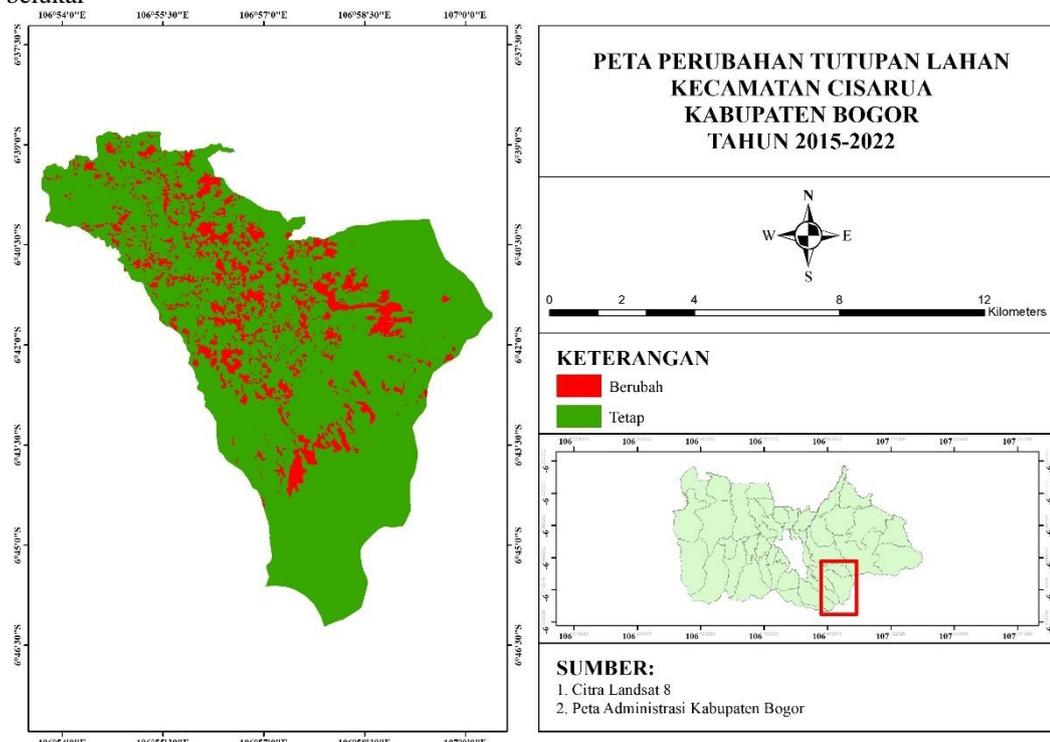
Secara keseluruhan, tutupan lahan di Kecamatan Cisarua mengalami perubahan tutupan lahan. Perubahan tersebut memiliki dampak langsung terhadap air, tanah, dan atmosfer (Mokoginta *et al.* 2021). Perubahan tutupan lahan yang terjadi di wilayah penelitian, umumnya disebabkan oleh konversi lahan baik menjadi lahan terbangun atau menjadi tutupan lahan yang lain. Matriks perubahan lahan yang menunjukkan perubahan tutupan lahan satu dengan yang lainnya disajikan pada Tabel 6. Peta perubahan lahan dapat dilihat Gambar 5.

Tabel 6 Matriks perubahan tutupan lahan

Tahun	Tutupan Lahan	2022								
		LT	BA	LK	HP	HS	PB	PLK	PLB	BL
2015	LT	1048,88	-	-	-	-	-	-	-	-
	BA	1,50	4,04	-	-	-	-	-	-	-
	LK	0,69	-	0,03	-	-	-	-	-	0,84
	HP	-	-	-	1935,40	276,10	-	-	-	6,43
	HS	2,93	-	-	-	1523,37	-	-	-	7,28
	PB	-	3,71	-	-	-	810,39	-	-	-
	PLK	11,68	-	-	-	-	-	50,01	-	76,08
	PLB	235,86	1,03	1,48	-	-	-	-	642,35	-
	BL	230,26	-	3,29	-	67,59	-	17,79	132,44	381,14

Sumber: Hasil analisis

Keterangan: LT: lahan terbangun, BA: badan air, LK: lahan terbuka, HP: hutan primer, HS: hutan sekunder, PB: perkebunan, PLK: pertanian lahan kering, PLB: pertanian lahan basah, BL: semak belukar



Gambar 1 Peta perubahan lahan tutupan lahan Tahun 2015 - Tahun 2022

Estimasi emisi CO₂-eq akibat perubahan tutupan lahan

Analisis CO₂ eq yang digunakan pada penelitian ini menggunakan data simpanan Carbon (C) dari data sekunder. Nilai carbon (C) yang digunakan adalah nilai carbon (C) pada setiap jenis penggunaan lahan yaitu nilai carbon untuk hutan primer 147.06 ton/ha (Arfianti, 2014) , hutan Sekunder 113.20 ton/ha (Darmawan, 2010), Kebun Sawah 5.24 ton/ha Semak dan pertanian lahan kering 35 ton/ha (IPCC 2003), Kebun Teh 22.13 ton/ha (Haryadi, 2005) Selanjutnya nilai Nilai serapan CO₂-eq dihitung menggunakan rumus $CO_2eq = C \times 3,67 \times C$. dan menghitung emisi CO₂ eq pada setiap perubahan tutupan lahan dari tahun 2015 sampai dengan tahun 2022 = Nilai CO₂-eq tahun 2015 - Nilai CO₂-eq tahun 2022.

Akibat perubahan tutupan lahan tahun 2015 sampai dengan 2022 memberikan esarnya estimasi emisi CO₂-eq sebesar 185790.1 ton atau sebesar 25641 ton/tahun (Tabel7).

Tabel 7. Estimasi Emisi CO₂-eq akibat perubahan tutupan lahan

Tutupan Lahan	Tahun 2015		Tahun 2022		Perubahan CO ₂ e (ton)	
	Luas Tuplah (ha)	CO ₂ e (ton)	Luas Tuplah (ha)	CO ₂ e (ton)	+	-
Lahan terbangun	1047.54	0	1414.6	0	0	
Badan air	6.58	0	9.27	0	0	
Lahan terbuka	1.56	0	4.92	0	TRUE	
Hutan primer	2198.07	1185836.8	1934.33	1043551.7		142285.1
Hutan sekunder	1527.4	633428.1	1867.66	774537.3	141109.2	
Perkebunan	813.67	65695.7	810.66	65452.7		243.0
Pertanian lahan kering	67.77	8705.1	62.24	7994.7		710.3
Pertanian lahan basah	880.4	16930.8	775.2	14907.7		2023.1
Belukar	831.34	106785.6	515.82	66257.1		40528.5
Total	7374.3	2017382.0	7394.7	1972701.2	141109.2	185790.1

SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Klasifikasi tutupan lahan menggunakan citra Landsat 8 dengan metode *maximum likelihood* menghasilkan 9 kelas tutupan lahan. Kelas tutupan lahan tersebut yaitu lahan terbangun, badan air, lahan terbuka, hutan primer, hutan sekunder, perkebunan, pertanian lahan kering, pertanian lahan basah, dan belukar. Perubahan tutupan lahan dari tahun 2015 hingga 2022 menunjukkan bahwa luasan lahan terbangun meningkat hingga sebesar 1414,60 ha. Namun, di Kecamatan Cisarua tutupan lahan yang mendominasi dari tahun 2015 hingga 2022 yaitu hutan primer walaupun luasnya mengalami penurunan. Akibat perubahan tutupan lahan tahun 2015 sampai dengan 2022 memberikan esarnya estimasi emisi CO₂-eq sebesar 185.790,1 ton atau sebesar 25.641 ton/tahun.

Saran

Diperlukan analisis estimasi CO₂-eq menggunakan data serapan C yang terukur sehingga untuk perencanaan mitigasi perubahan iklim nilai Emisi CO₂-eq akibat Perubahan Penggunaan Lahan yang digunakan lebih akurat .

DAFTAR PUSTAKA

- [UU] Undang-undang Republik Indonesia Nomor 26 Tahun 2007 Tentang Penataan Ruang. 2007.
- [Perda] Peraturan Daerah Kabupaten Bogor Nomor 11 Tahun 2006 Tentang Rencana Tata Ruang Wilayah Kabupaten Bogor Tahun 2016-2036. 2006.
- Akhirul A, Witra Y, Umar I, Erianjoni E. 2020. Dampak negatif pertumbuhan penduduk terhadap lingkungan dan upaya mengatasinya. *Jurnal Kependudukan dan Pembangunan Lingkungan*. 1(3):76–84.
- Ambodo AP, Jatmiko RH. 2012. Aplikasi penginderaan jauh untuk identifikasi sebaran batubara permukaan di Kabupaten Muara Enim, Sumatera Selatan. *Jurnal Bumi Indonesia*. 1(2):75636.
- Arsy RF. 2014. Metode survei deskriptif untuk mengkaji kemampuan interpretasi citra pada mahasiswa pendidikan geografi FKIP Universitas Tadulako. *Kreatif*. 16(3).
- Bai Y, Sun G, Li Y, Ma P, Li G, Zhang Y. 2021. Comprehensively analyzing optical and polarimetric SAR features for land-use/land-cover classification and urban vegetation extraction in highly-dense urban area. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 103:102496.doi:10.1016/j.jag.2021.102496.
- Beta AA. 2017. Perencanaan tata ruang wilayah bagi kesejahteraan di Indonesia. *Cano Ekonomos*. 6(1):1–6.
- Chatterjee U, Majumdar S. 2022. Impact of land use change and rapid urbanization on urban heat island in Kolkata city: A remote sensing based perspective. *Journal of Urban Management*. 11(1):59–71.doi:10.1016/j.jum.2021.09.002.
- Danoedoro P. 2012. *Pengantar Penginderaan Jauh Digital*. Yogyakarta: Penerbit Andi.

- Darmawati, Saleh C, Hanafi I. 2015. Implementasi kebijakan rencana tata ruang wilayah (rtrw) dalam perspektif pembangunan berkelanjutan. *Jurnal Ilmu Sosial dan Ilmu Politik (JISIP)*. 4(2).doi:10.33366/jisip.v4i2.118.
- Dewan AM, Yamaguchi Y. 2009. Land use and land cover change in Greater Dhaka, Bangladesh: Using remote sensing to promote sustainable urbanization. *Applied Geography*. 29(3):390–401.doi:10.1016/j.apgeog.2008.12.005.
- Du H, Cao Y, Zhang F, Lv J, Deng S, Lu Y, He S, Zhang Y, Yu Q. 2021. A classification method of building structures based on multi-feature fusion of UAV remote sensing images. *Earthquake Research Advances*. 1(4):100069.doi:10.1016/j.eqrea.2021.100069.
- Fujiastuti S, Pigawati B. 2011. Evaluasi penyusunan norma, standart dan kriteria pemanfaatan ruang Kabupaten Kudus tahun 2010. *Jurnal Geografi : Media Informasi Pengembangan dan Profesi Kegeografian*. 8(2):95–107.doi:10.15294/jg.v8i2.1660.
- Hansen MC, Potapov PV, Moore R, Hancher M, Turubanova SA, Tyukavina A, Thau D, Stehman SV, Goetz SJ, Loveland TR, *et al.* 2013. High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*. 342(6160):850–853.doi:10.1126/science.1244693.
- Hendrawan, Gaol JL, Susilo SB. 2018. Studi kerapatan dan perubahan tutupan mangrove menggunakan citra satelit di Pulau Sebatik Kalimantan Utara. *Jurnal Ilmu dan Teknologi Kelautan Tropis*. 10(1):99–109.doi:10.29244/jitkt.v10i1.18595.
- Kosasih D, Saleh MB, Prasetyo LB. 2019. Interpretasi visual dan digital untuk klasifikasi tutupan lahan di Kabupaten Kuningan, Jawa Barat. *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*. 24(2): 101-108.
- Jaya INS. 2010. *Analisis Citra Digital Perspektif Penginderaan Jauh untuk Pengelolaan Sumber Daya Alam*. Bogor: Fakultas Kehutanan IPB.
- Jensen J. 2005. *Introductory Digital Image Processing a Remote Sensing Perspective*. United States (USA): Pearson Prentice Hall.
- Iskandar I. 2020. Fungsi rencana tata ruang wilayah provinsi sebagai instrumen hukum pengendalian pemanfaatan ruang kawasan hutan. *Bina Hukum Lingkungan*. 5(1):1–20.doi:10.24970/bhl.v5i1.142.
- Kaswanto RL, Aurora RM, Yusri D, Sjaf S. 2021. Analisis faktor pendorong perubahan tutupan lahan selama satu dekade di Kabupaten Labuhanbatu Utara. *Jurnal Ilmu Lingkungan*. 19(1):107–116.doi:10.14710/jil.19.1.107-116.
- Kullo ED, Forkuo EK, Biney E, Harris E, Quaye-Ballard JA. 2021. The impact of land use and land cover changes on socioeconomic factors and livelihood in the Atwima Nwabiagya district of the Ashanti region, Ghana. *Environmental Challenges*. 5:100226.doi:10.1016/j.envc.2021.100226.
- Liao Q. 2023. Intelligent classification model of land resource use using deep learning in remote sensing images. *Ecological Modelling*. 475:110231.doi:10.1016/j.ecolmodel.2022.110231.
- Lillesand TM, Kiefer RW. 1990. *Penginderaan Jauh dan Penafsiran Citra*. Dulbahri, Suharsono P, Hartono, Suharyadi, penerjemah; Sutanto, editor. Yogyakarta: Gajah Mada University Press. Terjemahan dari: Remote Sensing and Image Interpretation.

- Lillesand TM, Kiefer RW. 2000. *Remote Sensing and Image Interpretation*. New York: John Wiley and Sons.
- Lillesand TM, Kiefer RW, Chipman JW. 2004. *Remote Sensing and Image Interpretation Fifth Edition*. New York: John Wiley and Sons.
- Lindgren DT. 1985. *Land Use Planning and Remote Sensing*. Dordrecht: Martinus Nijhoff Publisher.
- Lisnawati Y, Wibowo A. 2007. Penggunaan citra landsat ETM+ untuk monitoring perubahan penggunaan lahan di Kawasan Puncak. *JPHT*. 4(2):79–90.doi:10.20886/jpht.2007.4.2.79-90.
- Lu Y, Yang C, He R. 2022. Towards lithology mapping in semi-arid areas using time-series Landsat-8 data. *Ore Geology Reviews*. 150:105163.doi:10.1016/j.oregeorev.2022.105163.
- Mokoginta DC, Poluan RJ, Lakat RMS. 2021. Ketersediaan sarana prasarana dan kriteria khusus kawasan minapolitan di Kecamatan Nuangan Kabupaten Bolaang Mongondow Timur. *SPASIAL*. 8(1):67–76.doi:10.35793/sp.v8i1.32915.
- Muhammad AM, Rombang JA, Saroinsong FB. 2016. Identifikasi jenis tutupan lahan di kawasan KPHP Poigar dengan metode maximum likelihood. *Cocos*. 7(2).doi:10.35791/cocos.v7i2.11451.
- Muhsoni FF. 2015. *Penginderaan Jauh (Remote Sensing)*. Madura: UTM Press.
- Nawangwulan NH, Sudarsono B, Sasmito B. 2013. Analisis pengaruh perubahan lahan pertanian terhadap hasil produksi tanaman pangan di Kabupaten Pati tahun 2001 – 2011. *Jurnal Geodesi Undip*. 2(2).doi:10.14710/jgundip.2013.2444.
- Niagara Y, Ernawati E, Purwandari EP. 2020. Pemanfaatan citra penginderaan jauh untuk pemetaan klasifikasi tutupan lahan menggunakan metode unsupervised k-means berbasis web gis (studi kasus Sub-Das Bengkulu Hilir). *Rekursif*. 8(1).doi:10.33369/rekursif.v8i1.8478.
- Panjaitan A, Sudarsono B, Bashit N. 2019. Analisis kesesuaian penggunaan lahan terhadap rencana tata ruang wilayah (RTRW) di Kabupaten Cianjur menggunakan sistem informasi geografis. *Jurnal Geodesi Undip*. 8(1):248–257.doi:10.14710/jgundip.2019.22578.
- Putri AR. 2016. Pengolahan citra dengan menggunakan web cam pada kendaraan bergerak di jalan raya. *JIPi*. 1(01):224400.doi:10.29100/jipi.v1i01.18.
- Rahmawan AD, Pawestri DA, Fakhriyah RA, Pasha HDS, Ferryandy M, Sugandi D, Ridwana R, Somantri L. 2020. Penggunaan metode unsupervised (ISO Data) untuk mengkaji kerapatan vegetasi di Kecamatan Pangandaran. *Jurnal Pendidikan Geografi Undiksha*. 8(1):01–11.doi:10.23887/jjpg.v8i1.22752.
- Rawat JS, Kumar M. 2015. Monitoring land use/cover change using remote sensing and GIS techniques: A case study of Hawalbagh block, district Almora, Uttarakhand, India. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. 18(1):77–84.doi:10.1016/j.ejrs.2015.02.002.
- Reinaldi Y, Ulinnuha N, Hafiyusholeh M. 2021. Comparison of single linkage, complete linkage, and average linkage methods on community welfare analysis in cities and cegencies in East Java. *Jurnal Matematika, Statistika dan Komputasi*. 18(1):130–140.doi:10.20956/j.v18i1.14228.

- Sampurno RM, Thoriq A. 2016. Klasifikasi tutupan lahan menggunakan citra landsat 8 operational land imager (OLI) di kabupaten Sumedang. *TEKNOTAN*. 10(2).
- Sánchez-Espinosa A, Schröder C. 2019. Land use and land cover mapping in wetlands one step closer to the ground: Sentinel-2 versus landsat 8. *Journal of Environmental Management*. 247:484–498.doi:10.1016/j.jenvman.2019.06.084.
- Selamat MB, Siregar VP, Jaya I, Hestirianoto T. 2012. Evaluasi akurasi tematik citra satelit quickbird dan ikonos untuk pengadaan peta habitat terumbu karang skala besar (Thematic accuracy evaluation of quickbird and ikonos satellite images for large scale coral reef habitat map making). *Torani Jurnal Ilmu Kelautan dan Perikanan*.
- Septiani R, Citra IPA, Nugraha ASA. 2019. Perbandingan metode supervised classification dan unsupervised classification terhadap penutup lahan di Kabupaten Buleleng. *Jurnal Geografi : Media Informasi Pengembangan dan Profesi Kegeografian*. 16(2):90–96.doi:10.15294/jg.v16i2.19777.
- Seto KC, Güneralp B, Hutyra LR. 2012. Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 109(40):16083–16088.doi:10.1073/pnas.1211658109.
- Shujun Liang, Jing Cheng, Jianwei Zhang. 2020. Maximum likelihood classification of soil remote sensing image based on deep learning. *Earth Sciences Research Journal*. 24:357–365.doi:10.15446/esrj.v24n3.89750.
- Simamora FB, Sasmito B, Haniah H. 2015. Kajian metode segmentasi untuk identifikasi tutupan lahan dan luas bidang tanah menggunakan citra pada google earth (studi kasus : Kecamatan Tembalang, Semarang). *Jurnal Geodesi Undip*. 4(4):43–51.doi:10.14710/jgundip.2015.9909.
- Singh R, Krishnan P, Singh VK, Banerjee K. 2022. Application of thermal and visible imaging to estimate stripe rust disease severity in wheat using supervised image classification methods. *Ecological Informatics*. 71:101774.doi:10.1016/j.ecoinf.2022.101774.
- Sitorus S, Mustamei E, Mulya S. 2019. Keselarasan penggunaan lahan dengan pola ruang dan arahan pengembangan ruang terbuka hijau di Kabupaten Bengkulu Selatan: conformity of land use with spatial pattern and direction of green open space development in South Bengkulu Regency. *Jurnal Ilmu Tanah dan Lingkungan*. 21:21–29.doi:10.29244/jitl.21.1.21-29.
- Sitorus SRP, Patria SID, Panuju DR. 2012. Analisis perubahan penggunaan lahan ruang terbuka hijau di Jakarta Timur. *Jurnal Lanskap Indonesia*. 4(2).doi:10.29244/jli.2012.4.2.%p.
- Sutanto. 1994. *Penginderaan Jauh*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Somantri L. 2010. Kemajuan teknologi penginderaan jauh serta aplikasinya dibidang bencana alam. *Jurnal Geografi Gea*. 10(1):15–25.doi:10.17509/gea.v10i1.1661.
- Tarigan R. 2005. *Perencanaan Pembangunan Wilayah*. Jakarta: Bumi Aksara.
- Tso B, Mather PM. 2009. *Classification Methods for Remotely Sensed Data*. Volume ke-2. Francis (FR): CRC Press.
- Wulansari H. 2017. Uji Akurasi klasifikasi penggunaan lahan dengan menggunakan metode defuzzifikasi maximum likelihood berbasis citra Alos Avnir-2.

- BHUMI: Jurnal Agraria dan Pertanahan*. 3(1):98–110.doi:10.31292/jb.v3i1.233.
- Wulder MA, Coops NC, Roy DP, White JC, Hermosilla T. 2018. Land cover 2.0. *International Journal of Remote Sensing*. 39(12):4254–4284.doi:10.1080/01431161.2018.1452075.
- Wulder MA, Loveland TR, Roy DP, Crawford CJ, Masek JG, Woodcock CE, Allen RG, Anderson MC, Belward AS, Cohen WB, *et al.* 2019. Current status of Landsat program, science, and applications. *Remote Sensing of Environment*. 225:127–147.doi:10.1016/j.rse.2019.02.015.
- Yuliasri A. 2017. Identifikasi kesesuaian pemanfaatan ruang dengan rencana tata ruang wilayah Kota Bogor tahun 2011-2031 (studi kasus : Kecamatan Bogor Utara). *Jurnal Online Mahasiswa (JOM) Bidang Perencanaan Wilayah & Kota*. 1(1).