

PREDIKSI SEBARAN POTENSIAL GAJAH SUMATERA (*Elephas maximus sumatranus*) DI SUMATERA UTARA MENGGUNAKAN MODEL MAXENT

Fahri Sinaga, Eko Prasetya

Departemen Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam. Universitas Negeri Medan
Jl. Willem Iskandar Psr. V Medan Estate, Medan, Indonesia, 20221

Email Korespondensi: eko.prasetya@unimed.ac.id

Abstract

The Sumatran Elephant (*Elephas maximus sumatranus* Temminck, 1847) is an endemic Indonesian animal that plays a vital role as an ecosystem engineer and an indicator of conservation success within the Sumatran tropical rainforest ecosystem. The population of this species has experienced a significant decline due to habitat fragmentation, land use conversion, human elephant conflict, as well as illegal hunting and trade. This study aims to project the potential geographic distribution of the Sumatran Elephant habitat in North Sumatra Province and identify the environmental parameters that most profoundly influence its habitat preferences as a fundamental basis for developing spatial based conservation strategies utilizing the *Maximum Entropy* (MaxEnt) algorithm. The most influential environmental factors were slope inclination (34.5%, PI: 49.3%), isothermality (27%, PI: 20.1%), precipitation of the coldest quarter (19.9%, PI: 21.6%), and distance to water (9.8%, PI: 1%). Habitat suitability analysis revealed that highly suitable areas in North Sumatra are extremely limited, covering only 760.84 km² (1.05%). Moderate suitability encompassed 4,115.78 km² (5.68%), while low suitability dominated with 67,584.39 km² (93.27%). This indicates a critical ecological situation, as merely a fraction of the landscape provides optimal conditions for the species survival. These findings emphasize the urgency of integrated conservation strategies amidst increasing forest fragmentation from agricultural expansion. Developing wildlife corridors and protecting priority habitats are crucial to maintain the connectivity and sustainability of the Sumatran Elephant population.

Keywords:

Ecosystem, MaxEnt, North Sumatra, Spatial, Sumatran Elephant.

Pendahuluan

Provinsi Sumatera Utara merupakan salah satu kawasan penting di Pulau Sumatera dengan tingkat keanekaragaman hayati yang tinggi serta ekosistem hutan tropis yang masih relatif terjaga. Secara geografis, wilayah ini terletak pada 1°-4° LU dan 98°-100° BT, dengan luas mencapai sekitar 72.461,00 km². Topografinya bervariasi, meliputi pegunungan Bukit Barisan di bagian barat hingga dataran rendah pesisir timur yang subur dan kaya akan sumber daya alam (BPS Sumut, 2020). Salah satu satwa endemik bernilai ekologis dan konservasi tinggi yang mendiami kawasan ini adalah Gajah Sumatera (*Elephas maximus sumatranus* Temminck, 1847), subspecies gajah Asia yang saat ini berstatus *Critically Endangered* menurut IUCN (2024) dan termasuk *Appendix I* (dilarang diperdagangkan) berdasarkan lembaga CITES (Kuswanda *et al.*, 2019).

Gajah Sumatera berperan sebagai *ecosystem engineer*, yakni spesies yang secara aktif membentuk dan menjaga keseimbangan ekosistem. Melalui aktivitas makannya, gajah membantu penyebaran biji tanaman dan pembukaan jalur hutan yang menunjang pertumbuhan vegetasi bawah serta akses bagi satwa lain (Sa'diah & Atifah, 2024). Di kawasan konservasi seperti Taman Nasional Gunung Leuser (TNGL) yang sebagian besar arealnya berada di Sumatera Utara, gajah juga berfungsi sebagai spesies

payung (*umbrella species*), yang menunjukkan keberhasilan pengelolaan habitat satwa liar secara menyeluruh (Kuswanda & Barus, 2018).

Populasi Gajah Sumatera di Provinsi Sumatera Utara menghadapi tekanan yang semakin tinggi akibat fragmentasi habitat serta perubahan tata guna lahan menjadi kawasan perkebunan dan permukiman. Konflik antara manusia dan gajah paling sering terjadi di wilayah Langkat, tempat jalur pergerakan gajah tumpang tindih dengan area budidaya masyarakat. Kondisi tersebut mengakibatkan kerusakan pada lahan pertanian, menimbulkan korban pada manusia maupun satwa, serta memperbesar tekanan sosial dan ekologis di sekitar kawasan konservasi (Maulana, 2018). Dalam menanggapi permasalahan tersebut, pemerintah telah memberlakukan berbagai kebijakan perlindungan, seperti Peraturan Pemerintah Nomor 7 Tahun 1999 dan Peraturan Menteri LHK Nomor P.106/MenLHK/Setjen/Kum.1/12/2018. Meskipun demikian, informasi mengenai sebaran habitat potensial dan tingkat kesesuaian lingkungan Gajah Sumatera di Provinsi Sumatera Utara masih terbatas, sehingga upaya konservasi belum dapat dilakukan secara optimal dan berbasis data spasial yang komprehensif.

Pemodelan distribusi spesies merupakan salah satu pendekatan strategis dalam upaya memahami pola sebaran dan potensi habitat satwa liar. Metode MaxEnt (*Maximum Entropy*) terbukti efektif dalam memprediksi habitat potensial dengan memanfaatkan data keberadaan spesies (*occurrence data*) serta variabel lingkungan (*environmental variables*), bahkan ketika data lapangan yang tersedia terbatas (Nugroho *et al.*, 2022; Zainal *et al.*, 2022). Pendekatan ini telah banyak diterapkan untuk memetakan distribusi berbagai spesies endemik di Indonesia, seperti Orangutan Sumatera (*Pongo abelii*) (Islamidini *et al.*, 2024); Badak Sumatera (*Dicerorhinus sumatrensis*) (Rusman, 2016); Harimau Sumatera (*Panthera tigris sumatrae*) (Nasution *et al.*, 2022); Rangkong Sulawesi (*Rhyticeros cassidix*) (Aldiansyah *et al.*, 2024); dan Anoa (*Bubalus sp.*) (Ardiani *et al.*, 2023), yang menunjukkan hasil akurat dan relevan secara ekologis.

Melalui pendekatan MaxEnt, penelitian ini bertujuan memproyeksikan potensi sebaran geografis Gajah Sumatera di Provinsi Sumatera Utara serta mengidentifikasi faktor lingkungan utama yang memengaruhi distribusinya. Hasil pemodelan diharapkan dapat menjadi dasar ilmiah dalam pengambilan keputusan konservasi, termasuk penetapan wilayah prioritas perlindungan, pengembangan koridor ekologis antarhabitat, serta mitigasi konflik manusia-gajah berbasis data spasial.

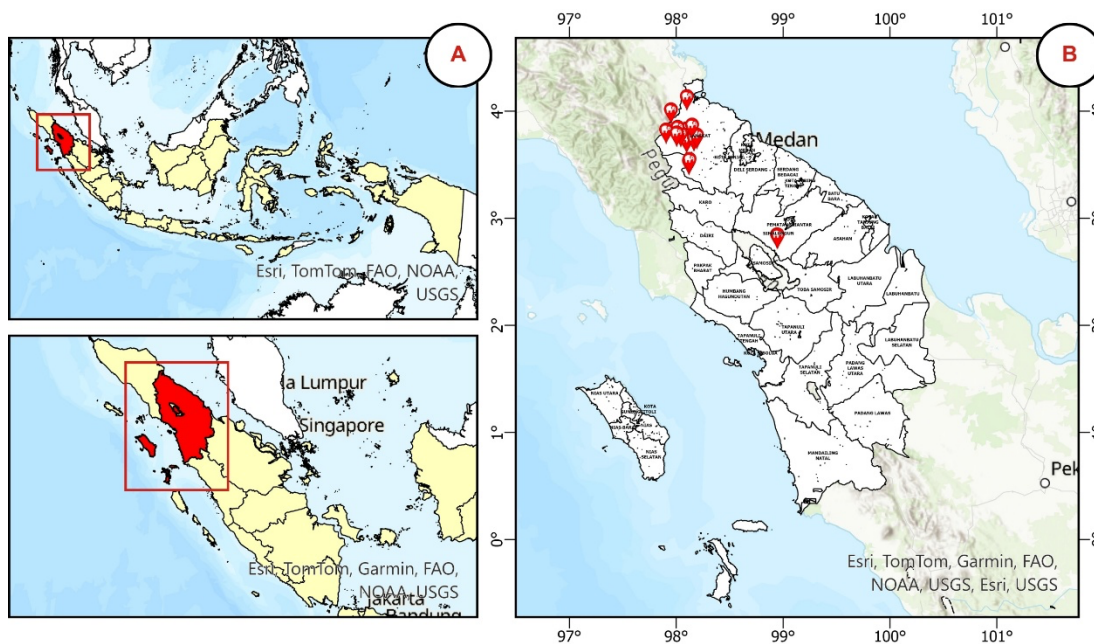
Metode Penelitian

Lokasi

Area studi yang dianalisis dalam studi ini mencakup seluruh area Provinsi Sumatera Utara dengan luas 72.460,74 km². Proses pengumpulan data sekunder mengenai keberadaan Gajah Sumatera (*Elephas maximus sumatranus*) dan variabel lingkungan di seluruh wilayah Pulau Sumatera dilakukan pada bulan April 2025. Seluruh tahapan pemrosesan data telah dilakukan di Laboratorium Bioinformatika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Medan, dari Juni 2025 - Agustus 2025.

Populasi dan Sampel

Subjek populasi yang dikaji dalam studi ini meliputi keseluruhan data titik koordinat kehadiran Gajah Sumatera (*E. m. sumatranus*) di wilayah Provinsi Sumatera Utara, sebagaimana yang telah terhimpun melalui *database* GBIF, *iNaturalist*, serta ragam literatur maupun publikasi ilmiah. Adapun teknik penarikan sampel mengaplikasikan metode sensus, yang berarti seluruh elemen dari populasi tersebut ditetapkan secara utuh untuk digunakan sebagai sampel penelitian.



Gambar 1. (A) Peta area studi yaitu Provinsi Sumatera Utara, Indonesia yang terletak antara 1° - 4° LU dan 98° - 100° BT. (B) Sebaran spasial 20 titik keberadaan Gajah Sumatera. Simbol berwarna merah menunjukkan lokasi titik observasi, sedangkan area putih merepresentasikan batas administratif Kab/Kota.

Alat dan Bahan

Alat

Dalam penelitian ini, digunakan beberapa perangkat lunak untuk mendukung analisis data. ArcGIS Pro versi 3.15 digunakan untuk analisis spasial, sementara *Maximum Entropy* (MaxEnt) versi 3.4.4 digunakan untuk pemodelan distribusi spesies. *Microsoft Office* digunakan untuk pengolahan data awal, SPSS versi 27 untuk uji statistik multikolinearitas, dan laptop berfungsi sebagai platform utama dalam keseluruhan proses analisis.

Bahan

Bahan penelitian yang diaplikasikan dalam studi ini meliputi beberapa komponen utama. *Komponen pertama*, adalah data koordinat titik kehadiran Gajah Sumatera di Provinsi Sumatera Utara yang memuat informasi garis bujur (X) dan garis lintang (Y), dikumpulkan melalui *database* GBIF, *iNaturalist*, serta ragam literatur dan publikasi relevan. *Komponen kedua*, mencakup peta digital kawasan Provinsi Sumatera Utara beserta batas administratifnya yang difungsikan secara khusus sebagai acuan spasial untuk proses pemetaan maupun analisis data. Selanjutnya, *komponen ketiga*, berisi sekumpulan data variabel lingkungan sebagaimana yang tertera secara rinci pada Tabel 1. *Terakhir*, penelitian ini juga mengandalkan sumber referensi tambahan berupa buku dan jurnal ilmiah guna menunjang pendalaman kajian ekologi spesies bersangkutan beserta metodologi analitis yang diimplementasikan. Seluruh rincian mengenai data lokasi penyebaran Gajah Sumatera tersebut kemudian direkapitulasi secara utuh untuk dijadikan landasan fundamental dalam keseluruhan tahapan analisis.

Tabel 1. Variabel Lingkungan pada Penelitian

Variabel	Tipe Variabel	Sumber	Kelas	Unit/ Range Data
Ketinggian	Kontinu	USGS	-	Meter
Kemiringan lereng	Kontinu	SRTM4.1dev	-	Derajat
Isotermalitas (BIO3)	Kontinu	WorldClim	-	Persen
Curah Hujan Kuartal Terdingin (BIO19)	Kontinu	WorldClim	-	mm
Radiasi matahari	Kontinu	WorldClim	-	$\text{kJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$
Tutupan lahan	Kategorikal	Satelit Sentinel 2	1	Perairan
			2	Hutan
			3	Vegetasi Tergenang
			4	Lahan Pertanian
			5	Area Terbangun
			6	Lahan Terbuka
			7	Padang Rumput
Jarak ke air	Kategorikal	BIG	1	0 - 500 m
			2	501 - 1,000 m
			3	1,001 - 1,500 m
			4	1,501 - 2,000 m
			5	> 2,000 m
Jarak ke bangunan	Kategorikal	BIG	1	0 - 500 m
			2	501 - 1,000 m
			3	1,001 - 1,500 m
			4	1,501 - 2,000 m
			5	> 2,000 m

Teknik Pengumpulan Data

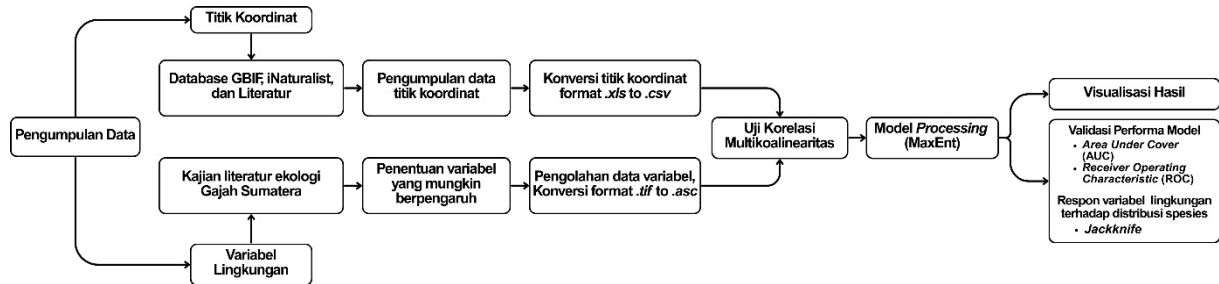
Penelitian ini menggunakan data sekunder berupa titik koordinat kehadiran Gajah Sumatera dari *Global Biodiversity Information Facility* (GBIF), *iNaturalist*, dan literatur, beserta variabel lingkungan dari WorldClim, Badan Informasi Geospasial, Citra Satelit Sentinel 2, dan USGS. Data kehadiran dibersihkan mengikuti metode Huang *et al.* (2021), dengan menghapus rekaman tanpa koordinat dan data ganda untuk meminimalisasi bias. Proses ini menghasilkan 20 titik tervalidasi (Gambar 1) yang direkapitulasi memuat informasi spesies, lintang, dan bujur, kemudian dikonversi menjadi format CSV untuk pemodelan MaxEnt.

Pemilihan variabel lingkungan merujuk pada literatur ekologi Gajah Sumatera yang mencakup parameter bioklimatik, topografi, dan antropogenik. Seluruh data raster beresolusi 1 km² tersebut diuji multikolinearitasnya menggunakan perangkat lunak ArcGIS Pro dan SPSS v27 untuk mengeliminasi korelasi antarvariabel yang terlalu tinggi (Hayat *et al.*, 2024). Rangkaian pengujian ini menetapkan 8 variabel akhir yang representatif dan siap diaplikasikan dalam simulasi MaxEnt (Tabel 1).

Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian diawali dengan pengumpulan data koordinat keberadaan dan variabel lingkungan, yang kemudian dikonversi dan diuji multikolinearitasnya sesuai alur pada (Gambar 2). Data tersebut kemudian diolah menggunakan perangkat lunak MaxEnt versi 3.4.4 berbasis *Java*, dengan

memasukkan file titik kehadiran spesies dalam format *.csv* serta layer lingkungan raster dalam format raster (*.asc*). Diterapkan metode validasi silang (*crossvalidation*) 10-fold, dengan jumlah 10 kali replikasi, di mana seluruh data sebaran spesies dibagi secara acak menjadi 10 subset yang sama besar. Setiap subset secara bergiliran berfungsi sebagai data uji sementara sembilan subset lainnya digunakan sebagai data pelatihan, sehingga memaksimalkan pemanfaatan data dan meningkatkan validitas statistik hasil pemodelan (Yan *et al.*, 2021).



Gambar 2. Alur prosedur penelitian

Pendekatan *Species Distribution Modeling* (SDM) dengan MaxEnt ini menghasilkan *output* dalam format HTML, ASC, dan CSV untuk dokumentasi, analisis spasial, dan evaluasi statistik (Karyanto *et al.*, 2023). Evaluasi kinerja model dilakukan melalui analisis kurva ROC dengan nilai *Area Under Curve* (AUC) sebagai indikator akurasi, mengacu klasifikasi Lissovsky & Dudov (2021) yang membagi tingkat akurasi menjadi lima kategori mulai dari sangat baik (AUC 0,9-1,0) hingga buruk (AUC 0,5-<0,6).

Hasil dan Pembahasan

Sebelum dilakukan pemrosesan pada MaxEnt, terlebih dahulu dilakukan uji multikolinearitas untuk memastikan tidak terjadinya korelasi tinggi antar variabel independen dalam model yang dapat mempengaruhi kestabilan dan interpretasi hasil pemodelan. Pengujian ini dilakukan dengan menganalisis nilai Toleransi dan *Variance Inflation Factor* (VIF), di mana nilai Toleransi < 0,1 atau VIF > 10 mengindikasikan multikolinearitas berat, sedangkan VIF > 5 sudah perlu diwaspadai (Javidan *et al.*, 2021; Kim, 2020).

Tabel 2. Statistik Multikolinearitas Variabel Prediktor menggunakan SPSS v27.

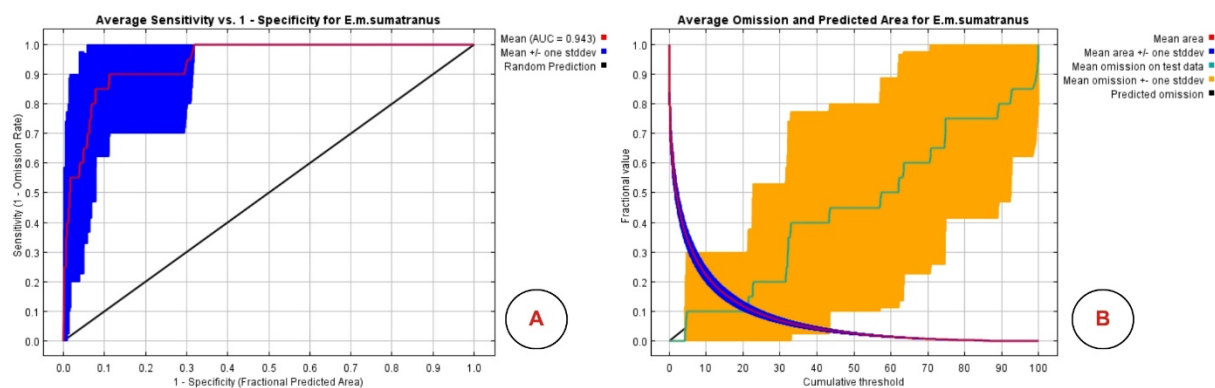
Variabel	Statistik Kolinearitas	
	Toleransi	VIF
Isotermalitas (BIO3)	0,570	1,754
Curah hujan kuartal terdingin (BIO19)	0,863	1,159
Jarak ke bangunan	0,825	1,212
Jarak ke air	0,460	2,172
Tutupan lahan	0,473	2,114
Kemiringan lereng	0,400	2,498
Radiasi matahari	0,297	3,371
Variabel terikat	Ketinggian	

Berdasarkan hasil uji yang disajikan pada Tabel 2, hasil uji menunjukkan bahwa seluruh variabel memenuhi syarat toleransi multikolinearitas, dimana hanya variabel radiasi matahari (3,371) yang agak tinggi namun masih di bawah <5 serta mayoritas variabel prediktor lainnya memiliki nilai

VIF dalam rentang 1-2 yang mengindikasikan tingkat korelasi antar variabel independen yang rendah. Dengan demikian, seluruh variabel lingkungan dinyatakan layak dan dapat langsung digunakan pada proses pemodelan MaxEnt.

Evaluasi Kinerja Model

Hasil validasi model *Maximum Entropy* (MaxEnt) menunjukkan akurasi tinggi dan sangat baik dalam memodelkan distribusi habitat Gajah Sumatera. Berdasarkan kurva *Receiver Operating Characteristic* (ROC), garis merah pada (Gambar 3a) menggambarkan rerata performa model dalam membedakan area keberadaan dan ketidakhadiran spesies. Nilai *Area Under Curve* (AUC) sebesar $0,943 \pm 0,066$ yang termasuk dalam kategori sangat baik menurut klasifikasi Lissovsky & Dudov (2021). Nilai ini mengindikasikan probabilitas prediksi sebesar 94% dimana model mampu membedakan titik kehadiran aktual dari titik acak yang menegaskan kemampuan MaxEnt dalam memprediksi area habitat potensial Gajah Sumatera secara andal.



Gambar 3. (A) Kurva ROC beserta Nilai AUC hasil pemodelan MaxEnt dengan rerata $0,943 \pm 0,066$. (B) Kurva rata-rata tingkat kesalahan prediksi dan area terprediksi hasil pemodelan MaxEnt (nilai kesalahan prediksi rendah pada sebagian besar ambang batas).

Validasi lebih lanjut melalui hubungan antara rata-rata tingkat kesalahan prediksi (*omission*) dan area terprediksi (*predicted area*) (Gambar 3b) memperkuat keandalan model, dimana kurva merah merepresentasikan luasan area prediksi terhadap ambang batas kumulatif sementara garis biru menunjukkan tingkat kesalahan prediksi. Nilai *omission* yang rendah pada ambang batas rendah mengindikasikan keberhasilan model dalam memprediksi titik kehadiran aktual, dengan area oranye yang menggambarkan Standar Deviasi ($\pm 0,066$) menegaskan konsistensi hasil antar replikasi. Kesesuaian antara garis tingkat kesalahan prediksi pada data pelatihan dan pengujian dengan garis kurva tingkat kesalahan prediksi mengindikasikan bahwa model yang dibangun tidak mengalami *overfitting*. Hal ini sesuai dengan kriteria validitas model menurut Phillips *et al.* (2006), dimana tingkat kesalahan prediksi (*omission rate*), yang mendekati tingkat kesalahan prediksi yang diperkirakan (*predicted omission*) menandakan keakuratan model terhadap data independen. Bentuk kurva yang selaras tersebut tidak hanya merefleksikan akurasi statistik tetapi juga kestabilan prediktif dan keterwakilan pola sebaran spasial spesies secara aktual.

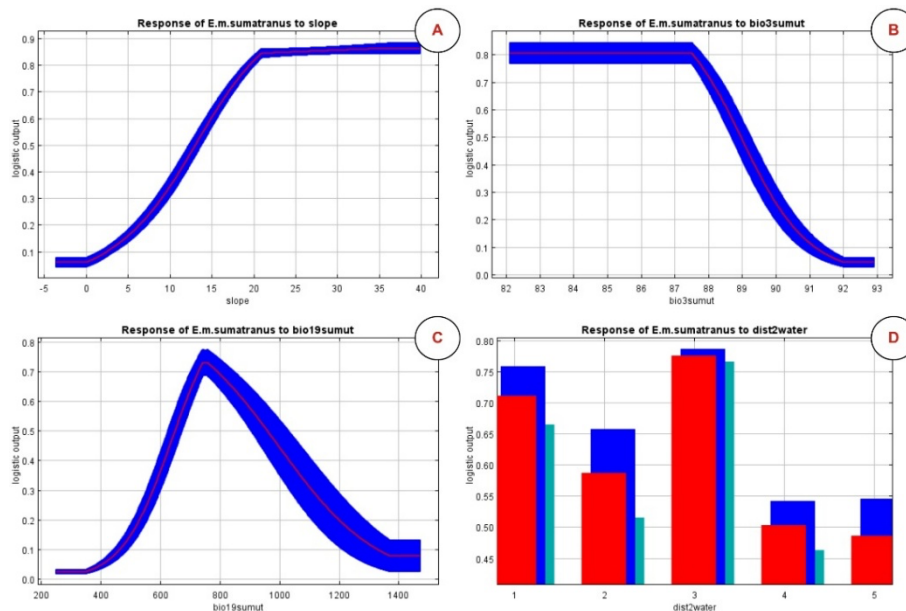
Kontribusi dan Kepentingan Variabel Lingkungan

Evaluasi kontribusi variabel lingkungan dalam pemodelan MaxEnt dilakukan untuk mengkuantifikasi pengaruh relatif masing-masing prediktor terhadap kinerja model, yang dianalisis melalui proporsi kontribusi persentase dan uji *Jackknife* sebagai indikator sensitivitas model. Hasil

visualisasi Jackknife mengonfirmasi bahwa eliminasi variabel berkontribusi tinggi menyebabkan penurunan signifikan nilai AUC, menunjukkan dependensi model terhadap variabel-variabel kunci tersebut dalam mempertahankan akurasi prediktifnya.

Tabel 3. Analisis kontribusi faktor lingkungan dan kepentingan permutasi pada pemodelan.

Variabel	Kontribusi (%)	Kepentingan Permutasi (%)
Kemiringan lereng	34,5	49,3
Isotermalitas (BIO3)	27,0	20,1
Curah hujan kuartal terdingin (BIO19)	19,9	21,6
Jarak ke air	9,8	1,0
Ketinggian	3,6	2,2
Tutupan lahan	3,2	4,0
Jarak ke bangunan	1,3	0,4
Radiasi matahari	0,8	1,5

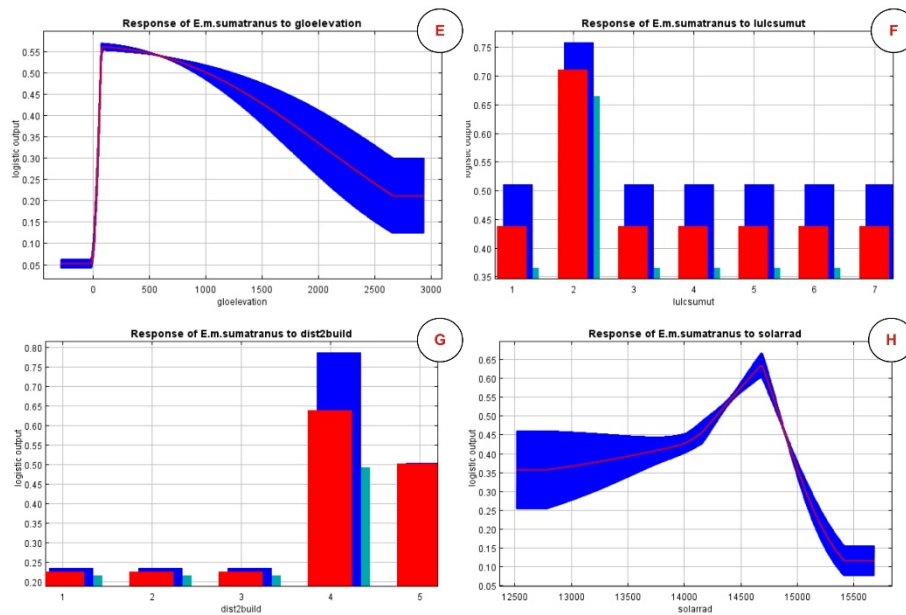


Gambar 4. Kurva respon variabel lingkungan: (A) Kemiringan lereng; (B) Isotermalitas (BIO3); (C) Curah hujan kuartal terdingin (BIO19); dan (D) Jarak ke air.

Berdasarkan hasil analisis kontribusi variabel lingkungan (Tabel 3), didapatkan hasil bahwa variabel kemiringan lereng merupakan prediktor paling dominan dalam model distribusi habitat Gajah sumatera dengan kontribusi 34,5% dan tingkat kepentingan permutasi 49,3%. Pola respons yang terbentuk (Gambar 4a) menunjukkan hubungan positif antara kemiringan lereng dan probabilitas kehadiran spesies, di mana habitat optimal berada pada rentang kemiringan 5°-20° dengan nilai kesesuaian mencapai 0,85-0,9. Karakteristik ini sesuai dengan kondisi topografi Ekosistem Leuser di Kabupaten Langkat yang didominasi perbukitan landai hingga bergelombang, menyediakan kombinasi ideal antara aksesibilitas pergerakan, ketersediaan pakan, sumber air, serta perlindungan alami dari gangguan antropogenik. Hal ini didukung oleh beberapa penelitian bahwa gajah lebih sering ditemukan di area dengan kemiringan lereng 0-10° atau <math>< 20^\circ</math>, terutama di dataran rendah dan lembah sungai (Budhathoki *et al.*, 2023; Moßbrucker *et al.*, 2016; Wilson *et al.*, 2021).

Berdasarkan analisis kurva respon, teridentifikasi hubungan determinatif antara probabilitas keberadaan Gajah Sumatera dengan variabel Isotermalitas (BIO3) dan curah hujan kuartal terdingin (BIO19) (Gambar 4b; 4c). Isotermalitas menunjukkan kesesuaian habitat optimal pada rentang 82-87% (*logistic output* ≥ 0.8), mencerminkan preferensi gajah terhadap stabilitas termal moderat yang mendukung kenyamanan fisiologis dan ketersediaan pakan sepanjang tahun. Pada curah hujan kuartal terdingin (BIO19) mengikuti pola *bell-shaped* dengan puncak optimal pada 800 mm, mengindikasikan kebutuhan air sedang selama musim kering untuk mempertahankan produktivitas habitat tanpa menyebabkan kondisi tergenang. Tingkat kontribusi dan kepentingan permutasi yang signifikan pada isotermalitas (BIO3) sebesar 27,0% dan 20,1% mengonfirmasi pengaruhnya terhadap distribusi habitat, khususnya pada populasi di elevasi tertentu atau wilayah dengan fluktuasi suhu signifikan (Xu *et al.*, 2025). Sementara curah hujan kuartal terdingin (BIO19) dengan nilai 19,9% dan 21,6% mempertegas peran kritis stabilitas iklim dalam memengaruhi pola vegetasi, produktivitas pakan, dan ketersediaan air musiman yang berdampak langsung terhadap kelangsungan populasi gajah (Yang *et al.*, 2022), serta pembentukan habitat ideal di lanskap tropis Ekosistem Leuser.

Variabel jarak ke sumber air (9,8%; PI: 1,0%) respon tertinggi di kategori 3 dan 1 yaitu jarak yang moderat (1.000-1.500 m) serta jarak paling dekat (0-500 m), hal ini mengindikasikan bahwa gajah memiliki preferensi terhadap daerah yang tidak terlalu jauh namun tetap memiliki akses yang memadai ke sumber air.

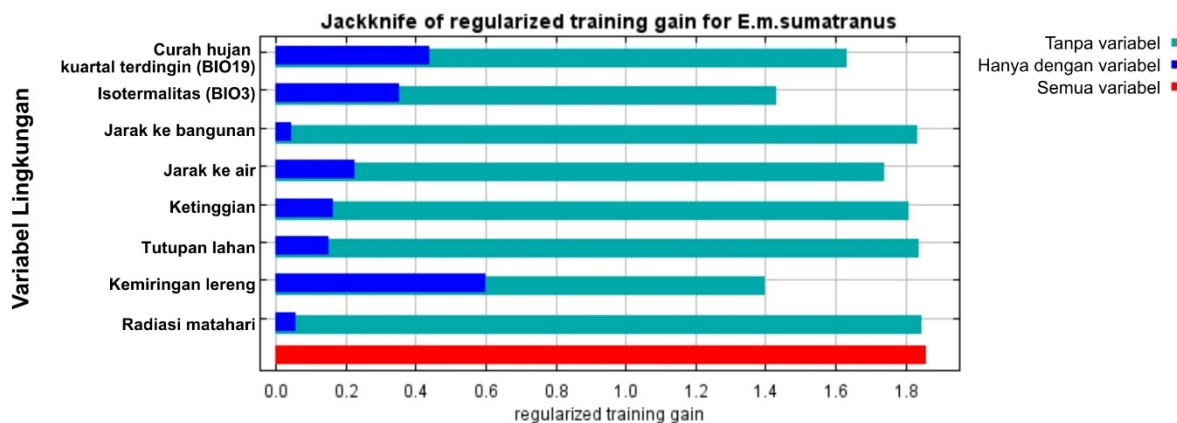


Gambar 5. Kurva respon variabel lingkungan: (E) Ketinggian; (F) Tutupan lahan; (G) Jarak ke bangunan; (H) Radiasi matahari.

Variabel lainnya seperti variabel ketinggian, tutupan lahan, jarak ke bangunan, dan radiasi matahari (Gambar 5) saling melengkapi dalam menentukan distribusi habitat Gajah Sumatera. Ketinggian (kontribusi 3,6%; permutasi 2,2%) menunjukkan preferensi terhadap dataran rendah 0-200 mdpl yang kaya sumber air dan pakan. Tutupan lahan (3,2%; 4,0%) menunjukkan kesesuaian tertinggi pada hutan (0,70), menegaskan ketergantungan terhadap vegetasi alami. Jarak ke bangunan (1,3%; 0,4%) memperlihatkan peningkatan kesesuaian pada jarak 1.500-2.000 m dari permukiman, mencerminkan upaya menghindari gangguan manusia. Radiasi matahari berpengaruh optimal pada kisaran 14.700 kJ/m²/hari sebelum menurun tajam pada intensitas lebih tinggi. Secara keseluruhan,

kombinasi faktor topografi, vegetasi, tekanan antropogenik, dan iklim mikro membentuk pola spasial habitat Gajah Sumatera.

Validasi model melalui analisis *Jackknife* (Gambar 6) menunjukkan bahwa variabel kemiringan lereng, curah hujan kuartal terdingin (BIO19), isothermalitas (BIO3), dan jarak ke air memiliki kontribusi paling besar terhadap akurasi prediksi distribusi habitat Gajah Sumatera. Nilai *training gain* tertinggi pada uji “hanya dengan variabel” menunjukkan bahwa keempat variabel kunci yaitu kemiringan lereng, curah hujan kuartal terdingin, isothermalitas, dan jarak ke air memiliki kemampuan kuat secara individu dalam menjelaskan kehadiran spesies. Sebaliknya, penurunan signifikan pada nilai *training gain* ketika variabel-variabel tersebut dihilangkan menandakan adanya kontribusi informasi unik yang tidak dapat digantikan oleh variabel lain.

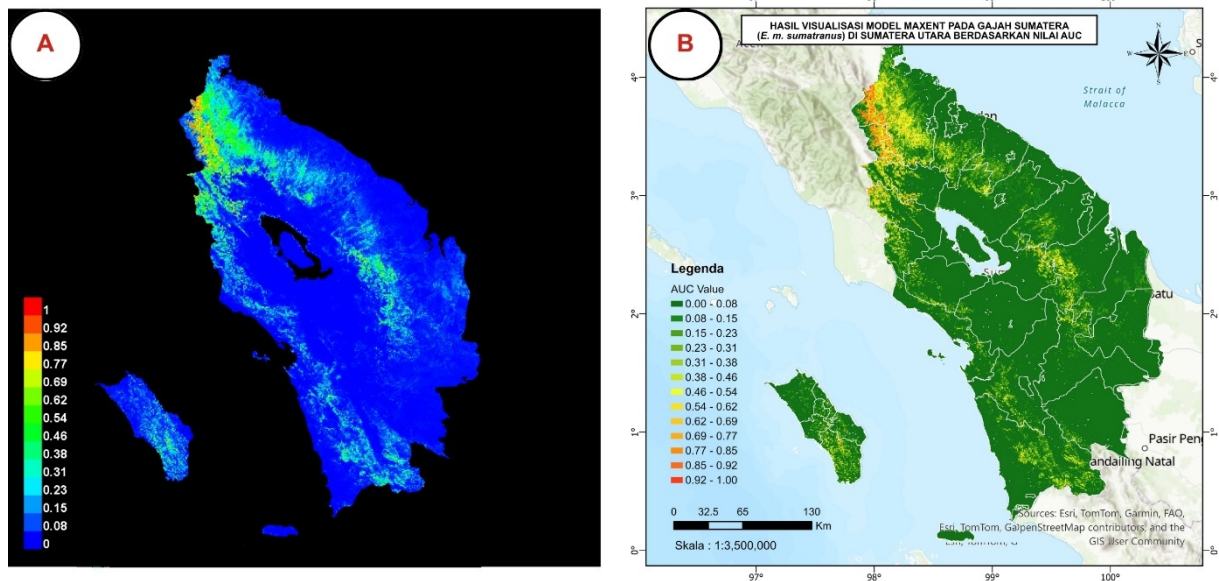


Gambar 6. Analisis Jackknife terhadap variabel lingkungan pada model kesesuaian habitat Gajah Sumatera (*E. m. sumatranus*).

Kombinasi hasil tersebut menegaskan bahwa faktor topografi dan bioklimatik, terutama curah hujan dan kestabilan suhu, berperan sebagai penentu utama dalam pembentukan habitat potensial Gajah Sumatera. Kedekatan terhadap sumber air turut berkontribusi dalam mendukung aktivitas harian serta menjamin ketersediaan sumber daya penting di ekosistem, sedangkan tekanan antropogenik berfungsi sebagai faktor penyesuaian lokal yang memengaruhi pola distribusi spesies. Pola ini konsisten dengan temuan berbagai penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa interaksi antara kondisi fisik lingkungan, iklim, dan aktivitas manusia secara bersama menentukan kelayakan habitat gajah di lanskap tropis (Benitez *et al.*, 2022; Budhathoki *et al.*, 2023; Frei *et al.*, 2023; He *et al.*, 2023; Sharma *et al.*, 2019).

Hasil Visualisasi Model MaxEnt dan Habitat Potensial Gajah Sumatera

Pemodelan kesesuaian habitat Gajah Sumatera (*E. m. sumatranus*) menggunakan algoritma *Maximum Entropy* (MaxEnt) di Sumatera Utara berhasil diidentifikasi melalui nilai AUC yang mengonfirmasi keakuratan prediksi model (Gambar 7a). Nilai AUC 1,0 mengindikasikan tingkat akurasi prediksi yang sempurna, sedangkan nilai 0,5 merepresentasikan kinerja acak. Nilai AUC yang diperoleh dalam penelitian ini mengonfirmasi reliabilitas model dalam memprediksi distribusi kesesuaian habitat secara spasial.



Gambar 7. (A) Hasil pemodelan MaxEnt untuk Gajah Sumatera di Provinsi Sumatera Utara divalidasi menggunakan nilai AUC. (B) Visualisasi melalui peta tematik yang menampilkan gradasi warna hijau (kesesuaian rendah) hingga kuning-merah (kesesuaian sedang-tinggi) pada batas administrasi Kabupaten/Kota.

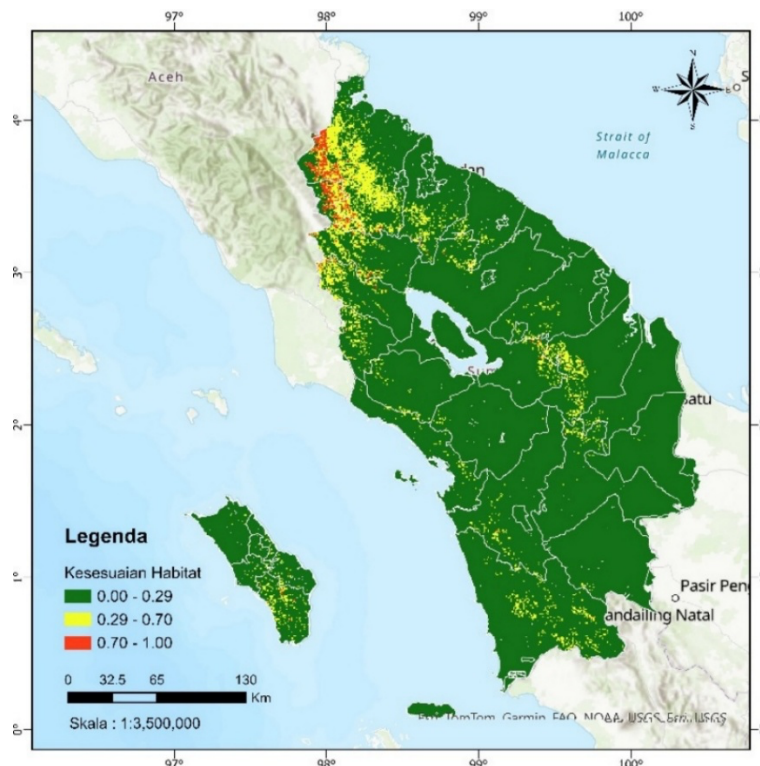
Hasil pemetaan pada (Gambar 7b) menunjukkan variasi spasial signifikan dimana wilayah tengah hingga timur didominasi kesesuaian rendah (0,00-0,29) akibat fragmentasi habitat dari aktivitas antropogenik, sementara kesesuaian sedang (0,29-0,70) terdistribusi di zona transisi yang berfungsi sebagai koridor ekologis. Habitat optimal (0,70-1,0) terkonsentrasi di kawasan barat yang terintegrasi dengan Ekosistem Leuser, selaras dengan habitat ideal bagi Gajah sumatera yang ditandai oleh topografi bergelombang, tutupan hutan rapat, wilayah jelajah yang luas, minim gangguan manusia dan ketersediaan sumber daya melimpah (Ananda *et al.*, 2024; Lubis *et al.*, 2023).

Tabel 4. Persentase distribusi dan luas area (km²) pada setiap nilai probabilitas hasil pemodelan MaxEnt pada Gajah sumatera di Sumatera Utara.

Nilai	Persentase	Luas Wilayah (Km ²)
0,00 - 0,08	75,91	55.005,15
0,08 - 0,15	9,14	6.622,94
0,15 - 0,23	5,16	3.738,99
0,23 - 0,31	3,06	2.217,31
0,31 - 0,38	1,76	1.275,31
0,38 - 0,46	1,55	1.123,15
0,46 - 0,54	0,99	717,36
0,54 - 0,62	0,86	623,16
0,62 - 0,69	0,52	376,80
0,69 - 0,77	0,40	289,84
0,77 - 0,85	0,41	297,09
0,85 - 0,92	0,22	159,41
0,92 - 1,00	0,02	14,49
Total		72.461,00

Berdasarkan hasil analisis distribusi nilai probabilitas (Tabel 4), teridentifikasi bahwa kisaran nilai 0,00-0,08 mendominasi luas wilayah dengan cakupan 55.005,15 km² (75,91%), sedangkan kisaran nilai tertinggi 0,92-1,00 hanya mencakup 14,49 km² (0,02%). Pola ini menunjukkan hubungan terbalik antara nilai probabilitas dan luas area, di mana semakin tinggi tingkat kesesuaian habitat, semakin terbatas pula distribusinya.

Analisis lebih lanjut dilakukan mengenai kesesuaian habitat Gajah Sumatera, dengan menyesuaikan klasifikasi kesesuaian habitat yang diadopsi dari penelitian Setiawana *et al.* (2024) yang membaginya ke dalam tiga kelas, yaitu kesesuaian rendah (0,00-0,29), sedang (0,29-0,70), dan tinggi (0,70-1,00). Hasil analisis berupa peta tematik kesesuaian habitat dan estimasi luas area habitat potensial Gajah Sumatera yang disajikan pada (Gambar 8) dan (Tabel 5).



Gambar 8. Peta Klasifikasi Kesesuaian Habitat (*Habitat Suitability Index*) Gajah Sumatera di Sumatera Utara menggunakan pemodelan MaxEnt.

Tabel 5. Klasifikasi Kesesuaian Habitat dan Estimasi Luas Daerahnya.

No	Nilai	Kelas kesesuaian	Persentase	Luas Estimasi Wilayah (Km ²)
1	0,00 - 0,29	Rendah	93,27	67.584,37
2	0,29 - 0,70	Sedang	5,68	4.115,78
3	0,70 - 1,00	Tinggi	1,05	760,84
Total			100,00	72.461,00

Hasil pemodelan habitat Gajah Sumatera di Sumatera Utara mengidentifikasi tiga kelas kesesuaian dengan distribusi spasial yang signifikan. Kawasan kesesuaian tinggi terkonsentrasi di wilayah barat (Langkat Barat terutama Kec. Bohorok dan Kec. Batang serangan, serta perbatasan Langkat-Karo (Kec. Mardinding dan sebagian Kec. Kuta Buluh) seluas 760,84 km² (1,05%) yang terintegrasi dengan Ekosistem Leuser, didominasi hutan primer/sekunder dengan topografi

pegunungan dan ketersediaan sumber air optimal. Zona kesesuaian sedang seluas 4.115,78 km² (5,68%) berfungsi sebagai koridor ekologis vital di daerah transisi dengan karakteristik mosaik lanskap hutan sekunder dan lahan budidaya, meskipun menghadapi tekanan antropogenik yang terus meningkat. Sementara itu, kawasan kesesuaian rendah mencakup 93,27% (67.584,39 km²) wilayah provinsi yang terutama terletak di dataran rendah timur dengan fragmentasi habitat ekstrem akibat alih fungsi lahan skala besar. Artinya, kurang dari 7% wilayah provinsi Sumut masih tergolong habitat berpotensi bagi gajah, sedangkan dominasi kelas rendah (93%) menunjukkan lanskap yang telah banyak rusak atau terfragmentasi. Temuan ini konsisten dengan data nasional, dimana diperkirakan sekitar 69% habitat potensial Gajah sumatera telah hilang dalam kurun waktu 25 tahun terakhir (Gopala *et al.*, 2011), sehingga perlindungan ketat pada habitat optimal dan penguatan konektivitas melalui koridor transisi menjadi strategi konservasi yang mendesak.

Berdasarkan temuan penelitian ini, upaya konservasi Gajah Sumatera di Provinsi Sumatera Utara perlu memprioritaskan perlindungan kawasan barat yang terintegrasi dengan Ekosistem Leuser sebagai habitat optimal, didukung oleh penguatan koridor penghubung di zona transisi dan implementasi kebijakan terpadu yang melibatkan multipihak menjadi faktor kunci dalam meminimalkan tekanan antropogenik sekaligus menjaga keberlangsungan populasi Gajah Sumatera di Provinsi Sumatera Utara.

Kesimpulan

Hasil analisis menunjukkan bahwa kondisi habitat Gajah sumatera (*Elephas maximus sumatranus*) di Provinsi Sumatera Utara berada pada tingkat kritis, dengan hanya 1,05% wilayah yang tergolong sangat sesuai dan 5,68% berkesesuaian sedang, sementara 93,27% area lainnya termasuk kategori rendah. Habitat optimal hanya tersisa di bagian barat provinsi yang berbatasan dengan Taman Nasional Gunung Leuser, sedangkan wilayah tengah dan timur telah mengalami degradasi akibat dominasi aktivitas antropogenik. Temuan ini menegaskan urgensi perlindungan habitat tersisa dan penguatan koridor ekologis sebagai upaya strategis menjaga keberlanjutan populasi Gajah Sumatera.

References

- Aldiansyah, S., Risna, & Saputra, R. A. (2024). Assessing Potential Distributions of Bird Endemic Species: Case Studies of *Macrocephalon maleo* and *Rhyticeros cassidix* and Their Threats. *Geomatics and Environmental Engineering*, 18(3), 45-61. <https://doi.org/10.7494/geom.2024.18.3.45>
- Ananda, I., Dahlan, D., & Dharma, W. (2024). Analisis Uji Multikolinearitas Variabel Lingkungan Hutan Bakongan-Bengkung, Kawasan Ekosistem Leuser: Implikasi Terhadap Habitat Spesies Kunci. *Bioscientist : Jurnal Ilmiah Biologi*, 12(2), 2456-2467. <https://doi.org/10.33394/bioscientist.v12i2.12797>
- Ardiani, D., Jaelani, L. M., Aldiansyah, S., Tambunan, M. P., Indrawan, M., & Wibowo, A. A. (2023). The Effect of Human Disturbance on the Spatial Distribution of Anoa (*Bubalus Sp.*) Using MaxEnt Modeling. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (1127, 1-10). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1127/1/012020>
- Benitez, L., Kilian, J. W., Wittemyer, G., Hughey, L. F., Fleming, C. H., Leimgruber, P., ... Stabach, J. A. (2022). Precipitation, Vegetation Productivity, and Human Impacts Control Home Range Size of Elephants in Dryland Systems in Northern Namibia. *Ecology and Evolution*, 12(9), 1-14. <https://doi.org/10.1002/ece3.9288>
- Budhathoki, S., Gautam, J., Budhathoki, S., & Jaishi, P. P. (2023). Predicting the Habitat Suitability of Asian Elephants (*Elephas maximus*) Under Future Climate Scenarios. *Ecosphere*, 14(10), 1-17. <https://doi.org/10.1002/ecs2.4678>

- Frei, K., Vojtkó, A., Farkas, T., Erdős, L., Barta, K., E-Vojtkó, A., ... Bátori, Z. (2023). Topographic Depressions Can Provide Climate and Resource Microrefugia for Biodiversity. *iScience*, 26(11), 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.108202>
- Gopala, A., Hadian, O., Sunarto, Sitompul, A., Williams, A., Leimgruber, P., ... Gunaryadi, D. (2011). *Elephas maximus ssp. sumatranus*, Sumatran Elephant. *The IUCN Red List of Threatened Species 2011*, 1-9. <https://doi.org/10.2305/IUCN.UK.2011-2.RLTS.T199856A9129626.en>
- Hayat, U., Shi, J., Wu, Z., Rizwan, M., & Haider, M. S. (2024). Which SDM Model, Climex vs. MaxEnt, Best Forecasts *Aeolesthes sarta* Distribution at a Global Scale under Climate Change Scenarios. *Insects*, 15(5), 1-20. <https://doi.org/10.3390/insects15050324>
- He, K., Fan, C., Zhong, M., Cao, F., Wang, G., & Cao, L. (2023). Evaluation of Habitat Suitability for Asian Elephants in Sipsongpanna under Climate Change by Coupling Multi-Source Remote Sensing Products with MaxEnt Model. *Remote Sensing*, 15(4), 1-23. <https://doi.org/10.3390/rs15041047>
- Huang, E., Chen, Y., Fang, M., Zheng, Y., & Yu, S. (2021). Environmental Drivers of Plant Distributions at Global and Regional Scales. *Global Ecology and Biogeography*, 30(3), 697-709. <https://doi.org/10.1111/geb.13251>
- Islamidini, N., Zumaidar, Z., Sulistiyono, N., & Alfarabi, M. (2024). Maximum Entropy Modelling for Sumatran Orangutan Habitat Suitability in Ketambe Research Station. *BIO Web of Conferences*, 123. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202412301010>
- IUCN. (2024). *Elephas maximus ssp. sumatranus*, Sumatran Elephant. Diakses 18 Januari 2025, dari <https://www.iucnredlist.org/species/199856/9129626>
- Javidan, N., Kaviani, A., Pourghasemi, H. R., Conoscenti, C., Jafarian, Z., & Rodrigo-Comino, J. (2021). Evaluation of Multi-Hazard Map Produced Using MaxEnt Machine Learning Technique. *Scientific reports*, 11(1), 6496. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85862-7>
- Karyanto, P., Bagasta, A. R., & Sari, T. S. K. (2023). *Teori dan Praktik Analisis Ekologi dengan MaxEnt*. Surakarta: UNS Press.
- Kim, J. H. (2020). Multicollinearity and Misleading Statistical Results. *Korean Journal of Anesthesiology*, 72(6), 558-569. <https://doi.org/10.4097/kja.19087>
- Kuswanda, W., & Barus, S. P. (2018). Keanekaragaman Dan Penetapan 'Umbrella Species' Satwaliar Di Taman Nasional Gunung Leuser. *Jurnal Penelitian Kehutanan Wallacea*, 6(2), 113-123. <https://journal.unhas.ac.id/index.php/wallacea/article/view/26152>
- Kuswanda, W., Barus, S. P., & Sukmana, A. (2019). The Potential of Sumatran Elephant Feed Plants in Aek Nauli's Special Purpose Forest Region, North Sumatera. In *Proceedings of the International Conference on Natural Resources and Technology (ICONART 2019)*, 279-286. <https://doi.org/10.5220/0008553202790286>
- Lissovsky, A. A., & Dudov, S. V. (2021). Species-Distribution Modeling: Advantages and Limitations of Its Application. 2. MaxEnt. *Biology Bulletin Reviews*, 11(3), 265-275. <https://doi.org/10.1134/s2079086421030087>
- Lubis, M. I., Lee, J. S. H., Rahmat, U. M., Tarmizi, Ramadiyanta, E., Melvern, D., ... Linkie, M. (2023). Planning for Megafauna Recovery in the Tropical Rainforests of Sumatra. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 11, 1-14. <https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1174708>
- Maulana, M. I. (2018). Pemodelan Spasial Daerah Rawan Konflik Gajah Sumatera (*Elephas maximus sumatranus*) dengan Manusia di Desa Sekitar Kawasan Taman Nasional Gunung Leuser. Universitas Sumatera Utara.
- Moßbrucker, A. M., Fleming, C. H., Imron, M. A., Pudyatmoko, S., & Sumardi. (2016). AKDEC Home Range Size and Habitat Selection of Sumatran Elephants. *Wildlife Research*, 43(7), 566-575. <https://doi.org/10.1071/WR16069>

- Nasution, A. F. R., Hidayat, R. A., Dzaki, G. M., Khofifah, S., & Fernando, G. J. (2022). Spatial Assessment of Sumatran Tiger-Human Conflict in South Tapanuli Regency, North Sumatera. *Proceeding International Conference on Religion, Science and Education*, 1, 561-569.
- Nugroho, A., Danoedoro, P., & Susilo, B. (2022). Pemodelan Spasial Untuk Tingkat Kesesuaian Habitat Surili Jawa (*Presbytis comate fredericae* Sody, 1930) di Taman Nasional Gunung Merbabu (TNGMb). *Geomedia Majalah Ilmiah dan Informasi Kegeografian*, 20(2), 68-84. <https://doi.org/10.21831/gm.v20i2.51818>
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum Entropy Modeling of Species Geographic Distributions. *Ecological modelling*, 6(3-4), 231-259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- Rusman, D. (2016). *Prediksi Kehadiran Badak Sumatera (Dicerorhinus sumatrensis) dan Analisis Struktur Lanskap Habitatnya di Taman Nasional Bukit Barisan Selatan*. Universitas Gadjah Mada. Universitas Gadjah Mada.
- Sa'diah, J. N. S., & Atifah, Y. (2024). Article Review: Behavioral Study of the Sumatran Elephant (*Elephas maximus sumatranus*) in Wildlife Park. *Jurnal Serambi Biologi*, 9(1), 95-102.
- Setiawana, T., Prasetyob, L. B., Mulyanib, Y. A., & Jarulis. (2024). The Habitat Suitability Modelling of Rhinoceros Hornbills (*Buceros rhinoceros*) in Java Island, Indonesia. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, 14(2), 253-266. <https://doi.org/10.29244/jpsl.14.2.253>
- Sharma, P., Adhikari, H., Tripathi, S., Ram, A. K., & Bhattarai, R. (2019). Habitat suitability modeling of Asian Elephant *Elephas maximus* (Mammalia: Proboscidea: Elephantidae) in Parsa National Park, Nepal and its Buffer Zone. *Journal of Threatened Taxa*, 11(13), 14643-14654. <https://doi.org/10.11609/jott.4467.11.13.14643-1465>
- Sumut, B. (2020). *Provinsi Sumatera Utara dalam Angka 2020*. Medan: BPS Sumut.
- Wilson, G., Gray, R. J., Radinal, Hasanuddin, Azmi, W., Sayuti, A., ... Desai, A. A. (2021). Between a Rock and a Hard Place: Rugged Terrain Features and Human Disturbance Affect Behaviour and Habitat Use of Sumatran Elephants in Aceh, Sumatra, Indonesia. *Biodiversity and Conservation*, 30(3), 597-618. <https://doi.org/10.1007/s10531-020-02105-3>
- Xu, J., Liu, Q., Ma, J., Yan, W., Guo, H., & Tian, K. (2025). Variations in the Potential Suitable Habitats of Different Populations of *Hippuris vulgaris*, a Species with Cross-Altitude Distribution. *Plants*, 14(12), 1-16. <https://doi.org/10.3390/plants14121798>
- Yan, H., He, J., Xu, X., Yao, X., Wang, G., & Tang, L. (2021). Prediction of Potentially Suitable Distributions of *Codonopsis pilosula* in China Based on an Optimized MaxEnt Model. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9, 1-17. <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.773396>
- Yang, W., Ma, Y., Jing, L., Wang, S., Sun, Z., Tang, Y., & Li, H. (2022). Differential Impacts of Climatic and Land Use Changes on Habitat Suitability and Protected Area Adequacy across the Asian Elephant's Range. *Sustainability (Switzerland)*, 14(9), 1-22. <https://doi.org/10.3390/su14094933>
- Zainal, I., Lestari, F., Gunawan, S., Adiwibowo, A., Kadir, A., & Ramadhan, N. A. (2022). Maximum Entropy Based Urban Fire Risk Distribution Modeling Under Climate Influences in North, West, and South of Jakarta City. *PREPOTIF: Jurnal Kesehatan Masyarakat*, 6(2), 1427-1435. <https://doi.org/10.31004/prepotif.v6i2.5085>