Jurnal Biologi Tropis

Original Research Paper

Habitat Suitability Modeling of the Maleo Bird in Gorontalo Using MaxEnt

Daud Yusuf[1,3], Sri Maryati[2], Sri Candrawati Langago[1], Haikal Monginsi[1]

[1]Program Studi Pendidikan Geografi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Gorontalo, Jalan Jenderal Sudirman No. 6, Kota Gorontalo, Indonesia;

[2]Program Studi Magister Pendidikan Geografi, Pascasarjana, Universitas Negeri Gorontalo, Jalan Jenderal Sudirman No. 6, Kota Gorontalo, Indonesia;

[3]Program Studi Doktor Ilmu Lingkungan, Pascasarjana, Universitas Negeri Gorontalo, Jalan Jenderal Sudirman No. 6, Kota Gorontalo, Indonesia;

Article History
Received : August 11th, 2026
Revised : October 09th, 2026
Accepted : October 27th, 2026

***Corresponding Author:**
Program Studi Pendidikan Geografi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Gorontalo, Kota Gorontalo, Indonesia;
Email: daud@ung.ac.id

Abstract: Habitat suitability information is needed to support Maleo (*Macrocephalon maleo*) conservation in Gorontalo. This study explored the spatial pattern of potential habitat suitability using Maximum Entropy (MaxEnt) and field observations. Species-presence data described in the study were combined with environmental and land-cover information, including QuickBird imagery (2024), Landsat 8 imagery (2025), and the National Digital Elevation Model. Field observations focused on two nesting localities, Maleo Village and Tulabolo–Hungayono. The available preliminary map was interpreted into three proposed management categories: Core Zone I, Core Zone II, and Buffer Zone. The map suggests relatively suitable areas near Tulabolo–Hungayono and a different landscape context around Maleo Village. These categories constitute an initial spatial interpretation rather than validated conservation zones. The manuscript does not provide occurrence-sample counts, numerical model evaluation, predictor importance, class thresholds, or area estimates. Accordingly, the map should not be interpreted as a verified estimate of occupancy probability, habitat change, or ecological connectivity. Further reporting of MaxEnt outputs and independent field validation is required before operational conservation priorities can be established.

Keywords: Conservation planning; Gorontalo; Habitat suitability; Maleo; MaxEnt.

Pendahuluan

Kawasan Wallacea merupakan salah satu pusat keanekaragaman hayati dan endemisme terpenting di dunia karena sejarah geologinya yang kompleks serta posisinya sebagai wilayah transisi antara biota Asia dan Australasia. Kondisi tersebut menghasilkan banyak spesies dengan sebaran terbatas dan ketergantungan tinggi terhadap karakter habitat tertentu. Kekayaan biologis Wallacea menghadapi tekanan akibat konversi hutan, perluasan pertanian, pembangunan infrastruktur, dan fragmentasi lanskap. Perlindungan biodiversitas Wallacea karena itu memerlukan perhatian terhadap proses ekologis dan pengelolaan bentang lahan (Struebig et al., 2022; Ngongo et al., 2025; Yuni & Yuda, 2020). Dalam konteks Gorontalo, kebutuhan informasi yang ditelaah penelitian ini ialah keterkaitan titik kehadiran Maleo dengan karakter lingkungan dan tutupan lahan pada skala provinsi. Besaran perubahan tutupan lahan lokal belum diukur dalam hasil penelitian ini.

Salah satu spesies endemik Sulawesi yang memiliki nilai konservasi tinggi ialah burung Maleo (*Macrocephalon maleo*). Spesies ini memanfaatkan panas bumi atau panas matahari pada substrat tanah dan pasir untuk menginkubasi telur. Lokasi peneluran merupakan salah satu komponen habitat reproduksi, sedangkan kawasan berhutan di sekitarnya dapat menyediakan tempat mencari pakan dan berlindung. Dengan demikian, kesesuaian tempat peneluran tidak serta-merta mewakili seluruh kebutuhan habitat sepanjang siklus hidup. Karakteristik sarang, sumber panas, gangguan manusia, pengambilan telur, dan kualitas habitat telah dibahas dalam penelitian terdahulu (Tasirin et al., 2021; Dhafir et al., 2022; Summers et al., 2023; Karim et al., 2023).

Permasalahan yang menjadi perhatian penelitian ini ialah terbatasnya informasi spasial pada skala Provinsi Gorontalo yang menghubungkan catatan kehadiran Maleo, lokasi peneluran, dan karakteristik lingkungan

This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License.

© 2026 The Author(s). This article is open access

sekitarnya. Inventarisasi lokasi peneluran memberikan informasi penting, tetapi belum selalu mencakup kawasan mencari pakan, tutupan vegetasi pendukung, dan konteks penggunaan lahan yang lebih luas. Tekanan konversi lahan dan fragmentasi merupakan ancaman ekologis yang perlu diperhatikan, tetapi besar perubahan luas habitat dan perubahan keterhubungan lanskap di Gorontalo tidak diukur dalam penelitian ini.

Salah satu pendekatan untuk mengisi kesenjangan tersebut ialah mengintegrasikan pemodelan distribusi spesies, penginderaan jauh, dan Sistem Informasi Geografis. Pendekatan ini menghubungkan titik kehadiran spesies dengan variabel lingkungan untuk menghasilkan indeks kesesuaian habitat relatif. Bagi spesies yang data ketidakhadirannya sulit diperoleh, Maximum Entropy (MaxEnt) dapat menggunakan data kehadiran dan sampel lingkungan latar (Phillips et al., 2006; Aldiansyah & Saputra, 2024; Aldiansyah & Wahid, 2024). Akan tetapi, keluaran logistik MaxEnt tidak boleh langsung dimaknai sebagai probabilitas kemunculan absolut tanpa informasi tambahan mengenai prevalensi dan kalibrasi (Guillera-Arroita et al., 2014).

Pemodelan habitat Maleo perlu mempertimbangkan prediktor yang relevan dengan ekologi spesies, seperti elevasi, kelerengan, tutupan lahan, kedekatan dengan sungai atau sumber panas, dan tekanan antropogenik. Sebagian informasi dapat diturunkan dari model elevasi digital, citra satelit, dan observasi lapangan. Pemeriksaan korelasi antarvariabel dan Variance Inflation Factor (VIF) dapat membantu mengidentifikasi prediktor yang saling berkaitan, tetapi nilai ambang merupakan pilihan analitis yang perlu dilaporkan bersama hasilnya. Penjarangan titik kehadiran (spatial thinning) juga dapat digunakan bila diperlukan untuk mengurangi pengelompokan spasial akibat rancangan survei; prosedur dan konsekuensi penjarangan perlu dinyatakan secara eksplisit. Penanganan bias pengambilan sampel dan penjarangan lokasi perlu dibandingkan dengan kajian Boria et al. (2014), Fourcade et al. (2014), dan Phillips et al. (2009).

Keluaran logistik MaxEnt biasanya berskala 0–1 dan ditafsirkan sebagai indeks kesesuaian relatif, bukan probabilitas okupansi absolut (Guillera-Arroita et al., 2014). Kemampuan prediksi model dapat dikaji melalui AUC pada data pelatihan dan pengujian. Perhitungan True Skill Statistic (TSS) mensyaratkan definisi ambang klasifikasi dan data pembanding ketidakhadiran atau pseudo-absence yang sesuai. Analisis Jackknife, permutation importance, dan kurva respons dapat membantu mendeskripsikan hubungan prediktor dengan keluaran model. Namun, penafsiran peran ekologis suatu variabel juga harus mempertimbangkan korelasi antarprediktor dan rancangan evaluasi (Elith et al., 2011; Roberts et al., 2017). Pilihan ambang klasifikasi pada data presence-only juga memerlukan pertimbangan metodologis tersendiri (Liu et al., 2016).

Kajian Maleo sebelumnya membahas aspek reproduksi, pemulihan populasi, dan kondisi tempat peneluran (Tasirin et al., 2021; Dhafir et al., 2022; Summers et al., 2023; Karim et al., 2023). Aldiansyah dan Saputra (2024) memetakan distribusi potensial spesies burung endemik, termasuk Maleo, sedangkan Aldiansyah dan Wahid (2024) menggunakan variabel bioklimatik pada cakupan Sulawesi. Kumaji et al. (2024) mengkaji perubahan area habitat Maleo secara spasial. Berbeda dalam fokus wilayah dan jenis data yang disebutkan, penelitian ini menguraikan penggabungan observasi dua lokasi peneluran di Gorontalo dengan informasi tutupan lahan dan topografi untuk menyusun peta kesesuaian awal pada skala provinsi. Keunggulan prediktif, resolusi efektif, serta perbedaan hasil antarmodel belum dapat ditetapkan tanpa metadata dan keluaran model yang lengkap.

Penelitian ini bertujuan menggambarkan pola spasial awal kesesuaian habitat Maleo di Provinsi Gorontalo berdasarkan data kehadiran yang dilaporkan dan variabel lingkungan. Interpretasi peta diarahkan untuk mengenali wilayah yang mungkin memerlukan kajian konservasi lebih lanjut, dengan tiga kategori pengelolaan yang masih bersifat usulan: Zona Inti I, Zona Inti II, dan Zona Penyangga. Penelitian berangkat dari dugaan bahwa indeks kesesuaian relatif bervariasi mengikuti karakter topografi, vegetasi, sumber panas, hidrologi, dan penggunaan lahan. Hubungan kausal perubahan penggunaan lahan, efektivitas koridor ekologis, dan penetapan zonasi legal tidak diuji dalam hasil yang tersedia.

Bahan dan Metode

Desain dan Wilayah Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan observasional dan pemodelan prediktif spasial untuk mengkaji kesesuaian habitat burung Maleo

(*Macrocephalon maleo*) di Provinsi Gorontalo. Rancangan yang dilaporkan memadukan catatan kehadiran, penginderaan jauh, Sistem Informasi Geografis, dan MaxEnt. Wilayah pembahasan mencakup Provinsi Gorontalo. Pemeriksaan kondisi lapangan difokuskan pada Desa Maleo yang memiliki area peneluran terbuka berpasir dan Tulabolo–Hungayono yang berasosiasi dengan vegetasi serta sumber air panas. Kedua lokasi dipilih untuk mewakili karakter tempat peneluran yang berbeda, bukan sebagai sampel validasi independen yang mewakili seluruh provinsi. Tanggal survei, batas wilayah kerja model, luas area analisis, dan perizinan atau ketentuan akses data spesies sensitif perlu dikonfirmasi dari catatan penelitian asli.

Kehadiran Spesies dan Data Lapangan

Sumber data kehadiran yang dijelaskan dalam naskah mencakup titik perjumpaan Maleo dan titik lokasi peneluran dari pengamatan lapangan serta sumber sekunder. Kedua jenis catatan perlu dibedakan karena masing-masing merepresentasikan aktivitas ekologis dan potensi bias pengamatan yang berbeda. Sebelum pemodelan, titik dapat diperiksa terhadap duplikasi, ketepatan koordinat, kesesuaian lokasi dengan batas kajian, dan konsentrasi pengambilan sampel. Naskah menyebut penjarangan spasial menggunakan paket spThin dalam perangkat lunak R, tetapi jarak penjarangan, versi paket, sistem koordinat, banyaknya titik sebelum dan sesudah penyaringan, serta strategi penanganan bias belum dilaporkan.

Basis data sekunder tertentu, termasuk Global Biodiversity Information Facility, belum dapat dipastikan sebagai sumber aktual karena catatan akses dan jumlah rekamannya tidak tersedia. Koordinat lokasi sarang yang sensitif harus digeneralisasi atau dilindungi pada peta yang diterbitkan. Pemisahan bias kehadiran dan strategi pemilihan background telah dibahas oleh Phillips et al. (2009), sementara penjarangan dan koreksi bias lokasi ditelaah oleh Boria et al. (2014) serta Fourcade et al. (2014).

Tabel 1. Metadata data kehadiran Maleo yang perlu dilengkapi

Komponen	Keterangan
Jumlah catatan awal (primer; sekunder)	CSV: 405 catatan; 69 koordinat (data sekunder)
Periode dan tanggal observasi	Bulan Juni 2025. Laporan MaxEnt dibuat pada 20 Mei 2026,
Jenis catatan	Seluruh 405 baris berlabel Macrocephalon_maleo. Data perjumpaan individu dan lokasi peneluran tidak dipisahkan.
Pembersihan koordinat/duplikat	Tidak ada koordinat kosong. Terdapat 336 baris berkoordinat sama; 69 titik unik jika pengulangan dihapus. Riwayat pembersihan model tidak tersedia.
Spatial thinning	spThin disebut dalam naskah, tetapi versi, jarak, dan hasilnya tidak tersedia. Model memakai 17 titik; asal penyaringannya tidak diketahui.
Wilayah aksesibel dan latar (M)	Sebaran CSV: 121,97-124,19 BT; 0,42-0,76 LU. Model memakai 10.000 titik latar dan kehadiran; batas M tidak tersedia.
Verifikasi dan perlindungan data	Verifikasi di Desa Maleo dan Tulabolo-Hungayono. Tanggal 16 Mei 2026

Variabel Lingkungan dan Penggunaan Lahan

Variabel lingkungan yang disebutkan meliputi suhu dan curah hujan dari WorldClim, elevasi serta turunan topografi dari DEMNAS, dan informasi penutup lahan dari citra QuickBird tahun 2024 serta Landsat 8 tahun 2025. Naskah juga menyebut hidrologi, kondisi termal, dan gangguan antropogenik, tetapi definisi operasional dan sumber spasial beberapa variabel tersebut belum dijelaskan. Khusus variabel termal, belum jelas apakah sumbernya suhu permukaan lahan, suhu bioklimatik, pengukuran suhu substrat, atau proksi lainnya. Lapisan dari sumber dengan resolusi berbeda hanya dapat dibandingkan dalam pemodelan setelah sistem koordinat, cakupan, waktu representasi, pengolahan nilai, dan ukuran piksel akhir dinyatakan secara konsisten. Metadata prediktor yang belum tersedia dirangkum pada Tabel 2.

Data citra QuickBird 2024 dan Landsat 8 tahun 2025 disebut sebagai sumber informasi penutup lahan, tetapi hasil klasifikasi yang terharmonisasi, matriks transisi, ketelitian klasifikasi, dan luas tiap kelas pada kedua tahun

belum disajikan. Karena itu, analisis perubahan penggunaan lahan tidak dinyatakan sebagai hasil penelitian ini. Pemeriksaan korelasi Pearson dan VIF dicantumkan sebagai tahapan seleksi prediktor yang memerlukan pelaporan matriks korelasi, nilai VIF, dan variabel yang dieliminasi. Penggunaan ambang korelasi 0,80 atau VIF 10 tidak menggantikan pelaporan diagnostik tersebut. Proyeksi berbasis Markov Chain dan Cellular Automata untuk tahun 2035 merupakan kemungkinan penelitian lanjutan, bukan langkah analisis yang telah dilaporkan.

Tabel 2. Sumber prediktor yang disebutkan dalam naskah

Prediktor / data	Sumber, tahun, dan catatan
Suhu dan curah hujan	WorldClim dan Citra Landsat Band 6
Elevasi, lereng, aspek	DEMNAS
Penutup lahan setempat	QuickBird 2024 disebut untuk tutupan lahan setempat. Kanal, resolusi, dan hubungan dengan raster PL tidak terdokumentasi.
Penutup lahan wilayah luas	Landsat 8 (2025) disebut dalam naskah. Tanggal, resolusi, dan metode klasifikasi tidak tersedia; sumber raster PL 2019 belum dipastikan.
Hidrologi	Citra satelit dan Peta Jaringan Sungai
Kondisi termal setempat	Sumber panas di Tulabolo-Hungayono disebutkan. Pengukuran suhu substrat/LST dan layer termal MaxEnt tidak tersedia.
Gangguan antropogenik	Gangguan manusia disebut sebagai konteks habitat. Definisi, sumber, tahun, serta raster prediktornya tidak tersedia.
Seleksi dan penyelarasan	Input MaxEnt terkonfirmasi: PL dan PL 2019, keduanya kategorikal. CRS, resolusi akhir, uji korelasi/VIF, dan seleksi belum dilaporkan.

Pengembangan Model MaxEnt

Pemodelan dijelaskan menggunakan MaxEnt versi 3.4.4. Naskah menyebut fitur linear, kuadratik, dan hinge serta pemisahan 75% data untuk pelatihan dan 25% untuk pengujian melalui sub-sampling berulang. Namun, keluaran pengaturan model yang mengonfirmasi kelas fitur aktif, jumlah ulangan pasti, regularization multiplier, random seed, area aksesibel (M), jumlah dan skema pemilihan titik latar, koreksi bias, serta pemilihan kompleksitas belum tersedia. Oleh karena itu, konfigurasi tersebut belum dapat dinyatakan sebagai prosedur yang sepenuhnya dapat direproduksi.

Tabel 3. Konfigurasi MaxEnt untuk verifikasi penulis

Parameter	Nilai / status
Perangkat lunak	MaxEnt versi 3.4.4; model dibuat 20 Mei 2026 pukul 12.58 ICT; konvergen setelah 20 iterasi.
Feature classes	Layer PL dan PL 2019 diperlakukan kategorikal; kelas fitur aktif (linear, quadratic, hinge) tidak dirinci.
Data latih dan uji	12 latih dan 5 uji (70,6%/29,4%); randomtestpoints = 30. Tidak sesuai klaim 75%/25% dalam naskah.
Jumlah replikasi	Satu laporan pemodelan dilampirkan; jumlah replikasi tidak dilaporkan.
Regularization multiplier	Regularisasi fitur: L/Q/P 0,714; kategorikal 0,429; threshold 1,880; hinge 0,500. Multiplier global dan tuning tidak tercantum.
Seed dan koreksi bias	Random seed, metode koreksi bias spasial, dan paket pendukung tidak dilaporkan.
Background / M	10.000 titik latar dan kehadiran untuk distribusi MaxEnt. Batas M dan metode pengambilan sampel latar tidak dilaporkan.
Output dan ambang kesesuaian	Tabel ambang: kumulatif 0,010; cloglog 0,632; area terprediksi 1,000. Kelas zona tidak ditetapkan; AUC latih/uji 0,500.

Penetapan area aksesibel perlu mengikuti pertimbangan sejarah aksesibilitas spesies (Barve

et al., 2011); pemilihan pengaturan dan evaluasi spasial dapat mengikuti pendekatan yang relevan dalam Muscarella et al. (2014). Keluaran logistik MaxEnt dinyatakan sebagai kesesuaian habitat relatif dengan rentang 0–1 (Guillera-Arroita et al., 2014). Kompleksitas, regularisasi, dan konfigurasi pemodelan perlu dilaporkan karena memengaruhi kelayakan transfer dan overfitting (Merow et al., 2013; Radosavljevic & Anderson, 2014; Warren & Seifert, 2011).

Evaluasi Model dan Pembagian Zona Spasial

Evaluasi model memerlukan pelaporan AUC pelatihan dan pengujian, variasi antarpengulangan, jumlah dan strategi pemilihan titik latar, serta cara pengujian keterpisahan spasial data. TSS hanya dapat ditampilkan setelah ambang klasifikasi dan definisi data ketidakhadiran atau pseudo-absence dijelaskan. Kontribusi prediktor, permutation importance, hasil Jackknife, dan kurva respons diperlukan sebelum pengaruh setiap variabel ditafsirkan. Pengujian berbasis blok spasial dapat dipertimbangkan untuk mengurangi optimisme penilaian akibat ketergantungan spasial (Roberts et al., 2017). Interpretasi peta menjadi usulan Zona Inti I, Zona Inti II, dan Zona Penyangga memerlukan ambang indeks yang eksplisit, kriteria pengelolaan tambahan, status kawasan, dan verifikasi lapangan. Tanpa informasi tersebut, ketiga kategori hanya merupakan pengelompokan visual awal, bukan zonasi konservasi resmi. Perangkat blockCV menyediakan salah satu pendekatan pengujian spasial (Valavi et al., 2019), sedangkan pemilihan ambang klasifikasi perlu dijelaskan berdasarkan tujuan prediksi (Liu et al., 2016).

Hasil dan Pembahasan

Basis Data Spasial dan Verifikasi Lapangan

Pengembangan Basis Data Geospasial

Basis data yang dijelaskan dalam penelitian menggabungkan catatan kehadiran Maleo, kondisi tempat peneluran, tutupan vegetasi, sumber panas, jaringan sungai, topografi, dan penggunaan lahan. Sumber citra yang disebutkan adalah QuickBird 2024, Landsat 8 tahun 2025, serta DEMNAS. Namun, jumlah titik kehadiran awal dan akhir, periode perekaman, resolusi analisis, jumlah raster terpilih, serta wilayah latar MaxEnt tidak tersedia dalam naskah. Kebutuhan metadata yang harus dilaporkan berdasarkan keluaran asli dirangkum pada Tabel 1. Ketiadaan rincian tersebut membatasi pemeriksaan keterulangan model.

QuickBird menyediakan informasi visual beresolusi relatif rinci pada skala setempat, Landsat 8 mencakup bentang lahan yang lebih luas, dan DEMNAS mewakili variasi topografi. Kombinasi sumber tersebut berpotensi membantu kajian lingkungan di sekitar catatan kehadiran Maleo. Namun, penyatuan citra dari tahun, sensor, dan resolusi berbeda harus dijelaskan secara teknis sebelum keunggulannya terhadap ketelitian pemodelan dapat dinilai. Data tersebut belum menunjukkan perubahan penutup lahan yang terukur karena analisis klasifikasi dan uji ketelitiannya belum dilaporkan.

Verifikasi Lapangan terhadap Habitat Sarang Burung Maleo

Pemeriksaan lapangan dilaporkan pada dua lokasi, yakni Desa Maleo dan Desa Tulabolo di kawasan Hungayono. Di Desa Maleo, tempat peneluran diamati pada lahan relatif terbuka dengan substrat berpasir, serta terdapat kandang penetasan sebagai bentuk perlindungan telur. Di Tulabolo–Hungayono, tempat peneluran berasosiasi dengan vegetasi di sekitar sumber air panas dan area yang tidak tertutup semak rapat. Perbedaan tersebut menggambarkan variasi kondisi lokasi peneluran yang diamati. Kajian lain mengaitkan pemilihan lokasi sarang dengan karakteristik termal, substrat, dan vegetasi (Dhafir et al., 2022; Karim et al., 2023). Akan tetapi, suhu substrat, jumlah sarang, tanggal pengamatan, dan prosedur verifikasi belum dilaporkan secara numerik. Pengamatan pada dua lokasi ini tidak dapat dianggap sebagai validasi prediksi spasial pada seluruh Provinsi Gorontalo.

Sebaran Spasial Habitat Potensial Maleo

Interpretasi Awal Kesesuaian Habitat

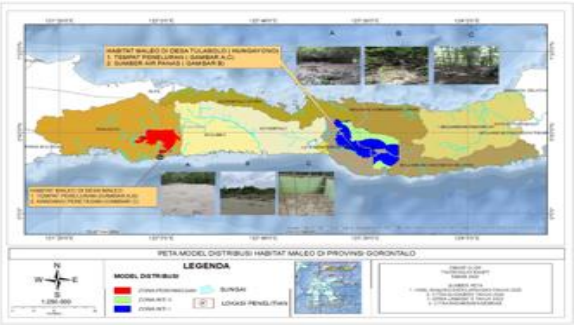
Peta yang tersedia menampilkan pola kesesuaian habitat Maleo dan pengelompokan interpretatif menjadi tiga kategori usulan pengelolaan: Zona Inti I, Zona Inti II, dan Zona Penyangga. Ketiga kategori tersebut bukan kelas yang secara otomatis dikeluarkan oleh MaxEnt. Hubungan antarkelas kesesuaian model dan kategori pengelolaan belum memiliki ambang numerik serta dasar penilaian kawasan yang dapat diperiksa. Oleh karena itu, distribusi pada peta hanya dapat dideskripsikan sebagai pola spasial awal.

Pada Gambar 1, wilayah yang diusulkan sebagai Zona Inti I terutama tampak di bagian timur dan tenggara kajian, termasuk sekitar Tulabolo–Hungayono. Letaknya berdekatan

dengan lokasi peneluran yang diamati serta sumber panas dan vegetasi setempat. Kedekatan tersebut merupakan pengamatan spasial dan tidak membuktikan bahwa faktor termal menentukan hasil model. Nilai kesesuaian rata-rata, ambang zona, jumlah titik kehadiran, dan luasan wilayah pada kategori ini belum tersedia. Interpretasi prioritas konservasi karenanya masih memerlukan pengujian.

Wilayah yang diberi label Zona Inti II terletak di sekitar area yang diusulkan sebagai Zona Inti I. Berdasarkan posisi spasialnya, area ini mungkin mendukung keterhubungan lanskap antara lokasi peneluran dan habitat berhutan. Akan tetapi, pola tersebut belum membuktikan pergerakan Maleo, keberadaan koridor, atau tingkat konektivitas fungsional. Pengujian lebih lanjut memerlukan data pergerakan atau analisis resistansi dan metrik konektivitas.

Zona Penyangga pada peta awal ditampilkan di bagian barat Provinsi Gorontalo, termasuk sekitar Desa Maleo. Keberadaan lokasi peneluran yang teramati di Desa Maleo menunjukkan bahwa kategori ini tidak boleh dimaknai sebagai habitat yang tidak penting. Penamaan zona penyangga merupakan usulan fungsi pengelolaan yang perlu mempertimbangkan nilai kesesuaian model, batas wilayah, keberadaan lokasi reproduksi, tekanan penggunaan lahan, dan status tata ruang. Tanpa ambang dan luas terukur, perbandingan kuantitatif dengan dua zona lainnya belum dapat dilakukan (Kumaji et al., 2024).



Gambar 1. Peta awal kesesuaian habitat Maleo dan pengelompokan sementara Zona Inti I, Zona Inti II, serta Zona Penyangga di Provinsi Gorontalo.

Implikasi Konservasi dari Interpretasi Spasial

Peta awal dapat digunakan untuk mengidentifikasi lokasi yang memerlukan pemeriksaan konservasi lebih lanjut, tetapi belum cukup untuk menetapkan batas zona resmi. Perhatian terhadap lokasi peneluran, vegetasi pendukung, penggunaan lahan, dan gangguan manusia sejalan dengan temuan penelitian Maleo sebelumnya (Tasirin et al., 2021; Summers et al., 2023). Penetapan tindakan pengelolaan tetap memerlukan validasi kesesuaian, kejelasan ambang zonasi, persetujuan pemangku kepentingan, serta pertimbangan peraturan kawasan yang berlaku.

Pembahasan

Secara visual, peta awal mengindikasikan variasi kesesuaian relatif habitat Maleo di Gorontalo. Pola di sekitar Tulabolo–Hungayono mungkin berkaitan dengan karakter lokasi peneluran yang diamati, termasuk vegetasi dan kedekatan dengan sumber panas. Namun, hubungan ini belum dapat diatribusikan kepada variabel tertentu sebelum kontribusi prediktor dan kurva respons MaxEnt disajikan. Pola tersebut juga tidak membuktikan efektivitas koridor atau fungsi habitat pada skala seluruh siklus hidup. Interpretasi ini perlu dibaca bersama keterbatasan data titik kehadiran dan evaluasi model.

Kondisi termal merupakan salah satu pertimbangan biologis pada lokasi peneluran Maleo karena telur diinkubasi melalui panas lingkungan, bukan panas tubuh induk. Pengamatan sumber air panas di Tulabolo–Hungayono memberikan konteks ekologis yang relevan, tetapi tidak menggantikan data suhu substrat atau pengujian statistik pengaruh prediktor termal. Penelitian mengenai karakter sarang juga menekankan aspek substrat, keterbukaan, dan vegetasi (Dhafir et al., 2022; Karim et al., 2023). Dengan demikian, hubungan suhu dan pola kesesuaian model dalam studi ini masih merupakan hipotesis ekologis yang memerlukan pengujian.

Kategori usulan Zona Inti II yang berada di sekitar wilayah kesesuaian relatif lebih tinggi mungkin relevan bagi keterhubungan lanskap. Maleo memerlukan habitat yang lebih luas daripada titik sarang untuk berbagai aktivitas hidupnya. Namun, letak suatu area yang mengelilingi kawasan inti tidak otomatis menunjukkan jalur pergerakan atau koridor ekologis. Pengujian hipotesis tersebut memerlukan peta resistansi, ukuran fragmentasi, analisis least-cost atau circuit theory, maupun data pergerakan individu. Pentingnya integritas lanskap bagi biota Wallacea dibahas oleh Struebig et al. (2022).

Desa Maleo menunjukkan konteks peneluran yang berbeda dari Tulabolo–

Hungayono: area lebih terbuka, substrat berpasir, dan adanya fasilitas penetasan. Penempatan kawasan ini sebagai usulan Zona Penyangga pada peta awal perlu ditinjau secara hati-hati karena sarang yang teramati tetap mempunyai nilai konservasi. Tanpa ambang kesesuaian, pengukuran tekanan penggunaan lahan, dan validasi lapangan yang lebih luas, rendahnya prioritas relatif tidak dapat disimpulkan sebagai fakta ekologis.

Peta awal menyediakan kerangka untuk merumuskan pertanyaan tentang perlindungan tempat peneluran dan lingkungan sekitarnya, tetapi belum mengukur dampak perubahan penggunaan lahan. Penelitian sebelumnya menunjukkan adanya perubahan area habitat Maleo secara spasial di Sulawesi (Kumaji et al., 2024). Hasil tersebut tidak dapat dipindahkan secara langsung sebagai besaran perubahan habitat di Gorontalo. Penilaian terhadap perubahan dan keterhubungan memerlukan peta tutupan lahan yang teruji pada tahun yang dibandingkan serta analisis fragmentasi yang sesuai.

Temuan dari penelitian terdahulu menunjukkan bahwa tekanan terhadap Maleo mencakup pengambilan telur dan gangguan manusia. Tasirin et al. (2021) melaporkan pemulihan populasi di lokasi peneluran yang melibatkan masyarakat dalam pencegahan pengambilan telur; Summers et al. (2023) mengkaji keterkaitan intensitas pengambilan telur dengan keberlanjutan lokasi peneluran. Konteks tersebut mendukung pentingnya mempertimbangkan ancaman langsung di samping kualitas habitat. Namun, peta kesesuaian dalam studi ini tidak mengukur intensitas pengambilan telur maupun keberhasilan konservasi setempat.

MaxEnt dapat memberikan indeks kesesuaian habitat relatif berdasarkan titik kehadiran dan lingkungan latar (Phillips et al., 2006; Guillera-Arroita et al., 2014). Naskah yang tersedia belum melaporkan jumlah rekaman bersih, area latar, AUC pelatihan dan pengujian, TSS, evaluasi antarpengulangan, kontribusi prediktor, hasil Jackknife, serta luas kelas peta. Oleh sebab itu, kinerja prediksi dan ketidakpastian model belum dapat dinilai. Tabel 4 memisahkan keluaran yang perlu diambil dari analisis asli dari deskripsi peta yang sudah dapat disampaikan. Temuan yang ada hanya cukup untuk diskusi eksploratif, bukan penetapan prioritas pengelolaan final.

Tabel 4. Keluaran evaluasi dan zonasi yang belum dilaporkan

Keluaran utama	Nilai yang diperlukan
AUC pelatihan dan pengujian	AUC latih 0,711; AUC uji 0,796; SD uji (DeLong) 0,055.
TSS dan ambang klasifikasi	Proksi berbasis latar = 0,649 (sensitivitas uji 1,000; spesifisitas latar 0,649), bukan TSS dari data absensi terverifikasi. Ambang uji maksimum sensitivitas + spesifisitas: cloglog 0,588; kumulatif 43,972; area terprediksi 35,1%; omisi uji 0.
Jackknife dan permutation importance	Jackknife: SUNGAI paling informatif, baik sendiri maupun saat dikeluarkan. Kontribusi/permutation importance (%): sungai 74,3/83,8; penggunaan lahan 12,7/10,4; jalan 12,2/3,2; LST 0,6/0; NDVI 0,2/0; tanah 0,1/2,7; panas bumi, lereng, pemukiman, tambang masing-masing 0/0.
Titik dan prediktor akhir	Laporan 6 Agustus 2025: 14 titik (10 latih; 4 uji), 10.010 titik latar dan kehadiran; 10 prediktor: jalan, lereng, lokasi panas bumi, LST, NDVI, pemukiman, penggunaan lahan (kategorikal), sungai, tambang, tanah (kategorikal).
Zona Inti I / Inti II / Penyangga	Ambang indeks dan luas/proporsi Zona Inti I, Inti II, dan Penyangga masing-masing berada di atas 0,588. Area terprediksi 35,1% pada ambang cloglog 0,588 bukan proporsi masing-masing zona.
Tutupan lahan 2024/2025	Penggunaan lahan dipakai sebagai prediktor kategorikal.

Integrasi sumber citra QuickBird, Landsat 8, DEMNAS, dan pengamatan lapangan berpotensi menyediakan informasi pada skala spasial berbeda. Namun, perbedaan tahun akuisisi, resolusi, sistem koordinat, metode resampling, dan ketelitian klasifikasi perlu dijelaskan sebelum kesesuaian antarvariabel dapat dievaluasi. Aspek mikrohabitat seperti suhu substrat, struktur vegetasi setempat, dan

gangguan manusia juga memerlukan pengamatan tersendiri. Penelitian lanjutan dapat menguji perubahan penutup lahan secara terukur dan mengembangkan skenario 2035 setelah rancangan dan data dasarnya tersedia.

Kesimpulan

Peta awal kesesuaian habitat Maleo (*Macrocephalon maleo*) di Provinsi Gorontalo menunjukkan pola spasial yang dapat diinterpretasikan sementara ke dalam usulan Zona Inti I, Zona Inti II, dan Zona Penyangga, dengan perbedaan konteks lokasi peneluran di Tulabolo–Hungayono dan Desa Maleo. Keluaran tersebut masih merupakan indeks kesesuaian relatif, bukan bukti probabilitas kehadiran absolut, perubahan penggunaan lahan terukur, atau konektivitas fungsional. Karena jumlah titik, setelan MaxEnt, AUC/TSS, kontribusi prediktor, ambang klasifikasi, dan luas zona belum tersedia dalam naskah, ketepatan serta batas ketidakpastian model belum dapat dinilai. Oleh karena itu, verifikasi keluaran model dan pemeriksaan lapangan tambahan diperlukan sebelum usulan kategori peta digunakan untuk menetapkan prioritas konservasi operasional.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Universitas Negeri Gorontalo atas dukungan yang diberikan.

Referensi

Aldiansyah, S., & 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

Aldiansyah, S., & Wahid, K. A. (2024). Species distribution modelling using bioclimatic variables on critically endangered endemic species (*Macrocephalon maleo*) in Sulawesi. *ASEAN Journal on Science and Technology for Development*, 41(3), 240–253. https://doi.org/10.61931/2224-9028.1588

Barve, N., Barve, V., Jiménez-Valverde, A., Lira-Noriega, A., Maher, S. P., Peterson, A. T., Soberón, J., & Villalobos, F. (2011). The crucial role of the accessible area in ecological niche modeling and species distribution modeling. *Ecological Modelling,* 222(11), 1810–1819. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.02.011

Boria, R. A., Olson, L. E., Goodman, S. M., & Anderson, R. P. (2014). Spatial filtering to reduce sampling bias can improve the performance of ecological niche models. Ecological Modelling, 275, 73–77. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.12.012

Dhafir, F., Bustamin, B., Isnainar, I., & Trianto, M. (2022). Tingkah laku bertelur burung Maleo (*Macrocephalon maleo* S. Muller) di Taman Nasional Lore Lindu (TNLL) Blok Saluki. *Media Eksakta*, 18(1), 74–80. https://doi.org/10.22487/me.v18i1.1712

Elith, J., Phillips, S. J., Hastie, T., Dudík, M., Chee, Y. E., & Yates, C. J. (2011). A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions*, 17(1), 43–57. https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x

Fourcade, Y., Engler, J. O., Rödder, D., & Secondi, J. (2014). Mapping species distributions with MAXENT using a geographically biased sample of presence data: A performance assessment of methods for correcting sampling bias. *PLOS ONE,* 9(5), e97122. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0097122

Guillera-Arroita, G., Lahoz-Monfort, J. J., & Elith, J. (2014). Maxent is not a presence–absence method: A comment on Thibaud et al. *Methods in Ecology and Evolution*, 5(11), 1192–1197. https://doi.org/10.1111/2041-210X.12252

Karim, H. (2022). Vegetation characteristics of the Maleo bird (*Macrocephalon maleo*) habitat at Natural Tourism Park of Towuti Lake, South Sulawesi. Jurnal Wasian, 9(1), 63–73. https://doi.org/10.20886/jwas.v9i1.6375

Karim, H. A., Najib, N. N., & Ayu, S. M. (2023). Characteristics of Maleo bird spawning nests (*Macrocephalon maleo*) in Lake Towuti, South Sulawesi, Indonesia. Biodiversitas, 24(2), 690–696. https://doi.org/10.13057/biodiv/d240203

Kumaji, S. S., Wantogia, M., Mohamad, N., Sm, F., Yusuf, D., Baderan, D. W. K., et al. (2024). Spatial study of Maleo bird habitat area change in Sulawesi. *Jurnal Biologi Tropis,* 24(2), 309–316. https://doi.org/10.29303/jbt.v24i2.6754

Liu, C., Newell, G., & White, M. (2016). On the selection of thresholds for predicting species occurrence with presence-only data. *Ecology and Evolution*, 6(1), 337–348. https://doi.org/10.1002/ece3.1878

Merow, C., Smith, M. J., & Silander, J. A., Jr. (2013). A practical guide to MaxEnt for modeling species' distributions: What it does, and why inputs and settings matter. *Ecography,* 36(10), 1058–1069. https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2013.07872.x

Muscarella, R., Galante, P. J., Soley-Guardia, M., Boria, R. A., Kass, J. M., Uriarte, M., & Anderson, R. P. (2014). ENMeval: An R package for conducting spatially independent evaluations and estimating optimal model complexity for Maxent ecological niche models. *Methods in Ecology and Evolution,* 5(11), 1198–1205. https://doi.org/10.1111/2041-210X.12261

Ngongo, Y., Njurumana, G. N., Sallata, M. K., Allo, M. K., Muin, N., Isnan, W., et al. (2025). Engaging sustainable reforestation and forest protection in the Wallacea line, Indonesia. *F1000Research,* 14. https://doi.org/10.12688/f1000research.159731.3

Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3–4), 231–259. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026

Phillips, S. J., Dudík, M., Elith, J., Graham, C. H., Lehmann, A., Leathwick, J., & Ferrier, S. (2009). Sample selection bias and presence-only distribution models: Implications for background and pseudo-absence data. *Ecological Applications*, 19(1), 181–197. https://doi.org/10.1890/07-2153.1

Radosavljevic, A., & Anderson, R. P. (2014). Making better Maxent models of species distributions: Complexity, overfitting and evaluation. *Journal of Biogeography*, 41(4), 629–643. https://doi.org/10.1111/jbi.12227

Roberts, D. R., Bahn, V., Ciuti, S., Boyce, M. S., Elith, J., Guillera-Arroita, G., et al. (2017). Cross-validation strategies for data with temporal, spatial, hierarchical, or phylogenetic structure. *Ecography,* 40(8), 913–929. https://doi.org/10.1111/ecog.02881

Struebig, M. J., Aninta, S. G., Beger, M., Bani, A., Barus, H., Brace, S., et al. (2022). Safeguarding imperiled biodiversity and evolutionary processes in the Wallacea center of endemism. *BioScience*, 72(11), 1118–1130. https://doi.org/10.1093/biosci/biac085

Summers, M., Geary, M., Djuni, N., Kresno, P. A., Laya, A., Sawuwu, S., et al. (2023). Degree of egg-taking by humans determines the fate of Maleo (*Macrocephalon maleo*) nesting grounds across Sulawesi. *Biodiversity and Conservation,* 32(3), 899–919. https://doi.org/10.1007/s10531-022-02527-1

Tasirin, J. S., Iskandar, D. T., Laya, A., Kresno, P., Suling, N., Oga, V. T., et al. (2021). Maleo *Macrocephalon maleo* population recovery at two Sulawesi nesting grounds after community engagement to prevent egg poaching. *Global Ecology and Conservation,* 28, e01699. https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01699

Valavi, R., Elith, J., Lahoz-Monfort, J. J., & Guillera-Arroita, G. (2019). blockCV: An R package for generating spatially or environmentally separated folds for k-fold cross-validation of species distribution models. *Methods in Ecology and Evolution,* 10(2), 225–232. https://doi.org/10.1111/2041-210X.13107

Warren, D. L., & Seifert, S. N. (2011). Ecological niche modeling in Maxent: The importance of model complexity and the performance of model selection criteria. Ecological Applications, 21(2), 335–342. https://doi.org/10.1890/10-1171.1

Yuni, L. P. E. K., & Yuda, I. P. (2020). The island biogeography of Wallacea and Krakatoa Island. *In Encyclopedia of the world's biomes* (Vol. 1). https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11789-0