

ARTÍCULO DE REVISIÓN

Análisis sobre el uso de UAVs para estudiar la biota antártica: aplicaciones, impactos y perspectivas a futuro. Una revisión PRISMA

Sol Vásquez-Grados , Cinthya Bello 

Carrera de Biología Marina, Facultad de Ciencias Veterinarias y Biológicas, Universidad Científica del Sur, Lima, Perú.

Resumen: Los Vehículos Aéreos No Tripulados (UAVs) se han consolidado como herramientas eficaces para estudiar áreas remotas con alta precisión y bajo impacto ambiental, especialmente en zonas como la Antártida. No obstante, persisten vacíos de información sobre sus efectos en la biota de este entorno. Por ello, el objetivo de este estudio fue realizar una revisión sistemática de la literatura sobre el uso de UAVs en investigaciones sobre la biota antártica, evaluando sus aplicaciones, impactos y perspectivas a futuro. Se aplicó el protocolo PRISMA (herramienta estandarizada para la presentación clara y completa de revisiones sistemáticas), seleccionando 42 artículos publicados entre 2014 y 2024 en inglés y español. Los resultados muestran un incremento en el uso de UAVs desde 2018, principalmente en estudios de biota marina (72,1%), destacando su utilidad en censos poblacionales, monitoreo de la salud y análisis de comportamiento. Predominó el uso de los drones multirrotor (como DJI Phantom 3 y 4) con sensores RGB o multispectrales. Sin embargo, solo el 37,2% de los estudios especificaron tanto la altura como el tiempo de vuelo, limitando su replicabilidad. Aunque los UAVs han mejorado la precisión de los datos y reducido el impacto sobre la fauna, se observan respuestas conductuales variables entre especies, lo que subraya la necesidad de establecer protocolos estandarizados. Se concluye que los UAVs son herramientas valiosas para la conservación y monitoreo ambiental en la Antártida, pero es crucial estandarizar su uso, mejorar la calidad de los sensores y expandir su aplicación a regiones y grupos biológicos menos estudiados.

Palabras clave: UAVs, Antártida, fauna, flora, monitoreo ambiental.

Use of UAVs for the study of Antarctic biota: applications, impacts, and future prospects. A PRISMA review

Abstract: Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) have established themselves as effective tools for studying remote areas with high precision and low environmental impact, especially in regions such as Antarctica. However, knowledge gaps persist regarding their effects on the biota from this area. Therefore, the objective of this study was to conduct a systematic review of the literature on the use of UAVs in research on Antarctic biota, evaluating their applications, impacts, and future prospects. The PRISMA protocol (a standardized tool for the clear and comprehensive presentation of systematic reviews) was applied, selecting 42 articles published between 2014 and 2024 in English and Spanish. The results show an increase in the use of UAVs since 2018, mainly in studies of marine biota (72.1%), highlighting their usefulness in population censuses, health monitoring, and behavioural analysis. The use of multirotor drones (such as the DJI Phantom 3 and 4) with RGB or multispectral sensors predominated. However, only 37.2% of the studies specify both height and flight time, limiting their replicability. Although UAVs have improved data accuracy and reduced impact on wildlife, variable

To cite this article: Vasquez-Grados, S., Bello, C. 2025. Use of UAVs for the study of Antarctic biota: applications, impacts, and future prospects. A PRISMA review. *Revista de Teledetección*, 66, e23171. <https://doi.org/10.4995/raet.2025.23171>

* Corresponding author: 100075917@cientifica.edu.pe

behavioural responses are observed across species, underscoring the need for standardized protocols. It is concluded that UAVs are valuable tools for conservation and environmental monitoring in Antarctica, but it is crucial to standardize their use, improve sensor quality, and expand their application to less-studied regions and biological groups.

Key words: UAV, Antarctica, fauna, flora, environmental monitoring.

1. Introducción

Diversos estudios han demostrado cambios significativos en las condiciones climáticas globales desde la era preindustrial. La Antártida se ha visto gravemente afectada en las últimas décadas a causa del cambio climático, provocando un aumento en la pérdida de glaciares, cambios en la biodiversidad, incrementos en la temperatura y en el nivel del mar, entre otros impactos (Isla y Gerdes, 2019; Auger *et al.*, 2021). Estos cambios se han presenciado principalmente en la Península Antártica, que registró un aumento paulatino de temperatura, seguido por un enfriamiento en las últimas dos décadas (Turner *et al.*, 2016; Bello *et al.*, 2022). Sin embargo, se espera que el calentamiento en la zona continúe durante los siguientes años (Bozkurt *et al.*, 2020). Esta transformación acelerada ha impulsado numerosas investigaciones orientadas tanto al monitoreo de estos cambios como al desarrollo de estrategias para mitigar sus efectos y conservar los ecosistemas únicos del continente (Harris *et al.*, 2019; Tovar-Sánchez *et al.*, 2021).

Aunque limitada, la biodiversidad antártica es vital para la regulación de procesos ecológicos globales, como el ciclo del carbono y la circulación oceánica (Hauk *et al.*, 2023). Sin embargo, se enfrenta a crecientes presiones derivadas del cambio climático, la introducción de especies y actividades humanas como el turismo (Chown *et al.*, 2022; Colesie *et al.*, 2023). Estos factores afectan significativamente la abundancia y distribución de la biota (Siebert *et al.*, 2023), siendo difícil estudiar los cambios ocasionados debido al esfuerzo logístico necesario para monitorear áreas extensas, remotas y de difícil acceso (Tovar-Sánchez *et al.*, 2021). Por ello, la teledetección representa una estrategia ventajosa, que ha tomado mayor importancia con el paso del tiempo.

En dicho contexto, los vehículos aéreos no tripulados (UAV, por sus siglas en inglés) o drones representan un método emergente para el monitoreo remoto de glaciares, capas de hielo, biodiversidad y perfiles costeros a nivel global (Rümmeler *et al.*, 2018). Su flexibilidad y bajo costo permiten cubrir grandes áreas y con topografía abrupta, complementando y mejorando las técnicas tradicionales como la teledetección satelital (Quiroz *et al.*, 2019). Esto se debe a su mayor control sobre la resolución temporal y espacial, lo que permite recolectar datos más frecuentes y con mayores tamaños muestrales (Laborie *et al.*, 2021). Igualmente, en 2018, se establecieron directrices para la certificación y operación de UAVs con el objetivo de reducir la perturbación a la biota antártica. Además, las directrices fueron actualizadas en 2021 (Harris *et al.*, 2019; Council of Managers of National Antarctic Programs [COMNAP], 2021), basadas en evidencia científica y experiencias de autoridades competentes (Mustafa *et al.*, 2018).

En la última década, el uso de UAVs en la Antártida ha aumentado significativamente. Sin embargo, la literatura se ha centrado principalmente en aspectos geofísicos (como el monitoreo de glaciares), dejando un vacío de información sobre el impacto y aplicaciones de los UAVs en la biota. Referente a ello, el artículo de revisión de Pina y Vieira (2022) destacan investigaciones con UAVs realizadas en la Antártida, pero su enfoque presenta un limitado abordaje de los posibles impactos a la biota. Por ello, el presente trabajo busca realizar una revisión sistemática PRISMA acerca del empleo de los UAVs para el estudio de la biota antártica, en los últimos 10 años, enfatizando (1) las aplicaciones presentes y futuras de los UAVs, (2) los impactos sobre la flora y fauna antártica y (3) las posibles limitaciones y perspectivas a futuro.

2. Metodología

Se realizó una búsqueda sistemática sobre los artículos científicos relacionados con el al empleo de los UAVs para el estudio de la biota antártica y sus impactos, considerando la metodología PRISMA, que es una herramienta estandarizada que guía la presentación clara y completa de revisiones sistemáticas y meta-análisis. Se tomó en consideración aquellos artículos entre 2014 y 2024 y, se emplearon buscadores como Google Scholar y bases de datos como Scopus. La búsqueda se hizo tanto en español como en inglés. Las palabras clave utilizadas en inglés para identificar los artículos fueron “Antarctica AND Polar AND UAV OR (UAS OR RPAS OR Unmanned/unoccupied aerial vehicles OR Remotely piloted aircraft systems OR Drones) AND Biodiversity OR (Fauna OR Flora AND Vegetation)”. Mientras que, las palabras clave empleadas en español fueron “Antártida Y UAV O (UAS O RPAS O Drones O Vehículos aéreos no tripulados/desocupados O Sistemas de aeronaves pilotadas a distancia) Y Biodiversidad O (Vida silvestre/fauna O Vegetación/flora)”. No se consideraron aquellos trabajos que eran artículos de revisión, artículos de congresos, libros, tesis o disertaciones o si no había datos disponibles para su recuperación.

Se obtuvieron un total de 42 artículos (Figura 1 y 2), empleándose para el análisis de datos el software GraphPad Prism (versión 6.04).

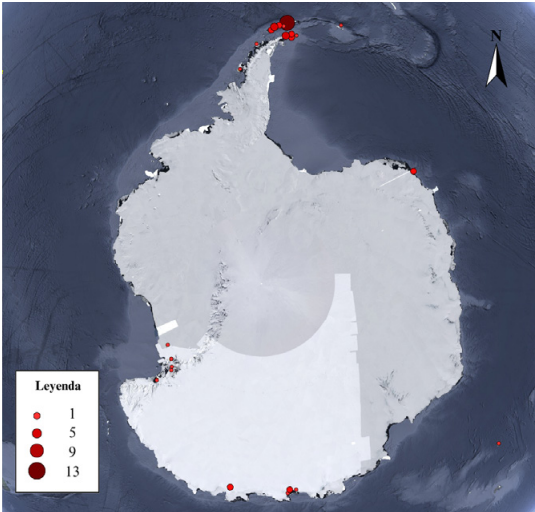


Figura 2. Distribución de localidades donde se realizaron los estudios analizados. Google Earth Pro 7.3.6.10201.

3. Resultados y discusión

3.1. Avances de la investigación de la biota antártica empleando los UAVs.

Los UAVs, inicialmente desarrollados para aplicaciones militares, han expandido su uso a diversas áreas como los censos de animales, el mapeo geoespacial, y monitoreo ambiental (Goebel *et al.*,

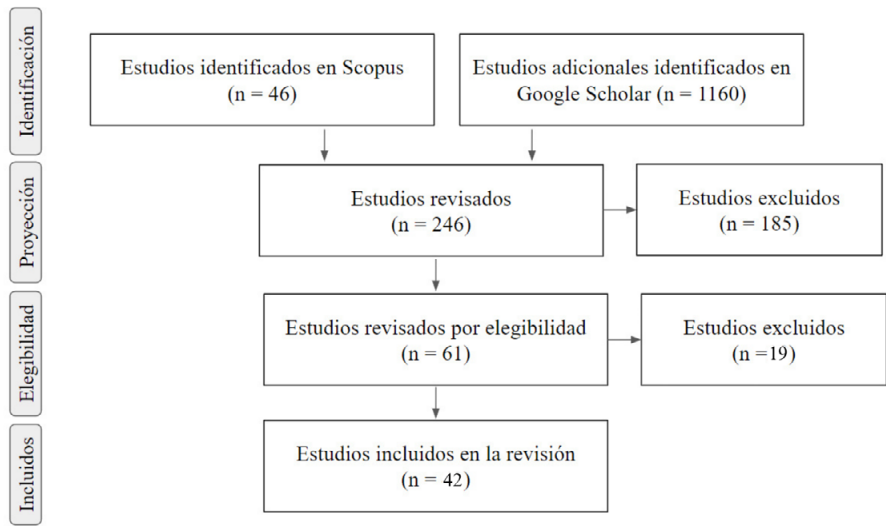


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de selección de artículos.

2015; Mustafa *et al.*, 2019). En el contexto de la investigación sobre la biota antártica, los UAVs han ganado considerable atención en los últimos años ya que, son una alternativa más precisa y menos invasiva que los métodos tradicionales (Miranda *et al.*, 2020). Se identificó que la mayoría de los artículos relacionados con las aplicaciones e impactos de los UAVs sobre esta biota se publicaron en el 2021 (9 artículos; Figura 3A, Tabla 1). Aunque, desde el 2018, la producción científica refleja el creciente interés por los UAVs como herramientas para la investigación ecológica y la conservación en ecosistemas frágiles y remotos como el antártico.

Así mismo, nuestro análisis determinó que los estudios se enfocaron principalmente sobre 1) la eficacia de los UAVs en comparación y/o complemento con metodologías tradicionales, 2) la necesidad de estandarizar protocolos de sobrevuelo, 3) la importancia en la optimización de la resolución espacial, 4) la versatilidad de los UAVs debido al acoplamiento de diferentes tipos de sensores o cámaras y 5) el grado de perturbación de los sobrevuelos sobre la biota (Ratcliffe *et al.*, 2015; Krause *et al.*, 2017; Krause *et al.*, 2021). Según Pina y Vieira (2022), desde el 2010, el uso de los UAVs con fines de investigación se generalizó en la Antártida. Esto posiblemente se debe a su flexibilidad de uso y acelerada evolución tecnológica, permitiendo la incorporación de sensores y/o cámaras especializadas para la evaluación de la biota. Además, se han logrado avances importantes en la operación de UAVs, como una mayor

autonomía y resistencia ante condiciones climáticas extremas. Paralelamente, el desarrollo de algoritmos de inteligencia artificial (IA) ha facilitado la automatización del análisis de imágenes, permitiendo identificar especies en tiempo real y generar modelos 3D del hábitat. Estos avances han convertido a los UAVs en herramientas importantes para ampliar la escala, precisión y alcance de la investigación ecológica, reduciendo los costos logísticos y abriendo nuevas posibilidades de investigación (Faisal *et al.*, 2024; Cusick *et al.*, 2024).

Sobre los países de procedencia del primer autor destacan Alemania y Polonia (8 artículos), seguidos por España y Estados Unidos (5 y 6 artículos, respectivamente) (Figura 3B). Esto sugiere un interés a nivel internacional en el desarrollo y aplicación de tecnologías avanzadas como los UAVs, para la investigación ambiental. Esto representa un potencial para la cooperación internacional, uno de los pilares fundamentales que promueve el Tratado Antártico. Aquello constituye un punto clave para superar los diversos desafíos (dificultad de acceso, costos operativos y logísticos) que involucra desarrollar investigaciones en la Antártida (Quiroz *et al.*, 2019). Por ello, el Comité Científico de Investigaciones Antárticas (SCAR, por sus siglas en inglés) ha promovido el uso coordinado de los UAVs (Walton *et al.*, 2018). Así mismo, el Comité de Protección Ambiental del Sistema del Tratado Antártico adoptó las Directrices para el uso de UAVs en Antártida (desarrolladas por el COMNAP) al reconocer sus numerosos

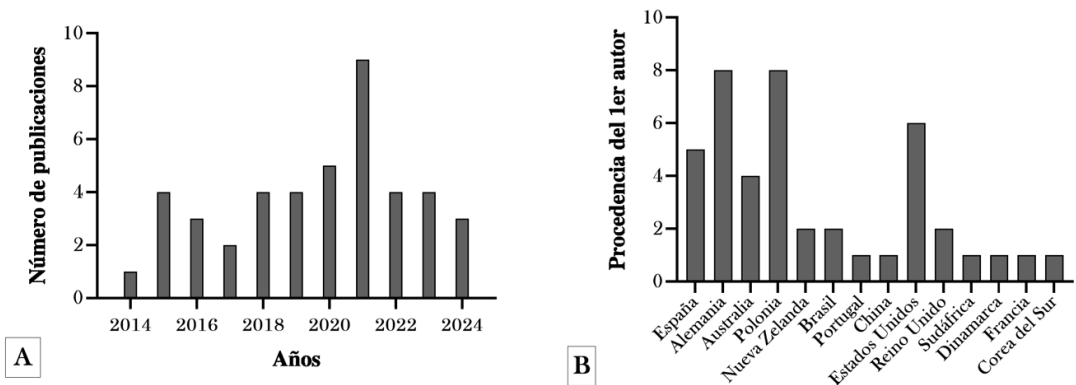


Figura 3. A) Número de publicaciones y B) procedencia del primer autor de las investigaciones sobre las aplicaciones e impactos de los UAV frente a la biota antártica.

Tabla 1. Investigaciones revisadas sobre el uso e impacto de los UAV's sobre la biota antártica.

Año	Autores	Título	País del 1er autor	Lugar	Tipo de información	Tipo de uav	Tipo de sensor del UAV	Altura de vuelo	Tiempo por vuelo	Biota	Enfoque del estudio
2022	Román <i>et al.</i>	High-spatial resolution UAV multispectral data complementing satellite imagery to characterize a chinstrap penguin colony ecosystem on deception island (Antarctica)	España	Islas Decepción	UAV e información satelital	Condor Hexacopter	Micasense RedEdge-MX con sensor RGB y NIR	100 m	No especifica	Marino	Cobertura de guano
2019	Pfeifer <i>et al.</i>	Using Fixed-Wing UAV for Detecting and Mapping the Distribution and Abundance of Penguins on the South Shetlands Islands, Antarctica	Alemania	Islas Rey Jorge y Nelson	UAV e información satelital	BORMA- TEC Ninox	MAPIR Survey-2 RGB y Pixhawk digital	70-100 m	No especifica	Marino	Cobertura y abundancia
2018	Zmarz <i>et al.</i>	Application of UAV BVLOS remote sensing data for multi-faceted analysis of Antarctic ecosystem	Polonia	Isla Rey Jorge	Solo UAV	PW-ZOOM	Cámara y sensor de velocidad de aire	No especifica	Tiempo total: 2 hrs y 14 min	Marino/ Terrestre	Abundancia y distribu- ción
2015	Bolland- Breen <i>et al.</i>	Application of an unmanned aerial vehicle in spatial mapping of terrestrial biology and human disturbance in the McMurdo Dry Valleys, East Antarctica	Nueva Zelanda	Valle Taylor	Solo UAV	Modified Swamp fox	Sony NEX 5 RGB y NIR	<120 m	No especifica	Marino	Cobertura
2020	Sotille <i>et al.</i>	Evaluation of UAV and satellite-derived NDVI to map maritime Antarctic vegetation	Brasil	Bahía Espe- ranza	UAV e información satelital	eBee Ag	Canon S110 NIR	No especifica	No especifica	Terrestre	Cobertura
2014	Turner <i>et al.</i>	Spatial co-registration of ultra-high resolution visible, multispectral and thermal images acquired with a micro-UAV over Antarctic moss beds	Australia	Robinson Ridge, Red Shed y la ASPA 135	Solo UAV	MikroKopter OktoKopter	Canon 550D Digital Single Lens Reflex y FLIR Photon 320 con sensor TIR	50 m	5 min	Terrestre	Cobertura y salud
2020	Miranda <i>et al.</i>	Monitoring recent changes of vegetation in Fildes Peninsula (King George Island, Antarctica) through satellite imagery guided by UAV surveys.	Portugal	Isla Rey Jorge	UAV e información satelital	DJI Phantom 3	Cámara con sensor RGB	60 m	17 min	Terrestre	Cobertura
2021	Chen <i>et al.</i>	Retreating shorelines as an emerging threat to Adélie Penguins on Inexpressible Island.	China	Isla Inexpres- sable	Solo UAV	Dajiang (DJI) Matrice 600	WILDRCS, Hasselblad H4D60, Hongpeng AP5100	350 m	No especifica	Marino	Abundancia y distribu- ción

(Continúa en la página siguiente)

(Continúa de la página anterior)

Año	Autores	Título	País del 1er autor	Lugar	Tipo de información	Tipo de uav	Tipo de sensor del UAV	Altura de vuelo	Tiempo por vuelo	Biota	Enfoque del estudio
2018	Borowicz <i>et al.</i>	Multi-modal survey of Adélie penguin mega-colonies reveals the Danger Islands as a seabird hotspot	Estados Unidos	Danger Islands	UAV e información satelital	DJI Phan- tom 3	Hongpeng AP5100	25-45 m	No especifica	Marino	Abundancia
2019	Korczak- Abshire <i>et al.</i>	Study of fauna population changes on Penguin Island and Turret Point Oasis (King George Island, Antarctica) using an unmanned aerial vehicle.	Polonia	Isla Rey Jorge	Solo UAV	PW-ZOOM	Canon EOS 700D	550 m	Tiempo total: 2 hrs y 14 min	Marino	Abundancia
2020	Bird <i>et al.</i>	A semi-automated method for estima- ting Adélie penguin colony abundance from a fusion of multispectral and thermal imagery collected with unoc- cupied aircraft systems	Estados Unidos	Isla Avian e Islas Torge- sen	Solo UAV	sensefly eBee	Canon S110, sen- sefly Thermomap, Parrot Sequoia, barómetros y anemómetros	85 m	15-22 min	Marino	Abundancia y densidad
2021	Dunn <i>et al.</i>	Un-crewed aerial vehicle population survey of three sympatrically breeding seabird species at Signy Island, South Orkney Islands	Reino Unido	Islas South Orkney	UAV y datos de campo	DJI Inspire 2 quadcopter, DJI Phan- tom 4	Canon EOS 60D Digital SLR	35 - 50 m	20 min	Marino	Abundancia
2019	Mustafa <i>et al.</i>	Detecting Antarctic seals and flying seabirds by UAV.	Alemania	Isla Rey Jorge	Solo UAV	MikroKopter MK, DJI Phan- tom 4 pro, Bormatec Ninox	Canon EOS 60D Digital SLR, , MAPIR Survey- 2RGB	30-150 m	No especifica	Marino	Morfometría
2020	Fudala y Bialik	Breeding Colony Dynamics of Southern Elephant Seals at Patelnia Point, King George Island, Antarctica	Polonia	Isla Rey Jorge	UAV y datos de campo	DJI Inspire 2 quadcopter, DJI Phan- tom 4	Zenmuse X5S, HP2X Hyperfire 2 camera	50-65 M	Tiempo total 75 min	Marino	Abundancia y morfome- tría
2020	Oosthuizen <i>et al.</i>	Unmanned aerial vehicle (UAV) sur- vey of the Antarctic shag (Leucocarbo bransfieldensis) breeding colony at Harmony Point, Nelson Island, South Shetland Islands.	Sudáfrica	Isla Nelson	Solo UAV	DJI Phan- tom 4 Ad- vanced	Cámara del DJI Phantom 4pro	90 m	No especifica	Marino	Abundancia y distribu- ción
2021	Pfeifer <i>et al.</i>	Assessing colonies of Antarctic shags by unmanned aerial vehicle (UAV) at South Shetland Islands, Antarctica.	Alemania	Isla Nelson y Rey Jorge	Solo UAV	BORMA- TEC Ninox	MAPIR Sur- vey-2 RGB, Pixhawk digital y sensor de veloci- dad del viento	30-100 m	No especifica	Marino	Abundancia

(Continúa en la página siguiente)

(Continúa de la página anterior)

Año	Autores	Título	País del 1er autor	Lugar	Tipo de información	Tipo de uav	Tipo de sensor del UAV	Altura de vuelo	Tiempo por vuelo	Biota	Enfoque del estudio
2022	Fudala y Bialik	The use of drone-based aerial photogrammetry in population monitoring of Southern Giant Petrels in ASMA 1, King George Island, maritime Antarctica	Polonia	Isla Rey Jorge	Solo UAV	DJI Inspire 2 quadcopter, DJI Phantom 4	Zenmuse X5S	200 m	No específica	Marino	Abundancia
2015	Goebel et al.	A small unmanned aerial system for estimating abundance and size of Antarctic predators	Estados Unidos	Isla Livings-ton	Solo UAV	d4-1000, APQ-18, APH-22	Zenmuse X5S	15-60 m	6-8 min	Marino	Cobertura, abundancia y densidad
2017	Krause et al.	An accurate and adaptable photogram-metric approach for estimating the mass and body condition of pinnipeds using an unmanned aerial system.	Estados Unidos	Isla Livings-ton	UAV y datos de campo	APH-22	Olympus E-PM2	23-45 m	No específica	Marino	Morfometría
2021	Durban et al.	Size and body condition of sympatric killer whale ecotypes around the Antarctic Peninsula	Estados Unidos	Isla Livings-ton	Solo UAV	APH-22	Olympus E-PM2	22-48 m	No específica	Marino	Morfometría
2021	Rümmler et al.	Effects of UAV overflight height, UAV type, and season on the behaviour of emperor penguin adults and chicks.	Alemania	Bahía Atka	UAV y datos de campo	DJI Phantom 4, MA-PIR Magpy	Cámara con sensor BSI MOS	45-70 m	No específica	Marino	Comportamiento
2021	Rümmler et al.	Emperor penguin reactions to UAVs: First observations and comparisons with effects of human approach.	Alemania	Bahía Atka	UAV y datos de campo	DJI Phantom 4	Cámara con sensor BSI MOS	<100 m	3 min	Marino	Comportamiento
2021	Krause et al.	Drones Minimize Antarctic Predator Responses Relative to Ground Survey Methods: An Appeal for Context in Policy Advice	Estados Unidos	Isla Livings-ton	UAV y datos de campo	APH-22	Olympus E-PM2	30 m	No específica	Marino	Comportamiento
2021	Labourie et al.	Behavioural impact assessment of unmanned aerial vehicles on Weddell seals (<i>Leptonychotes weddellii</i>).	Dinamarca	Isla de los petreles	Solo UAV	DJI Mavic 2 ZOOM	No específica sensor	15-25 m	6 min	Marino	Comportamiento
2018	Weimerskirch et al.	Flights of drones over sub-Antarctic seabirds show species- and status-specific behavioural and physiological responses	Francia	Islas Crozet	Solo UAV	DJI Phantom 3	Go Pro 4	25 m	No específica	Marino	Abundancia y comportamiento
2018	Rümmler et al.	Sensitivity of Adélie and Gentoo penguins to various flight activities of a micro UAV	Alemania	Isla Rey Jorge	Solo UAV	MK ARF Okto XL	No presentó	10-50 m	No específica	Marino	Abundancia y comportamiento

(Continúa en la página siguiente)

(Continúa de la página anterior)

Año	Autores	Título	País del 1er autor	Lugar	Tipo de información	Tipo de uav	Tipo de sensor del UAV	Altura de vuelo	Tiempo por vuelo	Biota	Enfoque del estudio
2016	Rümmler <i>et al.</i>	Measuring the influence of unmanned aerial vehicles on Adélie penguins	Alemania	Isla Ardley	Solo UAV	MK ARF Okto XL	No presentó	10-50 m	4-6 min	Marino	Abundancia y comporta- miento
2016	Korczak- Abshire <i>et al.</i>	Preliminary study on nesting Adélie penguins disturbance by unmanned aerial vehicles.	Polonia	Isla Rey Jorge	Solo UAV	CryoWing MK1, Skywalker X-8	Canon 700D came- ra SLR, Samsung VP-DX 200, Nikon D5100	300- 400 m	18-20 min	Marino	Abundancia y comporta- miento
2019	Firla <i>et al.</i>	Intraseasonal variability of guano stains in a remotely sensed penguin colony using UAV and satellite	Alemania	Isla Ardley	UAV e información satelital	DJI Phan- tom 4	Samsung MX500, MAPIR Survey 2 RGB, Cámara del Phantom 4 pro	No espe- cifica	No especifica	Marino	Cobertura de guano
2021	Tovar- Sánchez <i>et al.</i>	Applications of unmanned aerial vehicles in Antarctic environmental research	España	Islas Decep- ción	Solo UAV	Condor Hexacopter, DJI Multis- pectral P4, DJI Mavic 2 zoom	MicaSense RedEdge-MX, una cámara RGB, Op- tical Zoom Cámara (Mavic 2 zoom, DJI)	50-120 m	<30 min	Marino/ Terrestre	Identifica- ción y caracte- rización
2024	Cusick <i>et al.</i>	Using machine learning to count Antarctic shag (<i>Leucocarbo bransfield- ensis</i>) nests on images captured by Remotely Piloted Aircraft Systems	Polonia	Isla Rey Jorge	UAV y datos de campo	DJI Phan- tom 4 Pro v2.0, DJI Inspire 2, Bormatec Ninox	No especifica sensor	No espe- cifica	No especifica	Marino	Abundancia e identifica- ción
2024	Belyaev <i>et al.</i>	Assessing topographic features and population abundance in an Antarctic penguin colony through UAV-based deep-learning models	España	Islas Decep- ción	Solo UAV	DJI M2EA, M300	MicaSense RedEdge-MX con DLS, Cámara con sensor RGB	30 m	15-20 min	Marino	Abundancia de pingüinos y cobertura de guano
2023	Kim <i>et al.</i>	Antarctic Ecosystem Recovery Following Human-Induced Habitat Change: Recolonization of Adélie Penguins (<i>Pygoscelis adeliae</i>) at Cape Hallett, Ross Sea	Corea del sur	Victoria Land	UAV y datos de campo	DJI M600	Canon Eos 5DS con DSLR	95 m	No especifica	Marino	Abundancia
2022	Hinke <i>et al.</i>	Evaluating Thermal and Color Sensors for Automating Detection of Penguins and Pinnipeds in Images Collected with an Unoccupied Aerial System	Estados Unidos	Isla Livings- ton	Solo UAV	APH- 28 hexacop- ter	FLIR Duo Pro R con sensor RGB e IR	30-90 m	No especifica	Marino	Abundancia

(Continúa en la página siguiente)

(Continúa de la página anterior)

Año	Autores	Título	País del 1er autor	Lugar	Tipo de información	Tipo de uav	Tipo de sensor del UAV	Altura de vuelo	Tiempo por vuelo	Biota	Enfoque del estudio
2023	Zmarz <i>et al.</i>	BVLOS UAV missions for vegetation mapping in maritime Antarctic	Polonia	Isla Rey Jorge	Solo UAV	PW-ZOOM	Canon EOS 700D con sensor RGB y Canon EOS REBEL T5i RGB-NIR	350 m	Tiempo total: 2.5 hrs	Terrestre	Identificación y cobertura
2022	Bollard <i>et al.</i>	Drone Technology for Monitoring Protected Areas in Remote and Fragile Environments	Nueva Zelandia	ASPA 131, 154 y 155	Solo UAV	Polarfox fixed, Bhremer Octocopter	MicaSense RedEdge con sensor multiespectral y Sony SLR 5100 con sensor RGB	50-120 m	50 min	Terrestre	Densidad
2024	Raniga <i>et al.</i>	Monitoring of Antarctica's Fragile Vegetation Using Drone-Based Remote Sensing, Multispectral Imagery and AI	Australia	ASPA 135	Solo UAV	BMR3.9RTK	MicaSense Altum con sensor multiespectral y Sony SLR 5100 con sensor RGB	70 m	No específica	Terrestre	Cobertura
2022	Sotille <i>et al.</i>	UAV-based classification of maritime Antarctic vegetation types using GEOBIA and random forest	Brasil	Bahía Esperanza	Solo UAV	eBee Ag	Canon S110 RGB-NIR	<200 m	30 min	Marino/ Terrestre	Identificación y cobertura
2023	Fudala y Bialik	Identifying Important Bird and Biodiversity Areas in Antarctica Using RPAS Surveys—A Case Study of Cape Melville, King George Island, Antarctica	Polonia	Isla Rey Jorge	Solo UAV	DJI Phantom 4, DJI Inspire 2	Mpix camera, Zenmuse X5S	45-200 m	4-17 min	Marino	Abundancia
2017	Malenovsky <i>et al.</i>	Unmanned aircraft system advances health mapping of fragile polar vegetation	Australia	Islas Windmill	UAV e información satelital	micro-Hyperspec	Sony DSC-HX9V	No específica	No específica	Terrestre	Densidad de clorofila
2016	Calviño-Cancela & Martín-Herrero	Spectral Discrimination of Vegetation Classes in Ice-Free Areas of Antarctica	España	Islas Windmill	Solo UAV	No específica	Cámara con sensor RGB	No específica	No específica	Marino/ Terrestre	Reflectancia
2023	Román <i>et al.</i>	Characterization of an antarctic penguin colony ecosystem using high-resolution UAV hyperspectral imagery	España	Isla Livingston	Solo UAV	DJI Matrice 600 Pro, DJI Matrice 300 RTK	MicaSense RedEdge-MX con DLS, Cámara con sensor VNIR-SWIR	No específica	No específica	Marino/ Terrestre	Caracterización

beneficios (COMNAP, 2023). Por aquel motivo, diversos programas antárticos han elaborado procedimientos internos para la emisión de permisos y garantizar el uso apropiado de los UAVs, como el Programa Antártico Australiano (Australian Government, 2022).

La aplicación de UAVs ha facilitado la recopilación de datos sin la necesidad de intervención directa en estos hábitats o sobre la biota (Bird *et al.*, 2020). La mayoría de los estudios se concentraron en las Islas Shetland del Sur, como es el caso de la Isla Rey Jorge (24,1%), debido a su relativa accesibilidad y la presencia de estaciones científicas internacionales. Otras localidades relevantes fueron la Isla Livingston y el Valle Taylor, donde se realizó un 11,1% de los estudios (Figura 4). Esta concentración podría explicarse por la importancia de estas zonas como centros de biodiversidad o áreas clave para comprender los efectos del cambio ambiental, dadas sus características ecológicas intrínsecas. No obstante, esta focalización se debe principalmente a la disponibilidad de infraestructura científica y a condiciones logísticas y climáticas más favorables, lo que limita nuestra comprensión integral de la dinámica de la biota antártica en el resto del continente.

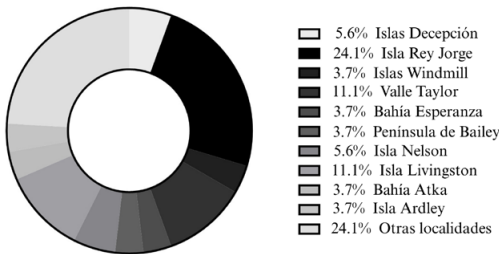


Figura 4. Frecuencia de localidades donde se han realizado los estudios de las aplicaciones e impactos de los UAV frente a la biota antártica. Otras Localidades = Localidades mencionadas una sola vez (ver Tabla 1).

3.2. Aplicaciones de los UAVs y su impacto en la biota antártica

El uso combinado de UAVs con técnicas de campo y satelitales permite validar los resultados, aumentando la fiabilidad de los hallazgos y ofreciendo una herramienta para monitorear los efectos del cambio climático y otras amenazas en entornos

sensibles. La mayoría de los estudios sobre la biota antártica (65,1%) emplearon UAVs para establecer líneas de base de información. Un 18,6% combinaron el uso de UAVs y datos recabados en campo, mientras que un 16,3% usaron UAVs e imágenes satelitales (Figura 5). Sobre ello, aunque las imágenes satelitales (como las de libre acceso) son una opción económica, presentan limitaciones para estimar la abundancia de organismos o realizar mediciones morfométricas precisas (Fudala y Bialik, 2020; Dunn *et al.*, 2021). Estas limitaciones están asociadas con su resolución espacial y temporal en comparación con los UAVs. Además, el uso de imágenes ópticas se ve condicionado por la cobertura nubosa y las condiciones atmosféricas, dificultando su aplicación bajo climas extremos (Firla *et al.*, 2019). En contraste, los UAVs permiten recolectar datos de alta resolución, tanto temporal como espacial, y acceder a zonas de difícil acceso. A pesar de ello, su uso en la Antártida enfrenta desafíos como las condiciones meteorológicas y la limitada duración de las baterías. No obstante, los UAVs reducen la perturbación a la fauna eliminando la necesidad de sedación, y minimizan los sesgos entre mediciones realizadas por diferentes investigadores (Krause *et al.*, 2021; Fudala y Bialik, 2022). En los últimos años, los modelos de estimación y clasificación han mejorado gracias a la incorporación de IA (Sotille *et al.*, 2020; Cusick *et al.*, 2024). Por ejemplo, Raniga *et al.* (2024) aplicaron IA para estudiar la fenología y distribución de la vegetación, demostrando su utilidad como herramienta complementaria a los UAVs.

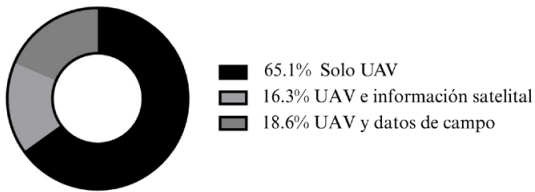


Figura 5. Tipo de información empleado en los estudios de las aplicaciones e impactos de los UAV frente a la biota antártica.

En la actualidad, existen cuatro tipos fundamentales de UAVs: drones de ala fija, los multirrotor, de rotor simple e híbridos. Los de ala fija son adecuados para cubrir grandes áreas de forma rápida, aunque requieren mayor logística debido

a su mayor tiempo de vuelo (Pfeifer *et al.*, 2019; Rümmler *et al.*, 2021a). Por otro lado, los drones multirrotor son más fáciles de operar y transportar, ideales para estudios en áreas reducidas (Rümmler *et al.*, 2021a). Los modelos de UAV comúnmente utilizados en los artículos analizados fueron el DJI Phantom 3 y 4 (26,7%), el PH-22/28 y el DJI Matrice 300/600 (11,1% respectivamente) (Figura 6), todos ellos de tipo multirrotor. Sin embargo, se debe evaluar con mayor detalle cómo las características de los drones (color, nivel de ruido, tamaño y forma) pueden impactar el comportamiento de la fauna antártica. En particular, el ruido generado durante los sobrevuelos y su frecuencia puede tener efectos acumulativos, afectando comportamientos críticos como la anidación o alimentación (Rümmler *et al.*, 2016; Tabla 2). Por ejemplo, el UAV APH-22 genera niveles de ruido que no parecen afectar a las colonias de pingüinos Barbijo (*Pygoscelis antarcticus*) (31,3-57,8 dB), ya que la misma colonia emite niveles de ruido superiores durante la puesta de huevos (59,6-84,2 dB) (Goebel *et al.*, 2015). No obstante, otros estudios, como el de Labourie *et al.* (2021), señalan que ciertos modelos de UAV pueden provocar respuestas de vigilancia o alerta en la fauna.

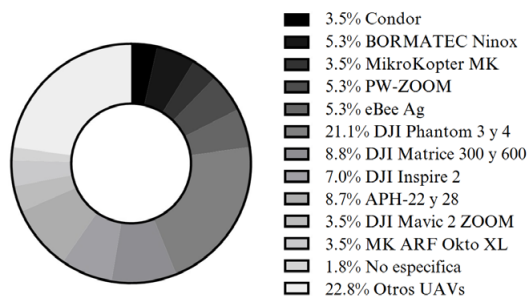


Figura 6. Modelos de UAVs empleados en los estudios de las aplicaciones e impactos de los UAV frente a la biota antártica. Otros UAVs = UAVs mencionados una sola vez (ver Tabla 1).

Sobre los parámetros de vuelos empleados, la mayoría de artículos especificaron el tiempo de duración de vuelo, pero no brindaron información sobre la altura de vuelo (Figura 7). Esto genera limitaciones si se desea evaluar el impacto potencial de los UAVs sobre la fauna y el ambiente circundante (Rümmler *et al.*, 2016; Weimerskirch *et al.*, 2018). La altura y trayectoria de vuelo son determinantes, ya que vuelos a baja altitud o

efectuados sobre las colonias de aves o mamíferos pueden inducir respuestas de vigilancia o estrés. Por el contrario, las trayectorias laterales a mayor altitud tienden a ser menos invasivas (Hodgson y Koh, 2016). Rümmler *et al.* (2021b) mencionan que altitudes de vuelo más bajas pueden causar una mayor alteración en el comportamiento de los pingüinos ya que pueden confundir a los drones con aves. Sin embargo, las diferentes variaciones de respuesta de la biota deben estudiarse con mayor profundidad (Ratcliffe *et al.*, 2015; Fudala y Bialik, 2023). Weimerskirch *et al.* (2018), por ejemplo, observaron cambios de comportamiento en aves durante vuelos a sólo 10 m de altura, con diferencias según la especie y su etapa de desarrollo. Así mismo, Labourie *et al.* (2021) identificaron que el 27% de las 37 focas de Weddell evaluadas (3 machos adultos, 12 hembras adultas y 22 parejas madre-cría) modificaron su actividad inicial, aumentando sus respuestas de vigilancia durante los vuelos aplicados a alturas por debajo de los 25 m. Además, el 3% de las hembras interrumpieron su periodo de lactancia.

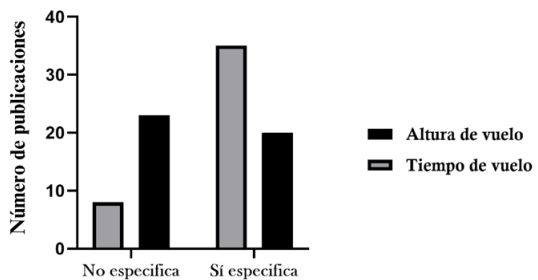


Figura 7. Frecuencia de publicaciones donde especifican la altura y tiempo de vuelo de los UAVs para el estudio de la biota antártica.

La falta de estandarización en los parámetros de vuelo dificulta la replicabilidad y confiabilidad de futuros estudios. Por ello, es fundamental desarrollar protocolos específicos, adaptados a las condiciones ecológicas y geográficas, que garanticen un uso responsable de los UAVs, especialmente en ambientes como la Antártida. Estos protocolos deben considerar la sensibilidad variable de las especies al ruido, a la presencia visual de los drones y a la perturbación antropogénica en general (Hodgson y Koh, 2016; Krause *et al.*, 2021). El tipo de sensor empleado en los UAVs es también un factor crucial para la obtención de

datos precisos y de alta calidad. Entre los sensores más comunes se encuentran cámaras RGB, multispectrales, térmicas e hiperspectrales, cada una con aplicaciones específicas. Las cámaras RGB son útiles para el monitoreo visual de grandes grupos de organismos, como colonias de aves o parches de vegetación (Turner *et al.*, 2014). Las cámaras multispectrales facilitan el análisis de salud vegetal (*e.g.* líquenes y briófitas; Bollard *et al.*, 2022), mientras que los sensores térmicos permiten estudiar el comportamiento animal detectando temperaturas corporales. Aquello es particularmente útil en entornos fríos donde el contraste térmico es notable (Bird *et al.*, 2020; Román *et al.*, 2022). Por ello, la elección del tipo de cámara depende de los objetivos de cada estudio y de las limitaciones ambientales de la Antártida (Calviño-Cancela y Martín-Herrero, 2016). Aunque existen alternativas como el uso de cámaras trampa, los UAVs ofrecen una ventaja en términos de cobertura espacial, rapidez de implementación y flexibilidad para adaptarse a diferentes entornos. Sin embargo, requieren

operadores capacitados y condiciones mínimas de vuelo, lo que puede limitar su uso continuo o autónomo (Baldwin *et al.*, 2023). Esta consideración es clave para optimizar la eficiencia de los UAVs en la recolección de datos y la reducción de incertidumbre.

En el futuro, se espera una integración más estrecha entre los sensores, los UAVs y la IA, lo que permitirá automatizar la detección y clasificación de especies, así como generar modelos predictivos. Este es el caso del modelo de *deep learning* YOLOv4, que busca mejorar la detección de objetos u organismos con apoyo de la IA (Zhou *et al.*, 2022; Dadrass *et al.*, 2022). La combinación de datos tomados con UAVs con plataformas satelitales, datos procedentes de información de campo y modelos computacionales permitirán el análisis multiescala cada vez más precisos y relevantes para la conservación de la biota antártica.

Los hallazgos de este trabajo muestran que, en la última década, la aplicación de los UAVs en la Antártida se ha enfocado principalmente en el

Tabla 2. Principales tipos de impactos identificados.

Tipo de Impacto	Descripción	Especies Afectadas o Contexto
Respuesta de vigilancia, y mayor alerta	Comportamiento de atención dirigida o postura erguida como reacción inmediata al UAV.	Pingüinos y otras aves marinas, focas de Weddell
Interrupción de lactancia	Suspensión momentánea del amamantamiento por parte de hembras al percibir UAVs volando cerca.	Focas (madres con crías)
Alteración en el comportamiento social	Cambios en la distancia entre individuos o agrupaciones más densas/desorganizadas como respuesta al sobrevuelo.	Pingüinos, focas
Impacto indirecto sobre el éxito reproductivo	La perturbación frecuente puede reducir el tiempo dedicado al cuidado parental o incubación, afectando el desarrollo de crías.	Pingüinos y otras aves marinas
Cambios en el patrón espacial de ocupación	Algunas especies pueden evitar temporalmente sectores donde se realizan vuelos frecuentes, alterando su distribución natural.	Pingüinos y otras aves marinas
Reducción en la tolerancia a disturbios naturales	Una exposición continua a UAVs puede aumentar la sensibilidad a otros factores perturbadores, como presencia humana o depredadores.	Pingüinos y otras aves marinas, focas
Competencia intraespecífica por refugios	Cambios de comportamiento inducidos por UAVs pueden hacer que individuos compitan por zonas “más seguras”, intensificando conflictos intraespecíficos.	Focas, pingüinos
Sesgo en los registros de comportamiento natural	La presencia del UAV puede modificar el comportamiento observado, generando datos no representativos del comportamiento normal.	Todas las especies animales estudiadas
Desplazamiento temporal de especies móviles	Algunas especies como aves pueden interrumpir vuelos o desplazamientos ante UAVs, postergando actividades alimenticias o migratorias.	Aves marinas en general como gaviotas, skúas, petreles
Pisoteo indirecto de plantas después de la operación de los UAVs	El despliegue, despegue o recuperación de UAVs puede implicar pisoteo accidental por parte del operador, alterando físicamente el sustrato y la vegetación.	Líquenes, briófitas, musgo

estudio de la biota marina (72,1%). Esto ha permitido una mejor comprensión de la ecología y el estado de salud de especies emblemáticas como pingüinos, cormoranes, petreles y mamíferos marinos (Figura 8A). Se han identificado cambios en la distribución espacial, patrones reproductivos y comportamiento migratorio, así como variaciones en los indicadores fisiológicos y conductuales asociados al estrés ambiental. Sin embargo, solo se encontró un estudio sobre la estimación de abundancia de cianobacterias (Bollard-Breen *et al.*, 2014), lo que evidencia una brecha en el uso de esta tecnología para el estudio de la microbiota antártica. El análisis efectuado revela que la mayoría de investigaciones se han centrado en detectar variaciones en abundancia, comportamiento y salud de la biota (Figura 8B), generando datos clave para comprender los efectos del cambio climático y la actividad humana en estos ecosistemas únicos.

En el caso de los pingüinos, destacan los estudios sobre la estimación de abundancia y comportamiento de colonias. El uso de ortofotos ha permitido censos más precisos, al reducir el doble conteo y proporcionar datos espaciales adicionales como la distribución de nidos y características del hábitat (Borowicz *et al.*, 2018; Korczak-Abshire *et al.*, 2019). También, se han investigado aspectos relacionados con el cambio climático, como la distribución de especies (Chen *et al.*, 2021), procesos de recolonización (Kim *et al.*, 2023) y la respuesta al ruido y a diferentes alturas de vuelo (Korczak-Abshire *et al.*, 2016; Rümmler

et al., 2018). En cuanto a otras aves marinas, los estudios han abordado principalmente la abundancia, distribución y comportamiento de especies como los petreles (*Macronectes giganteus*) y cormoranes (*Phalacrocorax atriceps*, *Leucocarbo bransfieldensis*) (Pfeifer *et al.*, 2021; Oosthuizen *et al.*, 2020). En menor medida, se ha registrado información sobre skuas (*Catharacta* sp.), paloma antártica (*Chionis albus*) y gaviotas dominicanas (*Larus dominicanus*) (Mustafa *et al.*, 2019). Las aves marinas son reconocidas como importantes bioindicadores de cambios en el ecosistema antártico. Sin embargo, la alta representación de ciertas especies de aves encontradas en este estudio (pingüinos), puede deberse a su estrecha relación con el calentamiento atmosférico y consecuente cambio en las condiciones del hielo marino que afectan de forma diferencial su ciclo de vida. Este sesgo puede limitar la comprensión integral del ecosistema antártico, ya que muchas de estas especies poco estudiadas, como los skuas, desempeñan roles ecológicos clave como depredadores oportunistas. Otras especies, como la paloma antártica, actúan como carroñeras o indicadores de condiciones ambientales locales (Costa y dos Santos, 2007; Mustafa *et al.*, 2019). Por lo tanto, ampliar el enfoque hacia especies menos representadas permitiría no solo enriquecer el conocimiento ecológico, sino también mejorar la capacidad de respuesta ante cambios ecosistémicos sutiles pero significativos.

Los mamíferos marinos como ballenas, focas y elefantes marinos; han sido estudiados en

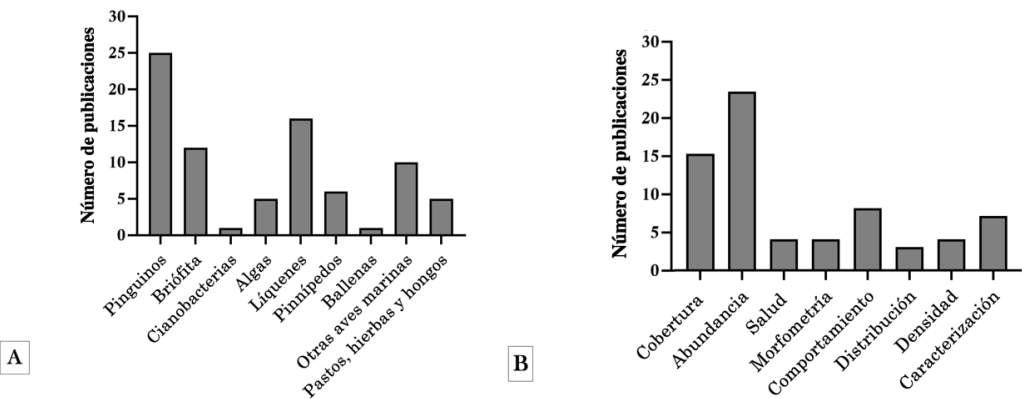


Figura 8. A) Frecuencia de grupos de organismos más comúnmente estudiados y B) Enfoque de estudio de las publicaciones analizadas.

menor proporción, debido a las dificultades logísticas de su evaluación. Las investigaciones se han vinculado al desarrollo de conteos y la toma de medidas morfométricas para evaluar la salud de los organismos (Zmarz *et al.*, 2018; Hinke *et al.*, 2022). De esta forma, se pueden inferir las condiciones ambientales y alimenticias a nivel poblacional (Hinke *et al.*, 2022). Así mismo, los UAVs han incrementado la posibilidad de estudiar una mayor cantidad de organismos con mayor precisión y reducir los errores de las mediciones efectuadas entre investigadores (Krause *et al.*, 2017). También, se ha analizado la respuesta de estos organismos frente al uso de UAVs (Labourie *et al.*, 2021), aunque persiste incertidumbre sobre las reacciones individuales o comunitarias, lo que evidencia la necesidad de ampliar los estudios sobre sus posibles impactos.

Sobre la biota terrestre, el 16,3% de las investigaciones se orientó al estudio de líquenes y briófitas (Figura 8A), especies altamente sensibles a las condiciones climáticas extremas en la región. Además, el uso de UAVs facilitó la toma de información a gran escala e identificar la cobertura de la vegetación para clasificarla (Malenovsky *et al.*, 2017). Se han empleado índices como el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, por sus siglas en inglés) para evaluar la salud y cambios en la distribución de la vegetación, permitiendo clasificar ésta de forma más rápida y precisa (Sotille *et al.*, 2022; Zmarz *et al.*, 2018). Esto contribuye a comprender la resiliencia de estas especies frente a fluctuaciones ambientales (Bollard *et al.*, 2022). En este contexto, los UAVs se posicionan como herramientas clave para el mapeo de vegetación, ya que permiten monitoreos de bajo impacto, evitando el pisoteo asociado a los estudios de campo tradicionales (Calviño-Cancela y Martín-Herrero, 2016). Los UAVs también se han empleado para el estudio de la biota marina y terrestre en conjunto (11,6%), proporcionando una visión integrada de los ecosistemas costeros y facilitando la identificación y caracterización de las especies (Tovar-Sánchez *et al.*, 2021; Román *et al.*, 2023).

3.3. Limitaciones y perspectivas a futuro

A pesar del creciente uso UAVs en estudios sobre la biota antártica, aún persisten múltiples limitaciones técnicas, logísticas y metodológicas

que deben ser abordadas para maximizar el potencial de esta tecnología. Una de las principales limitaciones identificadas es la falta de protocolos estandarizados para la operación de UAVs en este entorno. Las variaciones en altitud de vuelo, resolución de sensores, frecuencia de muestreo, tipo de motor y procedimientos éticos para minimizar la perturbación a la fauna generan inconsistencias entre estudios, dificultando la comparación de resultados y la generación de líneas base confiables a largo plazo (Vas *et al.*, 2015; McEvoy *et al.*, 2016; Mulero-Pázmány *et al.*, 2017). Además, la respuesta de la biota también depende de una amplia variedad de factores inherentes (edad, sexo, temporalidad de apareamiento, especie e individuo) (Krause *et al.*, 2021).

Aunque ya existen esfuerzos importantes, como las directrices del Tratado Antártico (Harris *et al.*, 2019) o los protocolos propuestos por Ratcliffe *et al.* (2015), se requiere avanzar hacia normativas más específicas según la región, las condiciones ambientales y la biota objetivo (Weimerskirch *et al.*, 2018). Además, es fundamental armonizar las regulaciones entre los distintos programas antárticos nacionales, para garantizar un uso coordinado y responsable de esta tecnología. Otro desafío significativo identificado es el sesgo geográfico en la distribución de los estudios. La mayoría de las investigaciones se concentran en regiones accesibles como las Islas Shetland del Sur y la Península Antártica, en particular la Isla Rey Jorge, debido a la concentración y proximidad de estaciones científicas y facilidades logísticas. Este enfoque, aunque comprensible, genera un desequilibrio espacial que podría dejar sin documentar dinámicas ecológicas relevantes en zonas menos accesibles, pero igualmente vulnerables al cambio climático o la actividad humana. Por ello, se vuelve prioritario fomentar el desarrollo de proyectos colaborativos y el desarrollo de tecnologías novedosas (como UAVs con mayor autonomía y resistencia) que permitan ampliar la cobertura geográfica de las investigaciones. Asimismo, sería relevante establecer prioridades científicas que incluyan zonas poco exploradas, promoviendo así una visión más representativa y equitativa del ecosistema antártico en su conjunto.

Por otro lado, las limitaciones tecnológicas también deben considerarse. Aunque se han logrado avances en la creación de sensores y en

la autonomía de vuelo, los UAVs aún enfrentan restricciones debido a las condiciones ambientales extremas. Estas condiciones pueden afectar tanto la operatividad del dron como la calidad de los datos recogidos (Calviño-Cancela y Martín-Herrero, 2016). En este contexto, el tipo y calidad de los sensores se vuelve un factor determinante. Los sensores ópticos RGB de alta resolución permiten obtener ortofotos detalladas para censos y análisis espaciales, mientras que los sensores multispectrales o hiperespectrales facilitan la identificación de patrones fisiológicos y de salud en la vegetación y fauna, al capturar rangos no visibles del espectro electromagnético (Bollard *et al.*, 2022). Por su parte, los sensores térmicos son particularmente útiles para detectar la temperatura corporal de los animales, identificar individuos en sombra o parcialmente ocultos y estudiar comportamientos termorregulatorios (Bird *et al.*, 2020; Román *et al.*, 2023).

Por ello, la elección del sensor no solo determina la calidad del dato, sino también la validez de los modelos predictivos derivados de ellos. De esta manera, serían capaces de anticipar respuestas ecológicas con mayor precisión frente a perturbaciones como el cambio climático o el impacto de actividades humanas. En este sentido, los algoritmos de detección automática, como YOLOv4 y otros modelos, ya han demostrado una alta efectividad para identificar y automatizar el conteo de aves marinas y mamíferos en imágenes obtenidas por UAVs, incluso bajo condiciones visuales complejas como fondos heterogéneos o superposición de individuos (Khawaja *et al.*, 2023; Raniga *et al.*, 2024; Cusick *et al.*, 2024). De hecho, la incorporación de técnicas de aprendizaje automático no sólo agiliza el análisis, sino que también mejora la precisión al reducir sesgos humanos.

No obstante, estas tecnologías requieren bases de datos sólidas y representativas para su entrenamiento y validación. En este sentido, es necesario fomentar la construcción de repositorios colaborativos de información, con participación de múltiples programas científicos antárticos para identificar los vacíos de información, no duplicar esfuerzo y potenciar el desarrollo de modelos más generalizables para toda la región antártica. Por ello, en el futuro, se espera una integración más estrecha entre los UAVs, sensores avanzados, metodologías tradicionales e IA. Esto permitirá

automatizar la detección y clasificación de especies, y para ello, es esencial contar con protocolos estandarizados para la toma y procesamiento de los datos o imágenes.

4. Conclusión

El uso de UAVs en la investigación de la biota antártica ha demostrado ser una herramienta fundamental que permite monitorear y comprender las respuestas de estos frente a la variabilidad climática y ambiental. Se logró identificar que los UAVs ofrecen ventajas significativas al reducir el impacto ambiental en comparación con los métodos tradicionales de investigación, al minimizar la necesidad de acceso directo y permitir la recopilación de datos de alta precisión en áreas remotas. Así mismo, pueden servir para identificar y analizar patrones de abundancia, distribución y salud en diversas especies. Sin embargo, para maximizar su utilidad en investigaciones científicas y minimizar los potenciales riesgos asociados, es esencial contar con protocolos estandarizados considerando el área y las especies a estudiar. La precisión de los sensores representa un componente crítico para la calidad de los datos y la confiabilidad de los modelos predictivos. Se sugiere que futuros estudios consideren evaluaciones comparativas entre distintos tipos de sensores (RGB, multispectral, térmico, hiperespectral) en relación con sus aplicaciones específicas y condiciones ambientales. Esta información será clave para reducir la variabilidad entre estudios y fortalecer las bases científicas para la toma de decisiones en conservación.

Los estudios revisados se enfocaron especialmente en estudiar la biota marina (72%) como pingüinos y focas, y en la biota terrestre sensible y predominante como los líquenes y briófitas (16,3%). Se estima que los UAVs continuarán siendo una herramienta clave para la conservación y el monitoreo de la Antártida, contribuyendo significativamente a la mitigación de los efectos del cambio climático. Aunque, los UAVs pueden reducir los errores de medición y mejorar la consistencia de los datos, se requiere perfeccionar su uso y desarrollar modelos predictivos que ayuden a comprender mejor los efectos del cambio climático en estos ecosistemas frágiles, así como desarrollar técnicas de *deep learning*, por ejemplo, para clasificar bases de datos de imágenes de

forma más eficiente. Finalmente, es necesario realizar más estudios sobre el impacto de los UAVs en la biota local; considerando diversas variables como el tipo de UAV y los parámetros de vuelo, así como aumentar las localidades estudiadas para comprender los impactos de manera integral, no solamente en una región reducida de la Antártida. Para ello, también es crucial fomentar las redes de cooperación internacional para facilitar el intercambio de datos y la creación de repositorios.

Financiación

C.B. fue financiada por la Universidad Científica del Sur (RESOLUCIÓN DIRECTORAL No.008-DGIDI-CIENTIFICA-2024).

Referencias

- Australian Government, 2022. *Australian Antarctic Strategy & 20 Year Action Plan*. Australian Government. https://www.antarctica.gov.au/site/assets/files/53156/2022_update_20yearstrategy.pdf
- Auger, M., Morrow, R., Kestenare, E., Sallée, J.-B., Cowley, R., 2021. Southern Ocean *in-situ* temperature trends over 25 years emerge from interannual variability. *Nature Communications*, 12, 514. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20781-1>
- Baldwin, R. W., Beaver, J. T., Messinger, M., Muday, J., Windsor, M., Larsen, G. D., Silman, M. R., Anderson, T. M., 2023. Camera Trap Methods and Drone Thermal Surveillance Provide Reliable, Comparable Density Estimates of Large, Free-Ranging Ungulates. *Animals*, 13(11), 1884. <https://doi.org/10.3390/ani13111884>
- Bello, C., Suarez, W., Lavado-Casimiro, W., 2022. Trends and space-time patterns of near-surface temperatures on Maxwell Bay, King George Island, Antarctica. *International Journal of Climatology*, 42(14), 7426–7442. <https://doi.org/10.1002/joc.7661>
- Belyaev, O., Román, R., Belliure, J., Navarro, G., Barbero, L., Tovar-Sánchez, A., 2024. Assessing topographic features and population abundance in an Antarctic penguin colony through UAV-based deep-learning models. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 134, 104124. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.104124>
- Bird, C., Dawn, A.H., Dale, J., Johnston, D.W., 2020. A semi-automated method for estimating Adélie penguin colony abundance from a fusion of multispectral and thermal imagery collected with unoccupied aircraft systems. *Remote Sensing*, 5, 3692. <https://doi.org/10.3390/rs12223692>
- Bollard, B., Doshi, A., Gilbert, N., Poirot, C., Gillman, L., 2022. Drone Technology for Monitoring Protected Areas in Remote and Fragile Environments. *Drones*, 6, 42. <https://doi.org/10.3390/drones6020042>
- Bollard-Breen, B., Brooks, J. D., Jones, M. R. L., Robertson, J., Betschart, S., Kung, O., Cary, S., Lee, C., Pointing, S. B., 2014. Application of an unmanned aerial vehicle in spatial mapping of terrestrial biology and human disturbance in the McMurdo Dry Valleys, East Antarctica. *Polar Biology*, 38(4), 573–578. <https://doi.org/10.1007/s00300-014-1586-7>
- Borowicz, A., McDowall, P., Youngflesh, C., Sayre-McCord, T., Clucas, G., Herman, R., Forrest, S., Rider, M., Schwaller, M., Hart, T., Jenouvrier, S., Polito, M., Singh, H., Lynch, H., 2018. Multi-modal survey of Adélie penguin mega-colonies reveals the Danger Islands as a seabird hotspot. *Scientific Reports*, 8, 3926. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-22313-w>
- Bozkurt, D., Bromwich, D. H., Carrasco, J., Hines, K. M., Maureira, J. C., Rondanelli, R., 2020. Recent Near-surface Temperature Trends in the Antarctic Peninsula from Observed, Reanalysis and Regional Climate Model Data. *Advances in Atmospheric Sciences*, 37(5), 477–493. <https://doi.org/10.1007/s00376-020-9183-x>
- Calviño-Cancela, M., Martín-Herrero, J., 2016. Spectral Discrimination of Vegetation Classes in Ice-Free Areas of Antarctica. *Remote Sensing*, 8, 856. <https://doi.org/10.3390/rs8100856>
- Colesie, C., Walshaw, C. V., Sancho, L. G., Davey, M. P., Gray, A., 2023. Antarctica's vegetation in a changing climate. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 14(1), e810. <https://doi.org/10.1002/wcc.810>
- Costa, E., dos Santos, M., 2007. Biología Reproductiva E Ecología Comportamental de Skuas Antárticas *Catharacta maccormicki* E *C. lonbergi*. *Oecol. Bras.*, 11(1), 78-84. <https://doi.org/10.4257/oeco.2007.1101.09>
- Chen, X., Chen, J., Cheng, X., Zhu, L., Li, B., Li, X., 2021. Retreating shorelines as an emerging threat to Adélie Penguins on Inexpressible Island. *Remote Sensing*, 13, 4718. <https://doi.org/10.3390/rs13224718>

- Chown, S.L., Leihiy, R.I., Naish, T.R., Brooks, C.M., Convey, P., Henley, B.J., Mackintosh, A.N., Phillips, L.M., Kennicutt, M.C. II, Grant, S.M. 2022. *Antarctic Climate Change and the Environment: A Decadal Synopsis and Recommendations for Action*. Cambridge: Scientific Committee on Antarctic Research.
- Council of Managers of National Antarctic Programs [COMNAP]. Antarctic Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS) Operator's Handbook; Version 6, 15 September 2021; Prepared by the COMNAP RPAS Working Group; 2021. <https://static1.squarespace.com/static/61073506e9b0073c7eaa464/t/614955adb8852a75ab0d5641/1632196017702/COMNAP+RPAS+Handbook+15+September+2021.pdf>
- Council of Managers of National Antarctic Programs [COMNAP]. Antarctic Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS) Operator's Handbook; Version 8, 18 December 2023; Prepared by the COMNAPRPAS Working Group; 2023. <https://static1.squarespace.com/static/61073506e9b0073c7eaa464/t/6581640fe595f44f5bee1fcf/1702978580347/COMNAP+RPAS+Handbook+18Dec2023.pdf>
- Cusick, A., Fudala, K., Pasza, P., Świeżewski, J., Kaleta, J., Oosthuizen, W., Pfeifer, C., Bialik, R., 2024. Using machine learning to count Antarctic shag (*Leucocarbo bransfieldensis*) nests on images captured by remotely piloted aircraft systems. *Ecological Informatics*, 84. <https://doi.org/10.1101/2024.02.27.582379>
- Dadrass, F., Samadzadegan, F., Gholamshahi, M., Ashatari Mahini, F., 2022. A Modified YOLOv4 Deep Learning Network for Vision-Based UAV Recognition. *Drones*, 6(7), 160. <https://doi.org/10.3390/drones6070160>
- Dunn, M.J., Adlard, S., Taylor, A.P., Wood, A.G., Trathan, P.N., Ratcliffe, N., 2021. Un-crewed aerial vehicle population survey of three sympatrically breeding seabird species at Signy Island, South Orkney Islands. *Polar Biology*, 44, 717–727. <https://doi.org/10.1007/s00300-021-02831-6>
- Durban, J.W., Fearnbach, H., Paredes, A., Hickmott, L.S., LeRoi, D.J., 2021. Size and body condition of sympatric killer whale ecotypes around the Antarctic Peninsula. *Marine Ecology Progress Series*, 677, 209–217. <https://doi.org/10.3354/meps13866>
- Faisal, S., Mazhar, T., Shloul, T. A., Shahzad, T., Hu, Y. C., Mallek, F., Hamam, H., 2024. Applications, challenges, and solutions of unmanned aerial vehicles in smart city using blockchain. *PeerJ. Computer science*, 10, e1776. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.1776>
- Firla, M., Mustafa, O., Pfeifer, C., Senf, M., Hese, S. 2019. Intraseasonal Variability Of Guano Stains in A Remotely Sensed Penguin Colony Using UAV and Satellite. *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, 4(2), 111–118. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W5-111-2019>.
- Fudala, K., Bialik, R.J. 2020. Breeding colony dynamics of southern elephant seals at Patelnia Point, King George Island, Antarctica. *Remote Sensing*, 12, 2964. <https://doi.org/10.3390/rs12182964>
- Fudala, K., Bialik, R.J. 2022. The use of drone-based aerial photogrammetry in population monitoring of Southern Giant Petrels in ASMA 1, King George Island, maritime Antarctica. *Global Ecology and Conservation*, 33, e01990. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01990>
- Fudala, K., Bialik, R.J., 2023. Identifying Important Bird and Biodiversity Areas in Antarctica Using RPAS Surveys—A Case Study of Cape Melville, King George Island, Antarctica. *Drones*, 7, 538. <https://doi.org/10.3390/drones7080538>
- Goebel, M.E., Perryman, W.L., Hinke, J.T., Krause, D., Hann, N., Gardner, S., LeRoi, D., 2015. A small unmanned aerial system for estimating abundance and size of Antarctic predators. *Polar Biology*, 38, 619–630. <https://doi.org/10.1007/s00300-014-1625-4>
- Harris, C. M., Herata, H., Hertel, F. 2019. Environmental guidelines for operation of Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS): Experience from Antarctica. *Biological Conservation*, 236, 521–531. <https://10.1016/j.biocon.2019.05.019>
- Hauck, J., Gregor, L., Nissen, C., Patara, L., Hague, M., Mongwe, P., Bushinsky, S., Doney, S., Gruber, N., Le Quéré, C., Manizza, M., Mazloff, M., Monteiro, P., Terhaar, J., 2023. The Southern Ocean carbon cycle 1985–2018: Mean, seasonal cycle, trends, and storage. *Global Biogeochemical Cycles*, 37, e2023GB007848. <https://doi.org/10.1029/2023GB007848>
- Hinke, J.T., Giuseffi, L.M., Hermanson, V.R., Woodman, S.M., Krause, D.J., 2022. Evaluating Thermal and Color Sensors for Automating Detection of Penguins and Pinnipeds in Images Collected with an Unoccupied Aerial System. *Drones*, 6, 255. <https://doi.org/10.3390/drones6090255>
- Hodgson, J., Koh, L. 2016. Best practice for minimising unmanned aerial vehicle disturbance to wildlife in biological field research. *Current Biology*, 26(10), R387–R407. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2016.04.001>

- Isla, E., Gerdes, D., 2019. Ongoing ocean warming threatens the rich and diverse macrobenthic communities of the Antarctic continental shelf. *Progress in Oceanography*, 178, 102180. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2019.102180>
- Khawaja, W., Yaqoob, Q., Guvenc, I. 2023. Detecting, tracking, and classifying unmanned aerial vehicles (UAVs) in a swarm using multi-agent reinforcement learning applied to airborne cognitive multibeam multifunction phased array radar. *Drones*, 7(7), 470. <https://doi.org/10.3390/drones7070470>
- Kim, J.U., Kim, Y., Oh, Y., Kim, H.C., Kim, J.H. 2023. Antarctic ecosystem recovery following human-induced habitat change: recolonization of Adélie Penguins (*Pygoscelis adeliae*) at Cape Hallett, Ross sea. *Diversity*, 15(1), 51. <https://doi.org/10.3390/d15010051>
- Krause, D.J., Hinke, J.T., Perryman, W.L., Goebel, M.E., LeRoi, D.J., 2017. An accurate and adaptable photogrammetric approach for estimating the mass and body condition of pinnipeds using an unmanned aerial system. *PLoS ONE*, 12(11), e0187465. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0187465>
- Krause, D.J., Hinke, J.T., Goebel, M.E., Perryman, W.L., 2021. Drones minimize Antarctic predator responses relative to ground survey methods: An appeal for context in policy advice. *Frontiers in Marine Science*, 8, 648772. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.648772>
- Korczak-Abshire, M., Kidawa, A., Zmarz, A., Storvold, R., Karlsen, S.R., Rodzewicz, M., Chwedorzewska, K., Znój, A., 2016. Preliminary study on nesting Adélie penguins disturbance by unmanned aerial vehicles. *CCAMLR Science*, 23, 1–16. https://documents.ats.aq/ATCM40/att/ATCM40_att039_e.pdf
- Korczak-Abshire, M., Zmarz, A., Rodzewicz, M., Kycko, M., Karsznia, I., Chwedorzewska, K., 2019. Study of fauna population changes on Penguin Island and Turret Point Oasis (King George Island, Antarctica) using an unmanned aerial vehicle. *Polar Biology*, 42, 217–224. <https://doi.org/10.1007/s00300-018-2379-1>
- Laborie, J., Christiansen, F., Beedholm, K., Madsen, P.T., Heerah, K., 2021. Behavioural impact assessment of unmanned aerial vehicles on Weddell seals (*Leptonychotes weddellii*). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 536, 151509. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2020.151509>
- Malenovský, Z., Lucieer, A., King, D., Turnbull, J., Robinson, S., 2017. Unmanned aircraft system advances health mapping of fragile polar vegetation. *Methods in Ecology and Evolution*, 8, 1842–1857. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.12833>
- McEvoy, J. F., Hall, G. P., McDonald, P. G., 2016. Evaluation of unmanned aerial vehicle shape, flight path and camera type for waterfowl surveys: disturbance effects and species recognition. *PeerJ*, 4, e1831. <https://doi.org/10.7717/peerj.1831>
- Miranda, V., Pina, P., Heleno, S., Vieira, G., Mora, C., Schaefer, C.E.G.R., 2020. Monitoring recent changes of vegetation in Fildes Peninsula (King George Island, Antarctica) through satellite imagery guided by UAV surveys. *Science of The Total Environment*, 704, 135295. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135295>
- Mulero-Pázmány, M., Jenni-Eiermann, S., Strebel, N., Sattler, T., Negro, J. J., Tablado, Z., 2017. Unmanned aircraft systems as a new source of disturbance for wildlife: A systematic review. *PloS one*, 12(6), e0178448. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0178448>
- Mustafa, O., Barbosa, A., Krause, D. J., Peter, H.U., Vieira, G., Rümmler, M.C., 2018. State of knowledge: Antarctic wildlife response to unmanned aerial systems. *Polar Biology*, 41(10). <https://doi.org/10.1007/s00300-018-2363-9>
- Mustafa, O., Braun, C., Esefeld, J., Knetsch, S., Maercker, J., Pfeifer, C., Rümmler, M.C. 2019. Detecting Antarctic Seals and Flying Seabirds by UAV. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 4. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-2-W5-141-2019>
- Oosthuizen, W.C., Krüger, L., Jouanneau, W., Lowther, A., 2020. Unmanned aerial vehicle (UAV) survey of the Antarctic shag (*Leucocarbo bransfieldensis*) breeding colony at Harmony Point, Nelson Island, South Shetland Islands. *Polar Biology*, 43, 187–191. <https://doi.org/10.1007/s00300-019-02616-y>
- Pfeifer, C., Barbosa, A., Mustafa, O., Peter, H.-U., Rümmler, M.-C., Brenning, A., 2019. Using Fixed-Wing UAV for Detecting and Mapping the Distribution and Abundance of Penguins on the South Shetlands Islands, Antarctica. *Drones*, 3, 39. <https://doi.org/10.3390/drones3020039>
- Pfeifer, C., Rümmler, M.-C., Mustafa, O., 2021. Assessing colonies of Antarctic shags by unmanned aerial vehicle (UAV) at South Shetland Islands, Antarctica. *Antarctic Science*, 33(2), 133–149. <https://doi.org/10.1017/s0954102020000644>

- Pina, P., Vieira, G., 2022. UAVs for Science in Antarctica. *Remote Sensing* 2022, 14(7), 1610. <https://doi.org/10.3390/rs14071610>
- Quiroz, O. M., Romanelli, A., González, F., Cermelo, L., Dalto, C., 2019. Metodología SIG para el análisis de la dinámica, monitoreo y remediación de un sistema playa- duna del sudeste bonaerense, Argentina. *GeoFocus*, 24, 77-97. <http://dx.doi.org/10.21138/GF.631>
- Raniga, D., Amarasingam, N., Sandino, J., Doshi, A., Barthelemy, J., Randall, K., Robinson, S.A., Gonzalez, F., Bollard, B., 2024. Monitoring of Antarctica's Fragile Vegetation Using Drone-Based Remote Sensing, Multispectral Imagery and AI. *Sensors* 2024, 24, 1063. <https://doi.org/10.3390/s24041063>
- Ratcliffe, N.; Guihen, D.; Robst, J.; Crofts, S.; Stanworth, A.; Enderlein, P. 2015. A protocol for the aerial survey of penguin colonies using UAVs. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 3, 95–101. <https://doi.org/10.1139/juvs-2015-0006>
- Román, A., Navarro, G., Caballero, I., Tovar-Sánchez, A., 2022. High-spatial resolution UAV multispectral data complementing satellite imagery to characterize a chinstrap penguin colony ecosystem on deception island (Antarctica). *GIScience & Remote Sensing*, 59(1), 1159–1176. <https://doi.org/10.1080/15481603.2022.2101702>
- Román, A., Tovar-Sánchez, A., Fernández-Marín, B., Navarro, G., Barbero, L., 2023. Characterization of an antarctic penguin colony ecosystem using high-resolution UAV hyperspectral imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 125, 103565. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103565>
- Rümmmler, M.-C., Mustafa, O., Maercker, J., Peter, H.-U., Esefeld, J., 2016. Measuring the influence of unmanned aerial vehicles on Adélie penguins. *Polar Biology*, 39, 1329–1334. <https://doi.org/10.1007/s00300-015-1838-1>
- Rümmmler, M. C., Mustafa, O., Maercker, J., Peter, H. U., Esefeld, J., 2018. Sensitivity of Adélie and Gentoo penguins to various flight activities of a micro UAV. *Polar Biology*, 41, 2481–2493. <https://doi.org/10.1007/s00300-018-2385-3>
- Rümmmler, M.-C., Esefeld, J., Hallabrin, M.T., Pfeifer, C., Mustafa, O., 2021a. Emperor penguin reactions to UAVs: First observations and comparisons with effects of human approach. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 23, 100558. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100558>
- Rümmmler, M.-C., Esefeld, J., Pfeifer, C., Mustafa, O., 2021b. Effects of UAV overflight height, UAV type, and season on the behaviour of emperor penguin adults and chicks. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 23, 100558. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100558>
- Siegert, M.J., Bentley, M.J., Atkinson, A., Bracegirdle, T.J., Convey, P., Davies, B., Downie, R., Hogg, A.E., Holmes, C., Hughes, K.A., Meredith, M.P., Ross, N., Rumble, J., Wilkinson, J., 2023. Antarctic extreme events. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1229283. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1229283>
- Sotille, M.E., Bremer, U.F., Vieira, G., Velho, L.F., Petsch, C., Simões, J.C., 2020. Evaluation of UAV and satellite-derived NDVI to map maritime Antarctic vegetation. *Applied Geography*, 125, 102322. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2020.102322>
- Sotille, M.E., Bremer, U.F., Vieira, G., Velho, L.F., Petsch, C., Auger, J., Simões, J.C., 2022. UAV-based classification of maritime Antarctic vegetation types using GEOBIA and random forest. *Ecological Informatics*, 71(7), 101768. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101768>
- Tovar-Sánchez, A., Román, A., Roque-Atienza, D., Navarro, G., 2021. Applications of unmanned aerial vehicles in Antarctic environmental research. *Science Reports*, 11, 21717. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01228-z>
- Turner, D., Lucieer, A., Malenovsky, Z., King, D. H., Robinson, S. A., 2014. Spatial Co-Registration of Ultra-High Resolution Visible, Multispectral and Thermal Images Acquired with a Micro-UAV over Antarctic Moss Beds. *Remote Sensing*, 6(5), 4003–4024. <https://doi.org/10.3390/rs6054003>
- Turner, J., Lu, H., White, I., King, J., Phillips, T., Hosking, J.S., Bracegirdle, T., Marshall, J., Mulvaney, J., Deb, P., 2016. Absence of 21st century warming on Antarctic Peninsula consistent with natural variability. *Nature*, 535, 411–415. <https://doi.org/10.1038/nature18645>
- Vas, E., Lescroël, A., Duriez, O., Boguszewski, G., Grémillet, D., 2015. Approaching birds with drones: first experiments and ethical guidelines. *Biol. Lett.* 11, 20140754. <https://doi.org/10.1098/rsbl.2014.0754>
- Walton, D., Clarkson, P., Summerhayes, C., 2018. *Science in the Snow: Sixty years of international collaboration through the Scientific Committee on Antarctic Research*. 2nd edition. Cambridge, SCAR. 321 pp.

- Weimerskirch, H., Prudor, A., Schull, Q., 2018. Flights of drones over sub-Antarctic seabirds show species- and status-specific behavioural and physiological responses. *Polar Biology*, 41, 259–266. <https://doi.org/10.1007/s00300-017-2187-z>
- Zhou, H., Ma, A., Niu, Y., Ma, Z., 2022. Small-Object Detection for UAV-Based Images Using a Distance Metric Method. *Drones*, 6(10), 308. <https://doi.org/10.3390/drones6100308>
- Zmarz, A., Rodzewicz, M., Dąbski, M., Karsznia, I., Korczak-Abshire, M., Chwedorzewska, K. J., 2018. Application of UAV BVLOS remote sensing data for multi-faceted analysis of Antarctic ecosystem. *Remote Sensing of Environment*, 217, 375–388. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.031>