GAYANA Gayana (2026) vol. 90, No. 1, 73-83

https://doi.org/10.4067/s0717-6538202600010073

Research Article

Uso de radar para la caracterización de tránsito aéreo de avifauna en estudios de evaluación ambiental

Use of radar to estimate bird traffic in environmental assessment studies

Felipe Yany[1], Roberto Aguilar-Pulido[2] & Alejandro Simeone[3,*]

[1]Magíster en Recursos Naturales, Facultad de Ciencias de la Vida, Universidad Andrés Bello, Santiago, Chile.
[2]Corporación Estudios Culturales y Ambientales - CULTAM, Antofagasta, Chile.
[3]Instituto One Health, Facultad de Ciencias de la Vida, Universidad Andrés Bello, Santiago, Chile.
*Corresponding author: asimeone@unab.cl

RESUMEN

La caracterización del tránsito aéreo de avifauna es un requisito para evaluar el impacto ambiental de proyectos que generan obstáculos al desplazamiento de las aves (*e.g.*, aerogeneradores, torres y líneas de transmisión eléctrica). Para esto, la autoridad ambiental chilena recomienda metodologías de observación directa, es decir, la determinación visual y/o auditiva de las variables de interés por un equipo de personas en terreno. Estas metodologías están sujetas a los sesgos propios del observador y a los esfuerzos de muestreo, muchas veces definidos por aspectos laborales y económicos. Esto plantea la necesidad de incorporar metodologías automatizadas, como el radar, para lograr caracterizaciones más precisas. En este estudio comparamos seis variables de tránsito aéreo de avifauna (especie, número, velocidad, dirección, altura y longitud de los vuelos) obtenidas de forma simultánea por un grupo de observadores y un radar marítimo. El radar obtuvo significativamente más registros que los observadores en el número de individuos, dirección y altura de vuelo. La velocidad y longitud de trayectoria sólo fueron registradas por el radar, no así por los observadores. La determinación de la especie fue la única variable donde los datos proporcionados por el radar no permitieron una identificación, pero sí la experiencia de los observadores. Estos resultados indican que la caracterización de tránsito aéreo de avifauna, tal como se está haciendo en la actualidad, no está aportando información precisa para la toma de decisiones sobre la viabilidad ambiental de los proyectos, y sería recomendable implementar de forma progresiva el uso de radar en estos estudios de evaluación ambiental.

Palabras clave: colisiones de aves, energía eólica, impacto ambiental, monitoreo, radar.

ABSTRACT

The characterization of bird traffic is a requirement for assessing the environmental impact of projects that create obstacles to bird movement (e.g., wind turbines, towers, and power transmission lines). For this purpose, the Chilean environmental authority recommends direct observation methodologies, i.e., the visual and/or auditory determination of the variables of interest by a team of observers in the field. These methodologies are subject to observer bias and sampling efforts, often determined by labor and economic factors. This raises the need to incorporate automated methodologies, such as radar, to achieve more precise characterizations. In this study, we compared six bird traffic variables (species, number, speed, direction, height, and flight length) obtained simultaneously by a group of observers and a maritime radar. The radar obtained significantly more records than the observers regarding the number of individuals, flight direction, and height. Speed and path

Received: 25.08.2025; Accepted: 13.02.2026
Editor: Alfredo Saldaña

Open Access

©2026 The Author(s). This open access article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0), which permits any noncommercial use, distribution, and reproduction, as long as appropriate credit is given to the original author(s) and the source.

length were recorded only by the radar, not by the observers. Species identification was the only variable where radar data did not allow identification, but observer experience did. These results indicate that bird traffic characterization, as currently implemented, is not providing accurate information for decision-making regarding the environmental viability of projects, and it would be advisable to progressively implement the use of radar in these environmental assessment studies.

Keywords: bird collisions, environmental impact, monitoring, radar, wind energy.

INTRODUCCIÓN

La demanda por recursos naturales y generación de energía para satisfacer las crecientes necesidades de la población humana están modificando la composición, estructura y función de la biodiversidad a escalas espaciales y tasas sin precedentes en la historia del planeta, causando extinción de especies, disminución de la abundancia de poblaciones y alteración de funciones ecosistémicas (Dirzo *et al*. 2014; Jaureguiberry *et al*. 2022). Muchas de estas alteraciones están teniendo importantes consecuencias para el bienestar humano que, precisamente, depende de los servicios que la biodiversidad y el funcionamiento de los ecosistemas les brindan a las personas (Díaz *et al*. 2006; Díaz & Malhi 2022).

Las formas para obtener estos recursos y generar energías de manera sustentable despiertan, sin embargo, preocupación por las consecuencias que pueden tener en la vida silvestre, sobre todo cuando éstas no son bien planificadas (Schuster *et al*. 2015). La generación de energía eólica, por ejemplo, implica la construcción de grandes y complejas estructuras como aerogeneradores que pueden modificar la distribución, abundancia, conducta y, en algunos casos, provocar extinción local de especies (Gómez-Catasús *et al*. 2018; Rahman *et al*. 2022). En el caso de la avifauna, los aerogeneradores pueden constituir obstáculos para su desplazamiento local y migraciones, haciéndola susceptible a mortalidad por colisiones y desplazamientos por pérdida o degradación de hábitat (Thaxter *et al*. 2017; Bernardino *et al*. 2018; Garthe *et al*. 2023; Peschko *et al*. 2024; Camiña 2025). En este contexto, es de gran importancia obtener información de calidad que permita evaluar los impactos ambientales que dichas iniciativas productivas podrían tener sobre estos componentes de la fauna silvestre y así prevenir, manejar y/o mitigar dichos impactos y sus consecuencias ecológicas y socioeconómicas (Morgan 2012). También es de gran relevancia escoger las metodologías, protocolos e instrumental más idóneos y disponer de personal con la motivación y habilidades adecuadas (Bibby *et al*. 2000; Scher & Clark 2023).

En Chile, las metodologías aceptadas y recomendadas por la institucionalidad ambiental, el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA 2025a) y el Servicio Agrícola y Ganadero (SAG 2015), para la evaluación de avifauna se basan principalmente en la observación directa, es decir, en el uso de personas para la identificación visual y/o acústica de las variables de interés. Dichas metodologías incluyen el reconocimiento por emisión de vocalizaciones grabadas (play back) y el conteo de aves desde un punto de muestreo fijo para caracterizar las rutas de vuelo. Al depender de personas, estas metodologías están sujetas a los sesgos propios del observador (*e.g*., habilidad en la detección e identificación de especies, consistencia y rapidez para registrar la información, nivel de motivación, dependencia de condiciones climáticas) y a los esfuerzos de muestreo, los que muchas veces están definidos por aspectos de conveniencia laboral y económica (Bibby *et al*. 2000; Scher & Clark 2023). Esta situación plantea la necesidad de considerar el uso de metodologías automatizadas que permitan caracterizar de manera más precisa, amplia y confiable el tránsito aéreo de avifauna para realizar mejores evaluaciones ambientales (May *et al*., 2017; Gémard *et al*. 2025).

En las últimas décadas, el uso del radar se ha adoptado como una herramienta muy precisa y eficiente para la observación y seguimiento de aves en vuelo ya que esta tecnología permite una gran capacidad de observación en términos del área que se puede cubrir, es poco invasiva, realiza registros continuos de forma automatizada y funciona en condiciones ambientales

muy variadas (Bridge *et al*. 2011; Beason *et al*. 2013; May *et al*. 2017; Nilsson *et al*. 2018; Bairlein 2022). Aunque con diferencias entre ellos en cuanto a su accesibilidad, costos y cobertura espacial, los diferentes tipos de radar (*e.g*., meteorológico, marítimo, de seguimiento, escaneo; ver detalles de cada tipo y sus aplicaciones en Nilsson *et al*. 2018), permiten caracterizar diversas variables de tránsito aéreo de avifauna, incluyendo intensidad de movimientos de individuos, altitud, dirección y velocidad de vuelo (Nilsson *et al*. 2018; Abbott *et al*. 2023). El radar puede usarse para la caracterización de la avifauna en forma previa al desarrollo de un proyecto con implicancias ambientales, permitiendo de este modo identificar áreas críticas (*e.g*., áreas de concentración o paso migratorio de aves, sitios reproductivos) y desarrollar planes de conservación más efectivos (Bonter *et al*. 2008) o bien para adecuar el diseño del proyecto previo a su construcción (Jenkins *et al*. 2018; Cohen *et al*. 2022).

En este estudio determinamos seis variables de tránsito aéreo de avifauna a través de observación directa y, en forma simultánea, con un radar marítimo. Comparamos los resultados obtenidos con cada método y discutimos las ventajas y desventajas de cada uno en el contexto de su aplicación a estudios de evaluación ambiental.

MATERIAL Y MÉTODOS

Zona de estudio

La evaluación de tránsito aéreo de aves se realizó en dos sitios costeros de la Región de Antofagasta: el 28/02/2024 en Playa Brava (22°57´S; 70°18´W) y el 29/02/2024 en Playa Rinconada (23°27´S; 70°30´W). Ambos lugares corresponden a playas arenosas extensas y despejadas, sin obstáculos visuales dentro de un radio > 1 km, con tránsito aéreo constante de aves marinas y playeras. Todas las observaciones se realizaron con luz de día y buena visibilidad. En cada localidad, la evaluación de tránsito aéreo se realizó a través de observación directa (i.e. observadores) y, de manera simultánea, con un radar marítimo. En total, se evaluaron seis variables de tránsito aéreo de avifauna: especie, número, dirección, altura, velocidad y longitud de trayectoria de los vuelos.

Evaluación de tránsito aéreo: observación directa

Los registros de tránsito aéreo de aves fueron realizados por dos personas utilizando binoculares 10X42, hasta un máximo aproximado de 1 km. Esta distancia se estimó a partir de puntos de referencia en el paisaje y es la recomendada para lograr una detección e identificación confiable de aves en vuelo (Dokter *et al*. 2013). Los observadores tomaron posiciones en un punto fijo dentro de un radio de 50 m desde la ubicación del radar, haciendo un barrido en 360º y registrando los vuelos de aves en dicho campo de visión de manera continua durante el período observado. Cada observador anotó sus registros de manera independiente, sin comunicarse con el otro para evitar sesgos en la obtención de información. La determinación de las variables de tránsito aéreo de avifauna dependió fundamentalmente de la habilidad y experiencia de cada observador. El reconocimiento taxonómico de las especies fue apoyado con guías de campo (Jaramillo 2005, Martínez-Piña 2023).

Evaluación de tránsito aéreo: radar

Se utilizó un radar marítimo (modificado para detectar aves) de banda X GEM SU 70-14 E/9 (GEM Elettronica, Italia), con una antena GEM de 2,1 metros, modelo AU11-07N. La unidad de 20 KW fue alimentada por un sistema de dos baterías de 12 V cada una (24 V DC en total) y se montó en un trípode metálico de 1,8 m de alto). Para manejar el sistema, se utilizó un computador Lenovo Notebook Ideapad Slim 5 con procesador Intel Core i7-13620H, con tarjeta gráfica integrada Intel® UHD Graphics.

El radar opera a 38 revoluciones por minuto (RPM) y permite disponer su antena en posición horizontal para determinar número, dirección, velocidad y longitud de la trayectoria de los vuelos. La posición vertical, por otra parte, permite estimar la altura de vuelo. En ambas playas se hicieron mediciones con el radar en horizontal, pero se dispuso en forma vertical solamente en Playa Brava. Si bien el equipo se puede configurar para registrar tránsito aéreo hasta un radio de 6 km, para efectos de este estudio sólo se consideraron los registros hasta 1 km y así equipararlo con la capacidad de detección recomendada para observadores toda vez que, al considerar distancias mayores, el ojo humano pierde efectividad (Dokter *et al*. 2013) y el radar pierde progresivamente la capacidad para detectar aves de tamaño pequeño (Beason *et al*. 2013).

Análisis de datos

La información generada por el radar se analizó con el software RdrForBirds (Radar Data processing For

Bird Detection and Statistical Analysis) desarrollado para MS Windows 10 por Techno Smart Europe (Italia), que entrega una base de datos en formato ".CSV" con información de la posición de un objeto en el tiempo respecto del eje del radar. Estos fueron posteriormente editados e interpretados estadística y espacialmente con sistemas de información geográfica (QGis®) y softwares PAST4 4.16c® y R-Studio®.

Los puntos detectados por el radar fueron agrupados por el software (RdrForBirds) con un mismo identificador (código numerado) en base a su comportamiento similar en dirección, sentido y velocidad de desplazamiento. Así, todos los identificadores del mismo código fueron agrupados en un mismo vuelo o track. Sólo se consideraron vuelos con al menos 4 identificadores y que estuvieran dentro del rango de velocidad 6–30 m/s, que corresponde al rango de velocidad reportada comúnmente para las aves (Panuccio *et al*. 2019; van Erp *et al*. 2024). A partir de estos datos, se generaron tracks de vuelo mediante el uso de Qgis®, eliminándose aquellos que tuvieran menos de 200 m y que tuvieran una sinuosidad (cociente del largo del track sobre la distancia euclidiana entre sus extremos) de hasta 1,1, descartándose tracks o vuelos con ángulos rectos y demasiado imbricados que pudieran no corresponder a aves (Catoni *et al*. 2021). Se eliminaron también los tracks que aparecieron sobre caminos (vehículos en circulación), así como los que aparecieron sobre el mar debido a la interferencia (clutter) que genera el movimiento de las olas. Para cada vuelo o track determinado de esta manera, se registró su correspondiente valor de dirección, velocidad y longitud de trayectoria. Con estas consideraciones metodológicas, se consideró un vuelo o track equivalente a un individuo en vuelo (Beason *et al*. 2013).

Todas las comparaciones estadísticas se hicieron utilizando la prueba de Xi^2 de Pearson en el software PAST 4.16c.

RESULTADOS

Especie

Aunque con diferencias entre ellos, ambos observadores lograron reconocer especies en función de sus características morfológicas, siluetas y coloración de plumaje (Tabla 1). El radar logró detectar solamente objetos en movimiento en el espacio aéreo, asignando a cada uno un identificador, pero que no permitió diferenciar especies.

Número de individuos

El número de individuos registrados por ambos observadores y por el radar se muestra en la Tabla 2. Dependiendo del sitio, los observadores detectaron sólo entre un 10 y 28% de los individuos registrados por el radar. En playa Brava, ambos observadores detectaron un número similar de individuos (X^2= 7,91; p>0,05), pero el radar detectó significativamente más individuos que el observador 1 (X^2= 22,23; p<0,05) y que el observador

TABLA 1. Especies de aves y número de individuos registrados por ambos observadores en los sitios de estudio. / Bird species and number of individuals recorded by both observers at the study sites.

Especie	Playa Brava		Playa Rinconada	
	Obs.1	Obs. 2	Obs. 1	Obs. 2
Gaviota dominicana (*Larus dominicanus*)	24	29	14	13
Gaviota peruana (*Larus belcheri*)	0	4	0	26
Gaviota garuma (*Leucophaeus modestus*)	0	6	8	2
Gaviotín elegante (*Thalasseus elegans*)	0	0	0	5
Piquero (*Sula variegata*)	1	1	0	4
Pilpilén (*Haematopus palliatus*)	0	5	2	3
Jote de cabeza colorada (*Cathartes aura*)	22	59	122	177
TOTAL	**47**	**104**	**146**	**230**

2 (X^2= 28,68; p<0,001). En Playa Rinconada hubo diferencias significativas entre ambos observadores (X^2= 16,98; p<0,01) y el radar detectó significativamente más individuos que el observador 1 (X^2= 22,83; p<0,001) y que el observador 2 (X^2= 46,61; p<0,001).

Dirección de vuelo

Las direcciones de vuelo registradas por los observadores y el radar se muestran en la Tabla 3. En Playa Brava, los valores de direcciones de vuelo registrados fueron significativamente diferentes en todas las comparaciones realizadas: entre ambos observadores (X^2= 11,20; p<0,01), entre el radar y el observador 1 (X^2= 11,16; p<0,01) y entre el radar y el observador 2 (X^2= 13,35; p<0,001). La misma situación se dio en Playa Rinconada: entre ambos observadores (X^2= 15,29; p<0,01), entre el radar y el observador 1 (X^2= 23,48; p<0,001) y entre el radar y el observador 2 (X^2= 18,08; p<0,01). En ambos sitios, los valores de dirección de vuelo detectados por el radar fueron siempre significativamente más altos que los registrados por ambos observadores.

Velocidad de vuelo y longitud de trayectoria

Ninguno de los observadores pudo determinar estas dos variables de tránsito aéreo. Las velocidades y longitudes de trayectoria detectadas por el radar para ambas localidades se muestran en las tablas 4 y 5, respectivamente.

Altura de vuelo

Mientras que el radar detectó aves hasta los 500 m de altura, los observadores solo pudieron discriminar aves volando hasta 100 m de altura (Tabla 6).

TABLA 2. Número de individuos detectados por el radar y ambos observadores en los sitios de estudio. Los números entre paréntesis corresponden al porcentaje que representa lo detectado por cada observador con respecto a lo detectado por el radar. / Number of individuals detected by the radar and both observers at the study sites. Numbers in parentheses correspond to the percentage of each observer's detections compared to the radar.

Horario	Radar	Observador 1		Observador 2	
Playa Brava					
14:50-15:10	88	5	(6)	8	(9)
15:10-15:30	93	12	(13)	12	(13)
15:30-15:50	88	5	(6)	25	(28)
16:20-16:40	41	5	(12)	16	(39)
16:40-17:00	82	15	(18)	34	(41)
17:00-17:20	83	5	(6)	9	(11)
TOTAL	**475**	**47**	**(10)**	**104**	**(22)**
Playa Rinconada					
12:50-13:10	171	52	(30)	71	(42)
13:10-13:30	193	34	(18)	89	(46)
14:00-14:20	153	31	(20)	21	(14)
14:20-14:40	151	15	(10)	22	(15)
14:40-15:00	153	14	(9)	27	(18)
TOTAL	**821**	**146**	**(18)**	**230**	**(28)**

TABLA 3. Direcciones de vuelo detectadas por el radar y ambos observadores en los sitios de estudio. / Flight directions detected by the radar and both observers at the study sites.

Dirección de vuelo	Playa Brava			Playa Rinconada		
	Radar	Obs. 1	Obs. 2	Radar	Obs. 1	Obs. 2
Norte	124	23	29	180	11	50
Este	101	6	36	296	69	99
Sur	190	14	24	108	11	8
Oeste	60	4	15	237	55	73
TOTAL	**475**	**47**	**104**	**821**	**146**	**230**

TABLA 4. Frecuencias de velocidades de vuelo registradas por el radar en las localidades de estudio. / Flight speed frequencies recorded by the radar at the study sites.

Rango de velocidad (m/s)	Playa Brava	Playa Rinconada
0-5	0	0
6-10	134	161
11-15	155	248
16-20	109	251
21-25	69	131
26-30	8	30
TOTAL	**475**	**821**

TABLA 5. Frecuencias de longitudes de trayectoria registradas por el radar en los sitios de estudio. **/** Frequencies of trajectory lengths recorded by the radar at the study sites.

Rango de longitud de trayectoria (m)	Playa Brava	Playa Rinconada
0 - 200	258	511
200 - 400	152	211
400 - 600	39	64
600 - 800	14	26
800 - 1.000	3	3
1.000 - 1.200	4	3
1.200 - 1.400	1	0
1.400 - 1.600	2	2
1.600 - 1.800	1	1
1.800 - 2.000	1	0
TOTAL	**475**	**821**

TABLA 6. Frecuencias de altura de vuelo registradas por el radar y ambos observadores en Playa Brava. / Frequencies of flight heights recorded by the radar and both observers at Playa Brava.

Rango de altura (m)	Radar	Obs 1	Obs 2
0-50	145	85	141
51-100	94	11	-
101-150	93	-	-
151-200	76	-	-
201-250	58	-	-
251-300	64	-	-
301-350	43	-	-
351-400	50	-	-
401-450	38	-	-
451-500	34	-	-
TOTAL	**695**	**96**	**141**

DISCUSIÓN

En la mayoría de las variables de tránsito aéreo de avifauna determinadas en este estudio, el radar obtuvo significativamente más registros que los observadores, especialmente de aquellas variables de tipo cuantitativas como el número de individuos, su dirección y altura de vuelo. La velocidad y longitud de trayectoria, por otra parte, sólo fueron registradas por el radar, no pudiendo ser determinadas por los observadores. La determinación de la especie fue la única variable, de tipo cualitativa, donde los datos proporcionados por el radar no permitieron una identificación, pero sí la experiencia del observador.

La tecnología del radar se basa en la medición de ecos electromagnéticos que son captados por el equipo una vez que rebotan en algún objeto en el espacio aéreo, lo que hace que las señales sean similares y poco específicas, dificultando la discriminación de especies (Beason *et al*. 2013; Rosa *et al*. 2016; Nilsson *et al*. 2018). Estas señales entregadas por el radar, sin embargo, permiten identificar "grupos de especies" (e.g., gaviotas, gaviotines, golondrinas) basados en el tamaño de las aves y sus patrones de vuelo (Cullinan *et al*. 2015; Gong *et al*. 2020; Bairlein 2022). Esto supone una desventaja en el uso del radar, pues conocer la identidad taxonómica de un ave es una información relevante cuando se quieren desarrollar modelos de riesgo de colisión, pues éstos son sensibles a características intrínsecas de las especies, como sus hábitos migratorios, morfología alar, altura de vuelo, entre otros (Band *et al*. 2007; Band 2012; Kleyheeg-Hartman *et al*. 2018; Gémard *et al*. 2025). La identidad de la especie cobra relevancia también cuando ésta se asocia a una categoría de amenaza (*i.e.* Vulnerable, En Peligro, En Peligro Crítico), lo que puede afectar el proceso de toma de decisiones e incluso, la viabilidad de un proyecto (Shamoun-Baranes *et al*. 2019). Debido a esto, es recomendable combinar el uso de radar con observación visual directa para lograr una identificación taxonómica más exacta (Dokter *et al*. 2013).

En todas las comparaciones realizadas entre lo detectado por el radar y los observadores, el primero proporcionó invariablemente más datos que estos últimos. También quedó en evidencia que hubo diferencias significativas entre los observadores, las que pueden atribuirse a las experiencias desiguales de ambas personas. Así, el observador 2 (AS), con mayor experiencia en la observación de aves, identificó más especies (Tabla 1) y reportó mayor número de individuos (Tabla 2) que el observador 1 (FY), de menor experiencia. Las diferencias entre observadores forman parte de los sesgos que todo estudio presenta en su diseño (Bibby *et al*. 2000;

Scher & Clark 2023) y, si no son corregidos, se pueden traducir en importantes errores en la cantidad y calidad de los datos reportados. Este aspecto no es considerado habitualmente por la autoridad ambiental (SEA, SAG), bastando declarar sólo la cantidad de observadores que participó, pero no su grado de conocimiento y experiencia en el tema. Considerando estos antecedentes, es posible suponer que la evaluación de muchos proyectos que ingresan al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) están declarando especies, movimientos y rutas de vuelo de avifauna con importantes errores.

El número de individuos detectados por el radar fue significativamente mayor que los reportados por ambos observadores. La capacidad de detección del radar utilizado en este estudio, girando a 38 RPM, es claramente superior que la de los observadores, quienes, en el ejercicio de avistar un ave, reconocerla y registrarla ocupan tiempo que los distrae de detectar otros individuos que puedan estar pasando en ese mismo momento por otras posiciones.

Cada observador asignó de forma estimativa una dirección de vuelo para cada ave que detectó, lo que se logra utilizando puntos de referencia (*e.g*., línea de costa, cerros, caminos), los que, sin embargo, se van confundiendo con la constante observación hacia las diferentes direcciones (Dokter *et al*. 2013). Además, esta variable es determinada por el observador de manera instantánea y no considera eventuales cambios de dirección que el ave pueda tener a lo largo de su desplazamiento total. Todo esto puede generar reportes erróneos. El radar, por otra parte, determina la dirección de vuelo a través de la asignación de un identificador a cada objeto en vuelo, lo que permite su seguimiento a lo largo de todo su desplazamiento. En terreno, el equipo se orienta hacia el norte, de manera que toda la información recabada queda inmediatamente definida respecto de su posición, señalando incluso el azimut o desviación en grados con respecto al norte. Todo esto permite una determinación mucho más completa y precisa de esta variable. Además, al quedar registrados en un archivo, esta información puede consultarse nuevamente y ser reanalizada si es preciso. La dirección de los vuelos posibilita determinar rutas que son utilizadas por la avifauna y con esto conocer potencialmente el riesgo de colisión (Band *et al*. 2007; Band 2012; Kleyheeg-Hartman *et al*. 2018) o bien evitar potenciales obstáculos para las aves (Jenkins *et al*. 2018).

La velocidad de vuelo y longitud de trayectoria son difíciles de determinar para los observadores, pues, al no contar con puntos de referencia a los cuales recurrir en cada detección, se pierde con facilidad la habilidad para definir cualquiera de estas variables. Además, en condiciones de alta abundancia de aves, la concentración del observador se distrae en otras tareas, como determinar la especie y su conteo (Bibby *et al*. 2000). El radar, si bien requiere de un procesamiento posterior de la información, registra la velocidad de cada punto que detecta y le asigna una velocidad media al track resultante de varios puntos con el mismo identificador.

Los observadores sólo lograron discriminar aves hasta 100 m de altura, lo que posiblemente se debe a la ausencia de elementos de referencia en el paisaje que les permitieran estimar vuelos a mayores alturas. Es probable, sin embargo, que la habilidad de los observadores pudiera mejorarse con mayor práctica. El radar registró aves hasta 500 m de altura, lo que lejos de representar su límite de detección, obedece a la configuración asignada en este estudio. La determinación precisa de la altura de vuelo es importante para el cálculo de modelos de riesgo de colisión (Band *et al*. 2007; Band 2012; Kleyheeg-Hartman *et al*. 2018), ya que algunas especies de aves, sobre todo con hábitos de migración nocturna, se desplazan a alturas dentro de la zona de operación de las palas de los aerogeneradores (Cohen *et al*. 2022).

El presente trabajo se realizó en condiciones diurnas, con buenas condiciones climáticas, topografía prácticamente plana y con amplia visibilidad (>1000 m). A la luz de los resultados obtenidos en estas condiciones favorables, las ventajas del uso de radar para evaluación de tránsito aéreo de avifauna serían aún más evidentes en condiciones de visibilidad reducida, clima adverso o incluso durante la noche (Beason *et al*. 2013; Urmy & Warren 2017; Nilsson *et al*. 2018). Todas estas condiciones afectan la capacidad de detección y la motivación de las personas que realizan las observaciones en terreno, sesgando sus resultados (Bibby *et al*. 2000). En Chile, especies como la gaviota garuma (*Leucophaeus modestus*) y algunas especies de golondrinas de mar (principalmente del género *Hydrobates*) realizan desplazamientos nocturnos entre la costa y sus áreas de nidificación en el interior del Desierto de Atacama. Estos sitios son de alto interés para proyectos de generación de energía eólica, transmisión eléctrica y explotación minera y la autoridad ambiental exige el levantamiento de información de tránsito aéreo de avifauna, el cual necesariamente

debe realizarse durante la noche (Aguilar-Pulido *et al*. 2021; Catoni *et al*. 2021). Para la gaviota garuma existe evidencia de mortalidad por colisión con torres de alta tensión y tendidos eléctricos en las regiones de Tarapacá y Antofagasta (Aguilar-Pulido *et al*. 2021; Malinarich 2016), lo que sugiere que estas grandes estructuras representan riesgos efectivos para el desplazamiento de esta especie. Para golondrinas de mar, aunque no hay evidencia clara de mortalidad, se reconocen como amenazas las estructuras que interfieran en su desplazamiento, incluyendo líneas de transmisión eléctrica, parques eólicos y proyectos fotovoltaicos, entre otros (MMA 2022).

Para que sea eficaz, la evaluación ambiental de un proyecto debe estar fundamentada en información precisa, de manera que los impactos que se generen puedan ser abordados adecuadamente (Morgan 2012). Para los proyectos que generan obstáculos al desplazamiento de avifauna, la obtención de información de calidad es clave para la formulación de modelos de colisión (Band *et al*. 2007; Band 2012; Kleyheeg-Hartman *et al*. 2018) o bien para adecuar el diseño de la instalación previo a su construcción (Jenkins *et al*. 2018) de manera que no afecten significativamente la conservación de las especies y los servicios ecosistémicos (Baker *et al.* 2013). En este contexto, el radar es una herramienta muy versátil que permite detectar, seguir y monitorear la actividad de animales a escalas espaciales y temporales que no son posibles con otras técnicas, incluida la observación humana. Sin embargo, como toda técnica, tiene sus limitaciones que requieren de entrenamiento y experiencia para obtener e interpretar adecuadamente los datos obtenidos (Beason *et al*. 2013).

El presente trabajo sugiere que la evaluación de tránsito aéreo, como se está llevando a cabo con la normativa nacional actual, no está aportando la información más adecuada. De 126 proyectos de generación de energía eólica aprobados por el SEA (https://www.sea.gob.cl) entre 2006 y 2024, 98 reportaron alguna metodología de levantamiento de línea base de avifauna. De estos últimos, sólo 26 evaluaron tránsito aéreo y la totalidad lo hizo utilizando observación directa. Es importante destacar, sin embargo, que la autoridad ambiental está recomendando el uso del radar como metodología para determinar abundancia, rutas y altura de vuelo en algunas especies (SEA 2025b) y que, en los últimos años, algunas empresas han realizado estudios con radar para caracterizar tránsito aéreo. Sin bien aún existen importantes barreras al uso de la tecnología de radar (*e.g.,* alto costo, transporte), sería muy recomendable su implementación progresiva en estudios de evaluación ambiental de tránsito aéreo. Esto cobra especial relevancia en el contexto actual, en que se proyecta una importante construcción de parques eólicos en el país para la generación de energías renovables con bajas emisiones (*e.g*., Martínez-Martínez *et al*. 2023; Cacciuttolo *et al*. 2025) y que podrían tener considerables impactos en la fauna local y el paisaje si no se diseñan con la información adecuada.

AGRADECIMIENTOS

La Corporación CULTAM (Antofagasta) facilitó el radar y todos los equipos accesorios. Econativa Consultores (Santiago) dio las facilidades a FY para desarrollar el trabajo de campo. Carlo Catoni, Ornis Italica (Roma, Italia) proporcionó valiosos consejos para el uso del radar y tratamiento de los datos. Christian Ibáñez (UNAB) nos ayudó con el tratamiento de los datos y nos prestó su asesoría estadística. Dos revisores anónimos hicieron valiosos comentarios y sugerencias al texto. A todos ellos nuestros sinceros agradecimientos.

REFERENCIAS

Abbott, A.L., Deng, Y., Badwey, K., Farnsworth, A., Horton, K.G. 2023. Inbound arrivals: using weather surveillance radar to quantify the diurnal timing of spring trans-Gulf bird migration. Ecography 8: e06644. https://doi.org/10.1111/ecog.06644

Aguilar-Pulido, R., Catoni, C., Luna Jorquera, G., Perucci, M., Dell`Omo, G., Zavalaga, C., Simeone, A. 2021. Distribución, características y situación actual de las colonias de la gaviota garuma (*Leucophaeus modestus*) en el Desierto de Atacama, Norte de Chile. Revista Chilena de Ornitología 27: 21-36.

Bairlein, F. 2022. Das grosse Buch vom Vogelzug. AULA-Verlag, Wiebelsheim. 367 pp.

Baker, J., Sheate, W.R., Phillips, P., Eales, R. 2013. Ecosystem services in environmental assessment - Help or hindrance? Environmental Impact Assessment Review 40(1): 3-13. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2012.11.004

Band, W., Madders, M, Whitfield, D.P. 2007. Developing field and analytical methods to assess avian collision risk at wind farms. In: De Lucas, M., Janss, G.F.E., Ferrer,

M. (Eds.) Birds and wind farms risk assessment and mitigation, pp. 259-275. Quercus, Madrid.

Band, W. 2012. Using a collision risk model to assess bird collision risk for offshore wind farms. Guidance Document. Strategic Ornithological Support Services (SOSS). 62 pp.

Beason, R., Nohara, T., Weber, P. 2013. Beware the Boojum: caveats and strengths of avian radar. Human-Wildlife Interactions 7: 16-46.

Bernardino, J., Bevanger, K., Barrientos, R., Dwyer, J.F., Marques, A.T., Martins, R.C., Shaw, J.M., Silva, J.P., Moreira, F. 2018. Bird collisions with power lines: State of the art and priority areas for research. Biological Conservation 222: 1-13. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.02.029

Bibby, C., Burguess, N., Hill, D., Mustoe, S. 2000. Bird Census Techniques. Second edition. Academic Press, London. 302 pp.

Bonter, D.N., Gauthreaux Jr., S.A., Donovan, T.M. 2008. Characteristics of important stopover locations for migrating birds: remote sensing with radar in the Great Lakes Basin. Conservation Biology 23(2): 440-448. https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2008.01085.x

Bridge, E.S., Thorup, K., Bowlin, M.S., Chilson, P.B., Diehl, R.H., Fléron, R.W., Hartl, P., Roland, K., Kelly, J.F., Robinson, W.D., Wikelski, M. 2011. Technology on the move: Recent and forthcoming innovations for tracking migratory birds. BioScience 61(9): 689-698. https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.9.7

Cacciuttolo, C., Huertas, A., Montoya, B., Cano, D. 2025. The present and future of production of green hydrogen, green ammonia, and green e-fuels for the decarbonization of the planet from the Magallanes region, Chile. Applied Sciences 15: 6228. https://doi.org/10.3390/app15116228

Camiña, A. 2025. Impacto de la energía eólica en aves y murciélagos en la Región de Coquimbo, centro-norte de Chile. Gayana 89(1): 29-48.

Catoni, C., Aguilar-Pulido, R., Zavalaga, C., Dell'Omo, G. 2021. Radar reveals the nocturnal flights of breeding Grey Gulls *Leucophaeus modestus* in the Atacama Desert, Chile. Bird Study 68(3): 351-358. https://doi.org/10.1080/00063657.2022.2092067

Cohen, E.B., Buler, J.J., Horton, K.G., Loss, S.R., Cabrera-Cruz, S.A., Smolinsky, J.A., Marra, P.P. 2022. Using weather radar to help minimize wind energy impacts on nocturnally migrating birds. Conservation Letters 15: e12887. https://doi.org/10.1111/conl.12887

Cullinan, V.I., Matzner, S., Duberstein, C.A. 2015. Classification of birds and bats using flight tracks. Ecological Informatics 27: 55-63. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2015.03.004

Díaz, S., Fargione, J., Chapin III, F.S., Tilman, D. 2006. Biodiversity loss threatens human well-being. PlosBiology 4: e277. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0040277

Díaz, S., Malhi, Y. 2022. Biodiversity: concepts, patterns, trends, and perspectives. Annual Review of Environment and Resources 47: 31-63. https://doi.org/10.1146/annurev-environ-120120-054300

Dirzo, R., Young, H.S., Galetti, M., Ceballos, G. Isaac, N.J.B., Collen, B. 2014. Defaunation in the Anthropocene. Science 345: 401-406. https://doi.org/10.1126/science.1251817

Dokter, A.M., Baptist, M.J., Ens, B.J., Krijgsveld, K.L., van Loon, E.E. 2013. Bird radar validation in the field by time-referencing line-transect surveys. Plos One 8(9): e74129. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0074129

Garthe, S., Schwemmer, H., Peschko, V., Markones, N., Müller, S., Schwemmer, P., Mercker, M. 2023. Large-scale effects of offshore wind farms on seabirds of high conservation concern. Scientific Reports 13: 4779. https://doi.org/10.1038/s41598-023-31601-z

Gémard, C., Duriez, O., Chappe, O., Duclos, G., Besnard, A. 2025. Towards a better understanding of avian collision in wind energy facilities using automatic detection systems. Journal Applied Ecology 62:1437-1448. https://doi.org/10.1111/1365-2664.70055

Gómez-Catasús, J., Garza, V., Traba, J. 2018. Wind farms affect the occurrence, abundance and population trends of small passerine birds: The case of the Dupont's lark. Journal of Applied Ecology 55(4): 2033-2042. https://doi.org/10.1111/1365-2664.13107

Gong, J., Yan, J., Li, D., Chen, R. 2020. Using radar signatures to classify bird flight modes between flapping and gliding. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters 17(9): 1518-1522. https://doi.org/10.1109/LGRS.2019.2949027

Jaramillo, A. 2005. Aves de Chile. Lynx ediciones, Barcelona. 240 pp.

Jaureguiberry, P., Titeux, N., Wiemers, M., Bowler, D.E., Coscieme, L., Golden, A.S., Guerra, C.A., Jacob, U., Takahashi, Y., Settele, J., Díaz, S., Molnár, Z., Purvis, A. 2022. The direct drivers of recent global anthropogenic biodiversity loss. Science Advances 8: eabm9982.

Jenkins, A.R., Reid, T., Plessis, J. du, Colyn, R., Benn, G., Millikin, R. 2018. Combining radar and direct observation to estimate pelican collision risk at a proposed wind farm on the Cape west coast, South Africa. PLoS ONE 13. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0192515.

Kleyheeg-Hartman, J.C., Krijgsveld, K.L., Collier, M.P., Poot, M.J.M., Boon, A.R., Troost, T.A., Dirksen, S. 2018. Predicting

bird collisions with wind turbines: comparison of the new empirical flux collision model with the SOSS band model. Ecological Modelling 387: 144-153. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.06.025

Malinarich, V. 2016. Diagnóstico poblacional de la gaviota garuma *Leucophaeus modestus* (Tschudi, 1843), en la Zona Norte de Chile. Informe no publicado. Unidad de Recursos Naturales Renovables. Servicio Agrícola y Ganadero (SAG), Región de Tarapacá, Chile. 39 pp.

Martínez-Martínez, Y., Dewulf, J., Aguayo, M., Casas-Ledón, Y. 2023. Sustainable wind energy planning through ecosystem service impact valuation and exergy: A study case in south-central Chile. Renewable and Sustainable Energy Reviews 178: 113252. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113252

Martínez-Piña, D. 2023. Aves de Chile, guía de campo. Museo Ediciones, Santiago. 469 pp.

May, R., Steinheim, Y., Kvaløy, P., Vang, R., Hanssen, F. 2017. Performance test and verification of an off-the-shelf automated avian radar tracking system. Ecology and Evolution 7(15): 5930-5938. https://doi.org/10.1002/ece3.3162

Morgan, R.K. 2012. Environmental impact assessment: the state of the art. Impact Assessment and Project Appraisal 30(1): 5-14. https://doi.org/10.1080/14615517.2012.661557

MMA. 2022. Plan de recuperación, conservación y gestión de las golondrinas de mar del norte de Chile. Ministerio de Medio Ambiente. Diario Oficial de la República de Chile 43.237: 1-38.

Nilsson, C., Dokter, A.M., Schmid, B., Scacco, M., Verlinden, L., Bäckman, J., Haase, G., Dell'Omo, G., Chapman, J.W., Leijnse, H., Liechti, F. 2018. Field validation of radar systems for monitoring bird migration. Journal Applied Ecology 55: 2552-2564. https://doi.org/10.1111/1365-2664.13174

Panuccio, M., Dell'Omo, G., Bogliani, G., Catoni, C., Sapir, N. 2019. Migrating birds avoid flying through fog and low clouds. International Journal of Biometeorology 63(2): 231-239. https://doi.org/10.1007/s00484-018-01656-z.

Peschko, V., Schwemmer, H., Mercker, M., Markones, N., Borkenhagen, K., Garthe, S. 2024. Cumulative effects of offshore wind farms on common guillemots (*Uria aalge*) in the southern North Sea - climate versus biodiversity? Biodiversity and Conservation 33: 949-970. https://doi.org/10.1007/s10531-023-02759-9

Rahman, A., Farrok, O., Haque, M.M. 2022. Environmental impact of renewable energy source based electrical power plants: Solar, wind, hydroelectric, biomass, geothermal, tidal, ocean, and osmotic. Renewable and Sustainable Energy Reviews 161: 112279. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112279

Rosa, I.M.D., Marques, A.T., Palminha, G., Costa, H., Mascarenhas, M., Fonseca, C., Bernardino, J. 2016. Classification success of six machine learning algorithms in radar ornithology. Ibis 158(1): 28-42. https://doi.org/10.1111/ibi.12333

Scher, C.L., Clark, J.S. 2023. Species traits and observer behaviors that bias data assimilation and how to accommodate them. Ecological Applications 33: e2815. https://doi.org/10.1002/eap.2815

Schuster, E., Bulling, L., Köppel, J. 2015. Consolidating the state of knowledge: A synoptical review of wind energy's wildlife effects. Environmental Management 56: 300-331. https://doi.org/10.1007/s00267-015-0501-5

SAG. 2015. Guía para la evaluación del impacto ambiental de proyectos eólicos y de líneas de transmisión eléctrica en aves silvestres y murciélagos. Servicio Agrícola y Ganadero, Ministerio de Agricultura, Santiago, Chile. 120 pp.

SEA. 2025a. Guía Metodológica para la descripción de Ecosistemas Terrestres. Servicio de Evaluación Ambiental, Santiago, Chile. 219 pp.

SEA. 2025b. Criterio de evaluación en el SEIA: Golondrinas de mar en el marco del SEIA. Segunda edición. Servicio de Evaluación Ambiental, Santiago, Chile. 51 pp.

Shamoun-Baranes, J., Nilsson, C., Bauer, S., Chapman, J. 2019. Taking radar aeroecology into the 21st century. Ecography 42(5): 847-851. https://doi.org/10.1111/ecog.04582

Thaxter, C.B., Buchanan, G.M., Carr, J., Butchart, S.H.M., Newbold, T., Green, R.E., Tobias, J.A., Foden, W.B., O'Brien, S., Pearce-Higgins, J.W. 2017. Bird and bat species' global vulnerability to collision mortality at wind farms revealed through a trait-based assessment. Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences 284(1862). https://doi.org/10.1098/rspb.2017.0829

Urmy, S.S., Warren, J.D. 2017. Quantitative ornithology with a commercial marine radar: standard-target calibration, target detection and tracking, and measurement of echoes from individuals and flocks. Methods in Ecology and Evolution 8: 860-869. https://doi.org/10.1111/2041-210X.12699

van Erp, J.A., van Loon, E.E., De Groeve, J., Bradarić, M., Shamoun-Baranes, J. 2024. A framework for post-processing bird tracks from automated tracking radar systems. Methods in Ecology and Evolution 15(1): 130-143. https://doi.org/10.1111/2041-210X.14249