



Facultad de Ingeniería

Departamento de Ciencias de la Ingeniería para la Sostenibilidad

Ingeniería Civil Ambiental.

ANÁLISIS TÉCNICO DEL RIESGO DE COLISIÓN DE AVES FRENTE A LA
INSTALACIÓN DE AEROGENERADORES DE PROYECTOS DE HIDRÓGENO
VERDE EN LA REGIÓN DE MAGALLANES.

Seminario de título para optar al título de ingeniero civil ambiental y el grado
académico licenciado en ciencias de la ingeniería.

Javier Angel Eduardo Legaza Carrasco

Profesora Guía: Mg. Gabriela Cristina Gallardo Aliaga

Valparaíso, Chile 2024.

Índice de Contenido

i. Resumen.....	6
ii. Abstract	7
1. Introducción.....	8
2. Planteamiento del Problema	11
3. Pregunta Investigación e Hipótesis	13
4. Objetivos	14
4.1. Objetivo General:.....	14
4.2. Objetivos específicos:.....	14
5. Marco Teórico	15
5.1. ¿Qué es el hidrógeno verde?	15
5.2. Antecedentes globales del hidrógeno verde	16
5.3. Antecedentes Nacionales del Hidrógeno Verde.....	16
5.4. Hidrógeno verde y los parques eólicos	18
5.5. Impactos De Los Parques Eólicos Sobre Las Aves.	19
5.5.1. Desplazamiento de especies	20
5.5.2. Pérdida de Hábitat	20
5.5.3. Colisión Contra Aerogeneradores	21
5.5.4. Tasas de colisión documentadas	22
5.6. Modelación matemática y tipos de Modelos	22
5.7. Modelos De Riesgo De Colisión De Aves	23
5.7.1. Limitaciones y suposiciones de los modelos de riesgo de colisión	24
5.7.2. Modelos de riesgo de colisión en Chile	27

6. Marco Normativo	28
6.1. Legislación ambiental nacional y evaluación de proyectos de hidrógeno verde.....	28
6.2. Análisis de ingreso de proyectos de hidrógeno verde al SEIA	29
6.2.1. Tipologías De La Ley Aplicables A Proyectos De Hidrógeno Verde	30
6.2.2. Análisis De Evaluación Ambiental De Proyectos Con Aerogeneradores En El País	32
7. Metodología	33
7.1. Revisión bibliográfica.....	33
7.2. Análisis y pruebas de modelos.....	33
7.3. Definir datos y área de estudio.....	34
7.4. Obtención de tasas de colisión de aves.....	36
7.5. Análisis de riesgo de colisión de aves contra aerogeneradores.....	37
8. Resultados	38
8.1. Revisión bibliográfica.....	38
8.2. Análisis del modelo de Band	40
8.3. Recopilación de datos para el modelamiento	40
8.3.1. Antecedentes de proyecto “Parque Eólico Faro del Sur”	41
8.3.2. Datos aerogeneradores proyecto “Parque eólico Faro del sur”	41
8.3.3. Datos de Tránsito de Aves proyecto “Parque eólico Faro del sur”	41
8.3.4. Datos adicionales	43
8.4. Tasas de colisión de caiques utilizando el modelo de Band	45

8.5.	Análisis de Riesgo de colisión de aves contra aerogeneradores	47
9.	Discusión.....	50
10.	Conclusiones	57
11.	Bibliografía.....	59
12.	Anexos.....	70

Índice de Tablas

Tabla 1. Tipologías de la ley 19.300 aplicables a proyectos de hidrógeno verdes que contemplen el uso de aerogeneradores	31
Tabla 2. Análisis de proyectos que han ingresado al SEIA en el país que contemplen el uso de aerogeneradores	32
Tabla 3. Datos de entrada necesarios para el modelo de Band	34
Tabla 4. Rangos de riesgo de colisión.....	37
Tabla 5. Modelos de riesgo de colisión encontrados en bibliografía.....	39
Tabla 6. Especificaciones técnicas de los aerogeneradores del proyecto “Parque eólico del sur”	41
Tabla 7. Cálculo de la densidad de caiques	43
Tabla 8. Cálculo velocidad de Vuelo.....	44
Tabla 9. Resumen de los de entrada para el modelo.....	45
Tabla 10. Tasas de colisión obtenidas con el modelo de Band, por mes y por año en los tres diferentes escenarios.....	46
Tabla 11. Riesgo de colisión de aves contra aerogeneradores en relación con la tasa de evitación de las aves	47

Índice de Gráficos

Gráfico 1. Número de registros del proyecto “Parque eólico Faro del Sur”	42
Gráfico 2. Colisión de aves contra aerogeneradores por mes para el escenario 1	48
Gráfico 3. Colisión de aves contra aerogeneradores por mes para el escenario 2	48
Gráfico 4. Colisión de aves contra aerogeneradores por mes para el escenario 3	49

i. Resumen

El presente estudio se enfoca en la aplicación de un modelo de evaluación de riesgo de colisión en un proyecto eólico dirigido a la generación de hidrógeno verde, situado en la XII Región de Magallanes y de la Antártica Chilena. El propósito principal radica en la capacidad de anticipar las tasas de colisión entre aves locales y los aerogeneradores planificados para este tipo de iniciativas.

Inicialmente, se lleva a cabo una exhaustiva revisión bibliográfica con el fin de identificar y contrastar los diversos modelos existentes de riesgo de colisión de aves, culminando en la selección del modelo propuesto por Band (2012). Se procede entonces a estimar las tasas de colisión en múltiples escenarios para el proyecto "Parque Eólico Faro del Sur". Los resultados obtenidos indican que dichas tasas se sitúan por debajo de los registros documentados a nivel global. Además, se logra discernir cómo varían las colisiones en relación con otras variables, tales como la velocidad de rotación de los aerogeneradores y las tasas de evitación de las aves.

En la fase final del estudio, se analizan las ventajas y desventajas asociadas a la implementación de este tipo de herramientas para mitigar el riesgo de colisión de aves. El estudio realizado evidencia la urgente necesidad de implementar medidas preventivas para proteger la avifauna ante proyectos que podrían afectar su presencia y desarrollo en la región, así como en todo Chile. Estos hallazgos resaltan la importancia de considerar cuidadosamente el impacto medioambiental de las iniciativas de desarrollo, especialmente en áreas sensibles como la XII Región de Magallanes y de la Antártica Chilena. La conservación de la biodiversidad, incluida la protección de las aves locales, debe ser una prioridad en la planificación y ejecución de proyectos, promoviendo así un equilibrio sostenible entre el progreso humano y la preservación del entorno natural.

ii. Abstract

This paper focuses on the use of a collision risk model in a wind farm project for green hydrogen production in the Magallanes y la Antártica Chilena Region, Chile. The model aims to predict the collision rates of local birds against wind turbines used for these types of projects.

The work begins with a literature review to identify and compare existing bird collision risk models, resulting in the Band model (2012) being the most suitable for the aims of this project. An estimation of collision rates in different scenarios was obtained for the “Faro del Sur Wind Farm” project, whose results indicate that the collision rates would be below those documented globally. In addition, it was also possible to determine how collisions vary with respect to other variables such as the rotation speed of the wind turbines and the birds’ avoidance rates.

In the final phase of the study, the advantages and disadvantages associated the implementation of this type of tools to mitigate the risk of bird collision in renewable energy projects are analyzed. The need to protect avifauna is emphasized, and recommendations are proposed to minimize impacts. These findings highlight the importance of carefully considering the environmental impact of development initiatives, especially in sensitive areas such as the XII Region of Magallanes and Chilean Antarctica. Biodiversity conservation, including the protection of local birds, should be a priority in project planning and implementation, thus promoting a sustainable balance between human progress and the preservation of the natural environment.

1. Introducción

Actualmente, el planeta se enfrenta a grandes y nuevos desafíos para combatir y frenar el cambio climático y sus efectos. La contaminación antropogénica, generación de gases efecto invernadero, así como también el aumento de la temperatura de la atmósfera, océanos y continentes, han ocasionado consecuencias tanto en los aspectos sociales, económicos, como también climáticos (IPCC, 2021). Es aquí donde adquiere importancia adoptar nuevas medidas y compromisos ambientales a nivel mundial para llegar a un equilibrio entre lo que es la actividad económica, el bienestar social y el cuidado del medio ambiente.

Chile no está ajeno a las problemáticas relacionadas con el cambio climático y es así como se han promulgado planes, políticas y leyes con diversos compromisos ambientales, incluida la participación en convenciones internacionales como el Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático y el posterior Acuerdo de París sobre Cambio Climático. El compromiso de Chile para enfrentar los desafíos del Cambio Climático ha sido concreto y constante, robusteciéndose en los últimos años tras la elaboración y promulgación de la Actualización de la Contribución Nacional Determinada, la Estrategia Climática de Largo Plazo y la Ley Marco de Cambio Climático (MMA, 2022).

Por lo anterior, Chile tiene el compromiso de implementar las acciones necesarias e inmediatas para cumplir con los compromisos adquiridos, por sobre todo movilizar inversiones públicas y privadas en la senda de un desarrollo sostenible, que considere las variables ambientales, sociales y económicas de manera equilibrada (Gobierno de Chile, 2020).

La energía es un factor clave y estratégico para alcanzar las metas de desarrollo tanto en lo económico como en lo social. Su generación y uso representan oportunidades para promover cambios positivos, permitiendo así a

la sociedad avanzar hacia un desarrollo equitativo y sustentable (Ministerio de Energía, 2017). Pero al mismo tiempo, en el país el sector energía es el principal responsable de las emisiones de gases de efecto invernadero, alcanzando el 77% de las emisiones totales en el año 2018 (García, 2021).

Dentro de las acciones que tiene el país en su agenda hacia el 2030, se destaca aumentar sustancialmente el porcentaje de la energía renovable en el conjunto de fuentes de energía. En lo particular, la Región de Magallanes tiene una ambiciosa agenda energética en torno a la implementación del hidrógeno verde como un método de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. El Estado de Chile ha trazado su estrategia de desarrollo de hidrógeno verde, fijando su primera etapa de activación de la industria y desarrollo de la exportación para el periodo 2020-2025, luego su segunda etapa de apalancamiento de la experiencia local, para entrar en mercados globales entre 2025 y 2030, y una tercera etapa que buscará explotar las sinergias y economías de escala para avanzar como proveedor global de energéticos limpios desde 2030 en adelante (Observatorio Laboral de SENCE en Magallanes, 2021).

La energía eólica es la energía renovable no convencional que se utilizará para el desarrollo de la industria del hidrógeno verde en la Región de Magallanes, aprovechando así las grandes ventajas climáticas que tiene el territorio para la implementación de ésta.

A pesar de todos los beneficios que pueden traer las energías renovables para combatir el inminente cambio climático actual, los megaproyectos energéticos inevitablemente siempre implican un impacto ambiental relacionado. La energía eólica es considerada la fuente energética más limpia dentro de las energías renovables. En comparación con la energía hidroeléctrica, fotovoltaica y geotérmica, la energía eólica genera una cantidad mínima de gases de efecto invernadero (Uribe et al, 2018). Sin embargo, uno

de los impactos directos es la mortalidad de aves por colisiones con las instalaciones, ya sea colisiones con las aspas en movimiento de las turbinas, con la torre o con las infraestructuras asociadas. Por lo tanto, es importante evaluar cuál es el impacto ambiental de estos proyectos y así tomar medidas acordes a la protección ambiental de las aves del sector (González et al, 2014).

Algunos autores sugieren que la fauna voladora puede ser impactada por la instalación de parques eólicos (por ej: Uribe et al, 2018; Dempsey y Hein, 2023; Aschwanden et al, 2018; Bernardino et al, 2013; Kleyheeg et al, 2018; Strickland et al, 2011; Pérez et al, 2021; Drewitt y Langston, 2006; entre otros), sin embargo, cuando su ubicación es debidamente planeada, pueden tener un mínimo impacto en la fauna, en comparación con otras fuentes de mortalidad de origen antropogénico (Zolotoff, 2020). Por lo que se necesita una planificación estratégica en donde se debe evitar elegir áreas con altas densidades de aves, en particular si éstas son sensibles a colisionar con aerogeneradores o están amenazadas o catalogadas en alguna categoría de conservación (González et al, 2014).

Si bien Chile es un país que está en una transición energética hacia el uso de energías renovables y disminuir la generación de gases de efecto invernadero, no existe demasiada información local y concisa sobre el impacto real de los parques eólicos. Esta investigación busca levantar información nueva y relevante para la agenda energética nacional, y por sobre todo apoyar el acelerado desarrollo del hidrógeno verde en el territorio. Analizando el riesgo de colisión de las aves de la región con los aerogeneradores con la obtención de indicadores confiables, utilizando datos reales sobre el parque eólico, el comportamiento, ubicación y características del vuelo de las aves, así como también aspectos importantes sobre la naturaleza del territorio y sus particularidades.

2. Planteamiento del Problema

El desarrollo energético del país entorno a diversos proyectos de producción de hidrógeno verde en la Región de Magallanes, podría tener un impacto en las aves locales a causa de la construcción de parques eólicos con numerosos y grandes aerogeneradores en diferentes comunas del territorio.

Según menciona la “Guía para la Evaluación del Impacto Ambiental de Proyectos Eólicos y de Líneas de Transmisión Eléctrica en Aves Silvestres y Murciélagos” del Servicio Agrícola Ganadero del año 2015, uno de los principales impactos de los proyectos con parques eólicos es la colisión de las aves con aerogeneradores.

Los principales factores que influyen en la colisión de aves contra los aerogeneradores son de tipo estructurales, tal como la distribución del parque eólico, la ubicación de cada aerogenerador y el tamaño de las estructuras. Factores biológicos como la maniobrabilidad de vuelo y los voladores nocturnos y, por último, factores propios del sitio como la disponibilidad de alimento, áreas con alta concentración de aves, condiciones meteorológicas adversas, períodos y sitios de migración y topografía (SAG, 2015).

No todas las instalaciones eólicas presentan altas tasas de muertes de aves y el efecto de una instalación aparentemente varía según la especie, la ubicación geográfica, las características topográficas locales, la historia de vida de las especies y otros factores pueden desempeñar un papel en el número de muertes que se producen. Sin embargo, incluso sabiendo que ocurren estas muertes, el desarrollo de las instalaciones eólicas ha avanzado rápidamente, superando el ritmo de estudio de sus efectos ambientales. Como resultado, abunda la incertidumbre con respecto a las relaciones entre las instalaciones eólicas y la mortalidad de las aves, lo que dificulta predecir el impacto de una instalación antes de su construcción (New et al, 2015).

Ante la incertidumbre y la variabilidad en las tasas de colisión de aves con instalaciones eólicas, esta investigación tiene como objetivo principal determinar, mediante un modelo predictivo de riesgo de colisión de aves, la cantidad de aves locales expuestas a colisionar con las instalaciones de parques eólicos destinados a la producción de hidrógeno verde en la región. Además, se pretende discutir la aplicación de estos modelos como herramientas para la evaluación ambiental y la mitigación de impactos en la fauna voladora asociados a este tipo de proyectos.

3. Pregunta Investigación e Hipótesis

- **Pregunta Investigación:** ¿Es posible predecir, a través del modelamiento, la tasa de colisión de aves con aerogeneradores en sectores donde se instalarán parques eólicos para la producción de Hidrógeno Verde en la Región de Magallanes?
- **Hipótesis:** La tasa de colisión de aves contra aerogeneradores de parques eólicos para la producción de Hidrógeno Verde en la Región de Magallanes se podrá estimar numéricamente a través de un modelo de riesgo de colisión.

4. Objetivos

4.1. Objetivo General:

- Determinar cuál es la tasa de colisión de aves con aerogeneradores producto de los proyectos de Hidrógeno Verde, en la Región de Magallanes, a través de un modelo de riesgo de colisión de aves predictivo.

4.2. Objetivos específicos:

- Identificar cuáles son los modelos de riesgo de colisión de aves existentes aplicados en proyectos eólicos en la escena nacional e internacional.
- Aplicar un modelo de riesgo de colisión de aves en un proyecto de hidrógeno verde, que incluya aerogeneradores, sometido al sistema de evaluación de impacto ambiental en la Región de Magallanes.
- Interpretar tasas de colisión de aves obtenidas a través del modelo aplicado para identificar en qué condiciones pudiese haber mayor o menor riesgo de colisión dentro del parque eólico del proyecto.

5. Marco Teórico

5.1. ¿Qué es el hidrógeno verde?

En el último tiempo el hidrógeno verde ha generado mucho interés ya que se presenta como una alternativa para reducir los gases de efecto invernadero, esto debido a la posibilidad de producirse mediante la electrólisis del agua, un proceso que permite separar la molécula de agua en hidrógeno y oxígeno, usando energías renovables (SEA, 2021). El hidrógeno no es una fuente de energía primaria, ya que no se encuentra a libre disposición en la naturaleza para su uso, sino que se considera un vector energético, como por ejemplo sucede con la energía eléctrica. Un vector energético se considera un producto que requiere de una aportación de energía para ser obtenido y que cuenta con la particularidad de ser capaz de almacenar energía para, posteriormente, ser liberada de forma gradual cuando sea requerida (Zuriaga, 2021).

Gracias a sus características químicas, como su inflamabilidad y gran poder calorífico, el hidrógeno verde serviría para reemplazar los combustibles fósiles y utilizarlo en nuevas aplicaciones, tales como: transporte, calefacción, almacenamiento de energía, soporte de sistemas eléctricos y producción de subproductos derivados como amoníaco, etanol, metanol, e-gasolina, nitrato de amonio, peróxido de hidrógeno, entre otros (Lillo, 2020).

La producción del hidrógeno y sus derivados no es algo nuevo, existen otros métodos para su producción que son igualmente efectivos y que se utilizan actualmente en la industria (Jiménez, 2020). La obtención del hidrógeno depende netamente de la materia prima de la cual se obtiene, del origen de la energía utilizada y de sus emisiones. Ya que, así como existe el hidrógeno verde, también está el hidrógeno gris, azul y negro, los cuales utilizan el gas y el petróleo para su obtención (Hernández, 2023). En general podemos entender por hidrógeno verde aquel que se produce a través de la electrólisis del agua,

separando mediante electricidad obtenida a través de energías renovables, el átomo de oxígeno y de hidrógeno (Eterovic Martí, et al., 2023).

5.2. Antecedentes globales del hidrógeno verde

A nivel mundial se espera que la demanda de hidrógeno verde crezca rápidamente y es así como muchos gobiernos y grandes empresas han reconocido la importancia estratégica del hidrógeno verde y han comenzado a realizar fuertes inversiones (IRENA, 2021).

Ya en el año 2021, 12 países, más la Unión Europea, habían publicado sus estrategias nacionales sobre el hidrógeno verde. El interés y el apoyo mundial es cada vez mayor, y es así que otros países ya están desarrollando sus estrategias nacionales en torno al desarrollo de esta industria, lo que demuestra una clara aceleración del interés de los gobiernos, incluido Chile, para cumplir con sus metas de carbono-neutralidad para el futuro (World Energy Council, 2021).

Se espera que el hidrógeno verde desempeñe un papel importante en sectores con alto consumo energético y que son difíciles de descarbonizar (IRENA, 2021). Además, ayudará a reducir el consumo de energía y las emisiones contaminantes provenientes del uso de otros combustibles a nivel mundial, así como también ayudará a impulsar el crecimiento económico y crear nuevos puestos de trabajo en el país (Zuriaga, 2021). Antecedentes Nacionales del Hidrógeno Verde

En la actualidad, Chile es uno de los países con mejores perspectivas de costo en el desarrollo de la industria de generación de hidrógeno verde y sus derivados, siendo reconocido internacionalmente por ello (Gobierno Regional de Biobío, 2021).

Nuestro país tiene condiciones privilegiadas para el desarrollo de la industria del hidrógeno verde, es rico en energías renovables necesarias para

su producción, posee fuertes vientos de norte a sur y la radiación solar más alta del mundo en el desierto de Atacama. El gran potencial renovable del país podría convertirlo en el productor más eficiente y competitivo de hidrógeno verde en el mundo (Ziehe et al, 2021).

A la fecha se han anunciado más de 60 de estos proyectos en Chile, que consideran principalmente, las regiones de Antofagasta y Magallanes, por su potencial solar y eólico, respectivamente (SEA, 2021). Lo anterior, es consistente con la “Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde, del Ministerio de Energía”, lanzada en noviembre de 2020, la cual indica que “se deben focalizar los esfuerzos en el despliegue de las tecnologías del hidrógeno verde, que utiliza energía eléctrica 100% renovable y sin emisiones de dióxido de carbono (Ministerio de Energía, 2020). Esta apunta a convertir al país en líder mundial en producción, uso doméstico y exportación de este combustible. Su objetivo, además de ayudar en el proceso de descarbonización nacional de algunas actividades productivas clave, es contribuir a lograr la meta de Chile de ser un país cero emisiones al 2050. Existen diversos países que esperan ser una potencia mundial de Hidrógeno Verde y Chile, con todo su potencial está entre ellos (Ministerio de Energía, 2022).

Chile es la única nación en América Latina con dos proyectos de hidrógeno verde en desarrollo: HyEx, perteneciente a la empresa Engie y Enaex), y HIF, que involucra a AME, Enap, Enel Green Power, Porsche y Siemens Energy. HyEx se encuentra ubicado en el norte del país, y HIF se encuentra en la geografía opuesta, en la Región de Magallanes y la Antártica Chilena (Wyczykier, 2023). Este último es el más grande de su tipo en América Latina y uno de los primeros a nivel mundial.

La Región de Magallanes se encuentra en una primera fase de la ambiciosa agenda energética en torno al hidrógeno verde, que consiste en la construcción de plantas demostrativas que tienen por objetivo probar

tecnologías para identificar los requerimientos que la industria necesitará en su expansión y consolidación (Observatorio Laboral de Sence en Magallanes, 2021).

5.3. Hidrógeno verde y los parques eólicos

Aunque es cierto que se puede utilizar cualquier fuente de energía renovable para la generación de hidrógeno, la energía eólica es la más recomendable para esta tarea. Los proyectos de energía eólica tienen el mayor potencial para la producción de hidrógeno verde por su competitividad económica y gran escalabilidad (Lee et al, 2021).

Dentro del gran potencial de energías renovables que tiene el país, la Región de Magallanes presenta uno que es fundamental: el recurso eólico. Estimaciones indican que la generación eléctrica eólica anual estimada en Magallanes podría sobrepasar en 7 veces la generación eléctrica actual de la matriz eléctrica chilena. Este gran potencial tiene directa relación con la capacidad de producción de hidrógeno con fuentes renovables, pudiendo llegar a más de 10 millones de toneladas de hidrógeno verde al año. Esto significaría que la participación de Chile en la producción de hidrógeno a nivel mundial podría pasar del 0,1% al 13%. La Región de Magallanes y de la Antártica Chilena merece particular interés para el desarrollo del hidrógeno verde, ya que su recurso eólico sobrepasa en órdenes de magnitud su capacidad de consumo eléctrico nacional y local (Ministerio de Energía, 2021)

Este tipo de energía no presenta inconvenientes para su instalación, la tecnología es ampliamente conocida y probada tanto en el territorio nacional, como en la escena internacional.

La Región de Magallanes posee excelentes condiciones para aprovechar el recurso eólico, con factores de plantas que han alcanzado hasta 54 % para el caso del parque eólico de Cabo Negro (Mesa Ciudadana de Energía para

Magallanes, 2015). Agreguemos de que esta tecnología no implica altos costos ya que, en el territorio también hay acceso a puertos y oleoductos existentes que a la fecha cuentan con rutas de exportación que podrían contribuir al desarrollo de la industria (Interamerican Development Bank, 2022).

5.4. Impactos De Los Parques Eólicos Sobre Las Aves.

La Región de Magallanes es reconocida mundialmente por su rica diversidad de aves. A modo de ejemplo, la Patagonia Chilena alberga cerca del 50% de las aves marinas registradas en todo Chile, convirtiendo a la región patagónica en un área de gran importancia en términos de la riqueza de especies de aves marinas para Chile y el mundo. (Hucke et al, 2021). También, las aves de la Patagonia poseen particularidades relevantes, como su amplio límite de distribución y la estacionalidad de algunas especies debido a las migraciones. Muchas especies de aves playeras se reproducen regularmente en Norteamérica y realizan extraordinarias migraciones a zonas de invernada hasta el extremo sur de Sudamérica, como Tierra de Fuego. Estas aves logran migrar a través de unos 13 países de Sudamérica y siete de Centroamérica (Schaeffe et al, 2006).

Pero en contraparte a las fascinantes cualidades de la fauna aviar de la región, a nivel mundial se ha documentado que la operación de parques eólicos genera impactos negativos para la vida silvestre, a través de muchos mecanismos (Tolvanen et al, 2023). De este modo, considerando que los proyectos que buscan emplazarse en la región para la producción de hidrógeno verde tienen en consideración el uso de energía eólica, existen impactos potenciales asociados. Entre estos impactos, se incluye la mortalidad de las aves por colisión con los aerogeneradores, el desplazamiento de especies por modificación del hábitat, el efecto barrera y la pérdida de hábitat (Uribe et al, 2018). También existe evidencia de que algunas aves son empujadas hacia el

suelo al ser envueltas en el vórtice creado por el movimiento de las aspas de las turbinas (Drewitt y Langston, 2006).

Se ha demostrado ampliamente que los parques eólicos pueden tener distintos efectos adversos sobre la flora y fauna, centrándose la mayoría de los estudios en la mortalidad de aves y murciélagos y en la pérdida de hábitat (De Lucas, 2007).

5.5. Desplazamiento de especies

Existe abundante literatura y artículos de revisión sobre los impactos del desarrollo de la energía eólica en la distribución, abundancia, supervivencia, comportamiento y desplazamiento de aves (Tolvanen et al, 2023). El desplazamiento de especies puede ocurrir tanto en la etapa de construcción como en la etapa operativa de los parques eólicos y es causado por la sola presencia de los aerogeneradores, a través de impactos visuales, ruido y vibraciones, o como resultado del tránsito de vehículos o personal en el área del proyecto (Drewitt y Langston, 2006).

Los aerogeneradores, el ruido, el electromagnetismo y las vibraciones que estos provocan, suponen unas molestias para la fauna que pueden llevar a que éstas eviten las zonas donde están emplazadas, viéndose obligadas a desplazarse a otros hábitats (Atienza et al, 2011).

Otra forma de desplazamiento es el efecto barrera, que sucede cuando las aves modifican sus rutas migratorias, o rutas de vuelo locales, a sitios de alimentación, o percha, con el fin de evitar los aerogeneradores dispuestos en un área. Este efecto es importante debido al mayor gasto energético que representa para las aves volar distancias mayores, esto aunado a la fragmentación potencial de los corredores que conectan sitios de alimentación, percha y reproducción (Drewitt y Langston, 2006).

5.5.1. Pérdida de Hábitat

La pérdida de hábitat resulta de la remoción de vegetación en áreas de cimentación de las turbinas, la construcción de caminos de acceso y líneas de transmisión (Zimmerling et al, 2013). La superficie del hábitat que se pierde depende del tamaño del parque eólico, pero en general va del 2 al 5% del total del área del proyecto (Drewitt y Langston, 2006). Este porcentaje se considera bajo respecto a otro tipo de proyectos, sin embargo, los efectos de la pérdida de hábitat pueden ser importantes para las aves, al generarse mortalidad en nidos y desplazamiento de parejas reproductivas (Zimmerling et al, 2013).

5.5.2. Colisión Contra Aerogeneradores

La mortalidad de aves por colisión con las palas de los aerogeneradores fue el primer efecto de los parques eólicos que se investigó (Orloff y Flannery, 1992). El impacto de colisión se refiere al choque de las aves con los aerogeneradores, situación que suele devenir en la muerte del o los ejemplares. En la escena internacional, el efecto de los parques eólicos sobre las aves es un motivo principal de preocupación, puesto que es visible y cuantificable (SAG, 2015).

La mortalidad por colisión puede suceder no solamente por la colisión contra los rotores, sino también contra las torres meteorológicas, plataformas y estructuras asociadas como cables de soporte y líneas de transmisión. Dentro de los impactos asociados al emplazamiento de parques eólicos sobre, las colisiones contra aerogeneradores constituyen un punto que ha captado la mayor atención de los investigadores y de la opinión pública, esto debido a la mortalidad que causan.

Por ejemplo, en Estados Unidos en el año 2012 entre 600.000– 888.000 murciélagos y 573.000 aves murieron, 83.000 eran aves rapaces y entre 134.000–230.000 pequeños passeriformes (Petracci y Carrizo, 2019). Otros estudios se centran en los efectos de los aerogeneradores en las grandes rapaces, sin embargo, se ha demostrado que un 78% de las aves muertas en

Estados Unidos fueron paseriformes protegidos, y es probable que ocurra lo mismo en Europa y no se haya documentado (Atienza et al, 2011).

Existen muchos factores que influyen en el riesgo de colisión, los relacionados con el medio ambiente, las especies y la configuración y ubicación de las estructuras. Por ejemplo, factores ambientales como la dirección y la velocidad del viento, así como las características del paisaje, influyen en el riesgo de colisión. Sin embargo, hay una escasez de estudios destinados a cuantificar los efectos de estos factores en las tasas de colisión de aves en los parques eólicos (Skov y Heinänen, 2015).

Si bien la mayoría de los estudios sobre colisión de aves en parques eólicos han obtenido niveles relativamente bajos de mortalidad, estos bajos niveles de mortalidad pueden ser significativos en ciertas especies de larga vida, con baja productividad y lenta maduración, especialmente cuando se trata de especies con problemas de conservación (Drewitt y Langston, 2006).

5.5.3. Tasas de colisión documentadas

El efecto de los parques eólicos sobre el número de colisiones de avifauna ha sido estudiado en profundidad y existe un gran número de publicaciones que señalan que el número de colisiones esperadas para un parque eólico con turbinas modernas es de 1-2 colisiones/turbina/año. Estas cifras son similares a lo registrado en estudios comparativos de parques eólicos en EEUU (HIF, 2020). Otro ejemplo es que, en Chile, y con datos presentados a la SMA, TEBAL en el año 2021 realizó un estudio de impactos sinérgicos y acumulativos de parques eólicos en la comuna de Los Ángeles, donde se registraron tasas de 0,6-1,8 colisiones/turbina/año. (HIF, 2020).

5.6. Modelación matemática y tipos de Modelos

La modelación matemática es un intento de describir alguna parte del mundo real en términos matemáticos. Modelos matemáticos han sido construidos en

todas las ciencias tanto físicas, como biológicas y sociales. Los elementos que lo componen son tomados del cálculo, el álgebra, la geometría y otros campos afines (Brito et al, 2011).

Los modelos matemáticos pueden clasificarse de diversas maneras, por un lado, tenemos los modelos empíricos y los mecanicistas. Ambos tipos de modelos matemáticos al mismo tiempo se clasifican dependiendo de su enfoque el cual puede ser cuantitativo o cualitativos. Los modelos empíricos se construyen comenzando con patrones observados y trabajando hacia atrás para reconstruir los procesos que posiblemente podrían haber generado esos patrones. Un modelo empírico intenta ser aplicable a otras situaciones análogas para predecir con precisión los resultados, o datos de salida, en función de las condiciones iniciales o los datos de entrada. (Willmott et al, 2012).

Por el contrario, los modelos mecanicistas se construyen a partir de representaciones matemáticas de la dinámica del sistema de interés (Willmott et al, 2012). Un modelo mecanicista comienza con una descripción de cómo la naturaleza podría funcionar, y procede de esta descripción a un conjunto de predicciones que relacionan las variables independientes y dependientes (Pérez, 2014). Estos suelen ser más simples, más matemáticos, automatizados y sus predicciones suelen ser de tipo cuantitativas. Un enfoque cuantitativo hace que el riesgo de colisión sea fácilmente comparable entre las instalaciones eólicas que un enfoque cualitativo. (Willmott et al, 2012).

Los modelos con enfoque cualitativo podrían describirse como modelos conceptuales, ya que no se presentan en forma matemática y no son automatizados, uniformes o sistemáticos. Además, sus predicciones suelen ser cualitativas y se basan en un análisis comparativo en base a lo disponible en literatura como, por ejemplo, el modelo desarrollado por USFWS (Willmott et al, 2012).

5.7. Modelos De Riesgo De Colisión De Aves

Los modelos de riesgo de colisión de aves se utilizan como herramienta para predecir el número de víctimas de colisiones, para parques eólicos planificados. Ofrecen la mejor información posible para los procesos de toma de decisiones sobre la ubicación y configuración del parque eólico, estas predicciones deberían reflejar con precisión el impacto del parque eólico sobre el medio ambiente (Kleyheeg et al, 2018).

Con los modelos de riesgo de colisión de aves es posible estimar la probabilidad de colisión y la tasa de mortalidad dados algunos parámetros clave sobre la ubicación, las dimensiones, la estructura y el funcionamiento de las turbinas eólicas, como también los movimientos, la abundancia y el comportamiento de las aves (Christie y Urquhart, 2015).

La aplicación de los modelos predictivos al estudio del riesgo de los impactos humanos sobre la fauna ha sido hasta este momento bastante reducida en relación con el elevado potencial de aplicación que pueden tener (Pérez et al, 2015). Éstos podrían ser de mucha ayuda para la evaluación ambiental de proyectos, ya que una de sus ventajas es predecir los impactos potenciales de la construcción y funcionamiento de parques eólicos en la mortalidad de las aves a través de estudios de campo previos a la construcción (Christie y Urquhart, 2015).

Los modelos de riesgo de colisión de aves son una herramienta valiosa utilizada en la evaluación del impacto de los parques eólicos, tanto en tierra como en el mar. Por ejemplo, los modelos de riesgo de colisión se han utilizado para evaluar los impactos sobre las aves en todas las evaluaciones ambientales de parques eólicos marinos en el Reino Unido desde 2009, y de parques eólicos terrestres desde principios del 2000. Desde entonces se han producido nuevos modelos y se han convertido en un requisito de facto de algunas evaluaciones ambientales en el caso de Reino Unido (Mcgregor et al, 2018).

Estos modelos varían dependiendo de las diferentes situaciones y circunstancias. Por lo tanto, es importante que se use o adapte el modelo o método más apropiado para la pregunta en cuestión y, en algunas situaciones, éste puede no ser siempre el modelo más utilizado (Masden y Cook, 2016).

Se han desarrollado una variedad de modelos de colisión para la vida silvestre voladora durante las últimas dos décadas. Algunos se crearon específicamente para responder preguntas sobre una instalación eólica en particular (por ejemplo, el modelo de Bolker), mientras que otros se desarrollaron para una aplicación más general (Willmott et al, 2012).

Se considera que la creación de modelos de tipo predictivos que permitan estimar los períodos de mayor actividad de vuelo, permitiría disminuir los impactos negativos sobre la fauna voladora al desactivar las turbinas durante esos períodos (González, 2014). Como también podrían ser utilizados para reubicar o eliminar las turbinas de alto riesgo para la fauna, y para determinar la posición de nuevas turbinas dentro de futuros proyectos (Ferrer et al, 2009).

Estos modelos son potencialmente útiles, pero, para ser efectivos, requieren datos suficientes sobre los movimientos de las aves tal como cantidad, intensidad, altura de vuelo y ángulo de aproximación, tanto a lo largo del ciclo anual como también en distintas condiciones, incluidas diferentes condiciones climáticas y diferentes horarios (Drewitt y Langston, 2006).

Debido a la pronunciada variación estacional en el comportamiento animal y por la distribución presente en la mayoría de las aves y murciélagos de América Latina, es ideal que para estudios de campo previos a la construcción incorporar una recopilación de datos de campo razonablemente intensivos y continuos durante el transcurso de un año completo. Lo anterior debido a que se espera que la variación interanual sea menos pronunciada que la variación estacional en la mayoría de los casos (Willmott et al, 2012).

También existen otros tipos de herramientas que son utilizadas para modelar el riesgo de colisión, entre las herramientas más frecuentemente empleadas destacan las técnicas de clasificación (CART), los modelos lineales generalizados (GLM), los modelos aditivos generalizados Introducción general (GAM) y los modelos Bayesianos (Pérez, 2014).

5.7.1. Limitaciones y suposiciones de los modelos de riesgo de colisión

Aunque los modelos de riesgo de colisión son una herramienta útil para estimar posibles colisiones de aves con turbinas eólicas y brindan información sobre los impactos ambientales potenciales del desarrollo de parques eólicos, también tienen limitaciones y es importante identificar cuáles son para asegurar que los datos de salida se utilicen de manera adecuada (Masden y Cook, 2016).

Las incertidumbres en los modelos son numerosas e incluyen la variabilidad de los datos del estudio, la validez de los supuestos del modelo y el conocimiento insuficiente de los efectos de desplazamiento, evasión y atracción de las aves con relación a un parque eólico (Willmott et al, 2012).

Una de las mayores limitaciones de los modelos de riesgo de colisión es que, por lo general, asumen mucho sobre el comportamiento de las aves. Por ejemplo, la mayoría de los modelos asumen una relación lineal entre la abundancia de aves y el riesgo de colisión, lo que puede no ser cierto para todas las situaciones (Masden y Cook, 2016). También muchos de los modelos incluyen una tasa de evitación, la cual supone que cierta proporción de aves tomarán medidas de evitación antes de que ocurra una colisión. La mayoría de los modelos asume que el comportamiento de evitación es constante en todos los individuos de una especie y esto es poco probable. Sin embargo, hay datos muy limitados disponibles sobre las tasas de evitación de las aves y la estimación de la variabilidad de ésta entre especies es complejo, y más aún dentro de una misma especie (Masden y Cook, 2016).

En definitiva, todos los modelos contienen supuestos que pueden no cumplirse en algunas circunstancias, lo que puede conducir a una inexactitud en la predicción, dependiendo de lo sensible que sea el modelo al no cumplimiento de sus supuestos (Willmott et al, 2012).

5.7.2. Modelos de riesgo de colisión en Chile

Si bien la escena nacional tiene una sólida legislación ambiental, en cuanto a materia de evaluación ambiental de proyectos, el país no cuenta con las mejores herramientas técnicas necesarias para determinar cuantitativamente cuál es el impacto de los parques eólicos sobre las aves. A pesar de que los modelos de riesgo de colisión pueden ser herramientas de gran utilidad para definir la localización de los proyectos, de modo de minimizar los impactos sobre ciertas especies clave, en Chile aún no se han desarrollado intentos por implementar medidas de este tipo (González et al, 2014).

Por ejemplo, el SEA, no cuenta con atribuciones respecto al desarrollo o uso de modelos sobre el riesgo de colisión de aves que tengan algún grado de incidencia en la evaluación de proyectos. La escasa información y análisis que existe sobre el riesgo de colisión de aves con aerogeneradores es realizada por los propios titulares de proyectos eólicos, el cual se basa netamente en antecedentes bibliográficos de otros países, aplicados en el contexto local de cada proyecto (SEA, 2023).

Actualmente, el país se enfoca en acciones de prevención del impacto de la instalación de los parques eólicos, tal como elegir estratégicamente lugares en que no se registre tránsito de aves u otras medidas de tipo de mitigación que minimicen el riesgo de impacto por colisión (SEA, 2023).

6. Marco Normativo

6.1. Legislación ambiental nacional y evaluación de proyectos de hidrógeno verde

Chile desde hace ya un par de años ha desarrollado diversas políticas en materia ambiental, comenzando el año 1994 con la promulgación de la Ley N°19.300, sobre bases generales del medio ambiente, esta definió la estructura institucional, los principios rectores y los principales instrumentos de gestión ambiental. Uno de los pilares de la legislación ambiental chilena es el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), el cual es el encargado de administrar el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA); y la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA), cuya responsabilidad es la fiscalización de los instrumentos de gestión ambiental, su seguimiento y sanción cuando corresponda (MMA, 2019).

El SEIA es un instrumento de gestión ambiental que busca el desarrollo sustentable a través de la inclusión de variables de índole ambiental en los proyectos que ingresan a evaluación. Éste tiene la facultad de uniformar criterios, requisitos, condiciones, antecedentes, certificados, trámites, exigencias técnicas y procedimientos de carácter ambiental que establezcan los Ministerios y demás organismos del Estado competentes. Es así como en materia de energía se han desarrollado diferentes documentos que tienen alta incidencia en los proyectos sometidos a evaluación tal como guías de evaluación de impacto ambiental, instructivos para la evaluación de impacto ambiental y los criterios de evaluación en el SEIA (SEA, 2022).

A la fecha no existen instrumentos tales como normas de calidad y/o emisión que regulen específicamente al hidrógeno verde. Todo proyecto de hidrógeno verde debe ceñirse a las reglas generales en materia ambiental, así como también someterse a su institucionalidad. Además, la electrólisis, el proceso utilizado para obtener el hidrógeno verde, es un proceso de bajo riesgo

puesto que no implica condiciones potencialmente peligrosas, como altas presiones o temperaturas, ni tampoco grandes cantidades de sustancias peligrosas como para requerir una evaluación ambiental específica (Eterovic et al, 2023).

6.2. Análisis de ingreso de proyectos de hidrógeno verde al SEIA

Uno de los primeros pasos en ámbitos legislativos para desarrollar un proyecto en el país, es que el titular debe determinar si su proyecto o actividad es susceptible de causar impacto ambiental, en cualquiera de sus fases. Esto está establecido en el artículo 10 de la Ley N°19.300 sobre bases generales del medio ambiente y en el artículo 3° del Decreto Supremo N°40, que aprueba el Reglamento del SEIA, donde se especifica. (Moreno et al, 2020).

Determinado el ingreso obligatorio del proyecto o actividad al SEIA, es responsabilidad del titular definir la modalidad de ingreso, ya sea a través de un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) o una Declaración de Impacto Ambiental (DIA). Para ello, corresponde analizar el artículo 11 de la Ley N°19.300, donde se establece que los proyectos que se presentan al SEIA requieren la elaboración de un EIA si generan o presentan a lo menos uno de los efectos, características o circunstancias estipuladas. Y en caso contrario justificar su inexistencia mediante una DIA (SEA, 2023)

Habiendo determinado bajo qué modalidad el proyecto o actividad debe ingresar al SEIA (DIA o EIA), el proponente deberá realizar la descripción de su proyecto e identificar el o los proceso/s y subproceso/s de la cadena de valor del hidrógeno verde. Esto permitirá clarificar la aplicabilidad de criterios técnicos exigidos por la autoridad ambiental, y a su vez obtener una descripción detallada del proyecto y su alcance. Cabe señalar que independientemente de que el proyecto o actividad contemple uno de los procesos o subprocesos de toda la cadena de valor del hidrógeno, el proyecto en evaluación debe detallar

qué autorizaciones corresponde tramitar y con cuáles ya cuenta su proyecto (SEA, 2023).

Esto es de suma importancia para identificar adecuadamente todas las tipologías de ingreso aplicables para el sometimiento del proyecto a evaluación ambiental (SEA, 2023). Finalmente, habiendo estipulado todos los procesos y subprocesos de la cadena de valor del hidrógeno verde, cabe hacer un análisis de todas las tipologías aplicables al proyecto que menciona la legislación actual, considerando todas sus etapas de producción.

6.2.1. Tipologías De La Ley Aplicables A Proyectos De Hidrógeno Verde

En la siguiente tabla se muestran los principales procesos de la industria del Hidrógeno Verde, con los posibles literales de ingreso al SEIA, como también los proyectos, partes u obras asociadas. Sin perjuicio de que, dada la envergadura de los procesos que conllevan los proyectos de hidrógeno verde, existan otras tipologías de proyectos no señaladas que deban ser consideradas por el titular para el ingreso al SEIA (SEA, 2021).

Tabla 1. Tipologías de la ley 19.300 aplicables a proyectos de hidrógeno verdes que contemplen el uso de aerogeneradores

Cadena de valor del h2v para la evaluación ambiental					
Procesos de cadena de valor del h2v	1. Energías renovables	2. Producción	3. Acondicionamiento y almacenamiento	4. Reconversión	5. Transporte y distribución
Literales de Ingreso	b), c), p), s)	a), b.2), h), j), k). ñ.1), ñ.3). ñ.4), o.6), o.9). p), s)	h), j), k), ñ. 1), ñ.3), ñ.4), o.9), p), s)	h), k), c), ñ.1), ñ.3), ñ.4), o.9), p), s)	f), j), ñ.5), s)
Proyectos o partes y obras asociadas	Parques eólicos	Plantas desalinizadoras	Sistemas de compresión y almacenamiento	Plantas de síntesis de metanol	Infraestructura de transporte terrestre o marítimo correspondiente
	Parques fotovoltaicos	Plantas electrolizadoras	Tuberías, ductos, gasoductos	Planta de producción de amoniaco	Infraestructura portuaria
	Líneas de transmisión	Tuberías, ductos, gasoductos	Plantas de licuefacción		Tuberías, ductos, gasoductos
	Proyectos de generación de energía renovable en general	Sistemas de transformación de energía	Tanques criogénicos		
		Subestaciones eléctricas	Plantas de conversión química		

Fuente: Criterio de evaluación en el SEIA

6.2.2. Análisis De Evaluación Ambiental De Proyectos Con Aerogeneradores En El País

A continuación, se expone un análisis de todos los proyectos que han ingresado al SEIA a lo largo del país que contemplen el uso de aerogeneradores, no sólo los que contemplen el hidrógeno verde. De manera de poder evidenciar el número de proyectos aprobados ambientalmente, y si la tramitación es través de una DIA o una EIA. así como también especificar el literal de ingreso, estipulado en la ley N°19.300 y el Decreto Supremo N°40, que se utilizó para la tramitación ambiental.

Tabla 2. Análisis de proyectos que han ingresado al SEIA en el país que contemplen el uso de aerogeneradores

Tabla Resumen	
N° de proyectos	153
N° de DIAs	126
N° de EIAs	27
Tipologías de ingreso	4 (b1, c,j2 y k1)
Regiones	13 (Segunda, Tercera, Cuarta, Quinta, Sexta, Séptima, Octava, Novena, Décima, Undécima, Duodécima, Decimocuarta y Decimosexta)

La mayoría de los proyectos que consideran la instalación de aerogeneradores en el país, se califican ambientalmente a través de una DIA, incluidos los dos únicos proyectos de hidrógeno verde con una resolución de calificación ambiental (RCA) aprobada. Siendo la literal “c” de ingreso la más frecuente tanto en EIAs como DIAs.

7. Metodología

7.1. Revisión bibliográfica

La elección de un modelo predictivo de colisión de aves se realizó con una revisión bibliográfica sobre cuáles son los modelos existentes en la actualidad, identificar los resultados que arrojan y qué variables consideran en sus cálculos.

En primer lugar, se realizó una revisión de información a nivel regional y nacional, tal como las guías y documentos del SEA sobre proyectos eólicos. Además, se utilizó la plataforma de la ley de transparencia para solicitar información a diferentes organismos públicos, como la SMA, MMA, el SEA, entre otros, con respecto al uso de modelos de riesgo de colisión de aves en el país.

Luego también se revisaron publicaciones científicas en la escena internacional, para finalmente realizar una comparación preliminar de todos los modelos de riesgo de colisión de aves encontrados.

Con esto se definieron criterios que permitieron la elección y aplicación del modelo de colisión más apropiado, dentro los cuales se priorizó que sea un modelo que incluya conductas de evitación de las aves, que sea aplicable a nivel poblacional, que sea aplicable a parques eólicos en tierra y, por sobre todo, que esté abiertamente disponible y documentado.

7.2. Análisis y pruebas de modelos

Una vez elegido el modelo más adecuado, se comenzó con una fase de pruebas del modelo. En esta etapa se analizó cómo funciona el modelo de Band (2012), identificando el paso a paso del cálculo y qué variables toma en consideración. Se realizaron pruebas con datos genéricos para comprender el funcionamiento, antes de utilizar los datos reales, donde se comenzó a analizar

el modelo de manera autodidacta, con la ayuda de guías, publicaciones y ejemplos de casos aplicados con el uso del modelo de Band.

Luego se identificaron cuáles son los datos de entrada necesarios para el modelo y cuáles variables necesitan cálculos o conversiones para poder introducirlas en la interfaz del modelo las cuales se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 3. Datos de entrada necesarios para el modelo de Band

Datos de entrada
Nombre común
Número de individuos por km ²
Largo del Ave
Ancho del Ave
Tipo de Vuelo
Velocidad de Vuelo
Alturas de Vuelo
Área del parque eólico
Número de turbinas
Coordenadas (latitud en °)
Modelo de turbinas
Radio del rotor
Altura del rotor
Ancho de cuerda
Velocidad de rotación turbina (rpm)
Ángulo de inclinación palas(°)
Proporción del mes que están en operación (%)

Además, en esta etapa de análisis y pruebas del modelo, se fue observando qué situaciones arrojaban error, también las suposiciones que utiliza y la sensibilidad de los resultados a las variaciones de los datos. Todo esto con el objetivo de poder familiarizarse con el modelo, su interfaz y cada etapa del cálculo (ver Anexo 1 y Anexo 2).

7.3. Definir datos y área de estudio

Una vez definidos cuales son los datos necesarios para aplicar el modelo de riesgo de colisión, se definió un proyecto para someter a estudio y solicitar el uso de datos existentes sobre tránsito de aves en el lugar de éste. Se solicitaron los datos necesarios a 4 diferentes empresas con las que la consultoría EINAS actualmente desarrolla estudios preliminares en la región, estas son: HIF, TEG, RWE y Total Eren. Todas están desarrollando proyectos en torno a la producción de hidrógeno verde con energía eólica.

Se obtuvo una respuesta positiva por parte de la empresa HIF, la cual nos autorizó usar los datos de tránsito aéreo presentados en el EIA del proyecto “Parque Eólico Faro Del Sur” que forma parte de su proyecto de producción de hidrógeno verde y que se encuentra en proceso de calificación en el sistema de evaluación de impacto ambiental (SEIA).

Se recopiló información específica del proyecto como especificaciones técnicas de las turbinas y su funcionamiento e información de la riqueza y abundancia de las aves dentro del área de influencia.

Cabe destacar que algunos datos como, la envergadura del ave, la velocidad de vuelo de las aves, la velocidad de rotación de las turbinas, el grado de inclinación de las palas y el ancho de cuerda de éstas, se tuvieron que utilizar datos provenientes de bibliografía, ya que no venían incorporados en el EIA del proyecto.

Por otra parte, para el dato de densidad de aves por km², se realizó un promedio por estación climática en base al año que más hubo monitoreos, el cual fue el año 2023. Para verano, otoño e invierno se utilizaron los datos de las campañas de tránsito aéreo mensual, mientras que para primavera se utilizaron los datos del tránsito aéreo intensivo del mismo año. Se sumó la cantidad de individuos obtenidas en los meses correspondientes a cada estación, y luego se saca un promedio para cada mes. Finalmente, éste se divide por el total del área del proyecto, sacando una densidad de aves por km² en promedio para el

parque. Todos los datos utilizados se encontraron adjuntos en el anexo de tránsito aéreo del EIA del proyecto.

También hubo ciertos datos como características morfológicas, comportamientos de vuelo del ave y especificaciones del funcionamiento y diseño de las turbinas, que no estaban incluidos en el EIA del proyecto. Éstos se recopilaron y/o calcularon en base a antecedentes bibliográficos, considerando elementos como: la envergadura del ave, las velocidades de vuelo, la velocidad de giro de las turbinas y el ancho máximo de cuerda de las palas de la turbina.

7.4. Obtención de tasas de colisión de aves

Se llevó a cabo el cálculo de las tasas de colisión para la especie más abundante en el sector en 3 diferentes casos, en relación con la velocidad de giro de las turbinas mientras están en operación, la cual es variable de acuerdo con las condiciones climáticas del momento.

- i. Tasa de colisión de aves mensual y por año para todo el parque eólico, a una velocidad de giro baja (15 rpm)
- ii. Tasa de colisión de aves mensual y por año para todo el parque eólico, a una velocidad de giro media (22,5 rpm)
- iii. Tasa de colisión de aves mensual y por año para todo el parque eólico, a una velocidad de giro alta (30 rpm)

Adicional a estos tres escenarios, el modelo de Band presenta diferentes resultados dependiendo de cómo se comporta el ave con respecto a la evitación de volar por el parque eólico, estos son: sin evitación, 95%, 98% y 99,5% de evitación. Por lo que además de los tres escenarios propuestos, el modelo calcula diferentes tasa de colisión dependiendo de cómo se comporta el ave con respecto al parque.

Cabe destacar que, si bien el modelo de Band tiene un modelo extendido donde incorpora parámetros como la distribución de alturas y un factor de corrección a los cálculos, por la complejidad matemática de éste y la ausencia de datos fiables sobre el comportamiento de las aves, se optó por utilizar sólo el modelo básico.

7.5. Análisis de riesgo de colisión de aves contra aerogeneradores.

Para analizar el riesgo de colisión, se asignó un rango de valores para clasificar las tasas de colisión obtenidas con el modelo en base a las tasas de colisión documentadas en bibliografía (Ver tabla 4). Luego, se le asignó un color a cada rango de valores y se resaltó del color correspondiente los diferentes resultados, clasificándolos en bajo riesgo, medio riesgo y alto riesgo.

Tabla 4. Rangos de riesgo de colisión

Rangos de riesgos de colisión	
[0-1]	Bajo riesgo
[1-3]	Medio riesgo
[>3]	Alto riesgo

Adicionalmente, se realizó una estimación del riesgo por mes, para ver en qué meses del año hay mayor o menor riesgo de colisión y también identificar las relaciones que puedan existir entre las variables del cálculo.

8. Resultados

8.1. Revisión bibliográfica

La revisión bibliográfica en diferentes plataformas de divulgación científica arrojó que en la actualidad existen variados modelos de riesgo de colisión en existencia. Se logró recopilar información sobre 12 modelos de riesgo de colisión de aves utilizados en proyectos eólicos. Se encontraron diferentes enfoques de modelamiento (mecanicista, determinista o estocásticos), así como también diferentes tipos de resultados y aspectos a considerar en los cálculos (Ver tabla 5).

Tabla 5. Modelos de riesgo de colisión encontrados en bibliografía

Nombre y referencia del modelo	Modelo o base	Incluye conductas de evitación	N° de Turbinas	Torre Incluida	Velocidad y dirección del viento incluidas	Ángulos oblicuos de aproximación	Individuo o población	Tierra o mar (on-shore/off-shore)	Estocástico	Modelo de salida
Band (Band, 2012)	-	Si	Múltiples	No	No	No	Población	En mar	No	Número de aves colisionando
Tucker (Tucker, 1996)	-	No	Único	No	No	No	Individual	-	No	Probabilidad de colisión
Biosis (Smales et al, 2013)	Band	Si	Múltiples	Si	No	Si	Población	En tierra	No	Número de aves colisionando
Podolsky (Podolsky, 2008)	-	Si	Único	Si	No	Si	Individual	En tierra	No	Probabilidad de colisión
McAdam (McAdam, 2005)	-	No	Múltiples	No	Velocidad Y dirección	Si	Individual	En mar	Si	Probabilidad de colisión
Desholm (Desholm, 2006)	-	Si	Único	No	Dirección	No	Población	En mar	Si	Número de aves colisionando
Eichhom (Eichhorn et al, 2012)	-	Si	-	No	No	No	Individual	En tierra	Si	Tasa de mortalidad
Hamer (Holmstrom et al, 2011)	Tucker	No	Único	No	Velocidad y dirección	Si	Individual	-	No	Probabilidad de colisión
Bolker (Bolker, 2014)	-	No	Múltiples	No	No	Si	Individual	En tierra	No	Probabilidad de colisión
USFWS (U.S. Fish and Wildlife Service, 2013)	-	Si	-	-	No	No	Población	En tierra	Si	Número de aves colisionando
Masden (Masden, 2015)	Band	Si	Múltiples	No	Velocidad	No	Población (Especie)	En mar	Si	Número de aves colisionando
McGregor (McGregor et al, 2018).	Masden	Si	Múltiples	No	Velocidad	No	población (Especie)	En mar	Si	Número de aves colisionando

8.2. Análisis del modelo de Band

El riesgo de colisión en este modelo se calcula principalmente a partir de los parámetros de las turbinas y la actividad de vuelo en el espacio aéreo que rodea cada turbina. El cálculo de las tasas de colisión de las aves utilizando el modelo básico de Band se divide en 4 etapas principalmente:

1. En primer lugar, se calcula una probabilidad general de que un ave sea golpeada cuando vuela a través del área de barrido de la turbina. Esta probabilidad se deriva del tamaño y la velocidad del ave, así como también del diámetro del rotor, el ancho de cuerda y la velocidad de rotación de las turbinas.
2. Luego, dado que velocidad y el ancho de la cuerda del aerogenerador son variables, las probabilidades de colisión se calcularon en intervalos dados a lo largo del diámetro del rotor y la probabilidad de colisión general se calcula sumando estas probabilidades.
3. Luego, esta probabilidad se multiplica por la densidad de aves dentro del área del parque eólico y el tiempo que pasan allí.
4. Finalmente se incorporan las distintas tasas de evitación, dando como resultado la tasa de colisión del ave por turbina de manera mensual y anual.

8.3. Recopilación de datos para el modelamiento

La recopilación de datos del proyecto en estudio se divide en 4 diferentes secciones, donde en primer lugar se recopilaban los datos generales del proyecto como su ubicación, dimensiones y cantidad de aerogeneradores. Luego, especificaciones más técnicas sobre los aerogeneradores, y finalmente los datos de tránsito aéreo de las aves del sector.

Adicionalmente se recopilaban algunos datos adicionales que no venían incluidos en el EIA del proyecto, y también la estimación de algunos datos de

entrada para el modelo, como por ejemplo la densidad de aves y la velocidad de vuelo de éstas.

8.3.1. Antecedentes de proyecto “Parque Eólico Faro del Sur”

El Proyecto tiene contemplado la generación de energía eléctrica mediante un parque eólico con una potencia nominal de 384 MW. El Parque Eólico está conformado por 64 aerogeneradores de tres palas, que se distribuirán en una superficie predial total de 3.791 ha aproximadamente y se localizará entre el km 36 y km 40 de la Ruta 9 Norte al interior de la “Estancia Tehuel Aike”.

8.3.2. Datos aerogeneradores proyecto “Parque eólico Faro del sur”

Cada aerogenerador ocupará una superficie en promedio de 657,17 m², tendrá una altura total de 200 m, y estará compuesto por una torre de 115 m de altura de buje, un rotor de 170 m de diámetro y una superficie de barrido de 22.698 m².

Tabla 6. Especificaciones técnicas de los aerogeneradores del proyecto “Parque eólico del sur”

Características	Valor	Unidad
N° de palas aerogenerador	3	-
Largo de palas	84	m
Área de Barrido del aerogenerador	22698	m ²
Velocidad de arranque	3	m/s
Velocidad de parada o corte	25	m/s
Altura de la torre	115	m
Diámetro del rotor	170	m
Velocidad de rotación	15-30	rpm
Ángulo de inclinación de palas	Variable	°
Ancho máximo de cuerda		m

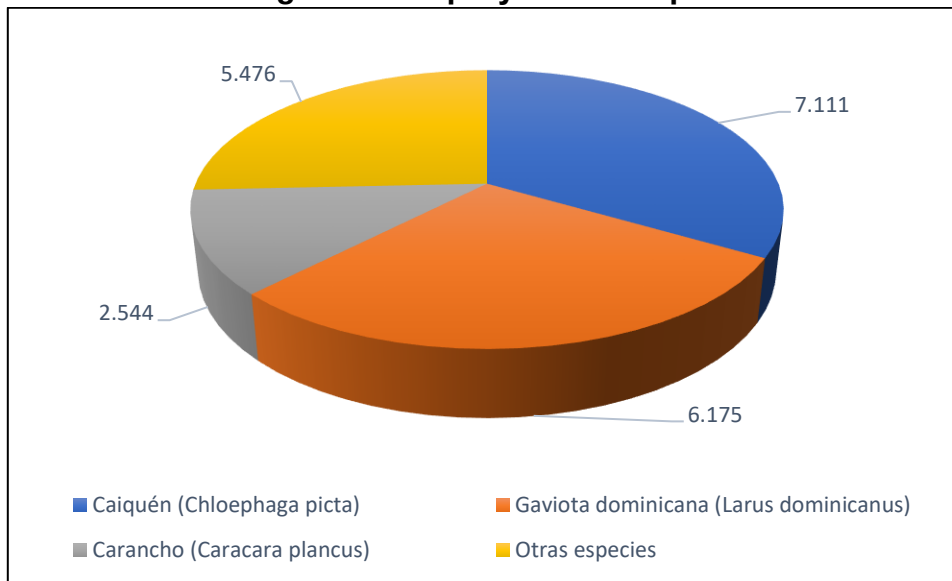
Fuente: EIA “Parque Eólico Faro del Sur”.

8.3.3. Datos de Tránsito de Aves proyecto “Parque eólico Faro del sur”

Estos datos han sido tomados en campo por profesionales de la ornitología en campañas en terreno para cada estación del año entre el año 2021 y 2023 en el área de influencia del proyecto, lo que garantiza que los datos son reales y fiables.

Las especies que fueron registradas en el conjunto de todos los muestreos, estaciones y años, fueron 55. Los registros totales de esas 55 especies no están homogéneamente repartidos. De un total de 21.306 registros casi el 75% (N = 15.830) está dominado por 3 especies: caiquén (*Chloephaga picta*, N = 7.111), gaviota dominicana (*Larus dominicanus*, N = 6.175) y carancho (*Caracara plancus*, N = 2.544) (ver gráfico 1). Es por esto por lo que se escogió el caiquén como especie de estudio, al ser la más abundante en todas las campañas de monitoreo de tránsito aéreo realizadas.

Gráfico 1. Número de registros del proyecto “Parque eólico Faro del Sur”



La proporción de actividad nocturna del caiquén se dejó como un 25% aproximadamente, porque si bien existe actividad nocturna no es tan significativa. De todos los registros de caiquén del EIA del proyecto, solo un 27% fueron registros nocturnos.

En cuanto a la proporción de vuelos a la altura del rotor, el EIA del proyecto indicaba que tan solo un 0,09% de los caiques registrados volaban a la altura de riesgo.

A continuación, se encuentran los valores obtenidos para la densidad de caiques por km², en base a los datos recopilados del EIA del proyecto.

Tabla 7. Cálculo de la densidad de caiques

	Mes	Individuos caiún por mes	Promedio por estación	Densidad de caiques por mes		
Verano	Enero	0	1571,7	Enero	41,5	Aves/km ²
	Febrero	2571	1571,7	Febrero	41,5	Aves/km ²
	Marzo	2144	1571,7	Marzo	41,5	Aves/km ²
Otoño	Abril	0	494,3	Abril	13,0	Aves/km ²
	Mayo	774	494,3	Mayo	13,0	Aves/km ²
	Junio	709	494,3	Junio	13,0	Aves/km ²
Invierno	Julio	1464	732,7	Julio	19,3	Aves/km ²
	Agosto	0	732,7	Agosto	19,3	Aves/km ²
	Septiembre	734	732,7	Septiembre	19,3	Aves/km ²
Primavera	Octubre	0	121,7	Octubre	3,2	Aves/km ²
	Noviembre	0	121,7	Noviembre	3,2	Aves/km ²
	Diciembre	365	121,7	Diciembre	3,2	Aves/km ²

8.3.4. Datos adicionales

Ciertos datos del caiún como su envergadura y tipo de vuelo fueron facilitados por la consultora EINAS, quienes tienen una vasta base de datos con información de diferentes especies de la región tomados por especialistas de ornitología. El alto del ave es de 0,65 m y tiene un 0,8 m de envergadura alar aproximadamente.

Mientras que el tipo de vuelo puede variar, el modelo sólo deja incluir el planeo y el aleteo, por lo que se definió como aleteo.

La velocidad de vuelo del caiún se estimó en base a lo documentado en bibliografía respecto a las distancias y tiempos de sus migraciones, se tomó

un promedio de lo que señalaban dos publicaciones, uno sobre caiquenes (Pedrana et al, 2015) y otro sobre canquenes colorados (Pedrana et al, 2020).

Tabla 8. Cálculo velocidad de Vuelo

Especie	Velocidad de vuelo promedio (m/s)	Fuente
Caiquén (<i>Chloephaga picta</i>)	3,89	(Pedrana et al, 2015)
Canquén Colorado (<i>Chloephaga rubidiceps</i>)	3,08	(Pedrana et al, 2020)
Promedio	3,48	

Después de convertir unidades de distancia y tiempo a m/s, se logró obtener una velocidad de vuelo del caiquén de 3,48 m/s aproximadamente.

Las dimensiones del máximo de cuerda de las palas de una turbina corresponde al perfil aerodinámico que tienen cada una de las palas de la turbina a lo largo de ésta, el cual va cambiando para aprovechar al máximo el recurso eólico. Se encontró que el ancho máximo de cuerda para un aerogenerador Siemens Gamesa de las mismas dimensiones que las del proyecto es de 4,5 m (Siemens Gamesa, 2019).

Otro dato de entrada recopilado de bibliografía fue la velocidad de giro de las turbinas. La frecuencia de giro de turbinas modernas abarca desde los 15 a 30 rpm (Berro, 2018).

Finalmente, para el ángulo de inclinación de las palas, la proporción del mes que las turbinas están operativas y la proporción de vuelos a favor del viento, se utilizó el valor por defecto del modelo, ya que no se encontró esa información ni en el EIA del proyecto ni en bibliografía.

Tabla 9. Resumen de los de entrada para el modelo

Datos de entrada	Valor	Unidad
Nombre común	Caiquén	Individuos
Número de individuos por km2	Verano: 16,76	Aves/km2
	Otoño:5,27	
	Invierno: 7,81	
	Primavera: 1,30	
Largo del Ave	0,65	m
Ancho del Ave	0,80	m
Tipo de Vuelo	Aleteo	-
Velocidad de Vuelo	3,48	m/s
Alturas de Vuelo	0,09	%
Área influencia del parque eólico	9378,3	ha
Número de turbinas	64	Turbinas
Coordenadas (latitud en °)	-52,84	grados °
Modelo de turbinas	SG 7.0 170	-
Radio del rotor	85	m
Altura del rotor	115	m
Ancho de cuerda	4,5	m
Velocidad de rotación turbina (rpm)	15-30	rpm
Ángulo de inclinación palas(°)	15	°
Proporción del mes turbinas operando(%)	85%	%

8.4. Tasas de colisión de caiques utilizando el modelo de Band

A continuación, se detalla el resultado de las colisiones para todo el parque eólico, en base a las densidades de aves por kilómetro cuadrado obtenida. Además, se muestran los 3 tres diferentes escenarios propuestos, en donde varia la velocidad de rotación de la turbina y para cada escenario también varía de acuerdo con la evitación de las aves a volar por el parque eólico (Ver tabla 10).

Tabla 10. Tasas de colisión obtenidas con el modelo de Band, por mes y por año en los tres diferentes escenarios

Caso 1 velocidad baja 15 rpm														
% de evitación	En ero	Feb rero	Ma rzo	A br il	Ma yo	Ju ni o	Ju lio	Ag ost o	Septie mbre	Oct ubr e	Novie mbre	Dicie mbre	Aves colisio nando por año	Aves/Aeroge nerador/año
Sin evitaci ón	52 9	444	44 8	12 3	11 4	10 4	16 4	179	193	37	39	42	2415	37,73
95%	26	22	22	6	6	5	8	9	10	2	2	2	121	1,89
98%	11	9	9	2	2	2	3	4	4	1	1	1	48	0,75
99%	5	4	4	1	1	1	2	2	2	0	0	0	24	0,38
Caso 2 velocidad media 22,5 rpm														
% de evitación	En ero	Feb rero	Ma rzo	A br il	Ma yo	Ju ni o	Ju lio	Ag ost o	Septie mbre	Oct ubr e	Novie mbre	Dicie mbre	Aves colisio nando por año	Aves/Aeroge nerador/año
Sin evitaci ón	79 1	665	67 0	18 3	17 1	15 6	24 5	268	289	55	58	63	3614	56,47
95%	40	33	34	9	9	8	12	13	14	3	3	3	181	2,82
98%	16	13	13	4	3	3	5	5	6	1	1	1	72	1,13
99%	8	7	7	2	2	2	2	3	3	1	1	1	36	0,56
Caso 3 velocidad alta 30 rpm														
% de evitación	En ero	Feb rero	Ma rzo	A br il	Ma yo	Ju ni o	Ju lio	Ag ost o	Septie mbre	Oct ubr e	Novie mbre	Dicie mbre	Aves colisio nando por año	Aves/Aeroge nerador/año
Sin evitaci ón	10 54	886	89 3	24 4	22 8	20 7	32 6	358	385	73	77	83	4814	75,22
95%	53	44	45	12	11	10	16	18	19	4	4	4	241	3,76
98%	21	18	18	5	5	4	7	7	8	1	2	2	96	1,50
99%	11	9	9	2	2	2	3	4	4	1	1	1	48	0,75

Como se aprecia en los resultados de los diferentes casos de velocidad de rotación de las turbinas, a medida que la velocidad de giro es mayor, la cantidad de aves colisionando por mes, y por tanto por año, también es mayor. Por ende, existe una correlación positiva entre la velocidad de giro de las turbinas, la cual depende de la velocidad del viento del momento, y las tasas de colisión de las aves.

8.5. Análisis de Riesgo de colisión de aves contra aerogeneradores

Los resultados de las colisiones esperadas indican que existe una disminución en las tasas de colisión a medida que la tasa de evitación es mayor, siendo el 98% y el 99% las tasas de evitación que predicen menor riesgo de colisión de las aves, ya sea en escenarios con alta o baja velocidad de giro de los aerogeneradores.

Tabla 11. Riesgo de colisión de aves contra aerogeneradores en relación con la tasa de evitación de las aves

	Riesgo de colisión de aves contra aerogeneradores (Aves/aerogenerador/año)			
	Sin comportamientos de evitación	Tasa de evitación del 95%	Tasa de evitación del 98%	Tasa de evitación del 99%
Tasas de colisión (Aves/aerogenerador/año)	[37,73 - 75,22]	[1,89 - 3,76]	[0,75 - 1,5]	[0,38 - 0,75]
Riesgo de colisión	Alto	Medio-alto	Medio-Bajo	Bajo

En cuanto al porcentaje de colisiones por mes, se encontró que en los 3 diferentes escenarios las colisiones previstas se distribuyen principalmente durante los primeros meses del año, enero, febrero y marzo. Esto debido a una mayor densidad de aves en esos meses. Mientras que, en el caso contrario, los meses donde se prevé menos colisiones son en los meses de octubre,

noviembre y diciembre. En el gráfico 2, 3 y 4 se detallan las colisiones por escenario.

Al mismo tiempo se puede apreciar que del total de aves previstas que colisionen dentro del parque eólico, al aplicar cualquiera de las tasas de evitación, éstas disminuyen considerablemente.

Gráfico 2. Colisión de aves contra aerogeneradores por mes para el escenario 1

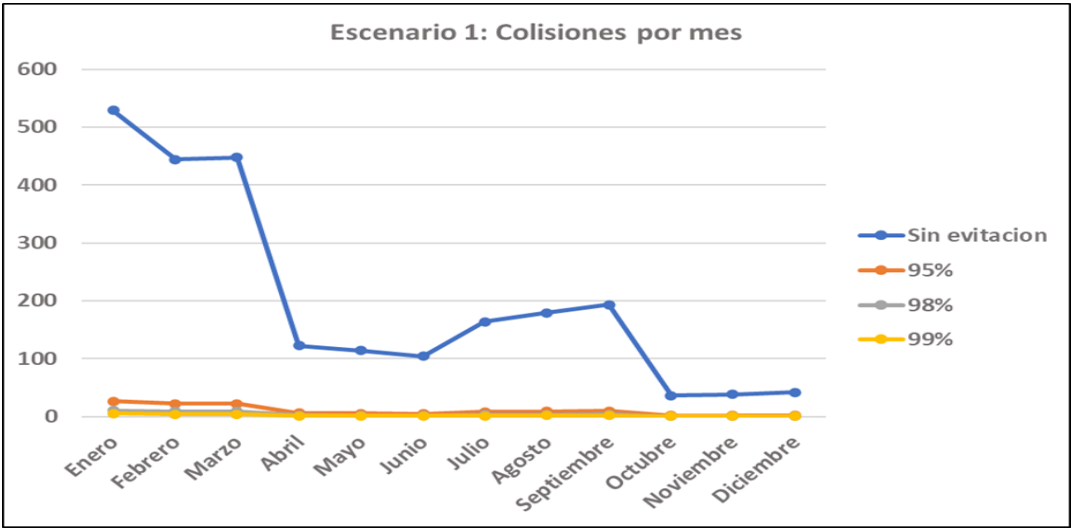


Gráfico 3. Colisión de aves contra aerogeneradores por mes para el escenario 2

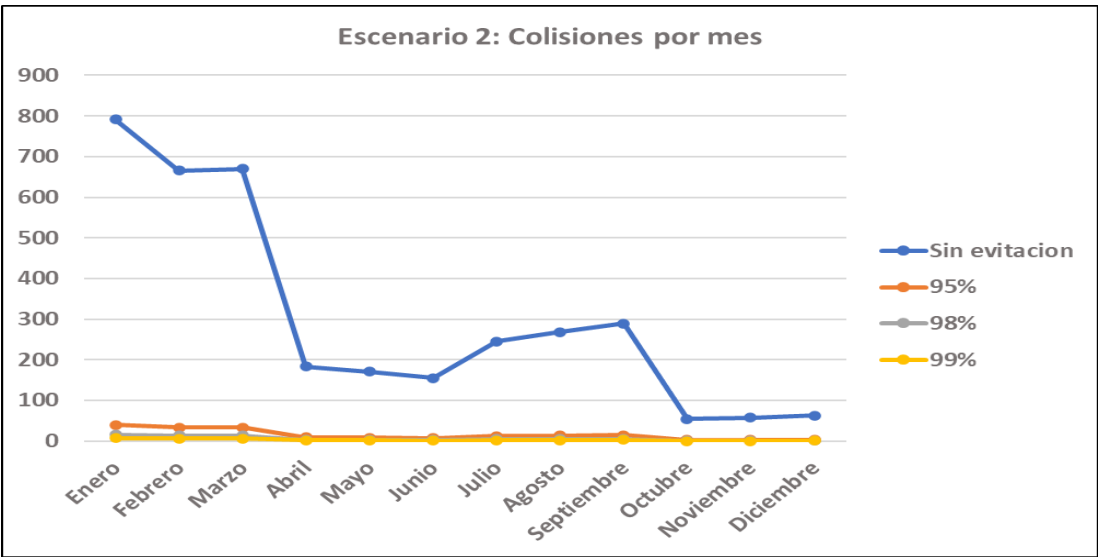
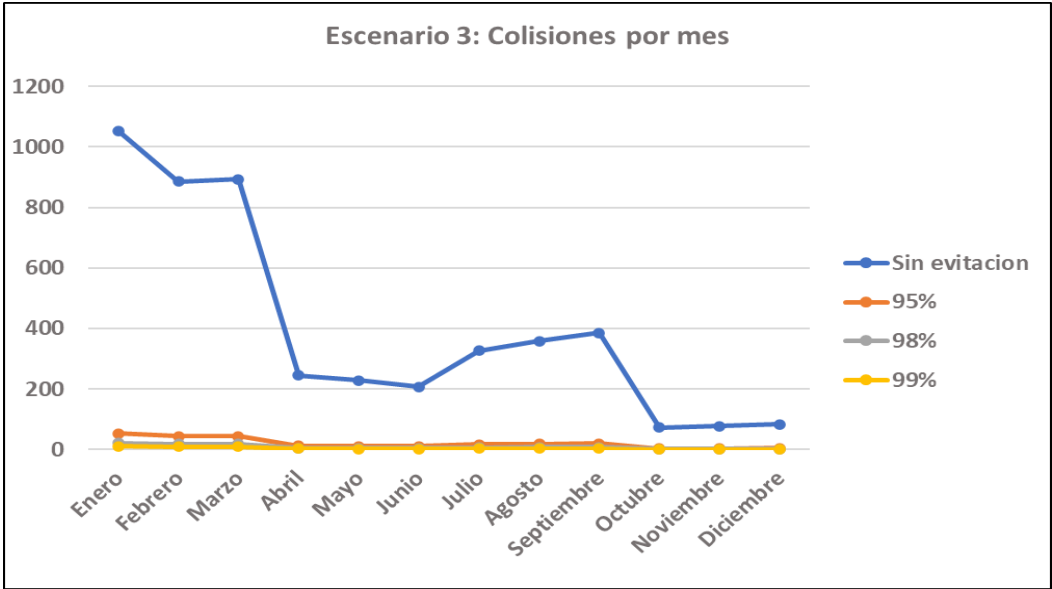


Gráfico 4. Colisión de aves contra aerogeneradores por mes para el escenario 3



9. Discusión

Los proyectos de hidrógeno verde, utilizando energía eólica, han adquirido gran fuerza y visibilidad en los últimos años en nuestro país, sobre todo en la Región de Magallanes. Varios de ellos ya se encuentran en curso realizando estudios previos desde hace 4 años aproximadamente, incluso antes de ingresar al SEIA, como por ejemplo el proyecto en estudio Parque eólico Faro del sur, el cual tiene datos desde el año 2019 en sus líneas de base (HIF, 2023). Una de las preocupaciones que surge a raíz de estos proyectos es el impacto socioambiental que podría conllevar este tipo de proyectos, ya sea para el territorio, la fauna o incluso en el medio humano (Norambuena et al, 2022).

La correcta planificación y prevención de impactos ambientales es crucial para un desarrollo sostenible de proyectos de esta envergadura, los cuales no tienen precedente alguno, no sólo en la región, sino que en el país. Es por esto, que los estudios ambientales y sociales que se están desarrollando en torno a estos proyectos son de alta complejidad y especialización, con esfuerzos de medición y análisis nunca antes vistos en la región (Muñoz, 2024). Uno de estos es el estudio del tránsito aéreo de las aves dentro de las áreas de influencia de los proyectos, los cuales utilizan diferentes metodologías y técnicas de muestreo para poder caracterizar la riqueza, abundancia y comportamiento de las aves del sector. Esto debido a que la colisión de aves contra aerogeneradores de proyectos eólicos está documentada como uno de los impactos ambientales que afecta a la fauna voladora (por ej: Uribe et al, 2018; Dempsey y Hein, 2023; Aschwanden et al, 2018; Bernardino et al, 2013; Kleyheeg et al, 2018; Strickland et al, 2011; Pérez et al, 2021; Drewitt y Langston, 2006; entre otros), por ende, podría ser un componente crítico en el desarrollo de este tipo de proyectos.

Sin embargo, Chile no es pionero en la implementación de la energía eólica ni en la prevención de sus impactos ambiental como otros países, tales

como: China, Estados Unidos, Alemania o España (Ferreira y Acosta, 2014), en donde desde hace años han desarrollado parques eólicos en diferentes lugares y condiciones, incluso desarrollando parques eólicos en el mar. Algunos de estos países han implementado la utilización de modelos de riesgo de colisión para cuantificar la cantidad de aves que colisionan con las turbinas de estos proyectos. Sin embargo, en Chile la autoridad ambiental no tiene atribuciones para exigir la implementación de modelos de riesgo de colisión en la evaluación ambiental de este tipo de proyectos, a diferencia de otros países como, por ejemplo, Inglaterra (Mcgregor et al, 2018). Estos modelos son una herramienta de gran utilidad para predecir impactos en fases previas a la construcción u operación de un parque eólico, o también cuando no existen datos suficientes de las aves del lugar y su comportamiento (Dempsey y Hein, 2023; González et al, 2014; Zolotoff, 2020), tal como en este caso. Éstos podrían ser de gran ayuda para el desarrollo del hidrógeno verde en el país en cuanto a la prevención y reducción de impactos negativos sobre las aves, pero para ser realmente efectivos, requieren datos suficientes sobre el comportamiento de las aves del sector, tanto a lo largo del ciclo anual como en una variedad de condiciones, incluidas diferentes condiciones climáticas y horas del día. (Drewitt y Langston, 2006).

La elección del modelo de riesgo de colisión más apropiado fue una de las dificultades de la investigación, ya que actualmente existen varios modelos de riesgo de colisión con diferentes enfoques, resultados y aplicabilidad. Dentro de los factores que llevaron en primer lugar a elegir el modelo de Band para este trabajo, está el ser ampliamente utilizado en la evaluación de impactos ambientales de otros proyectos eólicos en la escena internacional, además de tener aceptación en cuanto al modelado de colisiones de aves y también está ampliamente documentado (Willmott et al, 2012). También cuenta con guías, publicaciones y casos aplicados que facilitaron su comprensión y aplicabilidad

(por ej; Band, 2000; Band, 2007; Band, 2012; Jenkins, 2018; Kleyheeg et al, 2018; Clondargan y Ireland).

Además, este modelo es aplicable a parque eólicos en tierra o en el mar, así como también se puede aplicar a un parque eólico completo, a nivel de un subgrupo de turbinas o incluso a una turbina individual. También incorpora parámetros relevantes como la densidad de aves volando por unidad de área horizontal del parque eólico y la proporción de aves que vuelan a la altura de la turbina. Así como también incorpora en el cálculo datos sobre distribución de alturas de especies, actividad de vuelo nocturno, horas de luz y horas de oscuridad, tasa de evitación a las instalaciones, entre otros parámetros sobre el parque eólico y las especies en estudio (Band, 2000; Band, 2007; Band, 2012).

Otra ventaja del modelo de Band es que la interfaz utilizada para este modelo es una hoja de cálculo en Excel disponible abierta y gratuitamente, lo que facilitó el uso y comprensión de los cálculos en comparación con otros modelos (Masden y Cook, 2016). En esta interfaz se calculan diferentes tipos de resultados, un modelo básico y otro ampliado incluyendo más parámetros como la distribución de alturas y la incorporación de un factor de corrección.

A pesar de su aceptación, el modelo tiene ciertas limitaciones y suposiciones en las diferentes etapas del cálculo, por lo que se debería tener cautela al interpretar los resultados. Algunas de las suposiciones del modelo de Band, es que incluyen sesgos inherentes de recopilación de datos de campo, los cuales siempre están presentes, aunque sean muy pequeños. También el modelo supone que las aves tienen una forma cruciforme, y la velocidad de vuelo de las aves es constante, independientemente del vuelo contra el viento o a favor el viento, y tampoco tiene en cuenta las aves que vuelan en diferentes ángulos con respecto a las palas de la turbina.

Chamberlain et al, 2006, criticó el modelo Band diciendo que, si bien era estadísticamente sólido, la falta de datos sobre las tasas de evitación de las

aves con respecto al parque eólico debería alentar a tomar con cautela la interpretación de los resultados del modelo.

Lo mismo menciona, Drewitt y Langston, 2006, donde si bien los modelos de riesgo de colisión permiten adoptar un enfoque estandarizado para cuantificar las colisiones, una limitación significativa de estos modelos es que su precisión para determinar el riesgo real de colisión depende en gran medida de la aplicación de tasas confiables de evitación, obtenidas del monitoreo en parques eólicos ya existentes. Al pasar de los años, nuevos estudios sobre las tasas de evitación llenaron ese vacío en parte, ya que, si bien existe documentación de las tasas de evitación a parques eólicos de ciertas especies de aves, el número de especies aún es pequeño, particularmente en América Latina.

Dentro de las complejidades del modelo, estuvo el cálculo y obtención de cada uno de los datos de entrada que el modelo necesita para predecir las tasas de colisión. Se encontró que éste incorpora aspectos demasiado técnicos sobre el funcionamiento de los aerogeneradores, por ejemplo, el ángulo de paso de las palas, la velocidad de rotación de la turbina y el ancho máximo de cuerda de las palas del aerogenerador, el cual depende del perfil aerodinámico de éstas, ya que por su diseño el ancho de esta no es constante a lo largo de la pala.

No se especifica el modelo de los aerogeneradores utilizados en este proyecto, sin embargo, se tiene el antecedente que la misma empresa mandante del proyecto (HIF) tiene un proyecto piloto en funcionamiento donde utiliza un aerogenerador de marca “Siemens Gamesa” . Por lo que el cálculo de las tasas de colisión se realizó con un aerogenerador de la misma marca, pero diferente modelo, el cual además coincide con las especificaciones técnicas de los aerogeneradores del proyecto, tal como el área de barrido, diámetro del

rotor, rango de velocidad de rotación y la potencia. Este es un “Siemens Gamesa” modelo SG 7.0-170.

También otra complejidad en el cálculo fue determinar la velocidad de vuelo de las aves, ya que no era un dato que esté dentro de los registros del EIA del proyecto, se tuvo que calcular en base a antecedentes bibliográficos que no son específicos del sector, por lo que es otro sesgo que podría tener el cálculo.

Finalmente, el cálculo de la densidad de las aves se realizó tomando los registros del año en donde más monitoreos se realizaron debido a que los registros de aves documentadas en el EIA del proyecto son muy numerosos, se utilizaron tres diferentes metodologías, aplicadas en diferentes periodos y con diferentes duraciones. Este cálculo de la densidad de aves por kilómetro cuadrado, en base a lo documentado en el EIA del proyecto se identificó como uno de los aspectos más desafiantes en este estudio, ya que los registros de aves documentadas en el EIA del proyecto son muy numerosos, se utilizaron tres diferentes metodologías, aplicadas en diferentes periodos y con diferentes duraciones. Lo que hacía que los miles de registros de tránsito aéreo documentados no fueran representativos a un lugar y momento específico, sino sólo una suma de todos los registros obtenidos a lo largo de la elaboración del EIA.

Con todas las limitantes anteriores se logró obtener, de manera teórica, una predicción de las tasas de colisión del ave Caiquén (*Chloephaga picta*) contra los aerogeneradores del proyecto eólico “Faro del sur” a cargo de la empresa HIF, el cual está destinado a la producción de hidrógeno verde en la Región de Magallanes y de la Antártica Chilena. Uno de los resultados más relevantes es la correlación negativa encontrada entre la tasa de colisión de las aves y la tasa de evitación de las aves con respecto al parque eólico, Esto

quiere decir que a medida que las tasas de evitación de las aves son más altas, disminuyen las tasas de colisión y viceversa (Ver tabla 10).

Pero, por otro lado, también se puede observar una correlación positiva entre las tasas de colisión y la velocidad de giro de las turbinas. Es decir, las tasas de colisión de aves aumentan a medida que la velocidad de giro de las turbinas es mayor. Y al mismo tiempo, la velocidad de giro de las turbinas depende de la velocidad del viento, por lo que también puede existir una relación entre estas dos variables. De hecho, está documentado que al reducir la velocidad de giro de las aspas de los aerogeneradores se reduce el impacto sobre las aves que se desplazan por un parque eólico, dado que aumenta la visibilidad de las aspas en movimiento y además reduce la probabilidad de colisión al disminuir la frecuencia de giro (Kleyheeg et al, 2018).

En cuanto a las tasas de evitación utilizadas para el cálculo de las colisiones, el Scottish Natural Heritage, 2016, menciona que en general las aves tienen una alta tasa de evitación a los parques eólicos, y si bien existen tasas de evitación documentadas por especie y por grupo, para especies que no están en el listado se recomienda un valor predeterminado de 98% de evitación para el modelo utilizado. La especie en estudio, el caiquén, no estaba en este listado.

Esto indica que los valores obtenidos de tasa de colisión de caiquenes, con un 98% de evitación, sería un valor recomendable como referencia. Ya que un escenario más conservador como el de 99%, podría sobredimensionar el número de colisiones esperadas, así como por otro lado un valor más laxo, como el 95%, podría subestimar el número total de colisiones.

De este modo, el valor obtenido para las tasas de colisión de caiquenes con un 98% de evitación fue de 0,75, 1,13 y 1,5 aves por aerogenerador por año, para una velocidad baja, media y alta de rotación de las turbinas respectivamente (Ver tabla 11). Estos resultados si bien son predictivos en base

a las características del proyecto, del lugar y de las aves, en comparación con las tasas de colisiones documentadas en otros parques eólicos son bastante similares, e incluso por debajo de lo documentado. Por ejemplo, la empresa HIF en su DIA del proyecto piloto que tiene en funcionamiento señalan tasas de colisión de 0,6 a 0,8 aves por aerogenerador por año, para el caso de un parque eólico en la cuarta región del país, y de 1 a 2 aves por aerogenerador por año en Estados Unidos (HIF, 2020). Sin embargo, la realidad actual indica que la mortalidad en aves por colisión contra aerogeneradores a nivel mundial, pueden ser muy variables, llegando a variar desde 0 a 40 aves por turbina por año. Este número cambia de acuerdo con el sitio donde se ubique el proyecto eólico, algunos sitios presentan mayor riesgo de colisión que otros, y algunas especies también son más vulnerables a colisionar que otras (Marques et al, 2014).

Al comparar los resultados del modelo con lo documentado, las tasas de colisión esperadas para el caiquén son bajas e, incluso, inferiores a lo documentado. Estas similitudes sugieren que la interacción entre caiquenes y aerogeneradores podrían seguir una tendencia acorde con la evidencia previa, reforzando la validez e importancia de incorporar modelos de riesgo de colisión en el desarrollo de proyectos eólicos.

10.Conclusiones

En la actualidad, muchos de los estudios que documentan los impactos asociados a la implementación de parques eólicos, han evidenciado que efectivamente pueden existir colisiones de aves contra aerogeneradores, lo que generalmente suele devenir en la mortalidad de las mismas. De hecho, éste fue el primer efecto de los parques eólicos en ser estudiado y sigue siendo un motivo internacional de preocupación por la gran cantidad de aves que mueren a causa de los parques eólicos en diferentes partes del mundo.

La obtención de una predicción de las tasas de colisión del ave Caiquén (*Chloephaga picta*) contra los aerogeneradores del proyecto en estudio, el cual aún no está en operación, demuestra la efectividad del modelo de Band para poder realizar cálculos de manera predictiva en base a información específica del proyecto y del comportamiento de las aves del sector.

A lo largo de casi un año de trabajo, se logró con éxito el recopilar información sobre los modelos de riesgo de colisión existentes y lo más utilizados en la escena internacional.

En cuanto, a los resultados para las tasas de colisión del Caiquén, los cuales son similares e incluso por debajo de lo documentado en bibliografía, no sólo le otorgan validez al modelo utilizado, sino que también sugieren su utilidad para evaluar y gestionar los posibles impactos negativos sobre las aves locales, en fases previas a la construcción u operación del parque eólico.

También, se pudo determinar ciertas relaciones entre variables consideradas en el cálculo, como por ejemplo la relación positiva entre las tasas de colisión y la velocidad de giro de los aerogeneradores, la cual, a su vez, depende de la velocidad del viento. Así como también se encontró una relación inversa entre las tasas de colisión y las tasas de evitación de las aves. Es decir, que las condiciones de fuertes vientos, baja evitación al parque eólico y los

meses de verano (donde se predicen más colisiones), podría ser una de las condiciones donde existe un mayor riesgo de colisión.

Por otra parte, también se recomienda tomar con cautela los resultados de cualquiera de los modelos de riesgo de colisión de tipo predictivo, ya que, como todo modelo matemático, éste tiene sus propias limitaciones, como por ejemplo los supuestos que podrían no cumplirse en todos los casos. Esto deriva en que existan sesgos en la obtención de estas tasas de colisión, más allá de los inherentes a la recolección de datos en terreno.

Cabe destacar que las colisiones de aves contra aerogeneradores de un parque eólico pueden variar mucho dependiendo de un sitio u otro, por diferentes factores. El riesgo de colisión se puede ver influenciado por ciertas condiciones ambientales, las especificaciones de los aerogeneradores, pero por sobre todo por las aves y los efectos negativos que pueden traer estas colisiones sobre ciertas especies.

Finalmente, la obtención de una predicción de las tasas de colisión del ave Caiquén (*Chloephaga picta*) contra los aerogeneradores del proyecto en estudio, el cual aún no está en operación, demuestra la efectividad del modelo de Band para poder realizar cálculos de manera predictiva en base a información específica del proyecto y del comportamiento de las aves del sector, lo que respalda positivamente la hipótesis de la investigación y el cumplimiento del objetivo general del presente trabajo.

11. Bibliografía

1. Aschwanden, J., Stark, H., Peter, D., Steuri, T., Schmid, B., y Liechti, F. (2018). Bird collisions at wind turbines in a mountainous area related to bird movement intensities measured by radar. *Biological Conservation*, 220, 228-236.
2. Atienza, J.C., I. Martín Fierro, O. Infante, J.Valls y J. Domínguez. 2011. Directrices para la evaluación del impacto de los parques eólicos en aves y murciélagos (versión 3.0). SEO/BirdLife, Madrid
3. Band, B.T. y Hermansen, P. (2012). Using a collision risk model to assess bird collision risks for offshore windfarms March 2012.
4. Band, W. (2000). Windfarms and Birds: calculating a theoretical collision risk assuming no avoiding action. Scottish Natural Heritage Guidance Note. <http://www.snh.gov.uk/planningand-development/renewable-energy/onshore-wind/assessing-bird-collision-risks/>
5. Band, W., Madders, M. and Whitfield, D.P. (2007). Developing field and analytical methods to assess avian collision risk at windfarms. In De Lucas, M., Janss, G. and Ferrer, M. (eds) 'Birds and Wind Power'. www.quercus.pt
6. Bernardino, J., Bispo, R., Costa, H., y Mascarenhas, M. (2013). Estimating bird and bat fatality at wind farms: a practical overview of estimators, their assumptions and limitations. *New Zealand Journal of Zoology*, 40(1), 63-74.
7. Berro Bariain, J. (2018). Modelado de incertidumbre en sistema de comunicaciones y actuadores de un aerogenerador y diseño de algoritmos de control inmunes a sus efectos.
8. Brito-Vallina, M. L., Alemán-Romero, I., Fraga-Guerra, E., Para-García, J. L. y Arias-de Tapia, R. I. (2011). Papel de la modelación matemática en la

formación de los ingenieros. Ingeniería mecánica, 14(2), 129-139.
<http://scielo.sld.cu/pdf/im/v14n2/im05211.pdf>

9. Chamberlain, D. E., Rehfisch, M. R., Fox, A. D., Desholm, M. y Anthony, S. J. (2006). The effect of avoidance rates on bird mortality predictions made by wind turbine collision risk models. *Ibis*, 148, 198-202.
10. Clondargan, S. y Ireland, C. C. Annex 5.7: Avian Collision Risk Modelling.
11. D Christie y B Urquhart (2015). A refinement of the Band spreadsheet for wind turbine collision risk allowing for oblique entry, *New Zealand Journal of Zoology*, 42:4, 290-297, DOI: 10.1080/03014223.2015.1064456
12. De Lucas Castellanos, M. (2007). Aves y parques eólicos: efectos e interacciones (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Madrid). https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/2022/5171_lucas_castellanos_manuela.pdf?sequence=1&isAllowed=y
13. Dempsey, Laura y Hein, Cris. (2023). Modelos de riesgo de colisión: una herramienta para evaluar los riesgos para las aves rapaces en instalaciones de energía eólica (Spanish). United States.
14. Drewitt, A., H y Rowena, W. Langston. (2006). Assessing the impacts of wind farms on birds. *Ibis* 148:29-42. <https://doi.org/10.1111/j.1474-919X.2006.00516.x>
15. Eterovic Martí, D. M. (2022). Avances y desafíos en torno a la regulación del hidrógeno verde en Chile. *Revista De Derecho Aplicado LLM UC*, (10). <https://doi.org/10.7764/rda.10.ECC49971>
16. Ferrer, M., Janns, G. F. y de Lucas, M. (Eds.). (2009). Aves y parques eólicos: valoración del riesgo y atenuantes. Quercus.
17. García Bernal, N. (2021, octubre). Carbono neutralidad en el sector energético de Chile. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile.

https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/32578/1/B_CN_Carbononeutralidad_en_el_sector_energetico_Chile_15Oct._Rev._RT01_edPM.pdf

18. Gobierno de Chile. (2020, 9 de abril). Contribución Determinada a Nivel Nacional de Chile. Ministerio del Medio Ambiente. https://cambioclimatico.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/08/NDC_2020_Espanol_PDF_web.pdf
19. González G., Gonzalo O., Lorena S. (2014, mayo). “MEDIDAS DE MITIGACIÓN DE IMPACTOS EN AVES SILVESTRES Y MURCIÉLAGOS”. Servicio Agrícola y Ganadero. https://www.sag.gob.cl/sites/default/files/producto_1.3_entrega..pdf
20. Hernández Fernández, A. (2023). Hidrógeno verde y su almacenamiento energético: Estado del arte.
21. HIF. (2020). Declaración de impacto ambiental “proyecto piloto de descarbonización y producción de combustibles carbono neutral”. Anexo 2.3 actualización capítulo 8 fichas resumen. Recuperado de https://seia.sea.gob.cl/expediente/expedientesevaluacion.php?modo=ficha&id_expediente=2149071179
22. HIF. (2023). Estudio de impacto ambiental “Parque eólico Faro del Sur”. Recuperado de https://seia.sea.gob.cl/expediente/ficha/fichaPrincipal.php?modo=normal&id_expediente=2160813317
23. Hucke-Gaete, R., Viddi, F. A. y Simeone, A. (2021). Aves y mamíferos marinos de la Patagonia chilena: especies focales para la conservación de los ecosistemas marinos. Conservación en la Patagonia chilena: evaluación del conocimiento, oportunidades y desafíos, 289-320. https://www.researchgate.net/publication/354132026_Aves_y_Mamiferos_M

arinos_de_la_Patagonia_Chilena_Especies_Focales_para_la_Conservacion_de_los_Ecosistemas_Marinos

24. Industrial Analytics Platform. (2022, febrero). Hidrógeno verde: Impulsando el desarrollo industrial para un futuro limpio y sostenible | Industrial Analytics Platform. <https://iap.unido.org/es/articles/hidrogeno-verde-impulsando-el-desarrollo-industrial-para-un-futuro-limpio-y-sostenible>
25. IPCC, 2021: Resumen para responsables de políticas. En: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu y B. Zhou (editores)]. Cambridge University Press.
26. IRENA (2021), World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/IRENA_World_Energy_Transitions_Outlook_2021.pdf?rev=71105a4b8682418297cd220c007da1b9
27. J. Jenkins AR, Reid T, du Plessis J, 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(2): e0192515. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0192515>
28. Jiménez Sáez, F. L. (2020). Evaluación técnica y económica del uso de hidrógeno verde en aplicaciones para la industria y desplazamiento de combustible fósil.
29. Jorge Moreno, Donny Holaschutz, Héctor Moreno y Tomás Meyer. (2020). Identificación de aspectos ambientales, sectoriales y territoriales para el desarrollo de proyectos de hidrógeno verde en toda su cadena de valor.

https://bibliotecaacademica.minrel.gov.cl/opac-tmpl/bootstrap/hidrogeno_verde/Identificacion_de_aspectos_ambientales.pdf

30. Kleyheeg-Hartman, J. C., Krijgsveld, K. L., Collier, M. P., Poot, M. J. M., Boon, A. R., Troost, T. A. y 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.
31. Lee, J., Zhao, F. (2021). GWEC Global Wind Report; Global Wind Energy Council: Brussels, Belgium, 2021. <https://gwec.net/wp-content/uploads/2021/03/GWEC-Global-Wind-Report-2021.pdf>
32. Marques, A. T., Batalha, H., Rodrigues, S., Costa, H., Pereira, M. J. R., Fonseca, C., ... y Bernardino, J. (2014). Understanding bird collisions at wind farms: An updated review on the causes and possible mitigation strategies. *Biological Conservation*, 179, 40-52.
33. Masden, E. A. y Cook, A. S. C. P. (2016). Avian collision risk models for wind energy impact assessments. *Environmental Impact Assessment Review*, 56, 43–49. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2015.09.001>
34. McGregor, R. M., King, S., Donovan, C. R., Caneco, B. y Webb, A. (2018). A Stochastic Collision Risk Model for Seabirds in Flight. Recuperado de <https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/McGregor-2018-Stochastic.pdf>
35. Mesa Ciudadana de Energía para Magallanes (2015). Propuesta ciudadana de Energía para Magallanes. Boell.org. Recuperado el 10 de mayo de 2023, de <https://cl.boell.org/sites/default/files/magallanes.pdf>
36. Ministerio de Energía. (2017, 1 de enero). Energía 2050 política energética de Chile. Biblioteca digital CIREN.

https://biblioteca.digital.gob.cl/bitstream/handle/123456789/611/48_Energia%202050_Politica_Energetica_Chile.pdf?sequence=1&isAllowed=y

37. Ministerio de Energía. (2020, noviembre). ESTRATEGIA NACIONAL DE HIDRÓGENO VERDE: Chile, fuente energética para un planeta cero emisiones. Recuperado de https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_nacional_de_hidrogeno_verde_-_chile.pdf
38. Ministerio de Energía. (2021, febrero). Identificación de Potenciales Renovables: Caso Eólico Hidrógeno Verde en la Región de Magallanes y de la Antártica Chilena. Recuperado de https://exploradores.minenergia.cl/portal-ernc/websites/Magallanes_White_Paper_Edicion_Feb20.pdf
39. Ministerio de Energía. (2022, marzo). H2V HIDROGENO VERDE UN PROYECTO PAÍS Recuperado el 1 de junio de 2023, de https://energia.gob.cl/sites/default/files/guia_hidrogeno_abril.pdf
40. Ministerio de Medio Ambiente. (2022, noviembre). Fortalecimiento de la Contribución Determinada a Nivel Nacional de Chile. Recuperado de <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2023/01/Chile-Fortalecimiento-NDC-nov22.pdf>
41. MMA. (2019). Informe del Estado del Medio Ambiente 2019: Capítulo 2. Institucionalidad Ambiental y Desarrollo Sustentable. Recuperado de <https://sinia.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/04/2-institucionalidad-ambiental-y-desarrollo-sustentable.pdf>
42. Interamerican Development Bank. (2022, marzo). "Prefeasibility study for a synthetic fuel project in the Magallanes region based on green hydrogen". Recuperado de: https://energia.gob.cl/sites/default/files/ch-t1235-p003_final_report_28-03-2022_vf.pdf

43. Muñoz Antonin, M. I. (2024, 17 de febrero). Industria H2V y Ciencia. La Prensa Austral. Recuperado de <https://laprensaaustral.cl/2024/02/17/industria-h2v-y-ciencia/>
44. New, L., Bjerre, E., Millsap, B., Otto, M. C. y Runge, M. C. (2015). A Collision Risk Model to Predict Avian Fatalities at Wind Facilities: An Example Using Golden Eagles, *Aquila chrysaetos*. PloS one, 10(7), e0130978. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0130978>
45. Norambuena, H. V., Labra, F. A., Matus, R., Gómez, H., Luna-Quevedo, D. y Espoz, C. (2022). Green energy threatens chile's magallanes region. Science, 376(6591), 361-362.
46. Observatorio Laboral de Sence en Magallanes. (2021, diciembre). Hidrógeno Verde en la Región de Magallanes y de la Antártica Chilena Una contextualización para la identificación de perfiles laborales para la industria. Sence.cl. Recuperado el 10 de mayo de 2023, de <https://observatorionacionalapi.sence.cl/dl/reportes-1646920230551.pdf>
47. Orloff, S. G. y Flannery, A. W. (1992). Wind turbine effects on avian activity, habitat use, and mortality in the Altamont Pass and Solano County Wind Resource Areas. Avian interactions with utility structures. <https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/Orloff-1992.pdf>
48. Patricio Lillo. (2020). Hidrógeno verde: El combustible del futuro. Educación Profesional. Escuela de Ingeniería Pontificia Universidad Católica de Chile, <https://educacionprofesional.ing.uc.cl/hidrogeno-verde-el-combustible-del-futuro>.
49. Pedrana, J., Puetz, K., Bernad, L., Muñoz, S., Gorosabel, A., Castresana, G., ... y PON, J. P. S. (2020). Spatial and temporal variation in the migration of Ruddy-headed Goose in southern South America using satellite tagging. Bird Conservation International, 30(4), 634-648.

50. Pedrana, J., Seco Pon, J. P., Isacch, J. P., Leiss, A., Rojas, P. O., Castresana, G., ... y Putz, K. (2015). First insights into the migration pattern of an Upland Goose (*Chloephaga picta*) based on satellite tracking.
51. Pérez, R. S., Pérez-Collazos, E. y Esteban, C. G. (2021). Aerogeneradores y avifauna en Aragón. Lucas Mallada: revista de ciencias, (21), 267-284.
52. Pérez-García, J.M. (2014). Modelos predictivos aplicados a la corrección y gestión del impacto de la electrocución de aves en tendidos eléctricos. Tesis doctoral. Universidad Miguel Hernández, Elche.
53. Petracci, Pablo y Carrizo, Martín. (2019). PARQUES EÓLICOS ¿NUEVA AMENAZA PARA LA FAUNA VOLADORA?. https://www.researchgate.net/publication/339602150_PARQUES_EOLICOS_NUEVA_AMENAZA_PARA_LA_FAUNA_VOLADORA
54. Proaño, M. (2021). Hydrogen in Latin America. Handle with Care (II). En Energy Transition: The Global Energiewende. Publicado el 18 de noviembre de 2021. Obtenido en https://energytransition.org/2021/11/hydrogen-in-latin-america-handle-with-care-ii/?fbclid=IwAR2bT2jVsxBlumAj4_BDSyHsqZVI76SYJTTr9vkAe8asgWWRQJnAGMESZK0o
55. Regueiro Ferreira, R. M. y Chávez Acosta, H. (2014). El desarrollo eólico en Brasil, Ecuador y España: reflexiones a partir del marco normativo.
56. SAG (2015). Guía para la evaluación del impacto ambiental de proyectos eólicos y de líneas de transmisión eléctrica en aves silvestres y murciélagos. Primera edición. Ministerio de Agricultura. Santiago, Chile. 120 p. Recuperado de https://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/20.500.13082/33303/SAG_2015_EIA_guia_proyectos_eolicos.pdf?sequence=1&isAllowed=y

57. Schaeffer-Novelli, Y., Cintrón-Molero, G. y Coelho, C., Jr. (2006). Managing shorebird flyways: shrimp aquaculture, shorebird populations and flyway integrity. Waterbirds around the world. Eds. G.C. Boere, C.A. Galbraith y D.A. Stroud. The Stationery Office, Edinburgh, UK. pp. 812-816. <https://data.jncc.gov.uk/data/08cfb4da-4c5a-4bef-b45d-8f2f87dc8070/waterbirds-around-the-world.pdf>
58. Scottish Natural Heritage (2016). Avoidance rates for the onshore SNH wind farm collision risk model. SNH.
59. SEA (2021). Criterio de evaluación en el SEIA: descripción integrada de proyectos para la generación de hidrógeno verde en el SEIA [Documento técnico]. Recuperado de <https://sea.gob.cl/sites/default/files/adjuntos/noticias/Criterio%20técnico%20Hidrogeno%20Verde.pdf>
60. SEA (2022, enero). CRITERIO DE EVALUACIÓN EN EL SEIA: Introducción A Proyectos De Hidrógeno VERDE. https://www.sea.gob.cl/sites/default/files/imce/archivos/2022/09/21/02_dt_hidrogeno_verde.pdf
61. SEA (2023). Criterio de evaluación en el SEIA: descripción integrada de proyectos para la generación de hidrógeno verde en el SEIA [Documento técnico]. Recuperado de <https://sea.gob.cl/sites/default/files/adjuntos/noticias/Criterio%20técnico%20Hidrogeno%20Verde.pdf>
62. Siemens Gamesa. (2019). Developer Package SG 6.0-170.
63. Skov, H. y Heinänen, S. (2015). Predicting the Weather-Dependent Collision Risk for Birds at Wind Farms. In Wind and Wildlife: Proceedings from the Conference on Wind Energy and Wildlife Impacts, October 2012, Melbourne, Australia (pp. 3-21). Dordrecht, Netherlands: Springer.

64. Strickland, M.D., E.B. Arnett, W.P. Erickson, D.H. Johnson, G.D. Johnson, M.L., Morrison, J.A. Shaffer, and W. Warren-Hicks. (2011). Comprehensive Guide to Studying Wind Energy/Wildlife Interactions. Prepared for the National Wind Coordinating Collaborative, Washington, D.C., USA.
65. Tolvanen, A.; Routavaara, H.; Jokikokko, M.; Rana, P. (2023). How far are birds, bats, and terrestrial mammals displaced from onshore wind power development? – A systematic review. *Biological Conservation*, 288, 110382. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2023.110382>
66. Uribe-Rivera, M.A., A.A. Guevara-Carrizales, G. Ruiz-Campos. (2018). Mortalidad incidental de aves paseriformes en un parque eólico del noroeste de México. *Huitzil* 20(1): e-487. doi: <https://doi.org/10.28947/hrmo.2019.20.1.377>
67. Willmott, J. C. R., Costello, E. A., Gordon, C. E., Forcey, G., Casto, S., Beaulac, G. y Pilla, E. (2012). Bird and Bat Collision Risks y Wind Energy Facilities.
68. World Energy Council. (2021). Hidrógeno en el Horizonte: ¿Preparados, Listos, Ya?: Estrategias Nacionales. https://www.worldenergy.org/assets/downloads/working_paper_-_national_hydrogen_strategies_september_2021_spanish.pdf?v=1646390984
69. Wyczykier, G. (2023). Senderos de la transición energética: el hidrógeno verde en la era del cambio climático. *Revista temas sociológicos*, 31, 453–484. <https://doi.org/10.29344/07196458.31.3164>
70. Ziehe J., Walter K., Oliva T., Cárdenas P. y González J.P. (2021). Alianza Estratégica Hidrógeno Verde para el Biobío y Universidad de Concepción. Manual del Hidrógeno Verde. Disponible en la web <https://www.ah2vbiobio.cl/wp->

content/themes/lms_mooc/assets/Manual_Del_Hidrógeno_Verde_Ah2VBiobío.pdf

71. Zimmerling, J. R., A. C. Pomeroy, M. V. d'Entremont, and C. M. Francis. (2013). Canadian estimate of bird mortality due to collisions and direct habitat loss associated with wind turbine developments. *Avian Conservation and Ecology* 8(2): 10. <http://dx.doi.org/10.5751/ACE-00609-080210>
72. Zolotoff, J. (2020). Predicción de colisiones de aves contra torres eólicas en Rivas, Nicaragua, antes de su construcción, 2010-2011. [Tesis de master, Universidad Nacional de Ingeniería (Nicaragua)]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Ingeniería. <https://ribuni.uni.edu.ni/2896/1/PIENSA25.pdf>
73. Zuriaga, I. G. (2021, julio). Retos del hidrógeno verde. Portal de Sostenibilidad | Cámara Valencia. <https://negociosostenible.camaravalencia.com/wp-content/uploads/2021/07/ECONOMA-ARAGONESA-revista-73-Hidrogeno-Verde-2.pdf>

12. Anexos

Anexo 1: Interfaz del modelo de Band, datos de entrada

COLLISION RISK ASSESSMENT			used in overall collision risk sheet				used in available hours sheet							
Sheet 1 - Input data			used in migrant collision risk sheet				used in large array correction sheet							
			used in single transit collision risk sheet or extended model				not used in calculation but stated for reference							
	Units	Value	Data sources											
Bird data														
		Caiquén												
Bird length	m	0,65												
Wingspan	m	0,80												
Flight speed	m/sec	3,48												
Nocturnal activity factor (1-5)		2												
Flight type, flapping or gliding		flapping												
			Data sources											
Bird survey data			Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Daytime bird density	ds/sq km		41,46	41,46	41,46	13,04	13,04	13,04	19,33	19,33	19,33	3,21	3,21	3,21
Proportion at rotor height	%	0,09%												
Proportion of flights upwind	%	50,0%												
	Units	Value	Data sources											
Windfarm data														
Name of windfarm site		HIF												
Latitude	degrees	-52,84												
Number of turbines		64												
Width of windfarm	km	6,15												
Tidal offset	m	0												
	Units	Value	Data sources											
Turbine data														
Turbine model		SG 7.0-170												
No of blades		3												
Rotation speed	rpm	15												
Rotor radius	m	85												
Hub height	m	115	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Monthly proportion of time c	%		85%	85%	85%	85%	85%	85%	85%	85%	85%	85%	85%	85%
Max blade width	m	4,50												
Pitch	degrees	15												
Avoidance rates used in present			95,00%	Data sources (if applicable)										
			98,00%											
			99,00%											

Anexo 2: Interfaz modelo de Band, datos de salida

COLLISION RISK ASSESSMENT																	
Sheet 2 - Overall collision risk		All data input on Sheet 1:					from Sheet 1 - input data										
		no data entry needed on this sheet!					from Sheet 6 - available hours										
Bird details:							from Sheet 3 - single transit collision risk										
Species		Caiquén					from survey data										
Flight speed	m/sec	3,5					calculated field										
Nocturnal activity factor (1-5)		2															
Nocturnal activity (% of daytime)		25%															
Windfarm data:																	
Latitude	degrees	-52,8															
Number of turbines		64															
Rotor radius	m	85															
Minimum height of rotor	m	115															
Total rotor frontal area	sq m	1452672															
		Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	year average			
Proportion of time operational	%	85%	85%	85%	85%	85%	85%	85%	85%	85%	85%	85%	85%	85%	85,0%		
Stage A - flight activity																	
Daytime areal bird density	birds/sq km	41,458	41,4578	41,458	13,04	13,03966	13,03966	19,32647	19,32647	19,32647	3,209355	3,209355	3,209355				
Proportion at rotor height	%	0,1%															
Total daylight hours per month	hrs	504	408	389	314	269	231	251	299	349	425	470	520				
Total night hours per month	hrs	240	264	355	406	475	489	493	445	371	319	250	224				
Flux factor		#####	2104257	#####	580117	540922	492636	774543	849222	913875	173479	182896	197949				
Option 1 -Basic model - Stages B, C and D												per annum					
Potential bird transits through rotors		2253	1894	1908	522	487	443	697	764	822	156	165	178	10290			
Collision risk for single rotor transit	(from sheet 3)	27,6%															
Collisions for entire windfarm, allowing for non-op time, assuming no avoidance	birds per month or year	529	444	448	123	114	104	164	179	193	37	39	42	2415			
Stage E - applying avoidance rates																	
Using which of above options?	Option 1	0,00%	528,6	444,4	447,8	122,5	114,2	104,0	163,6	179,4	193,0	36,6	38,6	41,8	2415		
	birds per month																
Collisions assuming avoidance rate	or year	95,00%	26,4	22,2	22,4	6,1	5,7	5,2	8,2	9,0	9,7	1,8	1,9	2,1	121		
		98,00%	10,6	8,9	9,0	2,5	2,3	2,1	3,3	3,6	3,9	0,7	0,8	0,8	48		
		99,00%	5,3	4,4	4,5	1,2	1,1	1,0	1,6	1,8	1,9	0,4	0,4	0,4	24		
Collisions after applying large array correction		95,00%	26,3	22,1	22,2	6,1	5,7	5,2	8,1	8,9	9,6	1,8	1,9	2,1	120		
		98,00%	10,5	8,9	8,9	2,4	2,3	2,1	3,3	3,6	3,9	0,7	0,8	0,8	48		
		99,00%	5,3	4,4	4,5	1,2	1,1	1,0	1,6	1,8	1,9	0,4	0,4	0,4	24		