

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA



FACULTAD DE CIENCIAS



MAESTRÍA EN CIENCIAS EN MANEJO DE ECOSISTEMAS DE ZONAS ÁRIDAS

“CARACTERIZACIÓN DE NICHOS REPRODUCTIVOS DEL ÁGUILA REAL (*Aquila chrysaetos*) EN LA PENÍNSULA DE BAJA CALIFORNIA Y APLICACIONES PARA SU MANEJO”

TESIS

Que para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta

DIEGO TOSCANO MEDINA

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO.

AGOSTO, 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE CIENCIAS

MAESTRÍA EN MANEJO DE ECOSISEMAS EN ZONAS ÁRIDAS

“CARACTERIZACIÓN DE NICHOS REPRODUCTIVOS DEL ÁGUILA REAL (*Aquila chrysaetos*) EN LA PENÍNSULA DE BAJA CALIFORNIA Y APLICACIONES PARA SU MANEJO”

TESIS

Que para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta

DIEGO TOSCANO MEDINA

Aprobado por



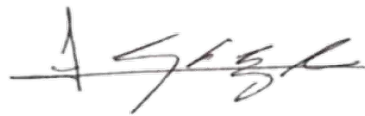
Dr. Gorgonio Ruiz Campos

Director



Dr. Gonzalo De León Girón

Sinodal



Dr. Jesús Lizardo Cruz Romo

Sinodal

## RESUMEN

Un censo aéreo fue realizado para cuantificar los nidos de Águila Real (*Aquila chrysaetos*) en los sistemas montañosos de la parte central de la península de Baja California, México, durante abril de 2021. El uso de técnicas avanzadas de reconocimiento aéreo y sistemas de información geográfica permitió identificar y mapear con precisión los nidos de Águila Real en una de las regiones más inaccesibles de México. Variables ecológicas y ambientales asociadas con los sitios de anidación muestreados fueron analizadas mediante análisis multivariado para determinar las variables que mejor explican la variación en el número de nidos. Así mismo se generó una distribución de nicho potencial reproductivo para esta especie registradas Posteriormente, se desarrollaron dos versiones de un modelo de nicho reproductivo que integra dos métodos de selección de variables ecológicas significativas (Jackknife "JKN" y Análisis de Componentes Principales "FACP"), como topografía, vegetación, clima y disponibilidad de presas, etc., proporcionando una comprensión integral de los factores ecológicos que influyen en la distribución de los nidos de Águila Real en la región. Los hallazgos describen aproximadamente 540 km<sup>2</sup> y 2,460 km<sup>2</sup> de alta probabilidad de nicho reproductivo respectivamente. Estos resultados tienen implicaciones significativas para la conservación y manejo de las poblaciones de Águila Real en estos entornos desérticos.

CITA SUGERIDA: TOSCANO, D. (2023) CARACTERIZACIÓN DE SITIOS DE ANIDACIÓN DEL ÁGUILA REAL (*AQUILA CHRYSAETOS*) EN LA PENÍNSULA DE BAJA CALIFORNIA. UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA, ENSENADA.

## ABSTRACT

An aerial survey was conducted to quantify Golden Eagle (*Aquila chrysaetos*) nests in the mountain ranges of the central part of the Baja California peninsula, Mexico, during April 2021. The use of advanced aerial reconnaissance techniques and geographic information systems allowed to accurately identify and map Golden Eagle nests in one of the most inaccessible regions of Mexico. Ecological and environmental variables associated with the sampled nesting sites were analyzed using multivariate analysis to determine the variables that best explain the variation in the number of nests. A potential reproductive niche distribution was also generated for this species. Subsequently, two versions of a reproductive niche model were developed that integrates two methods of selecting significant ecological variables (Jackknife "JKN" and Principal Components Analysis "FACP"), such as topography, vegetation, climate, and prey availability, etc., providing a comprehensive understanding of the ecological factors that influence the distribution of Golden Eagle nests in the region. The findings describe approximately 540 km<sup>2</sup> and 2,460 km<sup>2</sup> of high probability of reproductive niche, respectively. These results have significant implications for the conservation and management of Golden Eagle populations in these desert environments.

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi comité encabezado por el Dr. Gorgonio Ruiz-Campos, el Dr. Gonzalo de León-Girón y el Dr. Jesús Lizardo Cruz-Romo, por su guía, apoyo y paciencia durante todo el proceso de investigación y redacción de esta tesis. Sus consejos y comentarios fueron invaluable para la elaboración de este trabajo.

También quiero agradecer a mis compañeros de carrera, quienes siempre brindaron aportes importantes directa e indirectamente y sirvieron de ejemplo en la construcción de este trabajo.

Un agradecimiento especial a mi madre y a mis hermanos, que siempre me han apoyado incondicionalmente, tanto en lo personal como en lo académico. Literalmente es gracias a ustedes que he podido lograr esta y otras metas y soy la persona que soy hoy.

Además de los agradecimientos generales mencionados anteriormente, también quiero agradecer a las siguientes personas e instituciones que contribuyeron de manera significativa a mi trabajo:

A Juan Vargas y Catalina Porras, por ser un gran ejemplo de compromiso y responsabilidad cuando se trata de la conservación, a Eduardo Castro, Raymond Lee, Saruhen Ávila, Fernando Escoto, Omar Robles y Daniel Angulo con quienes conformé el equipazo que llevó a cabo el monitoreo de una manera simple y sencillamente perfecta. A Enrique Martínez, Ángela Cuervo y el laboratorio de análisis espaciales, a Mike Green, Jeep Pagel y Robert Fisher por sus valiosas aportaciones.

Al CONACYT por el apoyo institucional y económico para el proyecto, al igual que al GEF – PNUD a través de la SEMARNAT en su Dirección de Especies Prioritarias y las ANP Parque Nacional Sierra de San Pedro Mártir, APFF Valle de los Cirios y RB El Vizcaíno por facilitar no sólo el financiamiento para el proyecto sino por facilitar también todos sus recursos disponibles para la conducción segura y exitosa de los procedimientos acorde al plan de vuelo.

A todos ustedes, mi más profundo agradecimiento.

# Contenido

Introducción .....	9
Antecedentes.....	10
Biología .....	10
Distribución y sistemática .....	11
Fenología .....	13
Socio-ecología.....	14
Estudios de águila real.....	15
Monitoreo aéreo de poblaciones de águila real .....	15
Métodos estadísticos de análisis de poblaciones reproductivas.....	18
Estado de conservación del águila real en México y la península de Baja California .....	18
Justificación .....	21
Hipótesis .....	22
Objetivos.....	23
Objetivo general.....	23
Objetivo particular 1 (OP1) .....	23
Objetivo particular 2 (OP2) .....	23
Objetivo particular 3 (OP3) .....	23
Metodología.....	24
Área de Estudio.....	24
Fase de campo .....	26
Método OP1 Inventario de sitios de anidación .....	26
Fase de gabinete.....	27
Método OP2 Selección de variables base .....	27
Método OP3 Modelación de nicho reproductivo .....	30
Resultados.....	33
Resultado OP1 Inventario de sitios de anidación.....	33
Resultado OP2 Selección de variables base .....	35

Revisión bibliográfica .....	35
Selección de variables base .....	36
Función de JKN para selección de variables base.....	40
Función de FACP.....	40
Resultado OP3 Modelo de nicho reproductivo.....	41
Modelo de nicho reproductivo por selección de variables base con JKN de Máxima Entropía .....	41
Modelo de nicho reproductivo por eliminación de variables con FACP .....	43
Discusión.....	48
Discusión OP1 Inventario de sitios de anidación .....	48
Discusión OP2 Selección de variables.....	51
Discusión OP3 Modelo de nicho reproductivo.....	53
Limitaciones del estudio .....	57
Conclusiones y recomendaciones de manejo.....	58
Referencias .....	59

## Índice de figuras

Figura 1. Comparativo de aves rapaces de gran tamaño en América del Norte, Fuente: Tomado y modificado de Raptors of Western North América (Kevin Karlson).....	10
Figura 2. Distribución y fenología general del <i>Aquila chrysaetos</i> a nivel global. Fuente: Katzner, et al., 2020 .....	12
Figura 3. Águila real caída por colisión. Fotografía: Mía McPherson .....	16
Figura 4. Nido de águila real activo, observado desde un helicóptero. Fuente: Driscoll (2010). .....	17
Figura 5, Modelo de ensamble del potencial de distribución del águila real en México. Fuente: D'Addario, 2019 .....	19
Figura 6, Área de estudio del monitoreo poblacional aéreo para sitios de anidación de águila real en la región central de la PBC. ....	24
Figura 7, Distribución de la técnica de monitoreo abordado donde: .....	27
Figura 8, Ejemplos de variables consideradas para el análisis estadístico y sus valores base. (De izquierda a derecha: distribución de presas potenciales, precipitación promedio de la estación húmeda; e Integridad ecosistémica). ....	30
Figura 9, Cavidad de anidación del cóndor Californiano <i>Gymnogyps californianus</i> .....	34
Figura 10, Ilustración de las categorías de uso de los nidos de águila real de uso reciente (izquierda), alternativos (centro) y abandonados (derecha). ....	34
Figura 11, Palabras clave principales en la literatura consultada en la revisión bibliográfica.....	36
Figura 12, Análisis "JKN" de máxima entropía del área bajo la curva (AUC por sus siglas en inglés).....	42
Figura 13, Comparativo de análisis de máxima entropía "JKN" en ambas análisis de ganancia de entrenamiento (arriba) y de prueba (abajo). ....	42
Figura 14, Resultado de la distribución potencial de anidación del águila real por método de Máxima Entropía con depuración JKN de variables. ....	43
Figura 15, Análisis "JKN" de máxima entropía del área bajo la curva (AUC por sus siglas en inglés) de la muestra en modelo. ....	44
Figura 16, Comparativo de análisis de máxima entropía "FACP" en ambas análisis de ganancia de entrenamiento (arriba) y de prueba (abajo). ....	44
Figura 17, Resultado de potencial de anidación del águila real por método de Máxima Entropía con depuración de variables por FACP. ....	45
Figura 18, Comparativo de métodos JKN (izquierda) y FACP (derecha) en secciones de monitoreo .....	46
Figura 19, Comparativo de resultados por métodos JKN (izquierda) y FACP (derecha) en principales sistemas montañosos de la península de Baja California. ....	47

Figura 20, Comparativo de la cordillera con modelaciones de nicho reproductivo por Toscano et al., 2023 y D'Addario et al., 2019 distribución potencial. Se señalan regiones con discrepancias de potencial. .... 56

## Índice de tablas

Tabla 1, Fenología del águila real. Adaptado de Birds of the World (Kochert, 2020) .....	14
Tabla 2, Monitoreos aéreos enfocados en águila real en Norteamérica .....	16
Tabla 3, Definición de variables utilizadas por grupo temático .....	28
Tabla 4, Nidos de águila real identificados por sección durante el monitoreo aéreo. ....	34
Tabla 5, Resumen de observaciones durante el censo aéreo realizado en la península de Baja California durante el mes de marzo de 2021 por Toscano y colaboradores. ....	35
Tabla 6, Comparativo del monitoreo realizado para el presente estudio con antecedentes significativos en la literatura del águila real en el noroeste de Norteamérica .....	35
Tabla 7, Actualización de tabla de monitoreos enfocados en águila real en Norteamérica presentada en Antecedentes. ....	36
Tabla 8, Listado de grupos temáticos, variables y capas utilizadas como ingresos en la matriz de correlación para descarte de variables potenciales. ....	37
Tabla 9, Variables resultantes del análisis de discriminación correlativa" r.covar". El consenso seleccionó como principales las siguientes variables: .....	38
Tabla 10, Variables principales resultantes del análisis JKN para los sitios de anidación localizados en cada grupo temático durante el censo aéreo realizado en marzo 2021 .....	40
Tabla 11, Componentes principales del proceso reproductivo del águila real en la PBC .....	41
Tabla 12, Comparativo de probabilidades en las secciones monitoreadas y principales sistemas montañosos de la PBC. ....	47

## Introducción

El águila real *Aquila chrysaetos* es una especie de ave de presa que se caracteriza por su gran tamaño (ver capítulo de Biología) y sus capacidades de vuelo. Su habilidad y tamaño le permiten extenderse a una alta variedad de hábitats, utilizando una amplia variedad de técnicas de caza para subsistir. Su dieta consiste principalmente en aves y mamíferos pequeños y medianos, como liebres (*Lepus californicus*), conejos (*Silvilagus audubonii*), ardillas (*Otospermophilus variegatus*) y perritos de la pradera (*Cynomys mexicanus*), pero ocasionalmente puede capturar presas de gran tamaño, como cigüeñas (*Ciconiidae*), ungulados salvajes e incluso ciertos tipos de ganado y animales domésticos. Cuando la comida escasea, también pueden alimentarse de carroña (Katzner *et al.*, 2020; Rodríguez-Estrella *et al.*, 2020).

El águila real tiene una distribución holártica (hemisferio norte), presente en zonas templadas de Norteamérica, Asia y Europa. Algunas poblaciones son residentes, mientras que otras exhiben comportamiento migratorio regulado por climas extremos y sus efectos en la disponibilidad de alimento (Katzner *et al.*, 2020). Recientemente se ha descubierto que existen comportamientos poblacionales de escala continental, que corresponden a la edad y experiencia de los individuos, así como preferencias para el establecimiento de territorios de reproducción, y, notoriamente, el declive generalizado de la población norteamericana por efectos de la persecución y pérdida de hábitat principalmente (Katzner *et al.*, 2020).

En México, el águila real anida principalmente en acantilados rocosos cerca de áreas abiertas, aunque en todo el territorio mexicano se conoce un solo sitio de anidación en un árbol (De León-Girón, 2016; Juan Vargas com. pers., 2020). Sus movimientos migratorios pueden influenciar sus sitios de alimentación y ser atraídas a humedales, zonas agrícolas, lomeríos con pastizales y suelen utilizar líneas de guía como acantilados, líneas de costa y ríos. Entre sus recorridos alrededor de estas líneas, realizar paradas de descanso y percha comúnmente en acantilados, postes eléctricos o árboles (De León-Girón, 2016; Juan Vargas com. pers., 2020; Rodríguez-Estrella *et al.*, 2020).

Los estudios de águila real disponibles que incluyen monitoreos aéreos han proporcionado información valiosa sobre la distribución, abundancia y comportamiento de esta especie (Driscoll, 2010; Pagel, 2010). Los estudios principales que se describen en la sección de antecedentes han utilizado una variedad de enfoques, incluyendo el recuento de individuos y territorios, la estimación de densidades de población y la identificación de áreas importantes para la especie (ver sección de antecedentes).

# Antecedentes

## Biología

El águila real (*Aquila chrysaetos*) es un ave rapaz de gran tamaño, mide entre 70 y 99 cm de alto, con una envergadura de entre 185 y 222 cm. las hembras (3,048 – 6,460 g) son más grandes que los machos (2,387 a 4,500 g). Las águilas reales juveniles presentan una coloración marrón oscura con manchones blancos en la base de la cola, las alas y las plumas de la cresta de color dorado, durante su maduración cambiarán de apariencia a medida que avanzan en edad y al alcanzar la adultez, adoptan un tono de marrón pardo, pierden el manchón blanco de la cola y lo sustituyen por motas grises en todo el cuerpo, mantienen la cresta de color dorado (Katzner, *et al.*, 2020). Como otras aves del género *Aquila*, tienen la tibia y el tarso-metatarso emplumados, es decir, las patas emplumadas hasta la base de los dedos. Es una de las aves más grandes de Norteamérica (Figura 1), siendo superada en tamaño solo por el cóndor de California y el águila calva. sin embargo, de las aves netamente depredadoras, se posiciona como la de mayor tamaño. La forma del cuerpo describe un ave con cuello reducido, alas largas y angostas con una cola larga y ancha. Esto les permite un vuelo estable y la capacidad de alcanzar gran altitud (300 – 1200 m.s.n.m.) y velocidad en vuelo (322 km/h) (Kochert, *et al.*, 2002).

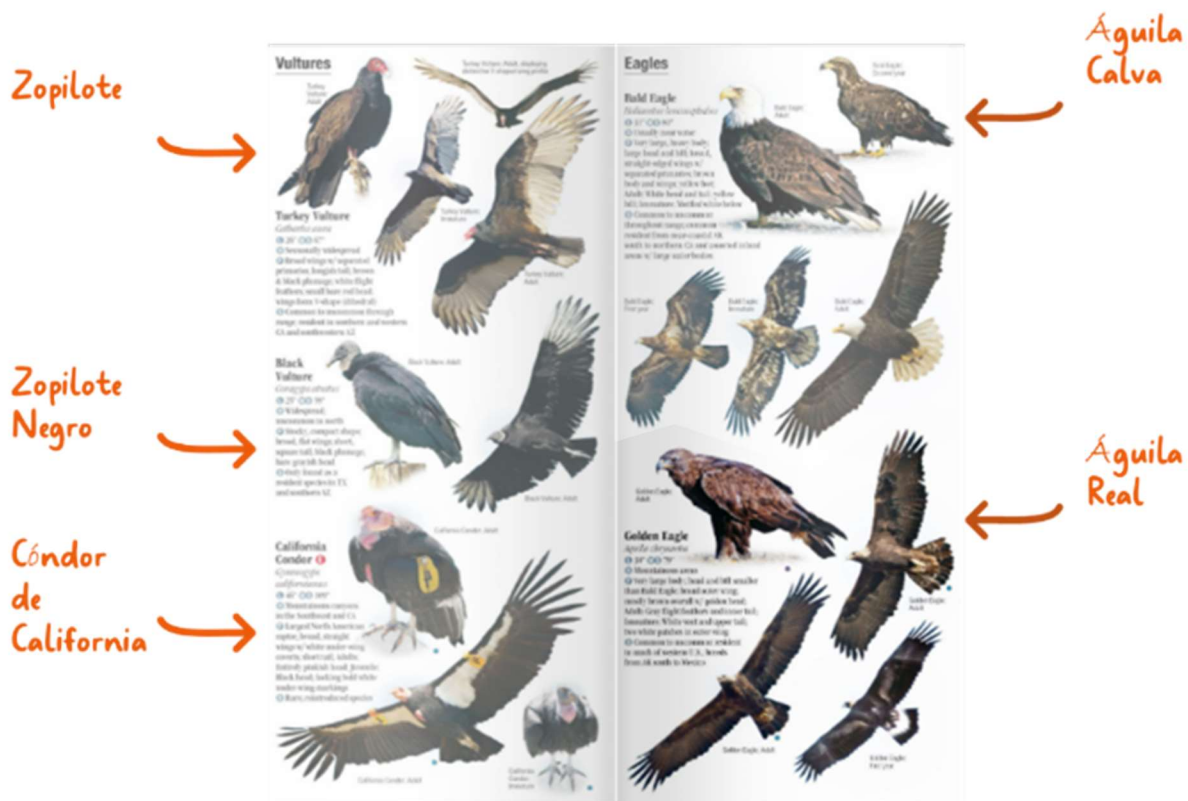


Figura 1. Comparativo de aves rapaces de gran tamaño en América del Norte, Fuente: Tomado y modificado de Raptors of Western North América (Kevin Karlson)

El águila real es una especie de voladora eficiente y un excelente depredador. Sus capacidades, dada su habilidad y tamaño le permiten extenderse a una alta variedad de hábitats e incluso de técnicas de cacería para subsistir.

Esta especie se distribuye en zonas templadas de Norteamérica, Asia y Europa. Algunas águilas son residentes de una región mientras que otras exhiben comportamiento migratorio regulado por climas extremos y sus efectos en la disponibilidad de alimento. Recientemente se ha descubierto que existen comportamientos poblacionales de escala continental, que corresponden a la edad y experiencia de los individuos, así como preferencias para el establecimiento de territorios de reproducción y, notoriamente, el declive generalizado de la población norteamericana por efectos de la persecución y pérdida de hábitat principalmente (Katzner *et al.*, 2020).

El águila real tiene una tasa reproductiva menor que otras aves debido a su tamaño y requiere de territorios de mayor tamaño por lo que la densidad de ocupación tiende a ser menor. Primeramente, un águila real puede tardar hasta cinco años en alcanzar la madurez sexual y es hasta este punto en el que un águila establece un territorio y comienza sus aportaciones a la abundancia y a la pila genética de su población. Durante la temporada reproductiva, el territorio de un águila se extendería entre 20 y 30 km<sup>2</sup> (De León-Girón, 2016), pero el ámbito hogareño incluyendo temporada no reproductiva puede extenderse hasta 160 mil km<sup>2</sup> (De León-Girón, datos inéditos).

Esta ave rapaz como ocurre con otros animales dominantes ha sido ampliamente integrada en la cosmovisión, folklore, e identidad cultural de pueblos originarios, grupos sociales y símbolos patrios en toda su distribución (Luján, 2019). Sin embargo, en la historia humana reciente, la relación entre águilas y comunidades humanas se ha deteriorado, como se evidencian en documentos científicos de diferentes disciplinas y análisis multidisciplinarios, los efectos negativos de actividades humanas en las águilas reales, enmarcados en un paradigma de cambio climático global y eventos intencionales, alteran las poblaciones silvestres o generan extinciones forzadas y accidentales, ya sea de poblaciones de águila real o de otras especies claves para el mantenimiento de las águilas reales. Entre los principales conflictos existe la cacería y captura para su domesticación, envenenamiento, colisión con infraestructura eléctrica y vehículos, pérdida de hábitat y cambios drásticos de elementos en su entorno (De León-Girón, 2016; Katzner *et al.*, 2020; Rodríguez-Estrella *et al.*, 2020).

## **Distribución y sistemática**

### **Variación geográfica**

Existen diferentes subespecies de águila real que habitan dos grandes regiones: 1) Norteamérica y 2) centro-sur de Europa, Eurasia y el norte de África. Las variaciones entre las águilas de diferentes regiones son notorias debido a sus diferentes especializaciones y se argumenta que aves residentes y migratorias de áreas con menor temperatura promedio anual y altas latitudes, tienden a ser de mayor tamaño que aves de regiones más templadas de acuerdo con la regla de Bergmann, la cual indica la correlación negativa entre la temperatura ambiente y la tasa de superficie corporal relativa al tamaño del cuerpo, en aquellas zonas donde se observa que una menor temperatura promueve ejemplares más corpulentos de aves (Griffiths, 2023)

### **Subespecies**

Existen seis subespecies de águila real o *Aquila chrysaetos* que se distribuyen de la siguiente forma (Oyervides, 2019; Katzner, *et al.*, 2020):

- 1) *Aquila chrysaetos homereyi* que incluye poblaciones desde la península ibérica hasta el medio oriente en la región de Irán y Uzbekistán.
- 2) *Aquila chrysaetos chrysaetos* que abarca las poblaciones que se distribuyen en Europa hasta el centro-norte asiático.
- 3) *Aquila chrysaetos daphanea* que se distribuye en Asia central incluyendo el desierto de Gobi, Afganistán, Tíbet hasta Siberia.
- 4) *Aquila chrysaetos japónica* se le encuentra en Japón y la península de Corea.
- 5) *Aquila chrysaetos kamtshatica* residente del noreste asiático, Mongolia al noreste de China.
- 6) *Aquila chrysaetos canadensis* águilas reales residentes y migratorias de Norteamérica, abarcando desde Alaska hasta Oaxaca, México.

### **Distribución**

El águila real es una especie que tiene distribución holártica, lo que es en el hemisferio norte entre las latitudes 20° y 70° N. Con algunas poblaciones aisladas más al sur. En Norteamérica existe una población residente en el oeste de Estados Unidos y México y una migratoria entre Alaska y Canadá hacia el este de Estados Unidos. Mientras que los territorios de Europa y Asia se reconocen poblaciones residentes principalmente y se reconocen algunas poblaciones que habitan en grandes islas (Figura 2).

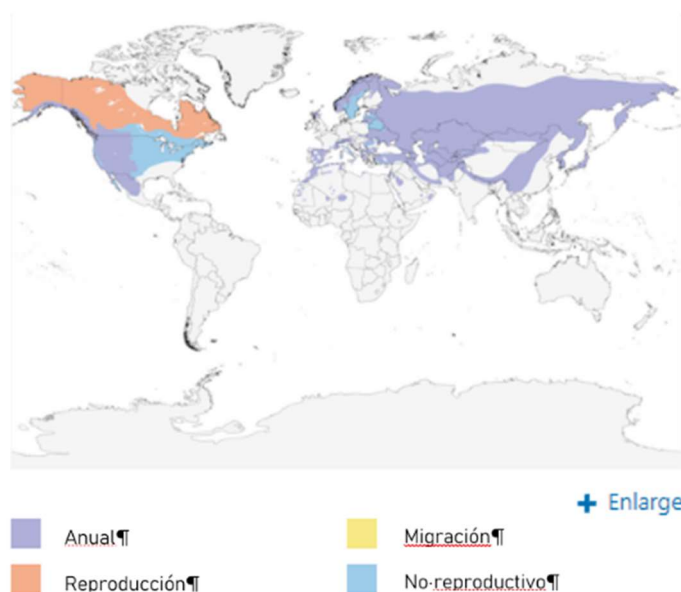


Figura 2. Distribución y fenología general del *Aquila chrysaetos* a nivel global. Fuente: Katzner, *et al.*, 2020

### **Territorios de distribución y sus hábitats**

Su hábitat reproductivo incluye una gran variedad de biotopos en un amplio margen altitudinal (Poole *et al.*, 1988). La selección de sitio de anidación se asocia con acantilados rocosos y árboles (PACE 2015). Entre los biomas en

los que se ha documentado actividad reproductiva se encuentran la tundra, matorral, pastizales, chaparral y bosques de coníferas (Kochert, *et al.*, 1986; Miller, *et al.*, 2017). En México su principal hábitat de anidación es en acantilados rocosos cerca de áreas abiertas, en todo el territorio mexicano se conocen pocos sitios de anidación en árboles en el centro del país. Sus movimientos migratorios pueden influenciar sus sitios de alimentación y ser atraídas a humedales, zonas agrícolas, lomeríos con pastizales y suelen utilizar líneas de guía como acantilados, líneas de costa y ríos. Entre sus recorridos alrededor de estas líneas, realizar paradas de descanso y percha comúnmente en acantilados, postes eléctricos o árboles (PACE, 2015; De León-Girón, 2016; Juan Vargas com. pers. 2020).

### **Influencia ecológica**

Se tiene un amplio conocimiento de su composición alimentaria y el papel que juega en el ecosistema, particularmente en su territorio durante épocas reproductivas. Por ser un depredador tope, ejerce influencia en la estructura de poblaciones de depredadores de segundo orden y mamíferos medianos en su dieta. En Baja California, la alimentación del águila real se compone principalmente de liebres *Lepus californicus* en un 33%, ardillas *Otospermophilus beecheyii* en un 21% y conejos *Silvilagus adubonii* en un 12% (De León-Girón *et al.*, 2016). En un enfoque más amplio, estudios en Norteamérica que abarcan diversas ecorregiones: tundra, cordilleras boreales, planicies semiáridas, desiertos frío y cálido, mediterráneo y montañas desérticas, la proporción de su dieta principal corresponde a: lepóridos (liebres y conejos) y esciúridos (ardillas) en 50% cada una. Su dieta secundaria incluye a aves terrestres y acuáticas medianas (cuervos, aves rapaces, patos y gaviotas), mamíferos medianos (tejón, zorrillo, marmota, perrito de la pradera), reptiles (serpientes), carroña y puede llegar a atacar al ganado con peso individual menor a 5 kg (De León-Girón *et al.*, 2016; Katzner *et al.*, 2020). Así mismo su actividad como depredador puede representar un beneficio al depredar ardillas, conejos, liebres y otras especies que sin tener control pueden causar daños en sistemas agrícolas.

## **Fenología**

### **Reproducción y anidación**

Considerando la temporada reproductiva como el inicio del ciclo anual fenológico (Tabla 1) inicia cuando las parejas de águila real reclaman un territorio y lo defienden de sus conoespecíficos y de otros depredadores. Dicho territorio alberga el nido donde las águilas reproductivas criarán a sus pollos, comúnmente éste tiene varios nidos que se pueden alternar en diferentes años, ya que las águilas reales demuestran comportamientos filopátricos, es decir que retornan al mismo sitio a reproducirse año con año (De León-Girón, 2016).

Las águilas reales destinan alrededor de cinco meses del año a las labores reproductivas que incluirán cortejo, apareamiento, incubación, alimentación y crianza de polluelos hasta que los juveniles dejen el nido. La temporada crítica de anidación se da en el mes de abril y mayo y se caracteriza por ser el periodo en que los huevos y los pollos de pocas semanas requieren mayor atención de la pareja reproductiva. En estas fechas, las águilas reales disminuirán la extensión del territorio en el que realizarán sus actividades cotidianas, incluyendo la cacería, descanso y anidación. En el caso de los machos el territorio que utilizan durante esta temporada es

de 1,845 hectáreas, mientras que para las hembras será de 7,166 hectáreas. En Baja California la productividad de los nidos se reporta dentro del promedio general de la especie, donde las parejas reproductivas tienen en promedio 1.3 pollos por nido (De León-Girón-Girón, 2016).

Tabla 1, Fenología del águila real. Adaptado de Birds of the World (Kochert, 2020)

Actividad	Ene	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Muda			■	■					■	■	■	■
Reproducción				■	■	■	■	■				
Migración			■	■	■	■	■	■	■	■	■	

### **Movimientos de dispersión, migración y conectividad**

El águila real es una especie de ave que presenta movimientos que incluyen dispersión de juveniles, aves adultas residentes y migratorias, así como combinaciones entre las dos últimas. Dichos comportamientos generalmente están asociados a condiciones ambientales, distribución de presas, así como también de amenazas (Katzner, *et al.*, 2020). Su movimiento particularmente depende de corrientes de viento vertical impulsado por barreras físicas de gran escala o por calentamiento terrestre (Tracey *et al.*, 2018).

Los movimientos tempranos en juveniles se incrementan en extensión gradualmente, partiendo del nido a medida que los juveniles mejoran su fortaleza, experiencia y habilidades de vuelo. Las aves juveniles de comportamiento migratorio pueden llegar a recorrer entre 10 y 1,500 km durante los primeros años hasta alcanzar la edad adulta, entre los 4 y 5 años. Mientras que juveniles de poblaciones no migratorias llegarán a recorrer entre 100 km y 500 km donde establecerán sus territorios los cuales no necesariamente se ubicarán cerca del territorio donde nacieron, pero al cual le serán notablemente fieles una vez que este sea establecido (Katzner *et al.*, 2020). Una vez que las águilas alcanzan la edad adulta sus movimientos pueden extenderse en vastos territorios que pueden abarcar hasta 160 mil km<sup>2</sup> (No publicado) sin ser considerado un movimiento migratorio (De León-Girón, 2016). Las aves migratorias pueden llegar a desplazarse hasta 3,000 Km hasta la región donde pasan el invierno (Brodeur *et al.*, 1996).

### **Socio-ecología**

#### **Servicios ecosistémicos**

Los servicios ecosistémicos de las águilas reales, al igual que otras rapaces, se extienden en la dimensión de soporte, de regulación y culturales. Quizá uno de los servicios ecosistémicos más importantes de las aves rapaces, sea el de control. Ya que, a través de su alimentación provee de servicios críticos para la productividad agrícola y como servicio de saneamiento del medio ambiente. Por su parte, el consumo de carroña por buitres, águilas calvas y águilas reales, previenen en gran medida la generación y distribución de patógenos que afecten al ganado, mascotas e incluso a las personas. Dichos servicios ecosistémicos pueden ser contabilizados al estimar las pérdidas que un brote infeccioso pudiera tener en el ganado y extrapolar los datos con modelos predictivos, los resultados de los cuales arrojan cifras billonarias pérdidas que se evitan gracias al

mantenimiento de poblaciones silvestres saludables. Comúnmente, el reconocimiento de los servicios ecosistémicos se remonta siglos e incluso milenios en la historia, ya sea como arte para conseguir alimento utilizando halcones y águilas en Europa y Asia, como control de roedores en antiguas civilizaciones agrícolas o como encarnación de seres mitológicos en la cosmogonía de pueblos originarios. Su figura ha sido utilizada como símbolo de castas guerreras, como designio de tierras prometidas y como insignia de valores sociales y culturales (Donázar, *et al.*, 2016).

### **Estado de conservación y amenazas generales**

Las águilas reales, al igual que otros depredadores, fueron perseguidos indiscriminadamente a principios de la década de 1900. Cuando cazadores profesionales fueron financiados por el Gobierno de Estados Unidos para controlar las poblaciones de grandes depredadores entre los que se incluye águilas reales (*Aquila chrysaetos*), pumas (*Puma concolor*), lobos grises (*Canis lupus*), lobos rojos (*Canis lupus*), gatos monteses (*Lynx rufus*), coyotes (*Canis latrans*), osos pardos (*Ursus horribilis*), osos negros (*Ursus americanus*), zorros rojos (*Vulpes vulpes*), zorros grises (*Urocyon cinereoargenteus*) y perros ferales (*Canis lupus familiaris*). El motivo del impulso de esta política obedeció a la preocupación generalizada sobre el efecto que éstos causaban sobre las poblaciones de ganado, particularmente corderos, pero también de especies de aves para cacería. Se estima que en un lapso de 20 años entre 1940 y 1960, más de 25,000 águilas reales fueron derribadas legalmente en Estados Unidos, principalmente por métodos de cacería en helicóptero, pero sin ningún tipo de consideración ecológica. Este programa se implementó en 21 de los 24 estados fronterizos de Estados Unidos, incluidos los cuatro que colindan con México (California, Arizona, Nuevo México, y Texas). Algunos estados mexicanos como Chihuahua, Sonora y Baja California principalmente, con aprobación del gobierno mexicano, recibieron también apoyo de las autoridades estadounidenses por su interés en controlar a dichas especies en zonas fronterizas (Donahoo, 1965). Otros métodos de control incluyeron, el envenenamiento, la reubicación de ejemplares, acoso aéreo con detonaciones, la instalación de espantapájaros, siendo la combinación de técnicas considerablemente efectiva (Matchett & O'Gara, 1987). Si bien la protección se hizo oficial en 1962, la persecución y cacería de las águilas reales continúa siendo una de sus principales problemáticas en zonas donde existe conflicto (Figura 3).

## **Estudios de águila real**

### **Monitoreo aéreo de poblaciones de águila real**

Durante décadas se han implementado programas de monitoreo aéreo para las poblaciones de águila real en Norteamérica. El objetivo general de dichos monitoreos ha sido evaluar la distribución, densidad, ecología reproductiva, abundancia y estado de conservación de esta especie. Considerando sus características ecológicas que abarcan amplias zonas de terreno, y la dificultad de coleccionar datos por medio de monitoreos terrestres en zonas de difícil acceso (Latta *et al.*, 2012; Bittner *et al.*, 2012; Boone y Tomlinson, 2012; Erickson *et al.*, 2012; Morneau *et al.*, 2012; McCarty *et al.*, 2014; Nielson *et al.*, 2017).



Figura 3, Águila real caída por colisión. Fotografía: Mía McPherson

Existen diversos monitoreos aéreos enfocados en águila real en diferentes regiones de su distribución en Norteamérica (

Tabla 2), destacando monitoreos en Nevada y el oeste de Estados Unidos. Así también, múltiples actores identifican al monitoreo aéreo como una de las herramientas más efectivas para realizar censos poblacionales de la especie, sin desestimar el monitoreo terrestre y satelital como estrategias complementarias (Driscoll *et al.*, 2010; Pagel *et al.*, 2010).

Tabla 2, Monitoreos aéreos enfocados en águila real en Norteamérica

Sitio	Autores	Hectáreas	Km Lineal	Sitios de anidación	Población	Periodo (hr)	Fechas
Quebec	Latta, B., <i>et al</i> , 2010	12,600	480	20	ND	14	1994 - 2007
Nevada	Bittner, J., <i>et al</i> , 2010	1,232,000	ND	1000	ND	ND	Mar - Oct 11
Oeste EU	Boone, J., <i>et al</i> , 2010	ND	17,500	ND	23,530	ND	2006 - 2011
California	Erickson, W., <i>et al</i> , 2010	ND	ND	289	ND	167.8	Dic 11 - Ago 12
Suroeste EU	Morneau, F., <i>et al</i> , 2010	ND	ND	342	ND	ND	1996 - 2012
Arizona	McCarty, K., <i>et al</i> , 2010	10,000	ND	264	ND	177.6	Feb - May 14

Pagel (2010) publicó el “Protocolos Interino para Inventario y Monitoreo de Águila Real y otras Recomendaciones” para el Servicio de Pesca y Vida Silvestre de Estados Unidos (USFWS). En su capítulo séptimo, Pagel detalló los procedimientos recomendados para la realización de un monitoreo aéreo. Entre sus consideraciones incluyó la realización de al menos dos censos aéreos en una temporada reproductiva para lograr confirmación de ocupación de un sitio de anidación. La velocidad indicada para realizar inventarios oscila entre los 30 y 40 nudos, con acercamiento frontal a la zona de monitoreo a una distancia de acercamiento máximo de 20 m y mínimo de 200 m, mientras que el tiempo máximo de permanencia es de 30 segundos y el lapso para visitar un sitio

deberá de exceder los 30 días. Indica que la fecha en la que se realiza el monitoreo determina los datos potenciales a coleccionar según la fenología reproductiva en el sitio, ya que esta puede variar según la región geográfica.

Driscoll (2010) confeccionó otro protocolo para evaluar la ocupación, reproducción y presas potenciales del águila real. Resaltó que comúnmente el método más eficiente es el aéreo con el uso de un helicóptero. Describió además de manera gráfica un sitio de anidación con uso recurrente. Esta identificación fue basada por la presencia de ejemplares, las marcas fecales que permanecen en las rocas circundantes al nido que derivan de los desechos de los polluelos y adultos durante la temporada reproductiva (Figura 4). Destacó también los resultados esperados en las distintas etapas del ciclo reproductivo, siendo la época de cortejo la mejor para identificar territorios. Así mismo, en las etapas de incubación recomendó la realización de monitoreos aéreos, ya que las águilas tienden a ser más discretas y es común no lograr observaciones fidedignas durante esta etapa, ya que, observando desde el suelo, el interior del nido no suele ser visible.



Figura 4. Nido de águila real activo, observado desde un helicóptero. Fuente: Driscoll (2010).

La elaboración de protocolos específicos para monitoreo en helicóptero de águila real han sido una de las herramientas clave para la conservación de la especie. La certeza de un protocolo bien diseñado e implementado ha permitido que los científicos sobrevuelen áreas críticas recopilando datos sobre la distribución, abundancia y comportamiento de especies animales. Los protocolos permiten la planificación, que es fundamental para el éxito del monitoreo en el que se deben seleccionar cuidadosamente las áreas de estudio, el equipo a utilizar y los métodos de muestreo. La recolección de datos es el paso más importante en cualquier protocolo de monitoreo, ya que al utilizar helicópteros para volar sobre las áreas seleccionadas y recopilar datos sobre la vida silvestre, el margen de error y riesgo de la actividad son elevados y en caso de accidentes, comúnmente

fatales. Los datos recopilados se utilizan para analizar el estado de las poblaciones, las tendencias de cambio y las amenazas a las que se enfrentan las especies.

Booms y colaboradores (2010) analizaron la detectabilidad de aves rapaces nidificantes en acantilados rocosos por monitoreo aéreo. A pesar de que el diseño del monitoreo por medio de un modelaje de detectabilidad que incluye la experiencia de los observadores, área de monitoreo y tipo de aeronave, encontraron que el ave objetivo fue la más detectable (*Falco rusticolus* = 0.79), seguida por el águila real (*Aquila chrysaetos* = 0.68).

Bittner y colaboradores (2012), realizaron monitoreos terrestres entre 1988 y 1996, en el suroeste de Estados Unidos. Adicionalmente realizaron un monitoreo integral entre 1996 y 2012, aplicando técnicas de anillamiento, etiquetado patagial, instalación de cámaras trampa, telemetría convencional, telemetría satelital, incluyendo monitoreos aéreos y monitoreos terrestres. El monitoreo integral, permitió identificar un declive de hasta 55% en parejas reproductivas. Así como un incremento de tres veces en la tasa de declive anual (1.5% en 3 años, 0.5% anual). Atribuyen con evidencias dichos declives a colisiones con estructuras artificiales fijas y móviles, electrocución, envenenamiento incidental, hambruna, depredación y competencia como las principales amenazas antropogénicas y naturales para ejemplares de esta especie.

### **Métodos estadísticos de análisis de poblaciones reproductivas**

El águila real en México se considera poco estudiada. Se cuenta con modelos de distribución. Sin embargo, en estudios recientes se han implementado herramientas novedosas como el rastreo satelital con GPS y modelaje estadístico (Rodríguez-Estrella *et al.*, 1991; D'Addario, *et al.*, 2019). El acceso a tecnología digital ha permitido incrementar el conocimiento sobre patrones de hábitat y uso del territorio significativamente (Figura 5).

D'Addario y colaboradores (2019) confirman que las preferencias de hábitat de la especie en territorio mexicano se extienden por el 16 % de su superficie, mientras que sólo el 8% de su extensión se localiza en Áreas Naturales Protegidas. Evidencia también la fragmentación del hábitat por efecto de los cambios de uso de suelo. A través del modelaje estadístico de bases de datos públicas de observaciones, colecciones científicas, hábitat y variables antropogénicas. Encontraron que el estado óptimo de distribución potencial es similar bajo el perfil ambiental entre las diferentes regiones biogeográficas del estudio. También indican que la amplitud de nicho es reducida, lo que significa que el águila real es especialista en México. De las 17 regiones biogeográficas analizadas, el Altiplano (Zacatecano-Potosino), Sonorense, el Altiplano Chihuahuense, Tamaulipeca, Baja California y California son los que concentran más del 20% de su territorio con alta idoneidad.

### **Estado de conservación del águila real en México y la península de Baja California**

De León-Girón- Girón (2016) realiza una serie de propuestas para la conservación del águila real en Baja California. Derivadas del estudio de la abundancia, ecología reproductiva, dieta uso de hábitat y amenazas del águila real. Encontró que existe un total de 108 avistamientos de águila real en 1893 a 2015, se contabilizaron un total de 1.6 individuos por transecto de 100 km, con una productividad reproductiva de 1.27 volantones por nido exitoso en un total de 11 sitios de anidación. Su dieta principalmente se constituye de liebres (*Lepus californicus*)

y ardillas (*Otospermophilus beecheyi*) y su territorio se extiende hasta 7,166 ha para águilas hembras y 1,847 para machos.

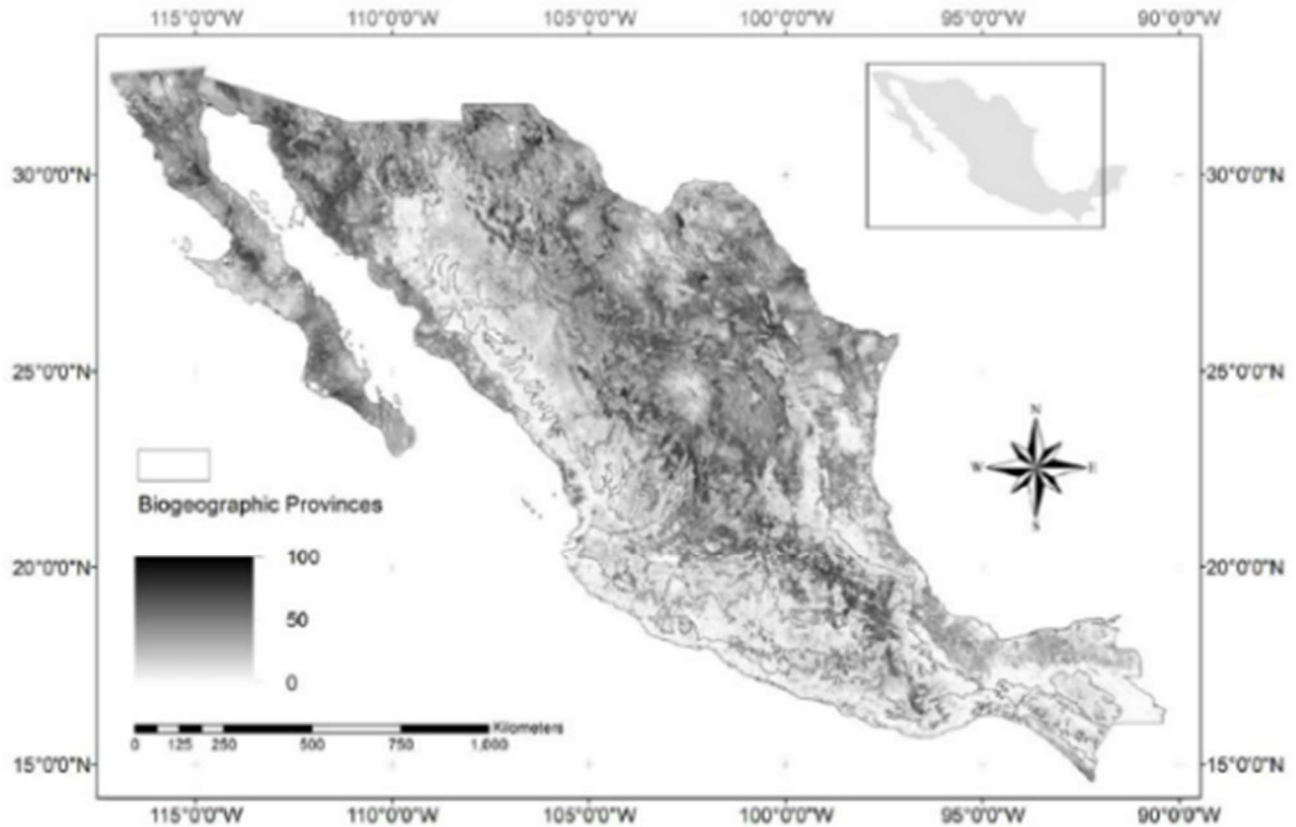


Figura 5, Modelo de ensamble del potencial de distribución del águila real en México. Fuente: D'Addario, 2019

Las propuestas de conservación incluyen la generación de conocimiento, aplicación de la ciencia y de instrumentos para la conservación, así como lineamientos de uso de suelo en sitios de anidación, promoción de designación de áreas para la conservación, colaboraciones interinstitucionales, desarrollo e implementación de tecnología. Determina finalmente que la población se encuentra estable y no se observaron indicios de inestabilidad ecológica.

En la península de Baja California existen colaboraciones significativas en torno al manejo y conservación de aves rapaces prioritarias. Una especie con la que comúnmente se trabaja en simultáneo con el águila real es el cóndor de California. El Parque Nacional Sierra de San Pedro Mártir alberga el proyecto (caso de reconocimiento internacional) de la reintroducción del cóndor de California, la cual ha demostrado que las similitudes en uso de hábitat y de afinidad de sitios reproductivos, lleva a estas dos especies a traslapar sus territorios a pesar de ser consideradas como territoriales (CONANP, 2015).

Sin embargo, el conocimiento de una gran porción del territorio de la península permaneció inexplorado y sin registros de presencia de territorios de anidación. Recientemente, a través del uso de dispositivos rastreadores por telemetría satelital, se ha demostrado que existen patrones de movimiento de águilas reales a lo largo de la

península de Baja California (USGS, no publicado). Por este motivo se emprendió el proyecto del “Protocolo para Monitoreo Aéreo de Águila Real en tres Áreas Naturales Protegidas y zonas de conectividad”. Dicho proyecto resultó de la colaboración entre tres Áreas Naturales Protegidas (Parque Nacional Sierra de San Pedro Mártir, Área de Protección de Flora y Fauna Valle de los Cirios y Reserva de la Biosfera El Vizcaíno) e instituciones tanto nacionales como internacionales, cuya objetivo fue generar una ruta crítica para realizar una búsqueda de nidos de águila real por recorrido aéreo, considerando la falta de datos y la poca a escasa accesibilidad a los territorios donde el águila real establece sus nidos (CONANP, 2015). El protocolo integró los procedimientos conocidos para monitoreo complementario (terrestre y aéreo), técnicas de monitoreo aéreo de águila real, modelaje predictivo y rastreo satelital como determinantes esenciales de las rutas y transectos potenciales de monitoreo (Toscano, 2020).

Con lo anterior y a pesar de considerar al águila real como una especie relativamente poco estudiada en México, Baja California es uno de los estados con mayor trabajo a nivel poblacional de águila real; donde la ciudadanía y las autoridades locales y estatales, realizan esfuerzos coordinados a pesar de en ocasiones carecer de elementos fundamentales tanto técnicos como científicos para establecer estrategias permanentes y regionales para la conservación de águila real (CONANP, 2015; De León-Girón 2016; Oyervides, 2021).

## Justificación

La distribución espacial y temporal de la población de águila real que habita en la península de Baja California se considera poco conocida, a pesar de existir numerosos registros en el norte de la región. Por su parte, el centro y sur de la península de Baja California ha sido virtualmente inexplorado en búsqueda de águila real. Regiones que, por sus características de hábitat apropiadas para esta especie, se esperaría que la distribución de anidación de esta especie se extienda hasta la región central peninsular.

Ante el rezago técnico y científico en el conocimiento de las águilas reales, se considera crítico en la agenda nacional, integrar técnicas de monitoreo y análisis de primer nivel para establecer y ejecutar acciones clave en la estrategia trilateral (México, EUA y Canadá) de conservación en sistemas socio-ecológicos en la distribución peninsular del águila real.

## Hipótesis

La distribución de territorios de anidación del águila real en la península de Baja California, México, depende de la combinación de atributos paisajísticos bióticos y abióticos asociados con la topografía, orientación, altitud y latitud, además de la extensión planicies para forrajeo.

Estas variables ambientales, como la disponibilidad de alimento, el hábitat adecuado y la ausencia de amenazas, son fundamentales para la reproducción del águila real. La posición geográfica de los nidos puede indicar patrones característicos para esta especie en la región estudiada, por lo que, al contrastar las variables ambientales con mayor relevancia para los nidos encontrados con la modelación de idoneidad, se espera determinar atributos socio-ecológicos críticos para aplicaciones potenciales de manejo y conservación.

## Objetivos

### Objetivo general

Caracterizar ecológicamente los sitios de anidación de águila real en las cordilleras montañosas de la región central de la península de Baja California, México, y su relación con variables de hábitat, para la identificación de áreas prioritarias de conservación de esta especie.

### Objetivo particular 1 (OP1)

Cuantificar y ubicar los sitios de anidación del águila real en la parte central de la península de Baja California.

### Objetivo particular 2 (OP2)

Determinar las principales variables ambientales que influyen en la distribución y frecuencia de nidos de águila real en la región central peninsular.

### Objetivo particular 3 (OP3)

Modelar la distribución potencial de sitios de anidación de águila real en la península de Baja California para determinar áreas prioritarias de conservación para esta especie emblemática nacional.

# Metodología

## Área de Estudio

El área de estudio comprende los sistemas montañosos de la región central de la península de Baja California, México, donde se incluyen tres áreas naturales protegidas: Área de Protección de Flora y Fauna Valle de los Cirios (APFFVC), Reserva de la Biosfera El Vizcaíno (RBEV), y finalmente, Parque Nacional sierra de San Pedro Mártir (PNSSPM) (Figura 6). El área de estudio fue dividida en seis secciones como Matomí, Cirios Norte, La Libertad, San Francisco y La Reforma.

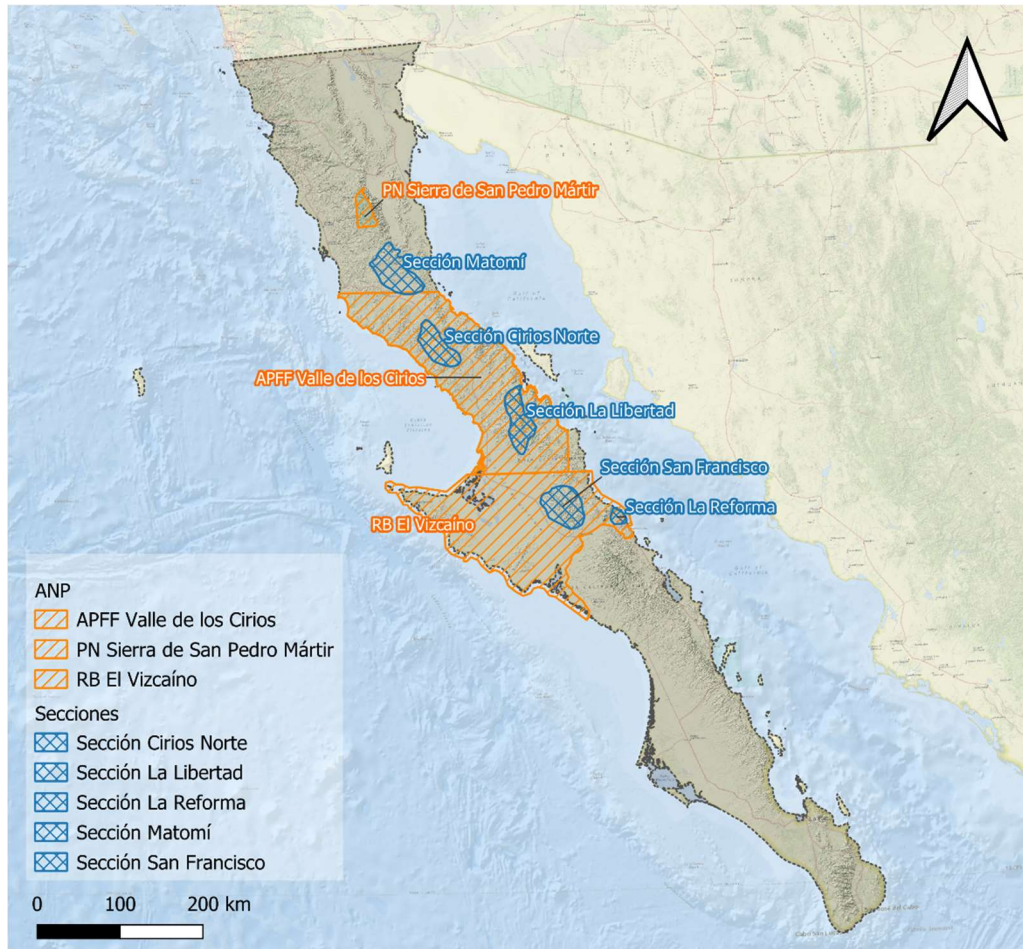


Figura 6, Área de estudio del monitoreo poblacional aéreo para sitios de anidación de águila real en la región central de la PBC.

## Área de Protección de Flora y Fauna Valle de los Cirios (APFFVC)

Esta área comprende 2,521,987.61 ha y se localiza en la ecorregión del Desierto Sonorense y abarca el tercio más sureño del estado de Baja California. Tiene un paisaje accidentado con una diversidad de ambientes con una altitud máxima de 1,660 msnm y cuenta con la presencia de dos sierras (Sierra de la Libertad y Sierra de la Asamblea). Así mismo, presenta climas muy variados, sin embargo, se caracteriza por tener ambientes áridos y semiáridos de transición entre el mediterráneo y tropical con temperaturas promedio entre los 18° y 22°. Su biodiversidad refleja adaptaciones muy particulares a ambientes inhóspitos para el ser humano, particularmente

por la escasez de precipitación, entre las que se puede observar plantas características del desierto sonorense con influencia de la provincia florística californiana en el norte. Entre las especies características de fauna se encuentran el águila real, el borrego cimarrón, venado bura, puma, gato montés y el berrendo peninsular. En el Área existen dos mil 500 habitantes, a lo que corresponde uno por cada 10 km<sup>2</sup> (CONANP, 2013).

### **Reserva de la Biosfera El Vizcaíno (RBEV)**

La RBEV con una superficie de 2,546,790.25 ha se localiza desde el paralelo 28 en la división entre Baja California y Baja California Sur, aproximadamente hasta la Sierra de La Reforma al este y formando un arco hacia el norte hasta el poblado de San Ignacio y al sur de nuevo hasta la laguna de San Ignacio. Se conforma de una planicie costera con sierras bajas y lomeríos al oeste y grandes macizos montañosos correspondientes a la cordillera de la península de Baja California en la Sierra de San Francisco y el sistema volcánico de las Tres Vírgenes donde se encuentra la sierra La Reforma. Se encuentra en la división de los sistemas climáticos que dividen la península y se ve influenciada por precipitaciones invernales y sistemas tropicales con lluvias en verano con temperaturas anuales promedio entre los 18° y 22° C.

Sus principales comunidades vegetales se dividen en una gran porción a unas diversidades de herbáceas y arbustivas adaptadas al desierto arenoso del Vizcaíno y una pequeña parte a la subprovincia de la costa del Golfo de California que comparte diversidad con regiones áridas del suroeste de Estados Unidos de América. Entre su fauna se estiman 308 especies de vertebrados terrestres y marinos, incluyendo 4 anfibios, 43 reptiles, 192 aves incluida el águila real y 69 mamíferos. Se estiman un total de 35,000 habitantes en la Reserva, distribuidos en aproximadamente 251 localidades (CONANP, 2000).

### **Sierra de Matomí (SM)**

La sierra de Matomí se localiza entre la Sierra de San Pedro Mártir y el norte del Valle de los Cirios. También conocida como mesa de Matomí, la cual abarca aproximadamente 85 mil hectáreas y 40 km lineales de noroeste - sureste. La SM presenta cañones profundos desde los 600 m hasta los 1100 m de altitud en las caras este y oeste, así como una saliente montañosa conocida como el "Pico de Matomí" que alcanza una elevación de 1700 m (INEGI, 2005). SM colinda al norte con la Baja California mediterránea al que pertenece el PNSSPM, dando inicio al desierto de Norteamérica donde se encuentra el APFFVC, formando con ello una zona de transición de ecosistemas en un corredor biológico considerado por el Programa de Ordenamiento Territorial del Estado de Baja California (POEBC) como una zona con aptitud para la conservación (GOBC, 2014).

## Fase de campo

### Método OPI Inventario de sitios de anidación

#### Plan de Vuelo

Se llevó a cabo la implementación del plan de vuelo con base en el “Protocolo para monitoreo aéreo enfocado en águila real en tres ANP de la península de Baja California y zonas de conectividad” (Toscano, 2020). Dicho plan de vuelo se subdividió en cinco secciones en las que se realizaron siete sobrevuelos de monitoreo en la zona de estudio. Se seleccionó un formato con el que se recolectaron los siguientes datos: fecha, observadores, área de muestreo, estado del tiempo, tiempo de inicio, tiempo de término, tiempo de inicio de muestreo, tiempo de término de muestreo, piloto, coordenadas con GPS, especie, número de individuos, fotografía (cámara fotográfica y/o video), condición del nido (activos, uso reciente, alternativos, abandonados), sexo (h/m), elevación del nido, orientación del nido, comportamiento, anidación. Adicionalmente, a través del registro fotográfico se llevó un registro de datos o consideraciones adicionales o complementarias. Se catalogaron los sitios de anidación como nidos con evidencia de uso reciente, nidos alternativos y nidos abandonados.

El criterio para diferenciar los nidos de uso reciente se observó la presencia de aportes de materia vegetal recientes y excretas en los materiales alrededor del nido, para determinar un nido alternativo se observó una estructura sólida pero con poca o nula presencia de excretas o material vegetal reciente y por último los nidos abandonados se consideraron aquellos que estaban ocupados por especies menores o especies que no construyen nidos, aquellos en que se observó el material vegetal degradado, derruido o aquellos que fueron enterrados por un derrumbe de rocas.

#### Monitoreo

Se sobrevolaron todas las secciones de monitoreo del 22 al 27 de marzo de 2021 conforme a las condiciones del tiempo, el plan y las horas de vuelo lo permitieron. La técnica de monitoreo a bordo (Figura 7) consistió en tres posiciones de observadores, la prioridad de la primera era la navegación (N) y toma de datos siguiendo un formato básico (punto de inicio, sentido, punto final y nidos localizados con fotografía), La segunda posición recolectaba fotografías de los sitios de anidación y de elementos significativos del hábitat de estos (Obs 1), la tercera se ocupó de tomar datos de GPS y llenado de un formato completo (Obs 2), las posiciones N, Obs 1 y Obs 2 compartieron la responsabilidad de identificar sitios de anidación. Conforme la aeronave se aproximó al punto de partida de cada transecto, se determinó el recorrido preestablecido en los puntos designados en el plan de vuelo y se complementó el tiempo de transecto de manera exploratoria, reconociendo visualmente sitios potenciales para anidación como acantilados y cañadas. Los recorridos se programaron para comenzar uno por la mañana y otro por la tarde a la hora que las condiciones climáticas adecuadas estuvieran presentes para contar con un viaje seguro (Pagel, com. pers., 2019).

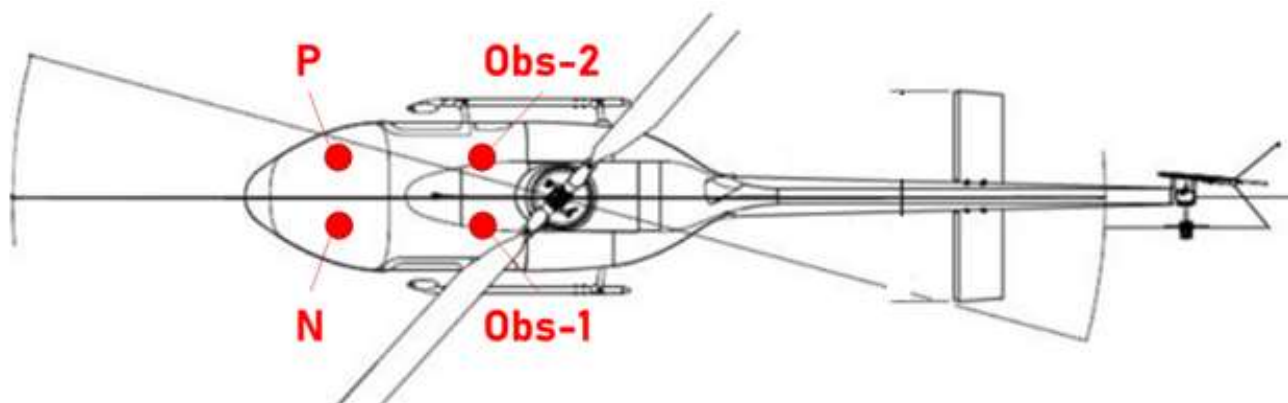


Figura 7, Distribución de la técnica de monitoreo abordo donde:

P = Piloto

N = Navegante / observador

Obs 1 – Observador principal

Obs 2 – Observador de apoyo

## Fase de gabinete

### Método OP2 Selección de variables base

#### Revisión bibliográfica

Para llevar a cabo este proceso se generó un mapa de palabras clave principales en estudios que integraron la revisión bibliográfica en la literatura regional del águila real. De dichos estudios se seleccionaron las variables que, se consideraron tener atributos críticos para la reproducción del águila real y que pudiera ser representada en un Sistema de Información Geográfica (SIG). La búsqueda de fuentes literarias particularmente se enfocó en estudios que vinculasen la caracterización del hábitat circundante con la ecología de las águilas reales.

#### Depuración de registros del monitoreo aéreo

Un formato fue generado para concentrar las notas de campo de los observadores, las fotografías y el recorrido en GPS. Se revisaron todos los archivos cotejando cada registro en los formatos recapitulando los transectos, corroborando con fotografías y videos en una reunión entre los observadores y el coordinador celebrada días posteriores al término de las actividades de campo. Se realizó una depuración detallada de datos e información colectada durante el monitoreo a través de la revisión cruzada de archivos electrónicos y notas de campo por cada uno de los sitios muestreados en secuencia temporal. De este proceso se obtuvo una capa que contiene la posición geográfica de los sitios de anidación hallados durante el monitoreo de águila real águila real en la PBC. Adicionalmente se generó una capa que incluye sitios de anidación conocidos y los hallados durante el monitoreo aéreo con objetivos comparativos y de referencia.

#### Funciones para la selección de variables

Se agruparon todas las variables encontradas en grupos temáticos (Bioclimáticos, Socio-ecológicos, Geomorfológicos), cada grupo de variables se sometió al análisis de valores redundantes (matriz de correlación) con la función **r.covar** del software QGIS y posteriormente se realizó la selección de una de las variables

correlacionadas con el que se evitó la sobreestimación en modelos estadísticos (Cruz-Cárdenas *et al.*, 2013). Esto permitió preservar para el análisis los valores de las variables que mantenían una relación más directa con el proceso reproductivo del águila real (ej., precipitación de la temporada húmeda y precipitación anual). Una vez concluido el descarte correlativo se utilizó ese conjunto de variables seleccionadas para alimentar dos métodos estadísticos con el propósito de identificar las variables más significativas de las resultantes utilizando de capa de referencia los sitios de anidación para ambos casos:

- 1) *Análisis JKN* (JKN) para determinar las variables principales que influyen al modelo del águila real por cada grupo temático por separado, utilizando como referencia la capa de sitios de anidación (Elith *et al.*, 2011).
- 2) *FACP* (FACP) en los que se determinó las variables que mejor describen la presencia de nidos por una matriz correlativa secundaria, utilizando como referencia la capa de sitios de anidación.

Se descargó la cartografía digital de la PBC que contienen las variables de interés en tres grupos temáticos: 1) Bioclimáticos, 2) Socio-Ecológicos, y 3) Geomorfológicos (Tabla 3). Lo anterior fue realizado siguiendo las recomendaciones de la bibliografía consultada (ver antecedentes).

Tabla 3, Definición de variables utilizadas por grupo temático

Grupo temático	Definición
Bioclimáticos	Variables derivadas que fueron desarrolladas para la modelación de distribución de especies y aplicaciones ecológicas relacionadas. Representan tendencias anuales, estacionalidad y factores ambientales extremos o limitantes.
Socio-Ecológicos	Variables derivadas del estado del territorio de la PBC. Representan rasgos fisiográficos y ecológicos como la disponibilidad de agua, estado de la vegetación nativa e incluso con las presas potenciales del águila real.
Geomorfológicos	Variables derivadas de la investigación en cuanto a preferencias de hábitat para anidación del águila real. Representan características de los sitios potenciales en la región para el establecimiento de los nidos.

#### **Función de JKN para selección de datos**

La selección de variables por JKN se utilizó para estimar la importancia de las variables ambientales en un modelo estadístico. Esta técnica es un análisis periférico de la metodología de la Máxima Entropía y consiste en eliminar de forma iterativa una variable ambiental de la muestra y estimar un modelo estadístico nuevamente con la variable ambiental eliminada. Este proceso se repitió para cada variable ambiental de la muestra, lo que daba como resultado un conjunto de estimaciones del modelo (Elith *et al.*, 2011).

Para valorar la importancia de las variables ambientales se utilizó la probabilidad JKN, la cual explica como la diferencia entre la probabilidad del modelo con la variable ambiental eliminada (A) y la probabilidad del modelo con todas las variables ambientales, excepto (A). Una probabilidad alta sin la variable y baja con la variable

explica una variable no crítica para el modelo, mientras que una probabilidad alta que demuestra poca diferencia con y sin variable, explica una variable crítica para el análisis JKN.

La eliminación JKN se utilizó para identificar las variables ambientales que eran más importantes para explicar la variación de las variables que impactan la distribución del Potencial de Nicho Reproductivo (PNR) del águila real. Esta técnica ayudó a comprender la relación entre las variables bioclimáticas y las variables socio-ecológicas y las variables geomorfológicas.

El procedimiento se puede resumir en tres partes, la primera en el cálculo de la probabilidad del modelo con la variable ambiental (i) eliminada, para lo que se calcula la probabilidad de cada observación (k) con la variable ambiental (i) eliminada; la segunda en el cálculo de la probabilidad del modelo con todas las variables ambientales (n) consideradas, y finalmente la tercera considerando cada variable por separado sin el resto de las variables ambientales (n-i).

Se consideró como resultado final las dos variables de mayor importancia que se presentaran para cada grupo temático.

### **Función FACP**

El complemento de *"Muestreo de puntos"* fue extraído en el programa *QGIS 3.14.6* utilizando la capa que contiene los puntos de localización de los nidos que resultaron del monitoreo, y de ese modo se obtuvieron los valores de las capas de interés de los atributos bióticos y abióticos correspondientes (Tabla 3) a cada una de las posiciones de los nidos registrados. El complemento de herramienta de muestreo de puntos recopila valores de ráster (Figura 8) de múltiples capas en puntos de muestreo específicos. El complemento generó una nueva capa de puntos con ubicaciones dadas por los puntos de muestreo y atributos tomados de todos y cada uno los polígonos y/o celdas ráster subyacentes (QGIS, s.f.).

La FACP es un método de reducción de datos (Moya *et al.*, 2017). La metodología aplicada del análisis estadístico de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés) se puede sintetizar en los siguientes pasos:

1. Se calculó la matriz de correlación entre las variables.
2. Se calcularon los vectores y valores propios: descomponiendo de la matriz de correlación para obtener los vectores propios (autovectores) y los valores propios (autovalores). Los vectores propios representan las direcciones principales de variabilidad en los datos, y los valores propios indican la cantidad de varianza explicada por cada componente principal.

*Se obtienen vectores propios (autovectores)  $v$  y los valores propios (autovalores)  $\lambda$  de matriz de covarianza  $C$ .*

3. Se seleccionaron los componentes principales: Los componentes principales se seleccionan en función de los valores propios, eligiendo aquellos con los valores más altos, ya que capturan la mayor cantidad de varianza en los datos.

*Se ordenan los vectores y los valores propios de forma descendente en función de los valores propios. Los componentes principales se seleccionan de acuerdo con los valores propios más altos.*

- Se proyectó la matriz de datos original en el espacio definido por los componentes principales seleccionados. Esto implica multiplicar la matriz de datos por la matriz de vectores propios correspondientes a los componentes principales seleccionados.

Los datos originales  $X$  se proyectan en el espacio definido por los componentes principales seleccionados:

$$Z = \hat{X} * V$$

Donde:

$Z$  es la matriz de datos proyectados en el espacio de las componentes principales, con dimensiones  $n \times k$ .

$\hat{X}$  es la matriz de datos estandarizados.

$V$  es la matriz de autovectores correspondientes a las  $k$  componentes principales seleccionadas

- Se interpretaron los componentes principales en combinaciones lineales de las variables originales. Se analizaron los coeficientes de las variables en cada componente principal para entender qué características están más fuertemente relacionadas con cada componente.

### Método OP3 Modelación de nicho reproductivo

Una vez seleccionadas las variables resultantes, se aplicó un modelo de MAXENT para cada uno de los grupos de variables de interés extraídos por los dos métodos (JKN y FACP) y se obtuvo un modelo predictivo de distribución de sitios de anidación para la PBC. Esto último fue integrado por medio de un modelo de ensamble, vectorizando los valores ráster y sumando únicamente las probabilidades superiores al 80% de ambos métodos, y así obtener dos modelos resultantes utilizando la calculadora de campos del programa QGIS.



Figura 8, Ejemplos de variables consideradas para el análisis estadístico y sus valores base. (De izquierda a derecha: distribución de presas potenciales, precipitación promedio de la estación húmeda; e Integridad ecosistémica).

A continuación, se describe el proceso de elaboración de un modelo de nicho reproductivo a través de la Máxima Entropía con el software MaxEnt 3.4.3:

- Se recolectaron de datos de presencia de nidos pertenecientes a la especie *Aquila chrysaetos* en la PBC. Estos datos provinieron de registros históricos, bases de datos y observaciones en campo de sitios de anidación por vía terrestre y aérea.

2. Se prepararon los datos ambientales para su uso en el modelo de máxima entropía. Se descargaron recursos cartográficos correspondientes a las variables seleccionadas de portales públicos pertenecientes a organizaciones civiles y de Gobierno (CONABIO, CHELSA BIOCLIM, INEGI), así como datos generados en campo por el equipo de colaboración del autor con el fin de obtener productos cartográficos de tipo ráster y vectoriales para su posterior manejo en un sistema de información geográfico (SIG).

Los archivos ráster o capas de variables significativas fueron sometidas a un tratamiento en QGIS, el cual consistió en emparar la resolución de píxeles y extensión de área de los archivos para evitar errores en el proceso y cálculos. Al emparar las capas con la herramienta "Align rasters" el programa automáticamente asigna valores representativos acorde al(los) valor(es) original(es) en celdas que se separan o se unen. Para el ráster de referencia inicial se utiliza una de las capas bioclimáticas del programa CHELSA, seleccionadas habitualmente para este proceso por su precisión en términos de la extensión y su resolución de 1 Km<sup>2</sup>. Logrando igualar cada píxel en un mismo sitio correspondiente y alineado con la misma celda en el resto de los archivos ráster (uno por cada variable) y en el mismo sistema de coordenadas geográficas (WGS84/ UTM 11N).

3. Los datos fueron divididos aleatoriamente en dos conjuntos, uno de entrenamiento (training) y otro para evaluar (test) el desempeño del modelo (Elith *et al.*, 2010). Esto permitió evaluar la capacidad predictiva del modelo de datos no utilizados durante el entrenamiento. Se corrieron 10 réplicas con 500 iteraciones para ambas configuraciones de variables seleccionadas (JKN y FACP) con una proporción de 30/70 siendo 70 % datos utilizados para el entrenamiento y 30% de los datos para la prueba de modelo (Gholamy *et al.*, 2018).
4. Se realizó el análisis de tasa de omisiones y el análisis de área predicha para las observaciones de *Aquila chrysaetos* de manera automática con el software MaxEnt. El análisis de tasa de omisión se explica como el porcentaje de los datos de evaluación que no resulta dentro de la modelación de nicho reproductivo, es decir que, una tasa de omisiones baja es reflejo que el modelo funciona mejor para predecir el hábitat adecuado, mientras que una tasa alta explica que el modelo está sobre ajustando los datos. El análisis de área describe el porcentaje del terreno como hábitat adecuado, un área más alta indica que el modelo predice un área mayor como adecuado para territorios de anidación. El resultado que deriva en mejores datos para análisis tiende a ser con una predicción de área menor, debido a que se reduce el riesgo de estar sobreestimando alguno de sus factores.
5. Se generó el modelo acumulativo de máxima entropía: La probabilidad de presencia de una especie y variables ambientales en un sitio predeterminado para construir un modelo que predice áreas que contienen condiciones adecuadas para su proceso reproductivo (Newton, 2017). El modelo se calibró y evaluó para generar capas que resalten la idoneidad de la península de Baja California. El modelo acumulativo que se generó considera la sumatoria de los valores de las capas resultantes de cada

iteración para identificar zonas con mayor o menor valor acumulado de potencial de anidación y se calcula de la siguiente manera para ambos conjuntos de variables seleccionadas por JKN y FACP:

$$P(y|x) = \exp(\sum \lambda_i * f_i(x)) / Z(x)$$

Donde:

$P(y|x)$  es la probabilidad condicional de que la especie esté presente ( $y=1$ ) o ausente ( $y=0$ ) en un punto dado  $x$  en el área de interés.

$\lambda_i$  son los multiplicadores de Lagrange que se determinan mediante el proceso de optimización para maximizar la entropía sujeta a las restricciones.

$f_i(x)$  son las características o variables explicativas que describen las condiciones ambientales en el punto  $x$ . Estas características se eligen de acuerdo con el conocimiento disponible y pueden incluir variables como la temperatura, la humedad, el tipo de suelo, etc.  $Z(x)$  es la función de partición que normaliza la distribución para que la suma de las probabilidades de sólo presencia sea igual a 1 sobre el área de interés.

6. La precisión del modelo fue evaluada utilizando los datos de prueba. Esto implica comparar las predicciones del modelo con las presencias reales y calcular métricas de evaluación, como el área bajo la curva ROC (AUC por sus siglas en inglés). El método de área bajo la curva cuantifica en un valor de 0 a 1 la capacidad del modelo de diferenciar entre sitios con y sin potencial, 0.5 indica que la capacidad del modelo es aleatoria.
7. Se interpretaron los resultados del modelo para entender la espacialidad de las variables ambientales que más influyen en el nicho reproductivo de la especie. Esto se puede hacer mediante el análisis de las contribuciones relativas de las variables y la visualización de los mapas de idoneidad obtenidos a partir del modelo presentado en resultados OP3.

## Resultados

### Resultado OP1 Inventario de sitios de anidación

El monitoreo aéreo se realizó durante cinco días de vuelos, contabilizando un total de 14.5 h efectivas de censo aéreo con 1,601 km recorridos cubriendo visualmente un área aproximada de 617 ha (Tabla 7). Se localizaron sitios de anidación en tres de las cinco secciones de monitoreo establecidas en el plan de vuelo: Matomí, Cirios Norte y Asamblea. En las secciones de San Francisco y Reforma no se lograron identificar estructuras de anidación propias de un águila real.

Durante el censo aéreo se identificaron nueve especies de aves rapaces. El total de los registros fue de 392, de los cuales 188 fueron sitios de anidación y 194 correspondieron a aves observadas con 18 evidencias de actividad reproductiva.

Para el águila real (*Aquila chrysaetos*), se encontró:

- Número de registros: 123
- Sitios de anidación: 115
- Aves observadas: 6
- Evidencias de actividad reproductiva: 2

Además del águila real, se observaron otras ocho especies de aves rapaces en el censo aéreo. De estas, la lechuza común (*Tyto alba*) fue la especie más abundante, con 162 registros, de los cuales 46 fueron atribuidos a sitios de anidación.

El halcón peregrino (*Falco peregrinus*) fue la siguiente especie más abundante, con 6 registros, de los cuales 2 fueron sitios de anidación. Se observaron cuatro huevos en uno de los sitios observados.

La águila pescadora (*Pandion haliaetus*) y el cóndor californiano (*Gymnogyps californianus*) fueron las especies con el menor número de registros (Figura 9), con 3 y 1 registros, respectivamente. En ambos casos, los registros correspondieron a sitios de anidación, pero no se observaron evidencias de actividad reproductiva.

Las demás especies observadas fueron el zopilote (*Cathartes aura*), el aguililla de Harris (*Parabuteo unicinctus*) y el búho virginiano (*Bubo virginianus*). Se observaron 32, 5 y 2 registros de cada una de estas especies, respectivamente.



Figura 9, Cavidad de anidación del cóndor Californiano *Gymnogyps californianus*

Tabla 4, Nidos de águila real identificados por sección durante el monitoreo aéreo.

Nidos de Águila Real localizados por sección	
<i>Sección</i>	<i>Nidos AR</i>
Matomí	20
Cirios Norte	52
Libertad	43
San Francisco	0
La Reforma	0

En cuanto a las categorías del estado del nido de águila real (Figura 10) se localizaron 58 nidos con evidencia de uso reciente (54%), 34 nidos alternativos (32%) y 15 nidos abandonados (14%). La mayor cantidad de nidos se localizó en la sección Cirios Norte (52), seguido de la sección Libertad (43), cerrando la cuenta de sitios de anidación en Matomí (20) y finalmente tanto San Francisco como La Reforma se concluyó el trayecto sin encontrar registros.

Registros adicionales incluyeron borrego cimarrón, cirios y cardones, al igual que una notable reducción en la disponibilidad de agua en las secciones Libertad y La Reforma. Por su parte en la sección de San Francisco destacó la presencia de chivos en acantilados y zonas rocosas, al igual que ganado en el cauce de los arroyos.



Figura 10, Ilustración de las categorías de uso de los nidos de águila real de uso reciente (izquierda), alternativos (centro) y abandonados (derecha).

Tabla 5, Resumen de observaciones durante el censo aéreo realizado en la península de Baja California durante el mes de marzo de 2021 por Toscano y colaboradores.

Especie	Individuos	Nidos	Anidación
<i>Aquila chrysaetos</i>	6	115	2
<i>Bubo virginianus</i>	2	0	0
<i>Buteo jamaicensis</i>	34	23	6
<i>Cathartes aura</i>	32	0	0
<i>Falco peregrinus</i>	4	2	1
<i>Gymnogyps californianus</i>	0	1	1*
<i>Pandion haliaetus</i>	2	1	1
<i>Parabuteo unicinctus</i>	5	0	0
<i>Tyto alba</i>	109	46	7
<b>Total</b>	<b>194</b>	<b>188</b>	<b>18</b>

\* = Proveniente de datos de GPS y no de observación directa

## Resultado OP2 Selección de variables base

### Revisión bibliográfica

El acervo bibliográfico para este trabajo constó de 35 fuentes directas y un sinnúmero de fuentes secundarias, siendo todas ellas artículos arbitrados consultados a través del portal de la Biblioteca UABC y de acceso libre en la web, así como literatura impresa y digital. Las principales palabras clave que se encontraron en la literatura relacionados con el águila real y el objeto del presente estudio (Figura 11) fueron: Anidación (9), Monitoreo aéreo (5), Conservación (4), Distribución (3), Manejo (3), Monitoreo (3) y Población (3).

Tabla 6, Comparativo del monitoreo realizado para el presente estudio con antecedentes significativos en la literatura del águila real en el noroeste de Norteamérica

Sitio	Autores	Hectáreas	Km Lineal	Sitios de anidación	Población	Periodo (hr)	Fechas
Quebec	Latta, B., <i>et al</i> , 2010	12,600	480	20	ND	14	1994 - 2007
Nevada	Bittner, J., <i>et al</i> , 2010	1,232,000	ND	1000	ND	ND	Mar - Oct 11
Oeste EU	Boone, J., <i>et al</i> , 2010	ND	17,500	ND	23,530	ND	2006 - 2011
California	Erickson, W., <i>et al</i> , 2010	ND	ND	289	ND	167.8	Dic 11 - Ago 12
Suroeste EU	Morneau, F., <i>et al</i> , 2010	ND	ND	342	ND	ND	1996 - 2012
Arizona	McCarty, K., <i>et al</i> , 2010	10,000	ND	264	ND	177.6	Feb - May 14
Baja California	Toscano <i>et al</i> , 2023	617	1,600	107	ND	14.5	21-Mar

ND= No disponible



- Precipitación  $\bar{x}$  mensual de la estación húmeda, este factor tiene una influencia directa en todas las variables socio-ecológicas (abundancia de presas, disponibilidad de agua, salud ambiental y tipo de hábitat), empero el efecto consecuente se encuentra condicionado por variables geomorfológicas.

Tabla 9), de las cuales dos son correspondientes a la categoría bioclimática (Precipitación  $\bar{x}$  mensual de la estación húmeda “Bio\_16” y Precipitación  $\bar{x}$  mensual de la estación cálida “Bio\_18”), cuatro a la categoría socio-ecológicas (Cobertura vegetal, Cuerpos de agua, Integridad ecológica y Distribución de presas potenciales) y, finalmente, cuatro variables en la categoría geomorfológica (Curvatura, Pendiente, Topoforma y Orientación).

Tabla 8, Listado de grupos temáticos, variables y capas utilizadas como ingresos en la matriz de correlación para descarte de variables potenciales.

Grupo temático	Variable potencial	Capa	
Geomorfológicos	Formación predominante	Topoformas	
	Elevación	Altitud	
	Orientación	Orientación	
	Exposición	Curvatura	
	Sitios de Forrajeo	Planicidad de valle	
	Inaccesibilidad	Pendiente	
Socio-Ecológicos	Salud ambiental	Integridad ecosistémica	
	Tipo de suelo	Cobertura vegetal	
	Disponibilidad de agua	Cuerpos de agua	
	Abundancia	Distribución de presas potenciales	
Bioclimáticos	Temperatura	Temperatura $\bar{x}$ anual	
		Margen diario promedio de temperatura	
		Isotermalidad	
		Temperatura estacional	
		Temperatura máxima promedio diaria del mes más cálido	
		Temperatura mínima promedio diaria del mes más frío	
		Margen anual de temperatura	
		Temperatura diaria promedio de la estación húmeda	
		Temperatura diaria promedio de la estación seca	
		Temperatura diaria promedio de la estación fría	
		Temperatura diaria promedio de la estación cálida	
		Precipitación	Precipitación anual promedio
			Precipitación del mes más húmedo
			Precipitación del mes más seco
			Precipitación estacional
			Precipitación mensual promedio de la estación húmeda
	Precipitación mensual promedio de la estación seca		
Precipitación mensual promedio de la estación cálida			
Precipitación mensual promedio de la estación fría			

En la Tabla 9 se ofrecen las variables resultantes de discriminación correlativa "r.covar", las cuales en consideración con expertos y en la literatura consultada guardan una relación más directa con los hábitos reproductivos de la especie. Este proceso fue repetido hasta que no existieron más variables correlacionadas. El consenso seleccionó como principales las siguientes variables:

***Bioclimáticas***

- Temperatura  $\bar{x}$  diaria de la estación fría, este factor tiene una influencia directa en los procesos de la reproducción del águila real debido a que la temperatura ambiental es considerado un gatillo de procesos biológicos a gran escala los cuales pueden determinar el comienzo de la temporada reproductiva.
- Precipitación  $\bar{x}$  mensual de la estación húmeda, este factor tiene una influencia directa en todas las variables socio-ecológicas (abundancia de presas, disponibilidad de agua, salud ambiental y tipo de hábitat), empero el efecto consecuente se encuentra condicionado por variables geomorfológicas.

Tabla 9, Variables resultantes del análisis de discriminación correlativa" r.covar". El consenso seleccionó como principales las siguientes variables:

Grupo temático	Variables base
Bioclimáticas	Temperatura $\bar{x}$ diaria de la estación fría (Bio_11) Precipitación $\bar{x}$ mensual de la estación húmeda (Bio_16)
Socio-Ecológicas	Cobertura vegetal Cuerpos agua Integridad ecológica Presas potenciales
Geomorfológicas	Curvatura Orientación Pendiente Topoforma

***Socio-ecológicas***

- Cobertura vegetal. Esta variable tiene una influencia directa en la distribución de la especie ya que depende de la vegetación baja arbustiva, evita zonas de bosques frondosos y/o altos para poder realizar sus actividades de cacería. Sus presas preferidas suelen habitar praderas y pastizales siendo este otro de los hábitats preferidos de esta especie.
- Disponibilidad de agua. Esta variable es esencial para todos los seres vivos, a pesar de que las águilas y otras aves se hidratan principalmente de los líquidos contenidos en sus presas, es una variable significativa para la producción de biomasa vegetal y en consecuencia abundancia de animales y presas potenciales.
- La integridad ecosistémica se considera que tiene una alta influencia en la distribución de la especie y su potencial reproductivo, dado que el águila real es una especie altamente reservada que necesita de amplias extensiones de terreno no perturbado y bajos niveles de disturbio para poder establecerse

exitosamente y desarrollar su ciclo reproductivo. El águila real al ser una especie de gran tamaño requiere territorios con grados aceptables de conservación y de ciertas medidas mínimas para poder realizar sus actividades de cacería.

- La distribución de presas potenciales es una variable que impactará significativamente la distribución de los sitios de anidación, lo cual es explicado por las características territoriales de la especie que requiere tener acceso cercano a las fuentes de alimento y así evitar desatender el nido en caso de acoso por un águila rival o amenazas por depredadores. A pesar de que el águila real es una especie generalista y su dieta puede variar según la disponibilidad, tenderá a buscar especies típicas de praderas como liebres, conejos, ardillas y perritos de la pradera, complementando su dieta con otras aves reptiles y carroña.

### ***Geomorfológicas***

- La curvatura del terreno describe lo convexo o cóncavo del terreno, esto nos permite definir si el sitio de anidación se encuentra expuesto en un cantil abierto o si se encuentra protegido en una zona de cañada o meseta.
- La orientación describe la preferencia de la especie a orientar el nido en consideración principalmente de la exposición a la luz solar directa y por ende la regulación de la temperatura del nido. Tienden a orientar sus nidos al norte y noroeste, principalmente.
- La pendiente principalmente describe la accesibilidad o inaccesibilidad del nido, esta es una característica fundamental cuando se expone tanto la exposición del sitio de anidación a disturbios y modificaciones al uso de suelo, así como ciertas características de la vegetación en las zonas aledañas al nido.
- La topografía particularmente describe diferentes tipos de formación rocosa que darán pie a particularidades del terreno como cañadas, acantilados, planicies, etc.

### Función de JKN para selección de variables base

Los resultados indican que de las seis variables base (Tabla 10) para este análisis son del grupo temático Geomorfológico: Pendiente y Topoforma, del grupo Socio-ecológicos: Cobertura vegetal y Cuerpos de agua, y finalmente del grupo bioclimáticos: Precipitación  $\bar{x}$  Mensual de la Estación Cálida (Bio\_18) y la Precipitación  $\bar{x}$  Mensual de la Temporada Húmeda (Bio\_16).

Tabla 10, Variables principales resultantes del análisis JKN para los sitios de anidación localizados en cada grupo temático durante el censo aéreo realizado en marzo 2021

Grupo temático	VARIABLES BASE	Porcentaje de contribución	Importancia de permutación
Geomorfológico	Pendiente	31.8	29.4
	Topoforma	30.6	31
	Planicidad de valle	29.6	29.1
	Orientación	7.2	9.7
	Curvatura	0.8	0.9
Socio-ecológico	Cobertura vegetal	60.3	28.4
	Cuerpos de agua	18.6	11.9
	Presas potenciales	11.1	36.3
	Integridad ecológica	10	23.4
Bioclimático	Bio_8	36.2	49.2
	Bio_1	30.2	5.2
	Bio_18	7.0	15.7
	Bio_16	5.9	0.0
	Bio_12	4.8	5.6

En gris se señalan las variables seleccionadas para cada grupo temático.

### Función de FACP

Las variables encontradas como significativas fueron utilizadas todas para el FACP (Tabla 11). Las cinco variables que forman el componente principal "RC1, que es donde se aporta la mayor contribución explicativa, se presentan en la Figura 9. Las variables que integraron el componente principal uno (RC1), son del grupo temático geomorfológico (curvatura, topoforma, pendiente y orientación), del grupo temático socio-ecológicas (cuerpos de agua), este último el de mayor peso de medición. Se observa que por grupo temático los componentes principales se ubican como de mayor importancia los geomorfológicos, seguidos de los socio-ecológicos, y finalmente los bioclimáticos.

Tabla 11, Componentes principales del proceso reproductivo del águila real en la PBC

Variable	Capa	RC1	RC2	RC3	RC4	Unicidad
Curvatura	CURV	<b>0.710</b>	0	0	0	0.386
Topoforma	TOPO	<b>0.660</b>	0	0	0	0.529
Pendiente	PEND	<b>-0.596</b>	0	0	0	0.416
Orientación	ORIE	<b>-0.635</b>	0	0	0	0.352
Presas potenciales	PRESAS POT	<b>0</b>	0.923	0	0	0.129
Cuerpos de agua	CAGUA	<b>0.816</b>	0	0	0	0.268
Integridad ecosistémica	INEC	<b>0</b>	0.796	0	0	0.128
Cobertura vegetal	COVE	<b>0</b>	0	0.843	0	0.166
Pp $\bar{x}$ mensual de la estación húmeda	BIO16 P $\bar{x}$ MEH	<b>0</b>	0	0	0.924	0.105
Pp $\bar{x}$ Mensual de la estación cálida	BIO18 P $\bar{x}$ MEC	<b>0</b>	0	0.865	0	0.134

Nota: El método de rotación aplicado fue Clúster

El porcentaje de la variación que corresponde al componente RC1 es la suma de los cuadrados de las cargas factoriales de todas las variables, dividida por la suma de los cuadrados de las cargas factoriales de todas las variables y los componentes principales. En este caso, la suma de los cuadrados de las cargas factoriales de todas las variables es:

$$0.710^2 + 0.660^2 + (-0.596)^2 + (-0.635)^2 + 0^2 + 0.816^2 + 0^2 + 0^2 + 0^2 + 0.923^2 + 0^2 + 0^2 + 0.924^2 + 0^2 + 0.865^2 = 6.108$$

La suma de los cuadrados de las cargas factoriales de todas las variables y los componentes principales es:

$$6.108 + 2*(0.923^2 + 0.924^2) = 6.108 + 2*0.851 = 8.709$$

Por lo tanto, el porcentaje de la variación que corresponde al componente RC1 es:

$$(6.108 / 8.709) * 100 = \mathbf{69.9\%}$$

## Resultado OP3 Modelo de nicho reproductivo

### Modelo de nicho reproductivo por selección de variables base con JKN de Máxima Entropía

Se observa (Figura 12) que las principales variables que influyeron en su presencia en el modelo son la precipitación  $\bar{x}$  de la estación cálida (bio\_18) seguida por la pendiente y la topoforma. Se observa que en la ausencia de cuerpos de agua el modelo en el área bajo la curva se representa casi al mismo nivel que con todas las variables. Reforzando así que el modelo como se presenta desestimó significativamente las variables socio-ecológicas al interactuar con las variables bioclimática y geomorfológica.

En términos del desempeño del modelo entrenado con regularización de probabilidad ordenada de 0.1 a 1.8 (Figura 13), el desempeño es similar al del análisis del AUC, la variable que refleja una mayor influencia en el territorio con base en los valores descritos en los sitios de anidación es la precipitación  $\bar{x}$  mensual de la estación cálida (Bio\_18), también es la que más impacta el modelo en su ausencia, le siguen la pendiente y finalmente

con muy poco valor la cobertura vegetal, aunque el rendimiento del modelo sigue siendo mejor cuando se consideran las seis variables (rojo) para la península de Baja California.

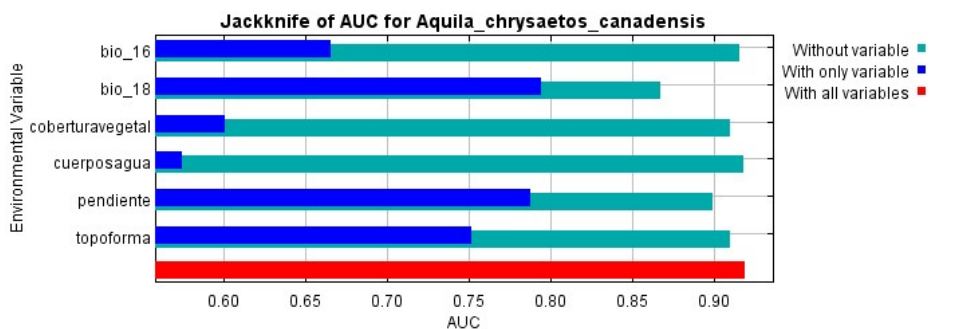


Figura 12, Análisis “JKN” de máxima entropía del área bajo la curva (AUC por sus siglas en inglés).

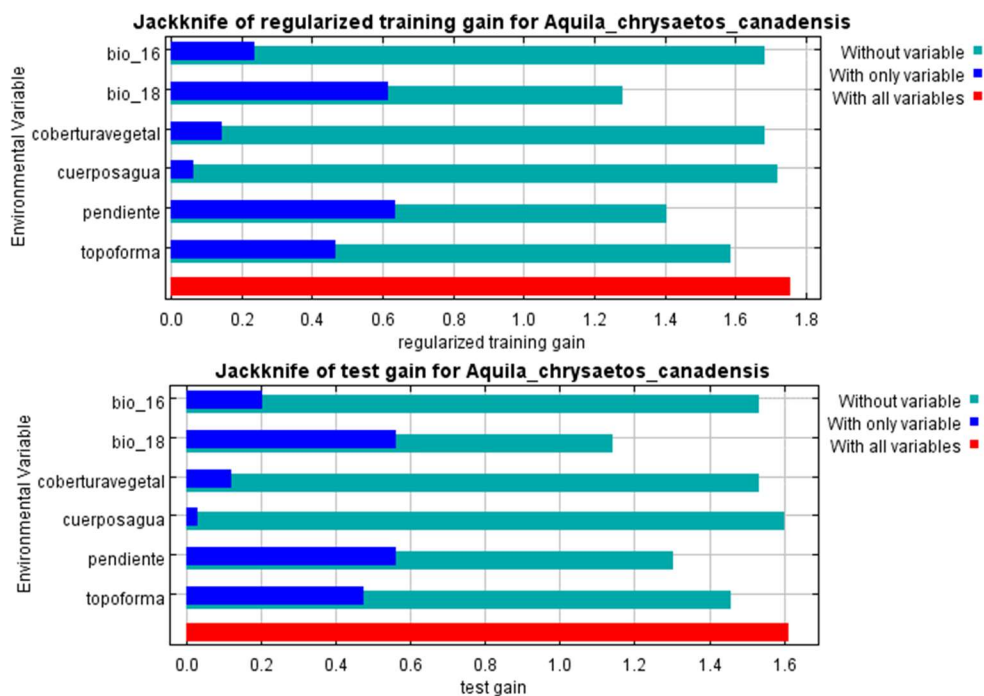


Figura 13, Comparativo de análisis de máxima entropía “JKN” en ambos análisis de ganancia de entrenamiento (arriba) y de prueba (abajo).

La Figura 14 muestra el resultado del estudio de máxima entropía con las seis variables principales (dos por cada grupo temático) alimentadas a MaxEnt, y se explica la probabilidad de presencia de sitios de anidación dados los valores del modelo de ganancia por entrenamiento-prueba de omisiones y el valor correspondiente del área bajo la curva (AUC). Las variables en el modelo se demuestran en una escala de 10% a 100% de probabilidad (siguiente página).

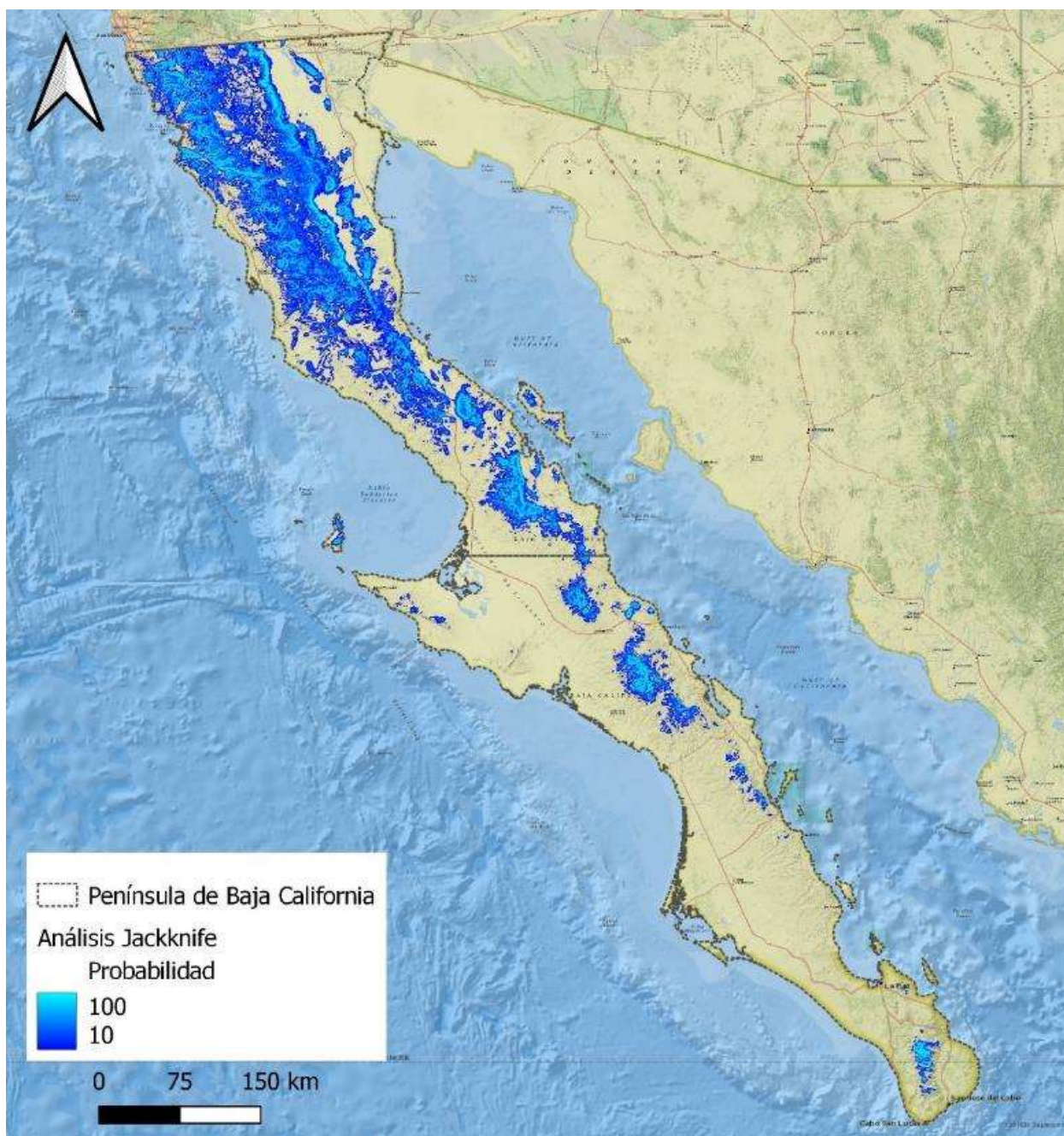


Figura 14, Resultado de la distribución potencial de anidación del águila real por método de Máxima Entropía con depuración JKN de variables.

- Bio\_18 (CHELSA Bioclim).
- Bio\_16 (CHELSA Bioclim)
- Cobertura vegetal (CONABIO).
- Densidad de "Cuerpos de Agua" (INEGI).
- Pendiente (INEGI)
- Topografía (INEGI)

#### Modelo de nicho reproductivo por eliminación de variables con FACP

Se observa (Figura 15) que las dos principales variables que influyen en el modelo son la pendiente y la topografía, siendo también las dos variables que más castigan al modelo en su ausencia. La presencia de

cuerpos de agua contribuye poco al modelo. Esto se observa con el valor alto de la AUC de la pendiente y la topoforma (azul rey), siendo éstas las mismas que más impactan el modelo en su ausencia, por lo que el mejor rendimiento del AUC es aquél donde se observa la combinación de las cinco variables (rojo).

En términos del desempeño del modelo entrenado y de prueba regularizado de probabilidad ordenada de 0.1 a 1.0 (Figura 16), el desempeño es similar al del análisis del AUC. Las variables que reflejas una mayor influencia en el modelo fueron la pendiente y la topoforma, mientras que la que menos impactó fue la densidad de "Cuerpos de Agua". El rendimiento del modelo sigue siendo mejor cuando se consideran las tres variables (rojo) para la península de Baja California.

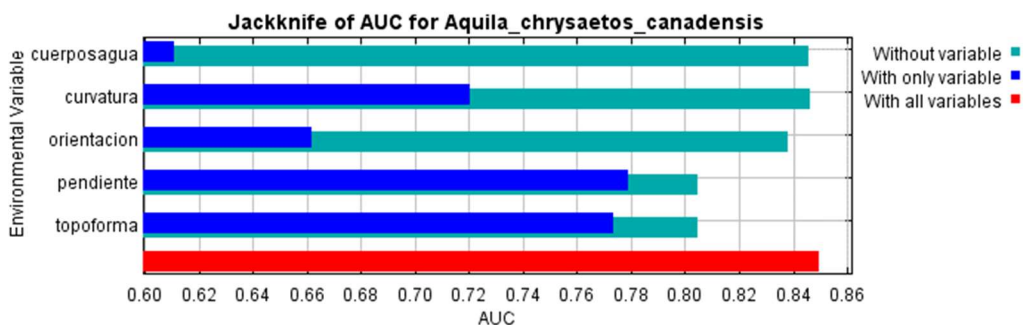


Figura 15, Análisis "JKN" de máxima entropía del área bajo la curva (AUC por sus siglas en inglés) de la muestra en modelo.

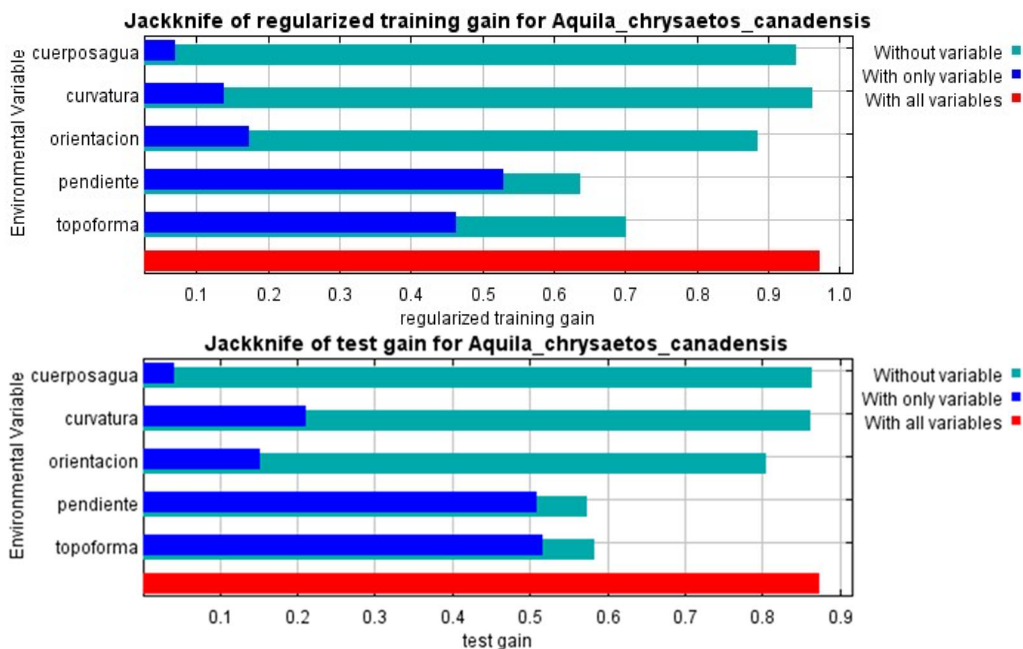


Figura 16, Comparativo de análisis de máxima entropía "FACP" en ambas análisis de ganancia de entrenamiento (arriba) y de prueba (abajo).

La Figura 17 muestra el resultado del estudio de máxima entropía con las tres variables principales (una de cada grupo temático) ingresadas a MaxEnt, donde se explica la probabilidad de presencia de sitios de anidación dados

los valores del área bajo la curva (AUC), de ganancia por entrenamiento y prueba de las variables en el modelo en una escala de 0 a 100% de probabilidad.

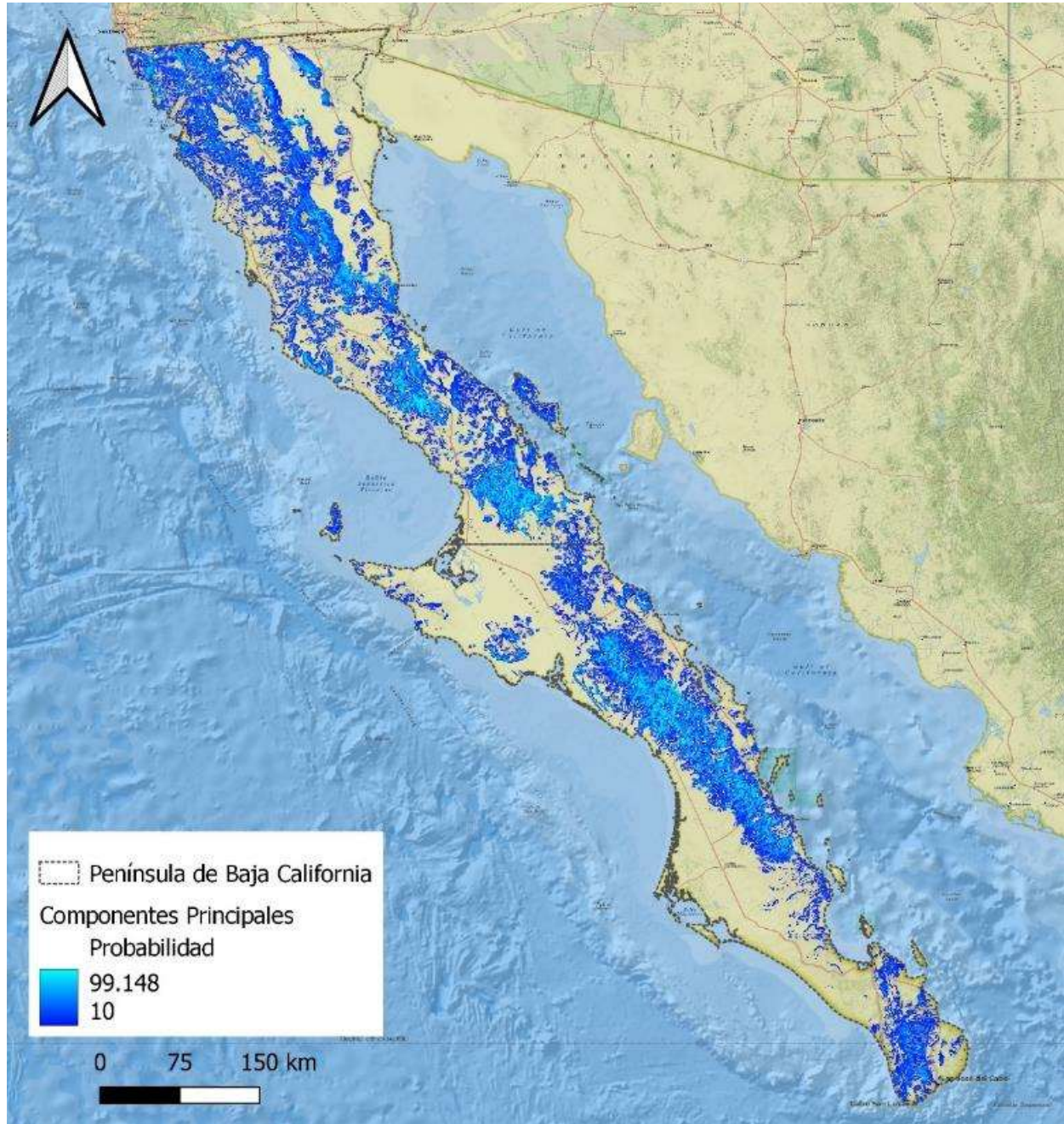


Figura 17, Resultado de potencial de anidación del águila real por método de Máxima Entropía con depuración de variables por FACP.

- Densidad de "Cuerpos de Agua" (INEGI).
- Curvatura (INEGI).
- Orientación (INEGI).
- Pendiente (INEGI).
- Topografía (INEGI)

Sin embargo, al comparar la superficie con potencial para ambos casos se observa una diferencia notable con un total de 23,500 m<sup>2</sup> de territorio con alto potencial utilizando el modelo JKN y 48,960 m<sup>2</sup> de territorio con potencial utilizando el modelo por FACP. Al refinar el análisis utilizando estas superficies con potencial reportado se observa que apenas el 2% (540 m<sup>2</sup>) y 5% (2,460 m<sup>2</sup>) se consideran con más de 80% de probabilidad respectivamente. La Figura 18 ilustra la relación de las secciones (S) monitoreadas vía aérea con la distribución de las zonas con potencial de anidación.

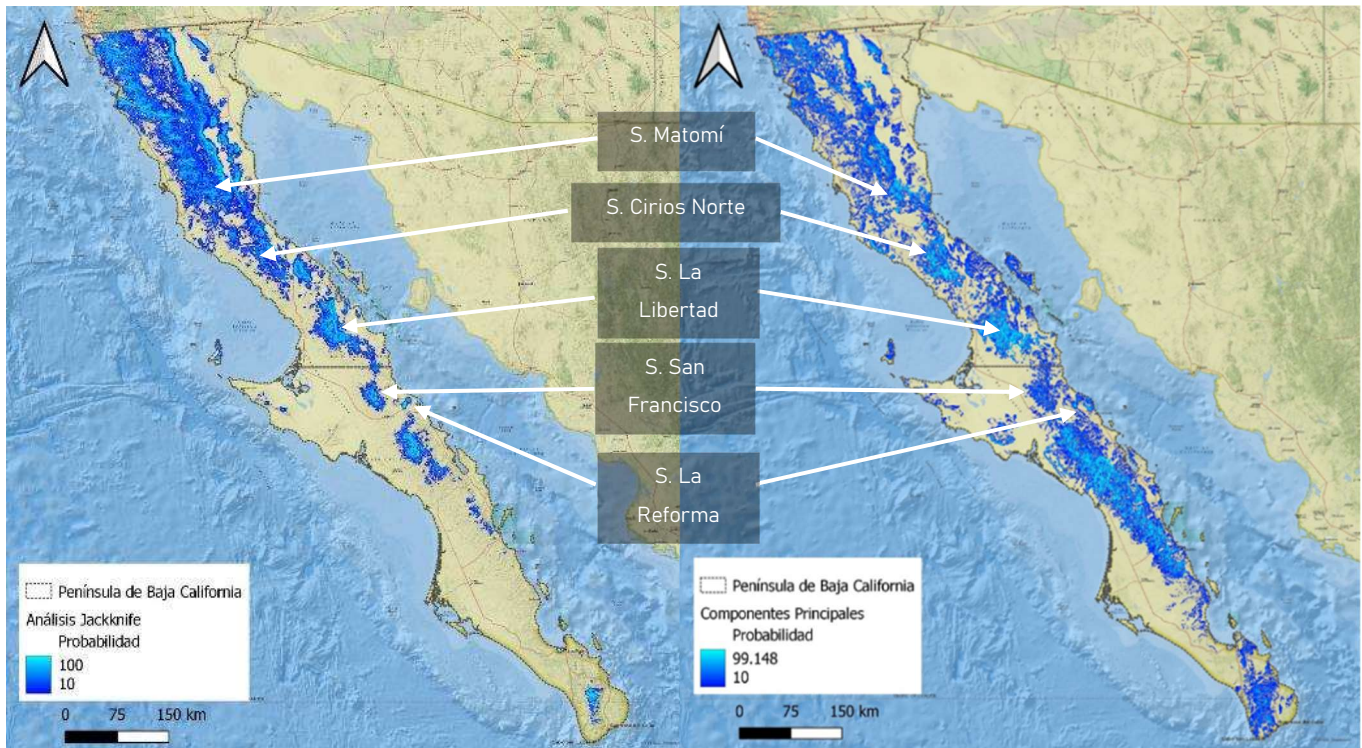


Figura 18, Comparativo de métodos JKN (izquierda) y FACP (derecha) en secciones de monitoreo

Finalmente observamos en la Figura 19 la distribución del potencial de anidación haciendo énfasis en sistemas con potencial de ser seleccionados como secciones de monitoreo, y en las cuales aún no han sido realizado esfuerzos de monitoreo aéreo.

A pesar de la más alta probabilidad coincide en términos generales para ambos modelos de nicho reproductivo, si se dividiera la cordillera de la península de Baja California asociando las probabilidades a las secciones de monitoreo como se observa en la Figura 18 y en sistemas montañosos importantes de la PBC en la Figura 19, la cordillera de la península de Baja California presenta un alto potencial mayormente en 16 de 20 comparaciones como se muestra en la Tabla 12 (siguiente página).

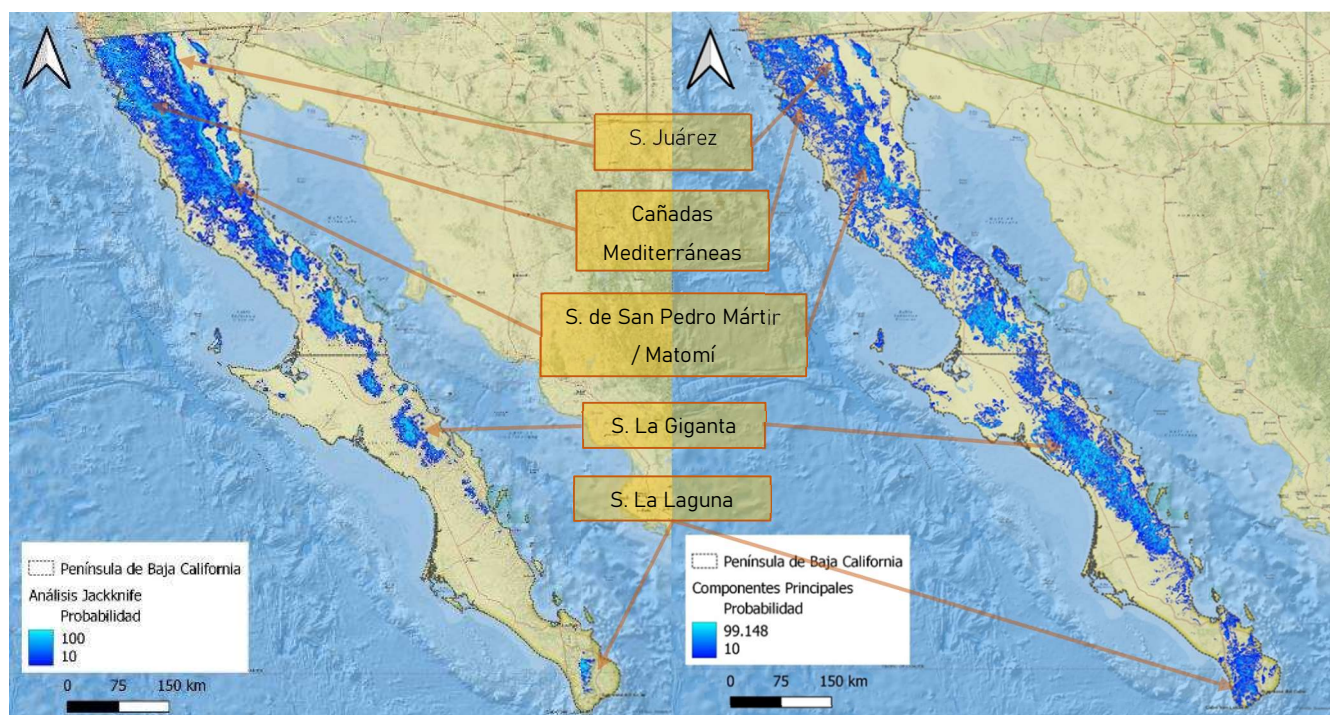


Tabla 12, Comparativo de probabilidades en las secciones monitoreadas y principales sistemas montañosos de la PBC.

Secciones del estudio			Otros Sistemas de la PBC		
Secciones	Probabilidad		Sistemas serranos	Probabilidad	
	JKN	FACP		JKN	FACP
Matomí	Alta	Alta	Juárez	Alta	Baja
Cirios Norte	Alta	Alta	Cañadas mediterráneas	Alta	Baja
La Libertad	Alta	Alta	San Pedro Mártir	Alta	Alta
San Francisco	Alta	Baja	La Giganta	Alta	Alta
La Reforma	Alta	Alta	La Laguna	Alta	Baja

## Discusión

### Discusión OP1 Inventario de sitios de anidación

El monitoreo aéreo se destaca por su capacidad para abarcar grandes extensiones de terreno y acceder a áreas remotas, donde los métodos terrestres son limitados. Tal como es descrito por Latta, Bittner, Boone, Erickson, Morneau, McCarty y sus respectivos colaboradores (2010) durante el simposio del grupo de trabajo del suroeste de Estados Unidos, la rapidez y la visión panorámica desde el aire permiten evaluar la distribución y densidad de las poblaciones de águila real de manera más eficiente. Aunque los enfoques terrestres y satelitales pueden ser complementarios para obtener datos más detallados en áreas específicas, el monitoreo aéreo es esencial para una evaluación inicial a gran escala. En este sentido y como indican Driscoll y Pagel en sus protocolos (2010), las tecnologías como cámaras trampa y telemetría satelital han revolucionado el monitoreo aéreo. Proporcionan datos detallados sobre movimientos, reproducción y comportamientos, mejorando la comprensión de la ecología de las águilas reales. Las futuras innovaciones podrían centrarse en la mejora de la resolución espacial y la reducción de posibles impactos negativos para las aves durante el monitoreo. Esto se comprobó de manera contundente durante el presente estudio, ya que la planificación del vuelo y las secciones de monitoreo son una combinación de los esfuerzos realizados por el grupo de monitoreo y manejo del águila real en la península de baja california los cuales han incluido incontables horas de monitoreo terrestre, monitoreo con cámaras trampa, el análisis y estudio de los movimientos de datos de telemetría satelital y la colaboración institucional.

Los censos aéreos para poblaciones de vertebrados terrestres representan un método que, como otros, está condicionado a una condición climática favorable. De este modo y de acuerdo con Pagel en su publicación de 2010, establecer protocolos éticos y seguros es crucial para minimizar el impacto del monitoreo aéreo en las águilas reales. Así como limitar la proximidad de la aeronave, definir períodos de monitoreo y establecer zonas de exclusión son medidas esenciales. Además, la implementación de regulaciones y capacitación especializada para pilotos y científicos puede garantizar la seguridad de todas las partes involucradas. Contrario a lo que pueda ocurrir en casos de emergencia o accidentes en tierra, las emergencias en helicóptero comúnmente son fatales (Pagel, 2019 com. pers.). De acuerdo con expertos en la materia, las fechas seleccionadas para el estudio presentan condiciones climáticas más favorables para el vuelo en la región (Castro E., 2021, com. pers.) pero enmarcan condiciones no ideales para el esfuerzo de monitoreo de actividad reproductiva (Vargas J., 2021 comentario personal). La consecuencia de esta alteración al programa (ver capítulo Limitaciones del estudio) es que el mes de marzo no es una fecha en la que las parejas reproductivas hayan ya iniciado el proceso de empollamiento, incluso en estas fechas es posible que aún no se define el nido (de entre los múltiples nidos alternativos que puede tener un territorio) que se utilizará durante la presente temporada. Habiendo explicado lo anterior, resulta crítico establecer un programa de monitoreo aéreo a manera de réplica en el que se pueda confirmar, todos los sitios encontrados durante el mes de mayo para comprobar si en efecto son utilizados por águilas reales o si la observación de evidencias corresponde a la presencia nidos abandonados por águilas reales pero en uso por otra especie como puede ocurrir (Driscoll D., 2010; Pagel J., 2010). Derivado de ello, los

objetivos de muestreo y los resultados del estudio fueron orientados hacia el conteo de nidos potenciales y caracterización de nidos dejando fuera la posibilidad de conteo de nidos activos y productividad de polluelos.

El total del tiempo efectivo de vuelo se concentró en las zonas de cada transecto que se identificaron como potenciales en el plan de vuelo. Sin embargo, en ningún momento se discriminó la observación en campo como guía para dirigir las observaciones durante el monitoreo aéreo. Como dictan protocolos publicados por agencias gubernamentales y particulares con amplia experiencia en monitoreos aéreos (Driscoll D., 2010; Pagel J., 2010).

Se priorizó que los mismos observadores se mantuvieran el mayor tiempo posible en vuelo con el objetivo de minimizar el error estadístico por criterio de observación (Pagel J., 2010). De manera que las posiciones de navegante y observador 1 se mantuvieron mientras que sólo la posición de Observador 2 se alternó de la siguiente manera, una persona realizó 5 sobrevuelos en 4 transectos (Matomí (2), Cirios Norte, Libertad y San Francisco) y dos personas recorrieron un sobrevuelo en un transecto cada una (Libertad y Reforma). En su mayoría se observó que en comparación a otros monitoreos aéreos que, las horas de vuelo, área monitoreada y registros de anidación entre el esfuerzo reportado en este estudio, en contraste con los registros analizados en la sección de antecedentes, reflejan un evidente rezago de datos científicos. No obstante, el monitoreo realizado para este estudio representa el primer ejercicio conducido con enfoque de águila real, el cual además tuvo la utilidad de corroborar la viabilidad operativa para establecer programas continuos de monitoreo aéreo y el potencial ecológico de la zona en términos de la población reproductiva activa de águilas reales.

A nivel Norteamérica, el monitoreo aéreo para águila real en México realizado para este estudio se une a una amplia lista de monitoreos realizados para el estudio de la parte norte del continente. En promedio, se logró monitorear el 7% en comparación de las horas de vuelo que se han monitoreado el resto de los programas de monitoreo aéreo en la región (EUA y Canadá); habiéndose logrado alcanzar entre el 29% y 35% de los registros en comparación a los registros de anidación conseguidos en estudios previamente mencionados. Esta relación indica que no solamente el realizar el monitoreo con su debido protocolo es un esfuerzo viable en México en su contexto contemporáneo, si no que los resultados obtenidos con la implementación de un protocolo diseñado técnica y operativamente para ello han superado cualquier expectativa del equipo a cargo de las actividades que representaron este proyecto.

El monitoreo fue dirigido a acantilados rocosos ya que estos son la única estructura de anidación conocida para águilas reales en la región (De León-Girón, 2016). Los nidos de águila real fueron identificados particularmente por su tamaño y por el grosor de las ramas utilizadas para la construcción (Vargas J., 2021 comentario personal). Durante este monitoreo se localizaron cuatro especies (*Buteo jamaicensis*, *Falco peregrinus*, *Gymnogyps californianus*, *Tyto alba*) diferentes a *Aquila chrysaetos* que también utilizan cavidades rocosas para su anidación. En el caso de *Tyto alba*, los sitios de anidación (46) fueron considerados como aquellos en los que dos o más ejemplares fueron observados en una misma cavidad, mientras que para *Buteo jamaicensis* se consideraron como sitios de anidación (23) los nidos similares en aspecto a los de águila real pero significativamente de menor tamaño de nido y de ramas utilizadas (Vargas J., 2021 comentario personal). Así mismo, se observaron sitios de anidación (2) de *Falco peregrinus*, ambos sitios se consideraron activo por la

presencia de adultos en ambos nidos y huevos en uno de ellos indicando una temporalidad distinta de procesos reproductivos que el águila real. Finalmente, el sitio de anidación localizado de cóndor de California es el resultado del reconocimiento visual de la observación en datos de GPS de comportamiento característico de una pareja reproductora, esto se refleja al observarse intercambios de adultos entre las labores de crianza y recolección de alimento. La relación desproporcionada de los hallazgos se da en función de que el esfuerzo de muestreo está orientado en particular a una especie, dicho sesgo se agudiza al utilizar herramientas de modelaje para refinar los criterios y técnicas de exploración en campo. Como indica Booms y sus colaboradores (2010), realizar monitoreos con una base de modelo reproductivo enfocado en una sola especie, resultará en que la observación de otras especies pueda realizarse de manera incidental, y tal como sucedió en el presente estudio, aquellas especies distintas que también fueron detectadas comparten algunos rasgos de hábitat con el águila real.

En cuanto al resto de especies localizadas durante el monitoreo, se encontraron especies comunes en la zona, se observaron ocho especies distintas propias de la región neártica americana. Fue notoria la presencia de *Tyto alba* en los acantilados, posiblemente la concentración de ejemplares de las comunidades de lechuzas observadas obedeciera a un periodo de reproducción avanzado en el que los polluelos ya eran capaces de mantener un vuelo constante. El efecto de dirigir el monitoreo a una especie en específico es el notorio resultado principal de sitios de anidación encontrados para águila real contra el resto (excepto *Tyto alba*). Por otra parte, resulta significativo que más de la mitad de los sitios de anidación encontrados y catalogados como sitios de anidación de águila real se observaran con evidencias de uso reciente por presencia de heces en las paredes contiguas al nido y ramas relativamente frescas.

Los resultados finales observados por sección indican una notoria ausencia en las secciones correspondientes a ambas secciones de la Reserva de Biosfera El Vizcaíno. El presente estudio no aborda las causas. En ese mismo sentido, Booms (2010) indicó que, aunque existen registros de zonas volcánicas inactivas que pueden proveer de un buen sitio para anidación del águila real, no se localizó información precisa sobre sitios de anidación en volcanes considerados activos y a raíz de las observaciones en campo, se considera que la sección de La Reforma en particular la "Caldera de la Reforma" representa un ambiente extremo para la reproducción del águila real, habiendo evidencia existente de actividad geotérmica y se considera activo o "resurgente" (Macías, 2013).

Visto de otra manera, si se subdividiera a la PBC en 4 secciones de norte a sur, la región centro-norte se consideraría a la zona con una aparente concentración mayor de territorios localizados. Sin embargo, la restricción por el escaso tiempo de vuelo disponible y el hecho de que no se cuenta con un monitoreo sistemático, impiden que se pueda definir esta categorización, ya que observando los resultados de modelo existen áreas con potencial de anidación importante en otras regiones de la PBC Finalmente, en términos de la especie, los datos del monitoreo aéreo una fuente esencial de información útil para desarrollar estrategias de conservación efectivas. La identificación de amenazas específicas, combinada con medidas de mitigación focalizadas, puede

ayudar a revertir el declive de las poblaciones de águila real. La planificación basada en datos precisos es clave para el éxito de los esfuerzos de conservación.

## **Discusión OP2 Selección de variables**

La comparación de resultados entre regiones permite identificar patrones geográficos en la distribución y conservación de águilas reales. Como indica Martínez-Meyer en su colaboración con Townsend y otros autores (2011). Establecer estas diferencias con precisión puede informar estrategias adaptadas a contextos específicos, considerando factores ambientales y antropogénicos únicos en cada región. Los estudios sobre las especies y sus distribuciones, sus hábitos reproductivos y alimenticios recurren comúnmente a métodos de modelación por su capacidad de cómputo. Sin embargo, como indica Booms en 2010 muchos años de experiencia y estudios integrales han detallado la importancia de la selección y preparación de los datos como la parte más fundamental del proceso de modelación, el resultado en ocasiones resulta obvio, una vez que las variables fueron preparadas con cuidado. En ese sentido, para la elaboración del plan de vuelo recorrido en este estudio, la utilización de datos satelitales fue fundamental, esto debido a que el modelo reproductivo realizado utilizaba como fuente de datos sitios de anidación localizados exclusivamente en la región de sierras bajas mediterráneas, esto presentaba un conflicto particular, ya que el monitoreo aéreo se realizaría principalmente sobre la región desértica de la península. Para sobreponer el modelo a los conflictos informativos, el modelo base se centró en características geomorfológicas compartidas entre ambas ecorregiones, así y con la sobreposición de datos de telemetría satelital se lograron identificar zonas de agrupamiento de factores sugestivos de zonas activas de anidación.

Con este método y recomendaciones en consideración se realizó una depuración general de una pila de variables potenciales de la que se descartaron dos tercios de las variables iniciales reconocidas como probables o comunes en la literatura en combinación con observaciones en campo y opinión de expertos. La segunda etapa de la depuración se realizó a través de dos métodos estadísticos, uno de ellos teórico (FACP) y el segundo otro aplicado (JKN). Este proceso descrito requirió una matriz de correlación previa para descarte de variables redundantes, es decir que, habiendo identificado las variables comunes o probables en la literatura, fue necesario identificar por medio de un método estadístico (matriz de correlación) cuales de estas variables no representaban un aporte significativo dentro del mismo grupo de variables por ser redundantes. Una vez eliminadas las redundancias, ambos métodos (JKN y FACP) pudieron ser aplicados en relación con las variables aplicables para los sitios de anidación hallados y así, ilustrar cuales variables integrarían el modelo de probabilidad de Máxima Entropía para cada caso y que variables seleccionadas mostrarían una directa relación independiente con los sitios de anidación del águila real localizados.

### **JKN**

La estructura de este método se puede describir como una estructura rígida de análisis en contraste con el método FACP. Este análisis obligó al modelo a incluir los tres ejes conceptuales (Grupos Temáticos) de la revisión literaria. La navegación del modelo de Máxima Entropía por las limitantes estructurales por la selección

de las variables base de mayor peso para el análisis JKN, resaltó la precipitación  $\bar{x}$  en la estación cálida y la pendiente. Sin embargo, a través de este método no se logró establecer una variable de especial significado para explicar la distribución de sitios de anidación inventariados. Este hecho, en combinación de una tasa de omisiones ligeramente por debajo de la aleatoriedad, con un área predicha reducida y un AUC de 0.95, sugiere que el mayor peso en este modelo lo ejerce la propia ubicación de la muestra, la cual se encuentra fuertemente diferenciada en la parte norte de la península en la ausencia de inventarios significativos en la porción sur de la PBC. La utilidad de este modelo está en función de que las preguntas de investigación posteriores que deriven de este set de valores de probabilidad de nicho reproductivo se centren en la espacialidad de estos resultados y no en factores ecológicos o climáticos. Ej: Completar el inventario en los territorios localizados durante el mes de mayo. En consecuencia y para el caso de este análisis, se descartaron las dos variables principales del análisis para el grupo temático "Bioclimático" debido a que en su naturaleza y a pesar de no estar correlacionadas con el resto, tenían baja relación con el proceso reproductivo del águila real:

- Bio 1 - Temperatura  $\bar{x}$  anual, y
- Bio\_8 - Temperatura diaria  $\bar{x}$  de la estación cálida.

Mientras que las variables seleccionadas fueron las primeras dos variables que guardaban relación con la temporada reproductiva estando relacionadas con la cantidad de agua acumulada en la estación húmeda y de la estación cálida. Variable que directamente juega un papel en el valor de la variable de mayor peso y la única no geomorfológica del análisis FACP "Cuerpos de Agua".

### **FACP**

Se observó que el análisis desestimó las variables bioclimáticas relegándolas al tercer y cuarto componente principal. Resaltaron por su parte en el componente principal todas las variables base geomorfológicas acompañados de la densidad de los cuerpos de agua. Tal como indica Newton (2017) en su reporte "Breeding and Nesting Biology in Raptors", señalando que las dos principales variables para una reproducción exitosa es el espacio físico que cumple ciertos criterios (N) y la presencia de presas asequibles. Sin embargo, no menciona por lo que se asume que el autor está obviando los detalles finos de la socio-ecología en términos de disponibilidad de otros recursos indispensables como ramas para construcción de nidos, grado de disturbio y depredación, estabilidad fenológico-asociada a la climatología del sitio y eventos naturales extremos, biomasa disponible requerida para el mantenimiento y desarrollo de los polluelos, entre otros. En cuanto a las variables base considera la densidad de "Cuerpos de Agua" la cual tiene como fuerza motriz factores climáticos, limitantes edafológicas y geológicas, resultando en un impacto en la disponibilidad de presas potenciales y la biomasa acumulada. Por su parte las variables base geomorfológicas se encuentran vinculadas directamente con la presencia física de un sitio adecuado para establecer el nido y la seguridad de este, interpretando que se cumplen las dos variables críticas señaladas por Newton en 2019.

La intención de proponer dos métodos es visualizar las diferencias que pueden presentarse al utilizar métodos distintos de análisis y que la expresión de dos resultados, si bien debían de presentarse coincidencias

importantes, las diferentes variables ingresadas para cada método generarían efectos considerables en los resultados al comparar modelos y resalta la importancia de que el análisis puede ser como para nutrir propuestas de manejo del territorio o de la conservación de la especie en particular. Uno de los métodos (JKN) buscó responder ¿cuáles dos variables no correlacionadas entre sí ejercen el mayor peso en un análisis por grupo temático? El método estadístico (FACP) realizó un proceso similar, en el que se estableció ¿cuál cúmulo de varianzas representan mejor al modelo? De esta manera por un lado obtuvimos 2 variables significativas por cada grupo temático en JKN y por el otro para un total de 6 variables, y para el FACP un grupo de 5 variables que mejor representan al conjunto de valores asociados al inventario. La variable de mayor importancia en el componente principal es de carácter socio-ecológico, densidad de “Cuerpos de Agua”.

Por su naturaleza, la capa geográfica de esta variable no hace referencia a la existencia como tal de la existencia de densidad de “Cuerpos de Agua” sino de una disponibilidad regional de recursos hídricos, que puede estar asociado con caracteres geomorfológicos y puede tener una influencia significativa en la disponibilidad de presas del águila real. La consideración de los grupos temáticos utilizados para el análisis recae en estudios literarios de reconocimiento de variables significativas para procesos reproductivos de la especie, consideraciones locales como climas extremos y su relación con procesos reproductivos de aves silvestres (Katzner, *et al.*, 2020; Maynard, 2022).

### **Discusión OP3 Modelo de nicho reproductivo**

En el sentido del meta-análisis sobre la reproducción del águila real que realiza Steenhof y colaboradores (2017), la decisión de los parámetros y métodos a evaluar difiere en diferentes sentidos con trabajos previos y se suma a la disonancia de términos y métodos empleados que se utilizan al realizar descripciones y que por su naturaleza diversa complican establecer un entendimiento estandarizado de los análisis. La modelación por su parte sufre de este mismo efecto, aunque en su caso los procedimientos tienden a darle una estructura estadística rígida que protege de mejor manera la comparación directa y enfoque del análisis de los resultados. Sin embargo, los modelos deben tender a ser dinámicos en el sentido de que deben estar bajo constante actualización (Brendel, *et al.*, 2002) con nueva información y técnicas, priorizando la calidad derivada de un correcto planteamiento original.

En la implementación de los métodos, se encontró que para el método aplicado (JKN) la variable de mayor importancia en el modelo fue la Precipitación  $\bar{x}$  Mensual de la Estación Cálida, después las variables geomorfológicas Pendiente y Topoforma y sin valor significativo Precipitación  $\bar{x}$  en la Estación Húmeda y Cuerpos de Agua. Por otro lado, el resultado por método estadístico de segmentar las covarianzas da la mayor importancia a las variables base de tipo geomorfológico (Pendiente, Topoforma, Orientación y Curvatura), posteriormente a las socioecológicas \* y en última instancia las bioclimáticas. Al visualizar gráficamente ambos resultados en función de las variables significativas, resaltan coincidencias evidentes a lo largo de la cordillera tanto en sentido de presencia como de ausencia de potencial reproductivo. Este efecto permite corroborar que se mantiene una directriz marcada a pesar de las diferencias en variables tomadas como insumos y de las diametrales diferencias entre los procesos de los dos distintos métodos de análisis estadísticos utilizados.

Para el caso de la modelación por JKN la principal variable que describe la probabilidad del territorio ser apto como potencial de anidación es la temperatura promedio diaria de la estación más fría. Esta variable de estacionalidad representa los valores del mes más frío y los meses anterior y posterior. Para el caso de la modelación por FACP la principal variable, aunque por poco margen fue la “pendiente” seguida de cerca por “topoforma”. Los resultados sugieren que el modelo de máxima entropía bajo el método JKN las consideraciones principales por el modelo recaen en las zonas serranas de la península en su totalidad. Mientras que los resultados del modelo de máxima entropía por método FACP muestran una disminución de potencial alto sin embargo parece focalizarse en ciertas áreas como principales a lo largo de la península de Baja California.

Finalmente se realiza la comparación entre modelos de nicho reproductivo a nivel península de Baja California realizado en el presente estudio y el modelo de distribución potencial a nivel nacional elaborado en 2018 por D’Addario y colaboradores en 2018.

Las consideraciones de base para el estudio se centran a escala biogeográficas incluye todos los tipos climáticos en México, también utiliza como fuente de datos, literatura y bases de datos en línea de uso público tanto científico como recreativo. Entre las variables que fueron consideradas para ambos estudios se encuentran:

- Altitud

La altitud de anidación encontrada de los sitios de anidación se encontró distribuida sin patrones evidentes, particularmente se considera que tal y como lo indica Katzner *et al.*, (2020), y que coincide con el conocimiento local de anidación del águila real, donde se observan sitios de anidación desde niveles cercanos a nivel medio del mar. Adicionalmente, las observaciones registradas en términos de la altitud se encuentran fuertemente influenciadas por la altitud de las secciones seleccionadas para el censo entre 600 y 1100 msnm.

- Pendiente

La pendiente observada sin embargo es muy característica entre los 18° y los 63°. Con una media de 36° de pendiente, este efecto coincide con las características de sitios de anidación ilustrados por Dunk, *et al* (2019), cuyos resultados muestran un intervalo de pendiente de anidación de entre 14° y 71.7° con una media de 49.8°. Cabe mencionar dichas pendientes preferidas coinciden con dos aspectos fundamentales de las preferencias de anidación al considerar por un lado la afinidad de la reproducción de la especie con sitios elevados y zonas montañosas, tanto con la lejanía de zonas de establecimientos urbanos que oscilan entre 0° y 10° considerando que el desarrollo en pendientes superior a 10° y hasta 20° se considera riesgoso y requiere de consideraciones especiales según consideración emitidas por el gobierno australiano (City of Wodonga,, 2019)

- Orientación

La particular influencia de la orientación del sitio de anidación se genera a partir del efecto que genera la luz solar en la temperatura registrada en el sitio de anidación. Aquellos sitios expuestos según la descripción proporcionada por Kochert, *et al.*, (2019) indica que dichos nidos expuestos muestran una

productividad reducida, por lo que la tendencia principal de selección será por optar sitios que tengan protección a la luz solar, otorgada principalmente en acantilados rocosos por la orientación. Los sitios analizados para el presente estudio muestran una coincidencia con este fenómeno dado que la media de los sitios presenta una orientación sur a noroeste.

- Cuerpos de agua

A pesar de no existir una relación directa entre la presencia de cuerpos de agua y poblaciones de águila real, debido a que esta especie consume la mayoría de sus líquidos vitales directamente de las presas que consume, se han encontrado vínculos entre la disponibilidad de agua con la disponibilidad de presas y en consecuencia con el éxito reproductivo y la ocupación del territorio. Tal y como indica Newton en 2017, los dos factores que influyen mayormente en la reproducción de las aves rapaces es: 1) La existencia de sitios aptos para la reproducción y 2) la disponibilidad de presas. Bajo ese principio, y ante la escasa y vital disponibilidad de agua, la presencia interpolada de cuerpos de agua en la península de Baja California y los efectos de las sequías que han azotado la región históricamente como una variable vital para el desarrollo reproductivo de la especie.

- Cobertura vegetal

Para el caso de la cobertura vegetal, se consideró tal y como ha sido expresado por Dunk *et al.*, 2019 y Katzner *et al.*, 2020, representa un punto crítico en la distribución del águila real. Contra intuitivamente por el efecto físico de la estructura y no como reflejo de la disponibilidad de agua mencionada en el punto anterior. Ya que, si bien la disponibilidad de agua puede tener un efecto notable en la abundancia de vegetación y por consecuencia en el número de presas, el águila real muestra un afinidad marcada por vegetación de estructura baja y abierta como matorrales, evitando por otra parte los núcleos de bosques densos de pino como es el caso del Parque Nacional Sierra de San Pedro Mártir. Favoreciendo como ha sido evidente en el presente estudio, zonas de matorral desértico y matorral mediterráneo.

Por ello se considera natural que en la comparación entre distintos análisis de Máxima Entropía descritos a continuación se hubiesen considerado dichas variables en los estudios de D'Addario 2019 y el presente estudio, sin embargo, también se observó diferencias importantes en el análisis realizado en dicha comparativa:

- Para Toscano, *et al.*, 2023: Densidad de población humana, vías pavimentadas.
- Para D'Addario: Integridad ecológica, Presas potenciales, Curvatura, Topoforma, Bio\_16 y Bio\_18

Llama la atención que existe una disparidad notable en relación de las áreas de mayor probabilidad, aun considerando la diferencia de enfoques de nicho ecológico a nicho reproductivo (Figura 20). Una posible explicación a estas diferencias de probabilidad observada recae en la(s) dimensión(es) de las variables utilizadas, que en el caso del estudio conducido por D'Addario *et al.*, se consideró un enfoque topográfico, biogeográfico y con observaciones asociadas a presencia humana como observaciones en campo y vías de acceso. Por otra parte, mientras que en el modelo desarrollado en el presente estudio el potencial de anidación obedece exclusivamente a sitios de anidación, esto genera en cierto sentido una especialización de modelo y lo centra en características físicas del terreno y no de la ecología cotidiana de la especie. Sin embargo, estas

diferencias no definen en su totalidad las diferencias encontradas, dado que un modelo de nicho reproductivo debería de encontrarse anidado en un modelo de distribución potencial. Aunque particularmente en el tercio norte de la península existen coincidencias importantes que sugieren una respuesta a condiciones muy favorables bajo los parámetros compartidos entre comparativos, en el centro y sur de la península la interpretación de alta probabilidad resulta inversa al comparar ambas predicciones. Otro factor importante asociado a la escala del análisis es que regiones biogeográficas pueden derivar en adaptaciones particulares. Es decir, que la misma especie en regiones distintas puede mostrar hábitos distintos y usar su territorio de una manera diferente, mientras que en Baja California no se conocen águilas reales que aniden en copas de árboles, existen regiones en toda su distribución donde las águilas si tienen dicha práctica (Katzner, *et al.*, 2020).

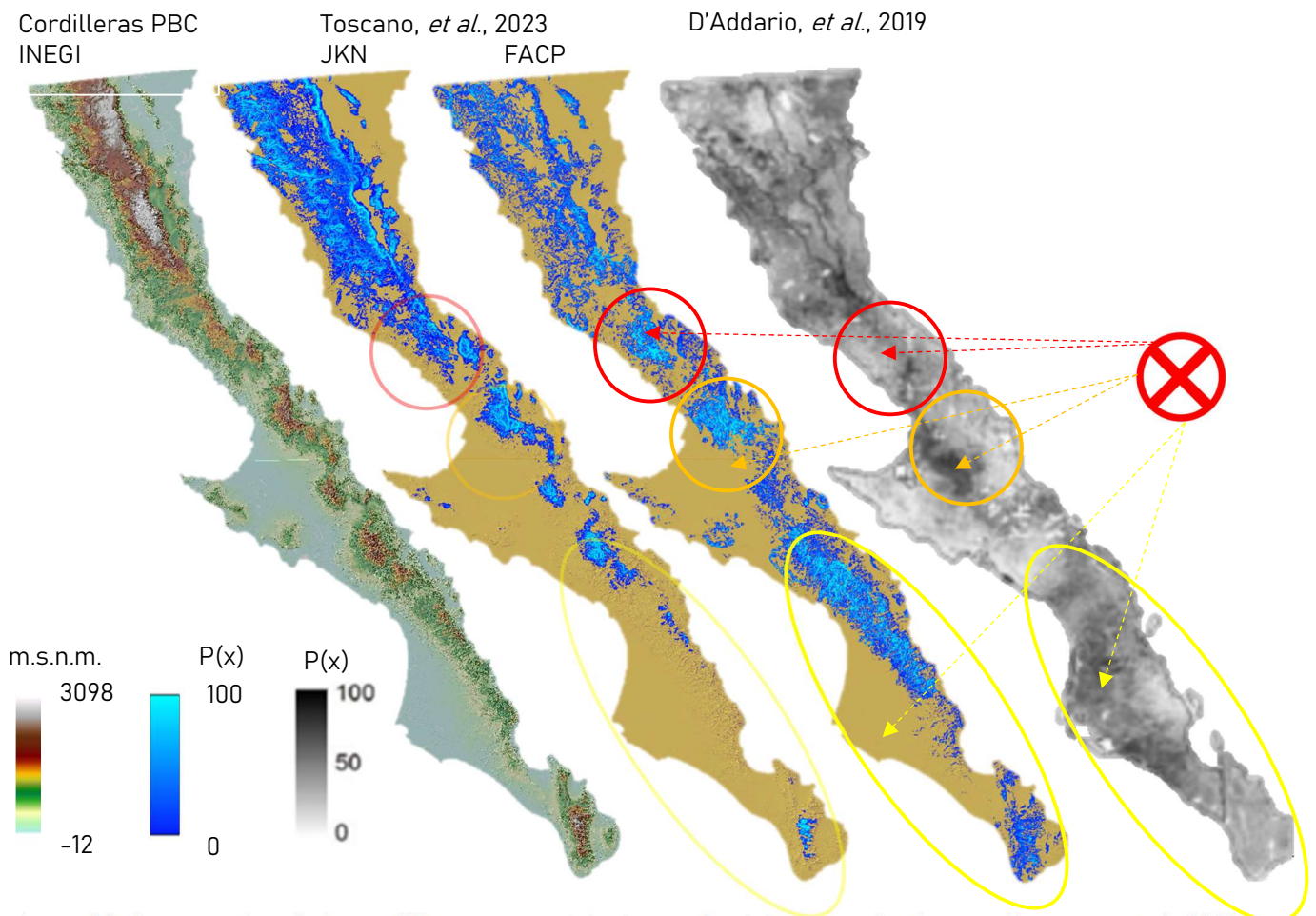


Figura 20, Comparativo de la cordillera con modelaciones de nicho reproductivo por Toscano *et al.*, 2023 y D'Addario *et al.*, 2019 distribución potencial. Se señalan regiones con discrepancias de potencial.

## **Limitaciones del estudio**

La principal limitación que afectó al presente estudio fue de tipo presupuestaria. Esta limitación se traduce en tiempo de vuelo efectivo. Sin embargo, aun considerando el alto costo de cada hora de vuelo, se considera que la capacidad de registrar datos y observaciones en una amplia extensión resulta en un monitoreo con una efectividad de costo mucho más alta que al realizar monitoreos terrestres.

La siguiente limitación significativa para el presente estudio fue la temporada en la que se realizó. Realizar estudios en temporada reproductiva tienen diferentes tipos de resultado según la temporada y la metodología aplicada. El objetivo principal de este estudio era identificar sitios de anidación activos de águila real, por ello tenía como fecha objetivo la segunda semana de mayo, sin embargo, la emergencia sanitaria COVID-19 descompuso los planes originales. La fecha objetivo tuvo que ser reprogramada de mayo 2020 a marzo 2021. La razón por la que no se pudo realizar en mayo 2021 fue meramente administrativa ya que los recursos otorgados no fue posible ejercerlos después de marzo 2020.

En consecuencia, del párrafo anterior, los resultados obtenidos deben ser tomados con precaución debido a que en una primera instancia no existe una certeza absoluta de que la mayoría de los nidos observados estén efectivamente siendo ocupados por águilas reales, más allá de que las características de los sitios cumplan con los atributos de un nido de esta especie. Además de confirmar que el sitio fuese construido en efecto por un águila real, son pocos los datos correspondientes a la especie, ya que, aunque el nido fuese construido por un águila real, no es raro observar a otras especies haciendo uso de estos.

## Conclusiones y recomendaciones de manejo

- Se sugiere que los sitios registrados con GPS correspondientes sean revisados durante la mitad del mes de mayo. Esto permitirá corroborar que los sitios de anidación sean efectivamente utilizados por águilas reales.
  - Dadas las reducidas horas de vuelo y el desconocimiento previo de la zona a monitorear con el enfoque de águila real, se observa que con los resultados obtenidos a pesar de las limitantes, se encuentra pertinente sugerir que se destinen horas de vuelo suficientes (7 a 12 horas por sección) para monitorear algunas regiones de la península de Baja California (Sierra de Matomí, Sierra La Libertad, Sierra de La Giganta, Sierra Juárez, Sierra de San Francisco, Sierra de San Pedro Mártir y zonas costeras selectas de la costa del pacífico).
  - Se sugiere replicar el protocolo implementado en el presente estudio (Toscano, 2020) para asegurar que se logren tomar todas las medidas necesarias para un vuelo seguro y productivo. Para la utilización del protocolo y análisis fuera de la región de la península de Baja California se recomienda ampliamente revisar los insumos del plan de vuelo, del análisis y del modelo.
  - Realizar un consenso entre actores involucrados con conocimiento técnico para desarrollar una metodología que permita integrar modelaciones certeras y funcionales en todo el territorio nacional. Como estrategia de conservación, estandarizar los mecanismos informáticos que permitan dirigir acciones de conservación certeras puede impactar positivamente en el aprovechamiento de los recursos financieros disponibles.
- . Así mismo se sugiere ampliar el esfuerzo para poder incluir mejores recursos para el análisis ambiental de las regiones identificadas y modeladas en relación con la calidad ambiental y conflictos socio-ecológicos. Los resultados presentados en este estudio deben ser interpretados únicamente como inventario de línea base para futuras exploraciones apoyadas por la proyección modelada de potencial de sitios de anidación.

## Referencias

- Bittner, J. D., Oakley, J., Meador, C., Hannan, J., Rivard, R., Newland, J., Quint, K., Collado, M. (2012) Population status of Golden Eagle in southern California and western Nevada. En: Hunt, G., Thelander, C., Bloom, P., & Woodbridge, B. (2012). California-Nevada Golden Eagle Working Group Symposium McClellan , CA – December 11 , 2012 Program Agenda : Moderator Jeff Smith. 5–11.
- Booms T, Schempf S, McCaffrey B, Lindberg M, Fuller, M. (2010) Detection probability of cliff-nesting raptors during helicopter and fixed-wing aircraft surveys in western Alaska. *Journal of Raptor Research* 44(3):175-187
- Boone, J. D., Tomlinson C. (2012) Statewide distribution of Golden Eagle nests in Nevada. En: Hunt, G., Thelander, C., Bloom, P., & Woodbridge, B. (2012). California-Nevada Golden Eagle Working Group Symposium McClellan , CA – December 11 , 2012 Program Agenda : Moderator Jeff Smith. 5–11.
- Brendel U, Eberhardt R, Wiesmann K, (2002) Conservation of the golden eagle (*Aquila chrysaetos*) in the European alps – a combination of education, cooperation, and modern techniques. *Journal of Raptor Research*, 36(1 Supplement):20 – 24.
- Brodeur, S., *et al.*, (1996) Complete migration cycle of golden eagles breeding in northern Quebec. *The Condor* 98:293-299.
- Campos-Rodríguez, JI, Flores-Leyva, X, Victores-Aguirre, M y Lozano-Román, LF. 2022. Nuevo territorio de anidación de águila real para Jalisco, México. *Huitzil Revista Mexicana de Ornitología* 23(2):e-645. DOI: <https://doi.org/10.28947/hrmo.2022.23.2.665>
- City of Wodonga (2019) Design guidelines for building on sloping land. Government of Australia. [Sloping Land Guideline\\_Final\\_06122019.pdf](#) (wodonga.vic.gov.au)
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (2000) Programa de Manejo del Reserva de la Biosfera El Vizcaíno. Diario Oficial de la Federación. Microsoft Word - SMAR121521.doc (conanp.gob.mx)
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (2013) Programa de Manejo del Área de Protección de Flora y Fauna Valle de los Cirios. Diario Oficial de la Federación. Microsoft Word - SMAR121521.doc (conanp.gob.mx)
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (2014) Programa de Manejo del Parque Nacional Sierra de San Pedro Mártir. Diario Oficial de la Federación. Microsoft Word - SMAR121521.doc (conanp.gob.mx)
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (s.f.) Fichas Áreas Naturales Protegidas. Sistema de Información Monitoreo y Evaluación para la Comunicación. Consulta Fichas ANP S I M E C | Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas | Gobierno | gob.mx (conanp.gob.mx)
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. (2015). Programa de Acción para la Conservación de la Especie (PACE): Águila Real (*Aquila chrysaetos*). Segunda edición. SEMARNAT - CONANP. México. 100 pp.
- Cruz-Cárdenas (2013) Selección de predictores ambientales para el modelado de la distribución de especies en MaxEnt. *Ciencias Forestales y del Ambiente*. DOI: <http://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2013.09.034>
- D-Addario M., *et al.*, (2019) Potential distribution of *Aquila chrysaetos* in Mexico: Implications for conservation. *Avian Biology Research*, 1-9. De León-Girón-Girón, G. (2017). Abundancia, ecología reproductiva, dieta, uso de hábitat y amenazas del águila real *Aquila chrysaetos canadensis* en Baja California, México. Propuestas para su conservación. Tesis Doctorado. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. La Paz, Baja California Sur.
- De León-Girón (2016) Abundancia, ecología reproductiva, dieta, uso de hábitat y amenazas del águila real (*Aquila chrysaetos canadensis*) en Baja California, México. Propuestas para su conservación. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. La Paz.
- Donahoo D., (1965) El control de animales depredadores en la zona fronteriza meridional de Estados Unidos. *Boletín de la oficina sanitaria panamericana* 199-203.

- Donázar J, Cortés-Avizanda A, Fargallo J, Margalida A, Moleón M, Morales-Reyes Z, Moreno-Opo R, Pérez-García J, Sánchez-Zapata J, Zuberohoitia I, Serrano D, (2016) Roles of Raptors in a Changing World: From Flagships to Providers of Key Ecosystem Services. *Ardeloa*, (2016) 181-234, 62(1). <https://doi.org/10.13157/arla.63.1.2016.rp8>
- Driscoll, D.E. 2010. Protocol for golden eagle occupancy, reproduction, and prey population assessment. American Eagle Research Institute, Apache Jct., AZ. 55pp.
- Dunk JR, Woodbridge B, Lickfett TM, Bedrosian G, Noon BR, LaPlante DW, et al. (2019) Modeling spatial variation in density of golden eagle nest sites in the western United States. *PLoS ONE* 14(9): e0223143. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0223143>
- Elith J, Phillips S, Hastie T, Dudik M, En Chee Y, Yates C, (2011) A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions* (2011) 17, 43-57.
- Erickson, W., Nielson, R. M., (2012) Monitoring abundance of Golden Eagles in the western United States. En: Hunt, G., Thelander, C., Bloom, P., & Woodbridge, B. (2012). California-Nevada Golden Eagle Working Group Symposium McClellan, CA - December 11, 2012 Program Agenda : Moderator Jeff Smith. 5-11.
- Ezcurra, E., E. Peters, A. Búrquez y E. Mellink. (2002) Los Desiertos de Sonora y Baja California (The Sonoran and Baja California Deserts). Pp. 315-332 en R. A. Mittermeier, P. Robles-Gil, K. Pilgrim, G. Fonseca, T. Brooks y W.R. Konstant (eds.) *Áreas silvestres: Las últimas regiones vírgenes del planeta (Wilderness: Earth's Las Wild Placs)*. Conservation International y Agrupación Sierra MadrFish, U. S. (2020). A Clarification on the Effects of Urbanization on Golden Eagle (*Aquila chrysaetos*) Habitat Selection.
- Flesch A., *et al.*, (2019) Distribution and habitat of the Golden Eagle (*Aquila chrysaetos*) in Sonora, México, 1892-2019
- Gholamy, Afshin; Kreinovich, Vladik; and Kosheleva, Olga, "Why 70/30 or 80/20 Relation Between Training and Testing Sets: A Pedagogical Explanation" (2018). Departmental Technical Reports (CS). 1209. [https://scholarworks.utep.edu/cs\\_techrep/1209](https://scholarworks.utep.edu/cs_techrep/1209)
- GOBC (2014) Programa de Ordenamiento Ecológico del Estado de Baja California. Gobierno del Estado. Mexicali, B. C.
- GOBC (2016) Baja California respecto al nacional Proyecciones 2017-2030. Apuntes de Población de Baja California. Gobierno del Estado. Mexicali, B. C.
- Griffiths, Anthony J.F.. "mutation". *Encyclopedia Britannica*, 25 May. 2023, <https://www.britannica.com/science/mutation-genetics>. Accessed 13 June 2023.
- INEGI (2005) Marco geoestadístico Nacional 2005. [bcreL\\_col\\_n.pdf](http://inegi.org.mx/bcreL_col_n.pdf) (inegi.org.mx)
- Karger, D.N., Conrad, O., Böhner, J., Kawohl, T., Kreft, H., Soria-Auza, R.W., Zimmermann, N.E., Linder, P., Kessler, M. (2017). Climatologies at high resolution for the Earth land surface areas. *Scientific Data*. 4 170122. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.122>
- Katzner, T. E., M. N. Kochert, K. Steenhof, C. L. McIntyre, E. H. Craig, and T. A. Miller (2020). Golden Eagle (*Aquila chrysaetos*), version 2.0. In *Birds of the World* (P. G. Rodewald and B. K. Keeney, Editors). Cornell Lab of Ornithology, Ithaca, NY, USA. <https://doi.org/10.2173/bow.goleag.02>
- Kochert M., Steenhof K., Brown., (2019) Effects of nest exposure and spring temperatures on golden eagle brood survival: an opportunity for mitigation. *Journal of Raptor Research*. 53(1):91-97.
- Kochert, M. N. (1986). Raptors. In *Inventory and Monitoring of Wildlife Habitat* (A. L. Cooperrider, R. J. Boyd, and H. R. Stuart, Editors). U.S. Department of the Interior, Bureau of Land Management, Denver, CO, USA. pp. 313-349.
- Kochert, M. N., K. Steenhof, C. L. McIntyre, and E. H. Craig (2020). Golden Eagle (*Aquila chrysaetos*), version 1.0. In *Birds of the World* (S. M. Billerman, Editor). Cornell Lab of Ornithology, Ithaca, NY, USA. <https://doi.org/10.2173/bow.goleag.01>
- Latta, B., Thelander, C. G., Bloom, P. H. (2012) Results of 2012 Golden Eagle nesting surveys of the BLM's California desert and northern California districts. En: Hunt, G., Thelander, C., Bloom, P., & Woodbridge, B. (2012).

- Luján L., *et al.*, (2019) El Arte plumerio: de la época prehispánica a la actualidad. *Arqueología Mexicana* Vol XXVII, Num 159.
- Macías J, Jiménez E, (2013) Estudio de estratigrafía y geología del complejo volcánico Tres Vírgenes, B.C.S. *Geotermia*, Vol. 26, No. 1, Enero-Junio de 2013.
- Maynard (2022) Key habitats and breeding zones of threatened golden eagles in eastern North America identified by multi-level habitat selection study. Researchsquare. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1935603/v1>
- Maynard L., (2022) Key habitats and breeding zones of threatened golden eagles in Eastern North America identified by multi-level habitat selection study. Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1935603/v1>
- McCarty, K.M., K.L. Licence, and K.V. Jacobson. 2014. Arizona golden eagle nest survey 2014 summary report. Nongame and Endangered Wildlife Program Technical Report 286. Arizona Game and Fish Department, Phoenix, Arizona.
- McGahan J, (1968). Ecology of the Golden Eagle. *AUK* 1–12.
- Miller, T. A., R. P. Brooks, M. J. Lanzone, J. Cooper, K. O'Malley, D. Brandes, A. Duerr, and T. E. Katzner (2017). Space use and home range characteristics of Golden Eagles (*Aquila chrysaetos*) in eastern North America during breeding season and winter. *Condor* 119: 697–719.
- Morneau, F., Gagnon, B., Poliquin, S., Lamothe, P., D'Astous, N., & Tremblay, J. A. (2012). Breeding Status and Population Trends of Golden Eagles in Northeastern Québec, Canada. *Avian Conservation and Ecology*, 7(2), art4. <https://doi.org/10.5751/ACE-00547-070204>
- Moya, W, Jacome, G, Yoo, C. Past, current, and future trends of red spiny lobster based on PCA with MaxEnt model in Galapagos Islands, Ecuador. *Ecol Evol*. 2017; 7: 4881–4890. <https://doi.org/10.1002/ece3.3054>
- Newton I, (2017) Invited commentary: Fifty years of raptors research. *The Journal of Raptors Research*. Vol. 51(2):95–106.
- Nielson, R. M., Rintz, DiDonato G. T., & McDonald, L. L. (2017). A Survey of Golden Eagles (*Aquila chrysaetos*) in the Western U.S. Mid-winter 2017, 1–31.
- Niz J (2022) La clave de las palabras clave. Editorial
- Oyervides J., (2021) Ensamble y anotación del genoma mitocondrial del Águila real (*Aquila chrysaetos*), del noroeste de Baja California, México. Universidad Autónoma de Baja California. Ensenada, Baja California.
- Page, J.E., Whittington, and G.T. Allen (2010) Interim Golden Eagle inventory and monitoring protocols; and other recommendations. Division of Migratory Bird Management, U.S. Fish and Wildlife Service.
- Poole, K. G., and R. G. Bromley (1988a). Interrelationships within a raptor guild in the central Canadian Arctic. *Canadian Journal of Zoology* 66: 2275–2282.
- QGIS (s.f.) Point Sampling Tool — QGIS Python Plugins repository. <https://plugins.qgis.org/plugins/pointsamplingtool/>
- Riemann, H., Santes-Álvarez, R. V., & Pombo, A. (2011). The role of natural protected areas in local development: The case of the peninsula of baja California. *Gestion y Política Publica*, 20(1), 141–172.
- Rodríguez-Estrella, R. (1991). El águila real (*Aquila chrysaetos*). Pp. 247–263. En A. Ortega, L. Arriaga (eds.). *la reserva de la Biosfera El Vizcaíno en la Península de Baja California*. Centro de Investigaciones Biológicas de Baja California Sur A.C. La Paz, Baja California Sur, México.
- Rodríguez-Estrella, R., A. Lafón, G. de León, J. Nocedal, L. Chapa, L. Scott, F. Eccardi, J. Ojeda y A. Lozano. 2020. Informe del Programa de Monitoreo del Águila Real en México. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad & CIBNOR. México 152.pp.

- Smith D., *et al.*, (1982) Spatial relationships of nesting golden eagles in central Utah. *Raptor Research* 16(4):127-132
- Steenhof K, Kochert M, McIntyre C, Brown J, (2017) Coming to terms about describing golden eagle reproduction. *Journal of Raptor Research*, 51(3):378-390. <https://doi.org/10.3356/JRR-16-46.1>
- Toscano, D. (2020) Protocolo de monitoreo aéreo del Águila Real en la península de Baja California. Universidad Autónoma de Baja California.
- Tracey J.A., Madden, M.C., Bloom, P.H., Katzner, T.E., and Fisher, R.N., (2018) Golden eagle (*Aquila chrysaetos*) habitat selection as a function of land use and terrain, San Diego County, California: U.S. Geological Survey OpenFile Report 2018-1067, 13 p., <https://doi.org/10.3133/ofr2018106>