



CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS  
DEL NOROESTE, S.C.

---

---

Programa de Estudios de Posgrado

COMPARACIÓN DEL NICHOS TRÓFICO Y BIOACUMULACIÓN  
DE METALES PESADOS EN DOS COLONIAS DE CRÍA DE *Sula  
nebouxii* Y *Sula leucogaster* EN EL GOLFO DE CALIFORNIA.

T E S I S

Que para obtener el grado de

**Maestra en Ciencias**

Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales  
(Orientación en Biología Marina)

P r e s e n t a

**Valeria Huerta Hernández**

La Paz, Baja California Sur, julio de 2022.

## ACTA DE LIBERACIÓN DE TESIS

En la Ciudad de La Paz, B. C. S., siendo las 11:40 horas del día 17 del Mes de Junio del 2022, se procedió por los abajo firmantes, miembros de la Comisión Revisora de Tesis avalada por la Dirección de Estudios de Posgrado y Formación de Recursos Humanos del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C., a liberar la Tesis de Grado titulada:

**"COMPARACIÓN DEL NICHOS TRÓFICO Y BIOACUMULACIÓN DE METALES PESADOS EN DOS COLONIAS DE CRÍA DE *SULA NEBOUXII* Y *SULA LEUCOGASTER* EN EL GOLFO DE CALIFORNIA "**

Presentada por el alumno:

**Valeria Huerta Hernández**

Aspirante al Grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN EL USO, MANEJO Y PRESERVACIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES CON ORIENTACIÓN EN **Biología Marina**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron su **APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

### LA COMISIÓN REVISORA



Dra. María del Carmen Blazquez Moreno  
Director /Co-Director de Tesis




Dra. Lía Celina Méndez Rodríguez



Dr. Alfredo Ortega Rubio  
Co-Director/Co-Tutor



Dr. Salvador Hernández Vázquez  
Co-Tutor



Dra. Gracia Alicia Gómez Anduro,  
Directora de Estudios de Posgrado y Formación de Recursos Humanos.

La Paz, Baja California Sur, a 23 de junio de 2022.

Los miembros del comité de tesis del (la) estudiante Valeria Huerta Hernández del Programa de Maestría en Ciencias en el Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales, revisamos el contenido de la tesis y otorgamos el Vo.Bo. dado que la tesis no representa un plagio de otro documento como lo muestra el reporte de similitud realizado:

- Herramienta antiplagio:  
Ithenticate
- Filtros utilizados:  
Excluir citas  
Excluir bibliografía
- Porcentajes de similitud:  
Máximo 20% para tesis Posgrado  
Se muestra captura de pantalla

	Citas excluidas Bibliografía excluida	12% SIMILAR
<b>Resumen de Coincidencias</b>		
1	Internet 147 palabras Copiado el 15-Oct-2020 <a href="http://www.datazone.birdlife.org">www.datazone.birdlife.org</a>	1%
2	Internet 75 palabras Copiado el 28-Sep-2016 <a href="http://www.scribd.com">www.scribd.com</a>	<1%
3	Internet 64 palabras Copiado el 14-Sep-2021 <a href="http://scme.mx">scme.mx</a>	<1%
4	Internet 56 palabras Copiado el 24-Ago-2013 <a href="http://www.cienciasmarinas.com.mx">www.cienciasmarinas.com.mx</a>	<1%
5	Internet 47 palabras Copiado el 15-Feb-2022 <a href="http://repositorio.udec.cl">repositorio.udec.cl</a>	<1%
6	Internet 44 palabras Copiado el 04-Sep-2020 <a href="http://naturalis.fcnym.unlp.edu.ar">naturalis.fcnym.unlp.edu.ar</a>	<1%

### Firmas del comité Firmas del comité



Dra. María del Carmen Blázquez Moreno  
Co-Directora de Tesis



Dr. Alfredo Ortega Rubio  
Co-Director de Tesis



Dra. Lía Celina Méndez Rodríguez  
Co-Tutora de Tesis



Dr. Salvador Hernández Vázquez  
Co-Tutor de Tesis

## **Conformación de Comités**

### **Comité Tutorial**

Dra. María del Carmen Blázquez Moreno  
Centro de investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.  
Co-Directora de Tesis

Dr. Alfredo Ortega Rubio  
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.  
Co-Director de Tesis

Dr. Salvador Hernández Vázquez  
Centro Universitario de la Costa Sur, Universidad de Guadalajara.  
Co-Tutor de Tesis

Dra. Lía Celina Méndez Rodríguez  
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C.  
Co-Tutora de Tesis

### **Comité Revisor de Tesis**

Dra. María del Carmen Blázquez Moreno  
Dr. Alfredo Ortega Rubio  
Dr. Salvador Hernández Vázquez  
Dra. Lía Celina Méndez Rodríguez

### **Jurado de Examen**

Dr. Alfredo Ortega Rubio  
Dr. Salvador Hernández Vázquez  
Dra. Lía Celina Méndez Rodríguez

### **Suplente**

Dra. María del Carmen Blázquez Moreno

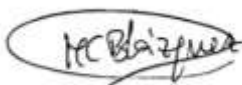
## Resumen

Las aves marinas desempeñan un papel importante en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas marinos. Debido a su abundancia, posición tope en la cadena trófica y respuestas rápidas a la disponibilidad de presas, se han utilizado como indicadores de cambios en las redes tróficas del océano y detectores de problemas de conservación como la presencia de contaminantes. En la actualidad, muchas poblaciones de aves marinas y especialmente las tropicales, están en declive. El Bobo Patas Azules (*Sula nebouxii*) y el Bobo Café (*Sula leucogaster*) se encuentran en esta problemática. En este trabajo se abordó un estudio de su dieta y de la competencia interespecifica en el nicho trófico de estas dos aves anidando juntas en dos islas cercanas del Golfo de California. Para ello se analizó la composición isotópica de sus plumas ( $\delta^{13}\text{C}$  y  $\delta^{15}\text{N}$ ). También se compararon sus niveles de contaminación analizando el contenido de cobre (Cu), Cadmio (Cd), plomo (Pb) y zinc (Zn) en plumas de adultos de ambas especies. Encontramos que las dos especies tienen nichos tróficos y dietas bastante similares en las dos islas. Pero se observó cierta divergencia de nicho por competencia trófica entre ellas que fue mayor entre las poblaciones de isla Tortuga que entre las de isla San Ildefonso. Las poblaciones tuvieron un nicho trófico un poco más amplio en San Ildefonso que en Tortuga, lo que implica mayor variación individual en las dietas de esta isla. La coincidencia en la dieta entre islas fue mayor en *S. leucogaster* que en *S. nebouxii*. Las plumas de *S. nebouxii* tuvieron mayores niveles de  $^{15}\text{N}$ , quizás porque consumió más arenques (*Opisthonema libertate*) y anchovetas (*Anchoa sp*), mientras que *S. leucogaster* prefirió más sardinias (*Sardinops sp*). Las poblaciones de San Ildefonso parecen forrajear en aguas menos pelágicas que las de Tortuga ya que tienen valores menos negativos de  $^{13}\text{C}$ . Las dos especies se alimentaron fundamentalmente de Cupleidae y Engraulidae, pero en menor medida de lo reportado en estudios anteriores. Este cambio en la dieta podría reflejar un cambio en las abundancias de presas disponibles, quizás como consecuencia del calentamiento global, pero es necesario un estudio a más largo plazo para confirmarlo. Todas las poblaciones tuvieron valores detectables de Cu, Cd y Zn, pero no de Pb. Los niveles de metales pesados no fueron diferentes entre especies o islas. El Zn es el que presentó mayores valores, pero en rangos dentro de lo reportado en otros estudios. Los valores de Cd parecen un poco elevados, puede ser por bioacumulación ambiental debido al historial minero de la zona, o a causas naturales. En conclusión, se confirma el importante papel de bioindicadores de cambios en el océano de estas aves marinas. Se detectó competencia interespecifica más marcada en una isla que en otra y un cambio de dieta respecto a estudios previos. Se recomienda un seguimiento poblacional continuado de estas poblaciones de bobos tan aisladas, y de sus presas para evaluar posibles cambios en su demografía a largo plazo en un escenario de calentamiento global.

**Palabras clave:** Competencia interespecifica, Isótopos estables, Nicho trófico, Metales pesados, Aves Marinas como bioindicadores, *Sula nebouxii*, *Sula leucogaster*.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8221-5843>

Vo. Bo. Co-Directores de Tesis



Dra. María del Carmen Blázquez Moreno



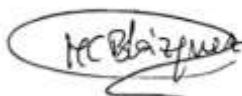
Dr. Alfredo Ortega Rubio

## Summary

Seabirds play an important role in the structure and functioning of the marine ecosystems. Because of their abundance, top position in the food webs and rapid responses to prey availability, they have been used as bioindicators of changes in ocean food webs or the presence of pollutants. Currently, many seabird populations around the world, and specially tropical seabirds, as The Blue-footed Booby (*Sula nebouxii*) and the Brown Booby (*Sula leucogaster*) are in decline. We studied the diet and compared the trophic niche of these two species in two close islands of Gulf of California, as a measure of their interspecific competition. For that, we analyzed the stable isotope ratios of  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  composition of feathers from adults birds nesting together in the same islands. We also determined the concentrations of copper (Cu), cadmium (Cd), lead (Pb) and zinc (Zn) in the feathers of adult birds of both species. We found high similarity between the trophic niche and diet of both species in both islands. We also found that the niche differentiation by interspecific competition was higher between the Tortuga island's populations. The trophic niche was wider in both San Ildefonso island's populations, showing higher individual variation in their diets than in Tortuga's. *S.leucogaster* diets's composition were more similar between islands than *S.nebouxii*'s diets. *S. nebouxii*'s feathers had higher values of  $^{15}\text{N}$  maybe because they preyed more on herrings (*Ophistonema libertate*) and anchovies (*Anchoa sp*), while *S.leucogaster* consumed more Sardines (*Sardinops*). We found  $^{13}\text{C}$  values less negative in San Ildefonso birds, suggesting they forage nearer of the coast that Tortugas's Boobies. The diet of both species was composed mainly by Cupleidae y Engraulidae, but their percentages were lower than in previous studies. The detected change in the diet could be as a consequence of the global warming affecting the fishes abundance on the Gulf of California, but longer studies are necessary. We found detectable values of Cu, Cd and Zn, in the feathers of the four populations, but not Pb. Those levels were not significantly different among species or islands. The highest values were Zn, but its levels are in the range of other studies. Cadmium levels were higher than other studies. It might be because bioaccumulation or they might exist naturally in the sediments. In conclusion, we confirmed the importance of Boobies as bioindicators of changes in the marine conditions. We detected different grade of interspecific competition in each island. We detected some changes in the diet of both species from previous studies. We recommend a continuous populational study of these isolated Boobies populations and periodical evaluations of their prey availability. Those measures are necessary in order to monitor long term changes in their demography in a global warming scenery.

**Keywords:** Interspecific competition, Stable isotopes, Trophic niche, Heavy metals, Seabirds, seabirds as bioindicators, *Sula nebouxii*, *Sula leucogaster*.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8221-5843>



Dra. María del Carmen Blázquez Moreno

Vo. Bo. Co-Directores de Tesis



Dr. Alfredo Ortega Rubio

## Dedicatoria

A mi Mamá Luz María Hernández Fabela

A mi Papá José Luis Huerta Gómez

A mi Hermano y Hermanas

A mis Amigos

## **Agradecimientos**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la beca No. 905891 otorgada para estudios de Posgrado.

Al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. (CIBNOR) por ofrecerme una matrícula en el Programa de Maestría en Ciencias en el Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales, el espacio y las facilidades para el desarrollo de mi investigación.

A la Dirección de Estudios de Posgrado y Formación de Recursos Humanos del CIBNOR por el apoyo en todos los trámites requeridos durante mi estancia en la Institución.

A mi Comité Tutorial:

Dra. María del Carmen Blázquez Moreno por todo lo aprendido en esta investigación, por apoyarme desde un principio con mi idea de trabajar con aves marinas, específicamente con los bobos. Por su paciencia, consejos y por motivarme e inspirarme a mejorar.

Dr. Alfredo Ortega Rubio por todas sus atenciones en todo lo necesario para realizar esta investigación. Por su disposición, comentarios para mejorar y por su entusiasmo siempre.

Dra. Lía Celina Méndez por estar siempre atenta a mis dudas, por sus comentarios y aportes a lo largo del desarrollo de esta investigación.

Dr. Salvador Hernández Vázquez por todo lo aprendido, por sus valiosos comentarios y aportaciones a esta investigación. Por el apoyo y disposición en todo momento. Sobre todo, por mostrarme más sobre el mundo de las aves.

Al laboratorio de Ecotoxicología y Calidad del Agua de Ambientes Terrestres y Marinos, del CIBNOR por el apoyo para la realización de los análisis de metales pesados.

A I.B.Q Francisca Griselda Peña e I.Q.B. Emerson Carlo Zúñiga Mayoral del Laboratorio de Espectrofotometría de Absorción Atómica del CIBNOR, por su apoyo y enseñanzas para realizar los análisis de metales pesados.

A la Dra. Tatiana Acosta Pachón y Dr. Víctor Manuel Muro por el apoyo en resolver mis dudas respecto a los isótopos estables.



Al Departamento de Estudios para el Desarrollo Sustentable de Zona Costera, Centro Universitario de la Costa Sur, de la Universidad de Guadalajara. En San Patricio-Melaque, Jalisco, por aceptarme para realizar mi estancia.

Al equipo de Aves de la UDG por incorporarme al trabajo de campo en Isla peña Blanca y aprender tanto de las aves marinas.

Al Dr. José Alfredo Castillo Guerrero por ayudarme en el muestreo y compartir sus conocimientos sobre el Bobo Pata Azules.

A Swanny y Rodrigo por el apoyo en el muestreo en las islas para esta investigación, por el viaje tan divertido y lleno de aprendizaje. Por las increíbles fotos que documentaron este proceso.

A mis Papás: por apoyarme incondicionalmente en cada etapa y sueños en mi vida. Por motivarme siempre a crecer personal y profesionalmente. Porque sé que tengo unos padres excepcionales y cada meta lograda es gracias a ustedes.

A mi familia Paceña: Maye, Lalo, Lalito, Mariana y Loli por apoyarme desde siempre, y motivarme para lograr esta meta. Por todos los viajes y aventuras juntos.

A mis queridos amigos: Tania, Carlos y Nuria que hicieron todo este proceso de Maestría muy feliz, por qué juntos nos dimos ánimo cuando lo necesitábamos, por todas las aventuras conociendo la Baja, las pajareadas, las risas, momentos vividos y los que faltan.

A mis hermanos: Karen, Lucero y José Luis por apoyarme incondicionalmente, por creer en mí y siempre darme ánimos.

A mis amigos que se encuentran en distintos lugares de México: por estar y motivarme siempre a la distancia.

## Contenido

<b>Resumen</b> .....	i
<b>Summary</b> .....	ii
<b>Dedicatoria</b> .....	iii
<b>Agradecimientos</b> .....	iv
<b>Contenido</b> .....	vi
<b>Lista de figuras</b> .....	viii
<b>Lista de tablas</b> .....	ix
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>2. ANTECEDENTES</b> .....	5
2.1 Isótopos estables y Nicho trófico .....	5
2.2 Metales pesados.....	6
2.3 Metales pesados y afectaciones en aves marinas.....	12
2.3.1 Cobre (Cu) .....	12
2.3.2 Cadmio (Cu).....	12
2.3.3 Plomo (Pb).....	12
2.3.4 Zinc (Zn).....	13
<b>3. JUSTIFICACIÓN</b> .....	14
<b>4. HIPÓTESIS</b> .....	15
<b>5. OBJETIVOS</b> .....	16
5.1 Objetivo general .....	16
5.2 Objetivos particulares.....	16
<b>6. MATERIAL Y MÉTODOS</b> .....	17
6.1 Área de estudio.....	17
6.2 Especies de estudio .....	19
6.2.1 Bobo Patas Azules ( <i>Sula neboxii</i> ) .....	19
6.2.2 Bobo Café ( <i>Sula leucogaster</i> ) .....	21
6.3 Recolección de muestras y análisis .....	23
6.4 Análisis isotópico .....	23
6.4.1 Trabajo de Laboratorio .....	23
6.4.2 Análisis de datos .....	24
6.5 Análisis de metales pesados .....	28
6.5.1 Análisis estadístico .....	28
<b>7. RESULTADOS</b> .....	30
7.1. Aves muestreadas.....	30
7.2 Análisis de isótopos estables.....	30
7.2.1 Posición trófica y diferencias ente islas y especies.....	30
7.2.1.1 Gráficos de dispersión.....	30
7.3 Representación gráfica del nicho isotópico .....	31
7.4 Amplitud de nicho .....	32
7.4.1 Características métricas del nicho isotópico .....	32
7.5 Sobrelapamiento de nichos tróficos.....	35
7.6 Composición de la dieta .....	37
7.6.1 Estimación de la contribución de las presas a la dieta de <i>S. neboxii</i> y <i>S. leucogaster</i> .....	37

7.7 Contribución de las presas a la dieta de cada especie por isla .....	38
7.7.1 <i>Sula neboxii</i> en Isla San Ildefonso e isla Tortuga .....	38
7.7.2 <i>Sula leucogaster</i> en Isla San Ildefonso e isla Tortuga .....	42
7.8 Comparación de proporciones de las presas por grupo .....	45
7.8.1 <i>Selar crumenopthalmus</i> .....	45
7.8.2 Comparación de proporciones de las presas por grupo.....	45
<i>Engraulis mordax</i> (E) <i>Cetengraulis mysticetus</i> (F) .....	48
.....	48
7.9 Análisis de metales pesados .....	49
7.9.1 Concentración de Co, Cd, Pb y Zn en adultos de <i>S. neboxii</i> y <i>S. leucogaster</i> en isla San Ildefonso e Isla Tortuga.....	49
7.9.2 Concentración de metales pesados por especies e islas.....	50
<b>8. DISCUSIÓN</b> .....	52
8.1 Nicho trófico .....	52
8.1.1 Posición trófica y nicho isotópico y diferencias entre islas o especies.....	52
8.2 Diferencias entre sexos dentro de la misma especie .....	54
8.3 Amplitud de nicho .....	55
8.4 Composición de la dieta .....	56
8.5 Metales pesados.....	60
<b>9. CONCLUSIONES</b> .....	62
9.1. Recomendaciones.....	63
<b>10. LITERATURA CITADA</b> .....	65

## Lista de figuras

<b>Figura 1.</b> Localización geográfica de la Isla Tortuga y San Ildefonso en el Golfo de California. ....	18
<b>Figura 2.</b> Valores isotópicos de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ en <i>S. nebouxii</i> y <i>S. leucogaster</i> en isla San Ildefonso (SI) e isla Tortuga (TO). .....	31
<b>Figura 3.</b> Elipses estándar de isótopos estables de <i>S. nebouxii</i> y <i>S. leucogaster</i> en isla San Ildefonso (SI) e isla Tortuga (TO). .....	32
<b>Figura 4.</b> Valores isotópicos de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ de <i>S. nebouxii</i> y <i>S. leucogaster</i> y sus presas potenciales en Isla San Ildefonso (SI) e isla Tortuga (TO). .....	37
<b>Figura 5.</b> Gráfico de densidad de las presas en la dieta de <i>S. nebouxii</i> en San Ildefonso. ....	39
<b>Figura 6.</b> Gráfico de matrices para <i>S. nebouxii</i> en San Ildefonso. ....	39
<b>Figura 7.</b> Gráfico de densidad de las presas en la dieta de <i>S. nebouxii</i> en Tortuga. ....	40
<b>Figura 8.</b> Gráfico de matrices para <i>S. nebouxii</i> en Tortuga. ....	40
<b>Figura 9.</b> Contribución de las presas en la dieta de <i>S. nebouxii</i> y <i>S. leucogaster</i> en isla San Ildefonso. ....	41
<b>Figura 10.</b> Gráfico de densidad para <i>S. leucogaster</i> en San Ildefonso. ....	42
<b>Figura 11.</b> Gráfico de matrices para <i>S. leucogaster</i> en San Ildefonso. ....	42
<b>Figura 12.</b> Gráfico de densidad para <i>S. leucogaster</i> en San Ildefonso. ....	43
<b>Figura 13.</b> Gráfico de matrices para <i>S. leucogaster</i> en San Ildefonso. ....	43
<b>Figura 14.</b> Contribución de las presas en la dieta de <i>S. nebouxii</i> y <i>S. leucogaster</i> en Tortuga. ....	44
<b>Figura 15.</b> Contribución de las principales en la dieta de <i>S. nebouxii</i> y <i>S. leucogaster</i> en isla San Ildefonso e Isla Tortuga. ....	47
<b>Figura 16.</b> Contribución de las presas que menos contribuyen en la dieta de <i>S. nebouxii</i> y <i>S. leucogaster</i> en isla San Ildefonso e Isla Tortuga. ....	48
<b>Figura 17.</b> Concentración de Cu, Cd y Zn ( $\mu\text{g/g}$ peso seco) en plumas de <i>S. nebouxii</i> y <i>S. leucogaster</i> en isla San Ildefonso y Tortuga. ....	51

## Lista de tablas

<b>Tabla 1.</b> Estudios relacionados con metales pesados en aves marinas de México. Las unidades de concentración son $\mu\text{g/g}$ .....	10
<b>Tabla 2.</b> Valores de $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{15}\text{N}$ (promedio +/- DE), presas principales de <i>S. nebouxii</i> y <i>S. leucogaster</i> .....	27
<b>Tabla 3.</b> Descripción de los individuos muestreados de cada especie en las dos islas. SI=San Ildefonso TO=Tortuga.....	30
<b>Tabla 4.</b> Métricas de nicho de isótopos estables para cada especie e isla $\delta^{13}\text{C}$ (‰) y $\delta^{15}\text{N}$ (‰) = valores promedio +/- Desviación Estándar por población, CR = rango $\delta^{13}\text{C}$ por población; NR = rango $\delta^{15}\text{N}$ por población, CD= Distancia media al centroide por población, NND= Distancia media al vecino más cercano por población, SDNND= Desviación estándar de la distancia del vecino más cercano, por población.....	34
<b>Tabla 5.</b> Valores medios de $\delta^{13}\text{C}$ (‰) y $\delta^{15}\text{N}$ (‰), por poblaciones y sexos.....	35
<b>Tabla 6.</b> TA= Área total SEA= Área de la elipse estándar SEAc= Área de elipse estándar corregidas.....	35
<b>Tabla 7.</b> Traslape entre <i>S. nebouxii</i> y <i>S. leucogaster</i> en isla San Ildefonso (SI) e Isla Tortuga (TO). .....	36
<b>Tabla 8.</b> Porcentajes corregidos de las presas en la dieta de las cuatro poblaciones. ....	38
<b>Tabla 9.</b> Concentración de metales pesados en muestras de plumas de <i>S. nebouxii</i> y <i>S. leucogaster</i> . Los valores están expresados en mg/kg referidos a peso seco. SI =San Ildefonso, TO=Tortuga. ND=No Detectado. ....	49
<b>Tabla 10.</b> Tabla de resultados de los valores esperados para <i>S. nebouxii</i> y <i>S. leucogaster</i> .....	50

## 1. INTRODUCCIÓN

Las aves marinas desempeñan un papel importante en la estructura y funcionamiento de los océanos por la gran cantidad de recursos que consumen (Cairns, 1988; Charrassin y Bost, 2001). Por su abundancia, posición tope en la cadena trófica y respuestas rápidas a los cambios en la disponibilidad de presas en varias escalas temporales y espaciales. Son consideradas especies “centinela”, ya que son excelentes indicadores para detectar la presencia de contaminantes, y cambios en las redes tróficas del océano (Burger y Gochfeld, 2004), lo que proporciona un diagnóstico de riesgo para su hábitat y sus poblaciones (Aguirre y Tabor, 2004).

Por estas características, son especies muy vulnerables a los cambios climáticos y antropogénicos que se producen en su hábitat y que amenazan su conservación (Burger y Gochfeld, 2004). Ante cambios en las variables ambientales, las aves marinas exhiben variaciones en sus parámetros reproductivos como; cambios en la fecha de puesta, disminución del tamaño de puesta y reducción del número de pollos que crían (Ancona *et al.*, 2011).

Además, por su alta movilidad y abundancia, se encuentran entre los animales que más activamente propician el flujo de materia y energía entre ecosistemas (Polis *et al.*, 1997). En el caso particular de las aves marinas del Golfo de California, contribuyen al intercambio de nutrientes, energía y organismos entre los ecosistemas marino costeros y de las islas donde se reproducen (Maulf, 1983). Estos flujos pueden ser de gran magnitud y concentrarse en áreas reducidas, con lo que llega afectar de forma significativa las características básicas de los ecosistemas insulares receptores (Polis *et al.*, 1997).

Al intercambio de nutrientes desde un ecosistema marino, hacia uno con escasez de recursos como el ecosistema terrestre de las islas, se le conoce como subsidios de recursos (Maulf, 1983). Se ha demostrado que, en las islas del Golfo de California, estos subsidios pueden influir sustancialmente en las dinámicas de población, las interacciones, las vías tróficas y otros aspectos de las redes alimentarias receptoras, enriqueciendo la funcionalidad de los ecosistemas terrestres de las islas desde las plantas a los mamíferos, reptiles y aves terrestres (Polis *et al.*, 1997).

Los sistemas insulares del Golfo de California, al estar aislados del continente, son sitios estratégicos para la reproducción de aves marinas y por la alta productividad del Golfo, las aves que anidan en las islas encuentran buena disponibilidad de alimento, especialmente en invierno y primavera que es cuando se reproducen principalmente (Mellink, 2001). Muchas de estas islas son reconocidas como Áreas de Importancia para la Conservación de las Aves (AICA) debido a que, las aves encuentran sitios de reproducción, anidación, descanso, alimentación o invernación, además de ser importantes sitios de poblaciones de aves migratorias y/o residentes (Arizmendi y Márquez, 2000). En estas islas se ha reportado la presencia de 56 especies de aves marinas, 18 de las cuales se reproducen en ellas, 26 más son migratorias, 10 especies son residentes, y 6 son cuasiendémicas (CONANP, 2000).

Entre las especies reproductivas, con mayor número de parejas, se encuentran el Bobo Patas Azules (*Sula nebouxii*) y el Bobo Café (*Sula leucogaster*), especies ampliamente distribuidas en el Golfo de California (Anderson, 1978; Mellink *et al.*, 2001; Suazo Guillén, 2004; Peñaloza Padilla, 2006). Estas especies cuentan con cierta plasticidad en su ecología de alimentación que les ayuda a sobrellevar cambios en la disponibilidad de alimento, lo que les permite vivir en sitios con variaciones ambientales amplias de escala interanual y estacional (como sucede con variaciones en la productividad primaria y temperatura superficial del océano) (Weimerskirch *et al.*, 2008). Se ha reportado que al encontrarse con modificaciones en la disponibilidad de sus recursos alimenticios son capaces de responder ajustando su comportamiento de alimentación y su dieta (Piatt *et al.*, 2007).

Por esto, es importante conocer la composición de su dieta y las estrategias de alimentación, que conforman su ecología trófica y nicho trófico de manera general (Bellocq, 2000; Jaksic, 2001). La ecología trófica incluye las estrategias de alimentación, disponibilidad de alimento en su área de forrajeo y diferencias entre los principales grupos de presas consumidas por los depredadores, en las diferentes áreas y, sus interacciones con otras especies y cambios temporales en la dieta a corto o largo plazo (Bearhop *et al.*, 2006).

El nicho trófico se refiere al conjunto de elementos de su dieta y los valores de cada uno de ellos, que componen el marco de referencia de su alimentación en todas las circunstancias de su vida. Los cambios en los componentes de la dieta y sus respectivos valores límite definen una región (un “hipervolumen n-dimensional”, Hutchinson, 1957), de manera que cada individuo de la población representa un punto dentro del espacio en el que esa población o esa especie puede sobrevivir. Estudiar el nicho trófico de estas aves marinas sirve para conocer de qué se están alimentando en un determinado periodo de tiempo, conocer el grado de especialización de cada población en su hábitat, y para saber cuan estrechamente pueden coexistir dos especies, si compiten por alimento, o existe una diferenciación en la elección de presas (Weimerskirch, 2006).

Una de las herramientas más fiables para estudiar la composición del nicho trófico y los flujos de energía en las cadenas alimenticias es el análisis de isótopos estables de carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ) y nitrógeno ( $\delta^{15}\text{N}$ ) de los tejidos. Esta técnica se basa en el hecho de que las señales isotópicas de las presas, quedan formando parte de los tejidos de los consumidores, transmitiéndose a lo largo de la cadena trófica desde los productores hasta los consumidores (DeNiro y Epstein, 1978; DeNiro y Epstein, 1981).

Otro factor importante es la contaminación de los océanos que se ha convertido en un tema de creciente preocupación mundial, ya que el medio marino está siendo severamente afectado por sustancias químicas antropogénicas, como los metales pesados, que son contaminantes altamente tóxicos para los seres vivos de ambientes terrestre y marinos (Burger, 1993; Fry 1995; Burger, 2000).

Estos metales están en todos los ecosistemas del planeta, debido a fenómenos naturales, o liberados al ambiente por la acción del ser humano (ICES, ADME 2002). Es por esto que, conocer el grado de bioacumulación de metales pesados como; Cu, Cd, Pb, y Zn, en los tejidos de las aves, ayuda a generar información que puede inferir el estado de salud de las aves y de la calidad del hábitat, es decir, las aves actúan como bioindicadores de los efectos en el ecosistema. Es sabido que, dependiendo de la magnitud de la concentración de los metales



pesados acumulados, es factible que ocurran cambios fisiológicos o de comportamiento en los seres vivos. Debilitando el estado físico de los individuos, puede extenderse y llegar a tener efectos negativos en toda la población (Burger y Gochfeld, 2004).

En este estudio, evaluamos el nicho trófico de dos especies de aves marinas del género *Sula* (*Sula nebouxii* = Bobo Patas Azules y *Sula leucogaster* = Bobo Café, anidantes de manera simpátrica en dos islas del Golfo de California: Isla San Ildefonso e Isla Tortuga. Para ello utilizamos el análisis de la composición isotópica de  $\delta^{13}\text{C}$  y  $\delta^{15}\text{N}$  en plumas. También se determinó la concentración de metales pesados, como; Cobre (Cu), Cadmio (Cd), Plomo (Pb) y Zinc (Zn) en plumas de adultos de ambas especies. Con estos resultados, comparamos el nicho trófico y evaluamos el grado de bioacumulación de metales pesados en ambas especies e islas. Con estos resultados, comparamos el nicho trófico entre ambas, como una medida de competencia interespecifica cuando anidan juntas. También evaluamos si se da un cambio de nicho entre islas. Por ultimo evaluamos el grado de bioacumulación de metales pesados en ambas especies e islas.

## 2. ANTECEDENTES

### 2.1 Isótopos estables y Nicho trófico

Los isótopos son átomos de un mismo elemento químico con distinto número de neutrones que están presentes en la naturaleza. Algunos isótopos son inestables y tienden a desintegrarse, otros son estables y no se descomponen con el tiempo (Bigeleisen, 1965). Una vez que un átomo de un elemento isotópicamente estable, forma parte de un tejido, permanece en esa forma, y se transmite a lo largo de la cadena alimenticia, sin alteración. En el caso de las aves marinas, los isótopos estables de carbono y nitrógeno han sido empleados principalmente como indicadores del régimen alimenticio. Los isótopos estables de  $^{13}\text{C}$  y  $^{15}\text{N}$  al ser componentes mayoritarios de los tejidos, constituyen excelentes trazadores naturales que permiten estudiar los flujos en las cadenas alimenticias, ya que la composición isotópica de cada eslabón de la cadena depende directamente de su dieta (Guerrero y Berlanga, 2000).

El estudio de isótopos estables permite conocer más sobre la dieta de las aves por medio de técnicas no invasivas como el análisis de las plumas. El tejido de las plumas tiene una composición de  $^{13}\text{C}$  y  $^{15}\text{N}$  que refleja el porcentaje de isótopos que tenían los recursos consumidos por el ave durante el periodo de tiempo que fueron creciendo esas plumas. Es decir, que las proporciones de isótopos estables que encontramos en la pluma ya madura y sellada, revelan información sobre la dieta asimilada por el ave tanto en el tiempo como en el espacio, si se conoce cuándo y dónde estaba el ave cuando la pluma se formó (Burger y Shaffer, 2008).

El análisis de su dieta, mediante el uso de isótopos de  $^{13}\text{C}$  y  $^{15}\text{N}$  puede ayudar a; a). Conocer las diferencias de la dieta entre las dos especies, en poblaciones que coexisten en tiempo y espacio (viven o anidan en la misma isla). b). Entender los cambios de nicho trófico que pudieran presentarse espacialmente entre poblaciones de la misma especie, viviendo en diferentes islas. c) Conocer diferencias en la dieta entre sexos de la mismas especie y población, diferencias con respecto a la etapa reproductiva (incubación, crianza temprana, crianza tardía) y con las variaciones oceanográficas y d). Se puede aplicar esta técnica para conocer variaciones temporales de la dieta.

El nicho trófico del *S. neboxii* y *S. leucogaster* se ha evaluado en el estudio de Weimerskirch *et al.* (2009) en isla San Ildefonso, a través de isótopos estables en sangre, plumas y regurgitados para conocer las diferencias de dieta entre las especies y examinar si ambas especies difieren en su comportamiento de búsqueda de alimento entre sexos y especies, tomando en cuenta su dimorfismo sexual. Las firmas de  $\delta^{13}\text{C}$  y  $\delta^{15}\text{N}$  de sangre y plumas fueron similares para machos y hembras de las dos especies, indicando que se alimentaron de las mismas presas, en niveles tróficos similares lo que indica que las diferencias específicas de sexo parecen tener un papel más importante que las diferencias específicas de especie.

Entre los estudios que han analizado la alimentación de *S. neboxii* y *S. leucogaster* en isótopos estables y regurgitados, se puede mencionar el de Mellink *et al.* (2001) y Weimerskirch *et al.* (2009) en isla San Ildefonso. Ellos reportaron que, en condiciones de abundancia de alimento, las dos especies de bobos se alimentaron a una distancia similar con respecto a la colonia (30 a 50 km) y se alimentaron de presas similares como; *Sardinops caeruleus*, *Selar crumenophthalmus*, *Etrumeus teres* y *Anchoa spp.* Más al sur, en Isla el Rancho e Isla el Farallón en Sinaloa, González Medina y Castillo Guerrero (2018), observaron algunas diferencias de alimentación entre sexos de *S. neboxii* y *S. leucogaster*, pero en coincidencia en las presas, alimentándose principalmente de *Ophistonema libertate* y *Cetengraulis mysticetus*.

## 2.2 Metales pesados

Los metales pesados que se encuentran dentro de los seres vivos se clasifican en esenciales (oligoelementos) y no esenciales. Los primeros son los que se involucran en alguna función metabólica como; Cobre (Cu), Arsénico (As), Cromo (Cr), Molibdeno (Mo), Magnesio (Mn), Níquel (Ni), Selenio (Se), Zinc (Zn) y Hierro (Fe). Estos, tienen diversas funciones (reproductivas, síntesis de proteínas, y procesos metabólicos) y son necesarios en bajas cantidades para los seres vivos, pero que pueden volverse tóxicos si superan el umbral fisiológico. Los metales no esenciales, son aquellos que no tienen una función biológica, exhiben variaciones interpoblacionales amplias y se van bioacumulando conforme se incrementa el nivel trófico y la edad del individuo. Entre ellos encontramos; Cadmio (Cd), Mercurio (Hg), Plomo (Pb), Antimonio (Sb) y Bismuto (Bi) (Navarro *et al.*, 2007). Estos metales no esenciales tienen elevado

peso atómico, son potencialmente tóxicos e incluso en bajas concentraciones pueden ser nocivos para los seres vivos (Burger y Gochfeld, 2002).

Por sus características de bioacumulación, persistencia, biotransformación y elevada toxicidad, los metales pesados permanecen en los ecosistemas por largos periodos (Burger y Gochfeld, 2004). Entre las características más importantes de los metales pesados se encuentran: su estabilidad que los hace persistentes y residuales en los ecosistemas, su biodisponibilidad en medio acuoso, y que tienen la capacidad de bioconcentrarse y biomagnificarse en los organismos terrestres (plantas) y acuáticos (ejemplo; peces, crustáceos, algas y aves marinas), afectando así la cadena alimenticia de los ecosistemas (Mejía, 2006).

En particular, las aves marinas están expuestas a diversas formas de contaminación debido a que pasan la mayor parte de su tiempo en el océano donde se exponen a su adquisición por inhalación y, particularmente por la ingestión de alimento y agua (Burger y Gochfeld, 2002). Los efectos de los metales pesados dependen de varios factores, como; concentración en los tejidos, ruta de exposición, la dosis, especie, edad, sexo, hábitat, condiciones climáticas y duración de la exposición, aunque condicionados mayormente por la dieta, patrones de migración y tiempo de residencia, tiempo de vida, hábitos de alimentación y las diferentes formas de contaminación (Burger y Gochfeld, 2002).

Los metales pesados, dependiendo de su concentración en un individuo, pueden tener efectos perjudiciales en la reproducción y supervivencia de las aves marinas, ya que acumulan estos contaminantes en distintos tejidos como en huevos, plumas, hígado y distintos músculos (Thompson *et al.*, 1992). Los metales pesados pueden tener efectos negativos en el comportamiento reproductivo de las aves, como; reducción en el tamaño de puesta, la reducción en el tamaño del huevo, poner huevos fuera del nido y esterilidad, el adelgazamiento del cascaron, malformaciones embrionarias y en los pollos puede haber un crecimiento y supervivencia reducidas (Burger y Gochfeld 2002; Scheuhammer, 1987).

Como una medida para reducir estos efectos, las aves tienen mecanismos de eliminación de los metales, pueden hacerlo a través de las heces, la muda, la producción de huevos y a través de la glándula uropigial. Estos procesos de detoxificación ocurren mediante diversas actividades enzimáticas antioxidantes que contrarrestan la toxicidad de los metales pesados y los depositan en distintos tejidos como el hígado, riñones, sangre y las plumas como vía para su excreción (Lewis y Furness 1991; Bearhop *et al.*, 2000).

Los niveles de metales pesados se pueden usar para monitorear la exposición de un ave a los mismos. Estos pueden unirse a las moléculas de proteína en la pluma durante el corto periodo de crecimiento ya que está conectada con el torrente sanguíneo a través de pequeños vasos sanguíneos (Burger, 1993). Después de que la pluma ha terminado su crecimiento, los vasos sanguíneos se atrofian y la pluma se separa fisiológicamente del ave (Denneman y Douben, 1993; Burger, 1994).

Se han realizado estudios de metales pesados en varias especies de aves marinas, y en algunas islas del pacífico, en los cuales se han usado diferentes tejidos (Tabla 1). Por ejemplo, en la laguna Altata en Sinaloa, utilizaron en músculo, corazón, hígado, vísceras y plumas para detectar Hg en la avifauna residente y migratoria. Los niveles más altos se presentaron en las plumas de aves residentes de hábitos piscívoros como el *Pelecanus occidentalis* y el *Phalacrocorax olivaceus* niveles superiores a 3,0  $\mu\text{g g}^{-1}$  p.s.

En la Isla El Rancho, Sinaloa Lerma *et al.* (2016) utilizaron muestras de sangre de *S. nebouxii* para determinar las concentraciones de plomo (Pb), cadmio (Cd) y mercurio (Hg) teniendo en cuenta el sexo (hembras y machos) y la clase de edad (adultos y polluelos) de individuos en diferentes etapas de reproducción (cortejo e incubación), durante dos temporadas de cría. Los autores detectaron bajas concentraciones de Cd (0,05 ppm) y Pb (0,36ppm) en machos y hembras adultas y una alta concentración de Hg en machos (Tabla 1).

En un estudio en la Bahía de Santa María en Sinaloa, Ceyca *et al.* (2016), evaluaron las concentraciones de mercurio (Hg) y cadmio (Cd) en huevos de ocho especies de aves marinas,

incluido *S. nebouxii* y *S. leucogaster*, durante dos temporadas de reproducción. Las concentraciones más altas de Hg se detectaron en especies piscívoras como los Bobos, mientras que las especies con dietas más variadas presentaron las mayores concentraciones de Cd. Estas diferencias en las concentraciones de ambos metales se atribuyeron a la dieta y ecología de forrajeo de las especies.

Otro estudio en isla el Rancho en Sinaloa, Lerma *et al.* (2020) recolectaron huevos y muestras de sangre de polluelos y adultos de Bobo Patas Azules para evaluar diferencias en concentraciones de Zinc (Zn) entre años, edades, sexos y estadios reproductivos. Las concentraciones de zinc en los huevos oscilaron entre 27,3 y 64,9 ppm, mientras que los niveles de Zn en sangre de polluelos y adultos entre 16,1 y 53,1 ppm. Los polluelos tenían concentraciones de Zn significativamente más altas que los adultos. Una vez los polluelos dejaron de crecer, las hembras presentaron concentraciones de Zn más altas que los machos. Los resultados sugieren que el crecimiento, el sexo y la etapa de reproducción afectan las concentraciones de Zn en sangre y que puede deberse a requisitos específicos de la etapa (Tabla 1).

Otros trabajos como el de Ramírez (2020) y Soldatini *et al.* (2020) realizados en Bahía Santa María e isla Natividad, reportaron en sangre niveles más altos de Hg. Los niveles de concentración reportados en *Leucophaeus atricilla* y *Fregata magnificens* estuvieron por encima de los umbrales de efectos tóxicos (0.2-8.5 µg/g). En cadmio ninguno rebaso los niveles tóxicos (<0.26 µg/g p.h.), y en Pb se encontraron por encima de estos niveles (0.1-2 µg/g p.h.). Y en *Puffinus opisthomelas* en isla Natividad, la concentración de Hg en los eritrocitos promediaron 1.8 µg/g y variaron de 1,4 a 2,4 µg/g, donde machos y hembras tenían concentraciones de Hg similares. También en el trabajo de Ruelas Inzunza *et al.* (2007), analizaron las concentraciones de mercurio en distintas aves marinas por medio de; músculo, corazón, hígado, vísceras y plumas de avifauna residente y migratoria de la Laguna de Altata Ensenada del Pabellón, Sinaloa. Los niveles más altos de Hg (0.005 - 3.75 µg/g) se presentaron en las plumas de aves residentes y de alimentación piscívora (*Pelecanus occidentalis* y *Phalacrocorax olivaceus*).

**Tabla 1.** Estudios relacionados con metales pesados en aves marinas de México. Las unidades de concentración son µg/g.

Lugar	Fuente y año	Especies	Órganos analizados	Metales pesados y concentraciones
Laguna Altata , Sinaloa	Ruelas Inzunza <i>et al.</i> ,2007	<i>Pelecanus occidentalis, Phalacrocorax brasilianus, Ardea alba, Bubulcus ibis, Plegadis chihi, Recurvirostra americana, Dendrocygna autumnalis, Anas cyanoptera y Fulica americana</i>	Corazón, hígado, músculo, vísceras y plumas	Hg 0.005-3.75 aprox.
Bahía Santa María, Isla El Rancho, Sinaloa	Lerma <i>et al.</i> , 2016	<b><i>Sula nebouxii</i></b>	Sangre	Hg (0.21-) Cd (0.63) Pb
Farallón de San Ignacio, Laguna Ohuira, Sistema Navachiste Macapule, Bahía de Santa María, Sinaloa y Bahía de Mazatlán.	Ceyca <i>et al.</i> , 2016	<b><i>Sula nebouxii, Sula leucogaster,</i></b> <i>Phalacrocorax auritus, Fregata magificens, Pelecanus occidentalis, Thalasseus maximus, Leucophaeus atricilla, Larus heermanni</i>	Huevos	Hg (0.26) Cd ( 0.10)
Bahía de Santa María, Sinaloa	Ramirez, 2020	<i>Leucophaeus atricilla y Fregata magnificens</i>	Sangre	Hg (0.02-6.9) Cd (<0.13) Pb (<0.3)

Isla Natividad, Baja California Sur.	Soldatini <i>et al.</i> , 2020	<i>Puffinus opisthomelas</i>	Sangre	Hg (0.29)
Isla el Rancho, Sinaloa.	Lerma <i>et al.</i> , 2020	<b><i>Sula nebouxii</i></b>	Huevos/ sangre	Zn ( 27.3 Y 64.9 ppm)

---



## **2.3 Metales pesados y afectaciones en aves marinas**

Los metales pesados se encuentran biodisponibles en el medio acuoso y tienen la capacidad de bioconcentrarse en los organismos acuáticos (peces, crustáceos, algas, entre otros) y terrestres (plantas), afectando directamente la cadena alimenticia de los ecosistemas (Mejía, 2006). A continuación, se detallan los metales pesados a analizar y sus afectaciones en las aves.

### **2.3.1 Cobre (Cu)**

Esencial: Este metal se encuentra en industrias metalúrgicas, explotaciones mineras incineradoras, fabricas recicladoras de plomo o vertimientos de altas cantidades de aguas residuales, incineración de basuras. En aves ocasiona; anemia, trastornos carcinogénicos, del crecimiento, problemas respiratorios, reproductivos, gastrointestinales, hematológicos, hepáticos y endocrinos (Skoric *et al.*, 2012; Manjula *et al.*, 2015). Un incremento en los niveles de cobre (Cu) puede causar daños en el hígado, riñón y cerebro.

### **2.3.2 Cadmio (Cu)**

No esencial: El cadmio no tiene un papel biológico y se origina tanto en fuentes antropogénicas (minas, fundiciones y productos comerciales (baterías y pinturas) como en fuentes naturales (la erosión de la geología de la superficie) (Qadir *et al.*, 2008). En aves, es absorbido a través del sistema digestivo y respiratorio, formando complejos con las proteínas que facilitan su transporte y almacenamiento en órganos como el hígado, riñones y en menores cantidades, en páncreas, hueso e intestino. El cadmio provoca efectos negativos como retraso en el crecimiento, descenso de la producción de huevos, adelgazamiento de la cáscara del huevo y alteraciones comportamentales (Pérez *et al.*, 2005).

### **2.3.3 Plomo (Pb)**

No esencial: Proviene principalmente de las fundidoras y de la producción industrial de baterías, pinturas y estabilizadores plásticos y, de manera natural se deriva del vulcanismo y de las partículas liberadas de la vegetación terrestre (Eisler 1985) así como el uso de la gasolina, pinturas a base de plomo, la agricultura o de fuentes naturales como la erosión. El exceso en el nivel de plomo en la dieta afecta a todos los sistemas del cuerpo y puede llegar a causar la

muerte. Síntomas de envenenamiento por plomo incluyen malformaciones anatómicas, pérdida de apetito, letargo, debilidad, temblores, locomoción impar, poca percepción de balance y otros efectos neurológicos (Burger y Gochfeld 2002). Además, ocasiona problemas neurológicos y hematológicos, signos gastrointestinales como regurgitación, vómito, diarrea y anorexia entre otros efectos. El Pb actúa como un veneno y como un neurotóxico. No tiene función biológica conocida, por lo que bioacumulado en pequeñas cantidades puede resultar tóxico (Jakimska *et al.*, 2011).

#### **2.3.4 Zinc (Zn)**

Esencial: El zinc puede encontrarse en forma pura o mezclado con otros metales. Se encuentra en grandes cantidades en la tierra y se presenta en forma de minerales, en el uso de fertilizantes, en la construcción, el transporte, en bienes de consumo, incluidos los aparatos eléctricos y electrónicos y en la fabricación de maquinaria industrial. El zinc es esencial para varios procesos metabólicos en animales como la replicación del ADN y la síntesis de proteínas (Murarka *et al.*, 2015). Además, las hembras adultas de las aves requieren concentraciones más altas de Zn para la producción de hormonas, el desarrollo de los ovarios y la producción de huevos (Idowo *et al.*, 2011; Murarka *et al.*, 2015). Las hembras pueden retener más Zn para una deposición óptima en el huevo (Zavalaga *et al.*, 2007). Los niveles excesivos de Zn en la dieta de las aves producen diarreas, anorexia e incluso la muerte (Eisler 1993; Zdziarski *et al.*, 1994).

Considerando las posibles afectaciones que tienen estos metales pesados en las aves marinas, en el presente estudio, se plantean las siguientes preguntas de investigación para comparar el nicho trófico y la bioacumulación de metales pesados en Bobos Patas Azules y Bobos cafés en Isla Tortuga e Isla san Ildefonso.

1. ¿Existe diferencia en el nicho trófico entre los adultos de Bobos Patas Azules y Bobos Cafés que anidan en isla San Ildefonso y Tortuga?
2. ¿Hay diferencias en el grado de bioacumulación de metales pesados en adultos de las dos especies y entre islas?

### 3. JUSTIFICACIÓN

*Sula nebouxii* y *Sula leucogaster* son dos especies de aves marinas longevas dado que viven hasta 17 años y se conoce su comportamiento reproductivo y de alimentación. Sus características biológicas y fisiológicas las hace ser particularmente vulnerables a las perturbaciones externas como los cambios ambientales y la contaminación (Burger y Gochfeld, 2002). Al anidar en colonias y en sistemas insulares, su presencia espacial y temporal puede ser predecible, lo que las hace ser buenos candidatos para el estudio de análisis isotópico y como bioindicadores de contaminantes, como pueden ser los metales pesados. El uso de plumas implica un tiempo son de manipulación corto y es un método no invasivo para estos análisis.

Con el estudio de isótopos estables de  $^{13}\text{C}$  y  $^{15}\text{N}$  en estas aves marinas podemos identificar el hábitat de alimentación, hacer una inferencia de su dieta, y conocer sus relaciones tróficas. Por otro lado, con la determinación de metales pesados podemos conocer la calidad del hábitat y proporcionar una alerta temprana de posibles efectos en su estado de salud y las consecuencias en su población.

Las islas San Ildefonso y Tortuga son Áreas de Importancia para la Conservación de las Aves (AICA), a pesar de esto han sido poco estudiadas. Estas islas proporcionan sustratos de anidación para *S. nebouxii* y *S. leucogaster* y otras aves como *Larus livens* y *Pelecanus occidentalis*. En Isla San Ildefonso se han estimado 1000 a 2000 parejas para cada especie (Weimerskirch *et al.*, 2009), respecto a isla Tortuga no se tiene algún registro de sus poblaciones. Con el presente estudio se generará información para comparar el nicho trófico entre estas especies y su grado de competencia interespecifica en cada isla, así como el grado de bioacumulación de metales pesados de las cuatro poblaciones. Además de sentar una línea base de conocimiento para estudios posteriores, servirá como una herramienta para plantear estrategias de conservación de las especies e islas, información importante considerando que las poblaciones de estas especies se están reduciendo en algunas colonias del Pacífico mexicano sin que se sepa aun la causa (Hernández Vázquez *et al.*, 2012; Anchundia *et al.*, 2014).

#### 4. HIPÓTESIS

1. En trabajos anteriores se ha reportado que las dos especies anidando juntas en San Ildefonso y en condiciones de alta productividad se alimentan de las mismas presas y no presentan competencia interespecífica (Weimerskirch *et al.*, 2009). Considerando lo anterior planteamos que el nicho trófico del *S. neboxii* y *S. leucogaster* es igual entre especies e islas.
2. *S. neboxii* y *S. leucogaster* tienen valores detectables de metales pesados de Cu, Cd, Pb y Zn en Isla San Ildefonso y Tortuga, debido a la actividad minera de Santa Rosalía e Isla San Marcos o a la abundancia natural de metales en la región.
3. No hay diferencias en la bioacumulación de metales pesados en adultos de las dos especies, ya que su alimentación es muy similar.

## **5. OBJETIVOS**

### **5.1 Objetivo general**

Analizar y comparar el nicho trófico y los niveles de metales pesados en aves adultas de dos colonias reproductivas de *S. nebouxii* y *S. leucogaster* en dos islas del Golfo de California.

### **5.2 Objetivos particulares**

1. Caracterizar el nicho trófico de adultos del *S. nebouxii* y *S. leucogaster* en colonias reproductivas de las islas San Ildefonso y Tortuga.
2. Comparar el grado de bioacumulación de Cu, Cd, Pb y Zn en adultos de *S. nebouxii* y *S. leucogaster* en colonias reproductivas de las islas San Idelfonso y Tortuga.

## 6. MATERIAL Y MÉTODOS

### 6.1 Área de estudio

Las islas del Golfo de California son una de las regiones marinas más productivas y ecológicamente diversas del mundo (Enriquez Andrade *et al.*, 2005; Lara *et al.*, 2008). Representan una superficie total de; 374,553.63 ha, son alrededor de 900 islas e islotes que representan aproximadamente el 50% del territorio insular mexicano (DOF, 2001). Proporcionan alimento y protección a un gran número de especies de aves marinas (Mellink, 2001). Además de ser sitios estratégicos de reproducción, también son sitios de alimentación y descanso para muchas otras especies de aves migratorias (Mellink, 2001). Su condición aislada hace de las islas uno de los territorios mejor conservados y con poca perturbación antrópica, siendo un refugio adecuado para las aves marinas, cuya distribución territorial en el Golfo de California se relaciona, en parte con la distribución de sus presas (peces e invertebrados marinos) que son mucho menos móviles que las aves y tienden a mostrar patrones geográficos definidos (Anderson y Velarde, 2001).

La Isla San Ildefonso (26°37'39.57" N, 111°25'45.91" W): se encuentra en Baja California Sur, tiene una superficie de 260 ha y una altura máxima de 116 msnm. Su costa es de difícil acceso; es rocosa y sin playas de arena. Solamente tiene 2 km de largo y cuenta con vegetación de matorral xerófilo. Es un punto de descanso para aves migratorias de la ruta del pacifico oriental que va desde Alaska hasta la Tierra del Fuego (Anderson y Velarde, 2001). Se han registrado un total de 24 especies de aves que utilizan este sitio para descanso, alimentación y reproducción, como; *Sula nebouxii*, *Sula leucogaster*, *Pelecanus occidentalis*, *Buteo jamaicensis*, *Falco peregrinus* y *Larus livens* y *Larus hermanni*.

Isla Tortuga (27°25'59.74" N, 111°52'00.12" W): esta isla del Golfo de California, se localiza al noreste de Santa Rosalía y pertenece a Baja California Sur. Tiene una superficie de 2,185 ha. Su altitud oscila entre el nivel del mar y los 200 msnm y cuenta con vegetación de matorral xerófilo. Es un sitio de anidación de aves marinas como *S. leucogaster* y *S. nebouxii* que se considera una colonia reproductiva grande, y *Pelecanus occidentalis* que en la isla tiene una de las mayores colonias reproductivas en el Golfo de California (Everett y Anderson, 1991).

Las dos islas pertenecen al Área de Protección de Flora y Fauna, Islas del Golfo de California, que son Reserva Especial de la Biosfera y Patrimonio de la Humanidad según la UNESCO desde 2005 (SEMARNAT, 2021), y son consideradas como Áreas de Importancia para la Conservación de las Aves de México (AICA) (Velarde *et al.*, 2004).



**Figura 1.** Localización geográfica de la Isla Tortuga y San Ildefonso en el Golfo de California.

## 6.2 Especies de estudio

### 6.2.1 Bobo Patas Azules (*Sula nebouxii*)

El Bobo Patas Azules, familia Sulidae, tiene la población más restringida entre los Sulidos, ya que se reproduce desde el Golfo de California hasta el norte de Perú y las Galápagos (Nelson, 1978). Dentro del Golfo de California anida en isla San Pedro Mártir en el norte, y en isla Tortuga, e isla San Ildefonso en el sur. En el Pacífico mexicano se han registrado colonias en isla el Rancho e isla Farallón, en Sinaloa, y en el Pacífico central en las Islas Marietas (Nelson, 1978) e islas de Chamela, Jalisco (Hernández Vázquez *et al.*, 2012). El *S. nebouxii* se asocia con una combinación de islas áridas y la proximidad relativa de agua fría (Nelson, 1978).

En el Golfo de California se estimaron en el siglo pasado 85,000 individuos de *S. nebouxii*, por lo que es considerada un área importante de reproducción para esta especie (Nelson, 1978). Esta especie de bobo es socialmente monógama, con un período de reproducción extenso. Para iniciar su reproducción los individuos deben tener buena condición física porque de ello depende que encuentren pareja (Nelson, 1978; Osorio Beristain y Drummond, 1998). La elección de pareja y el esfuerzo reproductivo están regulados por la exhibición de señales honestas de buena condición, como el color de las patas (Torres y Velando, 2010).

El cortejo dura cerca de 40 días (Nelson, 1978; Beristain y Drummond, 1998). El tamaño de puesta es entre uno y tres huevos, usualmente dos, que tardan 42 días en eclosionar (Drummond *et al.*, 1986). Crían de uno a tres pollos dependiendo de las condiciones climáticas y la disponibilidad de presas (Nelson, 1978; Castillo Guerrero, 2009; Ancona *et al.*, 2011). Los pollos son alimentados por ambos padres, pero cuando crecen las hembras pueden alimentarlos más que los machos (Guerra y Drummond, 1995).

Las hembras son 31% más pesadas que los machos y por lo tanto pueden almacenar mayor cantidad de grasas que le sirven de amortiguamiento de reserva, a diferencia de los machos que trabajan al máximo de su capacidad para conseguir alimento (Velando y Álvarez, 2003). Se alimentan de pequeños peces pelágicos (Zavala *et al.*, 2008; Castillo Guerrero y Mellink, 2011; Ancona *et al.*, 2012) que son capturados por inmersión a una distancia de hasta 30-50 km de la



colonia (Zavala *et al.*, 2007; Weimerskirch *et al.*, 2009). La técnica de captura de presas involucra una caída en picada desde alturas de 10 a 12 m, durante la cual las aves repliegan las alas y con la inercia ganan velocidad, lo que les permite entrar en la columna de agua (Schreiber y Norton 2002) a una profundidad de 4 a 4.5 metros de profundidad para conseguir sus presas (Castillo Guerrero, 2009; Weimerskirch *et al.*, 2009). Sus principales presas son sardinas, anchovetas, (*Sardinops caeruleus*, *Engraulis mordax*, *Anchovia macrolepidota* y *Pneumatophorus japonicus*, *Selar crumenophthalmus*, *Etrumeus teres* y *Anchoa*) (Zavala *et al.*, 2007; Weimerskirch *et al.*, 2009; Castillo Guerrero y Mellink, 2011; Ancona *et al.*, 2012).

La diferencia en el peso entre hembras y machos se relaciona con las diferencias en la técnica de caza y el tipo de presa, siendo el macho anatómicamente mejor adaptado que la hembra para sumergirse y capturar presas más pequeñas y de rápido movimiento, mientras que la hembra hace inmersiones más profundas y caza presas más grandes. El macho realiza viajes más cortos y también alimenta a los pollos con la misma frecuencia o más a menudo que la hembra (Nelson, 1978; Weimerskirch *et al.*, 2009).

La muda es una de las actividades más importantes del ciclo de vida de las aves, sin embargo, sigue siendo uno de los temas menos estudiados (Thompson y Leu, 1994). En el *S. neboxii* no se conoce su patrón de muda (Anderson, 1978) aunque en los Sulidos generalmente se produce durante el período previo a la puesta y probablemente a menudo durante la incubación, extendiéndose incluso hasta la primera parte de la cría de polluelos. Este patrón es importante para la determinación de la edad y el sexo de las aves, pero su adecuada determinación requiere el establecimiento de criterios morfométricos y cualitativos adecuados (Martínez Hernández, 2012). Además, conocer la muda permite un mayor entendimiento sobre la demografía aviar, variaciones poblaciones y el origen de estos cambios (Martínez Hernández, 2012).

Su estado actual de conservación es preocupante, se ha registrado un descenso continuo de reproductores, al menos en la población anidante en las islas Galápagos (Anderson, 2018). La Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN), clasifica al *S. neboxii* bajo

preocupación menor (LC) (IUCN, 2018). Sin embargo, en México está sujeta a protección especial (Pr) por la NOM-059 SEMARNAT-2019, que son “Aquellas que podrían llegar a encontrarse amenazadas por factores que inciden negativamente en su viabilidad, por lo que se determina la necesidad de propiciar su recuperación y conservación o la recuperación y conservación de poblaciones de especies asociadas. En la actualidad, el tamaño poblacional de *S. neboxii* se estima en 90,000 individuos a nivel mundial y según BirdLife international (2022) y con su tendencia poblacional actual de la especie como “experimentando un declive moderado”. En México no se tiene una evaluación del estado de sus poblaciones, ni en cuanto a sus números y su dinámica poblacional, este hecho da aún más relevancia a nuestro trabajo (Ceyca *et al.*, 2009; Castillo Guerrero *et al.*, 2016, Hernández Vázquez *et al.*, 2017).

### **6.2.2 Bobo Café (*Sula leucogaster*)**

El Bobo Café (*S. leucogaster*), por el contrario, es el más común de los Sulidos entre los trópicos de todo el mundo. Esta ave marina se distribuye en todos los océanos tropicales del mundo, anidando principalmente en islas remotas y costeras sin disturbio humano ni depredadores introducidos (Shreiber y Norton, 2002). Es una especie bastante numerosa y distribuida en el Pacífico mexicano y en el Golfo de California (Anderson, 1983; Mellink *et al.*, 2001).

En el Golfo de California comparte parte de su área de distribución con *S. neboxii*. Tiene hábitos de alimentación relativamente costeros. Selecciona de forma característica sitios empinados para anidar, pendientes, rocas, cimas de acantilados. Pone de uno a tres huevos y su período de incubación de 43 días (Nelson, 1978). Su distribución local parece estar controlada por la disponibilidad de alimento, ya que se observa frecuentemente en zonas de corrientes y surgencias donde hay presas abundantes (Scheirber y Norton, 2002). La técnica de captura de presas involucra una caída en picada desde alturas de 10 a 12 m y sus zonas de alimentación incluyen el océano abierto y la costa, aparentemente también dependiendo de la disponibilidad de presas (Nelson, 1978).

En la Isla San Ildefonso sus presas principales son; *Sardinops caeruleus*, *Selar crumenophthalmus*, *Etrumeus teres* y especies de peces voladores como; *Cheilopogon papilio*, *Scomber japonicus*, e

*Hyporhamphus sp* (Weimerskirch *et al.*, 2009; Mellink *et al.*, 2000). La calidad del hábitat de alimentación cerca de las colonias está sujeta a las variaciones del ambiente (Jaquement *et al.*, 2005) y las aves pueden modificar sus patrones de alimentación para asegurar su supervivencia o su éxito de crianza (Castillo Guerrero, 2009). Las variaciones detectadas en la ecología de alimentación del *S. leucogaster*, entre diferentes localidades, parecen indicar una flexibilidad en el comportamiento dependiendo de la disponibilidad de alimento y condiciones ambientales cerca de cada colonia (Burger y Piatt 1990, Croxall *et al.*, 1999).

Respecto a su muda, como en otros Sulidos, se produce durante el período previo a la puesta y probablemente a menudo durante la incubación, extendiéndose incluso hasta la primera parte de la cría de polluelos. No hay información sobre la velocidad de muda, pero no hay una razón a priori por la que deba diferir mucho de los Bobos de Nazca (*Sula granti*) o Bobos Patas Rojas (*Sula sula*).

A pesar de que su población es grande, a nivel global ha disminuido sustancialmente y actualmente podría ser de sólo un 10% de sus niveles históricos (Shreiber y Norton, 2002). En el Pacífico Central Mexicano se ha registrado una disminución en sus poblaciones. Las causas de esta notable disminución parecen estar asociadas a cambios en las condiciones del mar y/o por contaminación de origen antrópico. Estos factores reducen la disponibilidad y abundancia de su alimento y, en consecuencia, el éxito reproductivo se ve afectado, lo que ocasiona que las aves dejen el nido y sus huevos o polluelos queden expuestos a (Burger y Gochfeld, 2000).

Aunque en la actualidad su tendencia poblacional parece estar disminuyendo, no se cree que sea lo suficientemente rápido para acercarse a los umbrales de vulnerable en la población, por lo que la especie se evalúa como preocupación menor en la lista roja de IUCN (IUCN, 2018). Su población mundial se estima en más de 200.000 individuos según BirdLife International 2022 y con su tendencia poblacional actual en declive. Actualmente no se encuentra dentro de la NOM-059-SEMARNAT (SEMARNAT, 2019).

### 6.3 Recolección de muestras y análisis

La recolección de muestras se llevó a cabo los días 12 y 16 de marzo de 2020, en la temporada reproductiva del *S. nebouxii* y *S. leucogaster* específicamente en la zona de anidación en ambas islas. Se seleccionaron de forma aleatoria 20 nidos de cada especie y en cada isla, cada uno se marcó y número de forma consecutiva para evitar ser repetidos. En cada nido se capturaron individuos adultos de machos y hembras usando una red de aro. Por cada individuo capturado se obtuvieron cuatro plumas escapulares o cuatro del pecho. Las plumas recolectadas se encontraban completamente desarrolladas y no desgastadas, lo que indica que se habían sintetizado durante las semanas/meses antes de la reproducción.

Las aves fueron manipuladas en la mañana, entre las 07:00 am y 10:00 am, con el fin de evitar que los adultos volaran y los huevos o pollos fueran depredados por las gaviotas patas amarillas (*Larus livens*) y los cuervos (*Corvus corax*). El tiempo total de manipulación, desde que se capturó al ave hasta que se la liberó, fue de alrededor de seis minutos para evitar que se estresaran y, regurgitaran o dejaran el nido desatendido por mucho tiempo. Durante el tiempo de la manipulación se cubrió el nido con una tela para evitar la depredación o que estuvieran expuestos al sol. Las muestras de plumas se colocaron en bolsas de papel donde se separaron en bolsas de plástico con cierre hermético para metales pesados e isótopos para su posterior análisis. La identificación de las presas reportadas para ambas especies dentro del Golfo de California se consultó en la bibliografía y se obtuvieron los datos isotópicos de las presas reportadas para estas especies.

### 6.4 Análisis isotópico

#### 6.4.1 Trabajo de Laboratorio

Previo al análisis, las plumas se limpiaron de los contaminantes de la superficie usando agua tibia (50 ° C) en un limpiador ultrasónico durante 5 min y se secaron a temperatura ambiente durante 24 h para después molerse en un mortero hasta lograr un polvo fino de las plumas. Se pesaron submuestras de materiales en polvo con una precisión y se colocaron en cápsulas de estaño para las determinaciones de  $\delta^{13}\text{C}$  y  $\delta^{15}\text{N}$ . Los análisis isotópicos se realizaron en el

Laboratorio de Isótopos Estables de la Estación Biológica de Doñana (LIE-EBD, España; [www.ebd.csic.es/lie/index.html](http://www.ebd.csic.es/lie/index.html)).

Todas las muestras se quemaron a 1020 ° C utilizando un sistema de espectrometría de masas de relación de isótopos de flujo continuo mediante un analizador elemental Flash HT Plus acoplado a un espectrómetro de masas de relación de isótopos Delta-V Advantage mediante una interfaz CONFLO IV (Thermo Fisher Scientific, Bremen, Alemania).

Las diferencias en la composición isotópica se expresan en la notación delta ( $\delta$ ) como la desviación de los estándares en ppm (‰), según la siguiente ecuación:

$$\delta^{15}\text{N} \text{ o } \delta^{13}\text{C} = [(R_{\text{sample}} / R_{\text{standard}}) - 1] \times 1000 \quad (1)$$

Donde R es la relación de  $^{15}\text{N}$  o  $^{13}\text{C}$  para la muestra y el estándar, respectivamente. Los estándares internacionales para expresar las relaciones isotópicas estables son N atmosférico (AIRE) ( $\delta^{15}\text{N} = 0.004 \text{ ‰}$ ) para nitrógeno y Vienna Pee Dee Belemnite (VPDB) ( $\delta^{13}\text{C} = 0.011 \text{ ‰}$ ) para Carbono.

Los ensayos replicados de los estándares insertados de forma rutinaria dentro de la secuencia de muestreo indicaron errores de medición analítica de  $\pm 0.1\text{‰}$  y  $\pm 0.2 \text{ ‰}$  para  $\delta^{13}\text{C}$  y  $\delta^{15}\text{N}$ , respectivamente. Los patrones utilizados fueron: EBD-23 (cuerno de vaca, patrón interno), LIE-BB (barbas de ballena, patrón interno) y LIE-PA (plumas de Razorbill, patrón interno). Estos patrones de laboratorio fueron previamente calibrados con patrones internacionales suministrados por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA, Viena).

#### 6.4.2 Análisis de datos

Se generó una gráfica de dispersión donde se muestran los valores de  $\delta^{13}\text{C}$  y  $\delta^{15}\text{N}$  de cada uno de individuos, separados por machos y hembras de ambas especies en las dos islas. Esto se hizo para tener una primera impresión del agrupamiento de los individuos y la posición de las cuatro poblaciones en el espacio isotópico. Posteriormente se calcularon elipses estándar para

delimitar el nicho isotópico de cada población mediante el paquete SIBER (Jackson *et al.*, 2011) en el software R y se describieron las características métricas del nicho isotópico con métricas cuantitativas desarrolladas por Layman, (2007). Estas métricas cuantitativas proporcionan una perspectiva sobre la estructura trófica de la población, es decir sobre cómo se organizan los individuos de cada población en el espacio isotópico. Finalmente se determinó el área de coincidencia o traslape entre las elipses de cada población.

Las métricas de nicho calculadas para cada población fueron:

- 1. Valores de  $\delta^{13}\text{C}$  y  $\delta^{15}\text{N}$ :** Muestran los valores medios de las proporciones de isótopos estables de  $\delta^{13}\text{C}$  y  $\delta^{15}\text{N}$  de todos los individuos de la población. Se calcularon para las dos especies y las dos islas.
- 2. Rango  $d^{15}\text{N}$  (NR):** Distancia entre los dos puntos con los valores  $d^{15}\text{N}$  más enriquecidos y más empobrecidos (máx. y mín.) de cada población, es decir, un rango mayor en  $d^{15}\text{N}$  entre los consumidores sugiere más niveles tróficos y por lo tanto un mayor grado de diversidad trófica. Igualmente calculamos cuatro, una para cada especie e isla.
- 3. Rango  $d^{13}\text{C}$  (CR):** Estima la distancia entre las dos especies con los valores de  $d^{13}\text{C}$  más enriquecidos y más empobrecidos (máx. y mín.). Un CR incrementado, se esperaría en redes alimentarias en las que hay múltiples recursos basales con diferentes valores de  $d^{13}\text{C}$ , proporcionando la diversificación de nichos en la base de un alimento. También se calculó para las cuatro poblaciones.
- 4. Área Total (TA):** Área del mínimo polígono convexo que contienen los puntos de cada población en el espacio bi-plot  $d^{13}\text{C}$   $d^{15}\text{N}$ . Es decir, es una representación gráfica en forma de polígono convexo que engloba todos los puntos de todos los individuos de la población. TA Representa la cantidad total de espacio de nicho ocupado y, por lo tanto, una aproximación de la extensión total de diversidad trófica de la población muestreada. Esta medida muestra el grado de diversidad trófica, cuanto mayor es el área (TA), significa mayor diversidad. Se calcularon cuatro, una para cada población.

5. **Área de la elipse estándar (SEA):** Medida promedio del área alrededor del centro del nicho isotópico de, la población, no afectado por el tamaño de la muestra.
6. **Área de la elipse estándar corregida (SEAc):** Corrección del tamaño de muestra, evitando sesgo cuando los tamaños de muestra son muy pequeños y mejora la precisión de los resultados.
7. **Distancia media al centroide (CD):** distancia media euclidiana de cada individuo al centroide o punto medio, de la elipse que se representa el total de la población. Esta métrica proporciona una medida de la diversidad trófica de la población muestreada. Es decir, da una idea del grado de espaciamiento entre los individuos de la población. Cuanto mayor sea CD más espaciados están los valores isotópicos de los individuos del centro de la población. Se calcularon cuatro, una por población.
8. **Distancia media al vecino más cercano (NND):** Distancias euclidianas al vecino más cercano de cada individuo en el espacio de bi-plot y por lo tanto una medida de la densidad o agrupamiento de los individuos. Igualmente, se calcularon cuatro, una por población.
9. **Desviación estándar de la distancia del vecino más cercano (SDNND):** Desviación estándar de la media anterior. Medida de la uniformidad de la distribución de los individuos en el bi-plot. Valores bajos de SDNND sugieren distribución más uniforme de los nichos tróficos. Igualmente, se calculan cuatro, una por población.
10. **Solapamiento de nicho trófico o elipses estándar:** Se calcula el porcentaje de superficie que comparten las áreas de las distintas elipses (TA) de cada población en el espacio bi-plot. Indica el grado de especialización de las poblaciones en su dieta. Cuando los nichos se superponen, existe competencia por el mismo alimento. Si los nichos son muy diferentes entre sí, las poblaciones que comparten hábitat no compiten entre sí. Los valores próximos a 0 indican bajo solapamiento, es decir que no están en competencia por sus recursos de alimentación. Valores próximos a de 1 indican que están completamente sobrelapados

(Jackson, 2013). Como tenemos cuatro poblaciones, se calculan solapamientos de las cuatro poblaciones de las dos especies por cada isla y de las dos poblaciones de la misma especie.

Finalmente, para estimar la composición de la dieta de cada población, se utilizó la composición isotópica de los consumidores (Aves) y de sus principales presas (peces) para calcular la contribución a la dieta de cada presa con base en los valores isotópicos de las presas disponibles. Para ello usamos el paquete SIMMR (Parnell, 2016) en el software R, que contiene un modelo de mezcla que trabaja con un enfoque estadístico bayesiano y que permite estimar la contribución proporcional de cada fuente (presa) dentro de una mezcla (tejido de consumo) y con ello inferir la composición de la dieta, con ello se generaron gráficos de la distribución porcentual de las principales presas para cada una de las cuatro poblaciones, por especie e isla.

Después de eso, se estimó la relación entre cada una de las fuentes para conocer la fiabilidad de los resultados del modelo. Este cálculo se hizo también usando el paquete SIMMR, en R. Para los dos cálculos usamos los valores de las presas reportadas en la bibliografía, para Isla San Ildefonso y las más comunes en otras islas del Golfo de California (Mellink *et al.*, 2000; Weimerskirch *et al.*, 2009; Gonzales Medina *et al.*, 2015; Gonzales *et al.*, 2018). Tabla 2.

**Tabla 2.** Valores de  $\delta^{13}\text{C}$  y  $\delta^{15}\text{N}$  (promedio +/- DE), presas principales de *S. nebouxii* y *S. leucogaster*.

Especies de presa	Meand <sup>13</sup> C	SDd <sup>13</sup> C	Meand <sup>15</sup>	SDd <sup>15</sup> N	Fuente
<i>Sardinops caeruleus</i>	-17.25	1.24	15.77	1.49	Torres <i>et al.</i> , 2014
<i>Selar crumenophtalmus</i>	-17.72	0.24	15.36	0.32	Torres Rojas <i>et al.</i> , 2014
<i>Anchoa spp</i>	-16.59	0.6	17.45	0.7	Gonzales Medina <i>et al.</i> , 2018
<i>Cetengraulis mysticetus</i>	-15.85	1.3	17.47	0.7	Gonzales Medina <i>et al.</i> , 2018
<i>Engraulis mordax</i>	-17.47	0.9	17.59	0.59	Gonzales Medina <i>et al.</i> , 2018
<i>Opisthonema libertate</i>	-15.16	1.6	17.85	0.4	Gonzales Medina <i>et al.</i> , 2018

Para el cálculo de la contribución de cada presa a la dieta, se usa un factor de discriminación para cada isótopo. Este factor aditivo representa la diferencia entre el valor isotópico de un



determinado tejido en el consumidor en comparación con el valor isotópico de su alimento, asumiendo que el tejido consumidor está en equilibrio con la comida y corrige la diferencia entre la composición isotópica de la dieta y del tejido analizado (Deniro y Epstein, 1978). Debido a que no se han realizado estudios controlados para determinar el factor de discriminación específico de estas especies, se consideró el  $\delta^{13}\text{C}$  y de las aves y de las presas y un factor de discriminación de  $\delta^{13}\text{C}$  de 0.4 ‰ (1 SD = 1.3 ‰), y  $\delta^{15}\text{N}$  de 3.4 ‰ (1 SD = 5.1 ‰) (Post, 2002).

## **6.5 Análisis de metales pesados**

Para determinar las concentraciones de metales pesados en las plumas de las dos especies de aves, se empleó un espectrofotómetro de absorción atómica utilizando la flama de aire acetileno. El análisis se realizó en el laboratorio de Espectrofotometría de absorción Atómica del CIBNOR. Las muestras de plumas se separaron en cuatro grupos, uno por cada especie e isla, y se digirieron 0.5 g de cada muestra seca en un recipiente de digestión de fluorocarbono, utilizando el método de digestión EPA 3052 H. Esta muestra es sometida a un proceso de digestión mediante la adición de ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) (6 mL) y peróxido de hidrógeno ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) (2 mL; ambas sustancias grado ULTREX II). La mezcla se dejó reaccionar por 1 hora y posteriormente se sometió en un ciclo de temperatura-presión en un horno de microondas CEM Mars5x. Durante el ciclo, el horno funcionó a un voltaje del 100% (1200 W) y siguió una rampa de presión-temperatura de 2 minutos a 165°C, posteriormente, 3 minutos a 175°C, y finalmente 5 minutos a 175°C; en los tres casos la muestra estuvo sometida a 300 PSI de presión. La sustancia resultante fue sometida a determinación de concentración de elementos con un espectrofotómetro de absorción atómica GBC AVANTA de acuerdo al método EPA 3052.

Para tener certeza de la elaboración del procedimiento se incluyó una muestra duplicada, dos muestras de material de referencia (TORT-3) que fue hepatopáncreas de langosta y un tubo blanco con las sustancias de reacción (ácido y peróxido).

### **6.5.1 Análisis estadístico**

Se generaron gráficos de barras de error donde se muestran las concentraciones de cada metal por especie e isla para una mejor visualización de la variabilidad en las concentraciones y se

empleó la prueba estadística de Chi-cuadrado de Pearson ( $\chi^2$ ) (Pearson, 1900), para evaluar las diferencias significativas entre las concentraciones de los metales. Esta prueba mide el grado en que las frecuencias observadas difieren de las frecuencias esperadas bajo la hipótesis nula de independencia. Los valores esperados resumen la relación entre las especies de cada isla y las concentraciones de los metales pesados. Los valores esperados se calculan bajo la hipótesis nula de que no existe asociación entre las especies en las dos islas y las concentraciones de los metales pesados.

Este estadístico se calcula como;

$$\chi^2 = \sum \frac{(f_o - f_t)^2}{f_t} \quad (2)$$

Dónde:  $\chi^2$ =Pearson. = todas las celdas.

$f_o$  =Observado,

$f_t$ = Esperado

Para la determinación de los grados de libertad se empleó el siguiente cálculo:

$$gl = (r-1) \times (c-1) \quad (3)$$

Dónde:

$gl$ = grados de libertad

$r$ =número de filas

$c$ = número de columnas

Se obtuvieron 6 grados de libertad, tomando en cuenta la distribución de  $X^2$  se con un margen de error de 0.05.

## 7. RESULTADOS

### 7.1. Aves muestreadas

En este estudio se capturaron 82 aves; de *S. nebouxii* fueron 22 en isla San Ildefonso y 20 en isla Tortuga, y de *S. leucogaster* 20 en San Ildefonso y 20 en isla Tortuga. Los sexos de los individuos se determinaron en base a las características físicas de cada especie. En la Tabla 3 se describe el número de adultos (1 o 2), total y por sexo, así como el número de adultos que se encontraban en el nido al momento de realizar el muestreo.

**Tabla 3.** Descripción de los individuos muestreados de cada especie en las dos islas. SI=San Ildefonso TO=Tortuga

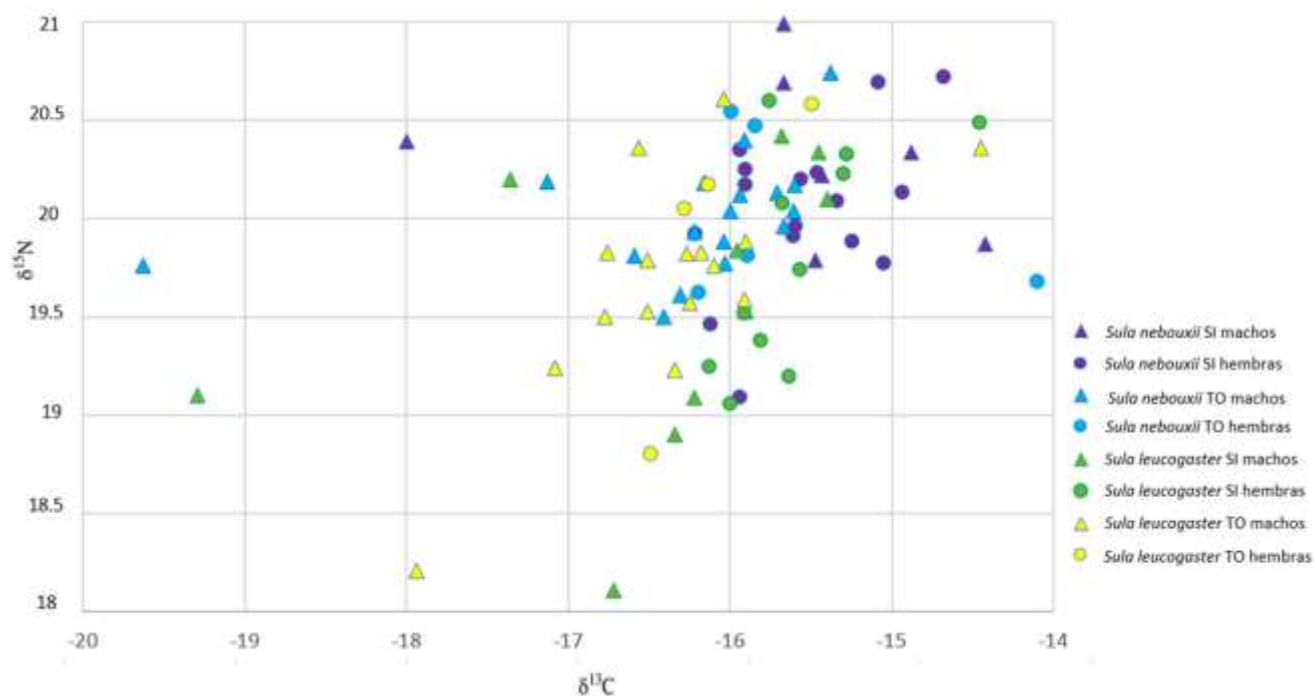
Especie e isla	Hembras	Machos	Total	Adultos en el nido	
				1	2
<b>Isla San Ildefonso</b>					
<i>S. nebouxii</i>	15	7	22	20	2,1 muerto
<i>S. leucogaster</i>	10	10	20	16	4
<b>Isla Tortuga</b>					
<i>S. nebouxii</i>	10	10	20	15	5
<i>S. leucogaster</i>	3	19	20	17	3

### 7.2 Análisis de isótopos estables

#### 7.2.1 Posición trófica y diferencias ente islas y especies

##### 7.2.1.1 Gráficos de dispersión

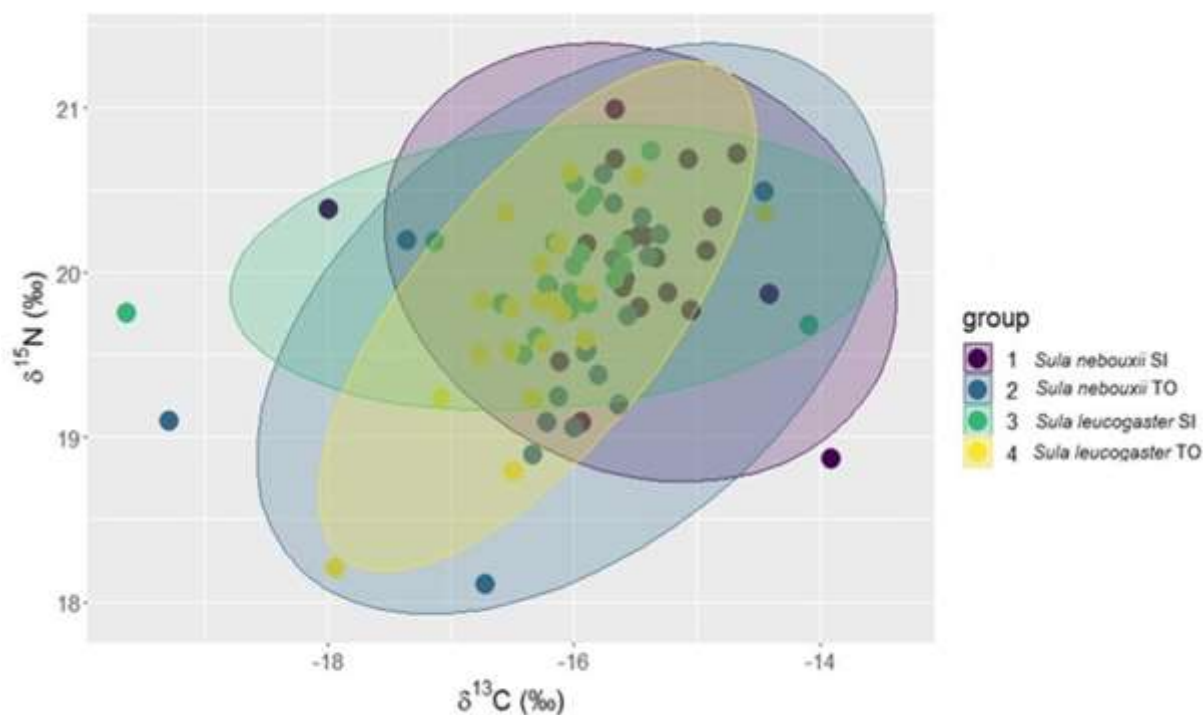
Los puntos de dispersión de los valores de  $\delta^{13}\text{C}$  y  $\delta^{15}\text{N}$  en las plumas de adultos de *S. nebouxii* y *S. leucogaster* de las poblaciones de isla San Ildefonso e isla Tortuga, se muestran en la Figura 2. La población de cada isla esta diferenciado por un color y dentro de cada población, los machos se representan con un triángulo y las hembras con un círculo. El rango de  $\delta^{13}\text{C}$  va de -20 a -14. En cuanto al  $\delta^{15}\text{N}$ , los rangos van de 18 a 21. Se observan dos machos con valores muy negativos de  $\delta^{13}\text{C}$  y otros dos con valores muy bajos de  $\delta^{15}\text{N}$ , el resto conforman grupos homogéneos.



**Figura 2.** Valores isotópicos de  $\delta^{13}\text{C}$  y  $\delta^{15}\text{N}$  en *S. neboxii* y *S. leucogaster* en isla San Ildefonso (SI) e isla Tortuga (TO).

### 7.3 Representación gráfica del nicho isotópico

La representación gráfica del nicho isotópico mediante elipses estándar muestra un área común o central donde coinciden las cuatro poblaciones. A partir de esta área central, cada una se va diferenciando hacia valores menores de  $\delta^{15}\text{N}$  (efecto notorio en las dos poblaciones de *S. leucogaster*) y hacia valores más negativos de  $\delta^{13}\text{C}$  (las dos poblaciones de Tortuga) (Figura 3). A continuación, se detallan las características del nicho de cada población.



**Figura 3.** Elipses estándar de isótopos estables de *S. neboxii* y *S. leucogaster* en isla San Ildefonso (SI) e isla Tortuga (TO).

## 7.4 Amplitud de nicho

### 7.4.1 Características métricas del nicho isotópico

Los valores de  $\delta^{13}\text{C}$  (‰) fueron diferentes entre cuatro las poblaciones (Anova  $F_{(3,84)} = 3.93$ ,  $P = 0.01$ ). Los dos grupos que mostraron diferencias significativas (Tuckey, post hoc test = 0.008) fueron *S. neboxii* de San Ildefonso, con el valor menos negativo (en esta población los individuos muestreados fueron mayoritariamente hembras -Tabla 3) y *S. leucogaster* de Tortuga con el valor más negativo (fueron más machos en la muestra). En general los valores fueron menos negativos en San Ildefonso que en Tortuga para las dos especies, lo que indica presas más cercanas a la costa (Tabla 4).

El rango de los valores de  $\delta^{13}\text{C}$  más amplio (5.53) correspondió a la población de *S. neboxii* en isla Tortuga, un poco mayor que para la misma especie en San Ildefonso (Tabla 4). El rango de

$\delta^{13}\text{C}$  más estrecho (3.49) lo presentaron los individuos de *S. leucogaster* en Tortuga (más machos), más estrecho que la misma especie en San Ildefonso y también más pequeño que los dos *S. neboxii* (Tabla 4).

Los valores de  $\delta^{15}\text{N}$  resultaron más positivos en *S. neboxii* que en *S. leucogaster* en ambas islas, es decir presas de mayor nivel trófico, y el test mostró que había diferencias significativas entre las poblaciones (Anova  $F_{(3,84)} = 3.32$ ,  $P = 0.02$ ). Aunque en este caso, el test de Tuckey no mostró diferencias significativas entre grupos. Las diferencias entre *S. neboxii* y *S. leucogaster* de San Ildefonso fueron las más marcadas (Tuckey, post hoc test = 0.06, n.s) (Tabla 4).

El rango de los valores de  $\delta^{15}\text{N}$  fue mayor en *S. leucogaster* que en *S. neboxii* en las dos islas. El rango más amplio (2.49) correspondió a la población de *S. leucogaster* en isla San Ildefonso. El rango mínimo correspondió a *S. neboxii* en isla Tortuga (1.24). (Tabla 4).

**Tabla 4.** Métricas de nicho de isótopos estables para cada especie e isla  $\delta^{13}\text{C}$  (‰) y  $\delta^{15}\text{N}$  (‰) = valores promedio +/- Desviación Estándar por población, CR = rango  $\delta^{13}\text{C}$  por población; NR = rango  $\delta^{15}\text{N}$  por población, CD= Distancia media al centroide por población, NND= Distancia media al vecino más cercano por población, SDNND= Desviación estándar de la distancia del vecino más cercano, por población.

Especie e isla	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	CR	NR	CD	NND
<b>SDNND</b>						
<b>Isla San Ildefonso</b>						
<i>S. neboxii</i>	-15.50 ± 0.7	20.08 ± 0.4	4.08	2.12	<b>0.70</b>	<b>0.37</b>
	0.43					
<i>S. leucogaster</i>	-15.99 ± 0.9	19.69 ± 0.6	4.83	<b>2.49</b>	<b>0.87</b>	<b>0.40</b>
	0.53					
<b>Isla Tortuga</b>						
<i>S. neboxii</i>	-16.10 ± 0.9	<b>20.01 ± 0.3</b>	<b>5.53</b>	<b>1.24</b>	0.65	0.35
	0.58					
<i>S. leucogaster</i>	-16.32 ± 0.6	19.71 ± 0.5	<b>3.49</b>	2.40	0.66	0.35
	0.31					

La distancia media al centroide (CD) es mayor en las dos poblaciones de San Ildefonso que en las de la isla Tortuga, lo que indica un mayor grado de separación entre los valores de los individuos de la población de San Ildefonso respecto al valor central de los individuos. Es decir, una mayor diversidad trófica en esta isla que en Tortuga. Sobre todo, en *S. leucogaster* de San Ildefonso (0.87) que presentó también el mayor rango de  $\delta^{15}\text{N}$  (2.49), la mayor área de la elipse (5.89) y la mayor distancia entre vecinos más cercanos (0.40).

La distancia media al vecino más cercano (NND), mide el agrupamiento de los individuos, mostró que las dos poblaciones de Isla Tortuga tienen a sus individuos más agrupados, es decir con valores tróficos más próximos entre sí que los de Isla San Ildefonso, aunque la diferencia es muy pequeña y la desviación estándar de la distancia del vecino más cercano (SDNND) es muy variable entre las cuatro poblaciones (Tabla 4).

Entre sexos de la misma población, no encontramos diferencias significativas en los valores medios de  $\delta^{13}\text{C}$  (‰) o  $\delta^{15}\text{N}$  (‰). (t. student, test, n.s). Tabla 5.

**Tabla 5.** Valores medios de  $\delta^{13}\text{C}$  (‰) y  $\delta^{15}\text{N}$  (‰), por poblaciones y sexos

Especie/ isla/ sexo	$\delta^{13}\text{C}$ (‰) (media +SD)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰) (media +SD)
<b>Isla San Ildefonso</b>		
<i>S. nebouxii</i> machos (n= 7)	<b>-15.64 ± 1.13</b>	20.32 ± 0.42
<i>S. nebouxii</i> hembras (n= 15)	<b>-15.43 ± 0.58</b>	19.98 ± 0.48
<i>S. leucogaster</i> machos (n=10)	-16.43 ± 1.16	19.56 ± 0.75
<i>S. leucogaster</i> hembras (n=10)	-15.59 ± 0.45	19.80 ± 0.55
<b>Isla Tortuga</b>		
<i>S. nebouxii</i> machos (n= 10)	-16.25 ± 0.96	20.01 ± 0.29
<i>S. nebouxii</i> hembras (n= 10)	-15.60 ± 0.85	20.02 ± 0.44
<i>S. leucogaster</i> machos (n=16)	<b>-16.34 ± 0.71</b>	19.69 ± 0.55
<i>S. leucogaster</i> hembras (n= 3)	<b>-16.09 ± 0.43</b>	19.9 ± 0.76

### 7.5 Sobrelapamiento de nichos tróficos

Las áreas del polígono y de la Elipse estándar fueron mayores en las poblaciones de isla San Ildefonso que de isla Tortuga (Tabla 6), lo que parece indicar, junto con el resto de parámetros de Layman, una zona de alimentación más amplia en las aves de esa isla que en las de Tortuga.

**Tabla 6.** TA= Área total SEA= Área de la elipse estándar SEAc= Área de elipse estándar corregidas.

Especie e isla	TA	SEA	SEAc
<b>Isla San Ildefonso</b>			
<i>S. nebouxii</i>	4.89	1.23	1.30
<i>S. leucogaster</i>	5.89	1.76	1.86
<b>Isla Tortuga</b>			
<i>S. nebouxii</i>	3.47	1.02	1.07
<i>S. leucogaster</i>	3.11	0.87	0.92



Con el área de la elipse estándar corregida para muestras pequeñas (SEAc) de cada población, se calculó el porcentaje de superposición (similitud) entre las cuatro poblaciones (Tabla 6).

Las especies anidando en la misma isla mostraron 70% de similitud de nicho en San Ildefonso, pero solo 48.6% en Tortuga. Es decir, hay más competencia entre las aves de San Ildefonso que entre las de Tortuga. Por especies *S. leucogaster* mantiene casi la misma amplitud de nicho en las dos islas, con un solapamiento entre las elipses del 90%, a pesar de que en isla Tortuga la muestra fue predominantemente de machos.

El área de nicho trófico de *S. nebouxii* de isla San Ildefonso (la muestra fue casi toda de hembras) solo solapó en un 58% con la población de *S. nebouxii* de Isla Tortuga (mitad hembras y mitad machos). El menor solapamiento se presentó entre la población de *S. nebouxii* en Isla San Ildefonso (hembras) con *S. leucogaster* de isla Tortuga (machos) con un valor del 30%. (Tabla 7).

**Tabla 7.** Traslape entre *S. nebouxii* y *S. leucogaster* en isla San Ildefonso (SI) e Isla Tortuga (TO).

Área de la elipse (SEAc) de cada población y porcentaje que traslapa con otras poblaciones	<i>S. nebouxii</i> SI Área de la elipse = 1.30	<i>S. leucogaster</i> SI Área de la elipse =1.86	<i>S. nebouxii</i> TO Área de la elipse =1.07	<i>S. leucogaster</i> TO Área de la elipse =0.92
<i>S. nebouxii</i> SI	1	0.727	0.58	<b>0.300</b>
<i>S. leucogaster</i> SI		1	0.731	<b>0.90</b>
<i>S. nebouxii</i> TO			1	0.486
<i>S. leucogaster</i> TO				1

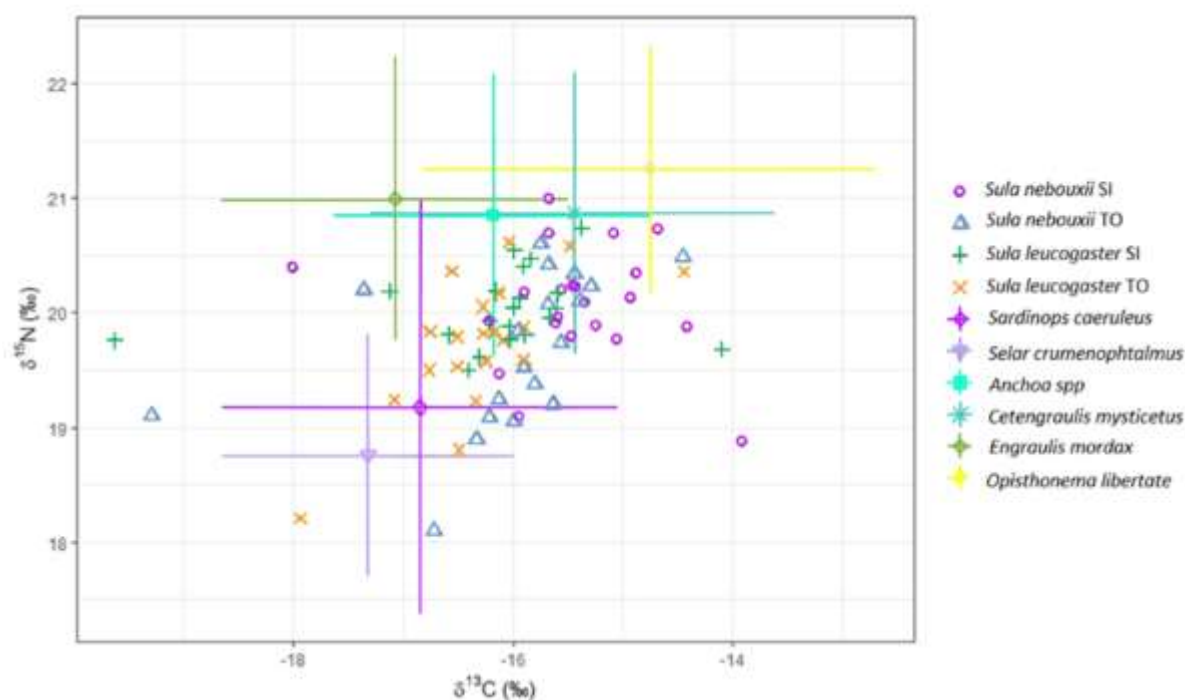
## 7.6 Composición de la dieta

### 7.6.1 Estimación de la contribución de las presas a la dieta de *S. neboxii* y *S. leucogaster*

Los valores isotópicos de  $\delta^{13}\text{C}$  y  $\delta^{15}\text{N}$  en plumas de *S. neboxii* y *S. leucogaster* en la Isla San Ildefonso e Isla Tortuga y los valores medios de sus presas muestran que los valores de las tres especies de peces pertenecientes a la familia Engraulidae (anchoas y anchovetas), *Anchoa sp*, *Engraulis mordax* y *Cetengraulis mysticetus*, tienen valores isotópicos muy similares.

Los dos peces de la familia Cupleidae (Sardinas y arenques), *Sardinops caeruleus* y *Opisthonema libertate* sin embargo tuvieron valores isotópicos muy diferentes, teniendo las sardinas niveles bajos de  $^{15}\text{N}$  y muy negativos de  $^{13}\text{C}$  y los arenques niveles altos de  $^{15}\text{N}$  y menos negativos de  $^{13}\text{C}$ .

La especie *Selar crumenophtalmus*, perteneciente a la familia Carangidae, tiene valores de  $\delta^{13}\text{C}$  y  $\delta^{15}\text{N}$  cercanos a *Sardinops caeruleus* (Figura 4).



**Figura 4.** Valores isotópicos de  $\delta^{13}\text{C}$  y  $\delta^{15}\text{N}$  de *S. neboxii* y *S. leucogaster* y sus presas potenciales en Isla San Ildefonso (SI) e isla Tortuga (TO).

## 7.7 Contribución de las presas a la dieta de cada especie por isla

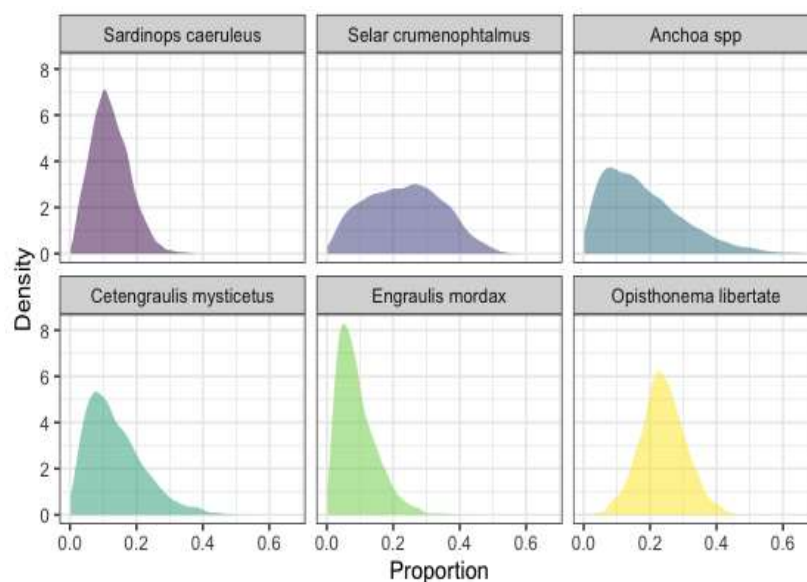
**Tabla 8.** Porcentajes corregidos de las presas en la dieta de las cuatro poblaciones.

Especie e isla	Cupleidae		Cupleidae Total	Engraulidae		Engraulidae Total	Carangidae
	<i>Sardinops caeruleus</i>	<i>Opisthonema libertate</i>		<i>Anchoa</i>	<i>Engraulis mordax</i> y <i>Cetengraulis mysticetus</i>		
<b>Isla San Ildefonso</b>							
<i>S. neboxii</i>	28.7	23.9	52.6	17.3	22.8	40.1	7
<i>S.leucogaster</i>	44.24	15.4	59.6	14.7	18.1	32.8	7.6
<b>Isla Tortuga</b>							
<i>S. neboxii</i>	7.4	15.9	23.3	42.72	20	62.7	14.04
<i>S.leucogaster</i>	40.1	9.7	49.8	18.4	19.8	38.2	12.09

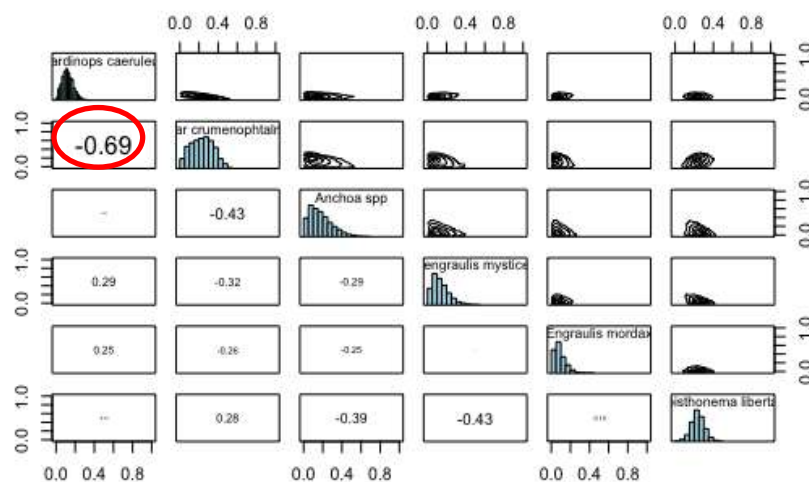
### 7.7.1 *Sula neboxii* en Isla San Ildefonso e isla Tortuga

El modelo de mezcla mostró la posible contribución de las fuentes (presas) a la dieta de la población de *S. neboxii* (Figura 5). Según el modelo, en la isla de San Ildefonso, las dos presas con mayor contribución a la dieta serían, *Selar crumenophthalmus* (23.6%) y *Opisthonema libertate* (23.9%), junto con *Anchoa spp* (17.5%).

Sin embargo, el modelo arrojó una correlación negativa bastante alta (-0.69) entre *Sardinops* 12.1% y *Selar* (23.6%), esto quiere decir que al correr las cadenas de Markov, en 6.9 de cada 10 ocasiones no pudo distinguir bien entre estas dos fuentes, porque están muy próximas en el espacio isotópico (Figura 5 y Figura 6).



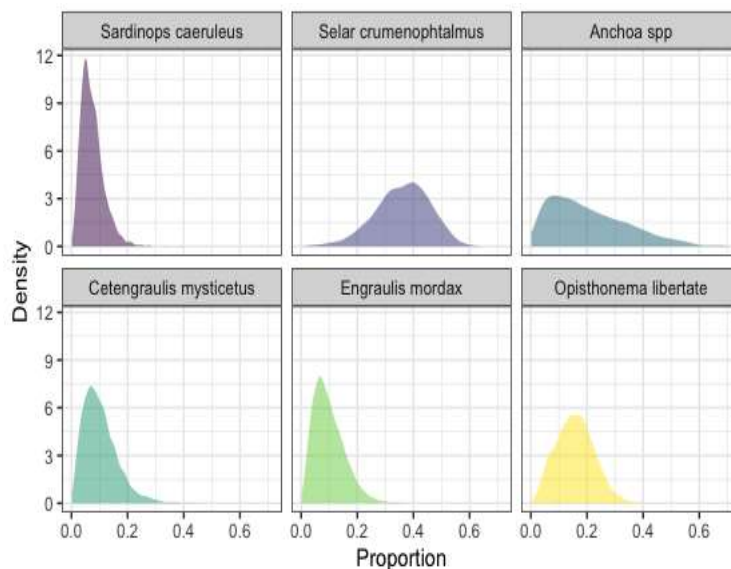
**Figura 5.** Gráfico de densidad de las presas en la dieta de *S. neboxii* en San Ildefonso.



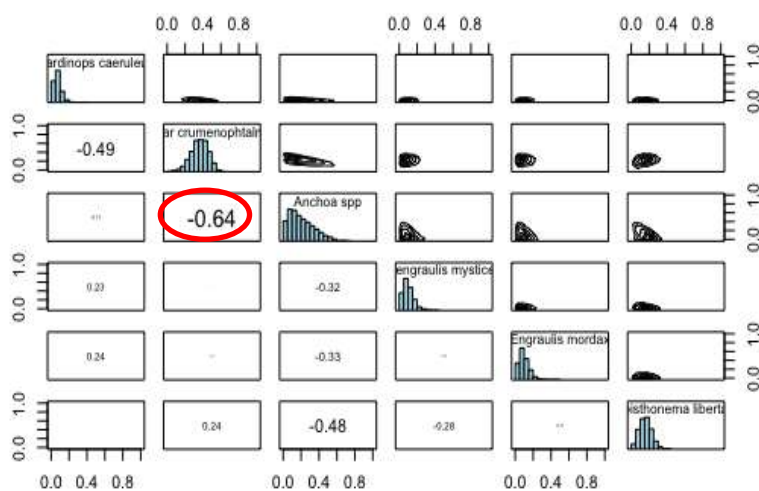
**Figura 6.** Gráfico de matrices para *S. neboxii* en San Ildefonso.

Teniendo esto en cuenta estos resultados, y al hacer la corrección correspondiente, asignado 6.9 del porcentaje original de *Selar crumenoptalmus* a *Sardinops caeruleus*, el porcentaje de *Sardinops caeruleus* podría llegar hasta 28.7%, que junto con *Opisthonema libertate* (23.9%) elevaría el porcentaje de Cupleidos desde 36.3 hasta 52.6%, Engraulidos quedaría en 40.1%, y Selar en 7%. (Tabla 8).

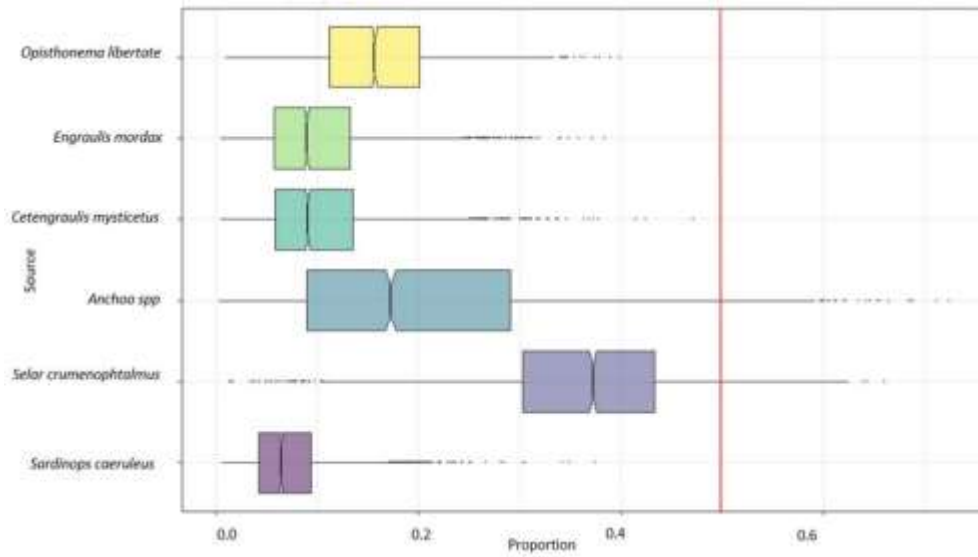
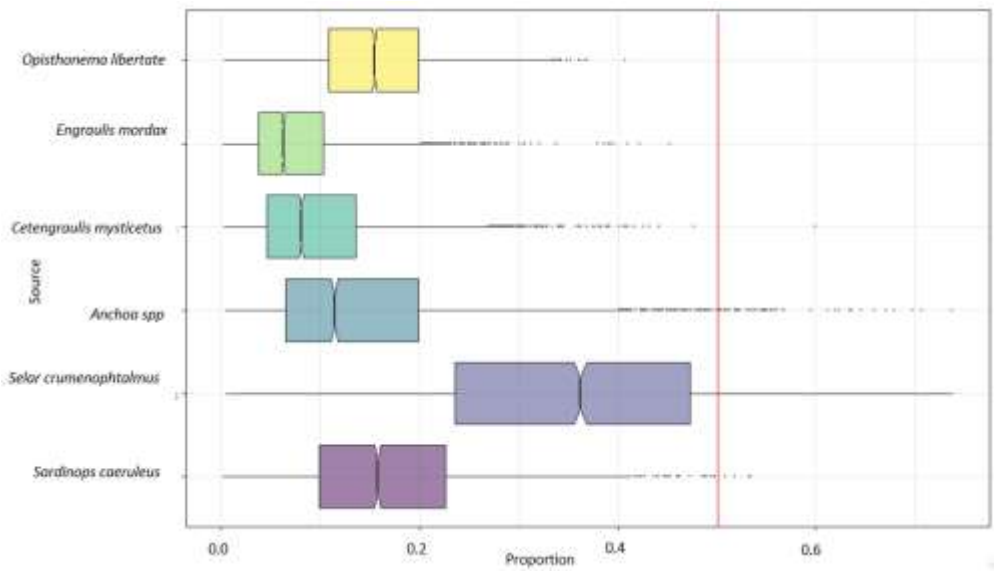
En isla Tortuga el resultado del modelo fue que la mayor aportación a la dieta proviene de *Selar crumenophthalmus* (36.0%) y *Anchoa spp* (20.8%), pero en este modelo apareció correlación negativa (-0.64) entre estas dos fuentes de alimento, por lo que, al aplicar la corrección, la proporción de *Anchoa* podría subir hasta 42.76%. En este caso Cupleidos representarían el 23.3% y Engraulidos oscilaría entre 40.8 6 y 62.7%, dejando a *Selar crumenophthalmus* en 14.04%. (Tabla 8).



**Figura 7.** Gráfico de densidad de las presas en la dieta de *S. neboxii* en Tortuga.



**Figura 8.** Gráfico de matrices para *S. neboxii* en Tortuga.

*Sula neboxii**Sula leucogaster*

**Figura 9.** Contribución de las presas en la dieta de *S. neboxii* y *S. leucogaster* en isla San Ildefonso

### 7.7.2 *Sula leucogaster* en Isla San Ildefonso e isla Tortuga

En la dieta de *S. leucogaster* de isla San Ildefonso la mayor contribución proviene de *Selar crumenophtalmus* (34.8%), y *Sardinops caeruleus* (17.1%), pero la correlación entre ellas es de (-0.80), es decir que el modelo no pudo distinguir las dos fuentes en 8 de cada 10 ocasiones. El tercer lugar en importancia lo comparten *Anchoa spp* (14.7%) y *Opisthonema libertate* (15.4%).

En este caso, después de la corrección, *Sardinops* subiría a 44.24%, el porcentaje de Cupleidos en la dieta se elevaría desde 32.4 a 59.6%. 32.8% serían Engraulidos y 7.6% *Selar*. (Tabla 8).

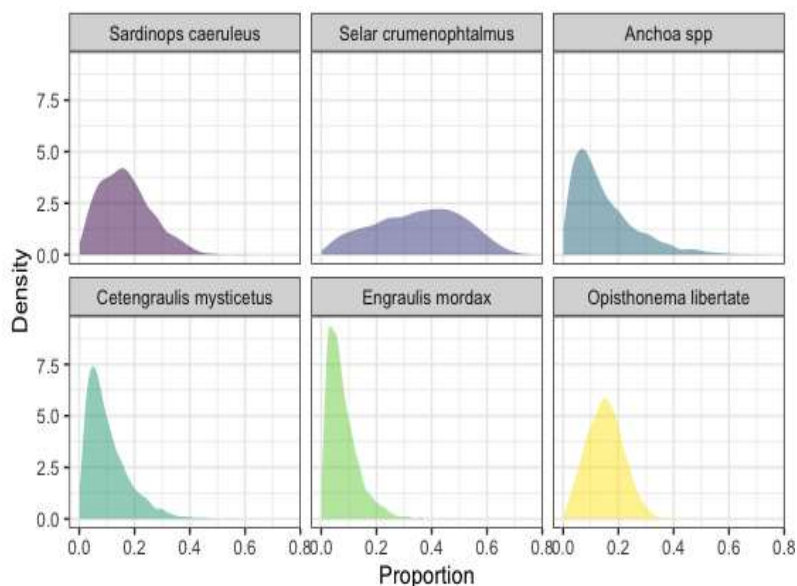


Figura 10. Gráfico de densidad para *S. leucogaster* en San Ildefonso.

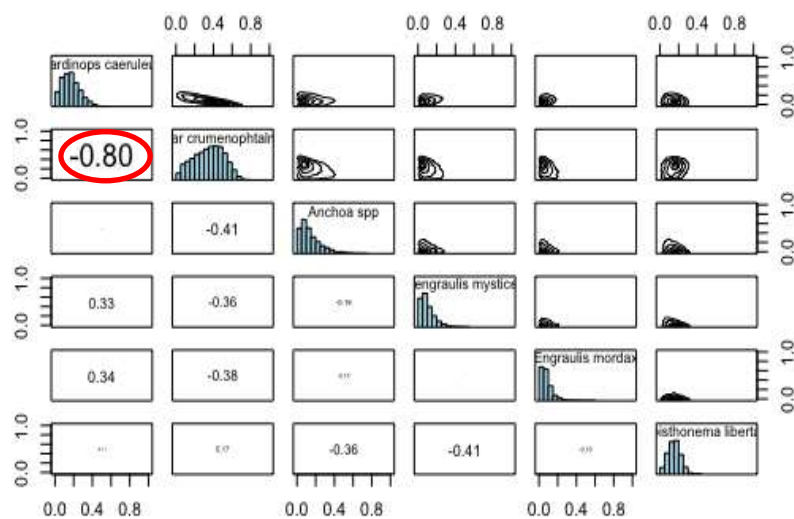
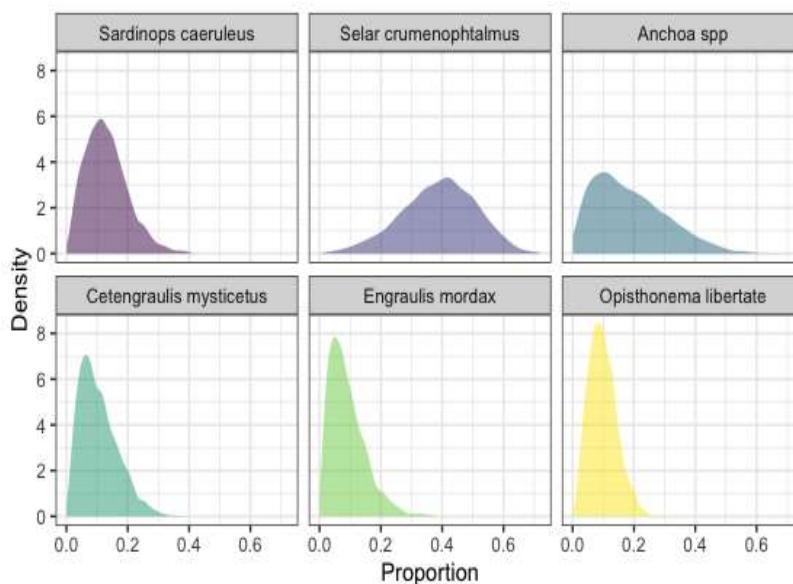
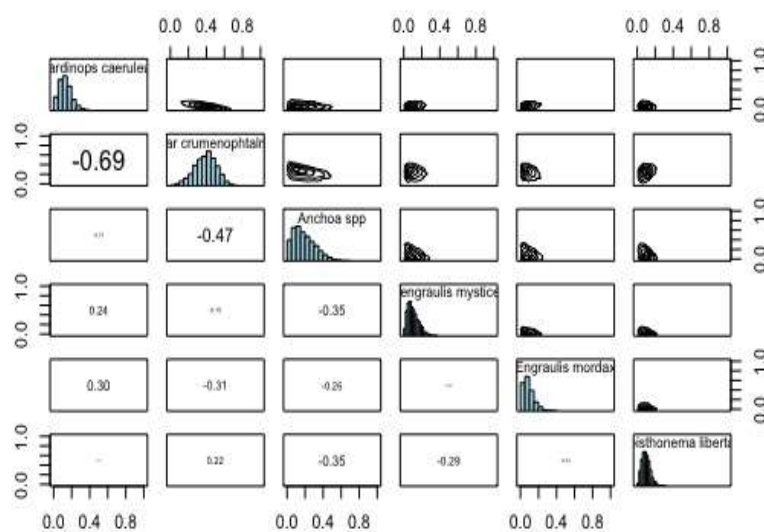


Figura 11. Gráfico de matrices para *S. leucogaster* en San Ildefonso.

En isla Tortuga las presas que mostraron mayor aportación a la dieta de *S. leucogaster* también fueron *Selar crumenophtalmus* (38.8%) y *Anchoa spp* (18.6%) (Figura 6). Aquí el modelo tuvo una correlación negativa de (-0.69) entre *Sardinops* y *Selar*. Por lo que, después de la corrección, la proporción de *Sardinops*, que el modelo da en 13.1% podría subir hasta 40.01%. En este caso la proporción de Cupleidos pasaría de 22.8 a 49.71%, Engraulidos quedaría en 38.2% y *Selar* quedaría en 12.09%. (Tabla 8).

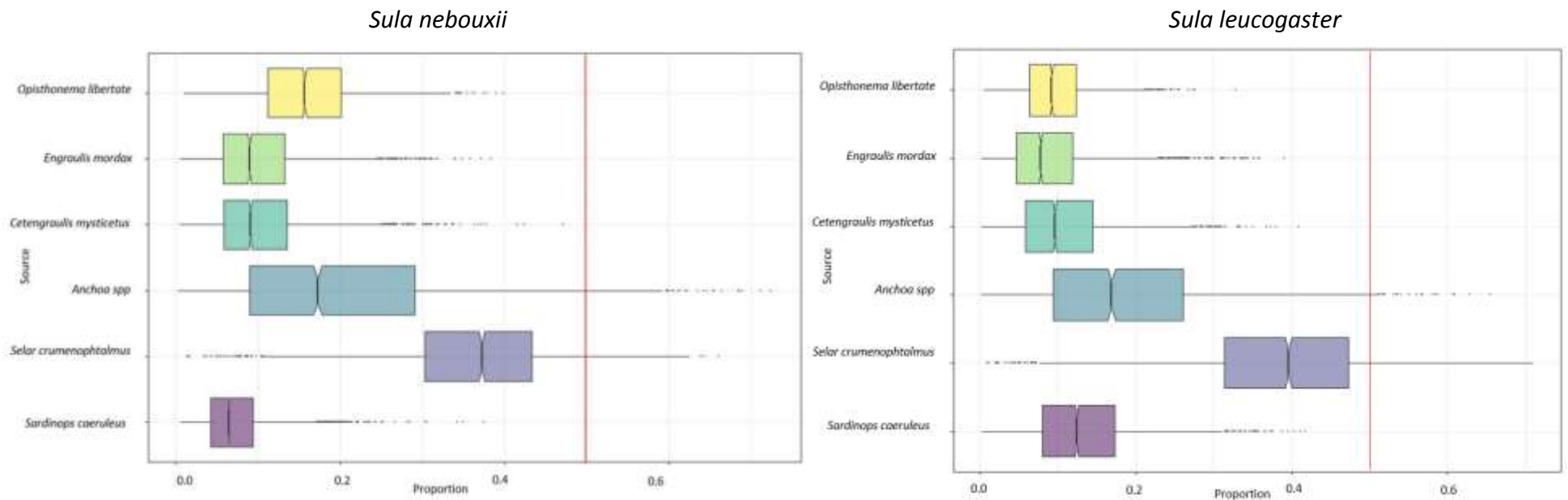


**Figura 12.** Gráfico de densidad para *S. leucogaster* en San Ildefonso.



**Figura 13.** Gráfico de matrices para *S. leucogaster* en San Ildefonso.





**Figura 14.** Contribución de las presas en la dieta de *S. neboxii* y *S. leucogaster* en Tortuga.

## 7.8 Comparación de proporciones de las presas por grupo

### 7.8.1 *Selar crumenophtalmus*

*Selar crumenophtalmus* fue la presa que mostró un mayor aporte a la dieta de las dos especies de Bobos en ambas islas. Este pez fue más consumido por *S. leucogaster* y en proporciones similares en las dos islas. 36.4 % en Tortuga 0.387% y en San Ildefonso 0.361%. Los *S. neboxii* de isla Tortuga también la consumieron bastante 0.349% y solo *S. neboxii* en San Ildefonso consumió esta presa en menor cantidad 0.254%. (Figura 7A).

La *Anchoa spp* fue la segunda especie de presa en importancia en la dieta de las dos especies de bobos en ambas islas, con una contribución similar entre las cuatro poblaciones. Contribuye un 20% de la dieta de *S. leucogaster* tanto en San Ildefonso 0.203% como en isla Tortuga 0.188%. Los Bobos Patas Azules la consumieron un poco menos 0.172%. *S. neboxii* en San Ildefonso y 0.150% la población de *S. neboxii* de Tortuga. (Figura 7B).

*Opisthonema libertate* fue muy variable en la dieta de ambas especies. La población que más la consumió de *S. neboxii* de Isla San Ildefonso 0.242, mientras que en isla Tortuga *S. neboxii* la consumieron en 0.152%. *S. leucogaster* de San Ildefonso la consumieron en 0.158% y en Tortuga 0.09 %. (Figura 7C). El modelo de mezcla correspondiente a *Sardinops caeruleus* muestra que la población que más consumió esta presa fue *S. neboxii* de isla Tortuga 0.171%, seguida de *S. leucogaster* 0.133% en la misma isla. En San Ildefonso, *S. neboxii* la consumió 0.120%. Los *S. leucogaster* la consumieron un poco menos 0.074%. (Figura 7D).

### 7.8.2 Comparación de proporciones de las presas por grupo

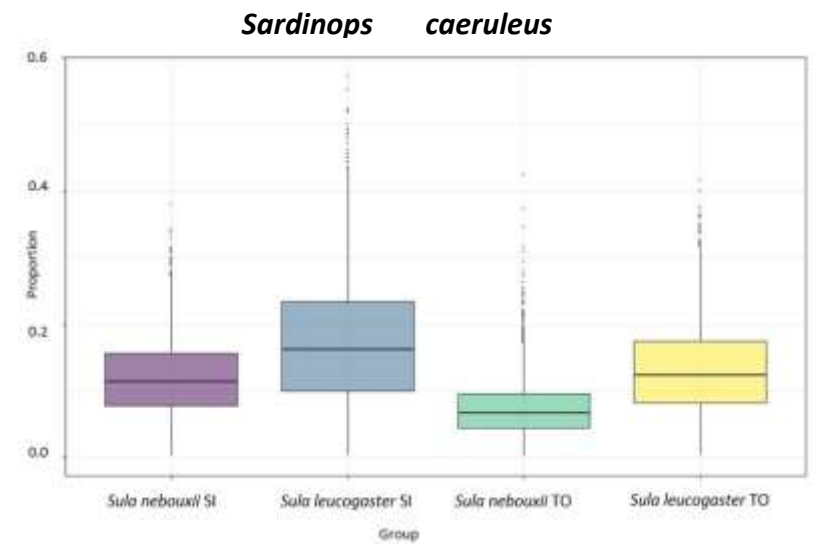
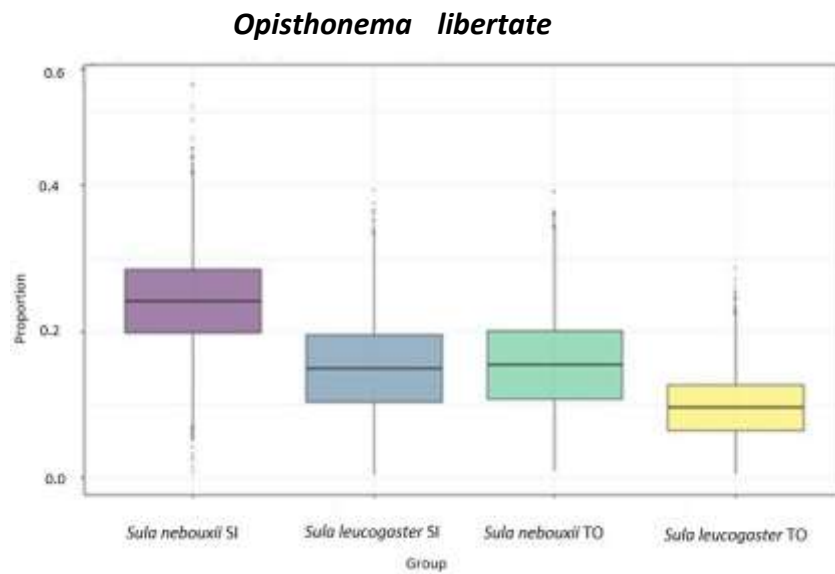
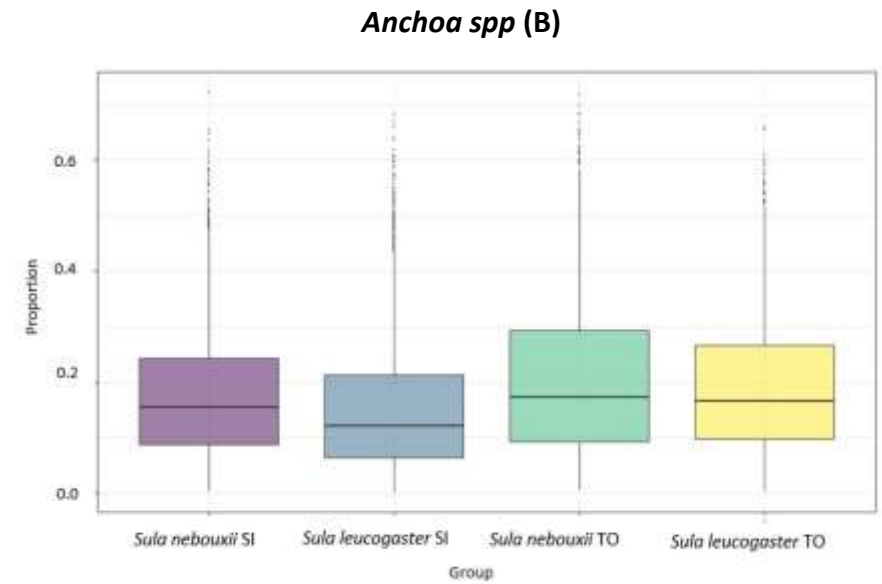
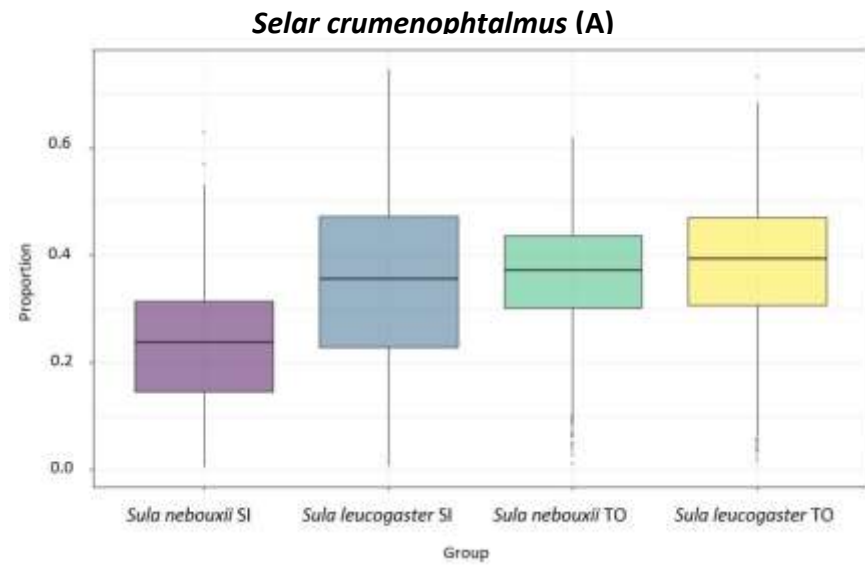
*Selar crumenophtalmus* parecía ser la presa que mayor aportaba a la dieta de las dos especies de Bobos en ambas islas. Según el modelo inicial representaba un 36.4% de la dieta total, y era más consumido en Tortuga que en San Ildefonso (Figura 14 A).

Pero al hacer la corrección tomando en cuenta la correlación que el modelo no pudo resolver entre *Selar* y *Sardinops* encontramos que su aportación bajó considerablemente (Tabla 8)

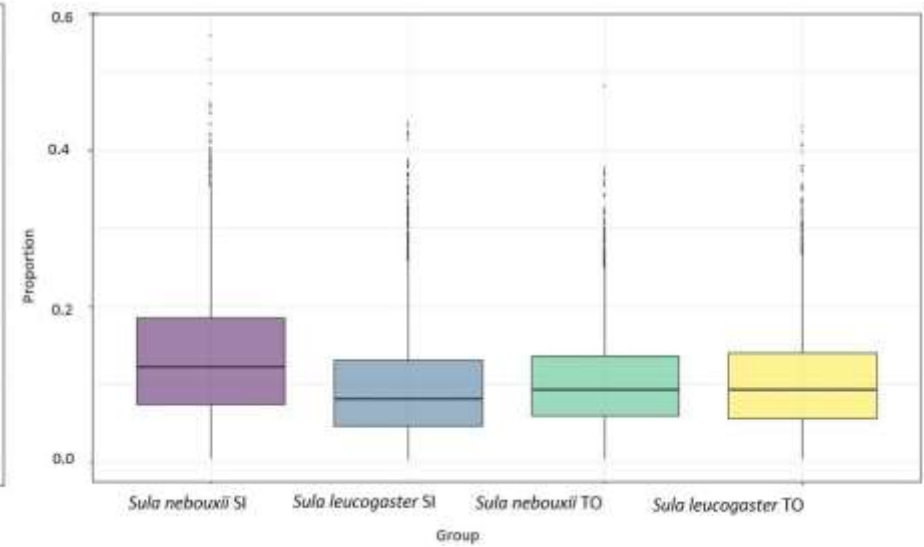
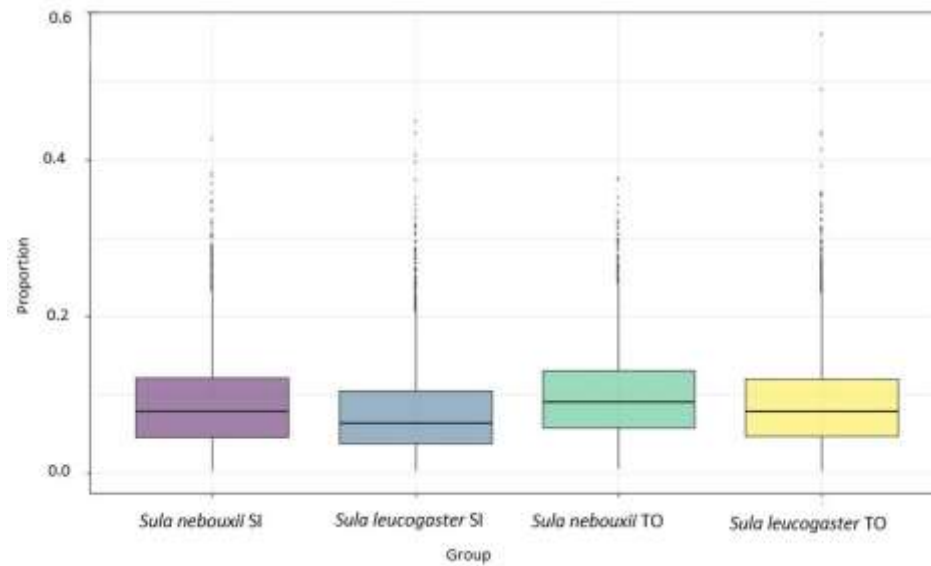
representado aproximadamente el 10.2% y quedando en cuarto lugar de importancia, siendo aún más consumido en Tortuga.

La *Anchoa spp* fue la segunda especie de presa en importancia en la dieta de las dos especies de bobos en ambas islas, en principio con una contribución similar entre las cuatro poblaciones, sobre 17% de la dieta. Pero al considerar la correlación existente con *Selar* en *S. neboxii* de Tortuga, la proporción consumida por esta población podría subir hasta 42.7% (Figura 14B). *Opisthonema libertate* fue muy variable en la dieta de ambas especies. La población que más la consumió de *S. neboxii* de Isla San Ildefonso (24.2%), y la que menos *S. leucogaster* en Tortuga solo 9 %, las otras dos alrededor de 15 %. (Figura 14C).

El modelo de mezcla correspondiente a *Sardinops caeruleus* muestra que la población que más consumió esta presa fueron las poblaciones de *S. leucogaster* en San Ildefonso (17.1%) y la que menos *S. neboxii* de Tortuga 7.4%. (Figura 14D). Sin embargo, si tenemos en cuenta la correlación que el modelo encuentra con *Selar*, los porcentajes variarían, quedando entonces como la presa más consumida en todas las poblaciones excepto en *S. neboxii* de Tortuga. Su importancia estaría sobre el 40% en las poblaciones de *S. leucogaster* (44% y 40%) y 28.7% *S. neboxii* en San Ildefonso. La población de *S. neboxii* en Tortuga, no cambiaría su bajo porcentaje de 7.4%. Las cuatro poblaciones consumieron *Engraulis mordax* en una proporción entre el 7 y el 10% (Figura 15E) y *Cetengraulis mysticetus*, entre el 10% y 13.8% (Figura 15F).



**Figura 15.** Contribución de las principales en la dieta de *S. neboxii* y *S. leucogaster* en isla San Ildefonso e Isla Tortuga.

*Engraulis mordax* (E)*Cetengraulis mysticetus* (F)

**Figura 16.** Contribución de las presas que menos contribuyen en la dieta de *S. neboxii* y *S. leucogaster* en isla San Ildefonso e Isla Tortuga.

## 7.9 Análisis de metales pesados

### 7.9.1 Concentración de Co, Cd, Pb y Zn en adultos de *S. nebouxii* y *S. leucogaster* en isla San Ildefonso e Isla Tortuga.

Las concentraciones de metales pesados en adultos de las dos especies, mostraron que Zinc fue uno de los metales con los valores más altos en ambas especies e islas. *S. nebouxii* tuvo los valores más altos de este elemento traza que los *S. leucogaster*. (Tabla 9).

El segundo metal con mayor concentración fue el Cobre. En este caso, el valor más alto lo presentaron los *S. leucogaster* en isla Tortuga y el valor más bajo los *S. leucogaster* de isla San Ildefonso. En Cadmio, *S. leucogaster* tuvo los valores ligeramente más altos que *S. nebouxii* en las dos islas, siendo de nuevo la población de Tortuga la que obtuvo el valor más alto. Respecto al Plomo, ninguna población presentó valores detectables en su tejido (Tabla 9).

**Tabla 9.** Concentración de metales pesados en muestras de plumas de *S. nebouxii* y *S. leucogaster*. Los valores están expresados en mg/kg referidos a peso seco. SI =San Ildefonso, TO=Tortuga. ND=No Detectado.

Espece e isla	Cu	Cd	Pb	Zn
<b>Isla San Ildefonso</b>				
<i>S. nebouxii</i>	3.025 µg/g	0.76 µg/g	ND	86.746 µg/g
<i>S. leucogaster</i>	2.463 µg/g	0.874 µg/g	ND	65.342 µg/g
<b>Isla Tortuga</b>				
<i>S. nebouxii</i>	3.129 µg/g	0.74 µg/g	ND	<b>89.654 µg/g</b>
<i>S. leucogaster</i>	3.661 µg/g	0.994 µg/g	ND	79.872 µg/g

Comparamos las frecuencias observadas de las concentraciones de los metales pesados de cada una de las cuatro poblaciones, con las con las frecuencias esperadas, con la hipótesis nula de que fueran poblaciones independientes (Tabla 9). La prueba de chi-cuadrado  $\chi^2$  nos dio un valor de 0.3088 con 6 grados de libertad, lo que indica que no hay diferencias significativas entre las concentraciones de los metales registradas para las cuatro poblaciones que tengan que ver con la especie o la isla. Es decir, aceptamos la hipótesis nula de que los datos observados se ajustan a una distribución teórica.

$\chi^2$  Tabla para 6 grados de libertad = 12,59 >  $\chi^2$  calculado = 0.3088

$\chi^2$  calculado <  $\chi^2$  tabla =  $H_0$

$\chi^2$  calculado >  $\chi^2$  tabla =  $H_1$

**Tabla 10.** Tabla de resultados de los valores esperados para *S. neboxii* y *S. leucogaster*.

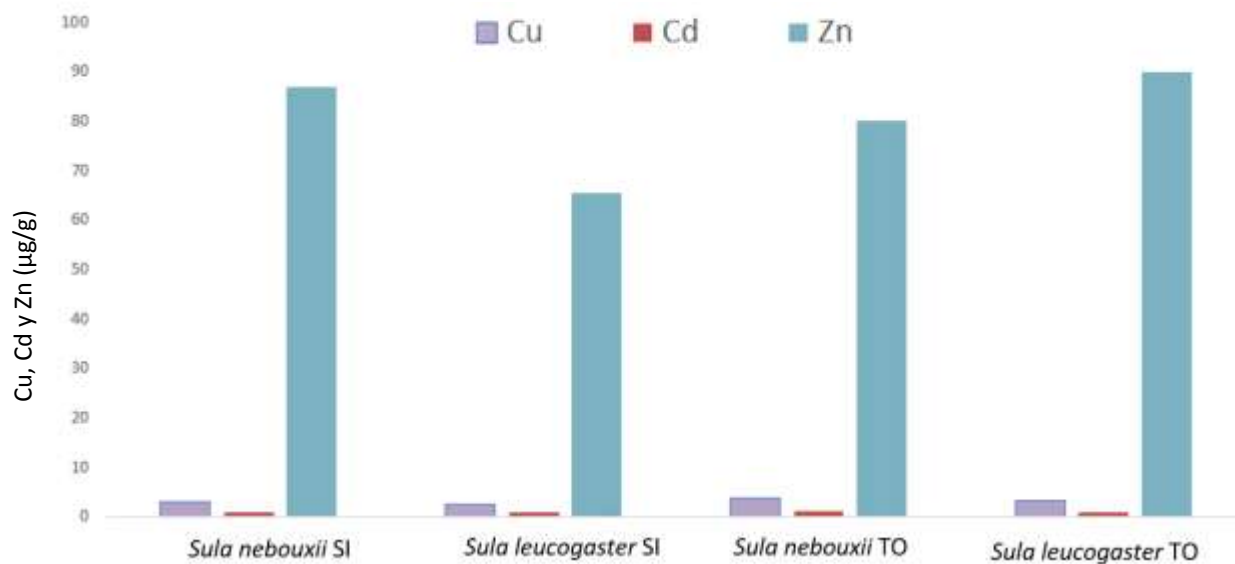
Especie e isla	Cu	Cd	Zn
<b>Isla San Ildefonso</b>			
<i>S. neboxii</i>	3.295	0.904	86.331
<i>S. leucogaster</i> SI	2.500	0.685	65.492
<b>Isla Tortuga</b>			
<i>S. neboxii</i>	3.404	0.933	89.184
<i>S. leucogaster</i>	3.077	0.844	80.605

### 7.9.2 Concentración de metales pesados por especies e islas.

La concentración de cobre (Cu) detectada fue ligeramente más alta en los bobos de isla Tortuga que en los de San Ildefonso Figura 17. *S. leucogaster* presentó valores en Tortuga (3.661  $\mu\text{g/g}$ ) y (2.463  $\mu\text{g/g}$ ) en San Ildefonso, mientras que en *S. neboxii* las concentraciones de Cobre fueron más similares, siendo de (3.129  $\mu\text{g/g}$ ) en Tortuga y (3.025  $\mu\text{g/kg}$ ) en San Ildefonso.

Los individuos de *S. leucogaster* tuvieron los valores detectables más altos de Cd en las dos islas. Los adultos de Isla Tortuga tuvieron (0.944  $\mu\text{g/g}$ ), y los de Isla San Ildefonso (0.874  $\mu\text{g/g}$ ). Los valores de concentración fueron más bajos en *S. neboxii* siendo similares en las dos islas y en San Ildefonso 0.76  $\mu\text{g/kg}$  y en Tortuga (0.74  $\mu\text{g/g}$ ).

El zinc fue el metal que presentó la mayor concentración en las cuatro poblaciones de bobos. Las concentraciones de zinc fueron más altas en *S. neboxii* en ambas islas. En Isla Tortuga los bobos azules presentaron valores de (89.654  $\mu\text{g/g}$ ), y en Isla San Ildefonso (86.746  $\mu\text{g/g}$ ). Las concentraciones en las plumas de *S. leucogaster* fueron más bajas en ambas islas. En Tortuga presentaron valores de 79.872  $\mu\text{g/kg}$  y en San Ildefonso de (65.342  $\mu\text{g/g}$ ). Figura 17.



**Figura 17.** Concentración de Cu, Cd y Zn ( $\mu\text{g/g}$  peso seco) en plumas de *S. neboxii* y *S. leucogaster* en isla San Ildefonso y Tortuga.



## 8. DISCUSIÓN

### 8.1 Nicho trófico

#### 8.1.1 Posición trófica y nicho isotópico y diferencias entre islas o especies.

Los Bobos Cafés (*Sula leucogaster*) y los Bobos Patas Azules (*Sula nebouxii*), son especies de aves marinas pelágicas, que anidan juntas en muchas islas a lo largo del océano Pacífico oriental. Ambas obtienen su alimento de manera similar, buceando desde el aire en picados, y tienen el mismo horario de actividad (Gilmour *et al.*, 2018). La técnica de captura de presas en los bobos involucra una caída en picada desde alturas de 10 a 12 m, entran en la columna de agua y bucean para atrapar los peces (Schreiber y Norton, 2002).

Cuando dos especies de aves marinas anidan en simpatria, se predice que, para evitar competencia, deben tener una separación de nicho ecológico (Ricklefs, 1990). Esta segregación de nicho, puede darse en el nicho trófico, y las especies lo logran mediante comportamientos diferentes como: elegir diferente lugar de forrajeo, tener diferentes técnicas de búsqueda de alimento, buscar presas de distinto tipo o tamaño, o forrajear a diferentes horas del día (Weimerskirch *et al.*, 2009).

En nuestro trabajo analizamos las posibles diferencias de nicho trófico entre estas dos especies, anidando juntas en dos islas en el centro del Golfo de California, situadas 100 km aparte, San Ildefonso, en aguas más someras cerca de la costa, y Tortuga, un volcán emergido en el centro del Golfo, más oceánica.

Evaluamos el nicho trófico de aves adultas en un periodo previo a la reproducción, ya que comparamos los valores de nicho isotópico de sus plumas crecidas y selladas. Es difícil evaluar el momento concreto al que corresponde la composición de isótopos de las plumas de estas aves que no tienen un periodo definido de muda, puede ser un mes o varios antes de la puesta (Nelson 1987, Burger y Gochfeld, 2004). Pero las dos especies son filopátricas y residentes, permaneciendo en el área casi todo el año, y puesto que las especies de bobos mantienen

fidelidad a sus áreas de forrajeo (Cherel *et al.*, 2000; Zavalaga *et al.*, 2007; Gilmour *et al.*, 2018), creemos que los valores obtenidos reflejan el nicho trófico de cada población en cada isla.

Nuestros resultados mostraron grandes coincidencias y sutiles diferencias en el nicho trófico entre las cuatro poblaciones estudiadas. El nicho trófico de las dos especies que anidan en isla San Ildefonso coincidió en un 70% por lo que la competencia entre ellas es baja. Ello se ve también en la composición de la dieta (ver abajo). Pero en isla Tortuga solo hubo una coincidencia del 48%, es decir una mayor competencia, que propició una divergencia mayor en el nicho trófico. La dieta de *S. leucogaster* de las dos islas coincidió en un 90%, mientras que la de dieta de *S. nebouxii* entre islas solo coincidió en un 58%.

En nuestros resultados la mayor diferencia en el valor isotópico del  $^{13}\text{C}$  se dio entre la población de *S. nebouxii* de San Ildefonso (que en nuestra muestra fueron fundamentalmente hembras) y la población de *S. leucogaster* de Tortuga (que en nuestro muestreo fueron fundamentalmente machos). Estas dos poblaciones fueron también las que menos solaparon en su nicho trófico, solo un 30%.

Las posiciones del  $^{13}\text{C}$  reflejan una diferencia en el lugar de alimentación (Kelly, 2000) ligeramente más costera de las poblaciones de San Ildefonso (valores menos negativos de  $^{13}\text{C}$ ) y más pelágica en las poblaciones de Tortuga (Wolf *et al.*, 2008), especialmente *S. leucogaster* que además tiene un rango estrecho de  $^{13}\text{C}$ . Este resultado concuerda con lo encontrado en el estudio de Weimerskirch *et al.* (2009), con estas dos especies en Isla San Ildefonso en 2006, en el que las aves no viajaban muy lejos de sus colonias en sus vuelos de alimentación, y también que los viajes de *S. leucogaster* eran más largos y pasaba menos tiempo en el agua que *S. nebouxii*.

La diferencia más notable entre las dos especies dentro de cada isla se encontró en los valores de  $^{15}\text{N}$ . Estos fueron siempre un poco más altos en *S. nebouxii* que en *S. leucogaster*, siendo esta diferencia mayor en San Ildefonso que en Tortuga. Como si *S. nebouxii* prefiriera peces en un nivel trófico un poco más alto que *S. leucogaster* (ver más abajo en composición de la dieta).

Algunos autores que han encontrado valores más altos de  $\delta^{15}\text{N}$  en la sangre de *S. neboxii* lo relacionaron con su dependencia de presas específicas (enriquecidas en  $\delta^{15}\text{N}$ , con mayor disponibilidad y contenido energético y lipídico) que les permite maximizar su esfuerzo reproductivo (Yerkes *et al.*, 2008; Lerma *et al.*, 2016; González Medina *et al.*, 2018).

## 8.2 Diferencias entre sexos dentro de la misma especie

Entre sexos las diferencias entre los valores medios de  $^{13}\text{C}$  o  $^{15}\text{N}$  no fueron significativas en ninguna de las 4 poblaciones. Los Sulidos tienen dimorfismo sexual inverso (hembras mayores que los machos) y *S. neboxii* son de mayor tamaño que *S. leucogaster*, de manera que en un gradiente de tamaño los machos de bobos cafés serían los más pequeños, seguidos de los machos de bobos de patas azules, hembras de bobos cafés y finalmente el grupo de mayor tamaño serían las hembras de bobos de patas azules (Weimerskirch *et al.*, 2009).

En un estudio previo, en 2006, en isla San Ildefonso Weimerskirch *et al.* (2009) detectaron diferencias en los lugares de forrajeo y en la profundidad de buceo entre machos y hembras, que atribuyeron a sus diferencias en tamaño, ya que las hembras (más grandes) hicieron viajes de alimentación más duraderos a lugares más lejanos y bucearon a más profundidad que los machos (porque pesan más).

Estas diferencias de comportamiento en forrajeo entre sexos, se han reportado también en otras especies del género *Sula*, y se han relacionado con un diferente papel en la alimentación de los pollos por parte de cada padre (los machos pasarían más tiempo en el nido, ya que las hembras viajan más, y las hembras aportarían más comida), aunque no es algo que se de en todos los casos. Por ejemplo, no suceden si otros factores condicionan el lugar de anidamiento (Tavares Nunes *et al.*, 2018), aparecen solo en circunstancias de alta demanda por ejemplo en *S. neboxii* en las islas de la costa de Jalisco, solamente en nidos con dos pollos (Castillo Guerrero y Mellink, 2011), o resulta al revés como en *S. leucogaster* en el sur de Nayarit donde las hembras pasaron más tiempo en el nido porque son más eficientes incubando que los machos (Ceyca y Mellink, 2009).

A pesar de estas sutiles diferencias de nicho encontradas entre machos de *S. leucogaster* en Tortuga y hembras *S. nebouxii* en San Ildefonso, en este estudio no encontramos prevalencia de uno de los sexos cuidando a los pollos, como se esperaba por la literatura, ya que, aunque hubo más machos de *S. leucogaster* en los nidos de Tortuga (como predice la teoría), registramos más hembras de *S. nebouxii* en los nidos de San Ildefonso. En cuando a las situaciones de alta demanda, solamente la población de *S. nebouxii* en San Ildefonso tuvo un porcentaje alto de nidos con dos pollos (36%), y sería en ella donde se esperaría que las hembras viajasen más lejos y pasaran más tiempo fuera de la colonia, para aportar mayor aporte de alimento y que los machos pasaran más tiempo en el nido (Castillo-Guerrero y Mellink, 2011), pero encontramos justo lo contrario. Un resultado llamativo es que, en Tortuga, ningún nido de *S. nebouxii* tuvo dos pollos, aunque 60% tenían 2 huevos. Quizás el periodo reproductivo estaba un poco más retrasado en esta isla, porque por ejemplo en San Ildefonso ya casi todos los nidos *S. leucogaster* tenían pollos y encontramos solo uno con un huevo. Para el objetivo de esta tesis no realizamos un seguimiento de los cuidados parentales, pero un estudio de este comportamiento, esclarecería estos puntos.

### 8.3 Amplitud de nicho

La amplitud de nicho trófico refleja la especialización de la dieta es decir cuanto más estrecho sea el nicho trófico de una población, más especialista es su alimentación. En este estudio no detectamos diferencias significativas en la amplitud entre las especies ni islas. El nicho de las dos especies anidando en San Ildefonso fue un poco más amplio que en las de Tortuga. Ello debido a que el rango de  $^{13}\text{C}$ , fue muy pequeño en la población de *S. leucogaster* Tortuga (casi todos machos) y el de  $^{15}\text{N}$  fue muy estrecho en la población de *S. nebouxii* de Tortuga.

*S. leucogaster* presentó rangos más amplios de  $^{15}\text{N}$  que *S. nebouxii*, en las dos islas, lo que indica que podrían estar utilizando mayor variedad de presas de distintos niveles tróficos, como fuente de alimento. Los valores de las otras métricas fueron muy parecidos entre las cuatro poblaciones, aunque se puede ver una ligera mayor dispersión en las dos poblaciones de San Ildefonso que en las de la isla Tortuga, con individuos menos agrupados en torno al centroide y mayor distancia entre ellos.

Este resultado podría indicar que las aves en San Ildefonso que buscan sus presas en aguas más costeras, Weimerskirch *et al.*, (2009), encuentran mayor variedad de presas, mientras que las aves que anidan en Tortuga, estarían pescando en aguas más pelágicas, y cardúmenes más uniformes, pero esta información habría que precizarla en un estudio más detallado de composición de la dieta o de seguimiento de individuos con transmisores.

En el estudio de 2009 en San Ildefonso, los autores no encontraron diferencias en el nicho trófico entre las dos especies ni entre los sexos, ni en las plumas (periodo previo a la reproducción) ni en la sangre (periodo reproductivo) (Weimerskirch *et al.*, 2009) y lo atribuyeron a que fue un periodo de alta productividad que las aves aprovecharon para alimentarse cerca de la colonia fundamentalmente a lo largo de un borde de surgencias, donde había superabundancia de Sardinias (*Sardinops*) (Weimerskirch *et al.*, 2009). Esta tendencia a buscar zonas ricas en surgencias para aprovechar la abundancia de alimento es una característica del modo de forrajeo de los Sulidos, especialmente los que habitan en el Golfo de California (Gilmour *et al.*, 2018). (Weimerskirch *et al.*, 2009) sugirieron que un estudio en unas condiciones con menos abundancia de este alimento en particular, quizás daría otros resultados con una mayor variedad de presas ya que encontraron algunos individuos con mayor diversidad trófica que el resto. Nosotros también encontramos algunos individuos alejados del resto de la población, más en San Ildefonso que en Tortuga. En otras especies de bobos, o en otros lugares la diferencia en el comportamiento de alimentación entre los sexos si da lugar a diferencias de nicho (Weimerskirch *et al.* 2009), o no se detectan estas diferencias de comportamiento (Castillo-Guerrero y Mellink, 2011; Tavares Nunes *et al.*, 2018).

#### **8.4 Composición de la dieta**

Los reportes históricos señalan que los bobos del Golfo de California se alimentan fundamentalmente de pequeños peces pelágicos, y su dieta no es muy variada, yendo desde 5-6 a 16 especies (Mellink *et al.*, 2001). Sardinias (Cupleidos) y sobre todo anchovetas (Engraulidos) son las presas más nutritivas (ricas en lípidos) que se han reportado como preferidas para las dos especies en esta área (Mellink *et al.*, 2011; Zavala *et al.*, 2008; Weimerskirch *et al.*, 2009; Castillo Guerrero y Mellink, 2011; Ancona *et al.*, 2012, González-Medina *et al.*, 2018). Las

preferencias por una u otra dependen de la disponibilidad de estos peces en cada temporada. Esta disponibilidad está influenciada entre otros factores por los cambios de temperatura en las capas superficiales del mar, que origina el fenómeno de El Niño. Cuando la temperatura de la capa superficial del mar aumenta (en años Niño), los peces se quedan a mayor profundidad, en el agua más fría, y las aves no las alcanzan con tanta facilidad en sus buceos. En estos años Niño, cuando sus presas preferidas no son muy abundantes, los bobos incorporan a su dieta otro tipo de especies como Escombridos, Carangidos o peces voladores, que son menos nutritivos (Ancona *et al.*, 2012).

Weimerskirch *et al.* (2009) encontraron que el 90% de la dieta de las dos especies bobos de isla San Ildefonso en 2006, estaba constituida por Sardinias, y previamente (Mellink, 2001) encontró que se alimentaban fundamentalmente de Engraulidos. Sin embargo, en nuestro estudio, la presa más consumida según el modelo de mezcla resultó ser un Carángido (*Selar crumenophtalmus*) que aportaba un 39% a las dietas de estas aves. Este pez vive en aguas neríticas (poco profundas), alrededor de las islas, y se agrupa en escuelas muy numerosas, es estacional y no migratorio (Roos *et al.*, 2006). Esta especie se ha reportado como componente muy minoritario de la dieta en las aves de San Ildefonso (Weimerskirch *et al.*, 2009), y aparece solo esporádicamente otros estudios como el de Ancona *et al.* (2012), pero no aparece como frecuente en ningún otro estudio. Por lo que era un resultado bastante novedoso y desconcertante.

Por ello consideramos que la correlación que el modelo de mezcla encontró entre *Selar crumenophtalmus*, *Sardinops caeruleus* y *Anchoa spp* es relevante para interpretar mejor los resultados de la dieta. Es decir que probablemente las asignaciones a *Selar crumenophtalmus* eran en realidad aportaciones de *Sardinops caeruleus* o *Anchoa spp* en un 60-80% de los casos. Aplicando esta corrección *Sardinops* y *Anchoa* pasaron a ser la presa más importante en la dieta de las poblaciones (Tabla 8) apareciendo *Selar crumenophtalmus* solo entre el 7 y 14%, siendo un poco más consumido en Tortuga que en San Ildefonso.

La alta coincidencia de las dos especies en Isla San Ildefonso (70% de solapamiento en la dieta) viene dada por la coincidencia en el alto aporte de Cupleidos a la dieta (50%-60), aunque *S. nebouxii* (que en esta muestra fueron más hembras) consumieron más *Opisthonema libertate* (que tiene un nivel de  $^{15}\text{N}$  más alto y valores menos negativos de  $^{13}\text{C}$ ) y *S. leucogaster* prefirió *Sardinops caeruleus* que tiene valores más bajos de  $^{15}\text{N}$  y más negativos -más pelágicos- de  $^{13}\text{C}$ . También coinciden en el porcentaje de Engraulidae (30-40%).

La diferencia en el  $^{15}\text{N}$  entre las dos poblaciones de San Ildefonso, es la más alta entre los cuatro grupos. Quizás las hembras de *S. nebouxii* más pesadas pudieron llegar mejor a la profundidad de *Opisthonema* que *S. leucogaster* y buscaron esta presa, preferentemente sobre todo antes de la reproducción (Yerkes *et al.*, 2008; Lerma *et al.*, 2016; González Medina *et al.*, 2018).

En isla Tortuga el solapamiento de nicho fue un poco menor (48%). La divergencia se dio porque *S. nebouxii* prefirió Engraulidae (62.7%), con un alto porcentaje de *Anchoa* spp (42%), mientras que en la dieta de *S. leucogaster* (que fueron casi todos machos) un 40% fueron aportaciones de *Sardinops*, siendo Cupleidae más importante que Engraulidae en su alimentación.

La dieta de *S. leucogaster* presentó un 90% de similitud entre las islas ya que mantuvo los porcentajes de presas similares en ambas, Cupleidos (50-60%) y Engraulidos (38-33%). Consumió más *S. crumenophthalmus* en isla Tortuga.

La dieta de *S. nebouxii* solo coincidió en 58% entre las dos islas. La diferencia estuvo en que en San Ildefonso consumió más Cupleidos que en Tortuga (52% frente a 23%), mientras que en Tortuga consumió más Engraulidos (62% frente a 40%). Más al sur, en isla Santa Isabel, también las anchovetas fueron reportadas como la presa principal de *S. nebouxii* (Ancona *et al.*, 2012), sobre todo en años Niño cuando escaseaban los Cupleidos.

Los bobos de San Ildefonso se alimentaban fundamentalmente y abrumadoramente de Sardinias en 2006 (Weimerskirch *et al.*, 2009), y ellos lo atribuyeron a que una alta abundancia de *Sardinops* en las surgencias cercanas a la costa explicaba la coincidencia en la dieta de las dos

especies, y la ausencia de competencia entre ellas. Si bien nosotros encontramos poca competencia en San Ildefonso, nuestros porcentajes de Sardinias son un poco menores, porque ambas especies también comen anchovetas y Carángidos.

La misma situación sucede con Engraulidos. Según Mellink (2001), la dieta de *S. leucogaster* en las islas de San Ildefonso, San Pedro Mártir y San Jorge, en 1999 y 2000 era prácticamente un 90% de anchovetas y nuestros porcentajes fueron un poco más bajos porque en nuestras islas, las dos especies también incluyeron Cupleidos, tanto sardinias como arenques y Carángidos.

La alta prevalencia de Cupleidos y Engraulidos en la dieta se ha relacionado con mayor éxito reproductivo en *S. nebouxii* en las islas la costa de Sinaloa (González-Medina *et al.*, 2018) y una dieta rica en Sardinias produce mayor éxito en *Sula granti* en las islas Galápagos. En este caso se constató que cuando se produjo un cambio en la dieta hacia peces voladores, porque las Sardinias escasearon por efecto del calentamiento global, la productividad de los bobos bajó drásticamente (Tompkins *et al.*, 2017).

La alternancia entre Cupleidos y Engraulidos o la presencia de ambas debe estar reflejando una diferencia en la abundancia. Es decir que puede haber surgencias de unas u otras, o en el caso de que no haya superabundancia, las aves incluyen las dos en la dieta e incluyen a otras.

Los bobos son bastante fieles a sus zonas de alimentación, que en el Golfo se definen por ser lugares relativamente someros, con altas concentraciones de clorofila y sin pendiente en el fondo marino, además de aprovechar los cambios de abundancia que traen las mareas (Gilmour *et al.*, 2018) y los eventos de surgencias (Weimerskirch *et al.*, 2009). Pero dependen de la abundancia de presas disponibles que, en este caso son muy dependientes de las oscilaciones de temperatura superficial relacionadas con los eventos de El Niño/la Niña. En 1999-2000 hubo un evento de Niña fuerte, pero en 2006 las condiciones en San Ildefonso, fueron de un Niño leve, igual que en los meses previos a marzo de 2020, el periodo de nuestro estudio.



En años Niño, además de *Sardinops*, parece que la abundancia de *Opisthonema libertate* es mayor en el Golfo que la de anchovetas, ya que llegan migrando desde aguas tropicales más sureñas, buscando las aguas un poco más frías del Golfo de California (Ancona *et al.*, 2012). Mientras que en años Niña los Engraulidos parecen ser más abundantes (Mellink, 2001). Pero adicionalmente a este fenómeno, el Golfo de California está experimentando un calentamiento acelerado en los últimos años, con la anomalía positiva alcanzando un máximo de + 1.06 °C in 2019 (Adame *et al.*, 2020), lo que podría estar originando este cambio (descenso) de abundancia de Cupleidos y Engraulidos, y por tanto el cambio de alimentación detectado. Estudios de más largo plazo y monitoreos continuos se hacen necesarios, sobre todo para evaluar la productividad de estas colonias tan poco estudiadas y para tomar acciones en caso de que se esté presentando un declive poblacional originado por el cambio de alimentación.

### 8.5 Metales pesados

Las concentraciones de metales pesados en adultos de las dos especies, no fueron significativamente diferentes entre especies o entre islas. El Pb no fue detectable en los individuos de las dos especies, a pesar de estar dentro de los metales que se depositan en mayores concentraciones en los sistemas costeros (De la Lanza Espino y Cáceres Martínez, 1994).

Los valores de Zinc fueron bastante menores a los reportados para *S. leucogaster* en poblaciones del estuario del Paranaguá, en el Atlántico en Brasil, que es un hábitat bastante contaminado (Dolci *et al.*, 2017). Son un poco más altos que los reportados para plumas de *Fregata sp* en la costa Noroeste de Australia (Lavers *et al.*, 2020). Este resultado coincide con lo reportado por Lerma (2020) donde también detectaron concentraciones de zinc en huevos, sangre y en polluelos de *S. nebouxii* en isla el Rancho en Sinaloa, mayores a las de otras especies de aves también buceadoras como los cormoranes.

El valor del Cobre es también menor al reportado para *S. leucogaster* de Brasil (Dolci *et al.*, 2017) y similar a los valores encontrados en otras aves pelágicas del Atlántico en la costa Noroeste de España (Pérez-López *et al.*, 2005), y a las otras especies de *Sula* de la costa

Noroeste de Australia (Lavers *et al.*, 2020). Las concentraciones de dos estos metales, entran dentro del rango de los valores reportados para otros lugares y se pueden considerar dentro de la normalidad, ya que como señalan Parra-Ochoa. (2014) y Dolci *et al.* (2017), su concentración en los tejidos o excreción en las plumas se puede deber más depósitos endógenos que a contaminación ambiental, ya que son requeridos para el crecimiento y metabolismo normal de los tejidos, y se regulan homeostáticamente, por lo que su concentración en los tejidos no se relaciona tan directamente con la del ambiente.

En Cadmio, sin embargo, los valores son bastante mayores a los reportados por Dolci. (2014) y también por Pérez-López *et al.* (2005) y Lavers *et al.* (2020), y mayores a los valores normales reportados para aves marinas que debe ser menor a  $0.2 \mu\text{g g}^{-1}$  (Burger, 1993). El cadmio es un metal que se acumula y se magnifica a lo largo de las cadenas tróficas marinas (Burger, 1993). Los valores de cadmio de los tejidos no reflejan exactamente el valor de Cd ingerido, pero un valor alto en las plumas si implica que si hay un volumen de Cd circulante en el sistema (Burger, 1993; Honda *et al.*, 1985). Bond y Lavers. (2020) encontraron que las concentraciones de Cd en las plumas de un ave pelágica (*Ardenna carneipes*) incrementaron en 1.5% por año en los últimos 100 años, en el Noroeste de Australia. En nuestra área de estudio se ha reportado un enriquecimiento natural en Cu, Cd, Pb y Zn en los sedimentos, aumentado por la explotación y procesamiento del yacimiento de cobre en la cercana mina de Santa Rosalía (Escandón, 1995; Wilson *et al.*, 1955), lo que quizás es la causa de estos niveles ligeramente altos de Cd en las aves de estas islas.

La exposición al Cadmio puede ser perjudicial para las aves porque impide el correcto funcionamiento de enzimas y proteínas y produce daño celular (Burger, 1993; Ceyca *et al.*, 2016) y puede producir lesiones en el hígado y afectar a la formación de la cáscara de los huevos.

## 9. CONCLUSIONES

- El nicho trófico de las dos especies de *Sula* anidando juntas, fue más similar (70%) en San Ildefonso que en Tortuga (48%), por lo que el efecto de competencia interespecifica parece mayor en isla Tortuga. Con esto resultados se cumple la primera hipótesis respecto a la similitud entre especies e islas.
- La mayor divergencia observada entre la dieta de las dos especies en isla Tortuga puede deberse a que *S. nebouxii* consumió un mayor porcentaje (62.3%) de anchoas y anchovetas mientras que la dieta de *S. leucogaster* reflejó un alto porcentaje de Cupleidae con *Sardinops caeruleus*, como presa principal.
- La coincidencia de nicho trófico en *S. leucogaster* entre las dos islas fue alta, de 90%, Se alimentó fundamentalmente de Cupleidos en (50-60%) y de Engraulidos (38-33%).
- La coincidencia de *S. nebouxii* entre islas fue solo 58%. Esta ave consumió más Cupleidos en San Ildefonso que en Tortuga (52% frente a 23%), mientras que en Tortuga consumió más Engraulidos (62% frente a 40%).
- No encontramos diferencias en los valores isotópicos entre las plumas de machos y hembras en ninguna de las dos especies.
- Encontramos diferencias entre los rangos de  $^{13}\text{C}$  de *S. nebouxii* en San Ildefonso que se alimentan en aguas más costeras y *S. leucogaster* en Tortuga que obtienen el alimento en aguas más pelágicas.
- Los valores de  $^{15}\text{N}$  fueron ligeramente más altos en *S. nebouxii* que en *S. leucogaster*. La diferencia puede ser debida a que los Bobos Patas Azules consumieron más anchovetas o más arenques, y los *S. leucogaster* más sardinas. Cuando *S. nebouxii* se alimenta de Cupleidae, prefiere *Opisthonema libertate* a *Sardinops caeruleus*, que tiene un nivel de  $^{15}\text{N}$  más alto.

- En este estudio no detectamos diferencias en la amplitud de nicho entre las especies ni islas, aunque se puede ver una ligera mayor dispersión en las dos poblaciones de San Ildefonso que en las de la isla Tortuga. Es decir, hay mayor variabilidad individual en la dieta de las aves de San Ildefonso.
- Las presas más consumidas por las dos especies fueron Cupleidos (50-60%) y Engraulidos (30-40%), pero en menor porcentaje de lo reportado en estudios anteriores. Esa disminución de sus presas óptimas puede ser efecto del calentamiento global y tener puede consecuencias poblacionales, que sería muy necesario evaluar.
- Las plumas de adultos de *S. nebouxii* y *S. leucogaster* tuvieron valores detectables de Zn, Cu y Cd y Zn a excepción del plomo, con lo que se cumple gran parte de la segunda hipótesis respecto a los metales pesados.
- No se encontró diferencias significativas en la bioacumulación de metales pesados entre islas y adultos de las dos especies, con lo que se cumple la hipótesis de que no hay diferencia en la bioacumulación de metales pesados.
- Los valores de Zinc y Cobre se consideraron normales.
- Los valores de Cd parecen un poco elevados, puede ser por bioacumulación ambiental debido al historial minero de la zona, o a causas naturales.

### 9.1. Recomendaciones

- Se recomienda hacer evaluaciones poblacionales de las colonias de las dos especies en las dos islas, para tener datos de demografía a largo plazo.
- Se recomienda hacer un estudio de ecología reproductiva y comportamiento parental para dilucidar el papel de cada sexo en el éxito de las puestas.

- Se recomienda hacer estudios de dieta comparando específicamente entre sexos con un mayor número de muestra a fin de relacionar la dieta con su papel en los cuidados parentales.
- Se recomienda un seguimiento continuo de las condiciones oceanográficas y de la disponibilidad y cambio estacional de presas en las zonas de alimentación de estas aves.
- Se recomienda un estudio de metales en sangre o huevos para conocer el grado de exposición real de metales pesados en el que se encuentran estas poblaciones.
- Se recomiendan actividades de educación ambiental y divulgación sobre el cuidado y la importancia de estas especies con las comunidades cercanas a la isla

## 10. LITERATURA CITADA

Adame, K., Elorriaga-Verplancken, F. R., Beier, E., Acevedo-Whitehouse, K., y Pardo, M. A. (2020). The demographic decline of a sea lion population followed multi-decadal sea surface warming. *Scientific reports*, 10(1), 1-15. doi:10.1038/s41598-020-67534-0.

Aggarwal, P., Gaur, S., y Gauba, P. (2014). Neurotoxic and genotoxic effects of methylmercury. *Environ. Dev. Sustain.* 16 (1), 71-78. doi: 10.1007/s10668-013-9475-8.

Aguirre, A.A. y Tabor, G.M. (2004). Introduction: marine vertebrates as sentinels of marine ecosystem health. *EcoHealth*, 1(3), 236-238. doi:10.1007/s10393-004-0091-9.

Anchundia, D., Huyvaert, K., Kate y Anderson, David. (2014). Chronic lack of breeding by Galápagos Blue-footed Boobies and associated population decline. *Avian Conservation and Ecology*. 9. 10.5751/ACE-00650-090106. doi:10.5751/ACE-00650-090106.

Ancona, S., Albarrán, C. I., y Drummond, H. (2012). Effect of El Niño on the diet of a specialist seabird, *Sula nebouxii*, in the warm eastern tropical Pacific. *Marine Ecology Progress Series*, 462, 261-271. doi: 10.3354/meps09851.

Ancona, S., Sánchez-Colón S, Rodríguez C, y Drummond, H. (2011). El Niño in the warm tropics: local sea temperature predicts breeding parameters and growth of blue-footed boobies. *J Anim Ecol* 80: 799–808. doi:10.1111/j.1365-2656.2011.01821.x.

Anderson, D. (1983). The seabirds. In *Island biogeography in the Sea of Cortez*, T. J. Case y M. L. Cody (eds.). University of California, Berkeley. p. 246–264 B.A.; Breure, A.M y Zechmeister, H.G (eds.), Elsevier, Oxford, pp. 677-736.

Anderson, D.J., Ricklefs R.E. (1992.) Brood size and food provisioning in masked and Blue-footed Boobies (*Sula* spp.). *Ecology* 73:1363– 1374. doi:10.2307/1940682.

Anderson, D., y Velarde, E. (2001). Aves del mar. P. Robles-Gil, E. Ezcurra y E. Mellink (comps.). *El Golfo de California. Un mundo aparte*. Pegaso, Casa Lamm, Sierra Madre, México, pp.137-154.

Angeles-Perez, A., Tershy, B. R., y Breese, D. (1991). Diet of male and female brown boobies on Isla San Pedro Martir, Gulf of California, Mexico. In *Pacific Seabird Group Annual Meeting*. Monterey, California.

Arizmendi, C. y Laura, M. V. (2000). Áreas de importancia para la conservación de las aves en México (No. Sirsi) i9789701843192).

Arizmendi, C. y Márquez, L. (2000). Áreas de Importancia para la Conservación de las Aves en México (AICAs). Cipamex-Conabio-CCA-FMCN, México DF.

Bearhop, S., Adams, C.E., Waldron, S., Fuller, R.A. y MacLeod, H. (2004). Determining trophic niche width: a novel approach using stable isotope analysis. *J. Anim Ecol* 73:1007–1012. doi:10.1111/j.0021-8790.2004.00861.x.

Bearhop, S., Ruxton, G.D., Furness, R.W., (2000). Dynamics of mercury in blood and feathers 546 of great skuas. *Environ. Toxicol. Chem.* 19, 1638–1643. doi:10.1897/1551- .

Bearhop, S., Phillips, R.A., McGill, R., Cherel, Y., Dawson, D.A., y Croxall, J.P. (2006). Stable isotopes indicate sex-specific and long-term individual foraging specialisation in diving seabirds. *Mar. Ecol. Progr. Ser.* 311: 157–164. doi: 10.3354/meps311157.

Becker, P.H. (2003). Biomonitoring with birds. In: Trace metals and other contaminants in the environment bioindicators and biomonitors; Principles, concepts and applications. Markert. doi: 10.1016/S0927-5215(03)80149-2 .

Bellocq, M. I. (2000). A review of the trophic ecology of the Barn Owl in Argentina. *Journal of Raptor Research*, 34(2), 108-119. doi: 10.25260/EA.17.27.3.0.505.

Bigeleisen, J. (1965). Chemistry of Isotopes: Isotope chemistry has opened new areas of chemical physics, geochemistry, and molecular biology. *Science*, 147(3657), 463-471. doi:10.1126/science.147.3657.463.

BirdLife International. *Sula leucogaster* (2018). The IUCN Red List of Threatened Species 2018: e.T22696698A132590197. <http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.20182.RLTS.T22696698A132590197.en> .

BirdLife International. *Sula nebouxii*. (2018). The IUCN Red List of Threatened Species 2018:e.T22696683A132588719. doi: 10.2305/IUCN.UK.20182.RLTS.T22696683A132588719.en.

Bost, C. A. y Maho, L. (1993). Seabirds as bio-indicators of changing marine ecosystems: new perspectives. *Acta Oecologica* 14:463-470. doi: 10.5772/intechopen.75458.

Branco, J. O. (2004). Aves marinhas das ilhas de Santa Catarina. BRANCO, JO Aves marinhas e insulares brasileiras: biologia e conservação. Editora da UNIVALI, Itajaí, p. 15-36.

Burger, J. (1993). Metals in feathers of brown noddy (*Anous stolidus*): Evidence for bioaccumulation or exposure levels? *Environmental monitoring and assessment*, 24(2), 181-187. doi:10.1007/BF00547986.

Burger, J. (1993). Metals in avian feathers: bioindicators of environmental pollution. *Reviews of Environmental Toxicology* 5:203–311. doi: 10.1007/s00128-013-1065-9.

Burger, J. (2000). Landscapes, tourism, and conservation. *The Science of the Total Environment*, 249. doi:10.1016/S0048-9697(99)00509-4.

Burger, J. (2013). Temporal trends (1989-2011) in levels of mercury and other heavy metals in feathers of fledgling great egrets nesting in Barnegat Bay, NJ. *Environ. Res.* 122, 11-17. doi: 10.1016/j.envres.2013.01.003.

Burger, J. y Gochfeld, M. (1985). Comparison of nine heavy metals in salt gland and liver of Great Scaup (*Aythya marila*), Black Duck (*Anas rubripes*) and Mallard (*Anas platyrhynchos*). *Comparative Biochemistry and Physiology*, 81, 287-292. doi:10.1016/0742-8413(85)90007-6.

Burger, J. y Piatt, J.F. (1990). Flexible time budgets in common murrelets: buffers against variable prey abundance. *Stud. Avian Biol.* 14: 71–83. doi: 10.3354/meps07072.

Burger, J. y Gochfeld, M. (1991). Lead, mercury, and cadmium in feathers of Tropical Terns in Puerto Rico and Australia. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 21: 311-315. doi: 10.1007/BF01055351.

Burger, J., y Gochfeld, M. (2001). Effects of chemicals and pollution on seabirds. In *Biology of marine birds*. CRC press, USA. Pp. 485-526. ISBN9780429127861.

Burger, J. y Gochfeld, M. (2004). Marine birds as sentinels of environmental pollution. *Ecohealth Journal* 1: 263-27. doi:10.1007/s10393-004-0096-4.

Burger, A. E. y Shaffer, S. A. (2008). Perspectives in ornithology application of tracking and data-logging technology in research and conservation of seabirds. *Auk* 125: 253-264. doi:10.1525/auk.2008.1408.

Cain, B., Sileo, W., Franson, L. J. C., y Moore, J. (1983). Effects of dietary cadmium on mallard ducklings. *Environmental Research*, 32, 286–297. doi:10.1016/0013-9351(83)90112-3.

Cairns, D.K. (1988). Seabirds as Indicators of Marine Food Supplies, *Biological Oceanography*, 5:4, 261-271. doi: 10.1080/01965581.1987.10749517.

Cairns, D. K. (1992). Bridging the gap between ornithology and fisheries science: use of seabirds data in stock assessment models. *Condor* 94: 811-824. doi:10.2307/1369279.

Castillo Guerrero, J. A. (2009). Variación intercolonial en la reproducción del bobo de patas azules (*Sula nebouxii*) en el Golfo de California: probando las hipótesis sobre el dimorfismo de talla de la familia Sulidae. Tesis de doctorado. Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada (CICESE).

Castillo Guerrero, J.A., Mellink, E., (2011). Occasional inter-sex differences in diet and foraging behavior of the blue-footed booby: maximizing chick rearing in a variable environment? *J. Ornithol.* 152, 269–277. doi: 10.1007/s10336-010-0575-z.

Ceyca Contreras, J., Castillo Guerrero, J.A., Fernández, F., y Guillermo B.I.M. (2016). Local and interannual variations in mercury and cadmium in eggs of eight seabird species of the Sinaloa



coast, México. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 35. 10.1002/etc.3402. doi:10.1002/etc.3402.

Ceyca, J. P. y Mellink, E. (2009). Ecología reproductiva del bobo café (*Sula leucogaster*) en Morros el Potosí, Guerrero, México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 80(3), 793-800. doi: 10.22201/ib.20078706e.2009.003.174.

Charrassin, J. B. y Bost, C.A. (2001). Utilization of the oceanic habitat by king penguins over the annual cycle. *Marine Ecology Progress Series* 2001: 285-297. doi:10.3354/meps221285.

Cherel., Hobson, K. A., y Weimerskirch, H. (2000). Using stable-isotope analysis of feathers to distinguish moulting and breeding origins of seabirds. *Oecologia*, 122(2), 155-162. doi: 10.1007/PL00008843.

Cherel, Y.P., Hobson, R., McGil, K y Rona. (2006). Stable isotope evidence of diverse species-specific and individual wintering strategies in seabirds. *Biology letters*. 2. 301-3. 10.1098/rsbl.2006.0445. doi: 10.1098/rsbl.2006.0445.

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (2000). Programa de Manejo Área de Protección de Flora y Fauna Islas del Golfo de California Mezico. 262 pp. CONANP, C. (2000). Programa de Manejo.

Cornelius, C.N., Sergio Marquet, P. (2008). Effects of Human Activity on the Structure of Coastal Marine Bird Assemblages in Central Chile. *Conservation Biology*. 15. 1396 - 1404. 10.1111/j.1523-1739.2001.00163.x. doi: 10.1111/j.1523-1739.2001.00163.x.

Croxall, J.P., Reid K. y Prince P.A. (1999). Diet, provisioning and productivity responses of marine predators to differences in availability of Antarctic krill. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 177: 115–131. doi: 10.3354/meps177115.

De la Lanza Espino, G. y Cáceres-Martínez, C. (1994). Lagunas costeras y el litoral mexicano. Universidad Autónoma de Baja California Sur, México. 525 pp. De la Federación, D. O. Fuente: Diario Oficial de la Federación Fecha de publicación: 09 de marzo de 2001.

Debacker, V., Jauniaux, T., Coignoul, F., y Bouquegneau, JM . (2000). Heavy metals contamination and body condition of wintering guillemots (*Uria aalge*) at the Belgian coast from 1993 to 1998. *Environ Res Section A* 84: 310-317. doi: 10.1006/enrs.2000.4087.

Del Hoyo, J., Elliot., y A. Sargatal, J. (1992). *Handbook of the Birds of the World, Vol. 1: Ostrich to Ducks*. Lynx Edicions, Barcelona, Spain.

DeNiro, M. J., y Epstein, S. (1978). Influence of diet on the distribution of carbon isotopes in animals. *Geochimica et cosmochimica acta*, 42(5), 495-506. doi: 10.1016/0016-7037(78)90199-0.

DeNiro, M. J., y Epstein, S. (1981). Isotopic composition of cellulose from aquatic organisms. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 45(10), 1885-1894. doi: 10.1016/0016-7037(81)90018-1.

Denneman, W.D. y Douben, P.E.T. (1993). Trace metals in primary feathers of the Barn Owl (*Tyto alba guttatus*) in the Netherlands. *Environ Pollut* 82: 301-310. doi: 10.1016/0269-7491(93)90133-9.

Dorward, D. F. (1962). Comparative biology of the white booby and the brown booby *Sula* spp. *Atascension. Ibis*, 103(2), 174-220. doi: 10.1111/j.1474-919X.1962.tb07244.x.

Drummond, H., González, E., y Osorno, J.L. (1986). Parent-offspring cooperation in the blue-footed booby (*Sula nebouxii*): social roles in infanticidal brood reduction. *Behav Ecol Sociobiol* 19:365–372. doi: 10.1007/BF00295710.

Drummond, H., y Guerra, M. (1995). Reversed sexual size dimorphism and parental care: minimal division of labour in the blue-footed booby. *Behaviour*, 132(7-8), 479-496. doi: 10.1163/156853995X00162.

Eisler, R. (1993). "Zinc Hazard to Fish, Wildlife, and Invertebrates: A Synoptic Review," Contaminant Hazard Reviews, US Department of the Interior, Fish and Wildlife Service, Laurel. Disponible en: [http://www.pwrc.usgs.gov/infobase/eisler/chr\\_26\\_zinc.pdf](http://www.pwrc.usgs.gov/infobase/eisler/chr_26_zinc.pdf) [consulta: 10 enero 2022 ].

Eisler, R. (1981). Trace metal concentration in marine organisms. Pergamon press. New. doi: 10.4319/lo.1983.28.3.0600.

Eisler, R., (1987). Mercury hazards to fish, wildlife and invertebrates: a synoptic review. Biological Report 85 (1.10). U. S. Fish and Wildlife Service, Washington DC.

Eisler, R. (1998). Compendium of Trace Metals and Marine Biota. Elsevier, Amsterdam. 2010. Chapter 5: 253–361.

Enríquez Andrade, R., Anaya, R.G., Barrera Guevara, J. C., Carvajal Moreno, A.M., Martínez Delgado, M. E., Vaca Rodríguez, J., y Valdés Casillas, C. (2005). An analysis of critical areas for biodiversity conservation in the Gulf of California region. *Ocean & Coastal Management*, 48(1), 31-50. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2004.11.002.

Escandón, V.F. (1995). Génesis de los Yacimientos Polimetálicos del Boleo, Santa Rosalía, Baja California sur. Academia Mexicana de Ingeniería. México. 24.

Estrada Guerrero, D. M. y Soler Tovar, D. (2014). Las aves como bioindicadores de contaminación por metales pesados en humedales. *Ornitología Colombiana*, (14). doi: 10.20937/RICA.2018.34.02.03.

Everett, W.T. y Anderson, D.W. (1991). Status and conservation of the breeding seabirds on offshore Pacific Islands of Baja California and the Gulf of California. In Croxall, J.P. (ed.), Seabird status and conservation: a supplement. ICBP Technical Publication, Cambridge, Great Britain 11:115-139.

Evers, D., Savoy, L., Desorbo, C., Yates D., William, T., Siegel, K., Cooley, L., Bank, J., Major, M., Munney, A., Mower, K., V. B., Schoch, H., Pokras, N., Goodale, M. y Fair, M. (2008). Adverse effects from environmental mercury loads on common loons. *Ecotoxicology* (London, England). doi: 10.1007/s10646-007-0168-7.

Ferreira, A. (2010). Trace Metals Analysis in Brown Booby (*Sula leucogaster*) Collected from Ilha Grande Bay, Rio de Janeiro, Brazil. *Revista Uniandrade*. doi. 11. 41-53. 10.18024/1519-5694/revuniandrade.v11n2p41-53.

Fry, B. and E.B. Sherr. (1989).  $\delta^{13}\text{C}$  measurements as indicators of carbon flow in marine and freshwater ecosystems. In: P.W. Rundel, J.R. Ehleringer and K.A. Nagy (eds), *Stable isotopes in ecological research*, pp. 196-229. Springer-Verlag, New York. doi:10.1007/978-1-4612-3498-2\_12.

Fry, D. M. (1995). Reproductive effects in birds exposed to pesticides and industrial chemicals. *Environmental health perspectives*, 103(suppl 7), 165-171. doi:10.1289/ehp.95103s7165 .

Fry, B. (2006). *Stable isotope ecology*. New York, NY: Springer. Gannes, L. Z., Martinez del Rio, C., y Koch, P. L. (1998). Natural abundance variations in stable isotope isotopes and their potential use in animal physiological ecology. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 119A, 725. doi:10.1016/s1095-6433(98)01016-2.

Furness, R. W. y Camphuysen, C. J. (1997). Seabirds as monitors of the marine environment. *ICES Journal of Marine Science*, 54: 726–737. doi: 10.1006/jmsc.1997.0243.

Gaviño de la Torre, G. (1988). Aves de la isla Isabel, Nayarit, México. *Anales del Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, serie Zoología* 58:751–812.

Gochfeld, M. (1997). Spatial patterns in a bioindicator: heavy metal and selenium concentration in eggs of Herring gulls (*Larus argentatus*) in the New York Bight. *Arch Environ Contam Toxicol* 33: 63-70. doi: 10.1007/s002449900224.

González Medina, E., Castillo Guerrero, J.A., Quesada, F.S., Legas, A.V., Masero, J.A, Sánchez Guzmán, J.M, y Fernández, G. (2015). Regulation of breeding expenditure in the blue-footed booby (*Sula nebouxii*): an experimental approach. *Anim Behav* 108:9–16. doi: 10.1016/j.anbehav.2015.06.025.

González Medina, E., Castillo Guerrero, J. A., Santiago-Quesada, F., Villegas, A., Masero, J. A., Sánchez Guzmán, J. M., y Fernández, G. (2016). Variation in parental rearing expenditure

triggers short-term physiological effects on offspring in a long-lived seabird. *Ibis*, 158(2), 305-314. doi: 10.1111/ibi.12346.

González Medina, E., Castillo Guerrero, J. A., Herzka, S. Z., y Fernández, G. (2017). Flexibility in food resource allocation in parents and selectivity for offspring: variations in  $\delta^{15}\text{N}$  and  $\delta^{13}\text{C}$  values during breeding of the blue-footed booby. *Marine Biology*, 164(3), 1-11. doi:164.10.1007/s00227-017-3070-8.

González Medina E, Castillo Guerrero J.A, Herzka, S.Z, y Fernández, G. (2018). High quality diet improves lipid metabolic profile and breeding performance in the blue-footed booby, a long-lived seabird. doi:10.1371/journal.pone.0193136.

Grue, C.E., Hoffman, D.J., Beyer, W.N y Franson, L.P. (1986). Lead concentrations and reproductive success in European starling *Sturnus vulgaris* nesting within highway roadside verges. *Environ Pollut* 42A: 157-182. doi: 10.1016/0143-1471(86)90005-X.

Guerrero, R. y Berlanga, B. (2000). Isótopos estables: Fundamento y aplicaciones. Actualidad SEM. Boletín informativo de la Sociedad Española de Microbiología 30-17-23.

Hernández, L.M., Gómara, B., Fernández, M., Jiménez, B., González, M.J, Baos, R., Hiraldo, F., Ferrer, M., Benito, V., Suñer, M.A., Devesa, V., Muñoz, O., y Montoro, R. (1999). Accumulation of heavy metals and As in wetlands birds in the area around Doñana National Park affected by the Aznalcollar toxic spill. *Sci Total Environ* 242: 293-308. doi:10.1016/S0048-9697(99)00397-6.

Herruzo, F.G., Rubio, A.G., Lahoz, C.G., Alonso, C.V. y Maroto, J.M.R. (2010). El mercurio: situación actual, problemas y soluciones. *Ingeniería Química* 480, 84-91. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/236625481> [consulta: 15 diciembre 2021].

Hobson K.A. y Clark, R.G. (1992). Assessing avian diets using stable isotopes I: turnover of  $^{13}\text{C}$  in tissues. *Condor* 94: 181–188. doi: 10.2307/1368807.

Hobson K.A y Clark, R.G. (1993). Turnover of  $^{13}\text{C}$  in cellular and plasma fractions of blood: implications for nondestructive sampling in avian dietary studies. *Auk* 110: 638–641. doi: 10.2307/4088430.

Hutchinson, G.E. (1957). Concluding remarks. *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology* 22:415-427.

ICES ACME Report. (2001). Nature Conservation and Biodiversity: chapter 12. Seabird issues. Sigulda, Latvia.

Inger, R. y Bearhop, S. (2008). Applications of stable isotope analyses to avian ecology. *Ibis*. 150. 447 - 461. 10.1111/j.1474-919X.2008.00839.x. doi: 10.1111/j.1474-919X.2008.00839.x.

Jackson, A.L., Inger, R., Parnell, A.C. y Bearhop, S. (2011). Comparing isotopic niche widths among and within communities: SIBER. Stable isotope Bayesian ellipses in R. *Journal of Animal Ecology* 80:595–602, doi: 10.1111/j.1365-2656.2011.01806.x.

Jackson, M. C., y Britton, J. R. (2013). Variation in the trophic overlap of invasive *Pseudorasbora parva* and sympatric cyprinid fishes. *Ecology of Freshwater fish*, 22(4), 654-657. doi: 10.1111/eff.12063.

Jakimska, A., Konieczka, P., Skóra, K., y Namieśnik, J. (2011). Bioaccumulation of Metals in Tissues of Marine Animals, Part I: the Role and Impact of Heavy Metals on Organisms. *Polish Journal of Environmental Studies*, 20(5).

Jaksic, F. M. (2001) .Ecological effects of El Niño in terrestrial eco- systems of western South America. *Ecography* 24, 241–249. doi: 10.1111/j.1600-0587.2001.tb00196.x.

Jaquemet, S., Le Corre, M., Marsac, F., Potier, M. y Weimerskirch, H. (2005). Foraging habitats of the seabird community of Europa Island (Mozambique Channel). *Mar. Biol.* 147: 537–582. doi: 10.1007/s00227-005-1610-0.

Kelly, J. F. (2000). Stable isotopes of carbon and nitrogen in the study of avian and mammalian trophic ecology. *Canadian journal of zoology*, 78(1), 1-27. doi:10.1139/z99-165.

Kim, J. y Oh, J.M. (2013). Assessment of trace metal in four bird's species from Korea. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185: 6847–6854. doi: 10.1007/s10661-013-3069-7.

Landner, L. y Reuther, R. (2004). Metals in society and in the environment: a critical review of current knowledge on fluxes, speciation, bioavailability and risk for adverse effects of copper, chromium, nickel and zinc.

Lara Lara, J.R., Arreola Lizárraga., J. A y Calderón Aguilera, L.E. (2008) Los ecosistemas costeros, insulares y epicontinentales. In: *Capital Natural de México. Conocimiento actual de la biodiversidad*, vol I. CONABIO, México, pp 109–134.

Lavers, J. L., Humphreys-Williams, E., Cramer, N. J., y Bond, A. L. (2020). Trace element concentrations in feathers from three seabird species breeding in the Timor Sea. *Marine Pollution Bulletin*, 151, 110876. doi: 10.1016/j.marpolbul.2019.110876.

Layman C.A., Aarington D.A., Montana C.G. y Post D.M.(2007) Can stable isotope ratios provide for community-wide measures of trophic structure? *Ecology*, 88,42–48. doi: 10.1890/0012-9658(2007)88[42:CSIRPF]2.0.CO;2.

Leach, R. M., Wang, K. W y Baker, D. E. (1979). Cadmium and the food chain: the effect of dietary cadmium on tissue composition in chicks and laying hens. *The Journal of Nutrition*, 109, 437–443. doi: 10.1093/jn/109.3.437.

Lee Cruz, L., McGill, R. A., Goodman, S. J y Hamer, K. C. (2012). Stable isotope ratios of a tropical marine predator: confounding effects of nutritional status during growth. *Marine Biology*, 159(4), 873-880. doi: 10.1007/s00227-011-1864-7.

Lerma, M. (2014). *Condición corporal y concentración de metales pesados (Hg, Pb, Cd y Zn) en Sula nebouxii durante la época reproductiva en la Isla El Rancho, Sinaloa. Tesis de Maestría.* Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM. doi:10.13140/RG.2.2.22279.80808.

Lerma, M., Castillo Guerrero, J.A., García Hernández, J., Fernández Montaña, G. Y., y Páez Osuna, F. (2014). Assessment of the tidal currents and pollutants dynamics associated with shrimp aquaculture effluents in SAMARE coastal lagoon (NW Mexico). *Aquaculture Research*, 45(8), 1269-1282. doi:10.1111/are.12071.

Lerma, M., Castillo Guerrero, J. A., Ruelas-Inzunza, J., y Fernández, G. (2016). Lead, cadmium and mercury in the blood of the blue-footed booby (*Sula nebouxii*) from the coast of Sinaloa, Gulf of California, Mexico. *Marine Pollution Bulletin*, 110(1), 293-298. doi: 10.1016/j.marpolbul.2016.06.049.

Lerma, M., Castillo Guerrero, J. A., García-Hernández, J., y Fernández, G. (2020). Zinc concentrations in Blue-footed booby (*Sula nebouxii*) eggs, nestlings, and adults. *Journal of Sea Research*, 165, 101952. doi: 10.1016/j.seares.2020.101952.

Lewis, S. A., y Furness, R. W. (1991). Mercury accumulation and excretion in laboratory reared black-headed gull (*Larus ridibundus*) chicks. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 21(2), 316-320. doi: 10.1007/BF01055352.

Lewis, S., Schreiber, E.A., Daunt, F., Schenk, G.A., Orr, K., Adams, A., Wanless, S. y Hamer, K.C (2005). Sex-specific foraging behavior in tropical boobies: does size matters? *Ibis* 147:408-414. doi:10.1111/j.1474-919x.2005.00428. x.

Manjula, M., Mohanraj, R. y Devi, M.P. (2015). Biomonitoring of heavy metals in feathers of eleven common bird species in urban and rural environments of Tiruchirappalli, India. *Environ. Monit. Assess.* 187 (5), 1-10. doi: 10.1007/s10661-015-4502-x.

Martínez Hernández, A. L., y Velasco Santos, C. (2012). Keratin fibers from chicken feathers: structure and advances in polymer composites. *Keratin: structure, properties and applications*, 1, 49-211. doi: 10.1021/ie200742x.

Maulf, L.Y., (1983). The physical oceanography. In: Case, T.J., Cody, M.L. (Eds.). *Island Biogeography in the Sea of Cortez*. University of California Press, Los Angeles, pp. 26-45.

Mejía, G. (2006). Aproximación teórica a la bioabsorción de metales pesados por medio de microorganismos. *Revista CES Medicina Veterinaria y Zootecnia* 1:77-99. doi: 10.21615/cesmvz

Mejía - Salazar, L. A. (2007). *Biología reproductiva del cazón bironche, Rhizoprionodon longurio en el Pacífico Mexicano. Tesis de doctorado*. Centro interdisciplinario de ciencias Marinas, Instituto Politécnico Nacional.

Mellink, E. (2000). Breeding of Brown Boobies in the Gulf of California: seasonality and apparent effects of El Niño. *Water- birds* 23: 89–99. doi: 10.2307/1522189.

Mellink, E. (2001). History and status of colonies of Heermann's Gull in Mexico. *Waterbirds*, 188-194. doi: 10.2307/1522029.

Mellink, E., J. Domínguez y J. Luévano. (2001). Diet of eastern Pacific Brown Boobies (*Sula leucogaster brewsteri*) on Isla San Jorge, north-eastern Gulf of California, and an April comparison with diets in the Middle Gulf of California. *Marine Ornithology* 29: 39-44. doi: 1018-3337.

Mellink, E. y Riojas López, M.E. (2005a). Breeding seabirds of Morros El Potosí, Guerrero, México. *Western Birds* 36:59– 63. doi: 10.1007/s10531-004-5289-1.

Mellink, E. y M.E. Riojas Lopez. (2005b). New breeding localities for the Snowy Plover in western Mexico. *Western Birds* 36: 141-143. doi: 10.28947/hrmo.2020.21.1.453.

Montevecchi, W. A. (1993). Birds as indicators of change in marine prey stocks. In *Birds as monitors of environmental change*, R. W. Furness y J. J. D. Greenwood. Chapman and Hall, London. p. 217-266. doi: 10.1007/978-94-015-1322-7\_6.

Montevecchi, W. A. y R. A. Myers. (1995). Prey harvest of seabirds reflects pelagic fish and squid abundance on multiple spatial and temporal scales. *Marine Ecology Progress Series* 117:1-9. doi: 10.3354/meps117001.

Montevecchi, W. A. y R. A. Myers. (1996). Dietary changes of seabirds indicate shifts in pelagic food webs. *Sarsia* 80:313- 322. doi:10.1080/00364827.1996.10413606.

Moura, J.F., Tavares, D.C., Lemos, L.S., Acevedo Trejos, E., Saint’Pierre, T.D., Siciliano, S., Merico, A. (2018). Interspecific variation of essential and non-essential trace elements in sympatric seabirds, *Environmental Pollution*. doi: 10.1016/j.envpol.2018.06.092.

Muirhead, S.J y Furness, R.W (1988). Heavy metals concentrations in the tissues of seabirds from Gough Island, South Atlantic Ocean. doi:10.1016/0025-326X (88)90599-1.

Murarka, S., Mishra, V., Joshi, P. Y Kumar, S. (2015). *Role of zinc in reproductive biology*. Austin Publishing Group. doi: 10.3390/nu12082464.

Navarro Aviñó, J., Aguilar Alonso, I. y López Moya, J. (2007). Aspectos bioquímicos y genéticos de la tolerancia y acumulación de metales pesados en plantas: *Ecosistemas*, 16(2). Disponible

en: <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/125>. [consulta 11 septiembre 2021].

Nelson, J. B. (1978). *The Sulidae: Gannets and boobies*. Oxford University Press. Oxford. 1012 p.

Nelson, J. B. (2006). *Pelicans, cormorants, and their relatives: Pelecanidae, Sulidae, Phalacrocoracidae, Anhingidae, Fregatidae, Phaethontidae*. OUP Oxford.

Nevárez Martínez, M. O., Lluch Belda, D., Cisneros Mata, M. A., Santos Molina, J. P., Angeles Martínez, M., y Lluch Cota, S. E. (2001). Distribution and abundance of the Pacific sardine (*Sardinops sagax*) in the Gulf of California and their relation with the environment. *Progress in Oceanography*, 49(1-4), 565-580. doi: 10.1016/S0079-6611(01)00041-6.

Osorio Beristain, M., y Drummond, H. (1998). Non-aggressive mate guarding by the blue-footed booby: a balance of female and male control. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, 43(4), 307-315. doi: 10.1007/s002650050496.

Padilha Cunha, J., Castro, L., Malm, R., y Dorneles, O.P. Paulo. (2018). Exposure of Magnificent Frigatebird (*Fregata magnificens*) and Brown Booby (*Sula leucogaster*) to Metals and Selenium in Rio de Janeiro State (Brazil) Coastal Waters. *Orbital: The Electronic Journal of Chemistry*. doi:10.1017/orbital.v10i2.1050.

Paiegeam, L. (1983). *Encyclopedia of Occupational Health and Safety* International Labor Organization, Geneva, Switzerland.

Parnell, A.C (2016). SIMMR: a stable isotope mixing model. R package version 0.3. disponible en: <https://CRAN.R-project.org/package=simmr>.

Peñaloza Padilla, E. A. (2006). *Cuidado parental y ecología de forrajeo del bobo café (Sula leucogaster brewsteri) en el farallón de San Ignacio, Sinaloa, México, en la temporada reproductiva 2004. Tesis de Licenciatura*. Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad de Guadalajara. Zapopan, Jalisco, México.

Pérez, M., F., Hernández, D. Oropeza, A. L., López, A., Fidalgo, L. E. y Soler, F. (2005). Contenido de metales pesados en hígado y plumas de aves marinas afectadas por el accidente del "Prestige" en la costa de Galicia. *Revista de Toxicología* 22:191-199.

Peterson, B. J. y Fry, B. (1987). Stable isotopes in ecosystem studies. *Annual Review of Ecology and Systematics*. doi: 10.1146/annurev.es.18.110187.001453.

Piatt, J.F., Harding, A.M.A., Shultz, M., Speckman, S.G., Van Pelt, T.I., Drew, G.S y Kettle, A.B. (2007). Seabirds as indicators of marine food supplies: Cairns revisited. *Mar Ecol Prog Ser* 352:221-234. doi:10.3354/meps07078.



Plackett, R. L. (1983). Karl Pearson and the chi-squared test. *International statistical review/revue internationale de statistique*, 59-72. doi: 10.2307/1402731.

Polis, G.A., Anderson, W.B. y Holt, R.D., (1997). Towards an integration of landscape and food web ecology: the dynamics of spatially subsidized food webs. doi: 10.1146/annurev.ecolsys.28.1.289 .

Post, D. M. (2002). Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions. *Ecology*, 83(3), 703-718. doi: 10.2307/3071875.

Post, D.M., Layman, C.A., Arrington, D.A., Takimoto, G., Quattrochi, J. y Montaña, C.G. (2007). Getting to the fat of the matter: models, methods and assumptions for dealing with lipids in stable isotope analysis. *Oecologia* 152: 179–189. doi: 10.1007/s00442-006-0630-x.

Qadir, M., Tubeileh, A., Akhtar, J., Larbi, A., Minhas, P. S., y Khan, M. A. (2008). Productivity enhancement of salt-affected environments through crop diversification. *Land degradation & development*, 19(4), 429-453. doi: 10.1002/ldr.853.

Quillfeldt, P., McGill, R. A., Masello, J. F., Weiss, F., Strange, I. J., Brickle, P., y Furness, R. W. (2008). Stable isotope analysis reveals sexual and environmental variability and individual consistency in foraging of thin-billed prions. *Marine Ecology Progress Series*, 373, 137-148. doi: 10.3354/meps07751.

Ramírez Ríos, Lorena (2020). *Concentración de Pb, Hg y Cd en la gaviota reidora (Leucophaeus atricilla) y la fragata magnífica (Fregata magnificens) durante la temporada reproductiva, en la Bahía de Santa María, Sinaloa, México, Tesis de Maestría*. Ciencias en Ecología y Manejo de Recursos Costeros y Marinos. Universidad de Guadalajara. Departamento de Estudios para el Desarrollo Sustentable de Zonas Costeras.

Roos, D., Roux, O., y Conand, F. (2007). Notes on the biology of the bigeye scad, *Selar crumenophthalmus* (Carangidae) around Reunion Island, southwest Indian Ocean. *Scientia Marina*, 71(1), 137-144. doi:10.3989/scimar.2007.71n1137.

Ricklefs, R.E. (1990). *Ecology*. 3th ed. Published by W. H. Freeman and Co. New York.

Ruelas Inzunza, J., Hernández Osuna, J., y PáezOsuna, F. (2009). Organic and total mercury in muscle tissue of five aquatic birds with different feeding habits from the SE Gulf of California, Mexico. *Chemosphere*, 76(3), 415-418. doi: 10.1016/j.chemosphere.2009.03.042.

Scheuhammer, A. M. (1987). The chronic toxicity of aluminium, cadmium, mercury, and lead in birds: a review. *Environmental Pollution*. doi: 10.1016/0269-7491(87)90173-4.

Schneider, R., Steinhagen-Schneider, G., Drescher, H.E. (1985). Organochlorine and heavy metals in seals and birds from the Weddell Sea. doi: 10.1007/978-3-642-82275-9\_90.

Schreiber, E. A., y Norton, R. L. (2002). Brown booby: *Sula leucogaster*. Birds of North America, Incorporated. The Birds of North America, no.649. The Academy of Natural Sciences, Philadelphia, Penn-sylvania, USA. doi: 10.2173/bow.brnboo.01.

Soldatini, C., Manrico, S., Albores-Barajas, Y., Abdelgawad, H y Bustamante, P. (2020). Mercury exposure in relation to foraging ecology and its impact on the oxidative status of an endangered seabird. Science of the Total Environment, Elsevier. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138131.

Skoric, S., Visnjić Jeftić Z., Jarić I., Djikanović V., Micković B., Nikčević M. y Lenhardt M. (2012). Accumulation of 20 elements in great cormorant (*Phalacrocorax carbo*) and its main prey, common carp (*Cyprinus carpio*) and Prussian carp (*Carassius gibelio*). doi: 10.1016/j.ecoenv.2012.03.004.

Steward, C. G., Goulden, N. J., Katz, F., Baines, D., Martin, P. G., Langlands, K., y Oakhill, A. (1994). A polymerase chain reaction study of the stability of Ig heavy-chain and T-cell receptor delta gene rearrangements between presentation and relapse of childhood B-lineage acute lymphoblastic leukemia. doi: 10.1182/blood.V83.5.1355.1355.

Suazo Guillén, E. (2004). *Biología reproductiva y hábitos de forrajeo del bobo café, Sula leucogaster, en dos islas del Golfo de California, 2003–2004. Tesis Maestría*. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Ensenada, B.C., México. 74 p.

Tasker, M. L., y Furness, R. W. (2003). Seabirds as monitors of the marine environment (No. 258). International Council for the Exploration of the Sea. doi:10.1006/jmsc.1997.0243.

Nunes, G. T., Bertrand, S., y Bugoni, L. (2018). Seabirds fighting for land: phenotypic consequences of breeding area constraints at a small remote archipelago. Scientific reports, 8(1), 1-12. doi: 10.1038/s41598-017-18808-7.

Thompson, D.R. (1990). Metal levels in marine vertebrates. In: Furness RW, Rainbow PS, editors. in Heavy metals in the marine environment. doi: 10.1201/9781351073158.

Thompson, D.R, Furness R.W, Barrett R.T. (1992). Mercury concentrations in seabirds from colonies in the Northeast Atlantic. Arch Environ Contam Toxicol 23: 383-389. doi: 10.1007/BF00216249.

Thompson, C. W y Leu, M. (1994). Determining homology of molts and plumages to address evolutionary questions: a rejoinder regarding Emberizid finches. Condor 96:769-782. doi: 10.2307/1369480.

Tompkins, E.M., Townsend, H.M., Anderson, D.J. (2017) Decadal-scale variation in diet forecasts persistently poor breeding under ocean warming in a tropical seabird. doi: 10.1371/journal.pone.0182545.

Torres, R., Drummond, H., (1999). Does large size make daughters of the blue-footed booby more expensive than sons? *J. Anim. Ecol.* 68, 1133–1141. doi.org/10.1046/j.1365-2656.1999.00357.x.

Torres, R. y A. Velando. (2010). Color in long-lived tropical seabird: sexual selection in a life history context. *Advances in the Study of Behavior.* 42: 155-18. doi: 10.1016/S0065-3454(10)42005-7.

Torres Rojas, Y., Hernandez Herrera, A., Ortega Garcia, S. y Domeier, M. (2013). Stable isotope differences between blue marlin (*Makaira nigricans*) and striped marlin (*Kajikia audax*) in the southern Gulf of California, Mexico. *Bulletin of Marine Science*, 89(2), 421-436. doi: 10.5343/bms.2011.1105 .

Torres, M.A., Barros, M. P., Campos, S., Pinto, E., Rajami, S., Sayre, T y Colepicolo, P. (2008). Biochemical biomarkers in algae and marine pollution: a review. *Ecotoxicology and Environmental Safety.* 71: 1-15. doi: 10.1016/j.ecoenv.2008.05.009.

Torres Rojas, Y. E., Hernandez Herrera, A., Ortega Garcia, S., y Soto Jiménez, M. F. (2014). Feeding habits variability and trophic position of dolphinfish in waters south of the Baja California Peninsula, Mexico. *Transactions of the American Fisheries Society*, 143(2), 528-542. *Toxicol* 1993;5:203–311. doi:10.1080/00028487.2013.866981.

Vazquez, S. H., Mellink, E., Castillo Guerrero, J. A., Rodríguez-Estrella, R., Hinojosa-Larios, J. Á., y Galván Piña, V. H. (2017). Ecología reproductiva del bobo café (*Sula leucogaster*) en tres islas del pacífico tropical mexicano. *Ornitología Neotropical*, 28, 57-66.

Velando, A., y Alonso Álvarez, C. (2003). Differential body condition regulation by males and females in response to experimental manipulations of brood size and parental effort in the blue-footed booby. *Journal of animal ecology*, 72(5), 846-856. doi:10.1046/j.1365-2656.2003.00756.

Velarde, E., Ezcurra, E., Cisneros Mata, M. A., y Lavín, M. F. (2004). Seabird ecology, El Niño anomalies, and prediction of sardine fisheries in the Gulf of California. *Ecological Applications*, 14(2), 607-615. doi: 10.1890/02-5320.

Verlis, K.M. (2014). Marine debris is selected as nesting material by the brown booby (*Sula leucogaster*) within the Swain Reefs, Great Barrier Reef, Australia. *Mar. Pollut. Bull.* doi: 10.1016/j.marpolbul.2014.07.060.

Weimerskirch, H. (2007). Are seabirds foraging for unpredictable resources?. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 54(3-4), 211-223. doi: 10.1016/j.dsr2.2006.11.013.

Weimerskirch, H., Corre, M.L., Jaquemet, S., y Marsac, F. (2005). Foraging strategy of a tropical seabird, the red-footed booby, in a dynamic marine environment. *Marine Ecology Progress Series*, 288, 251-261. doi: 10.3354/meps288251.

Weimerskirch, H., Corre, M. L., Ropert-Coudert, Y., Kato, A., y Marsac, F. (2006). Sex-specific foraging behaviour in a seabird with reversed sexual dimorphism: the red-footed booby. *Oecologia*, 146(4), 681-691. doi: 10.1007/s00442-005-0226-x.

Weimerskirch, H., Corre, M.L. y Bost, C.A (2008). Foraging strategy of masked boobies from the largest colony in the world: relationship to environmental conditions and fisheries. *Marine Ecology Progress Series*: 362: 291-302. doi: 10.1007/s00442-009-1397-7.

Weimerskirch, H., Tremblay, S., Costa, Y., Gadenne, D., Kato, H., Coudert, A., y Sato, Y. (2009). Species- and sex-specific differences in foraging behaviour and foraging zones in Blue-footed and Brown Boobies in the Gulf of California. *Marine Ecology-Progress Series*. doi:391. 267-278. 10.3354/meps07981.

Wilson, I. F. y Rocha, V. S. (1955). Geology and Mineral Deposits of the Boleo Cooper district Baja California, México. *Geol. Survey Prof. Paper*, 273, pp 134. doi: 10.3133/PP273.

Yerkes, T., Hobson, K. A., Wassenaar, L. I., Macleod, R., y Coluccy, J. M. (2008). Stable isotopes ( $\delta D$ ,  $\delta^{13}C$ ,  $\delta^{15}N$ ) reveal associations among geographic location and condition of Alaskan Northern Pintails. *The Journal of Wildlife Management*, 72(3), 715-725. doi:10.2193/2007-115.

Zavalaga, C.B., Benvenuti, S., Dall'Antonia, L y Emslie, S.D., (2007). Diving behavior of blue-footed boobies *Sula nebouxii* in northern Peru in relation to sex, body size and prey type. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 336, 291–303. doi: 10.3354/meps336291.

Zdziarski, J.M., Mattix, M., Bush, R.M. y Montali, R.J. (1994). Zinc toxicosis in diving ducks. *Journal of Zoo and Wildlife Medicine*, 32: 438–445. doi: 10.2307/20095396.