

# TESIS CARRERA DE LICENCIATURA EN FÍSICA

## ESTUDIO DEL MOVIMIENTO DE POBLACIONES ANIMALES: REDES COMPLEJAS DE INTERACCIÓN INSPIRADAS EN DATOS DE CAMPO.

**Marco Madile Hjelt**  
**Licenciando**

**Dra. Karina F. Laneri**  
Director

**Dr. Luis G. Moyano**  
Co-director

**Miembros del Jurado**  
Dr. Marcelo N. Kuperman (Instituto Balseiro)

1 de Diciembre de 2022

Centro Atómico Bariloche

Instituto Balseiro  
Universidad Nacional de Cuyo  
Comisión Nacional de Energía Atómica  
Argentina



A mi familia  
A mis amigos



# Índice de contenidos

<b>Índice de contenidos</b>	v
<b>Índice de figuras</b>	vii
<b>Índice de tablas</b>	ix
<b>Resumen</b>	xi
<b>Abstract</b>	xiii
<b>1. Introducción</b>	1
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. <i>Chelonoidis chilensis</i> . . . . .	1
1.3. Metodologías . . . . .	3
1.3.1. Radiotelemetría . . . . .	3
1.3.2. Unidad de navegación . . . . .	4
1.3.3. i-gotU . . . . .	5
1.4. Redes complejas . . . . .	5
<b>2. Redes de interacción entre tortugas</b>	9
2.1. Trayectorias . . . . .	9
2.2. Zonas de interés . . . . .	10
2.3. Red de encuentros . . . . .	12
<b>3. Uso de refugios</b>	17
3.1. Refugios en el mapa . . . . .	17
3.2. Refugios más usados y caminos tomados . . . . .	20
3.3. Redes bipartitas de refugios . . . . .	21
3.4. Comparación topológica de redes de encuentros y redes proyectadas . .	25
3.5. Proyecciones de redes bipartitas en nodos refugio . . . . .	27
<b>4. Conclusiones y trabajo a futuro</b>	31

<b>Bibliografía</b>	<b>35</b>
---------------------	-----------

<b>Agradecimientos</b>	<b>37</b>
------------------------	-----------

# Índice de figuras

1.1.	Distribución geográfica de la especie de tortuga <i>Chelonoidis chilensis</i> . . . . .	2
1.2.	Unidad de navegación (tortugómetro) para monitorear individuos. . . . .	4
1.3.	Unidad de navegación comercial i-gotU para monitorear individuos. . . . .	5
2.1.	Trayectorias un dia de medición, sin filtrar. . . . .	9
2.2.	Distribución de velocidades. . . . .	10
2.3.	Trayectorias de un día de medición, después del filtrado. . . . .	11
2.4.	Mapa con zonas de recurrencia. . . . .	11
2.5.	Mapa con zonas de recurrencia para trayectorias diurnas. . . . .	12
2.6.	Encuentros por hora medida tomando los datos del tortugómetro. . . . .	13
2.7.	Encuentros por hora medida tomando los datos de los i-gotU. . . . .	14
2.8.	Red de encuentros entre tortugas con datos tomados por el tortugómetro. .	15
2.9.	Red de encuentros entre tortugas utilizando i-gotU. . . . .	15
3.1.	Histogramas de las distancias entre los puntos de los datos de i-gotU. .	19
3.2.	Distribución geográfica de los refugios encontrados para los datos provenientes de las campañas. . . . .	20
3.3.	Distribución geográfica de los refugios encontrados para los datos provenientes de los datos de i-gotU. . . . .	21
3.4.	Acumulada de noches pasadas en los refugios preferidos. . . . .	22
3.5.	Caminos tomados entre refugios para la tortuga T54. . . . .	23
3.6.	Red bipartita de refugios para los datos de los tortugómetros. . . . .	24
3.7.	Red bipartita de refugios para los datos de los i-gotU. . . . .	25
3.8.	Proyección de red bipartita de refugios para datos de los tortugómetros en nodos tortuga. . . . .	26
3.9.	Proyección de red bipartita de refugios para datos de los tortugómetros en nodos tortuga. . . . .	27
3.10.	Distribución del coeficiente de agrupamiento en proyecciones de redes aleatorias. . . . .	28
3.11.	Proyección de red bipartita de refugios para datos de los tortugómetros en nodos refugio. . . . .	29

---

3.12. Proyección de red bipartita de refugios para datos de los i-gotU en nodos refugio. . . . .	30
3.13. Proyección en nodos refugio con conexiones en el mapa. . . . .	30

# Índice de tablas

3.1. Tabla con métricas de comparación entre redes de encuentros y proyecciones de redes bipartitas. . . . .	22
3.2. Tabla con comparación de métricas obtenidas en redes bipartitas con usos aleatorios de refugios respecto a las métricas medidas. . . . .	24
3.3. Tabla con métricas asociadas a las tipologías de las redes de encuentros y las redes proyectadas. . . . .	26



# Resumen

A pesar de ser una de las especies más comercializadas en el mercado ilegal de mascotas de Argentina, se conoce muy poco sobre la tortuga terrestre *Chelonoidis chilensis* en su hábitat natural. Debido además a la creciente fragmentación de su hábitat producida principalmente por la reciente introducción de ganado, esta tortuga está catalogada como especie en estado vulnerable. Por estos motivos resulta muy importante el estudio de sus refugios, su área de movimiento y las relaciones entre las tortugas dentro la comunidad. La población de estudio se encuentra en el límite sur de su distribución geográfica, en las cercanías de San Antonio Oeste, Patagonia, Argentina. Por ser reptiles se los considera solitarios, aunque se sabe muy poco sobre su red de interacción social. En este trabajo, se estudió el movimiento de 27 individuos de *Chelonoidis chilensis* usando dos técnicas de monitoreo: una unidad de navegación autónoma con GPS y un *datalogger* comercial. Se implementó un método de filtrado de trayectorias y se construyó una grilla de zonas de interés para las tortugas, utilizando las trayectorias filtradas e interpoladas. Se implementaron dos criterios para identificar los refugios nocturnos de las tortugas. Sobre éstos se calculó la distancia media entre refugios y su centro de masa, tanto para machos como para hembras y no se encontraron diferencias significativas en el área abarcada por los refugios para ambos sexos. Se armaron redes bipartitas de nodos tortuga y refugio, y se compararon las proyecciones en nodos tortuga con las redes de interacción diurnas entre pares de tortugas. Se utilizó la proyección en nodos tortuga de la red bipartita como predictor de enlaces en la red de encuentros diurnos y se encontró que las predicciones no son estadísticamente significativas. Se calcularon métricas sobre la topología de la red proyectada y no se encontraron diferencias respecto del uso aleatorio de refugios. Finalmente, se descubrió la existencia de refugios preferidos y que la tortuga pasa noches consecutivas en refugios geográficamente cercanos.

**Palabras clave:** REDES COMPLEJAS, CHELONOIDIS CHILENSIS, USO DE REFUGIOS



# Abstract

Although it is one of the most commercialized species in the Argentinean illegal pet market, very little is known about the *Chelonoidis chilensis* tortoise in the wild. This fact, together with the increasing habitat fragmentation produced by cattle, that is being recently introduced into the area, lead to the classification of its conservation status as vulnerable. It is therefore essential to learn about their burrows, their movement area and the relationship between themselves and within their community. The studied population lives at the southernmost distribution of the species, near to San Antonio Oeste city in Patagonia, Argentina. As they are reptiles, they are considered mostly solitary, although very little is known about their social interaction network. In this work, the movement of 27 *Chelonoidis chilensis* tortoises were studied using two monitoring techniques: an autonomous GPS navigation unit and a commercial *datalogger*. A trajectory filtering method was implemented and a grid was built, showing the tortoises's areas of interest. Two criteria were used to identify tortoise nocturnal burrows. The average distance between burrows to the center of mass (of these burrows) was calculated for males and females and no significant differences were found. Bipartite networks of tortoise nodes and burrows were built and the projection in tortoise nodes was compared with the diurnal interaction network. The projection in tortoise nodes of the bipartite network was used as a predictor of links in the encounter diurnal network and it was found that the predictions are not statistically significant. Metrics on the topology of the projected network were calculated and no differences were found with respect to the random use of burrows. Finally, the existence of preferred burrows was found and also that tortoises spend consecutive nights in nearby burrows.

**Keywords:** COMPLEX NETWORKS, CHELONOIDIS CHILENSIS, BURROW USE



# Capítulo 1

## Introducción

“Take a walk with a turtle. And behold the world in pause.”

— Bruce Feiler

### 1.1. Motivación

El movimiento de los animales es de fundamental importancia para procesos ecológicos. Los humanos han estado interesados en el movimiento individual y poblacional por milenios. Hace más de 2000 años, Aristoteles escribió acerca del movimiento de los animales y los conceptos filosóficos y matemáticos asociados, en su libro, *De Motu Animalium*. Históricamente era crucial entender su comportamiento para saber cómo y dónde se podían obtener estas fuentes de alimento salvajes; por lo tanto, los primeros humanos eran modeladores naturales del movimiento animal. En tiempos modernos, estamos interesados en su movimiento por razones científicas y para poder tomar medidas de conservación y protección.

La mayoría de las especies animales son capaces de realizar complejos patrones de movimientos que generalmente dependen del ambiente, factores intrínsecos de los individuos y las interacciones entre ellos ([1], [2] y [3]). La complejidad de estos movimientos están manifestados en sus trayectorias.

### 1.2. *Chelonoidis chilensis*

Nuestra especie de interés es la tortuga *Chelonoidis chilensis*, que se distribuye desde el Gran Chaco hasta el norte de la Patagonia, como se muestra en la Fig. 1.1 [4]. Esta especie está incluida en el apéndice de la *Convention on International Trade in Endangered Species of Wild Fauna and Flora (CITES)* y fue categorizada como *vulnerable* a nivel nacional [5] e internacional por la *International Union for Conservation*

of Nature (IUCN). Los principales factores que llevaron a esta situación son la reducción, modificación y destrucción de su hábitat, debido a la expansión de la frontera agropecuaria, así como su comercialización, siendo la especie nativa de reptiles más ilegalmente traficada en el mercado de mascotas en Argentina [5]. Además, la amenaza a esta especie se ve aumentada con la introducción de especies depredadoras exóticas como el Jabalí (*Sus scrofa*) [6]. En este trabajo estudiaremos una población de tortugas en el límite sur de su distribución geográfica, a 20 km al norte de San Antonio Oeste, provincia de Río Negro, Argentina.

Las tortugas son animales herbívoros que se alimentan con tallos, frutos de cactus (*Opuntia sulphurea*, *Cereus aethiops*, *Perocactus tuberosus*), gramíneas (*Chloris castilloniana*, *Trichloris crinita*), herbáceas (*Alternanthera pugens*, *Sphaeralcea miniata*, *S. mendocina*, *Portulaca grandiflora*) y vainas de leguminosas [7].



**Figura 1.1:** Distribución geográfica de la especie de tortuga *Chelonoidis chilensis*. En este trabajo estudiaremos una población de tortugas en el límite sur de su distribución geográfica, a 20 km al norte de San Antonio Oeste, provincia de Río Negro, Argentina.

Esta especie presenta un dimorfismo sexual cuando son adultos, siendo los machos notablemente más chicos que las hembras. El período de actividad de la especie (en la distribución más sur) a las latitudes de la zona de estudio es el más corto, ya que durante el invierno bruman (parecido a hibernar) por aproximadamente cinco meses. Sus períodos de actividad comienzan durante la primavera, en el mes de septiembre.

Desde noviembre a diciembre, ocurren los apareamientos; y entre enero y marzo es cuando las hembras pasan una gran parte del tiempo buscando un lugar adecuado para enterrar sus huevos [8]. Al momento se conoce muy poco sobre la dinámica poblacional de *C. chilensis* presente en Argentina.

Motivados por la falta de información, el objetivo de este estudio es caracterizar el movimiento y las interacciones de las tortugas en una de las poblaciones en el límite sur de su distribución geográfica. Aprender acerca del movimiento de los individuos es fundamental para entender su rol ecológico en el ecosistema y para diseñar políticas de conservación de la especie y de su hábitat.

## 1.3. Metodologías

Se combinaron diferentes técnicas para monitorear las trayectorias de las tortugas. Para este trabajo se utilizaron datos recolectados por el grupo de investigación (Física Estadística e Interdisciplinaria) en cuatro campañas de medición realizadas entre enero de 2020 y mayo del 2022.

En primer lugar se utilizó la técnica de radiotelemetría para la localización de la posición de las tortugas. En segundo lugar, se utilizó una unidad de navegación (construida en el Centro Atómico Bariloche), para registrar señales de GPS y que contaba con sensores iniciales y de temperatura. En tercer lugar, más recientemente en el año 2022 se comenzó a utilizar un *datalogger* comercial (i-gotU GT120) que toma datos de GPS y hora. En las siguientes subsecciones se proveerán más detalles de ambas metodologías.

### 1.3.1. Radiotelemetría

La técnica de radiotelemetría permite localizar individuos mediante un sistema de transmisor-receptor-antena. Se utilizaron transmisores Holohil (Grand HOLOHIL Systems Ltd. RI-2B) pegados a los caparazones de las tortugas mediante cinta adhesiva. Estos transmisores emiten un pulso a una determinada frecuencia ( $\approx 150$  MHz) cada dos segundos. Los pulsos eran detectados por un sistema de recepción, que consistía en una antena Yagi-Uda conectada a un receptor ATS R410 (Advanced Telemetry Systems, Inc.). Esta técnica permite con gran precisión localizar el transmisor y, usando un GPS portátil (Garmin eTrexx20), determinar la ubicación de la tortuga.

A pesar de ser muy precisa espacialmente, esta técnica no posee una buena resolución temporal, necesaria para reconstruir trayectorias confiables. En primer lugar, es necesario seguir constantemente al individuo para tener una mejor resolución temporal. En segundo lugar, el investigador debe acercarse a una distancia considerable de la tortuga para tomar su posición con el GPS. Ambos factores pueden alterar el

comportamiento de la tortuga y su trayectoria. En las siguientes secciones se describen la unidad de navegación y el i-gotU, que ofrecen una alta resolución temporal en las trayectorias sin perturbar al comportamiento animal. Es por esta razón que solo se usó esta técnica para recuperar la unidad de navegación y el i-gotU, no para monitorear la trayectoria directamente.

### 1.3.2. Unidad de navegación

Se desarrolló en el departamento de Ingeniería del Centro Atómico una unidad de bajo presupuesto para monitorear individuos en su hábitat natural (de ahora en más llamado tortugómetro), que consiste en un receptor GPS, sensores iniciales (acelerómetro y giróscopo) y un sensor de temperatura (Fig. 1.2). El mismo está alimentado por una batería recargable que le da una autonomía de aproximadamente 15 horas considerando una adquisición del GPS de un punto cada 5-10 minutos. El peso del tortugómetro es de 45 g representando el 3 % del peso de una tortuga de tamaño medio, lo que es aceptable para no disturbar el movimiento del animal. Los datos del receptor de GPS y de los sensores iniciales fueron guardados en una memoria micro-SD. Al final de cada día de monitoreo se descargaron los datos de la memoria y se cargaron las baterías.

En este trabajo se utilizaron datos obtenidos por campañas realizadas por el grupo de investigación. Se contó con 8 de estas unidades en correcto funcionamiento para monitorear las tortugas en cada día de campaña. Las campañas de medición donde se utilizó esta técnica fueron entre enero de 2020 y enero del 2022. Se monitorearon en total 27 individuos por un total de 1160 horas.



**Figura 1.2:** Unidad de navegación (tortugómetro) para monitorear individuos. Consiste de un GPS, sensores iniciales (giróscopo y acelerómetro) y de temperatura, todos conectados a una unidad de control y procesamiento. Pesa menos de 45 g. Las posiciones del GPS son adquiridas cada 10 minutos y se almacenan en la tarjeta micro SD extraíble.

### 1.3.3. i-gotU

La unidad de navegación comercial i-gotU GT120 (Fig. 1.3) es una unidad de bajo costo que permite monitorear la posición de individuos en su hábitat natural. La misma posee un receptor GPS, donde se puede programar la frecuencia de medición a través de un software provisto por el fabricante. La batería de la unidad permite una autonomía de aproximadamente 7 días. El peso de la misma es de 21 g, lo que representa el 1.5 % del peso de una tortuga de tamaño medio. La unidad posee una memoria interna que almacena los datos de posición y hora. Los datos se pueden descargar a la computadora a través de un puerto USB.



**Figura 1.3:** Unidad de navegación i-gotU para monitorear individuos. Pesa aproximadamente 21 g, las posiciones del GPS son adquiridas cada 15 minutos y se almacenan en la memoria interna del dispositivo.

Con este dispositivo se obtuvieron datos de campañas realizadas entre finales de enero 2022 y abril 2022, se contaron con 12 de estas unidades en correcto funcionamiento y se decidió monitorear a las mismas 6 tortugas intercambiando el i-gotU a cada una de ellas cada 7 días. Se programaron los i-gotU para adquirir posición y hora cada 15 minutos entre las 6 de la mañana y las 9 de la noche, sobre la noche no adquiere datos para ahorrar batería. En total se monitorearon aproximadamente 1000 horas por tortuga, ya que algunas semanas no se llegó a intercambiar los i-gotU.

## 1.4. Redes complejas

El uso de herramientas de redes complejas permitió comparar resultados provenientes de diferentes análisis sobre los datos de la posición de las tortugas. En este trabajo

se utilizaron métricas sobre la topología de distintas redes generadas, todas calculadas utilizando funciones implementadas en la librería NetworkX de Python [9].

Una red es un conjunto de elementos (nodos) conectados entre sí por enlaces (aristas). Las redes se consideran complejas cuando tienen características que las distinguen de modelos generadores sencillos, por ejemplo, el modelo de Erdos-Rényi. La forma en que están conectados los nodos en la red (o su topología) puede ser estudiada a través de distintas métricas. En este trabajo se utilizaron las siguientes métricas:

- **Densidad:** es la fracción de enlaces que existen en la red respecto de la cantidad de enlaces que podrían existir en la red. Se calcula como:

$$\rho = \frac{2m}{n(n-1)}, \quad (1.1)$$

donde  $n$  es la cantidad de nodos y  $m$  la cantidad de enlaces.

- **Modularidad:** es una medida de fuerza de división de la red en grupos de nodos o comunidades. Se calcula como:

$$Q = \sum_{c=1}^n \left[ \frac{L_c}{m} - \gamma \left( \frac{k_c}{2m} \right)^2 \right], \quad (1.2)$$

donde  $L_c$  es la cantidad de enlaces que conectan nodos de la comunidad  $c$ ,  $k_c$  es la cantidad de enlaces que conectan nodos de la comunidad  $c$  con nodos de otras comunidades,  $m$  es la cantidad de enlaces en la red y  $\gamma$  es un parámetro que depende de la red. En este trabajo se utilizó  $\gamma = 1$ . Las comunidades en la red se identificaron a través de un método de propagación de etiquetas semi-síncrono [10].

- **Coeficiente de agrupamiento:** es una medida de la densidad de enlaces entre los vecinos de un nodo. Se calcula como:

$$c_u = \frac{2T(u)}{\deg(u)(\deg(u)-1)}, \quad (1.3)$$

donde  $T(u)$  es la cantidad de triángulos formados por los vecinos de  $u$  y  $\deg(u)$  es la cantidad de vecinos de  $u$  (grado de  $u$ ).

- **Centralidad de grado:** para un nodo  $v$ , la centralidad de grado es la fracción de nodos a la que está conectado. Se calcula como:

$$C_G(v) = \frac{\deg(v)}{n-1}, \quad (1.4)$$

donde  $\deg(v)$  es el grado del nodo  $v$  y  $n$  es la cantidad de nodos en la red. Da

una idea de la importancia relativa de un nodo en la red.

En los siguientes capítulos se analizarán los datos obtenidos, a través de las metodologías mencionadas, mediante el enfoque de redes complejas.



# Capítulo 2

## Redes de interacción entre tortugas

*“There are times in any science that a transformation to deeper understanding is pressing upward in some as yet poorly articulated form. We may be in such a period in biology.”*

— Stuart A. Kauffman, 1993

### 2.1. Trayectorias

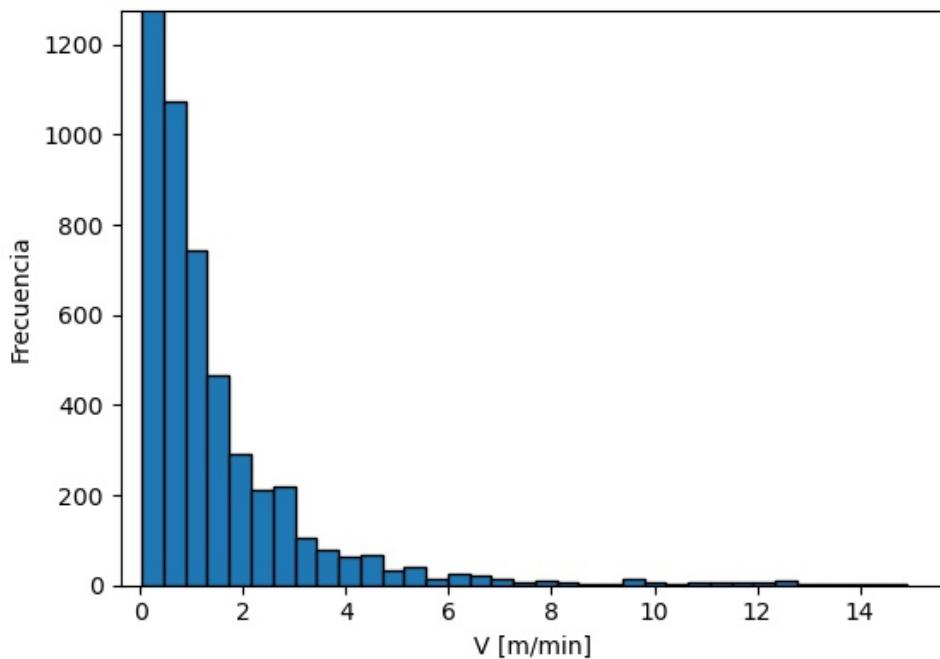
En la Fig. 2.1 se muestran las trayectorias obtenidas de los datos crudos en el día de medición 1/12/2020. Para graficar el mapa de las trayectorias se realizó un programa en el lenguaje Python utilizando la librería Folium [11].



**Figura 2.1:** Trayectorias del 1/12/2020; cada color representa una tortuga diferente. Ambas metodologías fueron implementadas; algunos puntos tomados con el tortugómetro escapan a la trayectoria esperada.

Se observa en la Fig. 2.1, que algunos puntos tomados por el tortugómetro se desvían de la trayectoria esperada para una tortuga (recorren distancias del orden de los kilóme-

tros en menos de 10 minutos). Se estima que estas desviaciones se producen por dos motivos: en primer lugar, en los primeros minutos de medición, el GPS comienza a conectarse a satélites hasta tener la precisión máxima, haciendo que los primeros puntos tengan una mayor desviación; en segundo lugar, se observó de manera aleatoria la desviación de algún punto respecto de la trayectoria típica. Para filtrar estas desviaciones, se implementó un método basado en la velocidad máxima que pueden alcanzar los individuos. El mismo está detallado en el repositorio de GitHub, archivo *Criterio-ParaSacarData.py* [11]. Para obtener la velocidad máxima se calculó la distribución de velocidades de la Fig. 2.2.

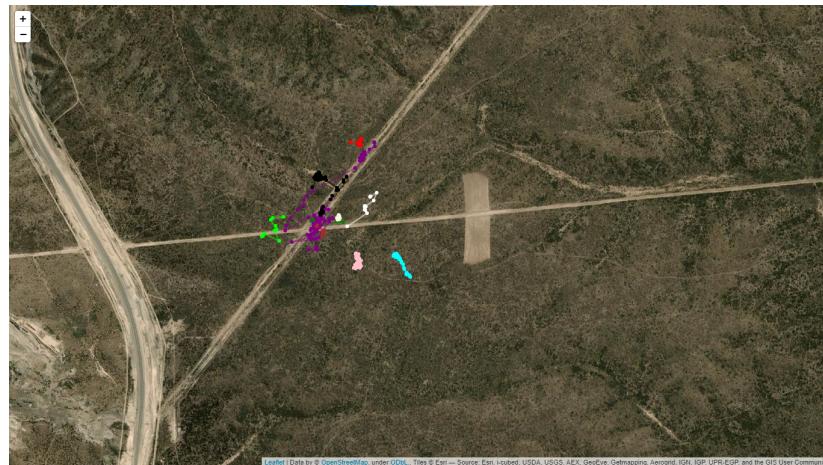


**Figura 2.2:** Histograma de velocidades en m/min. Las velocidades obtenidas mayores a 15 m/min están órdenes de magnitud por encima y fueron descartadas.

Se observó en la distribución de velocidades de la Fig. 2.2, que las tortugas llegan a una velocidad máxima de aproximadamente 15m/min, de manera que se adoptó el criterio de filtrar los tramos de trayectoria en los que la velocidad supera ese valor máximo. Filtrando los puntos de la Fig. 2.1, tomando velocidad máxima 15 m/min, se obtuvo el mapa de la Fig. 2.3.

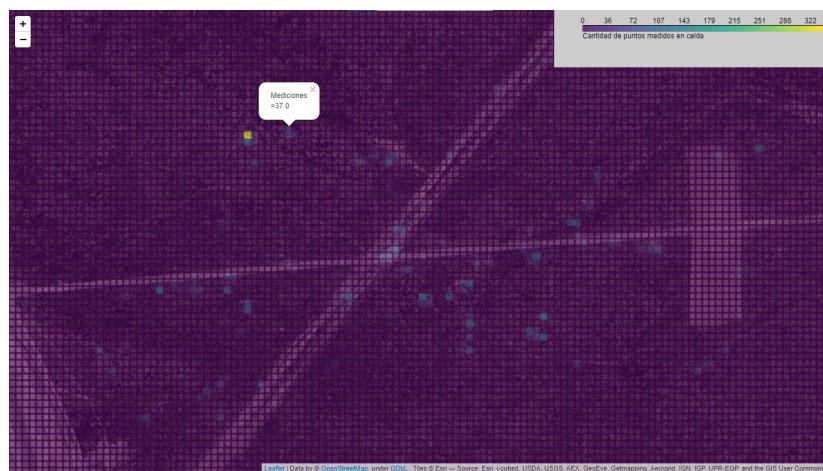
## 2.2. Zonas de interés

Partiendo de las trayectorias filtradas, se realizó una grilla identificando las zonas de recurrencia en la Fig. 2.4. Las celdas de la grilla fueron elegidas de  $10\text{ m}^2$  debido a que se estima en 10 m el error del GPS del tortugómetro y se está revisando para



**Figura 2.3:** Trayectorias del 1/12/2020 luego del filtrado; cada color representa una tortuga diferente.

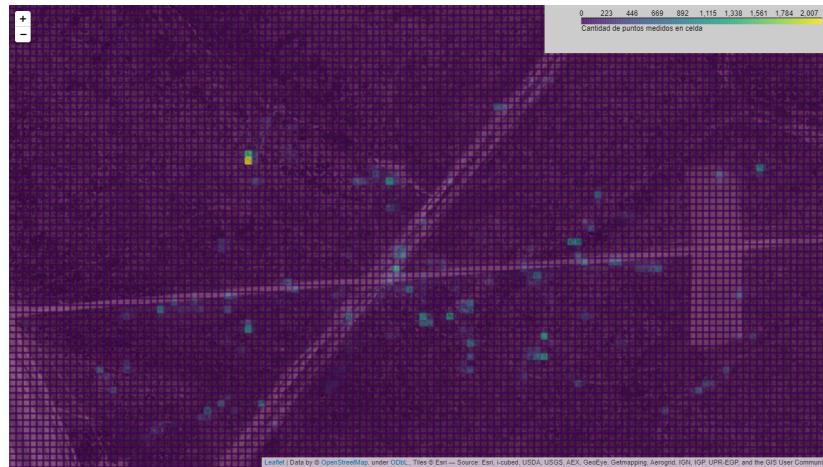
ambas modalidades el valor del mismo. Para cada celda se contó el número de veces que estuvieron allí las tortugas, la grilla fue programada en Python [11]. En caso de que se pudieran identificar los factores o características de las zonas más recurridas, se podrían sugerir políticas de manejo para minimizar los daños sobre las tortugas. Esto es especialmente importante dado que ahora se está introduciendo ganado en la zona con el consiguiente deterioro del hábitat natural de las mismas.



**Figura 2.4:** Mapa de recurrencias interactivo con las trayectorias filtradas. Al hacer clic en cualquier celda de la grilla un cartel dice cuantas mediciones fueron tomadas. El tamaño de celda es de  $10m^2$ .

Se puede observar en la Fig. 2.4 un punto que se destaca mucho más que el resto (arriba a la izquierda) teniendo el máximo de mediciones en esa casilla. Esto se debe a que una pareja de tortugas pasó la noche con el tortugómetro puesto en medio de un arbusto de difícil acceso. Para obtener una mejor idea de las zonas de interés diurnas se realizó otra grilla usando solo datos del tortugómetro registrados en el día (entre

7am y 9pm) y realizando una interpolación lineal de 1 punto por minuto por cada par de puntos consecutivos (Fig. 2.5, [11]). Esta interpolación da una aproximación de las casillas por donde tuvo que pasar la tortuga y añade un peso cuando la tortuga se quedó dentro de la misma casilla por una mayor cantidad de tiempo (mediciones consecutivas).



**Figura 2.5:** Mapa de recurrencias interactivo con las trayectorias diurnas (7am-9pm) filtradas e interpoladas linealmente. Al hacer clic en cualquier celda de la grilla un cartel dice cuantas mediciones fueron tomadas. El tamaño de celda es de  $10m^2$ .

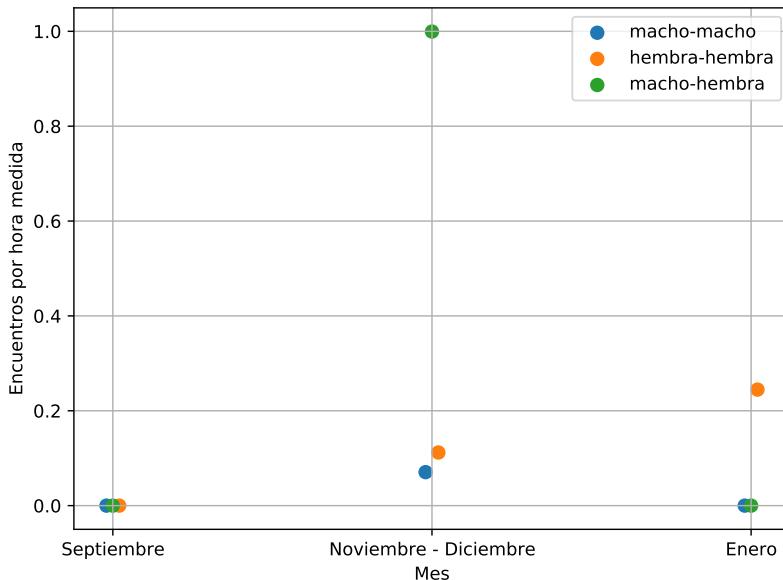
Comparando las Figs. 2.4 y 2.4, se observa en la Fig. 2.5 un mayor contraste de las otras celdas respecto al que se encuentra arriba a la izquierda. Esto se debe a la extracción de los puntos nocturnos. Al momento se desconocen los motivos por los cuales dichas zonas son muy visitadas, esto será investigado en profundidad en el futuro.

### 2.3. Red de encuentros

Partiendo de las trayectorias filtradas, se decidió buscar el solapamiento de las trayectorias, para identificar los encuentros. Para ello, se implementó un código en Python que, partiendo de cualquier punto de su trayectoria, busca si hay otro punto de otra tortuga que se encuentre a una distancia menor a 20 metros (se estima que el error del GPS es de 10 m) y a una distancia temporal menor a 20 minutos. Cuando se cumple esta condición se van guardando los pares de puntos junto con la hora y el nombre de ambas tortugas.

En las Figs. 2.6 y 2.7, pueden verse la cantidad de encuentros calculados por hora medida por los tortugómetros y por los i-gotU en función de los meses de medición. Los encuentros del tipo macho-hembra fueron normalizados por la cantidad promedio de horas medidas de ambos sexos para cada mes, en cambio para la cantidad de encuentros macho-macho y hembra-hembra se normalizó utilizando la cantidad de horas medidas

para cada sexo en cada mes.



**Figura 2.6:** Encuentros sobre cantidad de horas medidas para cada sexo en función de los meses de medición utilizando el tortugómetro. Los distintos colores identifican el tipo de encuentro.

En la Fig. 2.6, se observa que el máximo de encuentros del tipo macho-hembra por hora medida ocurre en los meses noviembre-diciembre; esto coincide con la época de apareamiento. Estos meses están juntos, ya que las mediciones en esos meses fueron tomadas a finales de noviembre y principios de diciembre. Para el mes de enero solo se registraron encuentros del tipo hembra-hembra en ambas figuras ( 2.6 y 2.7), esto puede deberse a que las hembras están buscando un lugar acorde para depositar sus huevos, haciendo el encuentro hembra-hembra más probable. Para los datos de los i-gotU (2.7) también se registraron encuentros en los meses de febrero, marzo y abril, pero en menor cantidad que en los meses anteriores, asociamos esta diferencia a la disminución de actividad en las tortugas propia de este periodo.

Utilizando los encuentros calculados, se armaron dos redes de interacción utilizando la librería NetworkX [9], una para los datos obtenidos con tortugómetro y otra para los datos provenientes de i-gotU (Figs. 2.8 y 2.9). Las conexiones entre nodos tortugas tienen peso linealmente dependiente de la cantidad de encuentros entre ellas, esto se observa en el grosor del link entre dos tortugas y las distancias relativas entre nodos.

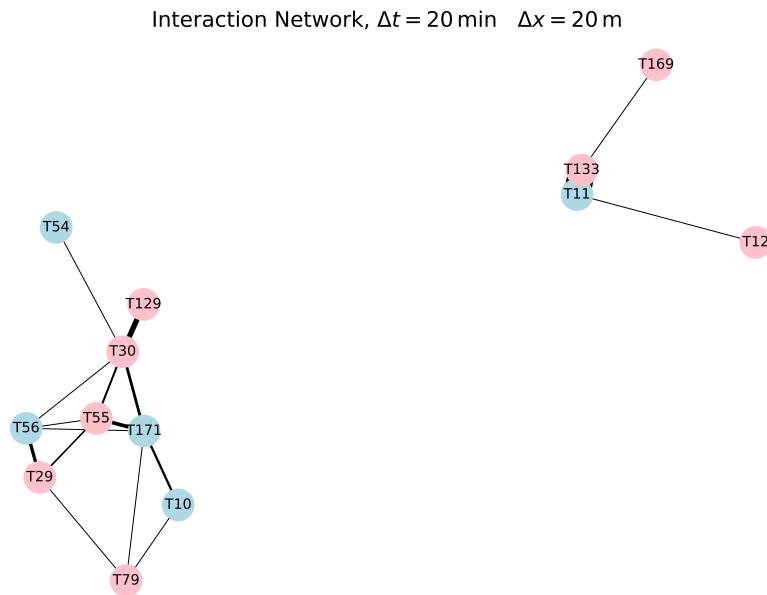
En la Fig. 2.8, se observa que la red de interacción está compuesta por dos comunidades. Sobre estas comunidades, se calcularon la media de las posiciones de cada nodo tortuga junto con su desviación estándar y no se encontraron diferencias significativas en estos valores para nodos tortugas pertenecientes a cada una de las comunidades. Esto nos indica que las tortugas que pertenecen a cada comunidad, no están separadas en el espacio y no es la causa de la separación de la red en dos comunidades. Queda a



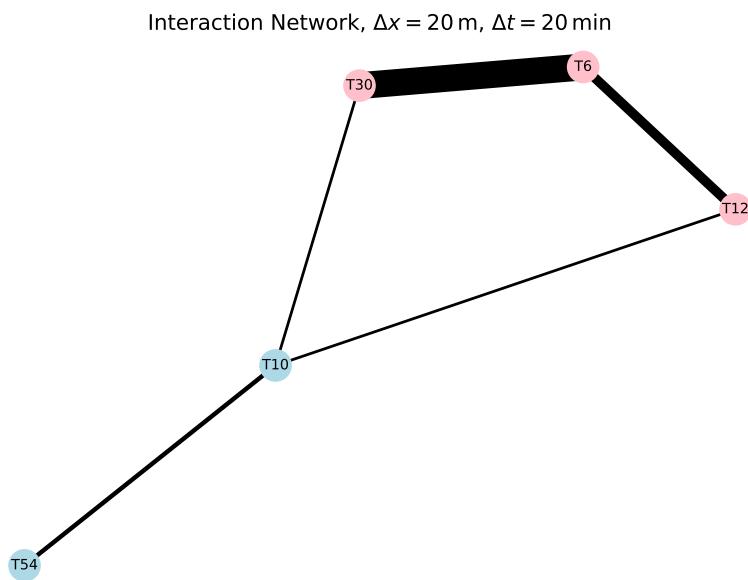
**Figura 2.7:** Encuentros sobre cantidad de horas medidas para cada sexo en función de los meses de medición utilizando los i-gotU. Los distintos colores identifican el tipo de encuentro.

determinar en futuros trabajos si la separación de la red en estas dos comunidades está relacionada con la cantidad de mediciones o con alguna característica de la población de tortugas estudiada. En la red, también se observan diferencias de grado, teniendo algunas tortugas muchas más conexiones que otras. Se seguirá trabajando para identificar comportamientos particulares de las tortugas que puedan estar relacionados con la distribución de grado de la red.

En la Fig. 2.9, se observa una mayor cantidad de encuentros entre las tortugas hembras (grosor de enlace), esto puede deberse a la época de medición, ya que en enero las tortugas hembras están en búsqueda de algún lugar para depositar sus huevos. En el siguiente capítulo se analizarán redes bipartitas de refugios y tortugas y se compararán con las redes de interacción de tortugas para entender mejor este aspecto.



**Figura 2.8:** Red de encuentros entre tortugas para datos provenientes de la metodología tortugómetro. La condición de encuentro está dada por una distancia espacial menor a 20 metros y a una distancia temporal menor a 20 minutos. Los datos de tortugómetros fueron tomados en distintas campañas en los meses de octubre, noviembre, diciembre y mediados de enero.



**Figura 2.9:** Red de encuentros entre tortugas para datos provenientes de las metodologías i-gotU. La condición de encuentro está dada por una distancia espacial menor a 20 metros y a una distancia temporal menor a 20 minutos. Los datos de los i-gotU fueron tomados desde finales de febrero hasta principios de mayo.



# Capítulo 3

## Uso de refugios

*“In retrospect, Euler’s unintended message is very simple: Graphs or networks have properties, hidden in their construction, that limit or enhance our ability to do things with them.”*

— Albert-László Barabási, 1982

Para varias especies los refugios son fundamentales para la protección ante depredadores y condiciones climáticas adversas, especialmente para animales ectotérmicos, como las tortugas que dependen de fuentes externas para la obtención de calor. En especies relativamente solitarias, es esperable que los individuos pasen un tiempo considerable solos en los refugios o tengan pocos encuentros directos fuera de la época de apareamiento [12]. Ejemplos de estas especies incluyen a los mapaches, zorros rojos, orangutanes y algunas especies de abejas, avispas y murciélagos. Para estas poblaciones de animales salvajes, monitorear y entender estos refugios puede ayudar a establecer patrones sociales de los individuos.

En distintos campos cercanos a la zona de medición (San Antonio Oeste, provincia de Río Negro) están introduciendo ganado en el habitat de las tortugas, por lo tanto es importante entender si esta perturbación presenta una amenaza para la integridad de los refugios. Entender el patrón de movimiento de las tortugas, junto con las características geográficas de los refugios más usados es de fundamental importancia para el establecimiento de políticas de conservación.

### 3.1. Refugios en el mapa

Para determinar el refugio donde pasó la noche la tortuga se tomaron dos criterios, uno para cada una de las metodologías de medición. Para la metodología de tortugómetro se tomó el último punto registrado de la tortuga en un día de medición y se pidió la

condición que haya sido tomado después de las 20 horas. En base a las anotaciones de campo tomadas por el grupo, las tortugas generalmente se encontraban en el refugio cuando quitaban los tortugómetros después de este horario. A este punto nuevo se le asigna una etiqueta de refugio y un enlace a la tortuga que pasó la noche en ese refugio. A medida que se añade otro refugio, primero se verifica que presente una distancia mayor a 20 metros con todos los otros refugios etiquetados. En caso de que la distancia sea menor de 20 metros al refugio 1 (por ejemplo) se dice que la tortuga estuvo en el refugio 1.

Para los datos tomados por los i-gotU, se decidió mirar primero las distancias recorridas entre el último punto medido (21:00 horas) de algún día monitoreado y el primer punto del día siguiente (6:00 horas). También se miraron las distancias entre el primer punto de algún día de monitoreo con el segundo punto (6:00 horas y 6:15 respectivamente). En la Fig. 3.1 se muestran los histogramas de las distancias para ambos casos. Se observa que entre el último punto de la noche y el primero de la mañana distancias mayores a 20 metros son muy probables, con varias mediciones de distancias del orden de los 50 o 100 metros, lo que nos diría que la tortuga no se encuentra aún en el refugio a las 21 horas. En cambio, entre el primer punto del día y el segundo punto, las distancias menores a 20 metros son las más probables, lo que nos diría que la tortuga todavía no abandonó el refugio entre las 6:00 y las 6:15, a excepción de algunos pocos casos donde tenemos distancias del orden de los 50 m. Por ese motivo, para los datos de los i-gotU se decidió tomar el primer punto del día como la posición del refugio y se siguió el mismo procedimiento que con los tortugómetros para agregar etiquetas a los refugios. En función de este resultado, para próximas campañas se decidió mantener las mediciones del i-gotU entre las 21:00 y las 6:00 horas, pero disminuyendo la frecuencia de muestreo.

Se graficaron los refugios encontrados en un mapa utilizando la librería Folium. Los mapas fueron guardados en formato html para el fácil acceso a los mismos y al clickear en un refugio sobre el html aparece un cartel con las tortugas que pasaron la noche en el mismo. En las Fig. 3.2 y 3.3 se muestran los mapas de los refugios encontrados para los datos de las campañas y los datos de i-gotU respectivamente.

En base a observaciones directas de campo [8], se observaron ciertos machos en distintas zonas de medición, en particular para la época de apareamiento. Estas observaciones aisladas nos llevaron a pensar que es posible que tortugas macho tengan una distribución de refugios más amplia en el espacio que tortugas hembra. Para poner a prueba esta hipótesis se definieron dos métricas: centro de masa de refugios y distancia media entre refugios. El centro de masa se define como:



**Figura 3.1:** Histogramas de las distancias entre los puntos de los datos de i-gotU. Arriba se muestra la distancia entre el último punto del día anterior y el primer punto del día siguiente. Abajo se muestra la distancia entre el primer punto del día y el segundo punto del día.

$$X_{centro} = \sum_{n=0}^{N-1} \frac{i_n X_n}{I_{totales}}.$$

Donde  $I_{totales}$  es la cantidad de noches donde se registró que la tortuga durmió en un refugio (depende de cada tortuga),  $X_n$  es la coordenada  $X$  del refugio  $n$ ,  $i_n$  es la cantidad de noches que la tortuga durmió en el refugio  $n$  y  $N$  la cantidad de refugios totales. Esta cantidad se calcula para todas las tortugas. Partiendo de  $X_{centro}$ , la distancia media espacial de los refugios se calcula como:

$$D = \sum_{n=0}^{N-1} \frac{|X_n i_n - X_{centro}|}{I_{totales}}.$$

El valor de  $D$  da una idea de la extensión en el espacio de los refugios de una dada tortuga. Cuanto mayor es el valor de  $D$ , más dispersos estarán los refugios en el espacio. Esta métrica fue calculada para todas las tortugas y promediada para machos y hembras. Se encontró para los machos  $\bar{D}_m = (128 \pm 66)$  m y para las hembras  $\bar{D}_h = (122 \pm 82)$  m. Es decir que no se encontraron diferencias significativas en la distribución espacial de refugios entre machos y hembras.



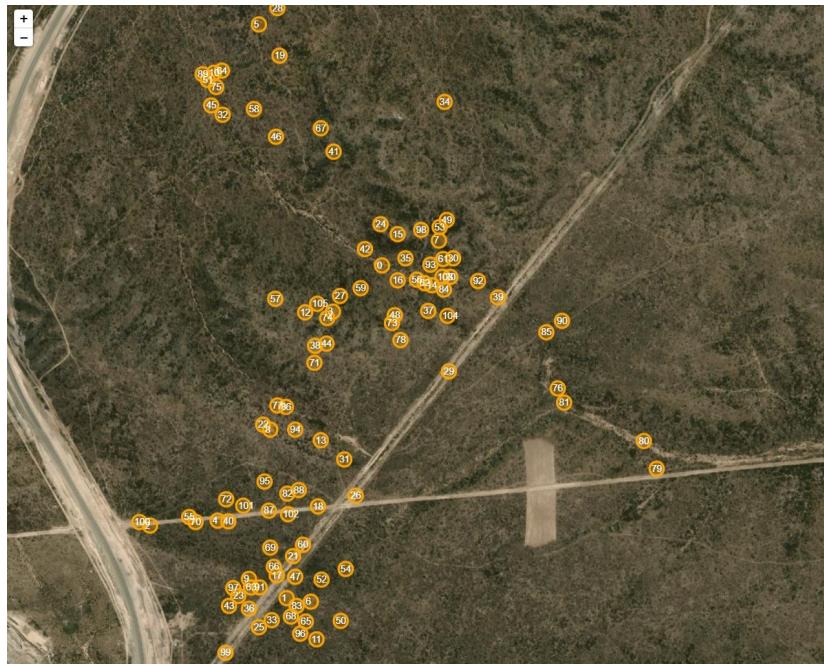
**Figura 3.2:** Distribución geográfica de los refugios encontrados para los datos provenientes de las campañas.

### 3.2. Refugios más usados y caminos tomados

Dentro de los refugios que utiliza una tortuga, se encontraron refugios preferidos, es decir refugios que fueron visitados recurrentemente. Para observar esto se decidió graficar la acumulada de noches pasadas en un refugio para los refugios más utilizados por una tortuga, y así poder visualizar la cantidad de noches que pasó en el refugio preferido y los días donde volvió al mismo. Esto se realizó solo para los datos provenientes de los i-gotU, ya que se contó con una gran cantidad de días consecutivos de medición (Fig. 3.4). Se observa en la Fig. 3.4 que las tortugas tienen un refugio preferido donde pasan la mayor parte de las noches monitoreadas (donde la recta tiene pendiente es positiva). Sin embargo, también se observó que algunas tortugas tienen varios refugios preferidos, como es el caso de la tortuga T54. En las tortugas T30, T54, T6 y T79, se registraron días donde cada tortuga decidió pasar la noche en otro refugio (línea horizontal) para después volver a su refugio preferido (recta con pendiente positiva).

Para visualizar estas rutas entre refugios y la preferencia relativa entre ciertos refugios, se realizaron mapas con la librería Folium donde se graficaron los refugios con círculos de tamaño proporcional a la cantidad de noches que la tortuga pasó en el refugio y con conexiones entre refugios ilustrando las rutas tomadas. Es decir si la T54 pasó una noche en el refugio 12 y la noche siguiente en el refugio 3, habrá una línea entre el refugio 12 y el refugio 3 en el mapa. En la Fig. 3.5 se muestra un ejemplo de este tipo de mapa para la tortuga T54.

Haber encontrado preferencia por ciertos refugios abre distintas preguntas: ¿Qué



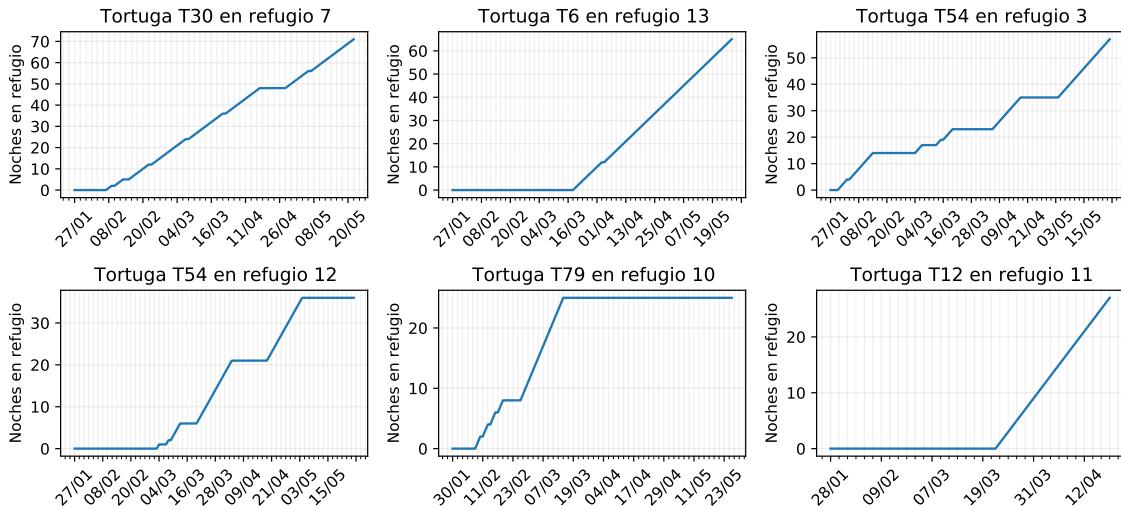
**Figura 3.3:** Distribución geográfica de los refugios encontrados para los datos provenientes de los datos de i-gotU.

características comparten estos refugios preferidos? ¿Siguen recurriendo a estos refugios en distintas épocas del año u otros años? Responder estas preguntas podría ayudarnos a entender el rol de la memoria en esta especie de reptiles y a plantear medidas de conservación de la especie. En futuras campañas de medición se espera poder entender más sobre estos refugios preferidos.

### 3.3. Redes bipartitas de refugios

Se armaron redes bipartitas con nodos refugio y nodos tortuga. En este tipo de redes, los nodos refugio solo están conectados con nodos tortuga y las conexiones indican que esa tortuga usó ese refugio. Partiendo de todas las etiquetas de refugios con las tortugas que pasaron noche en ese refugio, se armaron las redes bipartitas para los datos tomados por los tortugómetros y los datos tomados con los i-gotU, Figs. 3.6 y 3.7 respectivamente.

En la Figs. 3.6 y 3.7, se observan refugios compartidos entre dos y tres tortugas. En base a este resultado, se decidió buscar la probabilidad de que dos nodos tortuga estén conectados en la red de encuentros (Figs. 2.8 y 2.9). Al proyectar la red bipartita en nodos tortuga obtenemos redes comparables con las redes de encuentros, en las Figs. 3.8 y 3.9. Sin embargo la interpretación de ambas redes es diferente. Mientras la red de encuentros une tortugas que se encontraron durante el día, la red proyectada une tortugas que hayan usado el mismo refugio.



**Figura 3.4:** Acumulada de noches pasadas en los refugios preferidos para distintas tortugas monitoreadas por los i-gotU de enero 2022 a mayo 2022.

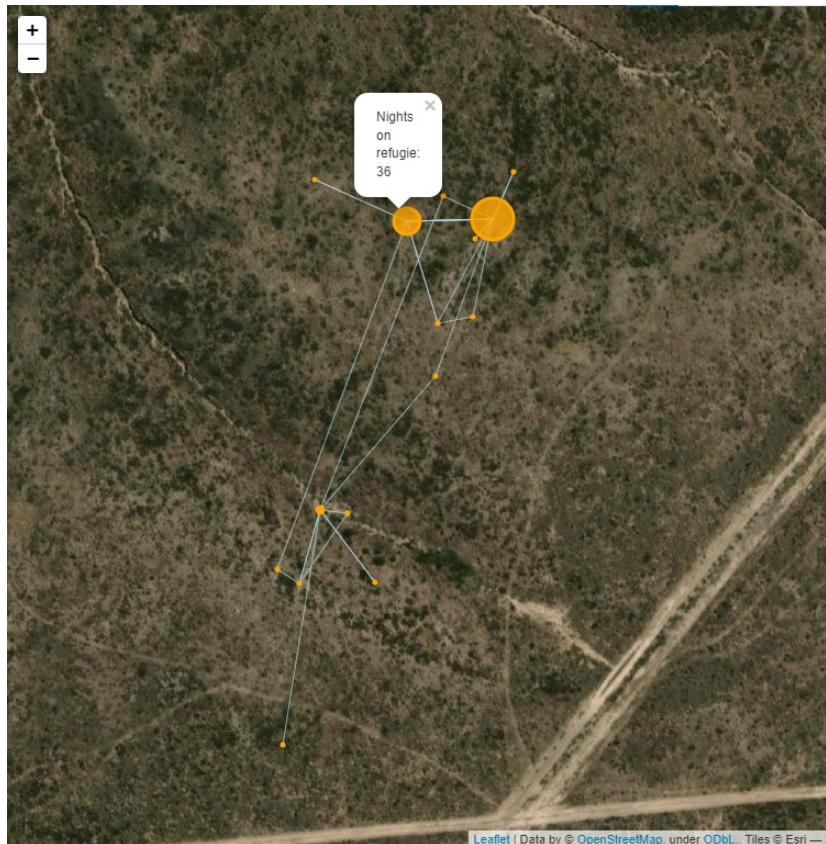
Para ver que tan probable es el encuentro entre tortugas, en caso que hayan usado alguna vez el mismo refugio, se decidió tomar las proyecciones de las redes bipartitas como predictores de conexiones en las redes de encuentros. Se calcularon las métricas precisión, accuracy y recall, partiendo de las cantidades verdadero positivo (TP), verdadero negativo (TN), falso positivo (FP) y falso negativo (FN). Donde, por ejemplo, TP se calculó como la cantidad de conexiones existentes en las redes de encuentros que también están en las redes proyectadas. La precisión se calculó como  $TP/(TP+FP)$ , accuracy como  $(TP+TN)/(TP+TN+FP+FN)$  y recall como  $TP/(TP+FN)$ . Los resultados se muestran en la tabla 3.1.

Metodología	Precisión	Recall	Accuracy
Tortugómetro	0.125	0.059	0.258
i-gotU	1	0.4	0.4

**Tabla 3.1:** Tabla con métricas de comparación entre redes de encuentros y proyecciones de redes bipartitas. Se tomó la proyección de la red bipartita como predictor de conexiones en las red de encuentros.

Se observa en la tabla 3.1, que las métricas obtenidas para los datos provenientes de los tortugómetros son considerablemente menores que las métricas obtenidas para los datos provenientes de los i-gotU. Estas diferencias se cree que están asociadas a la poca cantidad de refugios nocturnos medidos para los datos del tortugómetro, ya que originalmente las campañas de medición no se planearon para este tipo de análisis. Por otro lado, con los i-gotU se monitorean una menor cantidad de tortugas, produciendo una desviación en la medición.

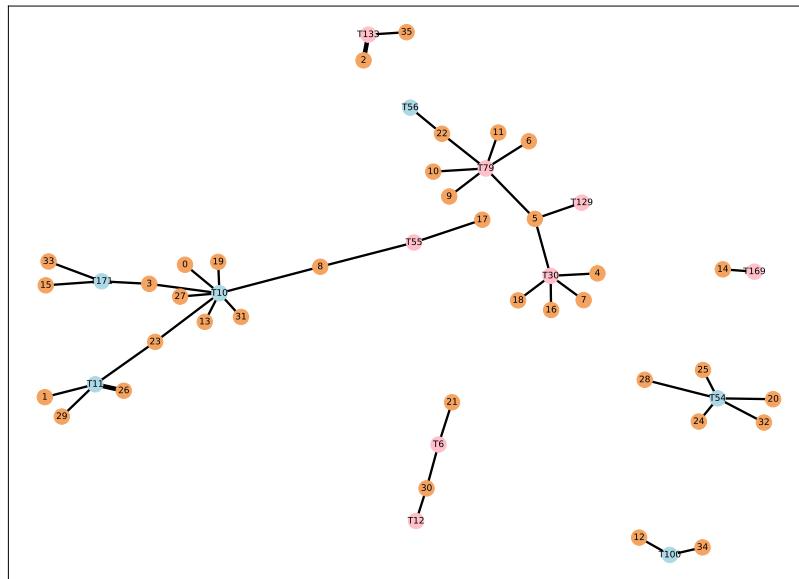
Para determinar si los resultados de la tabla 3.1 son estadísticamente significativos, se realizaron operaciones de *double edge swap* [12] sobre las redes bipartitas de refugios



**Figura 3.5:** Caminos tomados entre refugios para la tortuga T54. El tamaño de nodo refugio es proporcional a la cantidad de noches que pasó la tortuga en el mismo. Una conexión entre un par de nodos refugio aparece solo si pasó una noche en el refugio de origen y la noche siguiente en el refugio de destino. Al cliquear sobre un nodo refugio se puede ver la cantidad de noches que pasó la tortuga en el mismo.

y tortugas, y se compararon los valores obtenidos sobre estas nuevas redes generadas, después de haber hecho las proyecciones. Las redes generadas tenían la misma distribución de grado que las redes originales pero eran aleatorias con respecto a otras propiedades de las mismas y permiten comparar las métricas halladas con un modelo de correlación nula.

Se realizó un código en Python que elige dos conexiones al azar en la red bipartita y las intercambia, si es que no existen ya estas conexiones. Es decir, si T10 usó el refugio 54 y T11 el refugio 32, se intercambian los enlaces en caso que T10 no tenga una conexión con el refugio 32 y tampoco la T11 con el refugio 54 [11]. Este procedimiento se itera de manera que genera una red aleatoria manteniendo la distribución de grado constante (un equivalente en cierto sentido a mantener la misma cantidad de mediciones pero tomando uso de refugios al azar). Partiendo de 1000 redes generadas a partir de 1000 cambios aleatorios de conexiones (1000 instancias de *double edge swap*), se obtuvieron las métricas de precisión, recall y accuracy para cada red generada. Sobre estos valores se calculó la cantidad de veces donde las métricas halladas por usos aleatorios de



**Figura 3.6:** Red bipartita de refugios para los datos de los tortugómetros. Las distancias relativas entre nodos y el grosor del enlace es dependiente de la cantidad de noches que una tortuga pasó en el refugio.

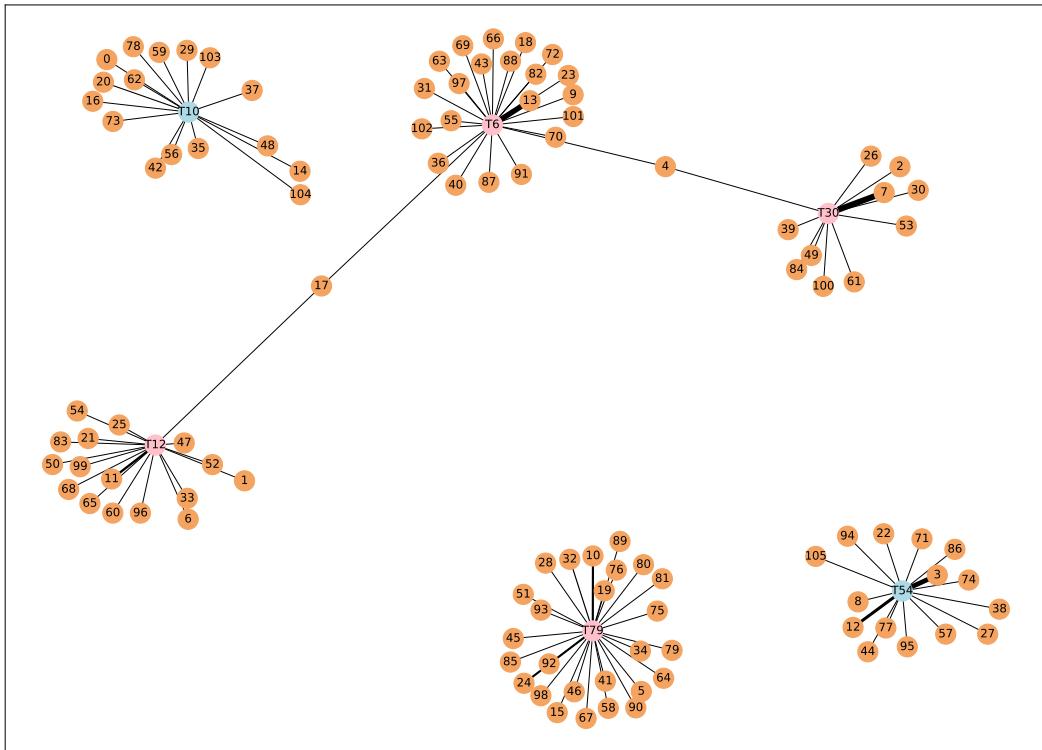
refugios fueron mayores que los valores obtenidos en la tabla 3.1. Los resultados en términos de porcentajes donde se obtuvieron métricas mayores para cada metodología se muestran en la tabla 3.2.

Metodología	% Precisión mayor	% Recall mayor	% Accuracy mayor
Tortugómetro	60	50	50
i-gotU	0	0	0

**Tabla 3.2:** Tabla con comparación de métricas obtenidas por redes bipartitas con usos aleatorios de refugios respecto de las métricas medidas. Se tomaron las proyecciones de la redes bipartitas generadas aleatoriamente como predictor de conexiones en las redes de encuentros y se calcularon las proporciones donde estas métricas son mayores a las obtenidas por la tabla 3.1.

Se observa en la tabla 3.2, que las métricas obtenidas para los datos provenientes de los i-gotU son siempre mayor o iguales a lo esperado por uso aleatorio de refugios, mientras que las métricas obtenidas para los datos provenientes de los tortugómetros no lo son (es igual de probable obtener métricas mayores o menores mediante el uso aleatorio de refugios nocturnos). Esto se debe a que la cantidad de refugios nocturnos medidos para los datos del tortugómetro es considerablemente menor que la cantidad de refugios nocturnos medidos para los datos de los i-gotU. Por otro lado, con los i-gotU se monitorea una menor cantidad de tortugas, haciendo posible la existencia de un desvío de medición.

Una posible comparación entre las proyecciones de las redes bipartitas con las redes de encuentros está dada por la topología de las mismas. En la siguiente sección se analiza la topología de las redes de encuentros y se compara con la topología de las



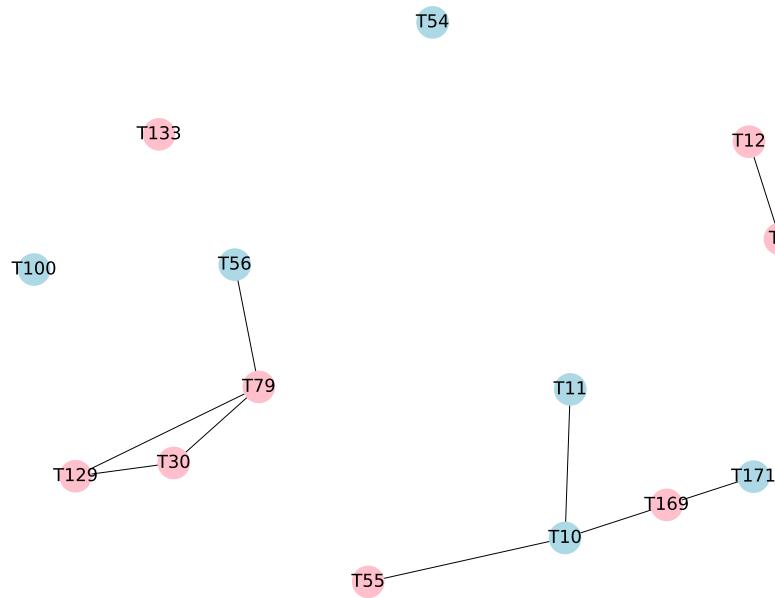
**Figura 3.7:** Red bipartita de refugios para los datos de los i-gotU. Las distancias relativas entre nodos y el grosor del enlace es dependiente de la cantidad de noches que una tortuga pasó en el refugio.

redes proyectadas en nodos tortuga, comparando con métricas a partir del uso aleatorio de los refugios.

### 3.4. Comparación topológica de redes de encuentros y redes proyectadas

Se calcularon las métricas modularidad, densidad de la red, coeficiente de agrupamiento y centralidad de grado medio en nodos tortuga machos y hembras para las redes de encuentros (Figs. 2.8 y 2.9) y para las redes proyectadas (Figs. 3.8 y 3.9). En la tabla 3.3 se muestran los valores obtenidos para las distintas métricas, para los datos provenientes de las dos metodologías.

Podría esperarse que la centralidad de grado medio de los machos sea mayor que la de las hembras en base de observaciones de campo, especialmente en época de apareamiento (Nov-Dic), pero se encontró en la tabla 3.3 que no presentan diferencias significativas para los datos provenientes de ambas metodologías [8]. Se encontró menor densidad de red en la red proyectada de tortugas que en la red de encuentros, para ambas metodologías. Esto está relacionado con la poca cantidad de mediciones



**Figura 3.8:** Proyección de red bipartita de refugios para datos de los tortugómetros (Fig. 3.6) en nodos tortuga. Si hay una refugio compartido por un par de nodos tortuga, aparece una conexión entre este par de nodos en la proyección.

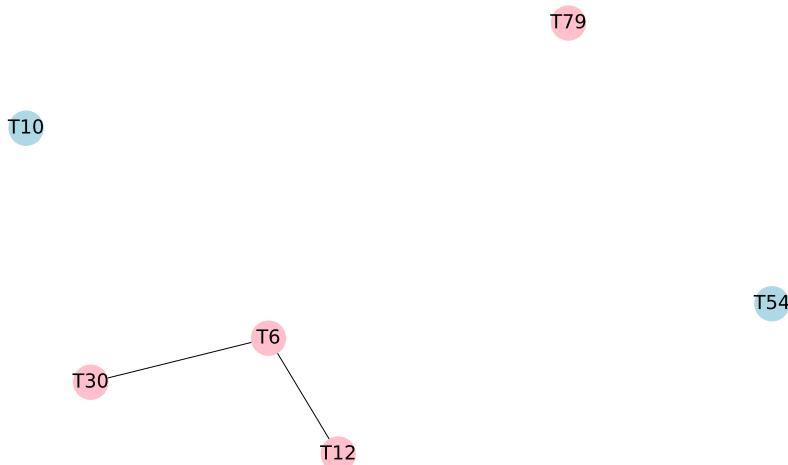
Métricas	E. Tortu	P. Tortu	E. i-gotU	P. i-gotU
Modularidad	0,5	0,6	0,1	0
C. agrupamiento	0,28	0,16	0	0
Densidad	0,22	0,09	0,50	0,13
C.G.M. machos	$0,2 \pm 0,1$	$0,08 \pm 0,08$	$0,5 \pm 0,2$	0
C.G.M. hembras	$0,2 \pm 0,1$	$0,10 \pm 0,07$	0,5	$0,2 \pm 0,1$

**Tabla 3.3:** Tabla con métricas asociadas a las topologías de las redes de encuentros y las redes proyectadas. E. y P. se refiere a redes de encuentros y redes proyectadas respectivamente, para cada metodología de medición. C. agrupamiento se refiere a coeficiente de agrupamiento y C.G.M. se refiere a centralidad de grado medio.

de refugios compartidos. En el caso de los tortugómetros, el filtro para la selección de refugios es muy estricto, generando una poca cantidad de refugios respecto de la cantidad de días de medición. Por otro lado, en el caso de los i-gotU, la cantidad de refugios medidos es alta pero la mayoría de estos fueron medidos en meses donde la tortuga baja la actividad a causa de las temperaturas del ambiente y decide quedarse la mayor parte de las noches en los refugios preferidos encontrados (Fig. 3.4).

Con respecto al coeficiente de agrupamiento, se observa que para los datos provenientes de los tortugómetros, el coeficiente de agrupamiento es distinto de cero. Para el caso de los datos provenientes de los i-gotU, el coeficiente de agrupamiento es cero. Esto se debe a que la red de encuentros y la red proyectada no presentan triángulos entre ningún triplete de nodos, debido seguramente a la poca cantidad de individuos monitoreados con este método.

Se utilizó la modularidad para detectar la fuerza de unión en comunidades en la



**Figura 3.9:** Proyección de red bipartita de refugios para datos de los i-gotU (Fig. 3.7) en nodos tortuga. Si hay una refugio compartido por un par de nodos tortuga, aparece una conexión entre este par de nodos en la proyección.

red. Se detectaron la existencia de dos claras comunidades en las redes provenientes de los datos del tortugómetro (Figs. 2.8 y 3.8) y a la ausencia de comunidades en las redes de los datos de los i-gotU (Figs. 2.9 y 3.9).

Para comparar las métricas obtenidas con un modelo de uso aleatorio de refugios, se generaron 1000 redes aleatorias realizando 1000 operaciones del tipo *double edge swap* sobre las redes bipartitas. Se compararon las métricas obtenidas en las redes proyectadas de la tabla 3.3 con las métricas obtenidas en las proyecciones de las redes aleatorias. En la Fig. 3.10, se muestra un ejemplo de la distribución del coeficiente de agrupamiento en las redes aleatorias generadas partiendo de la red bipartita de refugios con datos de los tortugómetros (Fig. 3.6). Se observa que no presenta diferencias significativas entre los valores hallados con el valor medido en la proyección de la red original. Se observó el mismo tipo de comportamiento para todas las métricas calculadas en la tabla 3.3. Esto quiere decir que no habría diferencias con una red aleatoria y que por lo tanto no parece ser posible inferir información de una red de a partir de la otra.

### 3.5. Proyecciones de redes bipartitas en nodos refugio

Se realizaron las proyecciones de las redes bipartitas (Figs. 3.6 y 3.7) en nodos refugio, Figs. 3.11 y 3.12.

En las Figs. 3.11 y 3.12, se observan pequeños clusters donde hay nodos completamente conectados (asociados a los refugios que visitó una tortuga) con algunos nodos que conectan distintos clusters (asociados a algún refugio compartido). Un ejemplo de

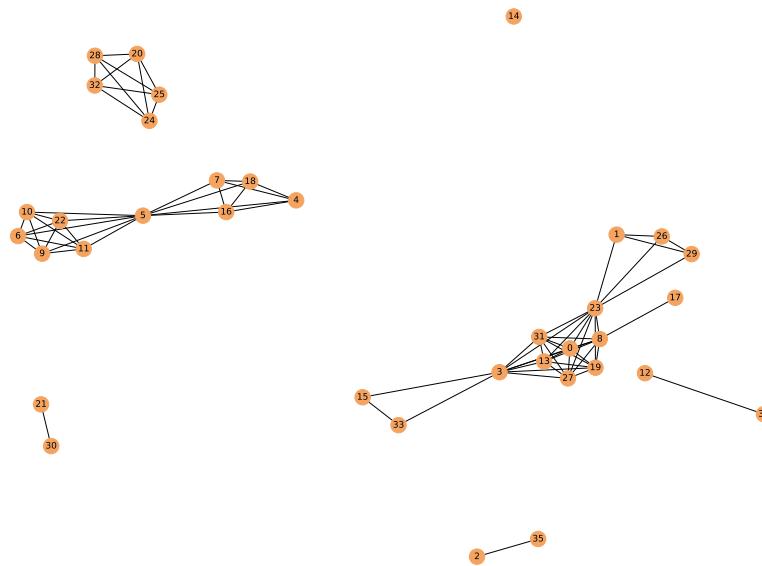


**Figura 3.10:** Distribución del coeficiente de agrupamiento calculado de las proyecciones en nodos tortuga de mil redes generadas aleatoriamente a partir de la red bipartita con datos de los tortugómetros. En rojo está el valor medido del coeficiente de agrupamiento para la proyección en nodos tortuga (Fig. 3.8).

este nodo conector es el refugio 4 (Fig. 3.12), que fue utilizado por la tortuga T30 y T6 en distintas noches (Fig. 3.7).

Una pregunta subyacente de las proyecciones calculadas es si existe alguna relación entre los enlaces de la red y las distancias geográficas entre los nodos refugio. Para responder esta pregunta se graficaron los refugios en el mapa junto con las conexiones dadas por los enlaces en las proyecciones. Un ejemplo de este mapa para los datos de los i-gotU se muestra en la Fig. 3.13. Se observa que parte de los enlaces se encuentran entre refugios vecinos, pero también hay unos pocos enlaces entre refugios que se encuentran a distancias considerables respecto de refugios vecinos. A falta de una relación más rigurosa entre las distancias y los enlaces, se realizó un *Mantel test* [13] entre las matrices de adyacencia de las redes proyectadas en nodos refugio (Figs. 3.11 y 3.12) con matrices de distancias entre refugios. La matriz de adyacencia está definida como la matriz booleana que representa las conexiones entre pares de nodos refugio. En el lugar  $i,j$  de la matriz de distancias se encuentra la distancia entre el refugio de la posición  $i$  y el refugio  $j$  (en metros) de la matriz de adyacencia.

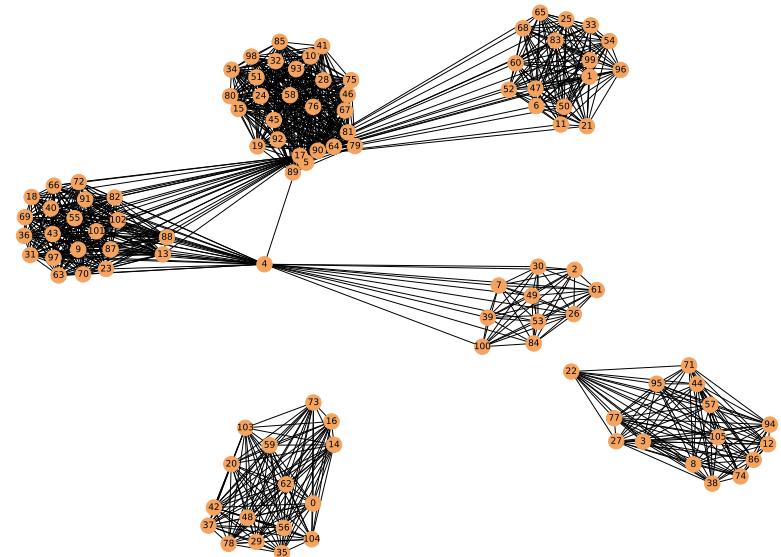
El Mantel test calcula el coeficiente de correlación de Pearson entre estas dos matrices, luego realiza permutaciones aleatorias de la matriz de distancias y vuelve a calcular el coeficiente de correlación de Pearson. El p-valor es la proporción de permutaciones que dan un coeficiente de correlación de Pearson mayor o igual al coeficiente de correlación de Pearson de la matriz de distancias original. Bajo la hipótesis de correlación nula en las dos matrices, las permutaciones aleatorias deberían ser igualmente probables de



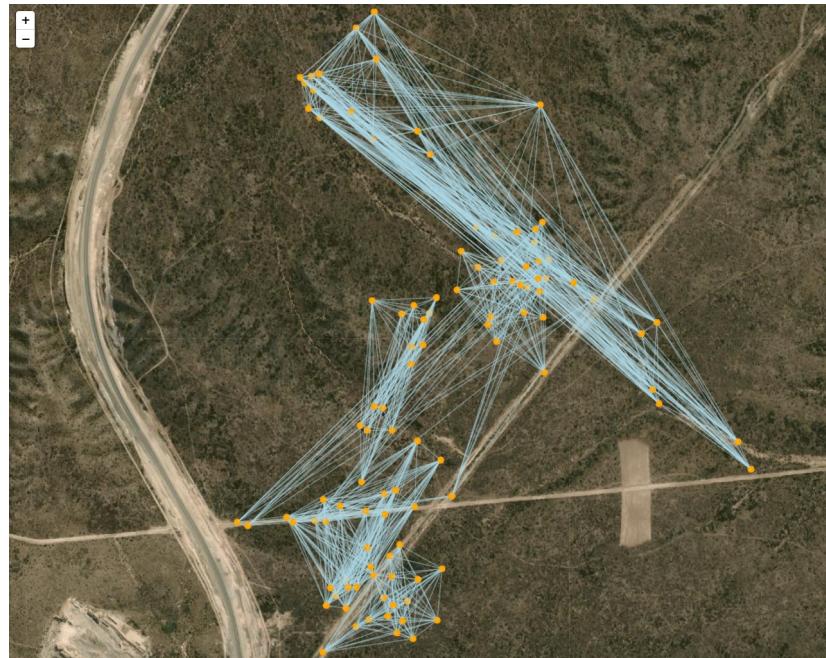
**Figura 3.11:** Proyección de red bipartita de refugios para datos de los tortugómetros (Fig. 3.6). Si hay un refugio compartido por un par de nodos tortuga, aparece una conexión entre este par de nodos en la proyección.

producir valores mayores o menores del coeficiente de correlación calculado.

Los Mantel tests realizados con 10000 permutaciones aleatorias para los datos de los tortugómetros y los i-gotU dan un p-valor de 0.0051 y 0.0001 respectivamente. Esto indica que existe una correlación significativa entre las distancias entre refugios y los enlaces en las redes proyectadas en nodos refugio (Figs. 3.11 y 3.12). Es decir que la tortuga que visita un refugio tiene una probabilidad mayor de visitar refugios cercanos a este, como se observa en la Fig. 3.13. Esto también se evidencia observando la trayectoria de visita de los refugios, siendo la regla que la tortuga posee noches consecutivas en refugios cercanos entre sí (Fig. 3.5).



**Figura 3.12:** Proyección de red bipartita de refugios para datos de los i-gotU (Fig. 3.7) sobre los nodos refugio. Si hay un refugio compartido por un par de nodos tortuga, aparece una conexión entre el refugio común con los respectivos refugios de ambas tortugas en la proyección.



**Figura 3.13:** Proyección de red bipartita (Fig. 3.12) en nodos refugio con conexiones en el mapa para los datos de i-gotU.

# Capítulo 4

## Conclusiones y trabajo a futuro

“Avanza rápido el tema de las tortugas.”

— Damián H. Zanette

A partir de los resultados obtenidos en cada uno de los capítulos, se pueden enumerar las siguientes conclusiones:

- Se diseñó un algoritmo de reconstrucción de trayectorias que puede ser usado con datos de GPS recopilados para cualquier especie, estimando la velocidad máxima de la misma y descartando los datos que excedan dicho umbral de velocidad. En particular para el caso de la tortuga *Chelonoidis chilensis*, se encontró que la velocidad máxima es de 14 m/min.
- Se identificaron las zonas más visitadas por la población de tortugas, lo que podría ser útil para diseñar políticas de conservación. Estos mapas de recurrencias se diseñaron en un formato html interactivo, para que puedan ser usados fácilmente por el equipo interdisciplinario durante las campañas. Además estos mapas podrán ser actualizados fácilmente a medida que se incorporen nuevas mediciones.
- Se obtuvieron redes de interacción entre tortugas y se computó la cantidad de encuentros promedio para machos y hembras en los distintos meses de medición. Se observa un máximo de encuentros para ambos sexos en el período noviembre-diciembre, donde el 85 % de los encuentros registrados fueron hembra-macho, lo que estaría asociado a la búsqueda de pareja en la época de apareamiento. En cambio, en el mes de enero las hembras presentan una mayor cantidad de encuentros promedio por hora medida que los machos. Curiosamente todos los encuentros detectados en este período fueron hembra-hembra. Este resultado puede estar sesgado debido al escaso número de encuentros monitoreados (57 encuentros en enero), o bien podría estar relacionado con la búsqueda que realizan las

hembras, de un lugar para excavar y depositar sus huevos. Lamentablemente solo se contó con 8 tortugómetros y 6 i-gotU, para cada día midiendo en simultáneo y es probable que parte de los encuentros no hayan sido registrados. A partir de éste resultado, se aumentará el número de pares de individuos monitoreados para poder estudiar más en profundidad la red de interacciones entre las tortugas.

- Se definieron dos criterios para determinar el refugio donde pasó la noche la tortuga, uno para cada metodología de medición. Reconociendo las limitaciones de estos criterios, se decidió para las próximas campañas de medición aumentar la franja horaria de medición para los datos de i-gotU, de esta manera garantizar la ubicación de la tortuga en el refugio nocturno. Para el caso del tortugómetro se decidió añadir una etiqueta si la tortuga se encuentra en su refugio nocturno a la hora de recuperar el dispositivo en ese día de medición. La etiqueta nos permitirá confirmar que la tortuga se encontraba en su refugio nocturno en la última medición del día.
- Con los refugios ya identificados, se definió una métrica para determinar la distribución espacial de los refugios en tortugas machos y hembras. Se observó que el área cubierta por los refugios no presenta diferencias significativas entre machos y hembras. En el futuro se utilizarán los nuevos datos colectados, utilizando el criterio del punto anterior, para estimar el área cubierta por los refugios, separando en machos y hembras, así como también en los tres períodos de comportamiento (Nov-Dic, Enero, Feb-Abril).
- Se descubrió la existencia de refugios preferidos donde la tortuga pasa la mayoría de las noches. Esto solo pudo observarse en el período febrero-abril, dado que solo en ese período se pudo identificar con precisión la ubicación de los refugios. En particular se observó que hacia el final del período mencionado, la tortuga parece elegir el refugio donde brumará durante el invierno, realizando caminatas exploratorias desde el refugio preferido hasta otro refugio nocturno y volviendo al refugio preferido. En próximas campañas se continuará utilizando esta metodología para poder contrastar este resultado entre los tres períodos de comportamiento anual. Conocer la ubicación de estos refugios preferidos puede ser útil para implementar medidas de protección de los mismos, dado que se está comenzando a introducir ganado en la zona, con el consiguiente peligro de destrucción y fragmentación del hábitat de las tortugas. Además de contribuir a diseñar políticas de conservación, este resultado contribuye a la caracterización del movimiento de las tortugas, y permitirá diseñar modelos matemáticos y simulaciones numéricas inspiradas en los datos.
- Partiendo de los refugios asociados a cada tortuga se armaron redes bipartitas

de refugios y tortugas. Utilizando las proyecciones de los grafos bipartitos como predictor de enlaces en la red de encuentros, se encontró que para los datos de los tortugómetros las métricas recall, precisión y accuracy no son mayores de lo esperado con respecto a una situación de uso de refugios aleatorios. Para los datos de i-gotU, se observa que las métricas son mayores a las esperadas por una situación de uso de refugios aleatorio pero, en este caso, se están monitoreando solo 6 tortugas y únicamente se encontraron 2 refugios compartidos entre las tortugas. Debido a la poca cantidad de datos, no se puede aún afirmar si las proyecciones en la red bipartita nos dan una predicción de la red de encuentros.

- Además, se compararon las topologías de las redes proyectadas en nodos tortuga con las redes de encuentros. Se observa que las redes bipartitas de refugios y tortugas tienen una topología similar a la red de encuentros, pero con una menor cantidad de enlaces y tampoco presentan diferencias significativas respecto el uso aleatorio de refugios. En un futuro se analizará este razonamiento con una mayor cantidad de tortugas donde se disponga la misma cantidad de datos de refugios que de días de medición (condición que actualmente no se cumple para los datos del tortugómetro).
- Sobre las redes bipartitas de nodos tortuga y refugio, se realizaron proyecciones en nodos refugio y se encontró que las matrices de adyacencia están fuertemente correlacionadas con las matrices de distancias. Los resultados del test de Mantel con 10000 permutaciones aleatorias indican que la tortuga que visita un refugio dado, tiene una probabilidad mayor de visitar refugios cercanos.

A partir de los resultados mencionados, se decidió realizar en la próxima campaña, un mayor esfuerzo de seguimiento de los individuos que participaron de los encuentros detectados. De esta forma se busca entender si la no repetición de encuentros entre tortugas se debe a la poca cantidad de muestras o a una característica de la especie. Este resultado sería muy novedoso dado que está relacionado con la capacidad de memoria de las tortugas, un aspecto muy poco estudiado hasta el momento.



# Bibliografía

- [1] Morales, J. M., Fortin, D., Frair, J. L., Merrill, E. H. Adaptive models for large herbivore movements in heterogeneous landscapes. *Landscape Ecology*, **20** (3), 301–316, 2005. [1](#)
- [2] Morales, J. M., Moorcroft, P. R., Matthiopoulos, J., Frair, J. L., Kie, J. G., Powell, R. A., *et al.* Building the bridge between animal movement and population dynamics. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, **365** (1550), 2289–2301, 2010. [1](#)
- [3] Nathan, R. An emerging movement ecology paradigm. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **105** (49), 19050–19051, 2008. [1](#)
- [4] Chebez, J. Los que se van. Fauna argentina amenazada, 2008. [1](#)
- [5] Prado, W. S., Waller, T., Albareda, D. A., Cabrera, M. R., Etchepare, E., Giraudo, A. R., *et al.* Categorización del estado de conservación de las tortugas de la República Argentina. *Cuadernos de herpetología*, **26**, 375–387, 2012. [1](#), [2](#)
- [6] Kubisch, E. L., Echave, M. E., Echave, L. A. Chelonoidis chilensis (chaco tortoise), 2014. [2](#)
- [7] Zacarias, G. G., Diaz Gomez, J. M., de la Fuente, M. S. Biología, ecología, paleontología y filogenia de nuestra tortuga chaqueña (Chelonoidis chilensis): Pequeño parente de las tortugas terrestres de las islas Galápagos, 2016. [2](#)
- [8] Kubisch, E., investigadora de CONICET, especialista en biología de campo. Comunicación directa, 2022. [3](#), [18](#), [25](#)
- [9] Hagberg, A., Swart, P., S Chult, D. Exploring network structure, dynamics, and function using NetworkX. Inf. téc., Los Alamos National Lab.(LANL), Los Alamos, NM (United States), 2008. [6](#), [13](#)
- [10] Cordasco, G., Gargano, L. Community detection via semi-synchronous label propagation algorithms. En: 2010 IEEE international workshop on: business applications of social network analysis (BASNA), págs. 1–8. IEEE, 2010. [6](#)

- [11] Códigos realizados en el trabajo, repositorio github. <https://github.com/MaestriaIBMarco/MaestriaMarco>. 9, 10, 11, 12, 23
- [12] Sah, P., Nussear, K. E., Esque, T. C., Aiello, C. M., Hudson, P. J., Bansal, S. Inferring social structure and its drivers from refuge use in the desert tortoise, a relatively solitary species. *Behavioral Ecology and Sociobiology*, **70** (8), 1277–1289, 2016. 17, 22
- [13] Carr JW (2015) MantelTest . <https://github.com/jwcarr/mantel>. 28

# Agradecimientos

A Kari y Luis, por haber sido tan buenos directores y por haberme enseñado tanto. Ya sea en el aula (ML), en Git o en las numerosas reuniones que tuvimos durante el desarrollo de la tesis. La verdad la pasé muy bien tanto en la tesis como en laboratorio avanzado y eso tiene mucho mérito. También quería agradecer a todos las personas que participaron en las campañas de medición, haciendo mi tesis posible.

A mi mamá, por siempre estar para mí en todo momento, priorizando felicidad. En sus llamadas, dándome el apoyo emocional en caso de que sea necesario o simplemente mejorando mi día. No hubiera llegado a nada, en cada tropezón sé que la mejor idea es hablar con ustedes.

A mi papá, siempre apoyándome en mis decisiones y ayudándome a crecer como persona. Y por transmitirme su pasión por los animales y enseñándome a pensar como científico y hacerme tantas preguntas. No estaría acá si no fuera por esas tardes viendo como se incubaban los huevos de las gallinas araucanas y estoy más que agradecido por ello.

A mi abuela, por haberme abierto sus brazos en su casa los primeros años de carrera y todo su soporte para que hoy esté entregando esta tesis.

A Flor, por haberme bancado incondicionalmente, haberme regalado tantos momentos de calidad y por haberme acompañado en cada momento de los últimos años. Tener la motivación de verte, hacia los trabajos pesados más ligeros.

A Tincho, Eze, Mr Bean, Bata, Tebo, Fran, Ecu, Nico y Guate. Hicieron que mi vida universitaria fuera mucho más divertida, siempre una sonrisa en la cara. Me hicieron sentirme más que agradecido de haber entrado al Balseiro, son la familia que elegí.

