

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)

28 de Noviembre 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 símbolos

Índice de contenidos

Índice de símbolos	v
Índice de contenidos	vii
Índice de figuras	ix
Índice de tablas	xi
Resumen	xiii
Abstract	xv
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. <i>C. chilensis</i>	1
1.3. Metodologías	2
1.3.1. Radiotelemetría	3
1.3.2. Unidad de navegación	4
1.3.3. i-gotU	4
1.4. Redes complejas	5
2. Redes de interacción entre tortugas	7
2.1. Trayectorias	7
2.2. Zonas de interés	8
2.3. Red de encuentros	10
3. Uso de refugios	15
3.1. Refugios en el mapa	15
3.2. Refugios más usados y caminos tomados	18
3.3. Redes de bipartitas de refugios	19
3.4. Comparación de topología de redes de encuentros y redes proyectadas .	22
3.5. Proyecciones de redes bipartitas en nodos refugios	24

4. Conclusiones y trabajo a futuro	29
A. Ejemplo de apéndice: El problema de la medida	31
Bibliografía	33
Publicaciones asociadas	35
Agradecimientos	37

Índice de figuras

1.1.	Distribución geográfica de la especie de tortuga <i>Chelonoidis chilensis</i> .	3
1.2.	Unidad de navegación (tortugómetro) para monitorear individuos.	5
1.3.	Unidad de navegación comercial i-gotU para monitorear individuos.	6
2.1.	Trayectorias un dia de medición, sin filtrar.	7
2.2.	Distribución de velocidades.	8
2.3.	Trayectorias un dia de medición, después del filtrado.	9
2.4.	Mapa de zonas de recurrencia.	9
2.5.	Mapa con zona de recurrencia para trayectorias diurnas.	10
2.6.	Encuentros por hora medida tomando los datos del tortugometro.	11
2.7.	Encuentros por hora medida tomando los datos de los i-gotU.	12
2.8.	Red de encuentros entre tortugas con datos tomados por el tortugometro.	13
2.9.	Red de encuentros entre tortugas utilizando i-gotU.	13
3.1.	Histogramas de las distancias entre los puntos de los datos de i-gotU. .	16
3.2.	Distribución geográfica de los refugios encontrados para los datos provenientes de las campañas.	17
3.3.	Distribución geográfica de los refugios encontrados para los datos provenientes de los datos de i-gotU.	18
3.4.	Acumulada de noches pasadas en los refugios preferidos.	19
3.5.	Caminos tomados entre refugios para la tortuga T54.	20
3.6.	Red bipartita de refugios para los datos de los tortugometros.	21
3.7.	Red bipartita de refugios para los datos de los i-gotU.	22
3.8.	Proyección de red bipartita de refugios para datos de los tortugometros en nodos tortugas.	23
3.9.	Proyección de red bipartita de refugios para datos de los tortugometros en nodos tortugas.	24
3.10.	Distribución del coeficiente de agrupamiento en proyecciones de redes aleatorias.	25
3.11.	Proyección de red bipartita de refugios para datos de los tortugometros en nodos refugios.	26

3.12. Proyección de red bipartita de refugios para datos de los i-gotU en nodos refugios	27
3.13. Proyección en nodos refugios con conexiones en el mapa.	27
A.1. Una figura con algunos puntos experimentales y curva de datos teóricos	32

Índice de tablas

3.1. Tabla con métricas de comparación entre redes de encuentros y proyecciones de redes bipartitas.	21
3.2. Tabla con comparación de métricas obtenidas en redes bipartitas con usos aleatorios de refugios respecto a las métricas medidas.	21
3.3. Tabla con métricas asociadas a las tipologías de las redes de encuentros y las redes proyectadas.	23

Resumen

Este es el resumen en castellano.

La tesis debe reflejar el trabajo desarrollado, mostrando la metodología utilizada, los resultados obtenidos y las conclusiones que pueden inferirse de dichos resultados.

Palabras clave: FORMATO DE TESIS, LINEAMIENTOS DE ESCRITURA, INS-TITUTO BALSEIRO

Abstract

This is the title in English:

The thesis must reflect the work of the student, including the chosen methodology, the results and the conclusions that those results allow us to draw.

Keywords: THESIS FORMAT, TEMPLATES, INSTITUTO BALSEIRO

Capítulo 1

Introducción

“Avanza rápido el tema de las tortugas”

— D. H. Zanette

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. *C. chilensis*

Nuestra especie de interés es la tortuga *Chelonoidis chilensis*. 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 Appendix 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, y 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.

Las tortugas son animales herbívoros que se alimentan con tallos y 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]).

Esta especie presenta un dimorfismo sexual cuando son adultos. Los machos son notablemente más chicos que las hembras. El período de actividad en la distribución más sur de la especie es el más corto, ya que bruman (parecido a hibernar) por aproximadamente cinco meses. Sus períodos de actividad comienzan en el mes de septiembre y, desde noviembre a diciembre, es cuando el apareamiento es mayormente observado. Entre enero y marzo es cuando las hembras pasan una gran parte del tiempo buscando un lugar adecuado para enterrar sus huevos [8]. Todavía falta mucho por aprender acerca de la biología de la población de *C. chilensis* presente en Argentina.

Motivados por la falta de información, el objetivo de este estudio es caracterizar el movimiento e 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 su hábitat.

1.3. Metodologías

Se combinaron diferentes técnicas para estudiar las trayectorias de las tortugas. En este trabajo se caracterizaron las técnicas utilizadas por el grupo de investigación (Física Estadística e Interdisciplinaria) para monitorear las trayectorias de las tortugas en distintas campañas de medición entre enero de 2020 y abril del 2022.

En primer lugar se utilizó una técnica de radiotelemetría para localizar la posición de las tortugas, se recibía una señal, a través de un sistema antena-receptor, de un radio transmisor localizado en el caparazón de las tortugas. La segunda técnica de medición consistió en utilizar una unidad de navegación construida en el Centro Atómico, para registrar señales de GPS, sensores iniciales y de temperatura. Sobre el año 2022 se adoptó una tercera técnica, utilizando una unidad de navegación comercial (i-gotU

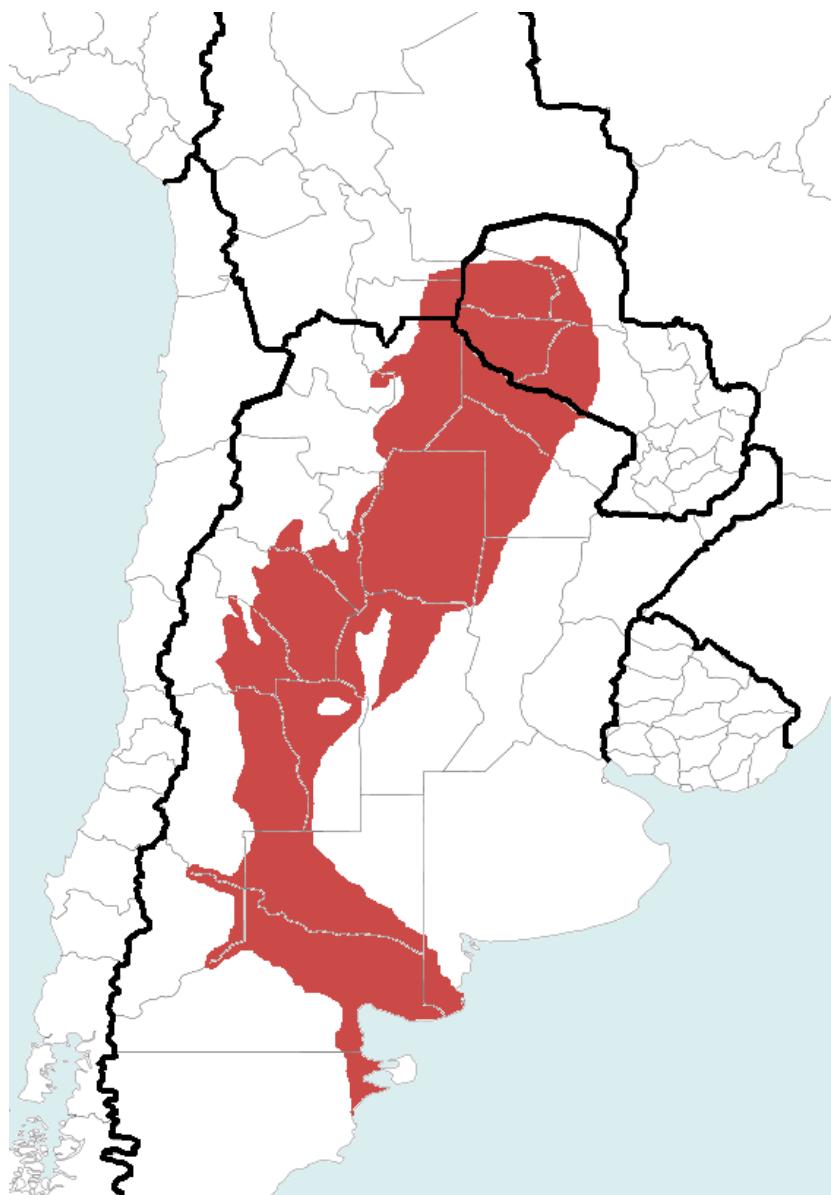


Figura 1.1: Distribución geográfica de la especie de tortuga *Chelonoidis chilensis*.

GT120) que toma datos de GPS y hora. En las siguientes subsecciones se proveerán más detalles de ambas metodologías.

1.3.1. Radiotelemetría

Las técnicas de radiotelemetría permiten 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 (≈ 150 MHz) cada dos segundos. Estos pulsos eran detectados por un sistema de recepción, que consiste 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 eTrex x20), determinar la ubicación.

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. Esto puede alterar el comportamiento de la tortuga y su trayectoria. En la siguiente sección se describe la unidad de navegación, que ofrece 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 trayectoría 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 de 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 los sensores iniciales son 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. Contaron 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.

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 previsto por el fabricante. La batería de la unidad permite una autonomía de aproximadamente 7 días. El peso de la unidad 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 través de un puerto USB.

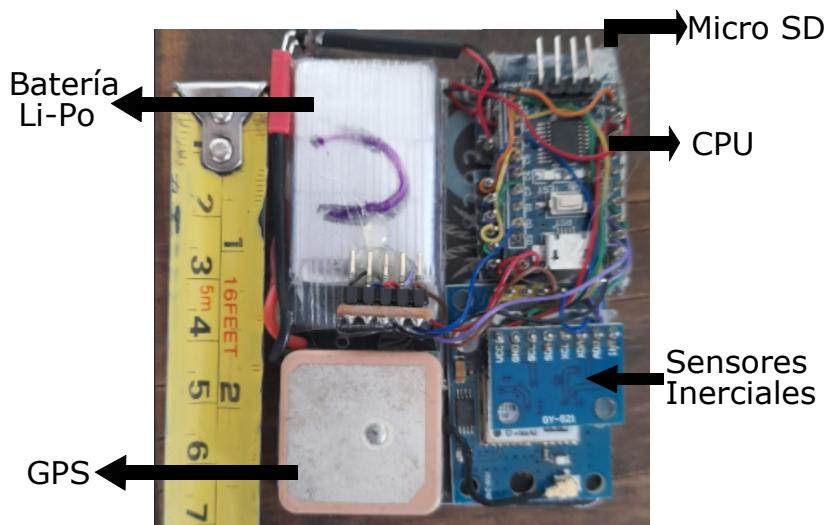


Figura 1.2: Unidad de navegación (tortugómetro) para monitorear individuos. Consiste de un GPS, sensores iniciales (giróscopo y acelerómetro) y de temperatura, todos conectados a una unidad de control y procesamiento. Pesa menos de 45g. Las posiciones del GPS son adquiridas cada 10 minutos y se almacenan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

En este trabajo se utilizaron datos obtenidos por 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

TO-DO!



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.

Capítulo 2

Redes de interacción entre tortugas

“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

2.1. Trayectorias

Primero se muestran las trayectorias obtenidas para un día de medición (Fig. 2.1), como por ejemplo 1/12/2020. Para éstas se realizó un programa en el lenguaje Python utilizando la librería Folium, permitiendo añadir puntos de GPS al mapa [9].



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 kilómetros 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 corregir 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 *CriterioParaSacarData.py* [9]. Para obtener la velocidad máxima, se calculó la distribución de velocidades de la Fig. 2.2.

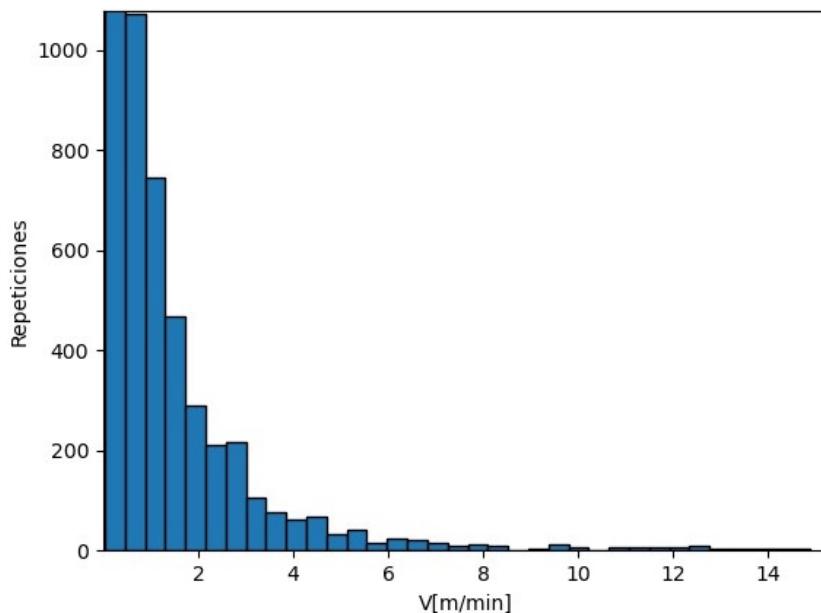


Figura 2.2: Histograma de velocidades en m/min. Las velocidades obtenidas mayores a 15 m/min están órdenes de magnitud por encima.

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. La misma es de gran interés para la investigación y preservación de la especie, en caso que se pudieran identificar los factores o características de las zonas más recurridas, se podrían sugerir políticas de manejo para minimizar



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

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 tortugas. La grilla fue programada en Python y asigna la cantidad de posiciones medidas por el GPS en cada celda [9].

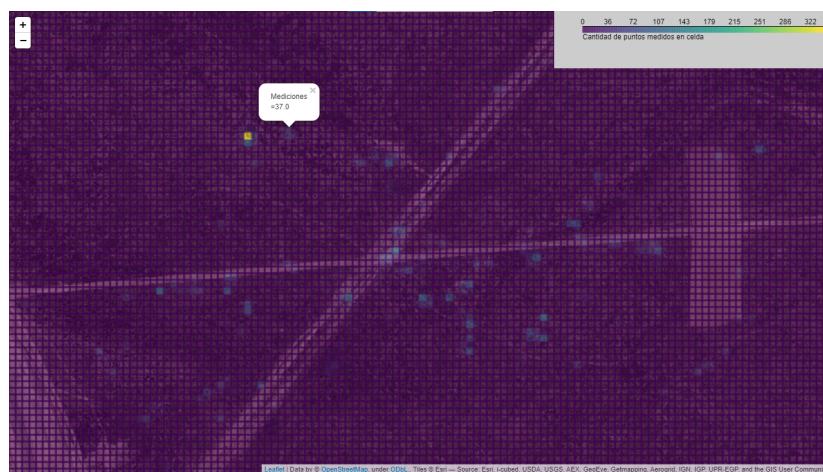


Figura 2.4: Mapa de recurrencias interactivo con las trayectorias filtradas. Al hacer clic en cualquier celda de la grilla un cartel dice cuantas mediciones fueron tomadas. El tamaño de celda es de $10m^2$.

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 sólo 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, [9]). 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).

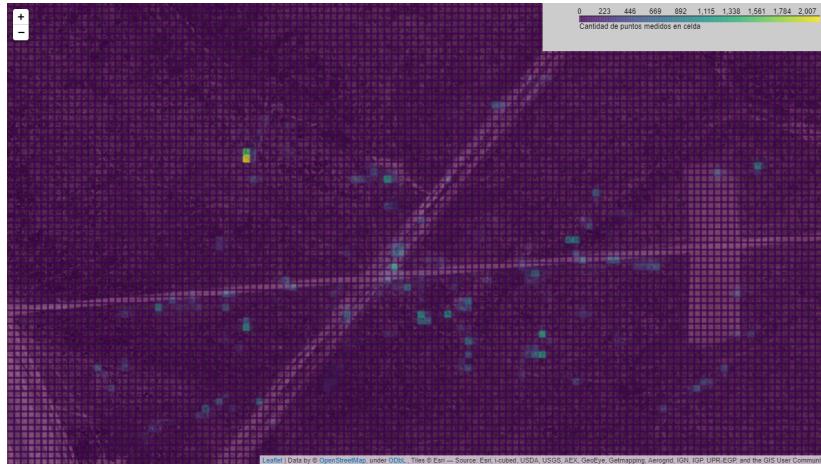


Figura 2.5: Mapa de recurrencias interactivas con las trayectorias diurnas (7am-9pm) filtradas e interpoladas linealmente. Al hacer clic en cualquier celda de la grilla un cartel dice cuantas mediciones fueron tomadas. El tamaño de celda es de 10m².

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. Si se puede obtener las características de las zonas de interés, 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 tortugas.

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 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, están 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.

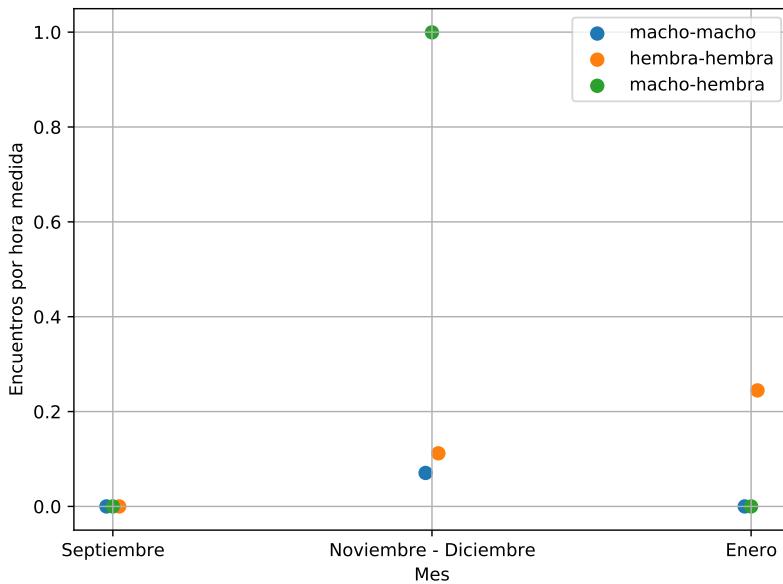


Figura 2.6: Encuentros sobre cantidad de horas medidas para cada sexo en función de los meses de medición utilizando el tortugometro. Los distintos colores identifican el tipo de encuentro.

En la Fig. 2.6, se observa que el máximo de encuentros del tipo macho-hembra por hora medida está 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.

Utilizando los encuentros calculados, se armaron dos redes de interacción en la librería NetworkX [10], una para los datos obtenidos utilizando tortugometro 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 algunos pares de 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 co-



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.

munidades. Queda a determinar en futuros trabajos si la separación de la red en estas dos comunidades está relacionada con alguna limitación de las mediciones o con alguna característica de la población de tortugas estudiada. En la red, también se observan diferencias en la distribución 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 del link), 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 se comparan con las redes de interacción de tortugas.

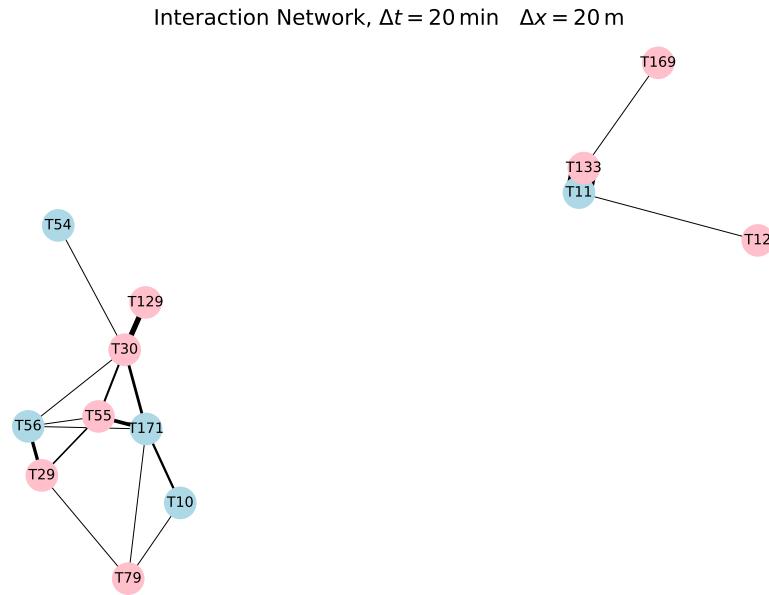


Figura 2.8: Red de encuentros entre tortugas para datos provenientes de la metodología tortugometro. La condición de encuentro está dada por una distancia espacial menor a 20 metros y a una distancia temporal menor a 20 minutos. Los datos de tortugometros fueron tomados en distintas campañas en los meses 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

Para varias especies los refugios son fundamentales para la protección de predadores y condiciones climáticas (especialmente para animales de sangre fría, como las tortugas). En especies relativamente solitarias, los individuos pasan un tiempo considerable solos en los refugios y tienen pocos encuentros directos fuera de la época de apareamiento. 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 al hábitat de las tortugas, es importante entender si presenta una amenaza para la integridad de los refugios y entender el patrón de movimiento de las tortugas sobre los mismos, junto con las características geográficas de los refugios más usados.

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 en los sets de datos. Para el tortugómetro se tomó el último punto tomado de la tortuga en un día de medición y se pidió la condición de que haya sido tomado después de las 20 horas, en base a las anotaciones 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 un label de refugio y un enlace con 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 que la distancia sea menor a 20 metros a por ejemplo el refugio 1, se dice que la tortuga estuvo en el refugio 1.

Para los datos tomados por los i-gotU, se decidió mirar primero las distancias entre el último punto medido (21 horas) de algún día monitoreado con el primer punto del día siguiente (6 horas). Y también se miraron las distancias entre el primer punto de algún día de monitoreo con el segundo punto (6 horas y 6:15 respectivamente). En la Fig. 3.1 se muestran los histogramas de las distancias entre los puntos. 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 todavía no se encuentra en el refugio a esa hora (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 y las 6:15, a excepción de algunos pocos casos donde tenemos distancias del orden de los 50 m. Por eso 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 de los tortugometros para agregar labels a los refugios. De cara a las próximas campañas se decidió mantener las mediciones del i-gotU entre las 21 y las 6 horas, pero disminuyendo la frecuencia de muestreo.

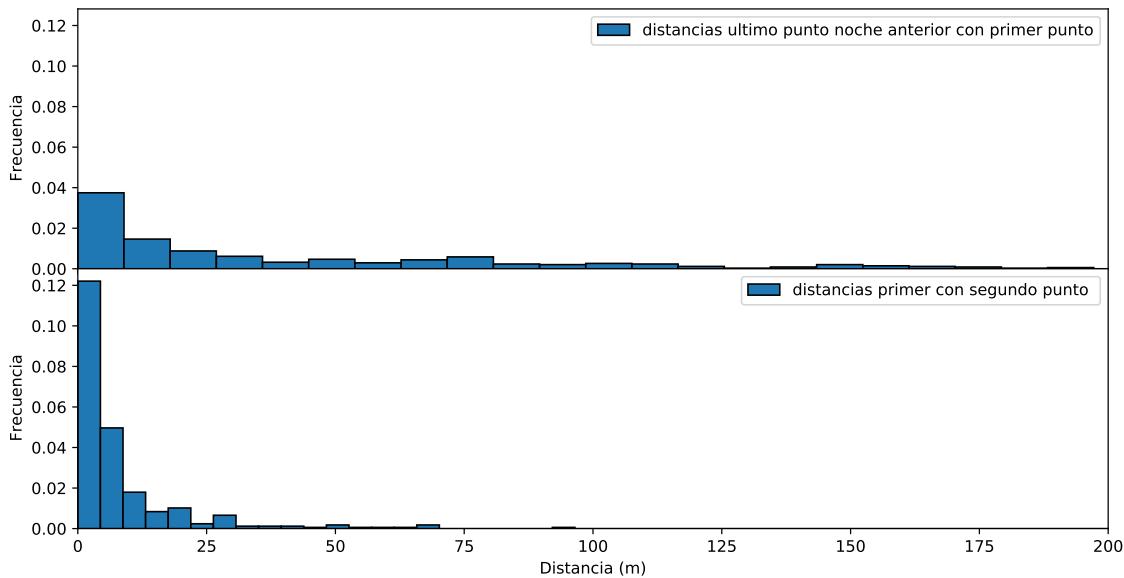


Figura 3.1: Histogramas de las distancias entre los puntos de los datos de i-gotU. Arriba se muestra la distancia entre el último punto del día anterior y el primer punto del día siguiente. Abajo se muestra la distancia entre el primer punto del día y el segundo punto del día.

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, al clickear en un refugio sobre el html aparece un cartel con las tortugas que pasaron la noche en el refugio. 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 de directas de campo [8], se espera que las tortugas machos

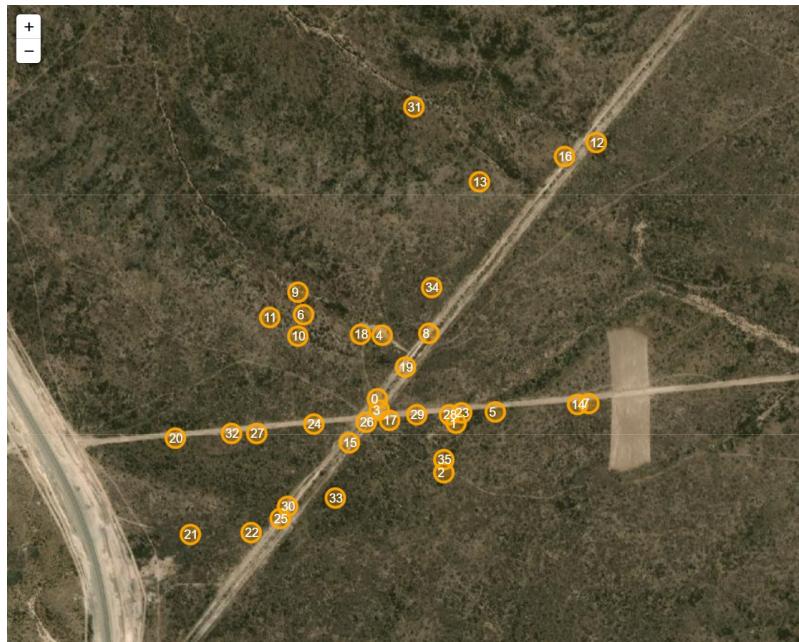


Figura 3.2: Distribución geográfica de los refugios encontrados para los datos provenientes de las campañas.

tengan una distribución de refugios más amplia en el espacio que las hembras. Para verificar esta hipótesis se definieron dos métricas, centro de masa de refugios y distancia media entre refugios. El centro de masa se define como:

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

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. Este proceso se calcula para todas las tortugas. Partiendo de X_{centro} , la distancia media espacial de los refugios se calcula como:

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

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

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. 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. En la Fig. 3.4 se encuentra la acumulada de noches pasadas en estos refugios que distintas tortugas tomaron como preferidos.

Se observa en la Fig. 3.4 que las tortugas tienen un refugio como preferido donde pasan la mayor parte de las noches monitoreadas. 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 decidió pasar la noche en otro refugio para después volver a su refugio preferido. Para visualizar estas rutas entre refugios y la preferencia relativa entre ciertos refugios, se realizaron mapas en la librería Folium donde se graficaron los refugios con tamaños proporcional a la cantidad de noches que la tortuga pasó en el refugio con conexiones entre refugios ilustrando las rutas tomadas entre refugios. Es decir si la T54 pasó una noche en el refugio 12 y la noche siguiente en el refugio 3, hay 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

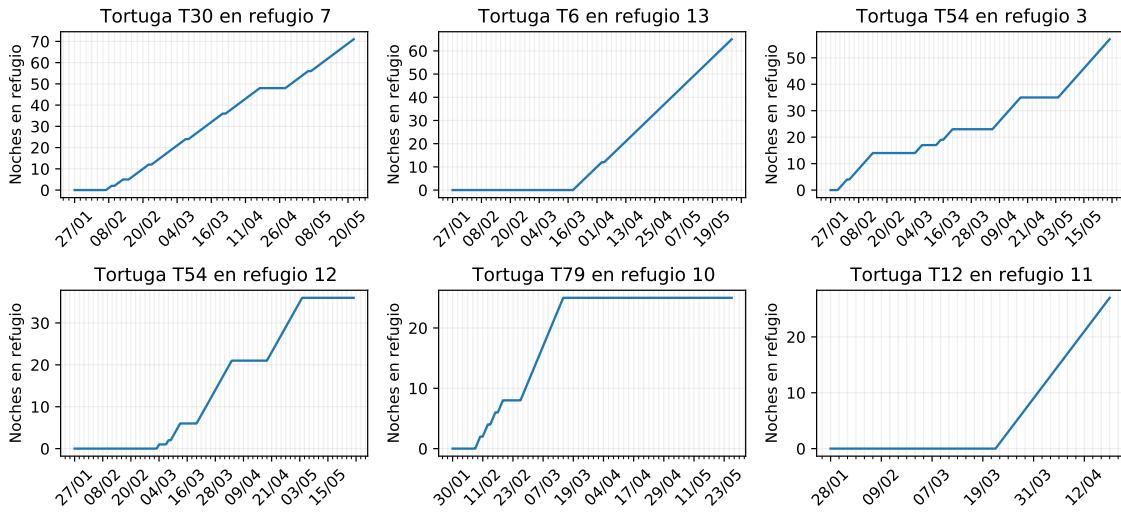


Figura 3.4: Acumulada de noches pasadas en los refugios preferidos para distintas tortugas monitoreadas por los i-gotU de enero 2022 a mayo 2022.

características comparten estos refugios preferidos? ¿Siguen recurriendo estos refugios a distintas épocas del año u otros años? Responder estas preguntas podría ayudarnos 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 de bipartitas de refugios

Se armaron redes bipartitas con nodos refugios y nodos tortugas. Los nodos refugios solo están conectados con nodos tortugas. Partiendo de todos los labels 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 pares de refugios. En base a este resultado, se decidió buscar la probabilidad de que dos nodos tortugas estén conectados en la red de encuentros (Figs. 2.8 y 2.9). Al proyectar la red bipartita en nodos tortugas obtenemos una red comparables con las redes de encuentros, en las Figs. 3.8 y 3.9.

Para comparar y 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 precision, accuracy y recall, partiendo de las cantidades TP, TN, FP y FN. Donde, por ejemplo, TP se calculó como la cantidad de conexiones existentes en las redes de encuentros que están en las redes proyectadas. Los valores obtenidos se muestran en la tabla 3.1. Se observa en la tabla 3.1, que las métricas obtenidas para

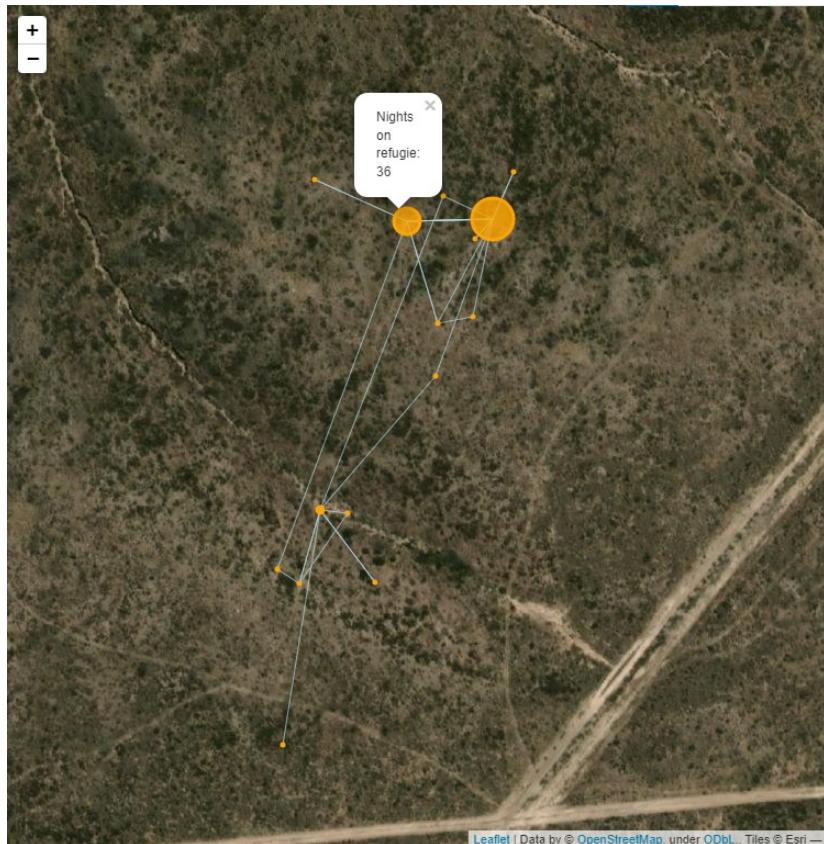


Figura 3.5: Caminos tomados entre refugios para la tortuga T54. El tamaño de nodo refugio es proporcional a la cantidad de noches que pasó la tortuga en el mismo. Una conexión entre par de nodos refugios aparece solo si pasó una noche en el refugio de origen y la noche siguiente en el refugio de destino.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

los datos provenientes de los tortugometros son considerablemente menores que las métricas obtenidas para los datos provenientes de los i-gotU. Estas diferencias se espera que estén asociadas a la poca cantidad de refugios nocturnos medidos para los datos del tortugometro 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, haciendo posible la existencia de un bias de medición.

Para determinar si los resultados de la tabla 3.1 son estadísticamente significativos, se realizaron operaciones de *double edge swap* sobre las redes bipartitas de refugios y se compararon los valores obtenidos sobre estas nuevas redes generadas, después de las proyecciones. Se realizó un código en Python que elige dos conexiones al azar en la red bipartita y las intercambia si es que no existe ya estas conexiones. Es decir, si T10 uso 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 54 [9], este procedimiento se iterá de manera de generar una red aleatoria manteniendo la distribución de grado constante (un equivalente en cierto sentido a mantener la misma cantidad de mediciones pero

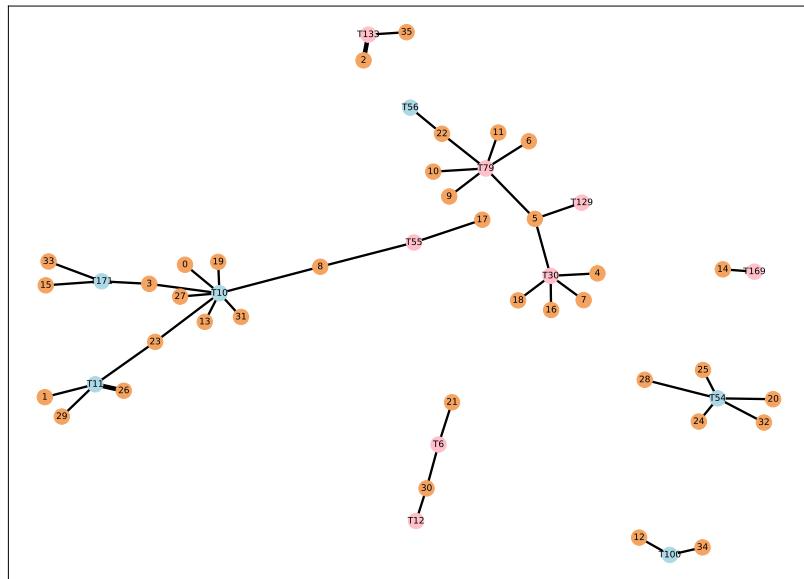


Figura 3.6: Red bipartita de refugios para los datos de los tortugometros. Las distancias relativas entre nodos y el grosor del link son dependientes de la cantidad de noches que una tortuga paso en el refugio.

Metodología	precision	Recall	accuracy
Tortugometro	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 las proyecciones de la redes bipartitas como predictor de conexiones en las redes de encuentros.

tomando uso de refugios al azar). Partiendo de 1000 redes generadas a partir de 1000 cambios aleatorios de conexiones (1000 *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 refugios fueron mayores que los valores obtenidos para los datos de la tabla 3.1. Los resultados se muestran en la tabla 3.2. Se observa en la tabla 3.2, que las métricas obtenidas para los

Metodología	% Precisión mayor	% Recall mayor	% Accuracy mayor
Tortugometro	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 a las métricas medidas. Se tomó 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.

datos provenientes de los i-gotU son estadísticamente significativas, mientras que las métricas obtenidas para los datos provenientes de los tortugometros no lo son. Esto se debe a que la cantidad de refugios nocturnos medidos para los datos del tortugometro



Figura 3.7: Red bipartita de refugios para los datos de los i-gotU. Las distancias relativas entre nodos y el grosor del link son dependientes de la cantidad de noches que una tortuga paso en el refugio.

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 monitorean una menor cantidad de tortugas, haciendo posible la existencia de un bias de medición.

Una posible comparación entre las proyecciones de las redes bipartitas con las redes de encuentros está dada por la topología de las redes. En la siguiente sección se analiza la topología de las redes de encuentros y se compara con la topología de las redes proyectadas en nodos tortugas, comparando con métricas obtenidas de usos aleatorios de los refugios.

3.4. Comparación de topología 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 tortugas 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.

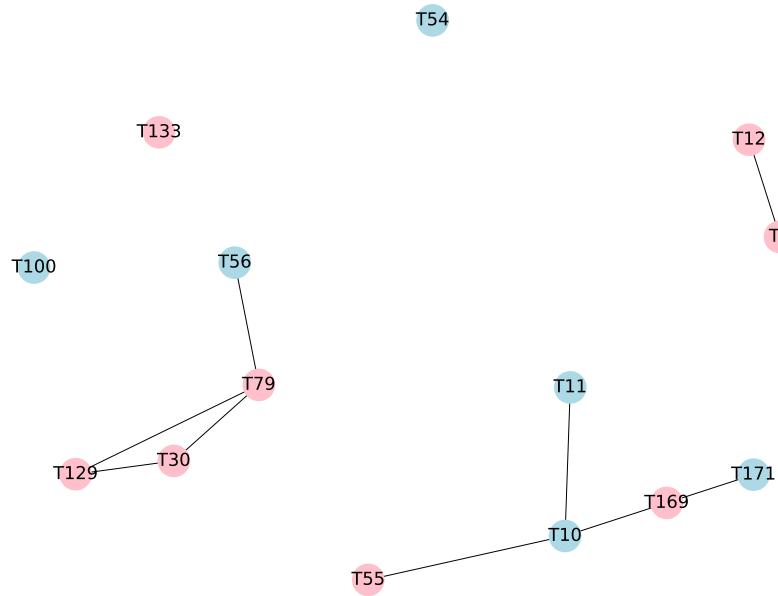


Figura 3.8: Proyección de red bipartita de refugios para datos de los tortugometros (Fig. 3.6) en nodos tortugas. Si hay una refugio compartido por un par de nodos tortugas, aparece una conexión entre este par de nodos en la proyección.

Metricas	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.

Se esperaba que la centralidad de grado medio de los machos fuera mayor que el de las hembras en base de observaciones de campo, pero se encontró en la tabla 3.3 que no presentan diferencias significativas para los datos provenientes de ambas metodologías [8]. Respecto a las proyecciones de la red bipartita en nodos tortugas para los datos provenientes de ambas metodologías, se encontraron menores densidades de redes respecto a las redes de encuentros. Esto está relacionado a la poca cantidad de mediciones de refugios compartidos, en el caso de los tortugometros el filtro para la selección de refugios es muy estricto, generando una poca cantidad de refugios respecto a la cantidad de días de medición. Por otro lado, en el caso de los i-gotU, la cantidad de refugios medidos es alta respecto a la cantidad de días de medición 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).

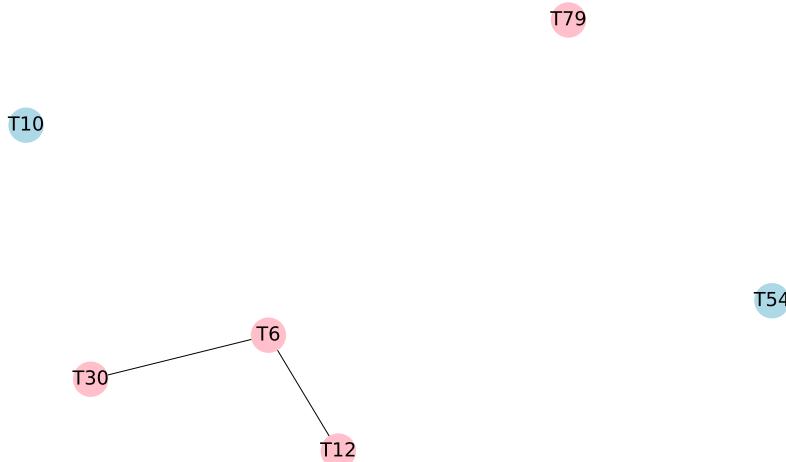


Figura 3.9: Proyección de red bipartita de refugios para datos de los i-gotU (Fig. 3.7) en nodos tortugas. Si hay una refugio compartido por un par de nodos tortugas, aparece una conexión entre este par de nodos en la proyección.

Respecto al coeficiente de agrupamiento, se observa que para los datos provenientes de los tortugometros, 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 presenta triangulos entre cualquier triplete de nodos. Se encontraron modularidades mayores en los datos provenientes de los tortugometros en comparacion con los datos provenientes de los i-gotU para las redes de encuentros y las redes proyectadas. Esto se debe a la existencia de dos claras comunidades en las redes provenientes de los datos del tortugometro (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).

Sobre las redes bipartitas se generaron 1000 redes aleatorias realizando 1000 operaciones del tipo *double edge swap*. Se compararon las metricas obtenidas en las redes proyectadas de la tabla 3.3 con las metricas 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 tortugometros (Fig. 3.6). Se observa que no presenta diferencias significativas entre los valores hayados con el valor medido en la proyección de la red original. Se observo el mismo tipo de comportamiento para todas las metricas calculadas en la tabla 3.3.

3.5. Proyecciones de redes bipartitas en nodos refugios

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

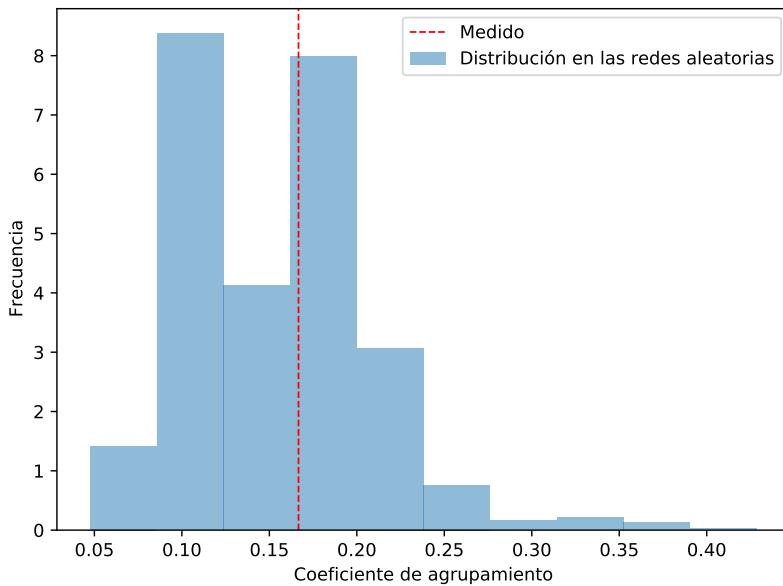


Figura 3.10: Distribución del coeficiente de agrupamiento calculado de las proyecciones en nodos tortugas de mil redes generadas aleatoriamente a partir de la red bipartita con datos de los tortugometros. En rojo esta el valor medido del coeficiente de agrupamiento para la proyección en nodos tortugas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

Se observa en las Figs. 3.11 y 3.12, pequeños clusters donde hay nodos completamente conectados (asociados a los refugios que visito una tortuga) con algunos nodos que conectan distintos clusters (asociados a algún refugio compartido). Ejemplo de 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 links formados y las distancias entre los nodos refugios. Para responder esta pregunta se graficaron los refugios en el mapa junto con las conexiones dadas por los links 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 links se encuentran entre refugios vecinos, pero también hay links entre refugios que se encuentran a distancias considerables respecto de refugios vecinos. A falta de una relación más rigurosa entre las distancias y los links, se realizó un *mantel test* [11] entre las matrices de adyacencia de las redes proyectadas en nodos refugios (Figs. 3.11 y 3.12) con matrices de distancias entre refugios. 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

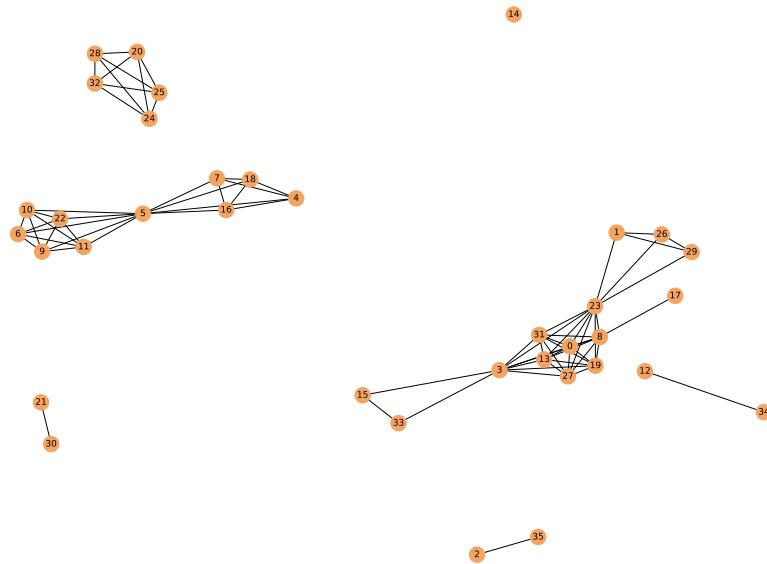


Figura 3.11: Proyección de red bipartita de refugios para datos de los tortugometros (Fig. 3.6). Si hay una refugio compartido por un par de nodos tortugas, aparece una conexión entre este par de nodos en la proyección.

nula en las dos matrices, las permutaciones aleatorias deberían ser igualmente probable de producir valores mayores o menores del coeficiente de correlación calculado.

Los mantel tests realizados con 10000 permutaciones aleatorias para los datos de los tortugometros 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 refugios (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.

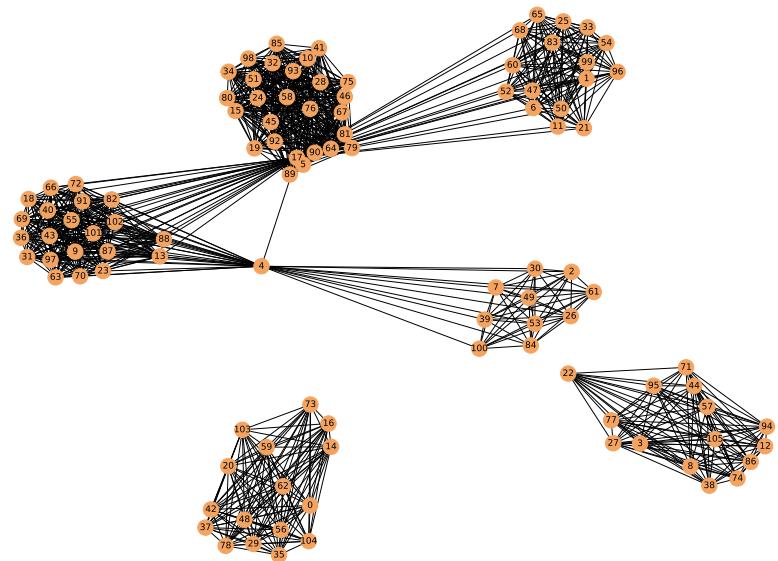


Figura 3.12: Proyección de red bipartita de refugios para datos de los i-gotU (Fig. 3.7) sobre los nodos refugios. Si hay una refugio compartido por un par de nodos tortugas, aparece una conexión entre el refugio común con los respectivos refugios de ambas tortugas en la proyección.

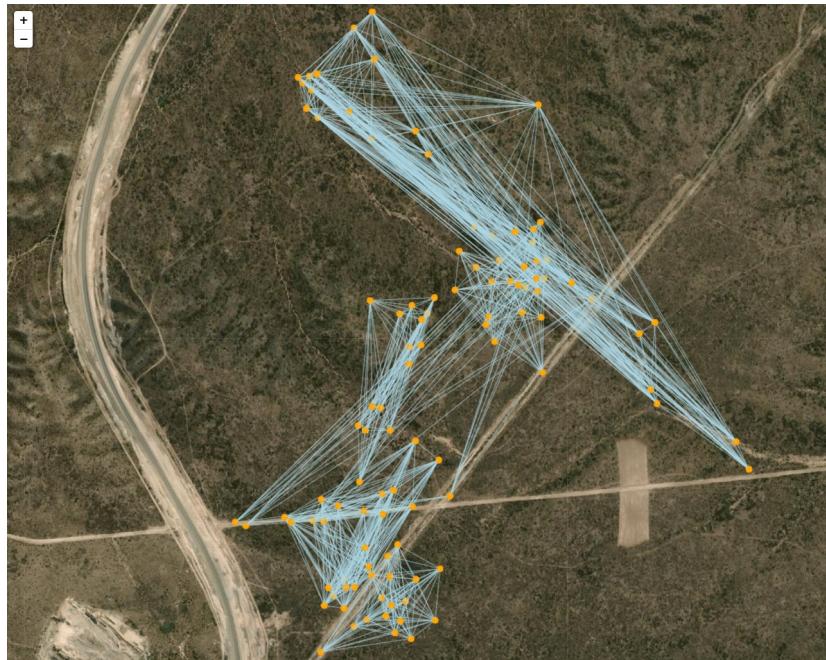


Figura 3.13: Proyección de red bipartita (Fig. 3.12) en nodos refugios con conexiones en el mapa para los datos de i-gotU.

Capítulo 4

Conclusiones y trabajo a futuro

Se diseñó un algoritmo de reconstrucción de trayectorias, el mismo puede ser usado en cualquier especie indicando la velocidad máxima de la misma. Se encontró que la velocidad máxima de las tortugas es de 14 m/min. Fueron identificadas las zonas más visitadas por la población de tortugas estudiadas (Fig. 2.5), lo que podría ser útil para diseñar políticas de conservación. Los mapas de recurrencias podrán ser actualizados con nuevas mediciones y al devolver mapas en un formato html interactivo son de fácil uso para un trabajo interdisciplinario.

Se obtuvieron redes de interacción de individuos (Figs. 2.8 y 2.9) y la cantidad de encuentros promedio para machos y hembras en los distintos meses de medición (Figs. 2.6 y 2.7). Se observa un pico para ambos sexos en noviembre-diciembre para los datos del tortugometro, donde el 85 % de los encuentros registrados fueron hembra-macho, éste puede estar asociado a la búsqueda de pareja en la época de apareamiento. En el mes de enero las hembras presentan una mayor cantidad de encuentros promedio por hora medida que los machos (para datos de i-gotU y tortugometro), se estima estar relacionada a la búsqueda de un lugar para sus huevos. De todas maneras, solo se contaron 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. En un futuro se analizará la red de interacciones aumentando el número de pares de individuos monitoreados.

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 las 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 a los días donde se recupera el dispositivo en un refugio.

Apéndice A

Ejemplo de apéndice: El problema de la medida

“Negociemos Don Inodoro”

— Fernando de la Rúa, 2001

“Smartness runs in my family. When I went to school I was so smart my teacher was in my class for five years”

— George Burns

El gran problema lo constituye el proceso de medición. En la física clásica, medir significa revelar o poner de manifiesto propiedades que estaban en el sistema desde antes de que midamos [12].

En mecánica cuántica el proceso de medición altera de forma incontrolada la evolución del sistema. Constituye un error pensar dentro del marco de la física cuántica que medir es revelar propiedades que estaban en el sistema con anterioridad. La información que nos proporciona la función de onda es la distribución de probabilidades, con la cual se podrá medir tal valor de tal cantidad. Cuando medimos ponemos en marcha un proceso que es indeterminable a priori, lo que algunos denominan azar, ya que habrá distintas probabilidades de medir distintos resultados. Esta idea fue y es aún objeto de controversias y disputas entre los físicos, filósofos y epistemólogos. Uno de los grandes objetores de esta interpretación fue Albert Einstein, quien a propósito de esta idea dijo su famosa frase “Dios no juega a los dados”.

Independientemente de los problemas de interpretación, la mecánica cuántica ha podido explicar esencialmente todo el mundo microscópico y ha hecho predicciones que han sido probadas experimentalmente de forma exitosa, por lo que es una teoría unánimemente aceptada.

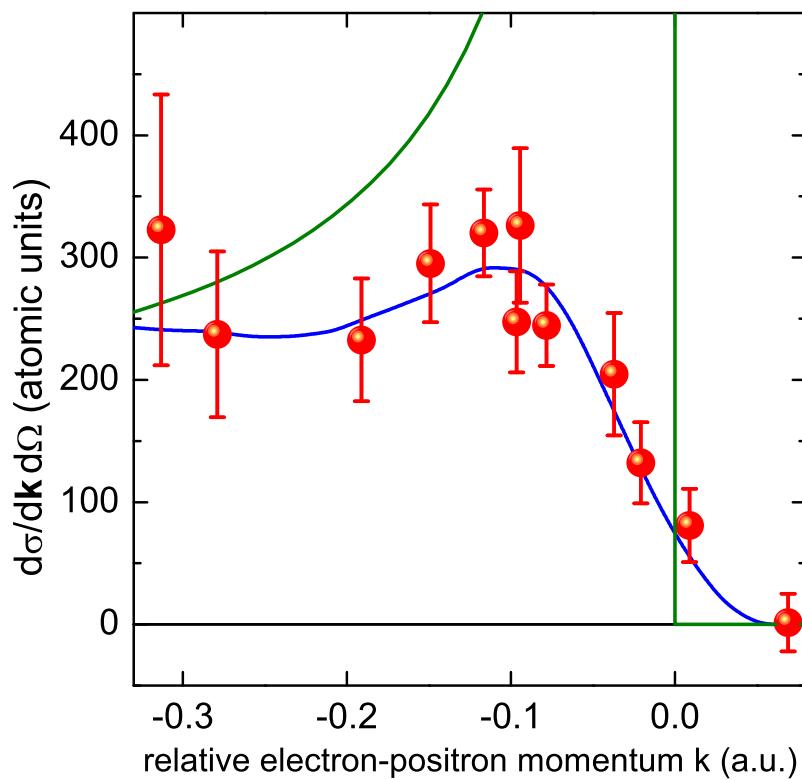


Figura A.1: Una figura con algunos puntos experimentales y curva de datos teóricos

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. Comunicacion directa, 2022. [2](#), [16](#), [23](#)
- [9] Códigos realizados en el trabajo, repositorio github. <https://github.com/MaestriaIBMarco/MaestriaMarco>. [7](#), [8](#), [9](#), [20](#)
- [10] 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. [11](#)

- [11] Carr JW (2015) MantelTest . <https://github.com/jwcarr/mantel>. 25
- [12] Philippidis, C., Bohm, D., Kaye, R. D. The Aharonov-Bohm effect and the quantum potential. *Nuovo Cimento B Serie*, **71**, 75–88, 1982. 31

Publicaciones asociadas

1. Mi primer aviso en la revista **ABC**, 1996
2. Mi segunda publicación en la revista **ABC**, 1997

Agradecimientos

A todos los que se lo merecen, por merecerlo

