

# 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. Fabiana K. Laneri**  
Director

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

### Miembros del Jurado

Dr. J. J. Jurado (Instituto Balseiro)  
Dr. Segundo Jurado (Universidad Nacional de Cuyo)  
Dr. J. Otro Jurado (Univ. Nac. de LaCalle)  
Dr. J. López Jurado (Univ. Nac. de Mar del Plata)  
Dr. U. Amigo (Instituto Balseiro, Centro Atómico Bariloche)

9 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
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
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 . . . . .	4
<b>2. Redes de interacción entre tortugas</b>	<b>7</b>
2.1. Trayectorias . . . . .	7
2.2. Red de encuentros . . . . .	8
<b>3. Uso de refugios</b>	<b>11</b>
3.1. Redes bipartitas de refugios . . . . .	11
3.2. Comparacion red encuentros con bipartita de refugio . . . . .	12
<b>4. Conclusiones y trabajo a futuro</b>	<b>13</b>
<b>A. Ejemplo de apéndice: El problema de la medida</b>	<b>15</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>17</b>

---

<b>Publicaciones asociadas</b>	<b>19</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>21</b>

# 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
2.1.	Trayectorias un dia de medición, sin filtrar. . . . .	7
2.2.	Distribución de velocidades. . . . .	8
2.3.	Trayectorias un dia de medición, despues del filtrado. . . . .	9
2.4.	Red de encuentros entre tortugas utilizando telemetria y tortugometro. . . . .	9
2.5.	Red de encuentros entre tortugas utilizando i-gotU. . . . .	10
A.1.	Una figura con algunos puntos experimentales y curva de datos teóricos	16



# Índice de tablas



# 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 rapido 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 mas de 2000 años, Aristoteles escribió acerca del movimiento de los animales y los conceptos filosoficos y matematicos asociados, en su libro, *De Motu Animalium*. Historicamente, era crucial entender su comportamiento para saber como y donde 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 scientificas 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]).

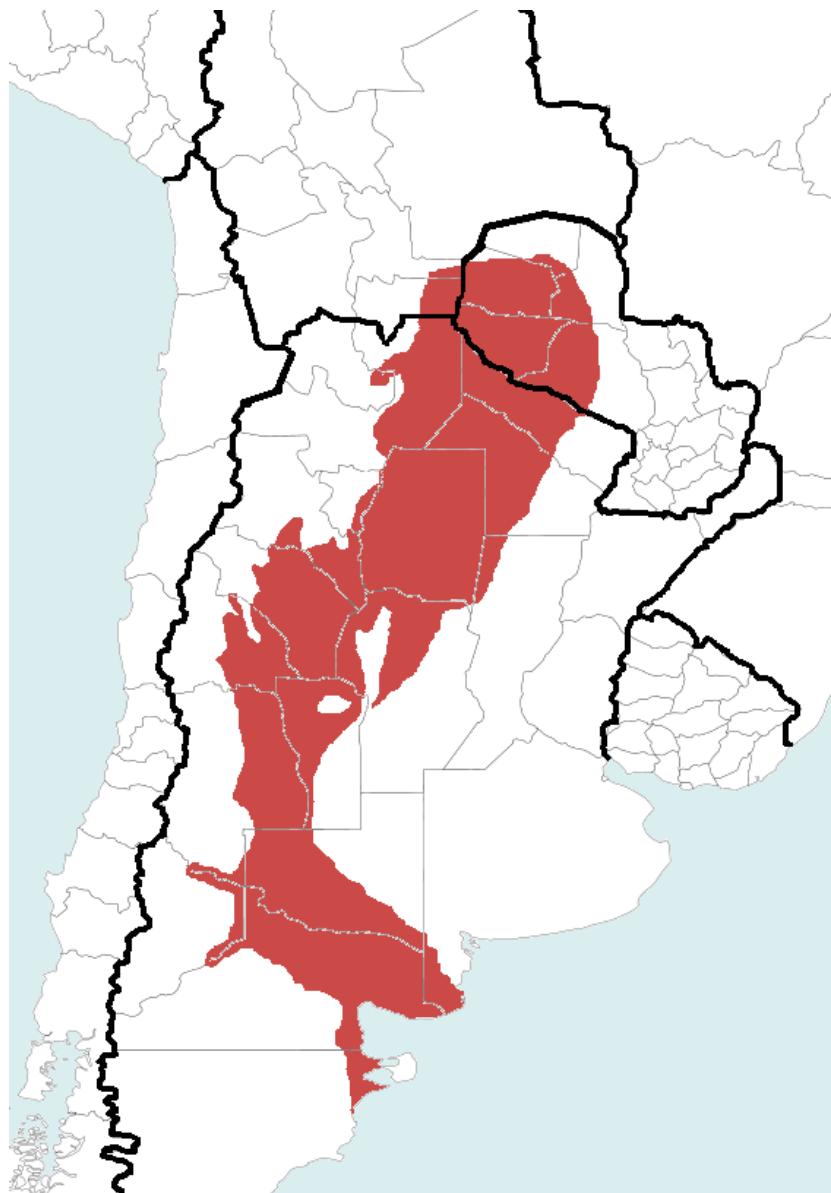
Esta especie presenta un dimorfismo sexual cuando son adultos. Los machos son notablemente más chicos que las hembras. El período de actividad en la distribución más sur de la especie es el más corto, ya que bruman (parecido a hibernar) por aproximadamente cinco meses. Sus períodos de actividad comienzan 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 ( $\approx 150$  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.

### 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.

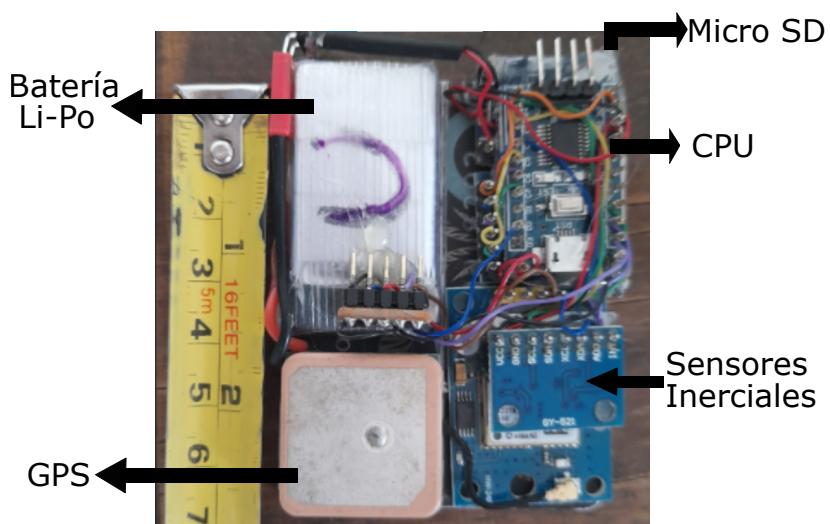
En este trabajo, se utilizaron datos obtenidos por campañas realizadas por el grupo de investigación. Contaron con 8 de estas unidades en correcto funcionamiento para monitorear las tortugas en cada día de campaña.

### 1.3.3. i-gotU

TO-DO!

## 1.4. Redes complejas

TO-DO!



**Figura 1.2:** Unidad de navegación (tortugómetro) para monitorear individuos. Consiste de un GPS, sensores inerciales (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.



# Capítulo 2

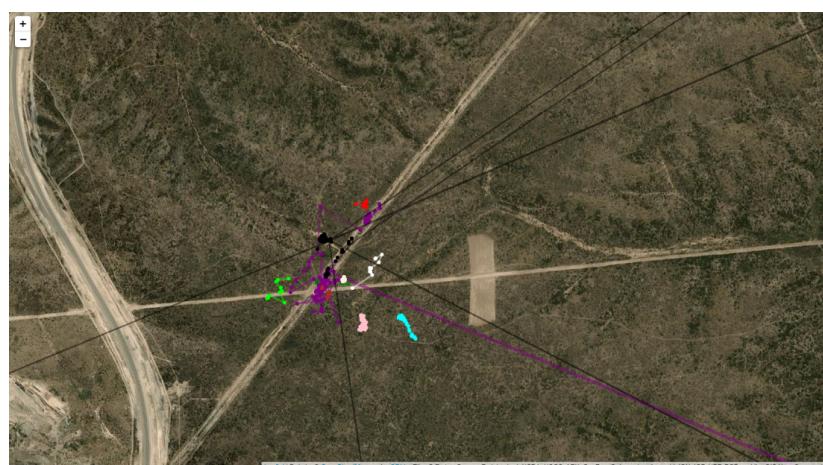
## Redes de interacción entre tortugas

*“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].

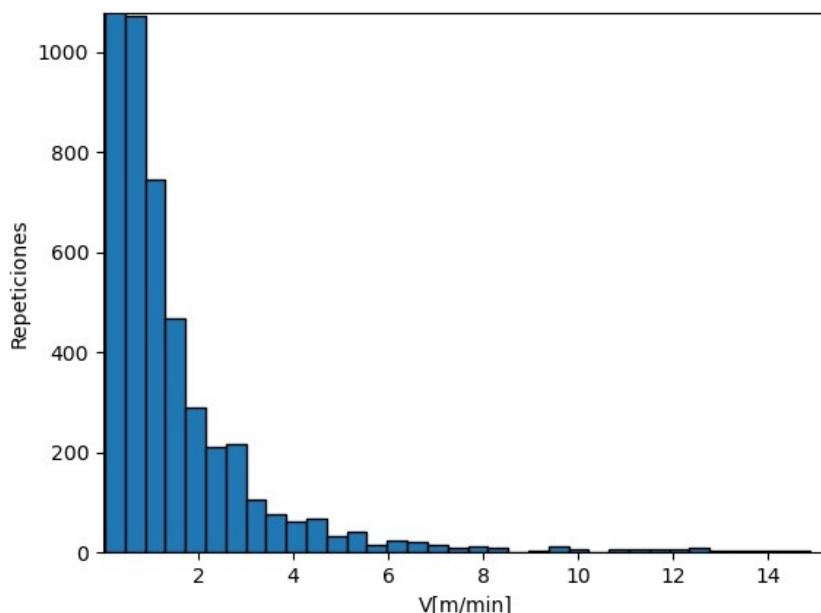


**Figura 2.1:** Trayectorias del 1/12/2020, cada color representa una tortuga diferente. Ambas metodologías fueron implementadas, algunos puntos tomados con el tortugómetro escapan a la trayectoria esperada.

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.

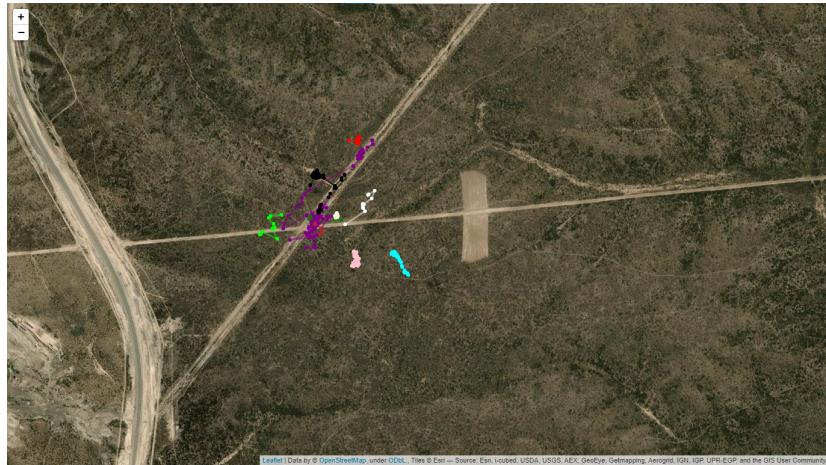


**Figura 2.2:** Histograma de velocidades en m/min. Las velocidades obtenidas mayores a 15 m/min están órdenes de magnitud por encima.

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. Red de encuentros

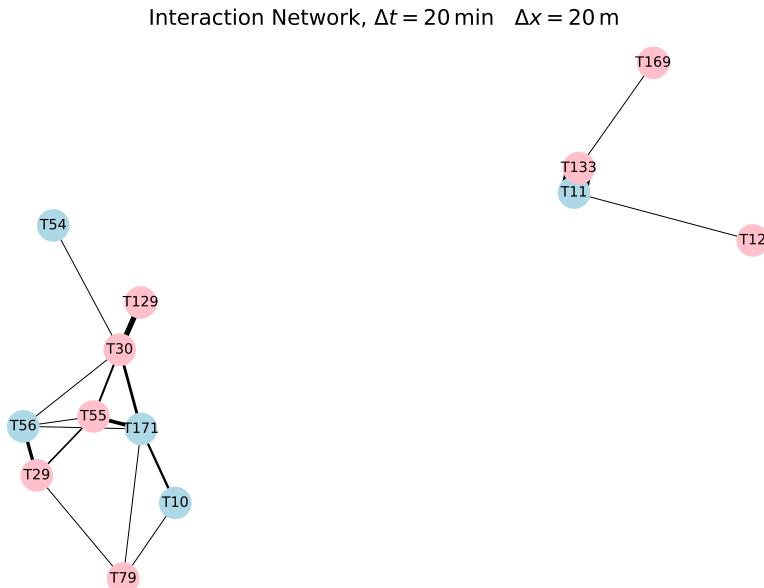
Partiendo de las trayectorias filtradas, se decidió buscar el solapamiento de las trayectorias, para identificar los encuentros. Para ello, se implementó un código en Python, que partiendo de cualquier punto de su trayectoria busca si hay otro punto de otra tortuga que se encuentre a una distancia menor a 20 metros y a una distancia



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

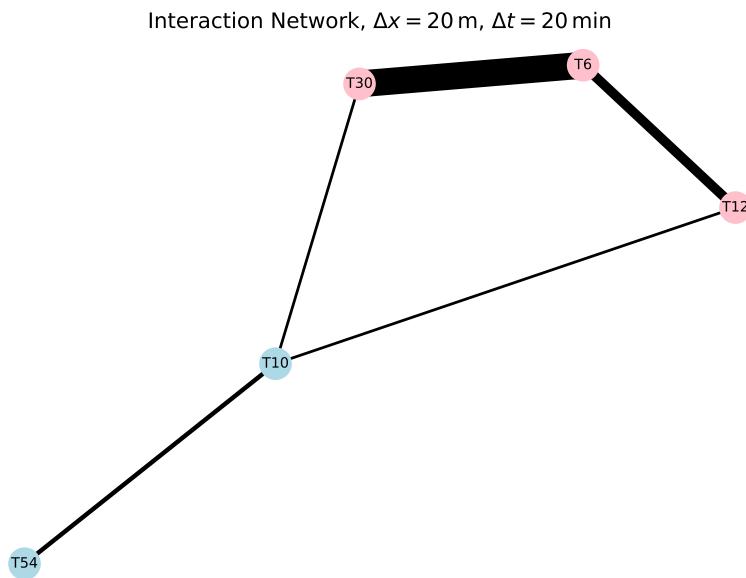
temporal menor a 20 minutos. Cuando se cumple esta condición se van guardando los pares de puntos junto con la hora y el nombre de ambas tortugas.

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 (2.4 y otra). 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.



**Figura 2.4:** Red de encuentros entre tortugas para datos provenientes de las metodologías telemetria y tortugometro. La condición de encuentro esta dada por una distancia espacial menor a 20 metros y a una distancia temporal menor a 20 minutos.

Idea : conectar con criterio de encuentros



**Figura 2.5:** Red de encuentros entre tortugas para datos provenientes de las metodologías i-gotU. La condición de encuentro esta dada por una distancia espacial menor a 20 metros y a una distancia temporal menor a 20 minutos.

mostrar grafico de encuentros segun la epoca del año y pasar a las dos redes de interacción que tenemos

# **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 necesario entender si presentan una amenaza para la integridad de los refugios y patrón de movimiento de las tortugas sobre los mismos junto con las características de los refugios preferidos para tomar medidas de conservación de la especie.

### **3.1. Redes bipartitas de refugios**

Se armaron redes bipartitas con nodos refugios y nodos tortugas. Los nodos refugios solo están conectados con nodos tortugas. Para determinar el refugio donde pasó la noche la tortuga se tomó el último punto de la tortuga en un día de medición y se pidió la condición de que haya sido tomado después de las 19 horas. 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 es menor a 20 metros a por ejemplo el refugio 1, se le asigna el label del refugio 1 a este nuevo punto. Partiendo de todos los labels de refugios y tortugas se armaron las redes bipartitas para los datos tomados por los tortugómetros y los datos tomados con los i-gotU.

- Criterio para identificar refugio, redes bipartitas de refus
- Distribucion espacial de los refugios con la definicion que usepackage
- Paths de refugios y acumulada de noches en refugios (material adicional gif de refugies paths)
- proyeccion en solo refugios, mapa con proyeccion y metricas asociadas
- Mantel test entre matriz de distancias y matriz adyacencia de refus

### **3.2. Comparacion red encuentros con bipartita de refugio**

Capaz esta section podria ser otro capitulo y aca poner las metricas alladas.

- Usar una como predictor de conexiones
- Comparar metricas obtenidas
- Double edge swapping

# Capítulo 4

## Conclusiones y trabajo a futuro



# Apéndice A

## Ejemplo de apéndice: El problema de la medida

*“Negociemos Don Inodoro”*

— Fernando de la Rúa, 2001

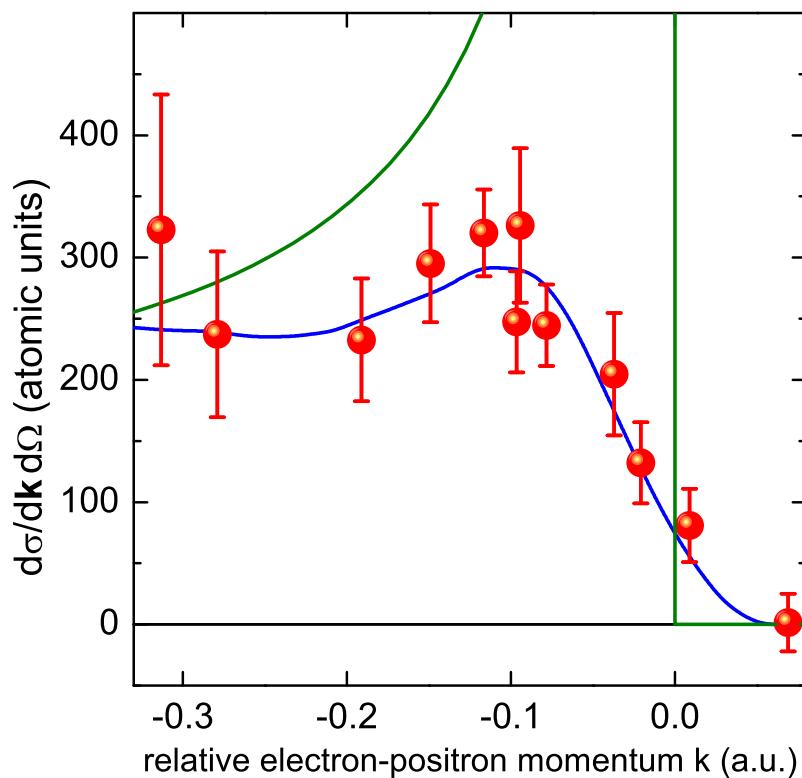
*“Smartness runs in my family. When I went to school I was so smart my teacher was in my class for five years”*

— 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 [11].

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](#)
- [9] Códigos realizados en el trabajo, repositorio github. <https://github.com/MaestriaIBMarco/MaestriaMarco>. [7](#), [8](#)
- [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. [9](#)

- [11] Philippidis, C., Bohm, D., Kaye, R. D. The Aharonov-Bohm effect and the quantum potential. *Nuovo Cimento B Serie*, **71**, 75–88, 1982. [15](#)

# 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

