

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)

7 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

A todos los que me conocen

A toda esa otra gente que no



# 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. <i>C. chilencis</i> . . . . .	1
1.2. Metodologías . . . . .	3
1.2.1. Radiotelemetría . . . . .	3
1.2.2. Unidad de navegación . . . . .	4
1.2.3. i-gotU . . . . .	4
<b>2. Título del Capítulo 2</b>	<b>5</b>
2.1. Formulación del problema . . . . .	5
2.2. Interpretaciones . . . . .	6
<b>3. otr</b>	<b>9</b>
3.1. Sección 1 . . . . .	9
3.2. otra . . . . .	9
3.3. una . . . . .	9
3.4. dos . . . . .	9
3.5. tres . . . . .	9
<b>4. cuatro</b>	<b>11</b>
4.1. una . . . . .	11
4.2. otra mas . . . . .	11

A. Ejemplo de apéndice: El problema de la medida	13
Bibliografía	15
Publicaciones asociadas	17
Agradecimientos	19



# 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
2.1. La figura muestra algunas curvas más o menos lindas . . . . .	7
A.1. Una figura con algunos puntos experimentales y curva de datos teóricos	14



# 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, INSTITUTO 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

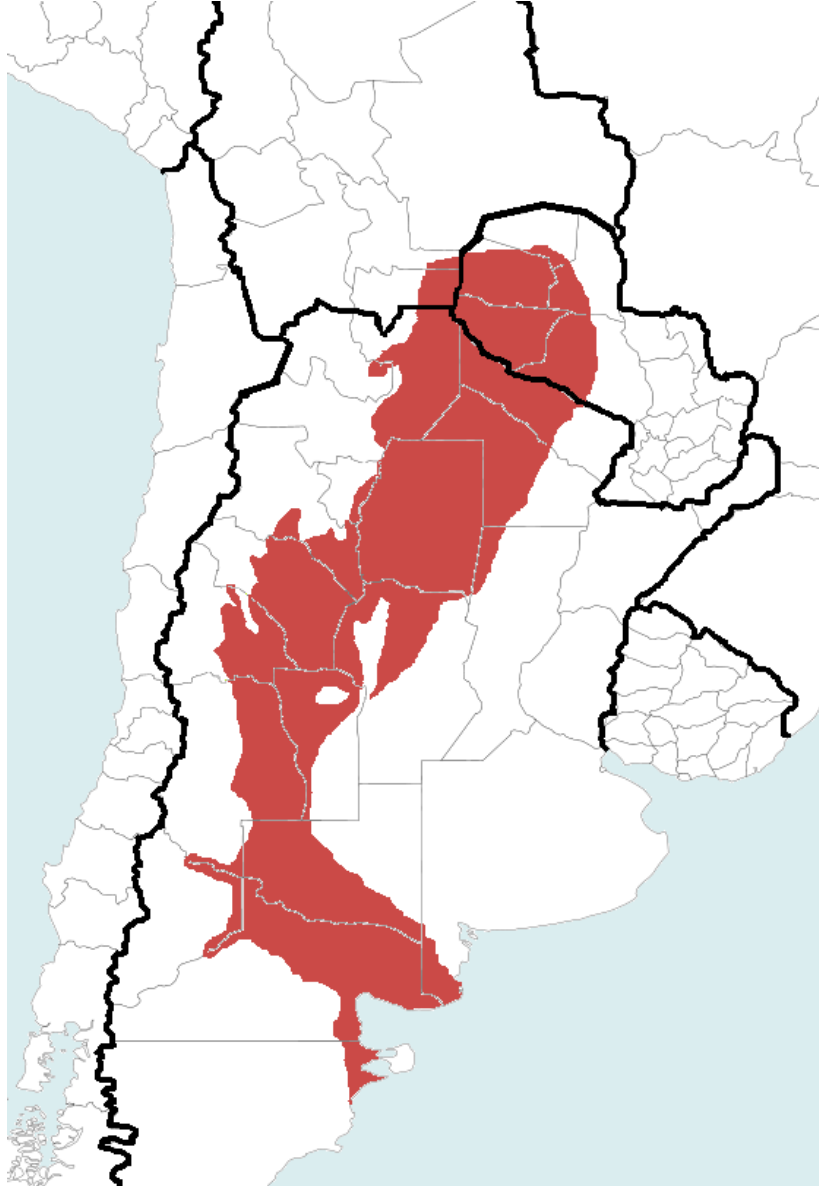
### 1.1. *C. chilencis*

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. Para el caso de las tortugas estas trayectorias dependen fuertemente de la vegetación en la zona de estudio y la época del año (caso que busquen reproducirse, depositar sus huevos, etc.).

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 pogens*, *Sphaeralcea miniata*, *S. mendocina*, *Portulaca grandiflora*) y vainas de leguminosas ([7]).



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

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 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.

## 1.2. 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 construída en el Centro Atómico, para registrar señales de GPS, sensores inerciales y de temperatura. Sobre el año 2022 se adoptó una tercera técnica, utilizando una unidad de navegación comercial (i-gotU GT120) que toma datos de GPS y hora. En las siguientes subsecciones se proveerán más detalles de ambas metodologías.

### 1.2.1. Radiotelemetría

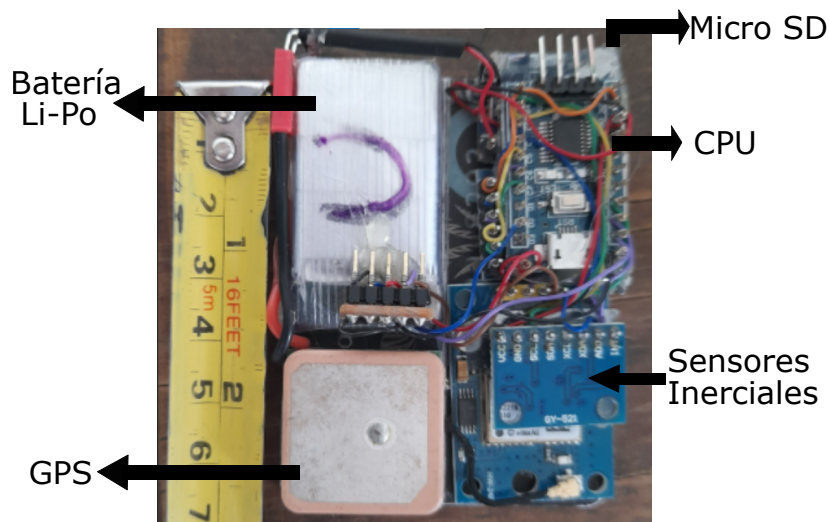
Las técnicas de radiotelemetría permiten localizar individuos mediante un sistema de transmisor-receptor-antena. Se utilizaron transmisores Holohil (Grand HOLOHIL Systems Ltd. RI-2B) pegados a los caparazones de las tortugas mediante cinta adhesiva. Estos transmisores emiten un pulso a una determinada 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.

### 1.2.2. 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 inerciales (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 inerciales 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.



**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.

### 1.2.3. i-gotU

# Capítulo 2

## Título del Capítulo 2

*“Quantum Mechanics is God’s version of ‘Trust me.’ ”*  
— Jorge Corona, 1982

### 2.1. Formulación del problema

El problema de la medida se puede describir informalmente del siguiente modo [9]

1. De acuerdo con la mecánica cuántica cuando un sistema físico, ya sea un conjunto de electrones orbitando en un átomo, queda descrito por una función de onda. Dicha función de onda es un objeto matemático que supuestamente describe la máxima información posible que contiene un estado puro.
2. Si nadie externo al sistema ni dentro de él observara o tratara de ver como está el sistema, la mecánica cuántica nos diría que el estado del sistema evoluciona deterministamente. Es decir, que podría ser perfectamente predecible hacia donde irá el sistema.
3. La función de onda nos informa de cuales son los resultados posibles de una medida y sus probabilidades relativas, pero no nos dice qué resultado concreto se obtendrá si un observador trata efectivamente de medir el sistema o averiguar algo sobre él. De hecho, la medida sobre un sistema es un valor impredecible de entre los resultados posibles.

Eso plantea un problema serio, si las personas, los científicos u observadores son también objetos físicos como cualquier otro, debería haber alguna forma determinista de predecir como tras juntar el sistema en estudio con el aparato de medida, finalmente llegamos a un resultado determinista. Pero el postulado de que una medición destruye la “coherencia” de un estado inobservado e inevitablemente

tras la medida se queda en un estado mezcla impredecible parece que sólo nos deja 3 salidas (ver notas a continuación) [10, 11]:

- a) O bien pasamos a entender el proceso de decoherencia por lo cual un sistema pasa de tener un estado puro que evoluciona predeciblemente a tener un estado mezcla o impredecible (ver teoría del caos)
- b) O bien admitimos que existen unos objetos no-físicos llamados “conciencia” que no están sujetos a las leyes de la mecánica cuántica y que nos resuelven el problema.
- c) O tratamos de inventar cualquier hipótesis exótica que nos haga compatibilizar como por un lado deberíamos estar observando tras una medida un estado no fijado por el estado inicial y por otro lado que el estado del universo en su conjunto evoluciona de forma determinista.

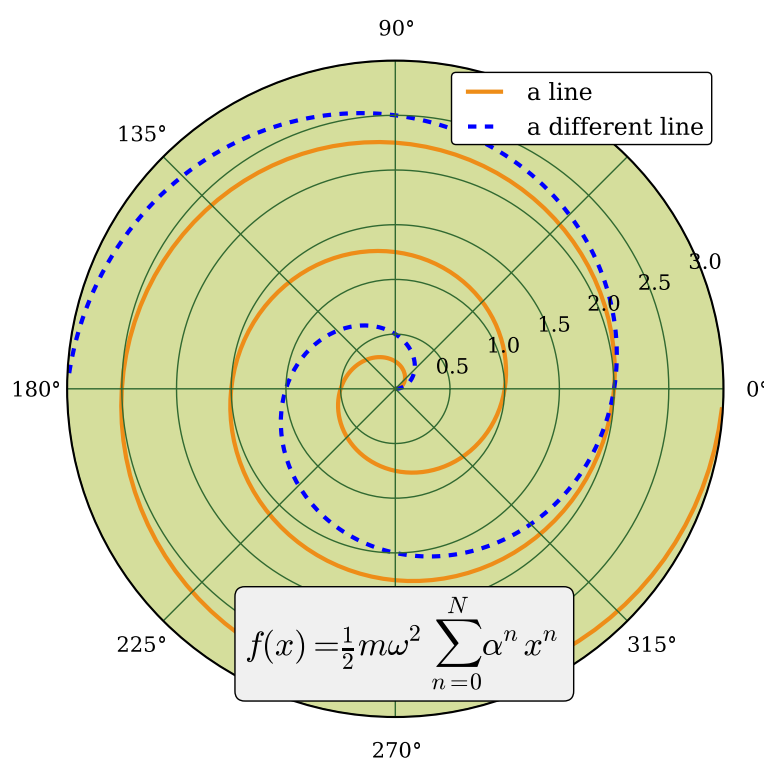
El enunciado anterior “una medición destruye la ‘coherencia’ de un estado inobservado e inevitablemente tras la medida se queda en un estado mezcla impredecible parece que sólo nos deja 3 salidas” es demasiado arriesgado y no probado. Si partimos de que las entidades fundamentales que constituyen la materia, precisamente, y al contrario de lo que deduce (B) no tienen consciencia de sí mismas, y sin preferencia alguna por el determinismo o el caos absoluto, sólo pueden encontrar el equilibrio comportándose según leyes de probabilidad o lo que es lo mismo por leyes de “caos determinado”. En la práctica cualquier defensa o negación de la teoría cuántica no responde a razonamientos matemáticos deductivos sino a impresiones o sugerencias con origen en axiomas filosóficos totalmente arbitrarios. Notar que p.ej, la palabra “equilibrio” en este párrafo puede o no tener sentido y el valor de realidad que se conceda al mismo no está sujeto a demostración matemática alguna.

## 2.2. Interpretaciones

Comúnmente existen diversas interpretaciones de la mecánica cuántica, cada una de las cuales en general afronta el problema de la medida de manera diferente. De hecho si el problema de la medida estuviera totalmente no existirían algunas de las interpretaciones rivales. En cierto modo la existencia de diferentes interpretaciones refleja que no existe un consenso sobre como plantear precisamente el problema de la medida. Algunas de las interpretaciones más ampliamente conocidas son las siguientes[12]:

1. Interpretación estadística, en la que se supone un estado cuántico describe una regularidad estadística, siendo explicables los diferentes resultados de la medida de

un observable atribuibles a factores estocásticos o fluctuaciones debidas al entorno y no observables. La electrodinámica estadística es una teoría de los electrones en que el comportamiento cuántico, aparentemente aleatorio, de los electrones de un sistema es atribuible a las fluctuaciones del campo electromagnético debido al resto de electrones del universo.



**Figura 2.1:** La figura muestra algunas curvas más o menos lindas. El gráfico está en coordenadas polares como se muestra en la ref. [13]

2. Interpretación de Copenhague, es la interpretación probablemente más común y a la que se han adherido la mayoría de manuales de mecánica cuántica tradicionalmente. Debida inicialmente a Niels Bohr y el grupo de físicos que trabajaba con él en Copenhague hacia 1927. Se asume el principio de incertidumbre y el principio de complementariedad de las descripciones ondulatoria y corpuscular.
3. Interpretación participatoria del principio antrópico.
4. Interpretación de historias consistentes.
5. Teorías de colapso objetivo. De acuerdo con estas teorías, la superposiciones de estados se destruyen aunque no se produzca observación, difiriendo las teorías en qué magnitud física es la que provoca la destrucción (tiempo, gravitación, temperatura, términos no lineales en el operador de evolución...). Esa destrucción es lo que evita

las ramas que aparecen en la teoría de los multi-universos o universos paralelos . La palabra "objetivo" procede de que en esta interpretación tanto la función de onda como el colapso de la misma son reales", en el sentido ontológico. En la interpretación de los muchos-mundos, el colapso no es objetivo, y en la de Copenhague es una hipótesis ad-hoc.

- Interpretación multiverso.
- Decoherencia por el entorno
- Interpretación de Bohm
- Interpretación Madhyamika

En la primera ecuación

$$\phi_1(z) = A_1 e^{ik_1 z} + B_1 e^{-ik_1 z}. \quad (2.1)$$

En la segunda ecuación:

$$\phi_2(z) = A_2 e^{ik_2 z} + B_2 e^{-ik_2 z}. \quad (2.2)$$

La solución de la tercera ecuación se puede obtener a partir de la solución en la primera ecuación aplicando [14]

$$\phi_3(z) = e^{iKd} (A_1 e^{ik_1(z-l)} + B_1 e^{-ik_1(z-l)}). \quad (2.3)$$



# Capítulo 3

otr

3.1. Sección 1

3.2. otra

3.3. una

3.4. dos

3.5. tres



# Capítulo 4

## cuatro

4.1. una

4.2. otra mas



# Apéndice A

## Ejemplo de apéndice: El problema de la medida

*“Negociemos Don Inodoro”*

— Fernando de la Rúa, 2001

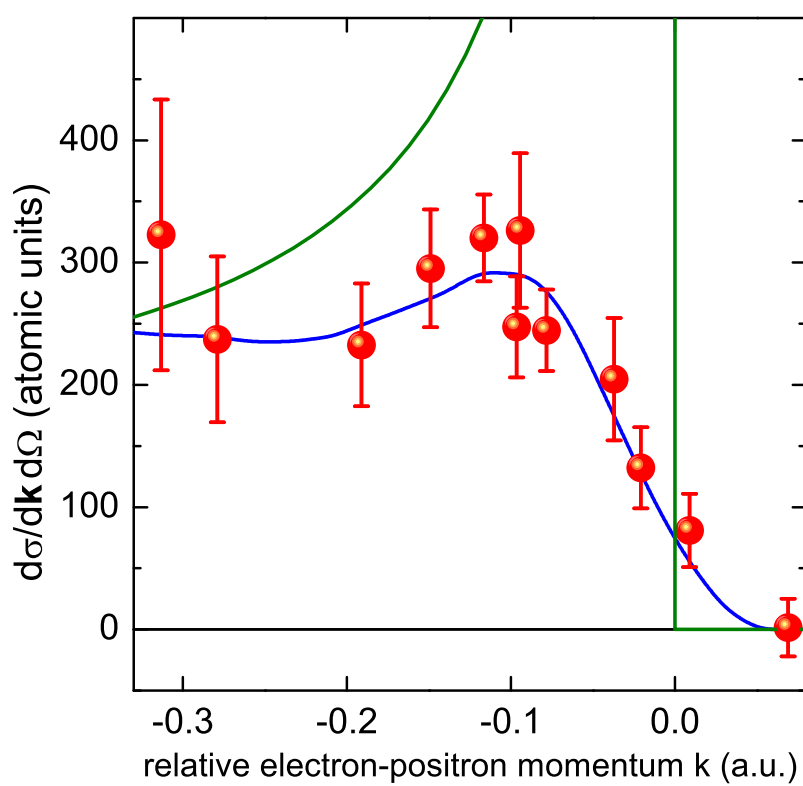
*“Smartness runs in my family. When I went to school I was so smart my teacher was in my class for five years”*

— 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 [15].

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](#)
- [6] Kubisch, E. L., Echave, M. E., Echave, L. A. *Chelonoidis chilensis* (chaco tortoise), 2014. [1](#)
- [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 pariente de las tortugas terrestres de las islas Galápagos, 2016. [2](#)
- [8] Kubisch, E., investigadora de CONICET, especialista en biología de campo. Comunicación directa, 2022. [2](#)
- [9] Bohr, N. On the constitution of atoms and molecules. *Phil. Mag.*, **25**, 10, 1913. [5](#)
- [10] Bohm, D. A suggested interpretation of the quantum theory in terms of “Hidden” variables. I. *Physical Review*, **85**, 166–179, 1952. [6](#)
- [11] Bohm, D. A suggested interpretation of the quantum theory in terms of “Hidden” variables. II. *Physical Review*, **85**, 180–193, 1952. [6](#)

- 
- [12] Briggs, J. S., Macek, J. H. The theory of fast ion-atom collisions. En: J. S. Briggs, J. H. Macek (eds.) *Advances in Atomic, Molecular and Optical Physics*, tomo 28, págs. 1–74. Academic Press, Inc., 1991. [6](#)
- [13] Hunter, J. D. Matplotlib: A 2d graphics environment. *Computing In Science & Engineering*, **9** (3), 90–95, May-Jun 2007. [7](#)
- [14] Laricchia, G., Armitage, S., Köver, A., Murtagh, D. J. Ionizing collisions by positrons and positronium impact on the inert atoms. En: *Advances in Atomic, Molecular and Optical Physics*, tomo 56, pág. 3. Academic Press, Inc., 2009. [8](#)
- [15] Philippidis, C., Bohm, D., Kaye, R. D. The Aharonov-Bohm effect and the quantum potential. *Nuovo Cimento B Serie*, **71**, 75–88, 1982. [13](#)



# 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

