

# DESCIFRANDO LA INCERTIDUMBRE: UN VIAJE A TRAVÉS DE LA ENTROPÍA DE SHANNON, LA MECÁNICA LAGRANGIANA Y LA CONFIABILIDAD

*DECODING UNCERTAINTY: A JOURNEY THROUGH SHANNON ENTROPY, LAGRANGIAN MECHANICS AND RELIABILITY*

OCTAVIO PÉREZ GÓMEZ GAONA<sup>1</sup>

LUISA ALEJANDRA RAMÍREZ DELGADO<sup>1</sup>

DAVID SALVADOR GONZÁLEZ GONZÁLEZ<sup>2</sup>

## RESUMEN

La teoría de la información de Claude E. Shannon, formulada en la década de 1940, es clave para cuantificar la incertidumbre en diversos sistemas, incluyendo comunicación, inteligencia artificial, estadística e ingeniería de confiabilidad. La entropía de Shannon mide la información en un mensaje y optimiza su transmisión, minimizando el ruido. Este artículo explora la relación entre la entropía, la mecánica lagrangiana y la confiabilidad de sistemas. Se plantea que el principio de mínima acción, base de la mecánica lagrangiana, también se aplica en la optimización de la transmisión de información y la predicción de fallas en sistemas industriales. La incertidumbre se interpreta como un factor central en la dinámica de sistemas físicos y de información, estableciendo un marco matemático basado en restricciones probabilísticas y principios variacionales. Finalmente, se destaca la conexión entre la ecuación de Euler-Lagrange y la evolución de la incertidumbre en sistemas de información y confiabilidad. Esta perspectiva describe la dinámica de la incertidumbre y su impacto en la gestión del riesgo y la optimización, ampliando la aplicabilidad de la teoría de la información en la toma de decisiones en ciencia e ingeniería, particularmente en confiabilidad.

**Palabras clave:** entropía de Shannon; mecánica lagrangiana; teoría de la información; confiabilidad de sistemas; optimización variacional.

1. Centro de Estudios e Investigaciones Interdisciplinarias, Unidad Sureste, UAdeC.
2. Facultad de Sistemas, Unidad Sureste, UAdeC.

Correspondencia  
ocperezgomezg@uadec.edu.mx  
<https://orcid.org/0000-0003-1341-0589>

Fecha de recepción  
24 de marzo de 2025.

Fecha de aceptación  
19 de mayo de 2025.

## ABSTRACT

*The information theory of Claude E. Shannon, formulated in the 1940s, is key to quantifying uncertainty in various systems, including communication, artificial intelligence, statistics, and reliability engineering. Shannon entropy measures the information in a message and optimizes its transmission by minimizing noise. This article explores the relationship between entropy, Lagrangian mechanics, and system reliability. It is proposed that the principle of least action, the foundation of Lagrangian mechanics, also applies to optimizing information transmission and predicting failures in industrial systems. Uncertainty is interpreted as a central factor in the dynamics of physical and informational systems, establishing a mathematical framework based on probabilistic constraints and variational principles. Finally, the connection between the Euler-Lagrange equation and uncertainty evolution in information and reliability systems is highlighted. This perspective describes the dynamics of uncertainty and its impact on risk management and optimization, expanding the applicability of information theory in decision-making in science and engineering, particularly in reliability.*

**Keywords:** Shannon entropy; lagrangian mechanics; information theory; system reliability; variational optimization.

## INTRODUCCIÓN

En nuestra vida cotidiana, la incertidumbre se manifiesta de diversas formas: en la transmisión de mensajes, la confiabilidad de sistemas mecánicos o la evolución de sistemas físicos bajo restricciones. La teoría de la información, formulada por Claude Shannon (Shannon1948) en los años 40, ofrece una herramienta matemática para cuantificar la incertidumbre mediante la entropía. Aunque concebida en telecomunicaciones, su aplicación se extiende a biología, ingeniería, medicina y ciencias sociales. Sin embargo, su relación con la mecánica lagrangiana y el cálculo variacional es menos evidente. Imaginemos que la confiabilidad de un sistema mecánico/industrial —como una turbina o un vehículo— no solo depende del desgaste físico, sino de una dinámica matemática oculta. ¿Podría la probabilidad de falla modelarse no solo como una función empírica, sino como una estructura emergente



derivada de principios variacionales? Aquí surge la conexión: la entropía de Shannon, la mecánica lagrangiana y el mantenimiento centrado en confiabilidad (RCM) pueden integrarse en un mismo marco teórico. Aunque parecen disciplinas independientes, examinadas desde una perspectiva informacional, revelan una estructura unificadora. La mecánica lagrangiana, basada en el principio de mínima acción, describe la evolución de sistemas físicos mediante trayectorias óptimas. El mantenimiento centrado en confiabilidad optimiza la gestión del ciclo de vida de sistemas industriales, anticipando fallas. La teoría de la información permite cuantificar la incertidumbre y su impacto en la confiabilidad. Este artículo explora cómo la entropía de Shannon actúa como un puente matemático entre la confiabilidad y la mecánica variacional, revelando que, en la intersección de estas disciplinas, la teoría de la información siempre ha estado presente, esperando ser descubierta.

## CUANTIFICACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE: DEFINICIÓN DE INCERTIDUMBRE Y SU RELACIÓN CON LA INFORMACIÓN

La incertidumbre surge cuando los datos disponibles son incompletos o insuficientes para predecir con certeza un evento, según Shannon (1948), López Pérez (1998) y Suárez Álvarez (2011). En el ámbito de la comunicación, esta ausencia de información genera desafíos en la transmisión y recepción de mensajes, lo que lleva al desarrollo de métodos matemáticos para cuantificarla y optimizar su gestión. Esta incertidumbre define estructuras matemáticas complejas en términos de codificación, pero simples en su interpretación. Claude E. Shannon formalizó la entropía como una medida cuantitativa de la incertidumbre asociada a la transmisión de información. En este contexto, la cantidad de información contenida en un mensaje es un valor matemático bien definido y medible. La información no se refiere al volumen de datos transmitidos, sino a la probabilidad de que un mensaje específico, dentro de un conjunto de mensajes posibles, sea recibido. En este sentido, un mensaje con menor probabilidad de ocurrencia contiene más información, mientras que un mensaje cuya recepción sea completamente predecible no aporta información nueva y, por tanto, su entropía es cero.



## LA INCERTIDUMBRE COMO CARACTERÍSTICA INHERENTE A LOS SISTEMAS DE TRANSMISIÓN DE INFORMACIÓN Y OTROS FENÓMENOS NATURALES

El modelo propuesto por Shannon describe la comunicación como un proceso en el que una fuente de información emite un mensaje, que es transformado en una señal por un transmisor y enviado a través de un canal. En este proceso, el ruido, como ocurre en una llamada telefónica con mala recepción o en una transmisión digital con interferencias, puede afectar la transmisión, comprometiendo la correcta interpretación del mensaje por parte del receptor. La teoría de la información busca optimizar la codificación y decodificación para minimizar los efectos del ruido y garantizar una transmisión eficiente.

La incertidumbre no solo es relevante en la comunicación, sino que también desempeña un papel crucial en múltiples disciplinas. En inteligencia artificial, la incertidumbre surge cuando los modelos predictivos operan con datos incompletos o ambiguos, requiriendo algoritmos avanzados para estimar probabilidades y tomar decisiones óptimas. Según Aladro Vico (2011), en estadística, la incertidumbre es inherente a cualquier análisis basado en muestreos y predicciones, donde la falta de datos suficientes o la variabilidad de los mismos afectan la confianza en los resultados. Por otro lado, Le Thi (2016) señala que, en la transmisión de señales, la incertidumbre se presenta cuando la calidad de la señal se degrada debido al ruido, obligando a implementar técnicas de corrección de errores y redundancia para asegurar la fidelidad del mensaje. Estos ejemplos reflejan cómo la incertidumbre no solo es un concepto teórico, sino un desafío práctico que requiere estrategias especializadas en cada campo para su manejo y minimización, como lo señalan Shannon (1948) y Capurro (2007).

## LA ENTROPÍA COMO MEDIDA DE INCERTIDUMBRE

La entropía, definida por Shannon, cuantifica la incertidumbre en un sistema de transmisión de información. En un canal de comunicación, la entropía mide la cantidad media de información por byte transmitido. Si un byte tiene una alta probabilidad de ser transmitido, su contribución a la entropía es baja; en cambio, si un byte tiene una baja probabilidad, aporta más información en



términos de incertidumbre y aumenta la entropía del sistema. Los bytes, en este sentido, se interpretan como unidades fundamentales de información, pero lo que define su aportación a un mensaje en este contexto es la probabilidad de que tal byte de información sea transmitido o no. En realidad, si lo pensamos, toda la tecnología moderna depende de probabilidades de que la información se consiga o no transmitir.

Es asombroso comprobar que se dispone de una cantidad específica para contabilizar la incertidumbre y transformarla en probabilidades que nos indican con qué frecuencia, al pasar el tiempo, logramos transmitir porciones bien definidas de un mensaje. ¡Tal cantidad es la entropía!

Este concepto es clave para optimizar los esquemas de codificación y almacenamiento de datos, asegurando que la cantidad de bits utilizada refleje de manera eficiente la cantidad de información transmitida. Además, la entropía se extiende a sistemas físicos y estadísticos, donde se usa para describir la dispersión de estados en un sistema dinámico.

Un detalle interesante: la entropía no se modifica si elegimos bytes, bits, ladrillos, gorditas de picadillo o símbolos ancestrales para codificar la información. Lo que importa es cuantificar la incertidumbre.

## PRESENTACIÓN DEL CONCEPTO DE ENTROPÍA DE SHANNON

La entropía de Shannon se puede entender como una medida del grado de incertidumbre asociado a una fuente de información. Cuanto más impredecibles sean los datos generados por una fuente, mayor será su entropía. En términos prácticos, esto significa que una secuencia de datos altamente aleatoria tiene mayor entropía que una secuencia con patrones repetitivos. En el trabajo de Capurro (2007) puede verse desde una perspectiva práctica, que la entropía de Shannon permite diseñar códigos de transmisión eficientes, tales como el sistema binario, y fundamenta el límite de compresión sin pérdidas de datos. La interpretación coloquial de que la entropía es una medida del desorden de un sistema es, en el mejor de los casos, una mala interpretación de la entropía en el contexto de la termodinámica. En general, es preferible entenderla como ausencia de información o, mejor dicho, incertidumbre, tal como se indica en el trabajo

seminal de (Shannon,1948). En la teoría de la información, la clave es comprender qué porción de la información desconocemos y, como consecuencia, cuánta incertidumbre opera en el sistema que estemos trabajando.

## NEXO CON LA TEORÍA ERGÓDICA Y APLICACIONES EN SISTEMAS COMPLEJOS

La teoría de la información se vincula con la teoría ergódica, que analiza el comportamiento estadístico de sistemas dinámicos en el tiempo. Según la hipótesis de ergodicidad, todos los microestados accesibles son igualmente probables a largo plazo, lo que permite interpretar cada fragmento de un mensaje como una unidad de incertidumbre optimizada. Así, una transmisión eficiente busca distribuir esta incertidumbre de forma uniforme a lo largo del mensaje.

Este paralelismo destaca que la incertidumbre no solo es estadística, sino también una base estructural en la organización de la información. Conceptos fundamentales de la teoría ergódica incluyen:

- Sistema ergódico: Un sistema en el que la probabilidad de estar en un estado coincide con el tiempo promedio pasado en dicho estado.
- Proceso ergódico: Un proceso estocástico en el cual una función muestral contiene todas las características estadísticas del proceso.
- Teoremas ergódicos: Propuestos por John von Neumann y George Birkhoff, establecen las condiciones bajo las cuales los promedios temporales coinciden con los promedios de conjunto.

La hipótesis de ergodicidad resulta clave en el estudio de sistemas complejos donde la información depende de múltiples parámetros. Sus aplicaciones incluyen redes neuronales, navegación autónoma y análisis estructural de redes informacionales, como muestra Mena Díaz (2012) desde la teoría de grafos. En este contexto, la ergodicidad no solo describe sistemas dinámicos, sino que también condiciona cómo la entropía evoluciona en el tiempo. La aleatoriedad y variabilidad temporal influyen directamente en la medición de la incertidumbre y en las estrategias de transmisión y almacenamiento de

información. En sistemas complejos, esta relación puede ser decisiva para entender la eficiencia del procesamiento de datos.

## CONEXIÓN LAGRANGIAN: MECÁNICA LAGRANGIANA Y EL PRINCIPIO DE MÍNIMA ACCIÓN

La mecánica lagrangiana es una herramienta teórica que describe la evolución de los sistemas físicos basándose en un principio de optimización. Según este principio, un sistema natural siempre sigue la trayectoria que optimiza su comportamiento bajo ciertas restricciones. En física, como indica Ballén Méndez (2023), se asume que tal optimización conduce a un mínimo, un punto donde existe estabilidad en la función lagrangiana que se estudia. Este enfoque se ha utilizado ampliamente para describir desde el movimiento de partículas en campos de fuerza hasta fenómenos más complejos en la física moderna. Desde el problema de la braquistócrona, planteado por los hermanos Bernoulli a Newton, hasta la formulación moderna de la mecánica cuántica de campos, la mecánica lagrangiana juega un papel fundamental en el desarrollo de algoritmos de optimización en distintas disciplinas en opinión de (Susskind, 1997).

## OPTIMIZACIÓN DE TRAYECTORIAS Y DINÁMICA DE SISTEMAS

El principio de mínima acción permite describir la evolución de sistemas físicos y su comportamiento bajo restricciones. Se interpreta como un mecanismo de optimización donde la trayectoria seleccionada minimiza o estabiliza una cantidad determinada, el lagrangiano. En términos generales, el lagrangiano alcanza valores mínimos para ciertas trayectorias, mientras que otras, con características geométricas distintas, no cumplen esta condición. Existen formulaciones que demuestran que las trayectorias cerradas siempre corresponden a mínimos dentro de este contexto. Este análisis es esencial para el estudio de sistemas con múltiples variables y condiciones, ya que reformula problemas dinámicos como la búsqueda de soluciones óptimas dentro de un conjunto de posibilidades. Ahora bien, ¿a qué se hace referencia con problemas dinámicos? En trabajo de Hawking (2005) se aborda esta cuestión

desde el planteamiento de sistemas cuya evolución depende explícitamente del tiempo, es decir, aquellos en los que el estado actual determina directamente el futuro y requieren una formulación adecuada para su descripción.

## PRIMERAS VINCULACIONES CON LA TEORÍA DE LA INFORMACIÓN

La relación entre la mecánica lagrangiana y la teoría de la información se basa en la conexión entre el principio de mínima acción y la incertidumbre en sistemas físicos. La incertidumbre, entendida como la falta de conocimiento sobre el estado futuro de un sistema, puede medirse mediante la entropía. En este sentido, la evolución óptima de un sistema puede interpretarse como aquella que maximiza la incertidumbre sobre su trayectoria. Este principio tiene aplicaciones en distintos campos, por ejemplo, Cárdenas (2022) señala condiciones bajo las cuales la mecánica cuántica y la confiabilidad en sistemas industriales se emplea para predecir y prevenir fallas.

## DE LA INCERTIDUMBRE A LA CONFIABILIDAD: MODELOS PROBABILÍSTICOS EN CONFIABILIDAD

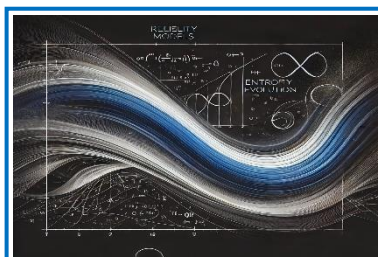
La confiabilidad de un sistema se modela generalmente a través de enfoques probabilísticos que permiten predecir su desempeño y vida útil. Las funciones de confiabilidad, como las distribuciones exponenciales y de Weibull, permiten estimar la probabilidad de falla en función del tiempo. Estos modelos se aplican en ingeniería y mantenimiento para optimizar estrategias de gestión de activos y minimizar el riesgo de fallas inesperadas. En este sentido, (Luna, 2005) plantea que la confiabilidad se puede entender como el cambio de la calidad a través del tiempo. Cuando se cambia el aceite y el filtro de aceite de un vehículo, el circuito de lubricación del motor alcanza su máximo nivel de calidad. Conforme el tiempo avanza, la calidad del aceite y la capacidad filtradora del filtro disminuyen progresivamente. Esta

degradación del sistema de lubricación induce riesgos que aumentan con el tiempo; la calidad va decayendo, el riesgo de fallas asociadas al circuito de aceite aumenta y, en general, la confiabilidad de este vital sistema automotor se compromete conforme el tiempo transcurre.

## USO DE LA INFORMACIÓN PARA ANTICIPAR

### FALLAS

La cuantificación de la incertidumbre mediante la entropía de Shannon permite mejorar la predicción y gestión del riesgo en sistemas complejos. En el mantenimiento predictivo, la información extraída de sensores y registros históricos permite anticipar fallas antes de que ocurran, optimizando la toma de decisiones y reduciendo costos operativos.



**Figura 1.** Representación abstracta de la entropía.

Sin embargo, paradójicamente, el momento en el que mejor funciona el enfoque entrópico es cuando no existe información disponible. Allí donde no haya registros de fallas, recambios de componentes o frecuencia de mantenimiento, la entropía alcanza un máximo, pues la incertidumbre es casi total. Es en este punto donde puede intervenir la teoría de la información para modelar las posibles fallas, incluso cuando la información es muy reducida.

**Figura 2.** El cambio de aceite como un ejemplo de sistemas reemplazables.



## ANALOGÍA ENTRE LA INCERTIDUMBRE EN INFORMACIÓN Y CONFIABILIDAD

Existe una relación conceptual entre la incertidumbre en teoría de la información y la confiabilidad de un sistema. La entropía mide el nivel de incertidumbre sobre el estado futuro de un sistema, y esta incertidumbre está directamente relacionada con su confiabilidad. Un sistema con alta entropía posee un comportamiento impredecible, lo que dificulta su mantenimiento y predicción. Por el contrario, reducir la incertidumbre permite mejorar la planificación y gestión de riesgos en sistemas industriales. Es aquí donde se involucra la mecánica lagrangiana y el cálculo variacional. El cálculo variacional es el lenguaje natural de la mecánica lagrangiana. En esencia, en ese máximo de incertidumbre se pueden imponer restricciones de tipo probabilístico basadas en los axiomas de Kolmogórov, como citan en su trabajo Shannon (1948) y Hawking (2005), en general, los axiomas de Kolmogórov se pueden entender como sigue:

- La probabilidad no puede ser mayor que 1.
- La probabilidad no puede ser menor que 0.
- La probabilidad es sumable y acumulativa a través del tiempo.

Estos tres axiomas, escritos en una formulación lagrangiana que incluye la entropía, no generan una única densidad de probabilidad de falla, sino un conjunto de funciones de densidad de probabilidad de falla que se ajustan progresivamente al comportamiento de la confiabilidad conforme evoluciona el sistema de interés. Es como si no recordáramos cuándo hicimos el cambio de aceite, pero por experiencia sabemos que cuando al encender nuestro coche por las mañanas este emite ciertos sonidos peculiares, estamos incurriendo en un riesgo de fallas. Decidimos entonces darle servicio: la incertidumbre es la misma, pero la experiencia pasada y el temor a una falla prematura nos permiten tomar una decisión más o menos racional con respecto al mantenimiento del vehículo.

**Figura 3.** Los Axiomas de Kolmogorov.

$$\begin{aligned}
 P(S) &\geq 0, \quad \forall S \in \mathcal{A} \\
 P(\Omega) &= 1 \\
 P\left(\bigcup_{n=1}^{\infty} S_n\right) &= \sum_{n=1}^{\infty} P(S_n)
 \end{aligned}$$

## DESCIFRANDO LA CONEXIÓN LAGRANGIANA: EL PRINCIPIO DE HAMILTON COMO MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN

El principio de Hamilton establece que la evolución de un sistema físico es el resultado de un proceso de optimización sujeto a restricciones como señala Bussotti (2024). Este principio se formula a través de un funcional de acción, cuya minimización conduce a las ecuaciones de movimiento del sistema. En términos generales, cualquier sistema físico sigue una trayectoria que optimiza la acción definida como la integral del lagrangiano en el tiempo. Para describir matemáticamente esta idea, tendremos que hacer algo que normalmente no se hace en artículos de divulgación: describir matemáticas! No es tan complicado y, en todo caso, como indica (Weaver, 2023), una descripción breve pero sucinta será de utilidad. Comencemos considerando la acción  $H$  sobre una función  $f$ , cuya variación está dada por:  $\delta H = 0$

De esta condición se extrae el lagrangiano  $L$ , que es una función que contiene toda la información del sistema dinámico que estamos postulando:  $H = \int L dt$ . Este enfoque, aplicado más allá de la mecánica clásica, permite modelar procesos en diversos dominios, desde sistemas físicos hasta el análisis de información. En el contexto de la teoría de la información, este marco de optimización se traduce en la búsqueda de configuraciones de máxima entropía bajo restricciones impuestas por la estructura de los datos o sistemas de transmisión.

## ENTROPÍA Y MECÁNICA LAGRANGIANA: UNA CONEXIÓN INESPERADA

La entropía de Shannon mide la incertidumbre de un sistema de información y puede ser interpretada como un funcional, es decir, una función de funciones. Si se considera la entropía como una cantidad análoga a una acción, su extremización bajo restricciones de normalización y momentos estadísticos conduce a la formulación de un lagrangiano especial:  $L = L_0 + L_R$  donde  $L_0$  es el lagrangiano "libre" que incorpora la contribución de la entropía de Shannon, y  $L_R$  es otro lagrangiano que incorpora las restricciones



impuestas por los axiomas de Kolmogorov y los momentos probabilísticos, tales como la media, la moda, la mediana, la desviación estándar y la curtosis. Así,  $L = L_0 + L_R$  contiene todas las exigencias de la teoría de la información, los axiomas de Kolmogorov y las condiciones analíticas derivadas de la densidad de probabilidad. Estas características son fundamentales para describir la evolución óptima de la incertidumbre en sistemas de información y confiabilidad. Para derivar ecuaciones que gobiernen esta evolución, recurrimos a las ecuaciones de Euler-Lagrange:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q} =$$

Estas ecuaciones diferenciales determinan la evolución temporal del sistema dinámico modelado por  $L$ . En este contexto, las ecuaciones de Euler-Lagrange nos indicarán qué distribuciones de probabilidad son compatibles con las restricciones y la entropía prescritas en el lagrangiano  $L$ . De esta manera, se establece un puente matemático entre la teoría de la información, la mecánica lagrangiana y el análisis de confiabilidad, proporcionando una nueva perspectiva sobre la optimización de sistemas dinámicos.

## CULMINACIÓN DEL ANÁLISIS: UN MARCO UNIFICADO

El análisis presentado sugiere un marco unificado donde la entropía, la mecánica lagrangiana y la confiabilidad convergen en un mismo formalismo matemático. La conexión entre estos conceptos se basa en la idea de que la evolución óptima de cualquier sistema puede ser descrita mediante principios variacionales, independientemente de si el sistema es físico, informacional o de confiabilidad. Todo lo que se necesita es contar con un lagrangiano con restricciones adecuadas al problema que tratamos de modelar. Este enfoque tiene implicaciones profundas en diversas áreas. En confiabilidad, permite modelar la evolución del riesgo mediante ecuaciones derivadas del formalismo lagrangiano. En teoría de la información, proporciona una base matemática para entender la optimización de la transmisión y almacenamiento de datos. Finalmente, en mecánica lagrangiana, amplía el horizonte de aplicación hacia sistemas no físicos donde la incertidumbre es un elemento central. Así, la entropía se revela no solo como una medida de incertidumbre, sino como un principio organizador desde el punto de vista del cálculo



variacional que, bajo el enfoque lagrangiano, conecta diversas disciplinas aparentemente dispares. Esta conexión, inesperada a primera vista, ofrece una visión unificadora que amplía nuestra comprensión sobre la optimización y la dinámica de sistemas.

## REFERENCIAS

- Aladro Vico, E. (2011). La teoría de la información ante las nuevas tecnologías de la comunicación. *CIC. Cuadernos de Información y Comunicación*, 16: 83–93.
- Ballén Méndez, I. C. (2023). *Un acercamiento termodinámico a las ecuaciones de campo de Einstein* [Tesis de grado, Universidad de los Andes]. Repositorio Uniandes.
- Bussotti, P., Capecchi, D., & Ruta, G. (2024). On the origins of Hamilton's principle(s). *Encyclopedia*, 4: 1454–1471. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia4040094>
- Capurro, R. (2007). Epistemología y ciencia de la información. *Revista de Ciencias de la Información*, 4(1): 1–15.
- Cárdenas, J. H. (2022). *Física estadística: una visión a partir de la entropía y la teoría de la información*. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
- Hawking, S. W. (2005). Information loss in black holes. *Physical Review D*, 72: 084013. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.72.084013>
- Le Thi, M. L. (2016). *Entropía: Una medida de riesgo*. Banco de México.
- López Pérez, R. (1998). Crítica de la teoría de la información: Integración y fragmentación en el estudio de la comunicación. *Cinta Moebio*, 3: 24–30.
- Luna, A. E. (2005). *Teoría de la confiabilidad*. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires.
- Mena Díaz, N. (2012). Redes sociales y gestión de la información: Un enfoque desde la teoría de grafos. *Ciencias de la Información*, 43(1). 29–37.
- Shannon, C. E. (1948). A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 27, 379–423, 623–656.
- Suárez Álvarez, E. (2011). *Avances metodológicos en el cálculo de la entropía conformacional y la energía de biomoléculas y su aplicación a modelos de colágeno*. Dialnet.
- Susskind, L. (1997). Black holes and the information paradox. *Scientific American*, 276: 52–57.

Weaver, C. G. (2023). *Hamilton, Hamiltonian mechanics, and causation*. *Foundations of Science*. <https://doi.org/10.1007/s10699-023-09967-3>