

# **INFORME ACADÉMICO EL ESPACIO DE HILBERT Y SU RELEVANCIA PARA LA PROSPECTIVA**



**FESAL**  
FUNDACIÓN DE ESTUDIOS  
PARA LA SALUD

# INFORME ACADÉMICO: EL ESPACIO DE HILBERT Y SU RELEVANCIA PARA LA PROSPECTIVA

A partir del artículo: *"In Hilbert Space, All Things Are Quantumly Possible"* (Quanta Magazine, 26 de agosto de 2026), por Charlie Wood

## o. PRESENTACIÓN



El informe analiza el espacio de Hilbert, formalizado por John von Neumann en 1927 como el escenario matemático de la mecánica cuántica, donde el estado de un objeto no es una realidad fija sino un vector que apunta en un "espacio de posibilidades" que contiene todos sus futuros potenciales. Este marco se rige por cinco axiomas que describen la evolución suave del vector, el colapso aleatorio al ser observado y el cálculo de probabilidades mediante la proyección del vector sobre ejes arbitrarios (que representan diferentes propiedades medibles).

La lección esencial para la prospectiva es que el futuro debe concebirse no como una trayectoria única, sino como un campo de posibilidades coexistentes, donde las decisiones estratégicas actúan como "mediciones" que colapsan dicho campo en un resultado actualizado; además, la arbitrariedad de los ejes enseña que los marcos analíticos no son neutrales y condicionan lo que se percibe, por lo que la práctica prospectiva debe mantener una actitud de exploración abierta y revisión permanente de sus propios fundamentos.

## 1. RESUMEN ACADÉMICO

El presente informe analiza el concepto de *espacio de Hilbert* como marco matemático fundamental de la mecánica cuántica, establecido por John von Neumann en 1927, y examina sus implicaciones para la disciplina de la prospectiva. El artículo de Charlie Wood para *Quanta Magazine* expone cómo von Neumann unificó las dos formulaciones aparentemente dispares de la mecánica cuántica —la mecánica matricial de Heisenberg (1925) y la mecánica ondulatoria de Schrödinger (1926)— mediante la axiomatización del espacio de Hilbert. Este espacio abstracto, definido como un "espacio de posibilidades", representa todos los futuros posibles de un objeto cuántico antes de su observación.

El núcleo del formalismo de von Neumann reside en cinco axiomas que describen: (1) la representación del estado cuántico como un vector en el espacio de Hilbert; (2) la evolución suave y determinista del vector en ausencia de observación; (3) la existencia de diferentes ejes que representan distintos conjuntos de propiedades medibles; (4) el cálculo de probabilidades mediante la proyección del vector sobre los ejes; y (5) el colapso abrupto y aleatorio del vector al momento de la medición.

Desde una perspectiva prospectiva, el espacio de Hilbert ofrece un modelo conceptualmente potente para pensar el futuro no como una trayectoria única y predeterminada, sino como un *espacio de posibilidades* donde coexisten múltiples futuros potenciales, cada uno con una probabilidad asociada. Este enfoque desafía los modelos predictivos lineales y deterministas, proponiendo en su lugar una comprensión del futuro como un campo de posibilidades que se actualizan mediante procesos de observación, decisión e intervención.

El artículo documenta además cómo el propio von Neumann llegó posteriormente a cuestionar la suficiencia del espacio de Hilbert, explorando las *álgebras de von Neumann* como marcos alternativos—una evolución que resuena con la necesidad prospectiva de desarrollar marcos flexibles y adaptativos para la anticipación de futuros múltiples.

## 2. HALLAZGOS MÁS RELEVANTES

### 2.1. La unificación de las dos mecánicas cuánticas

El hallazgo central del trabajo de von Neumann (1927) fue demostrar que la mecánica matricial de Heisenberg y la mecánica ondulatoria de Schrödinger eran dos representaciones matemáticas equivalentes de una misma realidad subyacente. Von Neumann mostró que ambas eran "reflejos de la misma entidad, del mismo modo que 0,5 y  $\frac{1}{2}$  representan el mismo punto en la recta numérica". Esta unificación, lograda mediante la axiomatización del espacio de Hilbert, estableció por primera vez una base matemática rigurosa para la mecánica cuántica.

## **2.2. El espacio de Hilbert como "espacio de posibilidades"**

El físico Lucien Hardy, del Instituto Perimeter de Física Teórica, describe el espacio de Hilbert como "un espacio mucho más abstracto" que el espacio físico ordinario, donde los vectores "apuntan realmente hacia una dirección en un espacio de posibilidades". Esta conceptualización es fundamental: el espacio de Hilbert no describe *dónde están* los objetos, sino *cómo podrían ser*.

## **2.3. La doble dinámica del estado cuántico**

Von Neumann estableció dos modos de evolución para el vector de estado en el espacio de Hilbert:

- Evolución unitaria (determinista): en ausencia de observación, el vector rota suavemente de manera predecible.
- Colapso (indeterminista): al realizar una medición, el vector salta instantáneamente y de forma aleatoria para alinearse con un eje específico.

Esta dualidad —entre un desarrollo continuo de posibilidades y una actualización discreta mediante observación— constituye un hallazgo de profunda resonancia para la prospectiva.

## **2.4. La arbitrariedad de los ejes**

Von Neumann demostró que los ejes del espacio de Hilbert son arbitrarios y no intrínsecos al espacio mismo. Esta libertad para dividir el espacio según diferentes conjuntos de propiedades posibles (posición, momento, energía, etc.) explica por qué Heisenberg y Schrödinger pudieron desarrollar versiones aparentemente distintas de

la misma teoría. La elección de los ejes corresponde a la elección del *observable* que se desea medir.

## **2.5. La crítica posterior de von Neumann al espacio de Hilbert**

En 1935, el propio von Neumann escribió: "Quisiera hacer una confesión que puede parecer inmoral: ya no creo en el espacio de Hilbert". Esta declaración, documentada en el artículo, refleja su exploración de las *álgebras de von Neumann* como marcos alternativos para abordar inconsistencias lógicas del espacio de Hilbert. Este hallazgo es particularmente relevante para la prospectiva, pues sugiere que incluso los marcos conceptuales más fundamentales están sujetos a revisión y evolución.

## **3. METODOLOGÍA**

### **3.1. Método de la fuente principal**

El artículo de *Quanta Magazine* se basa en una metodología de *periodismo científico* que combina:

- Revisión histórica: reconstrucción del contexto intelectual de la física cuántica en la década de 1920, incluyendo los trabajos de Heisenberg (1925), Schrödinger (1926), Dirac y la influencia de David Hilbert.
- Entrevistas con expertos: el artículo cita directamente a Lucien Hardy (Perimeter Institute), Leo Corry (historiador de las matemáticas), Miklós Rédei (filósofo de la física), Sean Carroll (Universidad Johns Hopkins) y Jonathan Sorce (Universidad de Princeton).
- Análisis de fuentes primarias: referencia a la trilogía de artículos de von Neumann de 1927, cuya traducción anotada ha sido publicada recientemente.

### **3.2. Estructura analítica del artículo**

El artículo organiza su exposición en torno a cinco preguntas clave:

1. *¿Qué es el espacio de Hilbert?* — Definición del concepto y su origen histórico.
2. *¿Qué ocurre en el espacio de Hilbert?* — Descripción de los dos modos de evolución del vector de estado.

3. *¿Qué propiedades definen el espacio de Hilbert?* — Explicación de los criterios de "completitud" y "producto interno".
4. *¿El espacio de Hilbert es real o solo una abstracción?* — Debate filosófico sobre la ontología del espacio de Hilbert.
5. *Los cinco mandamientos cuánticos de von Neumann* — Síntesis axiomática del formalismo.

### 3.3. Estrategia didáctica

El artículo emplea una potente estrategia pedagógica: el *semáforo cuántico* como analogía para explicar el espacio de Hilbert tridimensional, donde cada eje representa un posible color futuro (rojo, amarillo, verde) y el vector indica la probabilidad de cada resultado. Esta metodología de *abstracción mediante analogía* facilita la comprensión de conceptos matemáticamente complejos.

## 4. GLOSARIO

| Término            | Definición                                                                                                                                                                                                                                                        |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Espacio de Hilbert | Espacio matemático abstracto que contiene todos los posibles estados futuros de un sistema cuántico. Se caracteriza por ser "completo" (sin regiones ni puntos ausentes) y por permitir el cálculo del "producto interno" (proyección de un vector sobre un eje). |
| Vector de estado   | Flecha matemática que representa el estado cuántico de un objeto en el espacio de Hilbert. Su orientación codifica las probabilidades de los diferentes resultados posibles al realizar una medición.                                                             |

|                        |                                                                                                                                                                                                                                                |
|------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Superposición cuántica | Combinación de múltiples posibilidades futuras que caracteriza a un objeto cuántico antes de ser observado. Un objeto en superposición no posee propiedades definidas (como una posición específica), sino una mezcla de propiedades posibles. |
| Observable             | Propiedad de un sistema cuántico que puede ser medida (posición, momento, energía, etc.). Cada observable corresponde a un conjunto de ejes en el espacio de Hilbert.                                                                          |
| Producto interno       | Operación matemática que permite calcular la "sombra" que proyecta un vector sobre un eje, codificando así la probabilidad de que una posibilidad específica se materialice al realizar una medición.                                          |
| Completitud            | Propiedad de un espacio matemático que no carece de regiones ni puntos; condición necesaria para que un espacio sea considerado un espacio de Hilbert.                                                                                         |
| Qubit                  | Unidad básica de información cuántica, correspondiente a un sistema con dos estados posibles (análogo al bit clásico). Tiene un espacio de Hilbert bidimensional.                                                                              |
| Álgebra de von Neumann | Estructura matemática más abstracta que el espacio de Hilbert, desarrollada por von Neumann a partir de 1935 para abordar inconsistencias lógicas del espacio de Hilbert. Está formada por las operaciones que                                 |

---

se pueden realizar en un espacio de Hilbert.

---

Colapso de la función de onda

Salto instantáneo y aleatorio del vector de estado hacia un eje específico al momento de realizar una medición, eliminando la superposición cuántica.

---

## 5. COROLARIO DE APLICACIÓN PRÁCTICA PARA LA PROSPECTIVA

El espacio de Hilbert, como marco para pensar los futuros posibles, ofrece un conjunto de lecciones y herramientas conceptuales de gran valor para la disciplina prospectiva.

### 5.1. El futuro como espacio de posibilidades, no como trayectoria única

La primera lección del formalismo de von Neumann es que el futuro de un sistema no debe concebirse como una *línea* o *trayectoria* única, sino como un *espacio* de posibilidades. Así como el vector de estado cuántico coexiste en superposición con múltiples futuros posibles antes de ser observado, los sistemas sociales, tecnológicos y organizacionales pueden ser comprendidos como entidades que habitan un "espacio de posibilidades" donde múltiples futuros coexisten en estado de potencialidad.

Aplicación práctica: Los ejercicios de prospectiva deben abandonar el enfoque en la predicción de un *único futuro* y adoptar la construcción de *espacios de futuros posibles*. Métodos como la *matriz de escenarios* o el *análisis morfológico* pueden reinterpretarse como intentos de mapear regiones de este espacio de posibilidades.

### 5.2. La dualidad evolución-colapso: entre la anticipación y la decisión

La doble dinámica del espacio de Hilbert —evolución suave y determinista en ausencia de observación, colapso abrupto e indeterminista al observar— encuentra un paralelo directo en la práctica prospectiva:

- Fase de exploración (evolución): los prospectivistas exploran el espacio de posibilidades, identificando tendencias, señales débiles y fuerzas motrices que hacen rotar el "vector" de posibilidades.
- Fase de decisión (colapso): las decisiones estratégicas y políticas actúan como "mediciones" que colapsan el espacio de posibilidades en un futuro actualizado, eliminando otras alternativas.

Aplicación práctica: Los procesos de prospectiva deben diseñarse para mantener abierto el espacio de posibilidades durante el mayor tiempo posible, evitando "colapsos" prematuros. La toma de decisiones debe reconocerse como un acto que *reduce irreversiblemente* el espacio de futuros posibles, lo que otorga a la fase de exploración una importancia estratégica fundamental.

### **5.3. La arbitrariedad de los ejes: la elección del marco de observación**

Von Neumann demostró que los ejes del espacio de Hilbert son arbitrarios: podemos dividir el mismo espacio según diferentes conjuntos de propiedades (posición, momento, energía, etc.). En términos prospectivos, esto significa que *la forma en que observamos y categorizamos el futuro determina lo que vemos*.

Aplicación práctica: Los prospectivistas deben ser conscientes de que sus marcos analíticos (ejes) son construcciones arbitrarias que condicionan los futuros que pueden identificar. La elección de variables, indicadores y dimensiones de análisis no es neutral. La práctica prospectiva debe incluir una *reflexión epistemológica* sobre los propios marcos de observación, explorando múltiples formas de dividir el espacio de posibilidades.

### **5.4. La probabilidad como sombra proyectada**

El cuarto mandamiento de von Neumann establece que la "sombra" que proyecta el vector sobre un eje codifica la probabilidad de que esa posibilidad se materialice. Esta imagen sugiere que las probabilidades no son propiedades intrínsecas de los futuros posibles, sino *relaciones entre el estado actual del sistema y el marco de observación elegido*.

Aplicación práctica: Las probabilidades en prospectiva no deben tratarse como atributos fijos de los escenarios futuros, sino como expresiones de la *alineación* entre

el estado presente del sistema y las categorías que utilizamos para observarlo. Esto implica que las probabilidades son dinámicas y contextuales, no objetivas ni permanentes.

### **5.5. La crítica de von Neumann: los marcos son provisionales**

El hecho de que el propio von Neumann abandonara el espacio de Hilbert en favor de las álgebras que llevan su nombre ofrece una lección fundamental: *ningún marco conceptual es definitivo*. La prospectiva, como disciplina que trata con la incertidumbre y la apertura del futuro, debe mantener una actitud de permanente revisión de sus propios fundamentos.

Aplicación práctica: Los marcos prospectivos deben ser tratados como *hipótesis de trabajo* sujetas a revisión, no como verdades establecidas. La práctica prospectiva debe incluir mecanismos de *reflexión de segundo orden* que permitan cuestionar y reformular los propios supuestos metodológicos.

### **5.6. Síntesis: hacia una prospectiva del espacio de Hilbert**

La integración de estas lecciones sugiere un modelo de prospectiva inspirado en el espacio de Hilbert que:

1. Concibe el futuro como un espacio de posibilidades en lugar de una trayectoria única.
2. Reconoce la dualidad entre exploración abierta (evolución) y decisión (colapso).
3. Cuestiona la neutralidad de los marcos de observación y análisis.
4. Trata las probabilidades como relaciones contextuales, no como atributos fijos.
5. Mantiene una actitud de revisión permanente de sus propios fundamentos.

Este enfoque no pretende trasladar mecánicamente las matemáticas de la física cuántica a la prospectiva, sino inspirarse en sus principios epistemológicos para desarrollar una práctica más reflexiva, abierta y consciente de sus propias limitaciones.

## **REFERENCIAS**

- Wood, C. (2026, 26 de agosto). In Hilbert Space, All Things Are Quantumly Possible. *Quanta Magazine*.
- Duncan, A. (2024). Von Neumann's 1927 Trilogy on the Foundations of Quantum Mechanics. Annotated Translations. *arXiv:2406.02149*.
- Mitsch, C. (2022). Hilbert-style axiomatic completion: On von Neumann and hidden variables in quantum mechanics. *Studies in History and Philosophy of Science*.