

# **Aprendizaje y Comportamiento Adaptable: Principios y Modelos**

Arturo Bouzas

3 February 2026

# En esta página

<b>1</b>	<b>Notas de Aprendizaje y Comportamiento Adaptable</b>	<b>4</b>
	<b>Prefacio</b>	<b>5</b>
1.0.1	Prefacio . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Prefacio</b>	<b>6</b>
2.1	Principios y Modelos . . . . .	6
2.2	¿Para Quién es Este Libro? . . . . .	6
2.3	Filosofía del Libro . . . . .	6
2.3.1	Marco Conceptual Unificado . . . . .	6
2.3.2	Énfasis en Principios Generales . . . . .	7
2.3.3	Implementación Computacional . . . . .	7
2.3.4	Simuladores Interactivos . . . . .	7
2.4	Cómo Usar Este Libro . . . . .	7
2.4.1	Para Estudiantes . . . . .	7
2.4.2	Para Instructores . . . . .	7
2.5	Recursos Adicionales . . . . .	8
2.6	Licencia y Uso . . . . .	8
2.7	Agradecimientos . . . . .	8
2.8	Contacto . . . . .	8
2.9	Aviso: Libro en Desarrollo . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Introducción</b>	<b>10</b>
3.1	Un Problema de Diseño . . . . .	10
3.2	El Problema con la Enseñanza Tradicional . . . . .	11
3.3	Un Problema Adaptativo Fundamental . . . . .	11
3.4	Dos Componentes Esenciales . . . . .	12
3.5	Dos Orígenes de Soluciones . . . . .	12
3.6	Mecanismos Reutilizables: Las “Tuercas y Tornillos” . . . . .	13
3.7	El Enfoque de Este Libro . . . . .	13
3.7.1	Una Perspectiva Ingenieril . . . . .	13
3.8	Mapa del Curso . . . . .	14
3.8.1	Bloque 0: Fundamentos Conceptuales (Capítulos 0-3) . . . . .	14
3.8.2	Bloque I: Mecanismos Sin Integración de Historia (Capítulos 4-5) . . . . .	14

3.8.3	Bloque II: El Problema del Conocimiento - Asignación de Crédito (Capítulos 6-10) . . . . .	14
3.8.4	Bloque III: El Problema de la Acción - Elección y Optimización (Capítulos 11-15) . . . . .	14
3.8.5	Bloque IV: Aprendizaje Secuencial . . . . .	15
3.8.6	Bloque V: Incertidumbre y Estados Ocultos . . . . .	15
3.9	Cómo Usar Estas Notas . . . . .	15
3.9.1	Para el Estudiante: Estrategias de Lectura Activa . . . . .	15
3.9.2	Para el Instructor . . . . .	16
3.10	Un Argumento Final . . . . .	17

# **1 Notas de Aprendizaje y Comportamiento Adaptable**

# **Prefacio**

## **1.0.1 Prefacio**

## 2 Prefacio

### 2.1 Principios y Modelos

Este libro es una edición revisada y extendida del libro de notas [Aprendizaje y Comportamiento Adaptable](#). Su origen se encuentra en las presentaciones que desarrollé a lo largo de los años para los tres cursos de Aprendizaje y Comportamiento Adaptable que imparto en la Facultad de Psicología de la UNAM. El libro ofrece una introducción rigurosa pero accesible a los principios y modelos del aprendizaje y comportamiento adaptable. A diferencia de los textos que suelen organizarse como un catálogo histórico de protocolos experimentales (condicionamiento clásico, instrumental, etc.), este libro se estructura alrededor de problemas de adaptación. Aquí no solo preguntamos qué hacen los organismos, sino qué problemas están resolviendo y qué algoritmos han evolucionado para resolverlos.

### 2.2 ¿Para Quién es Este Libro?

1. **Estudiantes de licenciatura** en psicología, neurociencia o ciencia cognitiva que buscan ir más allá de la descripción verbal y desean una introducción a los modelos matemáticos del comportamiento adaptable. Se asume conocimiento básico de matemáticas a nivel bachillerato. Si necesitas refrescar estos temas, consulta los tutoriales en Bouzas Lab.
2. **Estudiantes de posgrado** que necesitan un puente conceptual para conectar psicología experimental con la neurociencia computacional y el aprendizaje de máquinas (machine learning).
3. **Profesionales en transición** de física, matemáticas, ingeniería o ciencias de la computación hacia neurociencia o ciencia cognitiva. El libro aprovecha principios cuantitativos que ya conoces para introducirte al estudio formal del comportamiento.

### 2.3 Filosofía del Libro

#### 2.3.1 Marco Conceptual Unificado

La introducción presenta el marco general que guía al libro. Aprenderás a distinguir entre nivel computacional (¿qué problema adaptativo se resuelve?), nivel algorítmico (¿qué procedimientos

generan el comportamiento?), y nivel de implementación (¿qué circuitos neuronales lo realizan?). Este marco evita confusiones comunes y te permite entender por qué diferentes tipos de modelos coexisten sin competir.

### **2.3.2 Énfasis en Principios Generales**

En lugar de memorizar el resultado de protocolos particulares, aprenderás algoritmos generales necesarios para la solución de diferentes problemas de adaptación.

### **2.3.3 Implementación Computacional**

Todos los modelos en este libro son implementables. No son solo ecuaciones abstractas: puedes programarlos, simularlos y experimentar con ellos.

### **2.3.4 Simuladores Interactivos**

Este libro incluye simuladores embebidos y enlaces a notebooks interactivos (Google Colab) donde puedes manipular parámetros y observar resultados inmediatos, implementar algoritmos desde cero, replicar experimentos clásicos y explorar extensiones creativas. Accede a todos los simuladores y tutoriales de matemáticas en [Lab 25](#).

## **2.4 Cómo Usar Este Libro**

### **2.4.1 Para Estudiantes**

Estas notas están diseñadas para lectura activa, no pasiva. Lee la Introducción completa antes de continuar con los capítulos, ya que establece el marco conceptual necesario. Cuando un capítulo menciona un simulador, explóralo antes de seguir leyendo. La Introducción contiene estrategias detalladas de lectura activa que maximizarán tu aprendizaje.

### **2.4.2 Para Instructores**

Este libro puede usarse como texto principal en un curso de dos semestres sobre aprendizaje y comportamiento adaptable, como complemento a un texto tradicional añadiendo la perspectiva formal y de optimización que esos textos omiten, o como recurso para temas específicos. Los simuladores permiten clases invertidas donde los estudiantes exploran antes de clase, y el tiempo presencial se dedica a discusión, resolución de problemas y profundización conceptual. La Introducción incluye sugerencias específicas para implementar este modelo pedagógico.

## 2.5 Recursos Adicionales

Todos los recursos (simuladores, código fuente, tutoriales) están disponibles en:

[Lab 25](#)

Para reportar errores o contribuir al proyecto, visita el repositorio GitHub.

## 2.6 Licencia y Uso

Este libro se distribuye bajo licencia Creative Commons BY-NC-SA 4.0. Esto significa que puedes compartir (copiar y redistribuir el material) y adaptar (remezclar, transformar y construir sobre el material) bajo las siguientes condiciones: debes dar crédito apropiado (Atribución), no puedes usar el material con fines comerciales (No Comercial), y si remezclas debes distribuir bajo la misma licencia (Compartir Igual).

## 2.7 Agradecimientos

La primera edición del libro mejoró significativamente gracias al excelente trabajo editorial de Rodrigo Álvarez. La estructura de esta página web fue adaptada del diseño original de Christian Badillo, quien siempre apoyó que este proyecto se concretara.

Mi agradecimiento a varias generaciones del Laboratorio 25 por desarrollar los simuladores interactivos que se encuentran en la página del Laboratorio.

Finalmente, extendiendo un agradecimiento especial a los cientos de estudiantes que en mis cursos han sufrido pacientemente mis intentos por enseñar los principios fundamentales del estudio del comportamiento adaptable.

La elaboración de esta página web fue financiada por los proyectos PAPIME PE309624 y PAPIME PE302221.

## 2.8 Contacto

**Arturo Bouzas**

Facultad de Psicología

Universidad Nacional Autónoma de México

[arbouria@unam.mx](mailto:arbouria@unam.mx)

[Lab 25](#)



## 2.9 Aviso: Libro en Desarrollo

Este es un proyecto vivo. El contenido se actualiza regularmente basándose en feedback de estudiantes e instructores, nuevos desarrollos en el campo, y mejoras en simuladores y código. Verifica el repositorio GitHub para la versión más reciente.

**Versión actual:** v1.0 (Enero 2026)

---

¿Listo para comenzar? Pasa a la **Introducción al Curso**

## 3 Introducción

“Lo que no puedo crear, no lo entiendo.” — Richard Feynman

### 3.1 Un Problema de Diseño

Cada mañana, antes de comenzar su día, Wall-E hace lo mismo: conecta su panel solar y recarga su batería. Este ritual aparentemente simple revela algo profundo. Wall-E enfrenta el problema fundamental que comparten todos los agentes adaptativos, desde bacterias hasta algoritmos de inteligencia artificial: cómo distribuir el comportamiento en el tiempo y en el espacio para maximizar la obtención de recursos necesarios para sobrevivir, funcionar o cumplir sus objetivos.

Imagina que te encargan diseñar un robot explorador similar a Wall-E para un planeta desconocido. La tarea del robot es localizar recursos dispersos en un terreno accidentado, evitar peligros y encontrar fuentes de energía que le permitan recargar y gestionar su limitada reserva energética. Para ello, cuentas con sensores imperfectos (cámaras con ruido, detectores químicos de sensibilidad limitada), un procesador con capacidad finita, y restricciones severas de tiempo y energía. ¿Qué capacidades mínimas debe tener este robot para sobrevivir?

Necesitará, al menos:

**Sensores** que transformen energía física en señales procesables, distinguiendo información útil del ruido ambiental. Wall-E usa sus cámaras para distinguir objetos compactables de obstáculos peligrosos.

**Navegación** que le permita moverse hacia concentraciones de recursos detectadas a distancia. Cuando Wall-E detecta un objeto de interés, no se mueve aleatoriamente sino que se dirige directamente hacia él.

**Aprendizaje predictivo** que le permita anticipar dónde aparecerán recursos basándose en señales previas. Si cierta formación rocosa predice agua cercana, o si cierto tipo de escombros suele contener objetos valiosos, el robot debe aprender estas regularidades. Wall-E aprende que ciertos contenedores suelen tener objetos brillantes que le interesan.

**Sistemas de elección** que le permitan decidir racionalmente entre opciones cuando los recursos son múltiples y los comportamientos compiten entre sí. Wall-E debe decidir constantemente:

¿sigo compactando basura o busco un lugar seguro antes del anochecer? ¿Persigo ese objeto brillante interesante o regreso a cargar energía?

Este es exactamente el problema que enfrentan todos los organismos vivos. Una rata buscando alimento, una bacteria navegando gradientes químicos, un estudiante decidiendo cuánto tiempo dedicar a cada materia, un algoritmo de ajedrez evaluando jugadas—todos enfrentan variantes del mismo desafío fundamental: cómo distribuir su comportamiento en el tiempo y en el espacio para maximizar la obtención de recursos necesarios para sobrevivir, reproducirse o cumplir sus objetivos.

Este curso estudia las soluciones biológicas y computacionales a este problema. Pero antes de construir ese robot (o de entender cómo funcionan los organismos) debemos confrontar un problema pedagógico previo.

## **3.2 El Problema con la Enseñanza Tradicional**

La estrategia pedagógica tradicional para enseñar aprendizaje y comportamiento adaptable, reflejada en la organización típica de los libros de texto, presenta casi exclusivamente las principales regularidades empíricas derivadas de más de 100 años de investigación, organizadas alrededor de protocolos experimentales específicos: condicionamiento clásico (Pavlov), condicionamiento operante (Skinner), programas de refuerzo, y quizás, si tuvo suerte, una clase sobre el modelo de Rescorla-Wagner y el principio de igualación de Herrnstein. Si bien este enfoque tiene valor histórico y permite apreciar la riqueza empírica del campo, puede dejar frecuentemente al estudiante con la impresión de que este es un área de conocimiento estática, fragmentada y predominantemente de interés histórico, llena de hallazgos aislados y con escasa coherencia conceptual.

Los estudiantes terminan ese curso sin una visión coherente de los principios que unifican estos fenómenos, ni una comprensión de por qué este campo sigue siendo relevante en el siglo XXI. Los hallazgos aparecen desconectados entre sí y, peor aún, desconectados de desarrollos contemporáneos en neurociencias, inteligencia artificial, economía conductual y teoría de la decisión.

Este curso adopta una estrategia diferente.

## **3.3 Un Problema Adaptativo Fundamental**

En el centro de este curso está el problema biológico fundamental que mencionamos al inicio: cómo distribuir el comportamiento en el tiempo y en el espacio para maximizar la obtención de recursos necesarios para sobrevivir y reproducirse. Los agentes biológicos y no biológicos deben aprender qué aspectos de su entorno predicen recompensas y castigos, y deben usar ese conocimiento para elegir cursos de acción que maximicen su éxito.

### 3.4 Dos Componentes Esenciales

El estudio del comportamiento adaptable busca los principios que permiten resolver este problema. Podemos descomponerlo en dos componentes fundamentales:

**1. El Problema del Conocimiento:** ¿Cómo detectar y aprender las propiedades estadísticas de la distribución de recursos relevantes desde el punto de vista biológico y psicológico? Es decir, ¿cómo aprender a predecir aquello fundamental para la supervivencia y reproducción? Este es el problema de la asignación de crédito: cuando un recurso aparece (o un peligro se presenta), ¿a cuál de los múltiples eventos, señales o acciones previas debe asignarse la responsabilidad? ¿Qué predice qué?

**2. El Problema de la Acción:** ¿Cómo usar eficientemente ese conocimiento para distribuir óptimamente el comportamiento en el tiempo y en el espacio? Dado que sabemos algo sobre dónde y cuándo aparecen los recursos, ¿cómo decidimos qué hacer? Este es el problema de la elección bajo restricciones: el tiempo es finito, los comportamientos compiten entre sí, y las decisiones tienen costos de oportunidad.

Estas dos preguntas (¿qué predice qué? y ¿qué hago ahora?) organizan todo el curso.

### 3.5 Dos Orígenes de Soluciones

Las soluciones a estos problemas adaptativos tienen dos orígenes temporales diferentes:

**1. Soluciones Filogenéticas (Selección Natural):** En entornos relativamente constantes a lo largo de generaciones, la selección natural puede codificar directamente en el genoma las respuestas apropiadas. El resultado es lo que llamamos comportamiento adaptado: reflejos, instintos, sesgos perceptuales y atencionales que no requieren aprendizaje individual. Un ejemplo es la impronta en aves: los patitos siguen al primer objeto en movimiento que ven después de nacer, típicamente su madre.

**2. Soluciones Ontogenéticas (Aprendizaje):** En entornos variables, volátiles e inciertos (la norma para la mayoría de los organismos), la selección natural no puede anticipar todas las contingencias. En estos casos, evoluciona algo diferente: mecanismos que permiten comportamiento adaptable, la capacidad de ajustar el comportamiento a la estructura estadística de los sucesos biológicamente importantes, dentro de la vida del organismo. A esto le llamamos aprendizaje.

## 3.6 Mecanismos Reutilizables: Las “Tuercas y Tornillos”

A lo largo del curso identificaremos un conjunto pequeño de mecanismos generales (verdaderas “tuercas y tornillos” en el cajón de herramientas de la adaptación) que aparecen una y otra vez en diferentes contextos. A estos mecanismos los llamaremos algoritmos:

**Algoritmos de comparación** (sucesiva vs. simultánea): Detectar diferencias entre estados del mundo.

**Algoritmos de reducción de error:** Ajustar predicciones cuando difieren de resultados observados.

**Algoritmos para la exploración vs. explotación:** El dilema entre muestrear nuevas opciones y aprovechar lo conocido.

**Algoritmos de sistemas de retroalimentación:** Sistemas cerrados donde la acción modifica las condiciones que la provocan.

**Algoritmos para la optimización bajo restricciones:** Encontrar la mejor distribución posible de comportamiento dadas las limitaciones del entorno.

Estos mecanismos y algoritmos son implementados tanto en agentes no biológicos (robots), como en agentes biológicos (sean unicelulares o humanos), y pueden estudiarse tanto a nivel conductual como neuronal.

## 3.7 El Enfoque de Este Libro

### 3.7.1 Una Perspectiva Ingenieril

Este curso adopta lo que podríamos llamar una perspectiva ingenieril: tratamos el comportamiento como una solución a problemas adaptativos específicos. Para cada fenómeno, preguntaremos no solo “¿qué hacen los organismos?” sino también:

¿Qué problema adaptativo están resolviendo? (¿Por qué esto es importante para sobrevivir y reproducirse?)

¿Qué debería hacer un agente ideal? (¿Cuál es la solución óptima dado el problema y las restricciones?)

¿Cómo lo logran? (¿Qué algoritmos o mecanismos implementan esa solución o se aproximan a ella?)

## 3.8 Mapa del Curso

El libro está organizado en bloques temáticos que siguen la lógica del problema adaptativo que planteamos al inicio. Cada bloque añade una capacidad funcional a nuestro “agente adaptativo”, construyendo progresivamente desde mecanismos simples hasta sistemas complejos de toma de decisiones:

### 3.8.1 Bloque 0: Fundamentos Conceptuales (Capítulos 0-3)

Establecemos el marco teórico general: niveles de explicación, el problema de la adaptabilidad, y la teoría de la selección natural como primera solución. Aquí definimos qué significa “adaptarse” y por qué necesitamos modelos mecanicistas en lugar de solo descripciones empíricas.

### 3.8.2 Bloque I: Mecanismos Sin Integración de Historia (Capítulos 4-5)

Estudiamos dos mecanismos fundamentales que permiten adaptación en tiempo real sin requerir integración de experiencias pasadas: ascenso de colina (comparación sucesiva) y sistemas de retroalimentación (comparación simultánea). Estos son las “tuercas y tornillos” más básicas. Nuestro agente aprende a navegar y a mantener condiciones internas estables, pero vive completamente en el “ahora”.

### 3.8.3 Bloque II: El Problema del Conocimiento - Asignación de Crédito (Capítulos 6-10)

Abordamos el problema central: cuando un reforzador aparece, ¿a qué se le asigna el crédito? Primero revisamos modelos clásicos de aprendizaje asociativo (Rescorla-Wagner) y sus extensiones contemporáneas, incluyendo modelos basados en teoría de la información y filtros bayesianos. Nuestro agente deja de ser puramente reactivo y aprende a predecir el futuro.

### 3.8.4 Bloque III: El Problema de la Acción - Elección y Optimización (Capítulos 11-15)

Dado que hemos aprendido qué predice qué, ¿cómo distribuimos nuestro comportamiento? Estudiamos la ley del efecto, programas de refuerzo, la ley de igualación, y culminamos con modelos de optimización en equilibrio que integran economía conductual. Nuestro agente ahora conecta su conocimiento con la acción y aprende a elegir racionalmente.

### 3.8.5 Bloque IV: Aprendizaje Secuencial

Extendemos el análisis a secuencias de acciones donde el reforzador aparece al final (problema de asignación de crédito temporal). Introducimos algoritmos de aprendizaje por refuerzo: diferencias temporales, Q-learning, Actor-Crítico. Nuestro agente aprende a planificar secuencias de acciones hacia metas distantes.

### 3.8.6 Bloque V: Incertidumbre y Estados Ocultos

Finalmente, relajamos el supuesto de que el agente siempre sabe en qué estado del mundo se encuentra. Estudiamos entornos volátiles y modelos bayesianos avanzados. Nuestro agente aprende a razonar bajo incertidumbre profunda sobre el estado del mundo.

## 3.9 Cómo Usar Estas Notas

### 3.9.1 Para el Estudiante: Estrategias de Lectura Activa

Estas notas están diseñadas para construcción progresiva de comprensión. No son para lectura lineal pasiva. Aquí las estrategias que maximizarán tu aprendizaje:

**Antes de cada capítulo:** Lee el título y el primer párrafo. Formula una pregunta concreta que esperas que el capítulo responda. Por ejemplo, antes del capítulo sobre Rescorla-Wagner, pregúntate: “¿Cómo aprende un organismo qué señales predicen recompensas y cuáles son irrelevantes?” Esta pregunta explícita activará tu atención selectiva durante la lectura.

**Durante la lectura:** Lee con lápiz y papel a la mano. Cuando aparece una ecuación, desarróllala. Verifica las derivaciones. Sustituye números concretos y calcula resultados. Por ejemplo, si el texto presenta la ecuación de Rescorla-Wagner, calcula manualmente los primeros cinco ensayos de un protocolo de condicionamiento antes de ver el resultado en el simulador. Esta aparente “pérdida de tiempo” es en realidad la forma más eficiente de aprendizaje profundo. La mayoría de las confusiones matemáticas se disuelven cuando calculas casos específicos con números reales.

**Usa los simuladores inmediatamente y sin restricciones.** Cuando un capítulo menciona un simulador, ve a explorarlo antes de seguir leyendo. No esperes a “terminar de leer” para experimentar. La secuencia óptima es: lee la presentación del problema adaptativo, explora el simulador libremente durante 10-15 minutos, regresa al texto para la formalización matemática, vuelve al simulador para validar tu comprensión con casos extremos.

En el simulador, prueba valores extremos intencionalmente. Si hay un parámetro  $\alpha$  (tasa de aprendizaje), no solo uses  $\alpha=0.3$ . Prueba  $\alpha=0.01$  (aprendizaje extremadamente lento),  $\alpha=0.99$  (aprendizaje casi instantáneo),  $\alpha=1.0$  (caso límite). Rompe el modelo intencionalmente para

entender sus límites. ¿Qué pasa si todos los parámetros son cero? ¿Y si todos son máximos? Solo después de romperlo y ver qué falla, regresa al texto para consolidar por qué esas condiciones son problemáticas.

**Sé paciente con las matemáticas.** Algunas ecuaciones parecerán opacas al inicio. Esta incomodidad es normal y esperada. Regresa a ellas después de explorar el simulador. La intuición precede a la formalización. Si una ecuación no tiene sentido la primera vez, marca la página y continúa. Frecuentemente, un ejemplo posterior o un simulador específico iluminará retrospectivamente lo que parecía oscuro. Si después de ver el simulador y regresar al texto una ecuación sigue siendo opaca, ese es el momento de pedir ayuda, no antes.

**Conecta con tus experiencias.** Cada mecanismo que estudiamos opera también en tu comportamiento cotidiano. Esta no es una sugerencia decorativa sino una estrategia pedagógica fundamental. Cuando leas sobre descuento temporal, dedica cinco minutos a analizar tu última procrastinación: ¿qué valor inmediato preferiste sobre qué beneficio futuro? Cuando estudies ascenso de colina, observa durante tu próxima ducha cómo buscas el punto óptimo al ajustar la temperatura del agua: ¿haces cambios grandes o pequeños? ¿Cómo decides cuándo has encontrado el óptimo? Estas conexiones personales anclan la teoría abstracta en la experiencia vivida, transformándola de “contenido para memorizar” a “herramienta para comprender tu propio comportamiento”.

**Organiza revisiones activas periódicas.** Después de completar tres capítulos, antes de continuar, dedica una sesión a responder: ¿Qué problema adaptativo resuelve cada mecanismo? ¿Qué tienen en común los tres algoritmos? ¿En qué se diferencian? Si tuvieras que diseñar un robot con esas capacidades, ¿en qué orden las implementarías y por qué? Esta metacognición consolida el aprendizaje más efectivamente que releer pasivamente.

### 3.9.2 Para el Instructor

Estas notas permiten múltiples configuraciones pedagógicas. La más efectiva en nuestra experiencia es el modelo de clase invertida. Asigna la lectura de un capítulo más la exploración libre del simulador correspondiente como tarea previa a clase. Usa el tiempo presencial para tres actividades específicas:

**Primera parte (20 minutos):** Resolución de dudas sobre la formalización matemática. No expliques las ecuaciones desde cero; más bien, identifica las confusiones específicas que surgieron durante la lectura. Frecuentemente, las dudas reflejan intuiciones correctas formuladas imprecisamente. Tu trabajo es ayudar a los estudiantes a articular lo que ya entendieron implícitamente a través del simulador.

**Segunda parte (30 minutos):** Discusión de las implicaciones teóricas de lo observado en el simulador. Plantea preguntas como: “Cuando aumentaron  $\alpha$  a 0.9, ¿qué pasó con la estabilidad del aprendizaje? ¿Por qué? ¿En qué situaciones ecológicas sería adaptativo tener



alto vs. bajo?” Estas preguntas fuerzan conexión entre el fenómeno observable y los principios subyacentes.

**Tercera parte (20 minutos):** Conexión del mecanismo con fenómenos reales en neurociencias o aplicaciones. Por ejemplo, después del capítulo sobre aprendizaje por diferencias temporales, discute cómo las neuronas dopaminérgicas implementan exactamente ese algoritmo. O después del capítulo sobre programas de refuerzo, analiza cómo los juegos de azar explotan esos principios.

Los simuladores y notebooks de Google Colab permiten extender el análisis más allá del libro. Asigna proyectos donde los estudiantes modifiquen el código para responder preguntas originales. Por ejemplo: “El modelo de Rescorla-Wagner asume que  $\alpha$  es constante. Modifica el código para que  $\alpha$  disminuya con la experiencia. ¿Cómo cambia el comportamiento? ¿Esto es más o menos adaptativo?”

Cada bloque temático es relativamente autocontenido, aunque se beneficia de la lectura secuencial. Si usas este libro como complemento a un texto tradicional organizado por protocolos, puedes asignar capítulos específicos como lecturas paralelas que proporcionan la formalización matemática que el texto principal omite.

### 3.10 Un Argumento Final

Muchos colegas me han dicho que es imposible enseñar estos temas (aprendizaje por refuerzo, modelos bayesianos, teoría de la información) a nivel introductorio. Que los estudiantes de licenciatura no tienen las herramientas matemáticas. Que es mejor mantener el enfoque tradicional, descriptivo, organizado por protocolos, que tiene el mérito probado de décadas de uso efectivo.

Entiendo esta perspectiva y reconozco el valor del enfoque clásico. La organización por protocolos experimentales tiene ventajas pedagógicas reales: permite apreciar la riqueza empírica del campo y conecta directamente con la literatura histórica. Sin embargo, creo que podemos y debemos complementar ese enfoque con algo adicional.

Los estudiantes de hoy crecieron con algoritmos de recomendación, navegación GPS y juegos con IA. Tienen una intuición operativa sobre aprendizaje de máquinas que generaciones previas no tenían. Esta familiaridad informal representa una oportunidad pedagógica única: lo que necesitamos es tender puentes entre esa intuición y los principios formales que el campo ha descubierto.

Los simuladores interactivos, los ejemplos concretos y la conexión explícita con aplicaciones contemporáneas construyen esos puentes. Las matemáticas no necesitan ser una barrera; pueden ser una revelación. Cuando un estudiante manipula los parámetros del modelo de Rescorla-Wagner y observa cómo emerge el bloqueo, la ecuación deja de ser un símbolo opaco y se convierte en una descripción precisa de un proceso observable. Cuando experimenta con

diferentes programas de refuerzo en el simulador y luego ve cómo la ley de igualación predice cuantitativamente la distribución de respuestas, las matemáticas se revelan como el lenguaje natural para expresar regularidades empíricas.

Además, el comportamiento adaptable no es solo historia: es un campo activo con aplicaciones en robótica, neurociencias computacionales, economía conductual y políticas públicas. Los mismos principios que explicamos aquí operan en algoritmos que determinan qué videos te recomienda YouTube, en modelos de neurociencias que estudian adicción, en políticas de salud pública que buscan modificar comportamientos de riesgo. Complementar el conocimiento de los fenómenos clásicos con comprensión de los principios formales permite a los estudiantes participar en estos desarrollos contemporáneos.

Estas notas son un experimento pedagógico. No buscan reemplazar los textos tradicionales sino complementarlos, ofreciendo una perspectiva adicional. Son un recurso abierto, en evolución, diseñado para estudiantes interesados en conectar el estudio clásico del aprendizaje con desarrollos contemporáneos en ciencia cognitiva, neurociencia computacional e inteligencia artificial.

Si funcionan para ti (como estudiante o instructor) compártelas. Si encuentras errores, omisiones o secciones poco claras, comunícamelo. Este es un proyecto colaborativo en el mejor espíritu de la ciencia abierta.