

Notas de Aprendizaje y Comportamiento Adaptable

Arturo Bouzas

2025-03-15

Table of contents

1 Notas de Aprendizaje y Comportamiento Adaptable

Prefacio

Este es un libro de notas para los cursos de “Aprendizaje y Comportamiento Adaptable”, que se imparten en la facultad de Psicología de la Universidad Nacional Autónoma de México

El proyecto de esta página web fue financiado por el proyecto PAPIME PE302221

Arturo Bouzas.

2 Introducción

La forma en que se organizan y presentan..

3 Principios de la Selección Natural

“Nothing in Biology (Psychology) Makes Sense Except in the Light of Evolution”. Dobzhansky.

Como vimos en una nota anterior, la influencia de Darwin y el pensamiento seleccionista sobre la Psicología fue enorme. Hoy en día, para entender el comportamiento adaptado y adaptable, resulta indispensable conocer los principios más generales de la teoría de la selección natural. El propósito de esta nota es presentar estos principios. Para un tratamiento extenso del tema, revise las recomendaciones al final de la nota.

Para cualquier observador del mundo natural, dos propiedades le parecerán sorprendentes y merecedoras de contar con una explicación. La primera de ellas es la enorme variabilidad en morfología, fisiología y comportamiento de los organismos que habitan este planeta. La segunda, es que esta variabilidad parece estar finamente ajustada (adaptada) a las características del entorno que habitan los organismos.

3.0.0.1 1. Variabilidad

Un repaso de nuestra experiencia cotidiana, visitas a zoológicos y videos de historia natural en YouTube, nos alerta a la enorme variedad de organismos que pueblan nuestro planeta: desde organismos unicelulares, hongos, medusas, plantas de múltiples tamaños, insectos, peces, aves, mamíferos y desde luego humanos. La variabilidad no es solo a nivel de la morfología, se da también en los mecanismos fisiológicos y en el comportamiento de los seres vivos. Hay organismos que se desplazan, otros que no; organismos que se alimentan de un solo producto y otros que comen de todo; organismos que regulan su temperatura, otros que no; organismos que se reproducen sexualmente, otros que no; organismos que tienen una sola cría, otros que depositan cientos de huevos. Aún entre una clase, como la de los perros, existen subtipos de todo tamaño, conformación, nivel de actividad, niveles de apego y agresividad.

Actualmente se estiman entre 10 millones a un billón de especies. Solo entre mamíferos existen aproximadamente 5,500 especies, de insectos 91,000 y no deja de sorprender las 250,000 especies de escarabajos (buen tino de los “Beatles”). Solo en el intestino humano hay 140,000 especies virales, y se estiman entre un

millón a 1 billón de especies de bacterias en nuestro planeta. Bacterias y virus representan la mayoría de los organismos biológicos.

La variabilidad observada cambia tanto a lo largo del espacio como a lo largo del tiempo. La variabilidad que registramos varía en sí misma dependiendo del lugar del planeta donde se lleve a cabo la observación. Lo que observamos en el desierto de Sonora es muy diferente a lo que observamos en la selva chiapaneca. Fue esta variabilidad lo primero que impactó a Darwin en su recorrido en el Beagle.

A mediados del siglo XIX, también se sabía que la variabilidad cambiaba a lo largo del tiempo. No solo había especies que ya habían desaparecido, sino, y esto era lo importante, ahora se sabía que también habían existido especies de las cuales no se tenían registros pero que habitaron la Tierra en etapas geológicas más tempranas. Era claro que el mundo biológico no había sido “creado” a un mismo tiempo y que podía hablarse de la evolución de los organismos. Gracias a los avances en la datación de capas geológicas, el análisis de fósiles nos permite determinar con mayor precisión la fecha de aparición de las diferentes especies. Estos datos confirman las predicciones de la teoría de Darwin sobre la evolución gradual y la ascendencia común.

Ante el panorama descrito, surgen un número de preguntas, ¿por qué no todos los organismos son iguales?, ¿cuál es el origen de esa gran variabilidad?, ¿cómo dar cuenta de ella y de su distribución en el espacio y en el tiempo? Fueron estas preguntas las que dieron origen a la noción de la evolución.

3.0.0.2 2. Adaptación

Una segunda observación que requiere explicación, es el sorprendente ajuste (adaptación) de las características morfológicas, fisiológicas y de comportamiento, a las características del entorno donde se desenvuelve un organismo. No tan solo existe una inmensa variabilidad, sino que esta está correlacionada con las propiedades de entornos que varían espacial y temporalmente. El ejemplo clásico de una adaptación morfológica lo observó Darwin al visitar los archipiélagos de las islas Galápagos y de Hawaii. Él encontró que la forma del pico de pequeños pájaros genéticamente relacionados, se ajustaba al tipo de alimento en la isla que habitaban. Cómo puede verse en la siguiente figura, el pico podía ser largo y delgado, apropiado para acceder al néctar dentro de una flor, o corto y fuerte para poder romper y comer semillas.

3.0.1 3. Principios de la Selección Natural

Tres principios se encuentran atrás de la propuesta de Darwin para dar cuenta de la variabilidad y la adaptación de los rasgos de los individuos, en particular

de los cambios en la frecuencia relativa de los rasgos en una población : 1. Variabilidad Existe variabilidad en rasgos morfológicos, fisiológicos o conductuales entre miembros de una especie. 2. La variabilidad es heredable 3. Hay una covarianza entre los diferentes rasgos y el número de descendientes dejados por los individuos, la covarianza es parcialmente atribuible al papel causal de los rasgos. Si se satisfacen los tres principios que acabamos de describir, de generación a generación, el rasgo con mayor éxito reproductivo incrementará en frecuencia en la población.

3.0.2 4. Determinantes del éxito reproductivo

3.0.2.1 1. Filtros

Dada cierta variabilidad en un rasgo, la distribución estadística de las características del entorno es la que determina el éxito reproductivo diferencial de dicho rasgo. Una analogía útil para entender el proceso de selección natural es considerar a los entornos como filtros sobre la variabilidad en los rasgos. Son estos filtros los que cambian la frecuencia relativa de un rasgo en una población y determinan su éxito reproductivo diferencial.

Un ejemplo muy sencillo de selección es el juego infantil de inserción de cuerpos geométricos. La cubierta de la caja tiene un conjunto de orificios de diferentes formas: cuadrados, círculos y triángulos. La tarea para el infante es insertar en estos orificios a objetos con forma de cilindros, cubos o pirámides. Para hacer uso de esta analogía de la selección natural, imagine ahora una cubierta enorme de este tipo, con una distribución de orificios de las tres formas, y por otro lado, un saco con una población de los tres objetos con diferentes frecuencias relativas. Esa distribución de objetos sería el equivalente a la “generación número 1” dentro del esquema de la selección natural. Vaciamos el contenido del saco sobre la cubierta y observamos la distribución de objetos que quedaron después de pasar por el filtro de la misma. El número de objetos que sí se ajustaron a un lugar dentro de la cubierta es la distribución de objetos en la segunda generación. Esa distribución depende de dos factores: la distribución original -es decir, el número original de cubos, cilindros y pirámides- y de la distribución de los tres tipos de orificios en la cubierta. Si la cubierta solo tuviese cuadrados y círculos, en la segunda generación solo observaremos cilindros y cubos. Note que no se selecciona el mejor, solo se eliminan los que no pasan a través de los filtros. Un problema con el ejemplo anterior es que no contempla la creación de nuevos objetos. La selección natural necesita de un proceso que, de generación a generación, produzca nueva variabilidad.

3.0.2.2 2. Determinantes de la variabilidad

La variabilidad puede cambiar intrínsecamente, de generación en generación o puede cambiar por un factor externo que ocurre en una oportunidad. Dos factores están detrás del origen de la variabilidad de generación a generación. El primero son las *mutaciones genéticas aleatorias*, el segundo es la *reproducción sexual*. El primero, las mutaciones genéticas aleatorias, produce modificaciones que pueden tener tres consecuencias: o bien ser letales para el individuo (haciendo que este no pase por ningún filtro evolutivo adicional); o inducir un mayor éxito reproductivo que los demás rasgos heredados (contribuyendo a que el individuo atraviese un nuevo filtro) o bien pueden ser neutrales y no tener ningún efecto sobre el éxito reproductivo. En este último caso, el gen mutado se desliza a lo largo de generaciones y cambia la frecuencia relativa de los diferentes genes: a este proceso se le conoce como *deriva genética* (vea el artículo de xxx para una descripción más detallada). La reproducción sexual es la segunda gran fuerza de variabilidad. La mitad de la conformación genética de cada descendiente proviene del macho y la otra mitad de la hembra; adicionalmente, cada una de las mitades proviene de un muestreo aleatorio de los genes del macho y de la hembra.

La otra fuente de variabilidad es la que se genera cuando un accidente geológico aísla a una población o la divide en subpoblaciones que no pueden interactuar. Es el caso de una erupción volcánica, una separación geológica que forma una isla o algo creado por el humano, como una barda en medio del desierto. El *aislamiento geográfico* produce que un mismo acervo genético separado por una barrera geográfica pueda resultar, mediante la recombinación aleatoria, en dos poblaciones con rasgos diferentes. Dicho proceso inclusive puede derivar eventualmente en la generación de dos especies diferentes que ya no pueden reproducirse entre sí.

3.0.2.3 En resumen,

1. En la teoría de la selección natural los cambios en el éxito reproductivo diferencial se deben a las propiedades (filtros, restricciones) en el entorno de los organismos.
2. La variabilidad aleatoria de los rasgos junto con los cambios en el entorno son el motor de la evolución y de la adaptación de los rasgos de un organismo.
3. Como resultado de la operación de los tres principios de la selección natural, se observa un incremento gradual en el éxito reproductivo de ciertos rasgos en la población. Este incremento puede describirse como un proceso de

ascenso de colina, que resulta en el ajuste de los rasgos a las propiedades estadísticas del entorno.

4. Reservamos el término de *adaptación* a los rasgos resultado del proceso de selección natural. Es importante distinguir entre rasgos que son benéficos para un organismo en el presente de aquellos rasgos cuya existencia es el resultado de un proceso de selección natural.
5. Para entender la evolución de un rasgo, es necesario especificar en detalle los filtros, caracterizados como propiedades estadísticas del entorno. Entre los filtros más generales encontramos:
 - a. Limitaciones en recursos
 - b. Competencia con organismos de la misma especie y de otras especies
 - c. Selección sexual
 - d. Selección dependiente de la frecuencia del rasgo
6. Una característica importante del proceso de selección natural es que con frecuencia actúa en entornos que son modificados por el mismo éxito reproductivo de una población. Adaptaciones a un nicho generan un nuevo nicho con un conjunto de nuevos filtros.
7. La teoría de la selección natural debe acompañarse de la especificación de las restricciones, genéticas y físicas, que limitan el tamaño del espacio de los posibles rasgos que son candidatos viables para un proceso de selección. Por ejemplo, físicamente hay una relación posible entre el peso de un animal y el diámetro de sus patas. Es decir, ciertos tamaños de patas en algunas especies no son rasgos viables para ser seleccionados por selección natural debido a las restricciones físicas propias de la anatomía del organismo. En ese sentido, la selección natural no produce la solución perfecta a un problema, sino que resulta en la mejor de las posibles soluciones dado un conjunto de restricciones.
8. Encontramos dos tipos de explicaciones evolutivas:
 - a. Explicaciones Causales: tras la observación de un rasgo y de su posible función, estas explicaciones buscan encontrar los cambios en los entornos, las posibles restricciones y la historia de esos rasgos que pueden dar cuenta de su aparición en una población.
 - b. Explicaciones de optimización: estas explicaciones están ancladas en las herramientas de la teoría matemática de la optimización y consisten en elaborar modelos del entorno (preferentemente matemáticos) como un problema y derivar su solución óptima dado un conjunto de restricciones. El éxito de estas explicaciones se sustenta en la calidad del modelo de las propiedades estadísticas del entorno que funcionan como filtros y que constituyen el problema a resolver, así como de la

identificación completa de las posibles restricciones de las cuales se derivan las soluciones.

9. Sin embargo, no todos los rasgos observados son el resultado de un proceso de selección natural, hay otros factores que se combinan con el proceso de selección para poder entender la evolución de un rasgo. Estos factores están principalmente asociados con los procesos que resultan en la generación de variabilidad aleatoria.

4 Evolución de la Adaptabilidad del Comportamiento: El papel de las restricciones

Si el término “adaptación” se utiliza para designar aquellos rasgos que son resultado del proceso de selección natural, el concepto de “adaptabilidad” del comportamiento se define como la medida en que un comportamiento contribuye al éxito reproductivo en el presente. El primer término hace referencia al origen de un comportamiento, mientras que el segundo hace referencia a la función que cumple un comportamiento actualmente. En particular, la adaptabilidad de un comportamiento se modifica naturalmente en función de cómo este aporta a dos características clave de la vida de los organismos: el metabolismo y la reproducción (Godfrey-Smith, 2017). En cuanto al metabolismo, los sistemas biológicos gastan y agotan la energía almacenada y requieren de un constante abastecimiento de ella. Los procesos evolutivos van moldeando distintas formas exitosas de reabastecimiento a través del éxito reproductivo diferencial del organismo.

El reabastecimiento de energía a través de la acción del organismo está limitado por dos grupos de restricciones, uno del organismo y otro del entorno. La primera condición limitante es que el comportamiento toma un tiempo para llevarse a cabo. Dado que el tiempo disponible es finito, la suma de todos los comportamientos llevados a cabo es igual al total del tiempo disponible.

$$T = t_1 + t_2 + t_3 + \dots + t_n \quad (1)$$

Esta es una *restricción lineal* bajo la cual los diferentes comportamientos *compiten* por el tiempo disponible. Este planteamiento asume que no existe tal cosa como una “ausencia de comportamiento”, por lo que en toda unidad de tiempo se está generando un tipo de conducta que consume una duración particular de tiempo (aunque este comportamiento sea “reposar” o que el organismo permanezca estático). Bajo este esquema, el incremento de una unidad de tiempo asignado a uno de los comportamientos por parte del organismo, implica una menor unidad de tiempo disponible para el resto de los comportamientos. Cada segundo de tiempo t dedicada al comportamiento 1 es una unidad menos que puede dedicarse al resto de los n comportamientos.

Una segunda restricción del organismo es su estructura biológica metabólica y neuronal, las cuales limitan el posible rango de comportamientos y uso de recursos energéticos.

El éxito reproductivo de un organismo no solo depende de su habilidad para reabastecerse de energía: es necesario, entre otras cosas, encontrar una pareja con la cual reproducirse, evitar depredadores y escapar del frío y/o calor extremo. Todas estas consecuencias tienen una importancia biológica por su impacto sobre el éxito reproductivo de los organismos y coinciden con lo que comúnmente se conoce como “refuerzos”: nosotros seguiremos a Baum y, para enfatizar el origen y el papel en la evolución de estos elementos, les llamaremos *sucesos biológicamente importantes SBI*. En la ecuación 1, corresponde a las acciones ligadas a los diferentes SBI. Cuando hablamos de SBI, no nos limitamos a lo que podría entenderse como necesidades básicas. Selección natural ha operado para filtrar mecanismos que permitan traducir éxito reproductivo diferencial en la detección de todas las variables que pueden estar correlacionadas con él. Por ejemplo, selección natural ha filtrado mecanismos de cognición social que permiten a diversos organismos detectar si una acción particular será bien recibida dentro de un grupo específico de su especie: si bien la aceptación social no se traduce inmediatamente en un mayor acceso a la reproducción o en mayores opciones para nutrir el metabolismo del organismo, a la larga la aceptación social es un SBI dado que facilita las condiciones que permiten al organismo un mayor acceso a ambos elementos. Por lo tanto, para diversas especies, la cognición social es un proxy del éxito reproductivo diferencial, aunque esta variable no satisface directamente una necesidad básica en términos evolutivos.

El segundo grupo de restricciones son aquellas que describen la disponibilidad de recursos de reabastecimiento y su relación a propiedades del entorno de los organismos. A estas restricciones les llamaremos las *propiedades estadísticas del entorno*. Son estas propiedades las que, en conjunción con la restricción lineal sobre el comportamiento, determinan el posible conjunto de distribuciones de acciones que han de ser sometidas al filtro de la selección natural.

Las condiciones del entorno biológicamente importantes pueden ser relativamente constantes en el tiempo o variar a lo largo de él. Dependiendo de esa variabilidad en el entorno, el proceso de selección puede ocurrir en dos escalas temporales diferentes: puede darse entre generaciones o durante la vida individual de un organismo. Si las condiciones son constantes, el proceso de selección ocurre a lo largo de generaciones y resulta en programas conductuales específicos que en la Psicología se les ha conocido como reflejos, instintos o sesgos y de los cuales se dice que son el resultado de un proceso evolutivo. Podemos decir que el proceso evolutivo “codifica” genéticamente las condiciones constantes del ambiente. Consideren la tarea de diseñar un robot que se mueve en un entorno fijo y que tiene solo una tarea por realizar. En ese caso, la solución del ingeniero consiste en *codificar* las características fijas del entorno en el software del robot.

En el curso, vamos a llamar *comportamiento adaptado* al que resulta de un proceso de selección natural: es decir, el comportamiento resultante de un proceso de ajuste lento y gradual a las condiciones del entorno a lo largo de generaciones. En ese sentido, el comportamiento adaptado es un tipo de adaptación.

Sin embargo, los entornos de la mayoría de los organismos y de los robots de servicio y exploración espacial son entornos variables, volátiles e inciertos. Este tipo de entornos requieren de mecanismos que se ajusten a la variabilidad en tiempo real (y no a lo largo de generaciones) para poder ser afrontados con éxito. Por ejemplo, para diseñar un robot (como Wall-E) que pueda funcionar en entornos con SBI variables e inciertos, un ingeniero debe conocer y poder modelar la disponibilidad de fuentes de energía para el reabastecimiento del robot, la distribución de los SBI y la disponibilidad de opciones para que el agente pueda llevar a cabo su meta (que sería recolectar y compactar basura en el caso de Wall-E).

Los entornos variables, volátiles e inciertos se caracterizan por sus propiedades estadísticas. Sin esta variabilidad, no habría selección de mecanismos que permitan la adaptación de los organismos a entornos cambiantes dentro del periodo de sus vidas individuales. La adaptación del comportamiento de los organismos a las propiedades estadísticas del entorno dentro de su lapso de vida individual, la atribuimos a un proceso que llamamos “Aprendizaje”.

En resumen,

1. En entornos sin variabilidad, la selección natural puede resultar en comportamientos adaptados a las propiedades invariantes del entorno.
2. En entornos variables e inciertos, selección natural resulta en el surgimiento de mecanismos que permiten “comportamiento adaptable” y que llamaremos *aprendizaje* (¡ojo! este concepto es distinto al de “comportamiento adaptado”).
3. Selección natural opera en estructuras, genes y las expresiones de genes (como un sistema nervioso, por ejemplo). Estos son los elementos que permiten y subyacen a los mecanismos del comportamiento adaptable.

En términos evolutivos, la tarea de los agentes es *reducir la incertidumbre* acerca de la ocurrencia de los SBI, *predecir* efectivamente su ocurrencia y llevar a cabo las *acciones* necesarias para interactuar óptimamente con estos. Así, un primer paso para el estudio del comportamiento inteligente es tener una especificación detallada de las propiedades estadísticas de los entornos de los organismos. Cuatro propiedades estadísticas de los sucesos biológicamente importantes han dominado el estudio del comportamiento adaptable: el tiempo y el lugar de ocurrencia, la relación (correlación, covarianza) con otras características del entorno y la relación con el comportamiento de un organismo. El supuesto más importante que haremos es que si las consecuencias relevantes en el entorno se

distribuyen en ciertos tiempos, lugares y están asociadas con ciertas estímulos y comportamientos, un organismo que pueda detectar estas propiedades estadísticas y ajustar su conducta a ellas, podrá asignar más óptimamente su distribución de comportamiento a las metas en competencia.

Los SBI ocurren de forma incierta y la tarea para los organismos es descubrir si su ocurrencia está ligada a ciertos tiempos o a ciertos lugares. Pueden también formar parte de una estructura causal, y en esos casos, la tarea de los organismos es descubrir con qué propiedades del entorno están vinculados. Adicionalmente, los SBI pueden depender de las acciones de los agentes, en cuyo caso, la tarea es descubrir cuál acción es responsable de su ocurrencia.

Una propiedad adicional de los entornos es que las cuatro posibles regularidades que acabamos de detallar (características estadísticas del entorno), pueden variar a su vez de acuerdo a otros estados externos del mundo de los agentes (noche y día, escuela y casa). En los libros de texto, a la adaptación de los organismos ante estas propiedades del contexto se les estudia bajo el nombre de control de estímulos.

Un problema de adaptación más difícil es cuando las propiedades estadísticas del entorno cambian sin señales externas, como resultado de estados ocultos al agente. En estos casos, la tarea es determinar si el cambio observado en la propiedad estadística del entorno constituye un cambio aleatorio o si realmente se trata de una modificación en el estado particular del mundo. En la literatura clásica, a este problema se le ha estudiado bajo el nombre del fenómeno de la extinción.

Hasta el momento hemos supuesto, al igual que la gran mayoría de los teóricos hasta los años 60s del siglo pasado, que los organismos solo detectan sucesos individuales. Revisaremos evidencia de que en adición, los organismos detectan y se adaptan a una característica de segundo orden de los entornos: la tasa de ocurrencia de sucesos individuales en su entorno, la cual se define como el número de sucesos por unidad de tiempo. Por ejemplo, las abejas seleccionan su tiempo de estancia en diferentes lugares de un jardín en función de la tasa de encuentro con flores con néctar. Veremos que la noción de tasa de ocurrencia juega un papel muy importante en las explicaciones contemporáneas del comportamiento.

Finalmente, podemos considerar una propiedad de los entornos que puede considerarse de tercer nivel. Nos referimos a la incertidumbre acerca del tiempo, lugar, covarianzas y tasas de los SBI. Los camiones de transporte público no pasan siempre a la misma hora (incertidumbre de tiempo), en el mercado no siempre se encuentra la misma fruta (incertidumbre de lugar), no llueve siempre que está nublado (incertidumbre de covarianzas) y un jugador de fútbol no alcanza siempre la misma tasa de goleo en una temporada (incertidumbre de tasas). Hay una relación que podemos describir como una probabilidad condicional en el sentido de que la probabilidad de un evento en sí misma depende (o

se encuentra condicionada) a otra distribución de probabilidad. Esta descripción nos sirve para distinguir entre cuando la incertidumbre de un evento es esperada o inesperada. La incertidumbre es esperada si existe una única distribución de probabilidad que la describa. Es el caso cuando se lanza una moneda sin imperfecciones al aire, donde sabemos que la probabilidad de que caiga águila o sol es de 0.5. Por otro lado, la incertidumbre es inesperada cuando los parámetros de la distribución cambian de acuerdo a una segunda distribución de probabilidad: en este caso se habla de una probabilidad condicional. Un caso sería una moneda cuya probabilidad de que caiga águila cambia a lo largo del tiempo de acuerdo a otra probabilidad, como la distribución de la velocidad del viento en un entorno, por ejemplo.

En conclusión, si asumimos que la teoría de la selección natural es una descripción correcta y si los organismos y el entorno operan bajo las restricciones descritas, podemos concluir que el objeto de estudio natural de la Psicología es el estudio de la adaptabilidad del comportamiento. En otras palabras, la Psicología estudia distintos comportamientos y los explica en función de su capacidad para brindarle acceso al organismo a sucesos que le son biológicamente significativos.

En el curso veremos cuales son las soluciones óptimas a los diferentes problemas de adaptación generales que encaran los organismos, así como los distintos mecanismos que posibilitan alcanzar tales soluciones a distintas especies. Veremos que para lograr el objetivo de entender el comportamiento adaptable es fructífero iniciar con un detallado análisis del problema de adaptación en cuestión. Esto último requiere modelar tanto las propiedades estadísticas del problema como las restricciones que imponen los posibles mecanismos de las distintas especies sobre la solución óptima.

5 Asignación de Crédito

Al interactuar con su entorno, un agente se encuentra con un constante flujo de estímulos y respuestas que se despliegan en el tiempo. Algunos de los sucesos que encuentra son biológicamente significativos, importantes para su éxito reproductivo. El encuentro inesperado con un suceso biológicamente importante echa a andar dos mecanismos: Uno que controla la respuesta inmediata al SBI y un segundo mecanismo que permite predecir su futura ocurrencia. Considere un organismo que encuentra un inesperado pedazo de comida o un depredador. El primer mecanismo le permite al organismo manipular y consumir la comida, o huir y escapar del depredador. El segundo mecanismo, el que posibilita predecir y controlar un SBI, implica la existencia de una estructura causal en el entorno del organismo: esto es, que existen sucesos que predicen o respuestas que producen la comida o evitan al depredador. La tarea para el agente es seleccionar, dentro de un número gigantesco de posibilidades, a cuál suceso o respuesta atribuirle la ocurrencia de un SBI. A este problema de adaptación se le conoce como el de la *asignación de crédito*.

El vasto espacio de posibles candidatos para la asignación de crédito de un SBI incluye la hora a la que ocurre, dónde ocurre, el enorme grupo de sucesos que lo acompañan o los comportamientos que un organismo genera; pero también podemos incluir momentos, espacios, sucesos y comportamientos que ocurrieron en cualquier momento previo. La comida que un perro callejero se encuentra en una banqueta puede deberse a un transeúnte que el perro percibe en ese momento alejándose de la comida, o a miles de posibles transeúntes que la tiraron en un tiempo cada vez más alejado de su encuentro con el alimento, pero pudo deberse a alguien que la tiró desde un transporte público un segundo antes, o diez minutos antes o un día antes.

Para hacer más manejable la asignación de crédito ante las limitaciones de nuestras observaciones y la riqueza de candidatos, selección natural filtró mecanismos que llamamos "*sesgos inductivos*", los cuales logran dos cometidos: primero, reducen el espacio de candidatos a asignación de crédito y, segundo, establecen un orden de evaluación para poner a prueba a los candidatos del espacio más reducido en un momento posterior. Los sesgos pueden ser el resultado de la codificación genética de propiedades del entorno bajo el cual evolucionó la especie del organismo o el resultado de su experiencia y aprendizaje individuales.

Históricamente, la contigüidad entre sucesos fue el primer sesgo en recibir atención. El sesgo consiste en suponer que la “contigüidad” entre un estímulo o una respuesta y un SBI es una regla evolutiva muy útil para reducir el espacio de opciones de asignación de crédito. El espacio de asignación de crédito se reduce a sólo aquellos eventos contiguos con el SBI. Si al momento que el perro callejero encontró la comida, este prestaba atención a una ambulancia que pasaba con la sirena encendida y a un transeúnte vestido como estudiante universitario, su espacio de asignación de crédito se reduciría a esos dos sucesos. Para seleccionar entre ellos dos, operaría un segundo sesgo que veremos en una sección subsecuente.

Al inicio del siglo XX, Pavlov le dio sentido experimental y conceptual al estudio de este sesgo. El propósito de los experimentos de Pavlov fue establecer la importancia de la contigüidad en la formación de nuevas asociaciones entre estímulos previamente neutrales y respuestas reflejas. El protocolo, representado en la Figura x, consistió en presentarle a un perro un estímulo auditivo seguido por acceso a comida. Pavlov midió la salivación ante la comida y ante el estímulo auditivo, antes y después de haber sido presentado junto con la comida. Encontró que aparear el sonido a la comida, resultó en que el perro salivaba ahora no tan solo a la comida, sino también al sonido. Al sonido se le conoce como *estímulo condicionado EC* y a la comida como *estímulo incondicionado EI*.

En los primeros protocolos experimentales se consideraba solo un candidato al cual asignar crédito (como un tono) y la manipulación experimental era una imprecisa medida de contigüidad que implicaba diferentes relaciones temporales entre el EC y el EI. Los siguientes son los protocolos más empleados: Ver Figura.

En estos protocolos se encontró que la medida de condicionamiento disminuye conforme incrementa el tiempo entre la terminación del EC y el inicio del EI. A esta relación se le llamó el *gradiente de la demora*. Dependiendo de la preparación, después de menos de un minuto de intervalo entre EC y EI no se observaba aprendizaje. Adicionalmente, si el EI se presentaba antes del EC (procedimiento huella) no se observaba aprendizaje. Más adelante veremos que la historia es más compleja que este resumen, pero por el momento es suficiente que se tenga claridad sobre estos resultados.

5.0.1 ¿Es la contigüidad una condición necesaria para el aprendizaje?

Nos podemos preguntar si la contigüidad es el único sesgo que reduce el espacio de candidatos a la asignación de crédito. Para darle respuesta a esta pregunta se utilizan dos estrategias: la primera consiste de protocolos experimentales en los que dos o más estímulos igualmente contiguos con el SBI compiten por la asignación de crédito. Este protocolo nos permitiría demostrar si la contigüidad es un factor **suficiente** para reducir el espacio de candidatos en asignación de

crédito: en el sentido de que, si ambos estímulos son igualmente contiguos, pero el organismo sólo aprende sobre uno de ellos, esto demostraría que la contigüidad no es una condición suficiente para el aprendizaje. La segunda estrategia se trata de protocolos en los cuales se modifica la demora de la presentación del SBI para observar si la asignación de crédito se mantiene. Esta clase de protocolo nos permitiría darle respuesta a la pregunta de si la contigüidad es una condición **necesaria** para el aprendizaje. John García condujo justo estos experimentos. Inicialmente, a partir de una observación accidental trabajando con los efectos de radiación sobre ratas, García encontró que las ratas dejaban de comer y generaban una aversión a su dieta habitual a pesar de que el efecto de la radiación se presentaba mucho tiempo después de la ingesta de la comida.

La figura x muestra el protocolo del experimento de García. A todos los animales se les daba acceso a un bebedero con agua azucarada en el cual cada contacto detonaba la presentación de un tono. De esa forma había un compuesto conformado por dos estímulos: un tono (EC) y el agua dulce (EI). A la mitad de los animales se les daba una descarga eléctrica con cada lengüetazo que daban al bebedero, mientras que a la otra mitad de los animales se les inyectaba una sustancia que producía un malestar estomacal. García encontró que las ratas que recibieron las descargas eléctricas no dejaron de beber el agua azucarada, pero sí evitaban tocar el bebedero cuando este producía el tono; mientras tanto, las ratas con malestar estomacal dejaban de beber el agua dulce, pero no presentaban aversión al tono. Este experimento muestra que la naturaleza del SBI determina los elementos que entran en el espacio de asignación de crédito. Para las ratas, igual que para otras especies omnívoras, como la nuestra, cuando el SBI es un malestar estomacal, el espacio de elección está conformado por elementos con sabor, pero no por elementos visuales o auditivos. Al sentirnos mal del estómago, lo primero que hacemos es buscar qué comimos, aunque nuestra última comida haya sido muchas horas antes. A este sesgo se le conoce como el sesgo de *relevancia biológica*.

Las ratas aprenden a evitar el sabor asociado con enfermedad aun cuando existen largas demoras (horas) entre la experiencia del sabor y la presentación de la enfermedad. Sin embargo, el que la *contigüidad no sea necesaria*, no significa que no sea un factor. En subsecuentes experimentos que manipularon la duración entre el consumo del alimento y la enfermedad, se encontró también un gradiente de demora en el cual la aversión aprendida al sabor incrementa en función de la reducción de los intervalos entre la presentación del alimento y el EI. Una evidencia adicional sobre el papel de la contigüidad la encontramos en estudios que presentan al organismo dos sabores antes de que este atravesase su experiencia de enfermedad. En estos estudios se ha encontrado que la aversión se genera al sabor que es temporalmente más cercano a la sensación de malestar.

Usando la misma preparación de aversión a sabores de García, se encontró otro sesgo importante que determina cuál de los elementos en el espacio de candidatos

a la asignación de crédito es considerado primero. En experimentos en los que se presentan dos sabores, uno novedoso y otro familiar, ambos igualmente contiguos con la enfermedad, las ratas aprenden a evitar solo el sabor que era novedoso. A este sesgo se le conoce como el sesgo de la *novedad*.

El sesgo de la relevancia biológica es evolutivo. Para especies como la rata que son omnívoras y viven principalmente en la oscuridad es importante detectar qué alimento es tóxico por su sabor. Otras especies como las palomas, que habitan nichos ecológicos diferentes, no generan aversión a los sabores. Para estas especies, la dimensión relevante es la estimulación visual y no el sabor del alimento. La coevolución entre aves y polillas ejemplifica la importancia de la relevancia biológica. Las polillas son un alimento para ciertas aves; por otro lado, la selección natural resultó en algunas especies de polillas que son tóxicas para las aves. Esta toxicidad es identificable a través de señales visualmente perceptibles, gracias a lo cual, las aves pueden desplegar su sesgo de relevancia biológica hacia los estímulos visuales y aprender a evitar este tipo de polilla. Simultáneamente, otro grupo de polillas no tóxicas evolucionaron para tomar ventaja de ese mismo sesgo de las palomas y desarrollaron patrones visuales similares a los de las especies tóxicas para evitar ser depredadas. Poner figura.

En resumen, los estudios de aversión a sabores sugieren que: 1. Contigüidad no es una condición necesaria para el aprendizaje. 2. Sin embargo existe un gradiente temporal y hay una mayor aversión al sabor más cercano al malestar estomacal. 3. Existen sesgos biológicos que generan una predisposición a considerar sólo ciertos estímulos para asignación de crédito, los cuales dependen del suceso biológicamente importante, como por ejemplo, sabor para enfermedad estomacal en omnívoros y estímulos visuales para aves. 4. Un importante sesgo adicional es priorizar sucesos que son novedosos (o sorprendentes) dentro del proceso de asignación de crédito. 5. La contigüidad es uno de los sesgos, pero no constituye una condición necesaria para el aprendizaje.

5.0.2 ¿Es la contigüidad una condición suficiente para el aprendizaje?

A finales de los años 60s del siglo pasado, un grupo de investigadores, entre los que destacan Leon Kamin, Robert Rescorla y Allan Wagner, condujeron un grupo de experimentos dirigidos a darle respuesta a la pregunta sobre si la contigüidad es una condición suficiente para el aprendizaje. En estos experimentos se presentó un compuesto de dos o más estímulos (condicionados), igualmente contiguos con el suceso biológicamente importante, el llamado estímulo incondicionado (EI). Un ejemplo de un compuesto de estímulos es la presentación simultánea de una luz y un tono, o la combinación de una figura visual y un color.

5.0.2.1 Ensombrecimiento

Los sucesos que anteceden a un suceso biológicamente importante regularmente están compuestos de estímulos que varían en diferentes dimensiones. Un perro que los amenaza, no solo ladra y gruñe, tiene también cierto color, ciertos ojos y cierta boca. Si les llegara a morder, todas estas características del perro estarían contiguas con el suceso aversivo de la mordida. Si la contigüidad fuese suficiente para el aprendizaje, todas y cada una de las características del perro se convertirían en predictores de un ataque. Reynolds puso a prueba esta conjetura con un sencillo experimento. A dos palomas se les entrenó a discriminar entre dos teclas a las que podían picar. Una de las teclas generaba acceso a un comedero, la otra no. Las teclas estaban iluminadas por un compuesto de dos estímulos que variaban en color o forma. La tecla positiva era un triángulo blanco sobre un fondo rojo, la tecla negativa era un círculo blanco en un fondo verde. (Ver figura). Después de que los animales habían aprendido a responder solo a la tecla positiva, se le presentaron los cuatro estímulos por separado. Se encontró que las palomas responden solo a uno de los dos estímulos del compuesto positivo. Una paloma respondía a la figura, la otra al color.

La importancia del experimento radica no solo en la demostración de que la contigüidad no es una condición suficiente, sino en la ilustración de un principio que será clave en el curso: la *competencia* entre elementos, sean estímulos o respuestas. El experimento de Reynolds ilustra que los estímulos presentados en forma simultánea dentro de un compuesto compiten entre ellos por la asignación de crédito del organismo. En ese sentido, la asignación del crédito a uno de los estímulos por parte del organismo implica la no asignación de crédito al otro estímulo presente. Retomando nuestro ejemplo, si el perro los ataca, para algunos de ustedes el predictor del ataque será el gruñido, para otros será el color y para otros será la raza. Cuando es la primera experiencia con el compuesto de estimulación, los factores que determinan cuál elemento gana incluyen la sobresaliencia de los estímulos y su novedad. La siguiente pregunta es si la historia del organismo con uno de los elementos del compuesto afecta la asignación de crédito. A continuación, veremos una serie de experimentos que sugieren que una vez que se asignó el crédito a un elemento, los organismos dejan de considerar a otros elementos como candidatos.

5.0.2.2 Bloqueo

Imaginen que, después de un par de experiencias visitando restaurantes, ustedes aprenden que un mantel de tela es un buen predictor de la calidad de la comida de un lugar. En su visita a un nuevo restaurante, las mesas de este tienen manteles de tela, pero adicionalmente el restaurante tiene música clásica de fondo. La calidad de la comida es igualmente buena a la del último restaurante

con manteles de tela que visitaron, pero en este caso la comida fue contigua tanto con el mantel de tela como con música clásica. ¿Habrán aprendido que la música clásica es un predictor de la buena comida? Para darle respuesta a esta pregunta, tendrían que observar si al verse forzados a escoger entre dos restaurantes sin manteles de tela, seleccionarían aquel que tiene música clásica sobre el que no la tiene. Veremos que los experimentos indican que una vez que se asignó el crédito de un SBI a un elemento de un compuesto, los otros elementos del compuesto no adquieren ningún crédito.

En 1969 Kamin corrió el primer experimento evaluando la intuición anterior. A dos grupos de ratas se les presentó un compuesto de luz y tono seguido de una descarga eléctrica. Ver Figura. Para el grupo experimental, en una fase anterior se le presentaba la luz seguida de la descarga eléctrica. En la tercera fase, de prueba, se le presentaba el tono sin la luz para evaluar qué tanto habían aprendido las ratas acerca de él. Noten que para los dos grupos, el tono antecede a la descarga eléctrica. La única diferencia entre los dos grupos fue la experiencia previa de la luz con la descarga eléctrica. Kamin encontró que a pesar de que para los dos grupos el tono aparecía contiguo con la descarga eléctrica, las ratas del grupo con el entrenamiento luz - descarga eléctrica no mostraron evidencia de que el tono recibiera ningún crédito por la presentación de la descarga eléctrica. Se dice que la experiencia con la luz bloquea el aprendizaje acerca del tono. De la misma forma, en nuestro ejemplo previo, el mantel de tela bloqueaba el aprendizaje acerca de la música clásica. Estos experimentos muestran que el grado de aprendizaje acerca del elemento de un compuesto seguido de un SBI, depende del grado de aprendizaje adquirido previamente por el otro elemento del compuesto. Una forma de interpretar estos resultados es que los elementos compiten por la asignación de crédito en función de si uno de ellos ya es un predictor del suceso biológicamente importante. El fenómeno de bloqueo es evidencia adicional de que la contigüidad entre un estímulo y un refuerzo no es una condición suficiente para el aprendizaje.

6 Asignación de Crédito para Respuestas

El acceso a sucesos biológicamente importantes es fundamental para la supervivencia y reproducción de los organismos. Aquellos organismos que puedan predecir confiablemente la ocurrencia de los SBI tienen una ventaja comparativa en términos de su éxito reproductivo. Aprender que un cielo encapotado predice una fuerte lluvia le permite a un individuo anticiparse y prepararse correctamente para ella. De igual forma, escuchar un rugido le permite a una presa prepararse para el caso de un posible ataque. Sin embargo, el individuo no tiene control sobre lo nublado del cielo, ni sobre la presencia del depredador dado el rugido. Puede predecir cuándo lloverá, pero no puede alterar el que llueva; puede predecir que detrás del rugido esté un depredador, pero no puede modificar su presencia.

Uno de los saltos importantes en la historia evolutiva fue la emergencia de mecanismos biológicos que, a través de la acción y la interacción con el entorno, permiten a los organismos *controlar* la ocurrencia de sucesos biológicamente importantes. Estos mecanismos se encuentran estrechamente asociados a un componente específico de la estructura causal de los entornos: las relaciones que describen cuáles acciones de un organismo son exitosas para obtener mayores opciones de acceso a SBI. Un ejemplo en nuestra especie de estas **”elaciones que describen las acciones exitosas para acceder a mayores opciones de SBI”** son los contratos laborales: en estos se contienen las reglas que especifican las acciones a seguir para acceder a un monto de dinero (lo que equivale a mayores opciones de SBI para nuestra especie). Otros ejemplos son: las reglas que especifican qué acciones llevar a cabo si se desea tomar un transporte público; las reglas que definen las acciones requeridas para iniciar una relación amorosa; las reglas que especifican a su mascota qué acciones le otorgan una comida especial; las reglas que especifican a cada especie las acciones que facilitan su acceso a alimentos, así como los actos que les permiten escapar y evitar a sus depredadores.

Desde la psicología, nos preguntamos cómo un organismo logra reconocer dichas estructuras causales: específicamente, cómo puede determinar qué acción específica, entre muchas posibilidades, es la responsable del resultado deseado (el SBI). En los libros de texto, al estudio de la respuesta a esta pregunta se le conoce como *condicionamiento instrumental o condicionamiento operante*. En estas

notas abordaremos su estudio con base en el mismo grupo de principios con los que abordamos los resultados de los protocolos de condicionamiento clásico.

Antes de describir cómo se aplican los mismos principios a los fenómenos de condicionamiento instrumental, es conveniente revisar el estudio original del que surgió esta área de investigación: siguiendo el mismo proceder que seguimos para entender el condicionamiento clásico. Al inicio del siglo XX, Edward Thorndike condujo una serie de estudios con gatos. Él diseñó una variedad de cajas experimentales, de las que un gato encerrado podría escapar activando dispositivos como un cerrojo o una palanca. (Ver figura). La medida del aprendizaje era el tiempo que le tomaba al gato para escapar de la caja. De los datos mostrados en la figura x, puede verse que el tiempo que le tomaba escapar al gato disminuyó conforme aumentaba el número de ensayos en los que se le encerraba. Al inicio, los gatos intentaban un número grande de respuestas hasta que accidentalmente operaban el dispositivo que abría la puerta. Después de algunos ensayos, el gato empezaba a activar el dispositivo de escape inmediatamente después de que se le metía a la caja. Thorndike caracterizó esta ejecución como una de *ensayo y error*. El gato intentaba diferentes respuestas (ensayos) y las descartaba si no lo llevaban a salir de la caja (error).

Es posible identificar que el resultado de los experimentos de Thorndike está compuesto de dos observaciones. La primera es el conjunto de respuestas que lleva a cabo el gato antes de emitir la respuesta correcta. La segunda observación es que después de varios ensayos, el gato ejecuta de forma casi exclusiva e inmediata la respuesta que fue exitosa para escapar de la caja. Para entender estas dos observaciones, recordemos que en el capítulo anterior vimos que el encuentro inesperado con un suceso biológicamente importante (SBI) echa a andar dos mecanismos: uno que controla el comportamiento apropiado para la interacción con y búsqueda adicional del SBI, y un segundo, que permite predecir y controlar su futura ocurrencia.

Para analizar los dos principios que ilustra el comportamiento de ensayo y error, recordemos que los sesgos inductivos pueden dividirse en dos clases:

1. Aquellos que determinan qué elementos -en nuestro caso respuestas- conforman el espacio de candidatos a la asignación de crédito.
2. Los sesgos que determinan cuál elemento dentro del espacio se debe considerar primero.

En el caso del primer sesgo, el que delimita el espacio de respuestas candidato a la asignación de crédito, las respuestas inducidas por el SBI juegan un papel equivalente al de las mutaciones y la recombinación genética dentro del proceso de generación de variabilidad en la teoría de la evolución. Las respuestas del organismo y la variabilidad genética coinciden en que ambas generan el espacio de opciones seleccionables (candidatos) dentro de los procesos de selección de los

que forman parte. En la teoría de evolución, un conjunto de genes creado por las mutaciones y la recombinación genética es sometido a un proceso de selección por los cambios en el entorno; en la teoría de los sesgos inductivos, un conjunto de respuestas generadas por un organismo en su interacción con el entorno es sometido a un proceso de selección por el sesgo inductivo del organismo. Por otra parte, el segundo sesgo referido, aquel que establece el orden de prioridad para evaluar las respuestas candidato, es equivalente a los procesos específicos de selección natural. De la misma forma en la que la selección natural se dan procesos bien definidos para descartar y conservar genes particulares de entre un amplio espacio de candidatos, existen procesos bien definidos a nivel de los sesgos inductivos (de la segunda clase) del organismo, que describen cómo este prioriza, descarta y conserva las respuestas de entre su espacio de candidatos.

Para entender los resultados de sus experimentos, Thorndike propuso un principio que se conoce como *La ley del Efecto*, la cual establece que: *“En la presencia de un estímulo (situación, contexto) pueden ocurrir una multitud de respuestas. Aquella que vaya seguida de un estado de cosas satisfactorio tendrá que ser la que se asocia (conecta, selecciona) con el estímulo.”*

La ley del efecto de Thorndike prioriza a la contigüidad como el factor que determina tanto el espacio de candidatos, como el orden que establece cuáles elementos evaluar primero. La ley no toma en cuenta el origen de las respuestas que anteceden al “estado de cosas satisfactorio”. Este último término al poco tiempo se convertiría en el concepto que hoy conocemos como “refuerzos” y que en estas notas llamaremos también SBI. En lo que resta del capítulo, revisaremos la historia y la evidencia acerca del papel de la contigüidad en la asignación de crédito para una respuesta.

En 1947, Skinner publicó los resultados de un pequeño experimento para demostrar la suficiencia de la contigüidad para el aprendizaje de respuestas. A las palomas hambrientas se les presentó comida cada 15 seg., independientemente de su comportamiento. Se observó que a pesar de esto, muchas palomas desarrollaron comportamientos estereotipados, como girar en círculos o picotear ciertas áreas. Los comportamientos difieren de paloma a paloma. (Ver figura). Skinner explicó estos resultados, señalando que para cada ave, una respuesta ocurría de forma accidental inmediatamente antes del refuerzo y esa contigüidad era responsable del fortalecimiento de dicha respuesta. A partir de este tipo de observaciones, Skinner concluyó: “Decir que un reforzador es contingente sobre una respuesta no significa otra cosa que decir que “se presenta después de la respuesta”. Para Skinner, presumiblemente, el condicionamiento ocurre únicamente debido a la relación temporal, expresada en términos de la proximidad entre la respuesta y el reforzador.

La sencilla historia anterior fue rápidamente cuestionada en una réplica del estudio de Skinner, publicada por Staddon y Simmelhag en 1971. Al igual que Skinner, a un grupo de palomas se le dió acceso a comida cada 15 segundos,

independientemente de su comportamiento. A diferencia de Skinner, estos investigadores observaron cuidadosamente el comportamiento de las palomas a lo largo de los 15 segundos. Los resultados se muestran en la figura x. No encontraron evidencia de que se aprendiera la respuesta individual que accidentalmente antecede el acceso a la comida. No obstante, observaron que para todas las palomas, el comportamiento desplegado se podía agrupar en dos clases: una de respuestas que ocurrían al final del intervalo, a las que llamaron “respuestas terminales”, y las cuales incluían, entre otras, el orientarse hacia la pared del comedero; y una segunda clase de respuestas que agrupaba comportamientos que ocurrían a la mitad del intervalo, a las que llamaron “respuestas interinas”, entre las cuales se observó la conducta de picar el piso. El estudio se replicó con ratas y en ese caso también se observó la agrupación de respuestas en dos clases.

De los resultados del experimento de Staddon y Simmelhag pueden extraerse dos conclusiones, una negativa y otra positiva. Primero, en relación al tema de este capítulo, podemos concluir que en los experimentos en los que no existe una relación netamente causal entre respuesta y SBI, el estímulo no selecciona a la respuesta que accidentalmente le antecede: contradiciendo a la idea que la contigüidad es una condición suficiente para el aprendizaje de respuestas. La conclusión positiva es que la mera presentación de un SBI induce un conjunto tipificado de respuestas, y que la periodicidad de la presentación del SBI organiza el comportamiento de los organismos alrededor del tiempo. En otro capítulo revisaremos en detalle otros resultados relacionados y su papel en una teoría general del comportamiento.

6.0.1 ¿Es la contigüidad entre una respuesta y un refuerzo una condición necesaria para la adquisición de la respuesta?

En el experimento de superstición de Skinner no había una relación de dependencia causal entre respuesta y refuerzo y Skinner buscaba demostrar que la mera contigüidad era suficiente para el aprendizaje de respuestas. Pero esta demostración dependía de la manera en la que se especifica el concepto de contigüidad en términos concretos (¿cuándo podemos considerar que un suceso es realmente contiguo? Si el SBI ocurre un segundo antes del EC o dos segundos antes, ¿sigue siendo contiguo? ¿cuándo comienza y cuándo termina la contigüidad?). Para poder estudiar sistemáticamente el papel de la contigüidad, es necesario especificar la ventana temporal que define a dos eventos como contiguos. La estrategia teórica-experimental inicial en esta área fue considerar como contigüidad una ventana de cero segundos y considerar el impacto de ventanas mayores como distintas instancias de efectos de la demora en el refuerzo.

Para poder analizar el efecto de diferentes demoras, se requiere poder controlar esa relación. Con esa finalidad, es necesario estudiar protocolos en los que exista

una relación de dependencia entre la respuesta y el SBI, en particular, protocolos en los cuales se varíe el tiempo entre las respuestas y la presentación de los SBI que son generados por estas respuestas. A continuación revisaremos el efecto de variar el valor temporal de los intervalos entre respuestas y los SBI producidos por ellas.

En un primer experimento, Dickinson y sus colaboradores evaluaron el impacto de diferentes demoras entre la respuesta de apretar una palanca y la presentación del SBI. El experimento se condujo con ratas sin ninguna experiencia previa con el procedimiento. El propósito del experimento fue evaluar si las ratas aprenderían a apretar la palanca. Cada respuesta producía un SBI con una demora fija. Durante el periodo de demora, las ratas podían volver a responder y producir otro SBI con una demora igual. Noten que con este procedimiento podía darse el caso de que accidentalmente una de las respuestas de las ratas durante uno de los periodos de demora ocurriera justo antes del SBI. Para descartar el aprendizaje de respuestas por la mera contigüidad accidental con el SBI (esto es, en ausencia de un efecto causal sobre este) había que evaluar si el aprendizaje de la respuesta en las ratas se genera independientemente de la existencia de una dependencia causal entre respuesta y refuerzo. Para descartar esta posibilidad, se estableció un grupo diferente de ratas a las cuales se les entregaba el SBI al mismo tiempo que lo recibía el grupo dependiente: para este segundo grupo, sus respuestas no tenían ningún efecto sobre el momento de aparición de los reforzadores. Si ambos grupos mostraban los mismos patrones de respuesta, eso significaba que la contigüidad temporal era el factor determinante del aprendizaje de las respuestas y que las ratas del primer grupo no aprendían en función del poder causal que identificaban en sus respuestas. Esto también implicaría que las ratas del primer grupo, el grupo dependiente, estarían aprendiendo a asociar la presentación de los SBI con sus respuestas que se generaban accidental y tardíamente dentro del intervalo de demora. La figura x muestra los resultados del experimento. Se probaron tres valores de demora adicional a la condición de contigüidad estricta. La medida empleada para determinar si se había aprendido la respuesta fue el número de respuestas de apretar la palanca por minuto. En el panel izquierdo puede verse que la tasa de respuestas va decreciendo conforme incrementa la demora hasta alcanzar un valor de 32 segundos entre respuesta y reforzador, y cero aprendizaje con demora de 64 segundos. En el panel de la derecha, se muestra el efecto de la dependencia respuesta-SBI sobre el aprendizaje de las respuestas de las ratas a lo largo de 20 sesiones. Se compara la tasa de respuesta para el grupo con dependencia respuesta-SBI con la del grupo que recibía el SBI independientemente de las respuestas de las ratas. Los resultados indican que para el segundo grupo de ratas, la tasa de respuesta fue casi cero para todas las demoras evaluadas, es decir no hubo aprendizaje, mientras que para el primer grupo de ratas se observaron los patrones de aprendizaje con demoras descritos previamente.

Como ya se mencionó, un problema a resolver para el experimento anterior

era controlar la posibilidad de que los organismos aprendieran respuestas que aparecieran accidentalmente contiguas al SBI. Lattal y Gleeson realizaron un experimento con una ingeniosa estrategia alterna para controlar esta posibilidad. En su experimento, la respuesta de las palomas de picar una tecla detonaba una demora de 10 seg. después de la cual obtenían un refuerzo de comida; sin embargo, esto último sólo ocurría si las palomas no daban ninguna respuesta durante el periodo de demora. De esta forma, el diseño experimental garantizaba una demora real de 10 segundos. En la Figura x, puede verse que aún eliminando la posibilidad de una contigüidad accidental, las palomas aprenden la respuesta de picar la tecla.

6.0.2 Percepción de la relación de causalidad respuesta - refuerzo

Los resultados que hemos reportado en este capítulo, nos llevan a considerar la siguiente pregunta: ¿Pueden los organismos discriminar entre refuerzos producidos por su comportamiento de aquellos que son independientes de él?

Con un ingenioso experimento, Killeen pretendió explorar esta pregunta de manera directa. En el experimento, la tarea para las palomas era discriminar si un cambio en la iluminación de una tecla era el resultado o no de su comportamiento. La respuesta de picar una tecla central iluminada tenía como consecuencia el que, de manera aleatoria, cinco de cada 100 respuestas (probabilidad de 0.05) causaran que se apagara la tecla central y se encendieran dos teclas laterales. A la tasa que la paloma pica la tecla iluminada, la computadora generaba pseudo picotazos que tenían también una probabilidad de 0.05 de apagar la luz de la tecla central y encender las luces de dos teclas laterales. La tarea para las palomas era discriminar si el apagado de la tecla central era consecuencia de uno de sus picotazos o de los producidos por la computadora, es decir los apagados independientes de su respuesta. Si el apagado dependía de la respuesta de la paloma, entonces la respuesta de picar la tecla derecha permitía acceso a la comida; por otro lado, si el apagado era independiente de su respuesta, entonces el picar la tecla izquierda era la respuesta que producía acceso a la comida. Los errores tenían como consecuencia el apagado de todas las luces por un breve periodo de tiempo. La forma en la cual la paloma informaba sobre su juicio era por sus respuestas a las teclas laterales.

Como veremos en la práctica sobre “teoría de detección de señales”, cuando el organismo identifica correctamente al cambio en la tecla que es dependiente de su respuesta le llamamos un “hit”; por el contrario, cuando el organismo identifica al cambio en la tecla como dependiente de su respuesta cuando en realidad era el resultado de una pseudo respuesta, le llamamos una “falsa alarma”. En la práctica sobre teoría de la detección de señales (poner link), veremos que las respuestas de los animales no dependen exclusivamente de su capacidad para detectar causalidad. En este contexto es que emerge la siguiente pregunta:

¿Cuando los organismos muestran alguna respuesta “supersticiosa”, esta se debe a una falla del mecanismo de discriminación o a las ganancias o costos ligados a emitir una respuesta causalmente errónea? Ponderen que harían ustedes si un hit produjera \$10, y una falsa alarma les restara un peso. Ahora consideren que harían si los hits les otorgaran \$1,000 y las falsas alarmas siguieran teniendo un costo de un peso. Incrementen ahora la ganancia para los hits a \$10,000. Seguramente, conforme la ganancia para los hits fuese incrementando, su estrategia se iría acercando a responder con mayor frecuencia que ustedes produjeron el cambio, aunque la probabilidad real de que esta relación causal sea verdadera se mantiene inalterada. En el experimento, Killeen varió la cantidad de comida que las palomas recibían después de un hit y encontró que las palomas se comportan justo como lo haríamos nosotros.

¿Qué papel juega el tiempo transcurrido entre una respuesta y el encuentro con un refuerzo independiente? ¿Si ha transcurrido un tiempo largo entre una respuesta del organismo y un evento accidental, este todavía le asignará poder causal a su respuesta para dar cuenta de la ocurrencia del evento? En el mismo experimento, Killeen se preguntó acerca del efecto del tiempo transcurrido entre una respuesta y el apagado de la luz generado por la computadora sobre la probabilidad de una falsa alarma. Encontró que las falsas alarmas se reducen conforme ese tiempo se mueve de 0.20 seg. a 1.0 seg. Ver fig. Es decir, a mayor distancia entre la respuesta y el suceso accidental, existe una menor probabilidad de que el organismo le asigne poder causal a su respuesta para explicar la ocurrencia del evento accidental.

6.0.2.1 Conclusiones

De los experimentos presentados podemos alcanzar las siguientes conclusiones:

1. La evolución ha seleccionado mecanismos de aprendizaje que consisten en buscar los mejores predictores de los sucesos biológicamente importantes (SBI).
2. Existen sesgos para reducir el tamaño del espacio de estímulos/respuestas candidatos predictores de SBI.
3. Existen sesgos como la relevancia biológica, la novedad y la contigüidad.
4. La contigüidad es un factor que influye la selección de estímulos/respuestas candidato, pero no es una condición ni necesaria ni suficiente para el aprendizaje.
5. En los casos en los que se considera a compuestos de estímulos como conjuntos de elementos, parece haber competencia entre estos por la asignación de crédito para la predicción del SBI.

6. El crédito asignado previamente a un elemento del compuesto le resta (bloquea) la posibilidad de asignar crédito a otro elemento. Lo anterior significa que no todos los elementos contiguos al SBI necesariamente son considerados como predictores del mismo.
7. La contigüidad estricta entre respuesta y SBI tampoco es necesaria para el aprendizaje de respuestas. Las palomas y las ratas pueden aprender una respuesta aún con demoras de 32 segundos.
8. La mera presentación del refuerzo, independiente de la respuesta, no es suficiente para generar el aprendizaje de una respuesta.
9. La contigüidad estricta no es necesaria para el aprendizaje de respuestas: pero mientras más cercano esté el refuerzo de una respuesta, más fácil es su adquisición.
10. Aún en protocolos en los cuales no es posible la contigüidad accidental entre respuesta y SBI, los animales adquieren la respuesta que genera reforzadores demorados en el tiempo.
11. Las palomas pueden discriminar entre consecuencias dependientes e independientes de su respuesta.
12. El que un organismo juzgue a una consecuencia como dependiente de su respuesta varía en función de la ganancia y el costo asociado a esos juicios.

7 Correlación, Tiempo y Contingencia

En mi juventud, los periódicos más amarillistas de la Ciudad de México tenían titulares de ocho columnas, del tipo “mariguano ataca con un cuchillo a su vecino”. Titulares de este tipo eran utilizados por los noticieros para justificar la prohibición del consumo de la mariguana. Independientemente del debate acerca de su legalización, esos titulares tienen un importante problema que dificulta atribuir al consumo de la droga el ataque perpetuado. El error radica en asignar el crédito del ataque a la mariguana, observando únicamente lo que sucede después del consumo de la droga. Los periódicos y los noticieros debían preguntarse adicionalmente cuántos ataques a vecinos ocurren cuando el atacante **No** está bajo la influencia de la droga. Si el número de ataques a vecinos fuese similar cuando el atacante consumió la droga y cuando este no lo hizo, consideraríamos que el consumo de esta sustancia no se encuentra correlacionado con los ataques. De la misma manera, nos planteamos las dos preguntas sutilmente diferentes pero relacionadas de: ¿cuántos vecinos **No** fueron atacados cuando se encontraron con una persona que **Sí** había consumido la droga? y ¿cuántos vecinos **No** fueron atacados cuando se encontraron con una persona que **No** la había consumido? Si el número de ataques y de no ataques a vecinos en encuentros con otras personas es similar, independientemente de si las personas han consumido la droga o no, consideraríamos que su consumo no está correlacionado con los ataques.

En este capítulo, nos preguntaremos si las palomas y las ratas son sensibles únicamente a lo que ocurre después de un estímulo o de una respuesta o si para la asignación de crédito, estos organismos también contemplan lo que ocurre cuando el estímulo o la respuesta en cuestión no se encuentran presentes. En otras palabras, ahondaremos con mayor profundidad sobre la pregunta de si la contigüidad entre un estímulo (o una respuesta) y un reforzador es un elemento suficiente y necesario para la asignación de crédito.

Los protocolos experimentales presentados en los dos capítulos anteriores tienen en común el variar lo que ocurre después de una estímulo o de una respuesta, ya sea con un refuerzo inmediato o demorado. En 1968, Rescorla introdujo un protocolo experimental que permite manipular lo que ocurre en la presencia y en la ausencia de un estímulo o una respuesta. Al protocolo le llamó *verdaderamente aleatorio*. En lugar de presentar un refuerzo al final del estímulo condicionado (EC), Rescorla varió la probabilidad de un refuerzo durante la presencia y durante la ausencia del estímulo condicionado (ver figura). En su experimento,

Rescorla presentó un estímulo condicionado de una duración de 20 seg. con un intervalo de 2 min. entre cada presentación del EC: a este último periodo se le conoce como el intervalo entre ensayos. Durante ambos periodos de tiempo, la presentación del refuerzo se determina con cierta probabilidad para cada segundo. Las diferencias entre las probabilidades en los dos periodos de tiempo pueden manipularse, de tal forma que la probabilidad de un refuerzo durante la presencia del EC sea mayor o menor que la probabilidad durante el intervalo entre ensayos. En el primer caso, diremos que el EC y el refuerzo están correlacionados positivamente, en el segundo caso diremos que están correlacionados negativamente. Si las probabilidades en ambas duraciones son iguales diremos que ambos elementos no se encuentran correlacionados. La figura x ilustra el espacio de posibles correlaciones. En el eje de las X se presenta la probabilidad de refuerzo durante el intervalo entre ensayos, mientras en el eje de las Y se presenta la probabilidad de refuerzo durante el estímulo condicionado. La línea diagonal representa la falta de correlación entre el EC y el refuerzo. El espacio arriba de la diagonal representa correlaciones positivas y el espacio abajo de la diagonal representa correlaciones negativas. Los puntos cercanos al 1 y al cero, representan las correlaciones más fuertes: en un caso, los refuerzos ocurren exclusivamente durante el EC, en el otro, ocurren casi exclusivamente durante el intervalo entre ensayos.

Usando diferentes medidas de aprendizaje, múltiples experimentos han encontrado que en la condición *no correlacionada* los animales no le asignan crédito al EC. En cambio, cuando la correlación es positiva, los animales aprenden que el EC predice al refuerzo, y por el contrario, cuando la correlación es negativa, los animales aprenden que el EC predice la ausencia del refuerzo. Esos resultados añaden evidencia a la afirmación de que la contigüidad entre el EC y el refuerzo no es una condición suficiente para la asignación de crédito. Cuando es igualmente probable que el refuerzo aparezca en la presencia del EC como en su ausencia, en el entorno del organismo no hay una relación causal entre el EC y el refuerzo. Intuitivamente, en la condición no correlacionada, el EC no proporciona información alguna acerca de la ocurrencia de los refuerzos. Podríamos eliminar del protocolo experimental el EC y no se alteraría la expectativa del organismo acerca de la ocurrencia de los refuerzos. En otro capítulo, veremos que formalizar la noción intuitiva de información ilumina muchos de los hallazgos acerca de la asignación de crédito.

Los organismos no tan solo son sensibles a la correlación entre estímulos y refuerzos, a continuación veremos que también son sensibles a la correlación entre respuestas y refuerzos. Para evaluar si la contigüidad entre la respuesta y el refuerzo es suficiente para asignar crédito o si es necesario que exista una correlación entre estos elementos, Hammond corrió un experimento con una estructura similar al de Rescorla, manipulando la probabilidad de un refuerzo dada la ocurrencia y ausencia de una respuesta. Para lograr igualar la oportunidad de una respuesta y de una no respuesta, Hammond partió el tiempo de la sesión

experimental en segmentos de un segundo de duración. En cada uno de esos segundos el animal puede o no emitir una respuesta; asimismo, este puede obtener o no, con cierta probabilidad, un refuerzo. La probabilidad de obtener un refuerzo en cada segundo dependía de la presencia o ausencia de una respuesta por parte del organismo. En todas las condiciones del experimento, Hammond mantuvo constante la probabilidad de un refuerzo dada la ocurrencia de una respuesta en el intervalo de un segundo, y varió su probabilidad en la ausencia de la respuesta. La probabilidad del refuerzo dada la respuesta fue de 0.05, mientras que la probabilidad de un refuerzo dada la no respuesta fue de cero o de 0.05. La figura x muestra que las ratas no responden en las condiciones experimentales en las cuales las dos probabilidades de refuerzo eran iguales.

7.1 Tiempo

Un problema de dirigir nuestra atención exclusivamente al momento en el que ocurre el estímulo condicionado (EC) o la respuesta, es que solo atendemos a los refuerzos contiguos al EC; en ese sentido, también emerge el problema de ignorar el tiempo entre presentaciones del EC, lo que llamamos el intervalo entre ensayos (TEE). Si la contigüidad estímulo-respuesta fuera la única variable importante para el aprendizaje de comportamientos, entonces manipular la duración del EC relativa a la duración del intervalo entre ensayos no tendría ningún efecto sobre el aprendizaje.

Un escenario hipotético nos hace dudar de la conclusión anterior. Comparemos dos fábricas, en ambas, cada cuatro horas hay 10 minutos de descanso. Pero en una de las fábricas, el período de descanso es precedido por una señal que dura 3 horas y 45 minutos, mientras que en la otra, el descanso es precedido por una señal que dura 10 minutos. Pregúntense si ambas señales les serían igualmente informativas, si les prestarían igual atención a ambas o si una de ellas les permitiría anticipar adaptativamente la ocurrencia del descanso. Intuitivamente, este caso hipotético nos hace pensar que los escenarios con EC con una duración muy larga respecto a la duración de los intervalos entre ensayos (TEE) inducen un menor aprendizaje que los escenarios con EC que tienen una duración más corta respecto a la duración de los TEE.

Gibbon et al. llevaron a cabo justo ese protocolo con ratas para evaluar la importancia de las duraciones del intervalo entre ensayos y del estímulo condicionado. En el experimento, se manipularon dos condiciones: en la primera, se incrementó la duración del estímulo condicionado, manteniendo constante el tiempo del intervalo entre ensayos; y en la segunda condición, se incrementaron ambas duraciones proporcionalmente (por ejemplo, de 4 a 8 y de 48 a 96 segundos, respectivamente). La medida del aprendizaje fue el número de refuerzos necesarios para mostrar aprendizaje. La siguiente figura muestra los resultados. La línea

roja muestra que el número de refuerzos requeridos para el aprendizaje incrementó como función del aumento en la duración del EC, manteniendo constante la duración del intervalo entre ensayos: bajo esta condición, las señales fueron “menos informativas” para los organismos, por lo que el aprendizaje resultó “más difícil”. Por el contrario, incrementar las dos duraciones, manteniendo constante su razón, no tuvo un efecto sobre el número de refuerzos necesarios para el aprendizaje.

Lo anterior indica que los organismos son sensibles a la razón TEE/TEC: si esta razón rebasa un valor, el animal aprende acerca de la importancia del EC. Una forma de entenderlo es suponer que el EC reduce la incertidumbre acerca del momento de ocurrencia de un refuerzo: mientras la razón TEE/TEC sea más grande, mayor es la reducción en la incertidumbre de la entrega. En otras palabras, la asignación de crédito a un estímulo o respuesta depende de que el estímulo condicionado sea breve relativo al intervalo entre las presentaciones del refuerzo. En nuestro ejemplo hipotético, el obrero de la fábrica aprenderá acerca de la señal de 10 minutos que ocurre cada 4 horas, y no de la señal de 3 horas y media de duración.

Conclusiones

Adicionalmente a las limitaciones ya señaladas sobre el papel de la contigüidad en la selección de estímulos/respuestas candidato, cabe agregar las siguientes observaciones:

1. La correlación en el tiempo entre EC y EI es un factor importante en el aprendizaje.
2. Uno de los criterios para identificar un buen predictor de SBI es su duración relativa a la duración del intervalo entre ensayos: en particular, la razón TEE/TEC.

8 Modelo de Aprendizaje por Refuerzo

Como un resultado de la selección natural, los agentes biológicos son sistemas con mecanismos que les permiten detectar, predecir y controlar los sucesos biológicamente importantes (SBI). Recordemos que los SBI son sucesos con valor hedónico, también conocidos como refuerzos, los cuales incrementan el éxito reproductivo diferencial de los organismos. Para ejecutar estas funciones de detección, predicción y control de SBI los organismos necesitan hacer contacto con la estructura causal del entorno: estructura a la cual designamos bajo el término de *propiedades estadísticas del entorno*.

Una parte de la estructura estadística de los SBI consiste de estímulos que se despliegan en el tiempo y en el espacio, los cuales en algunas ocasiones aparecen solos, mientras que en otras instancias aparecen seguidos (contiguos) de un refuerzo. Hay tiempos sin nubes y otros con nubes, estos últimos pueden ser seguidos o no de lluvia. La tarea para el organismo es determinar si existe una relación causal entre las nubes y la lluvia. Una segunda parte de la estructura estadística del entorno consiste del hecho de que, con relación al despliegue de respuestas de los organismos en el tiempo y en el espacio, algunas ocasiones estas respuestas van seguidas de un refuerzo y en otras ocasiones no. Hay veces en las que ustedes le dicen “hola” a una persona y otras en las que no. Después del “hola” ustedes pueden recibir, o no, otro “hola” de regreso. Los protocolos de condicionamiento clásico e instrumental definen, como una primera aproximación, las estructuras causales más simples que se estudiaron en buena parte del siglo XX. En los dos capítulos anteriores, resumimos la literatura empírica acerca del papel de la contigüidad en la asignación de crédito a estímulos y respuestas que permiten *predecir y controlar* los refuerzos. Presentamos evidencia que muestra que aunque la contigüidad es importante, esta no es ni necesaria, ni suficiente para la asignación de crédito.

Para dar cuenta de los resultados empíricos presentados en los capítulos anteriores, en la segunda mitad del siglo XX se consolidó un modelo matemático, conocido como *Aprendizaje por Refuerzo*, junto con varias modificaciones del mismo. El propósito de este capítulo es presentar estos modelos y su desarrollo como respuesta a la evidencia sobre el papel de la contigüidad.