



1

El origen de la inteligencia

Más allá de los límites biológicos

Nunca hemos entendido la mente humana. En septiembre de 1848, un joven llamado Phineas Gage estaba trabajando en la construcción de los primeros ferrocarriles norteamericanos. Su trabajo consistía en volar rocas. Primero perforaba un profundo agujero, después introducía el explosivo y el detonador y por último añadía arena y la compactaba con la ayuda de una barra de hierro.

Aquel día algo debió funcionar mal, porque la pólvora explotó de forma inesperada y la barra de hierro, de 3,2 centímetros de diámetro y más de un metro de longitud, salió disparada del agujero. Su trayectoria no pudo ser más infortunada: le entró a Phineas por una mejilla, perforó su cerebro, salió por la parte superior del cráneo y aterrizó a varios metros de distancia, manchada de sangre y tejido cerebral. Lo montaron en una carreta de bueyes y lo llevaron al médico más cercano, que lo único que pudo hacer fue curarle las heridas de entrada y salida de la barra. Sorprendentemente, logró sobrevivir e incluso volver a trabajar.

Ni el terrible accidente ni la casi milagrosa recuperación tuvieron ningún eco. En cambio, poco después los médicos observaron algo que hizo que Phineas pasase a ocupar un lugar destacado en los libros de Historia de la Ciencia: su carácter había cambiado. Fue

aquel accidente el que hizo ver a la ciencia que nuestra personalidad no reside en un alma intangible, sino en el cableado biológico del cerebro.

Aquello despertó el interés por las bases biológicas de la mente humana y durante siglo y medio creímos que íbamos avanzando por el buen camino. Poco a poco, los neurólogos fueron logrando construir un mapa del cerebro y localizar el origen de la memoria, el lenguaje, la audición, del miedo... Creíamos que entender las piezas era entender el pensamiento, hasta que **una maquina nos hizo ver que íbamos equivocados.**

En el año 2020 los investigadores de OpenAI se quedaron admirados al ver la fluidez con la que GPT-3 traducía de un idioma a otro. Pero no fue eso lo que les extrañó, al fin y al cabo, estaban construyendo un traductor automático, lo que les cogió por sorpresa fue que pudiese razonar y resolver problemas, porque ellos no lo habían diseñado para eso. Hasta ese momento, la ortodoxia científica dictaba que para que un sistema, biológico o artificial, pudiese razonar, necesitaría reglas lógicas, árboles de decisión y motores de inferencia. ¡En cambio, GPT-3 lo hacía sin tener nada de eso! Fue como si hubiesen diseñado una bicicleta para rodar por la calle y de repente la viesen levantar el vuelo y cruzar las nubes.

Aquello fue una confirmación de que los procesos mentales son fenómenos “emergentes” y eso cambia por completo la forma de estudiarlos. Con el cerebro no se puede emplear el enfoque tradicional, basado en fragmentarlo para entenderlo, porque la “emergencia” significa que el “todo” es superior a la suma de las partes y, además, **de naturaleza distinta.**

Recientemente ha surgido un nuevo campo de estudio, la **Neurociencia Computacional**, que no solo estudia el cerebro usando técnicas de neuroimagen, sino que intenta descifrar su funcionamiento con las mismas herramientas teóricas empleadas para el desarrollo

de la Inteligencia Artificial. Científicos de la talla de Karl Friston, Larry Abbott, Terrence Sejnowski o Gustavo Deco están descubriendo que nuestra mente es muy distinta a lo que habíamos imaginado y que su arquitectura tiene muchas similitudes con la de las redes neuronales artificiales.

La IA apenas acaba de llegar, pero una vez que se asiente, provocará una ola de cambios de tal intensidad que diez años nos parecerán un siglo. Serán tan rápidos y profundos que el mundo se volverá muy difícil de entender.

Incluso antes de la IA, el cerebro humano ya había llegado a su frontera. Estamos inmersos en un océano de conocimientos que nadie sabe navegar a solas y frente a sistemas tan complejos que desafían nuestra comprensión. Muchos, abrumados, han decidido rendirse. Pero la historia nos enseña que, cuando nuestra biología alcanza un límite, **nuestra inventiva crea una herramienta.**

No es la primera vez que **nos superamos a nosotros mismos** con la ayuda de las herramientas. Cuando nuestra vista falló, inventamos las lentes, cuando nuestras piernas resultaron lentas creamos el motor. Siempre hemos sabido apoyarnos en “algo más”; incluso hemos construido sistemas digitales como la Wikipedia para organizar y consultar la información.

Sin embargo, el reto actual es más profundo: ya no nos falta información, tenemos demasiada, lo que necesitamos es una herramienta que nos ayude a **pensar, tomar decisiones y orientarnos** en un mundo cada vez más complejo, que pronto no seremos capaces de abarcar.

La solución que necesitamos ya está aquí, es la **Inteligencia Artificial**. Puede procesar mucha más información que nosotros, detectar patrones que se nos escapan y generar ideas que no se nos ocurrirían. Pero, aunque su poder parezca así infinito, es un gigante ciego: carece de nuestro sentido común, de nuestro criterio

y del interés por nuestros valores. **Integrando ambas capacidades**, pensando juntos, podremos lograr resultados que **nunca hubiésemos soñado**.

No se trata de una posibilidad teórica, es una realidad que está ocurriendo ahora mismo. En este instante, miles de profesionales están utilizando la IA no como un buscador, sino como una extensión de su propia mente, alcanzando metas que antes eran físicamente imposibles. **La brecha ya se está abriendo**: quien no aprenda a cabalgar esta ola, estará renunciando a la palanca cognitiva **más potente de la historia**.

Para que esa “hibridación” funcione debemos entender los engranajes de la IA y, sobre todo, las trampas de nuestro propio “software” biológico. Tendemos a pensar que operamos bajo las reglas de la lógica, pero ya veremos que nuestras decisiones están dominadas por los sentimientos y las emociones hasta extremos difíciles de creer. Si ignoramos esos mecanismos, la IA se convertirá en una caja de resonancia que potenciará nuestros errores. Tampoco la IA es rectilínea y transparente, si no conocemos la forma de operar de sus algoritmos, seremos esclavos de sus sesgos y de sus alucinaciones.

La simbiosis del cerebro y la IA nos puede abrir nuevas puertas y permitirnos alcanzar **metas que antes eran imposibles**, pero solo cuando comprendamos las dos, sabremos utilizarlas juntas. Por eso aquí vamos a explorar tres territorios distintos:

- Estudiaremos los fundamentos de la Inteligencia Artificial. De forma sencilla, pero con la profundidad suficiente para entender su funcionamiento interno, especialmente el de los Grandes Modelos de Lenguaje, como ChatGPT.
- Recorreremos los recientes avances de la Neurología y especialmente de la Neurociencia Computacional, para entender nuestros propios procesos mentales. Sobre todo,

los que operan fuera de nuestra consciencia, que son los más decisivos y a la vez los más desconocidos.

- Una vez que conozcamos los mecanismos internos de las “dos inteligencias”, será fácil ver cómo pueden cooperar y cómo podemos conseguir que la inteligencia artificial pase a ser una especie de **extensión de nuestra propia corteza cerebral**.

Quien aprenda a hibridar su pensamiento con la inteligencia artificial no solo será más eficiente, será una versión aumentada de sí mismo: más racional, más creativa y capaz.

El origen del cerebro, la primera inteligencia

El cerebro no fue diseñado para entender el mundo actual. Ni siquiera fue diseñado para pensar. Es un órgano tan anclado en su pasado que no se puede entender sin conocer su historia, por eso vamos a retroceder casi 700 millones de años para poder contemplar sus orígenes.

Carl Sagan ganó el Premio Pulitzer en 1978 con un libro titulado “*Los dragones del Edén*”. Aquella obra, que tuvo una gran influencia sobre la visión del cerebro, se apoyaba en la teoría del “**cerebro triuno**”, propuesta unos años antes por el psiquiatra Paul MacLean. Decía que el cerebro se ha ido desarrollando por capas, que la evolución natural ha ido apilando, unas encima de otras, sin eliminar las anteriores.

Primero se desarrolló una capa “reptiliana”, responsable de las funciones vitales del organismo; después el sistema límbico, que controla las emociones y por último la moderna corteza cerebral, que por eso se llama también neocórtex. El planteamiento de Sagan consistía en que cada capa tiene sus propios objetivos y la gran “victoria” de nuestra especie fue el desarrollo de la corteza, porque es la que nos ayudó a “*domesticar a los dragones interiores*” procedentes de las etapas anteriores.

Aunque sigue siendo muy popular, ahora esta teoría se considera errónea. Entre otras razones, porque el cerebro está totalmente integrado y, además, hoy se sabe que nuestros antepasados nunca fueron reptiles: tenían un aspecto parecido, pero solo eran parientes cercanos que compartían un ancestro común.

Aquí vamos a resumir la visión actual sobre el desarrollo del cerebro. Es una historia dramática que nos ha dejado **huellas indelebles** y aún condiciona nuestras vidas.

Nuestros primeros antecesores fueron una especie de minúsculos gusanos que vivían en el fondo del mar. Se alimentaban filtrando las aguas y algunas de sus células superficiales eran sensibles a los productos químicos. Aquella sensibilidad, que fue la precursora del olfato, les permitía identificar las corrientes con nutrientes. Cuando detectaban una que llevaba alimento, necesitaban dirigirse hacia ella y para eso tenían que actuar sobre una especie de apéndice que hacía de timón. Para que la señal de las células sensibles llegase a los músculos del apéndice, desarrollaron **las primeras neuronas**.

Con el paso del tiempo los gusanos fueron desarrollando más sensores (sentidos), y más sistemas motrices y el número de neuronas fueron creciendo hasta formar el primer embrión de **cerebro**. Los que no lo tenían se morían de hambre mucho más rápidamente y terminaron por desaparecer.

Aquel proto-cerebro **no nació con ningún propósito**, ni siquiera para que no pasasen hambre. La evolución natural nunca tiene propósitos, no tiene alma de diseñador. Cuando hay un problema el diseñador busca una solución, pero la evolución no piensa, lo único que sabe hacer es **“esperar”**. Con el tiempo irán surgiendo cambios genéticos y alguno servirá para resolver el problema. Tampoco tiene que elegir el mejor diseño, de nuevo le basta con **“esperar”**. El tiempo decidirá cuál de las distintas mutaciones es la que sobrevive y se reproduce.

Algunos creen que la historia no fue así, que las primeras neuronas se desarrollaron para resolver un problema más mundano y mucho más urgente: el control de la digestión. No es casualidad que actualmente nuestro sistema digestivo tenga más de cien millones de neuronas, una red tan compleja que se conoce como **el segundo cerebro**. Está conectado con el principal por el nervio vago, pero no es un subordinado, funciona de forma autónoma y puede que sea el auténtico heredero del primer cerebro.

Lentamente, aquellos gusanos se fueron volviendo más complejos y adquiriendo un aspecto parecido al de los peces actuales. Las neuronas encargadas de las funciones vitales básicas, como la respiración y el ritmo cardíaco, comenzaron a concentrarse en el **bulbo raquídeo** y cuando la precisión de los movimientos se hizo vital, se desarrolló el **cerebelo** para hacerse cargo de su control.

Al principio, las profundidades marinas fueron una especie de apacible guardería de seres lentos y torpes. No había ni garras ni fauces, pero aquella paz duro muy poco, enseguida aparecieron animales capaces de digerir la carne de otros y tan rápidos que podían darles caza.

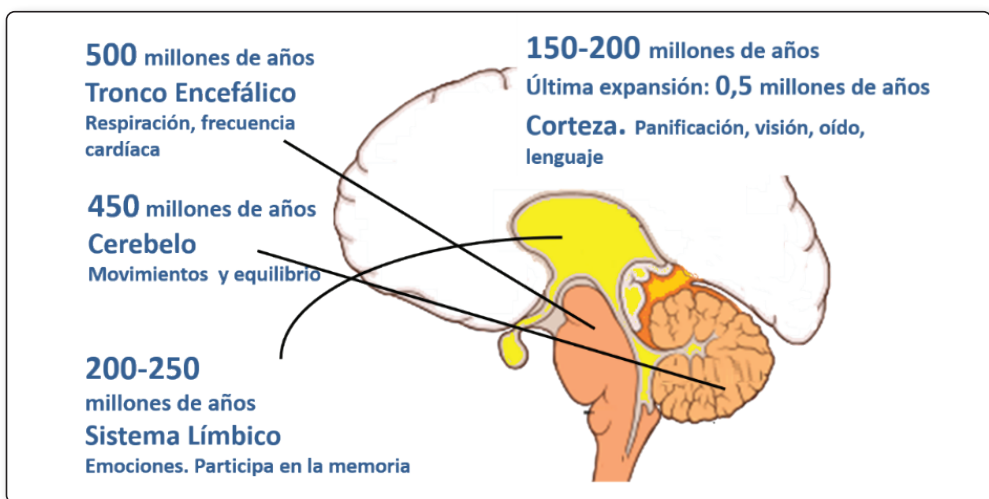


Fig. 1. Cronología aproximada de las principales partes del cerebro

La presión de los depredadores aceleró los cambios evolutivos y surgieron unos circuitos neuronales **capaces de recordar experiencias anteriores**. Fueron los precursores del actual sistema límbico y supusieron una gran ventaja, porque conocer lo que había funcionado bien servía para repetirlo y evitar que la respuesta siempre fuese la huida apresurada. No obstante, aquel recuerdo también supuso la invención del **“miedo”**, un mecanismo extraordinariamente importante para la vida que les ayudó a mantenerse vivos, aunque también les supuso el fin de la calma e incluso de la racionalidad.

La presión de los depredadores se volvió cada vez más intensa. El mayor terror de aquellos mares era el *Dunkleosteus*, un pez acorazado de grandes dimensiones. No tenía dientes, pero tenía unas placas óseas que cortaban la carne como afiladas guillotinas. Ante aquella presión, nuestros antepasados terminaron emigrando. Primero hacia las marismas y las aguas de las orillas, donde sus enemigos más voluminosos no se podían mover con facilidad. Más tarde, fueron transformando las aletas en patas y se aventuraron en tierra firme.

La conquista de aquel nuevo mundo fue lenta y difícil. Necesitaron grandes cambios evolutivos para adaptarse al nuevo entorno, pero durante algún tiempo, no tuvieron prácticamente enemigos.

Aquella paz duró poco, de nuevo la vida se volvió peligrosa y la tensión evolutiva los llevó a consolidar el **sistema límbico**: un eficaz **dispositivo de alarma** y protección **contra todo tipo de peligros**. Es un centro de mando tan eficaz, que puede tomar el control del organismo antes incluso de que el resto del cerebro llegue a procesar la señal de peligro. El gran logro de la etapa marina fue el cerebelo, que les permitió moverse con fluidez en el agua, el de esta etapa fue el sistema límbico. Es posible que sin este sistema, nuestra especie hubiese terminado por extinguirse.

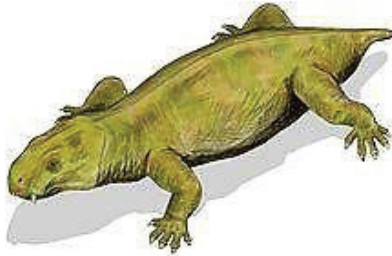


Fig. 2. Dicotyles. Vivió hace casi 300 millones de años y de él descendemos los mamíferos actuales. Crédito Wikipedia y nobu.tamura@yahoo.co

Nuestros antepasados directos siempre fueron **una especie perdedora**, tuvieron que huir del mar y en tierra tampoco les fue demasiado bien. Durante el periodo de los dinosaurios tuvieron que escapar de la luz del día y hacer vida nocturna para esconderse de sus enemigos.

Su suerte empezó a cambiar hace casi 200 millones de años, cuando dejaron de ser ovíparos para transformarse en mamíferos. Entonces un conglomerado de neuronas, que ya tenían anteriormente, inició un intenso desarrollo que terminó dando lugar a la actual corteza **cerebral**. Aquella especie de “**ampliación de memoria**” que les permitió aprender a predecir dónde estarían los depredadores a la mañana siguiente y a construir herramientas para enfrentarse a ellos.

Se podría pensar que una vez desarrollada la potente corteza cerebral sería esta la encargada de tomar las decisiones críticas, pero la evolución no favorece a los sabios que meditan ante el peligro, sino a los supervivientes que saltan antes de preguntar. Por eso, ante la más mínima señal de urgencia o de peligro, sigue siendo el primitivo sistema límbico quien toma el control de la situación, sin detenerse a evaluar si la señal es cierta o falsa.

La última etapa de la expansión de la corteza ocurrió hace medio millón de años, mucho después de que nuestro linaje se separara del de los chimpancés. Pudo haber sido favorecida por un “error” genético; accidentalmente, el gen ARHGAP11A se duplicó y dio lugar al ARHGAP11B, que provoca un mayor crecimiento del número de neuronas y que está presente en todos los humanos modernos. El desarrollo de la corteza fue tan rápido y masivo que el cráneo resultó pequeño y tuvo que plegarse sobre sí misma para caber en el espacio disponible. Ese plegamiento también provocó una mejora de la velocidad de procesamiento, porque acorta la distancia entre las neuronas.

Así fue como unas neuronas que nacieron en el fondo del océano para encontrar comida, tras millones de años de errores, muertes y cambios de estrategia, terminaron formando una estructura cognitiva capaz de transformar el planeta.

La evolución **no nos diseñó para entender el mundo actual**, su propósito era mucho más modesto: ayudarnos a sobrevivir un día más. Por tanto, no nos puede extrañar que las circunstancias actuales lo estén llevando al cerebro contra las cuerdas.

El que hayamos logrado dominar la materia y la energía, e incluso llegar a crear nuevas inteligencias, fue un puro **accidente biológico** y una sorprendente muestra de la capacidad de sus redes neuronales biológicas para adaptarse a las cambiantes circunstancias que han tenido que vivir.

La neurona, la base de la inteligencia

Para saber cómo funciona la inteligencia, sea humana o artificial, tenemos que empezar por entender la neurona.

El transistor es uno de los inventos más trascendentales de la Historia, es la base de los ordenadores y de las telecomunicaciones y por tanto de la mayoría de los avances tecnológicos de las últimas

décadas. Sin embargo, unos 600 millones de años antes de que los Laboratorios Bell inventasen el transistor, la evolución natural ya había descubierto otro mecanismo mucho más versátil: la neurona. Con ella ha ido construyendo sistemas cada vez más capaces, hasta llegar al prodigioso cerebro humano.

El funcionamiento de un transistor es parecido al de un grifo, salvo que en lugar de regular el paso del agua controla el flujo de una corriente eléctrica. El de la neurona es también muy sencillo, es una célula especializada en sumar señales eléctricas. Lo que la distingue a simple vista de otras células de nuestro organismo son sus abundantes ramificaciones (Fig.3). Por un lado, tiene unos filamentos muy delgados, llamados **dendritas**, y por otro un conducto llamado **axón**. Las dendritas reciben corrientes eléctricas procedentes de otras neuronas y, cuando la suma de esas señales excede un cierto umbral, la neurona “se excita” y envía el valor total a través del axón. Esa señal se emplea para alimentar otras neuronas situadas aguas abajo. La zona de contacto entre el **axón** y la siguiente dendrita se llama **sinapsis**, que es el término griego para enlace o unión.

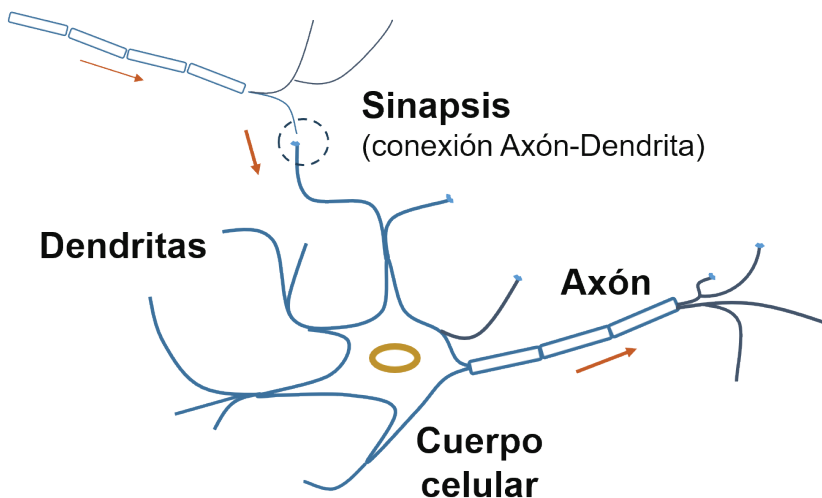


Fig. 3. Las neuronas reciben señales a través de las dendritas, las suman y envían el resultado a otras neuronas a través del axón

Para explicar su funcionamiento en más detalle, vamos a emplear la figura 2, que es un símil de la neurona orgánica, llamado Perceptrón, empleado en la Inteligencia Artificial.

- Las señales de entrada (x_1, x_2, x_3, x_4) llegan a través de las dendritas.
- Cada señal se multiplica por un factor llamado “**peso sináptico**”, cuyo valor explicaremos después. Por tanto, la señal x_1 se convierte en p_1x_1 , la x_2 en p_2x_2 y así sucesivamente.
- Todos esos productos se suman en el cuerpo celular y el resultado ($p_1x_1 + p_2x_2 + p_3x_3 + \dots$) se transmite a través del axón hacia otras neuronas situadas aguas abajo.
- Si el valor de la suma es inferior a un cierto valor “umbral”, la neurona no emite ninguna señal de salida.

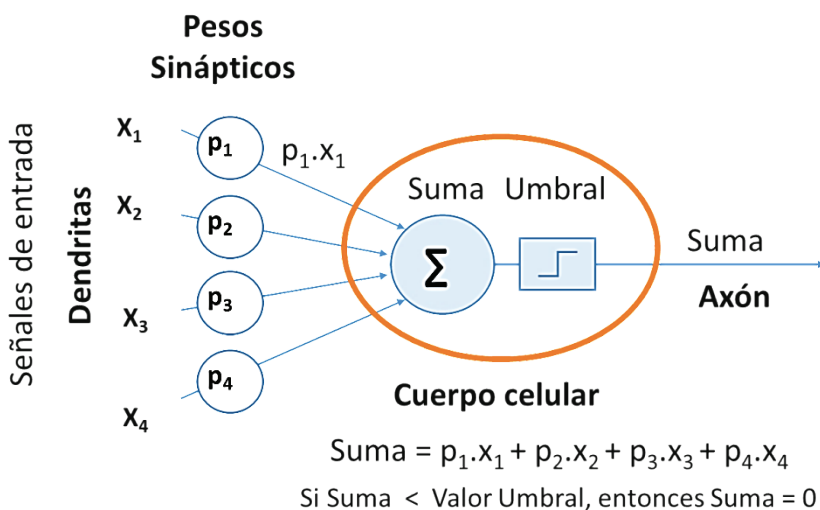


Fig. 4. Símil del funcionamiento de la neurona (Perceptrón). Cada señal de entrada se multiplica por su peso sináptico y después se suman los resultados. Esa suma es la señal de salida y sirve de entrada a otras neuronas situadas aguas abajo

En este sencillo esquema que acabamos de ver, se basan tanto la inteligencia humana como la artificial. Cuando hablemos de las neuronas orgánicas, veremos que tienen varias complejidades que no recoge el Perceptrón. No obstante, no cambian significativamente su funcionamiento.

Cómo aprenden las neuronas

Que una neurona sea capaz de sumar corrientes eléctricas no parece muy impresionante. Lo llamativo es que eso le permita aprender a resolver **todo tipo de problemas**, incluso aquellos que nosotros no sabríamos cómo enfocar. Veamos, por ejemplo, cómo la de la Fig. 4 puede aprender a diagnosticar infartos de miocardio.

Sabemos cuáles son los síntomas más frecuentes del infarto, pero el diagnóstico puede resultar difícil porque también pueden ser debidos a traumatismos o a enfermedades pulmonares. Esos síntomas son:

- Dolor torácico.
- Dolor en el hombro izquierdo o la mandíbula.
- Dificultad para respirar.
- Fatiga y sudoración.

Lo primero que necesitamos, es hacer que cada uno de los síntomas se corresponda una de las dendritas de entrada (ver figura 5). Si en lugar de cuatro, el número de síntomas fuese mayor, necesitaríamos una neurona con más dendritas.

Cada síntoma lo valoraremos del 0 al 1, según sea su intensidad, y lo que queremos es que la suma ($p_1x_1 + p_2x_2 + p_3x_3 + p_4x_4$) sea 1 cuando se trate de un infarto y 0 cuando sea un problema distinto.

Para que la suma se comporte de esa forma, es necesario que sus pesos sinápticos (p_1, p_2, p_3 y p_4) tengan unos valores determinados. De entrada, no sabemos cuáles son esos valores y lo que queremos es que sea **la propia neurona** quien los encuentre.

Para aprender a patinar, no empleamos las matemáticas para calcular los puntos de equilibrio, lo que hacemos es entrenarnos concienzudamente. Con las neuronas sucede algo parecido: vamos ajustando el valor de sus pesos sinápticos hasta dar con los valores correctos; es decir, los que hacen que la neurona se comporte de la forma deseada.

Para hacerlo, necesitamos un centenar de historiales clínicos de pacientes que hayan acudido al hospital con sospecha de infarto y que recojan tanto los síntomas que presentaban como el diagnóstico final. Una vez que tengamos esos informes, el procedimiento es siempre el mismo:

- Le vamos introduciendo datos de casos reales (x_1 a x_4) y calculamos la suma.
- Al principio las sumas darán valores erróneos. Puede que solo sume 0,4 y en realidad fuese un caso de infarto. Entonces lo que hacemos es localizar los pesos sinápticos que parezcan ser “responsables” del fallo y “castigarlos” con un “pequeñísimo” ajuste de su valor (del orden del 1%), en la dirección necesaria para reducir el error.
- Con esta especie de “castigo”, que se le aplica cada vez que la neurona falla, sus resultados irán mejorando, hasta llegar a la perfección.

El valor de la corrección tiene que ser siempre muy bajo. No se trata de resolver el problema con el primer historial, hay que ir muy poco a poco para no dar bandazos; por eso se necesitan tantos historiales clínicos.

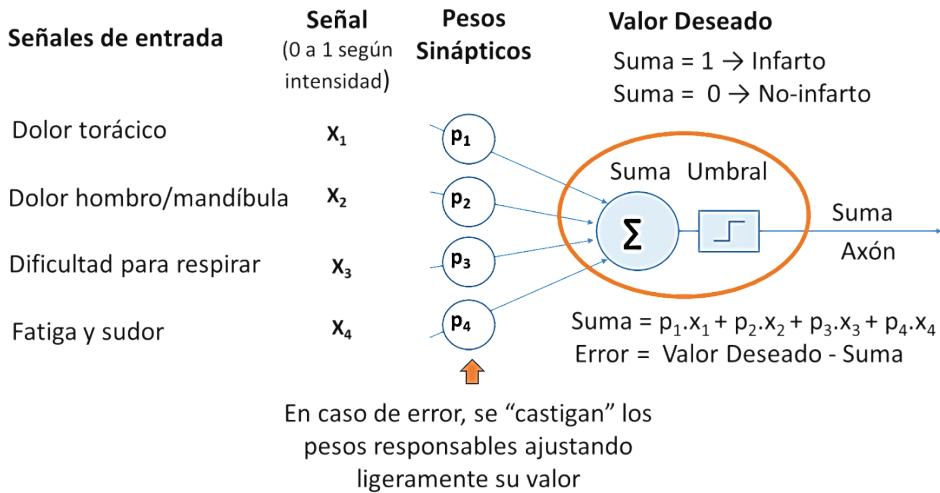


Fig. 5. Ajuste de los pesos sinápticos para detectar infartos. Se comienza con pesos sinápticos al azar y después se emplean historiales clínicos para irlos ajustando, poco a poco, hasta que la neurona acierte siempre con el diagnóstico

Redes neuronales

El Perceptrón que acabamos de ver, lo ideó a finales de los años 50 el psicólogo norteamericano Frank Rosenblatt basándose en las teorías de Ramón y Cajal sobre el funcionamiento de la neurona. Su publicación desató una desbordante ola de optimismo entre los primeros investigadores de la IA. Rosenblatt llegó a afirmar “*esto es el embrión de un ordenador electrónico que será capaz de andar, hablar, ver, escribir, reproducirse y ser consciente de su existencia*”. Incluso el New York Times vaticinó que **el misterio de la mente estaba a punto de ser resuelto**.

Sin embargo, Marvin Minsky no estaba de acuerdo. Rosenblatt y Minsky eran amigos de la infancia. Habían ido a la misma escuela y, aunque el primero estudió Psicología y el segundo Matemáticas, mantenían desde entonces una clara rivalidad. Minsky, que por entonces ya era profesor en el Instituto Tecnológico de Massachussets publicó en 1969 un libro **despectivo y demoledor** demostrando que el Perceptrón de su amigo Frank solo servía para resolver problemas totalmente banales.

Como Minsky tenía un enorme prestigio, el libro desanimó a los investigadores e incluso provocó el corte de los fondos del gobierno de EEUU para investigar las redes neuronales. Años más tarde, Minsky terminó admitiendo su error, pero para entonces el daño ya estaba hecho y el humillado Rosenblatt ya había muerto en un naufragio el día de su 43 cumpleaños.

Lo que Minsky y los investigadores de la época tardaron en entender es que para resolver los problemas complejos, que superaban la capacidad del Perceptrón, bastaba con interconectar entre sí un elevado número de ellos. Quizás hubiesen reaccionado antes si hubiesen leído los trabajos de Lorente de Nó, un discípulo de Cajal que dedicó toda su vida al estudio de las redes neuronales.

En el caso de la Inteligencia Artificial, la forma más frecuente y sencilla de encadenar los perceptrones para formar una red neuronal es la indicada en la Fig. 6. En la primera capa están las neuronas que reciben los datos de entrada y en la última las encargadas de proporcionar los resultados.

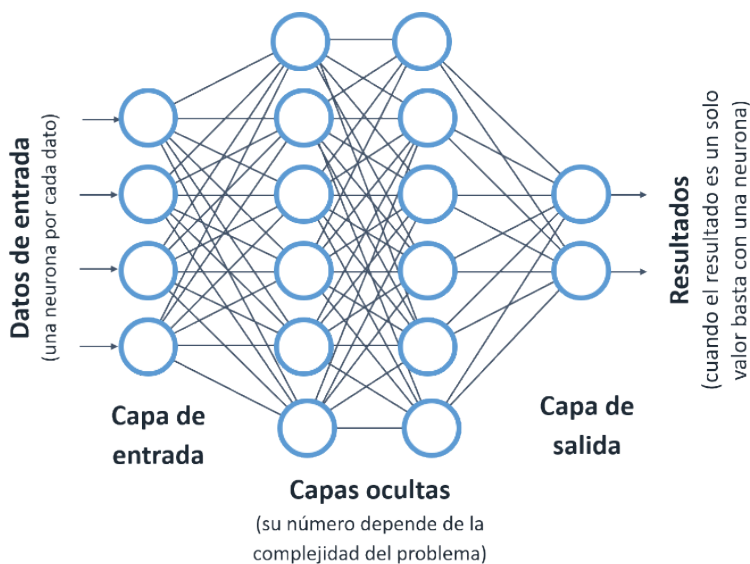


Fig. 6. Red neuronal de cuatro capas. Cada círculo representa una neurona y cada línea una dendrita con su correspondiente peso sináptico

En la inteligencia artificial, no existen cables físicos que conecten neuronas como sugiere la Fig. 6; se trata de programas informáticos que simulan ese proceso. Aunque se pueden programar en cualquier lenguaje, el más utilizado es Python. Actualmente, crear una red es algo sencillo y accesible para todos. Para codificar una red como la de la Fig. 6 basta con pedirle que lo haga a una Inteligencia Artificial como ChatGPT. En la Fig. 7 se muestra un ejemplo del código Python.

```
import tensorflow as tf

# 1. Definir arquitectura (3 capas)
model = tf.keras.Sequential([
    tf.keras.layers.Dense(8, activation='relu', input_shape=(4,)),
    tf.keras.layers.Dense(1, activation='sigmoid')
])

# 2. Configurar aprendizaje
model.compile(optimizer='adam', loss='binary_crossentropy')

# 3. Entrenar
model.fit(X, y, epochs=10)
```

Fig. 7. Código Python de una red neuronal de tres capas, con cuatro neuronas en la capa de entrada, ocho en la oculta y una en la de salida

Supongamos que queremos entrenar una red neuronal para que aprenda a identificar **fotos que contengan perros**. Nosotros no sabríamos explicarle que debe hacer para distinguir entre un animal y una cosa inanimada; ni tampoco cómo diferenciar entre un perro y un gato o un cachorro de león. Pero la red no necesita ese tipo de ayuda, **solo necesita datos**.

El procedimiento para entrenar la red (Fig. 8) es similar al que acabamos de explicar para el caso de una sola neurona:

- Necesitaremos millones de fotos, unas con perros y otras con otros tipos de objetos y de animales.

- Le vamos mostrando las fotos una a una y cuando se equivoque, introducimos un “ligero ajuste” en los pesos sinápticos culpables del error, igual que hicimos en el ejemplo anterior.
- La red irá acertando cada vez más, hasta acercarse a la perfección.

Los ordenadores no ven las fotos como las vemos nosotros, para ellos solo son conjuntos de píxeles, pero no vamos a entrar ahora en esos detalles porque los explicaremos más adelante al hablar de la generación de imágenes.

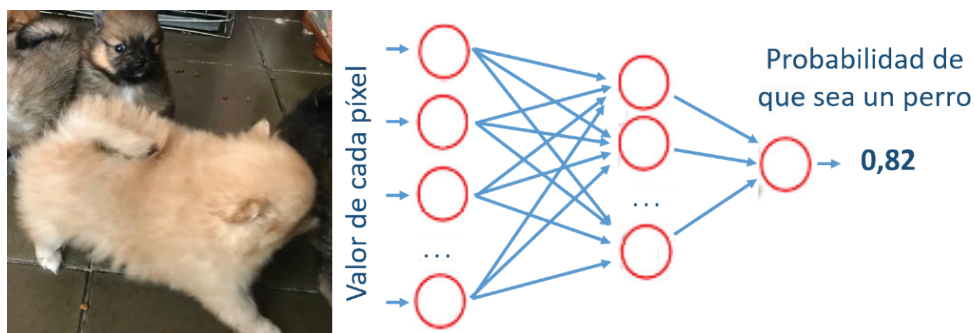


Fig. 8. Entrenamiento de una red neuronal para reconocer fotos con perros

Una vez entrenada, la red neuronal sabe que un San Bernardo es un perro y en cambio un cachorro de león es de otra especie distinta ¿cómo los distingue?, ¿qué criterios utiliza?

No es fácil responder a estas preguntas. Durante el entrenamiento, las redes aprenden a detectar cientos de características comunes a todos los perros que son las que después les sirven para distinguirlos. Pero no son los diseñadores, es la propia red la que determina esas características distintivas. **No tenemos ninguna forma directa de averiguar cuáles son** ni cómo las elige, porque lo único que

podemos ver al entrenarla es una maraña de cientos de miles de pesos sinápticos cuyo análisis excede la capacidad humana. Lo que sabemos es que buscan características mucho más **abstractas** que las que emplearíamos los humanos.

Lo más **sorprendente** es que, una vez entrenadas, las redes neuronales **saben cosas que nunca se le han enseñado**. Hay algunas especies de lobos que no se distinguen de los perros, sin embargo, la red neuronal puede hacerlo, aunque sea la primera vez que los ve ¿cómo sabe que no son perros? La explicación parece estar en que no se limita a recordar datos, sino que se centra en encontrar “reglas generales” que **nosotros somos incapaces de percibir**.

Ya iremos viendo que cuantas más capas tiene una red más asombroso y difícil de explicar se vuelve su comportamiento. Llega un momento, en el que **desafían por completo nuestra capacidad de comprensión** y empiezan a resultar incluso inquietantes.

El aprendizaje humano

Nuestro cerebro aprende de forma parecida a las redes neuronales artificiales. Cuando un niño está aprendiendo a montar en bicicleta, necesita caerse docenas de veces y volverlo a intentar, porque no está tratando de descubrir las leyes del equilibrio, está ajustando los pesos sinápticos de sus redes neuronales.

A pesar de ello, hay grandes diferencias con el aprendizaje de la IA, debido sobre todo a que nuestros ciclos vitales son muy distintos. Antes de que una nueva versión de ChatGPT salga al mercado, ha pasado por un masivo programa de entrenamiento en el que ha asimilado una enorme cantidad de conocimientos. Pero a partir de ese momento ya **nunca más vuelve a aprender**. Hay algunos modelos que pueden seguir aprendiendo, pero generalmente será muy poco en comparación con los conocimientos de partida. En cambio, nosotros nacemos casi a cero y luego no dejamos de aprender ni un