

PROLOGO

A pagina 25 del numero dell'8 luglio 1958 del *New York Times* era presente una notizia piuttosto straordinaria. Il titolo recitava: “Un nuovo dispositivo della Marina Militare impara agendo: uno psicologo mostra l’embrione di un computer progettato per leggere e diventare più saggio”. Il paragrafo di apertura alzava ulteriormente la posta in gioco: “La Marina ha rivelato oggi l’embrione di un computer elettronico che si prevede sarà in grado di camminare, parlare, vedere, scrivere, riprodursi ed essere consapevole della propria esistenza”.

Con il senno del poi, l’iperbole è ovvia e imbarazzante. Ma il *New York Times* non aveva tutte le colpe. Alcune di quelle considerazioni esagerate provenivano da Frank Rosenblatt, psicologo e ingegnere della Cornell University. Rosenblatt, finanziato dall’Office of Naval Research degli Stati Uniti, aveva inventato il “perceptron”, o “perceptrone”, una versione del quale fu presentata in una conferenza stampa il giorno prima che il *New York Times* pubblicasse la notizia. Secondo Rosenblatt, il perceptron sarebbe stato il “primo dispositivo a pensare come il cervello umano” e avrebbe potuto essere inviato su altri pianeti come “esploratore spaziale meccanico”.

Non successe nulla di tutto ciò. Il perceptron non fu mai all’altezza delle aspettative. Ciononostante, il lavoro di Rosenblatt fu assolutamente fondamentale. Quasi tutti i corsi sull’intelligenza artificiale (AI) citano il perceptron. Ed è giustificato: il momento storico che stiamo vivendo, con l’arrivo dei cosiddetti Large Language Model (LLM), come ChatGPT e i suoi simili, è un vero e proprio boom tecnologico. La nostra risposta a questo fenomeno, che alcuni hanno paragonato a ciò che accadde negli anni 1910 e 1920, quando i fisici si dovettero confrontare con la stravaganza della meccanica quantistica, ha le sue radici nella ricerca iniziata da Rosenblatt. Nella storia raccontata dal *New York Times* c’era una frase che accennava alla rivoluzione che il perceptron avrebbe messo in moto: “Il dottor Rosenblatt afferma di poter spiegare perché

la macchina apprende solamente usando dei termini altamente tecnici”. L’articolo, tuttavia, non conteneva nessun dettaglio “altamente tecnico”.

Questo libro invece sì: affronta proprio i dettagli tecnologici. Spiega l’elegante matematica e gli algoritmi che, per decenni, hanno stimolato ed entusiasmato i ricercatori nel campo dell’“apprendimento automatico” o “machine learning”, un tipo di AI che prevede la costruzione di macchine in grado di imparare a discernere modelli, nei dati, senza essere esplicitamente programmate per farlo. Le macchine, opportunamente addestrate, possono cioè rilevare modelli simili in un nuovo set di dati, rendendo possibili applicazioni che vanno dal riconoscimento delle immagini di cani e gatti alla realizzazione, almeno potenzialmente, di auto completamente autonome e altre tecnologie ancor più futuristiche.

Le macchine possono imparare grazie alla straordinaria sinergia fra matematica e informatica, con l’aggiunta di un pizzico di fisica e neuroscienza.

L’apprendimento automatico (ML) è un campo vasto, popolato da algoritmi che fanno leva su una matematica relativamente semplice che risale a secoli fa, una matematica che si impara alle scuole superiori o all’inizio dell’università. Parleremo, ovviamente, di algebra elementare, ma una pietra miliare del machine learning è il calcolo infinitesimale dell’analisi matematica, co-inventato da un genio come Isaac Newton. Il machine learning si basa anche sul lavoro di Thomas Bayes, statistico e ministro inglese del XVIII secolo, che formulò l’omonimo teorema di Bayes: un contributo fondamentale nel campo della probabilità e della statistica. Inoltre, il lavoro del matematico tedesco Carl Friedrich Gauss sulla distribuzione gaussiana (a campana) permea anch’esso l’apprendimento automatico. E poi c’è l’algebra lineare, che costituisce la spina dorsale del machine learning. La prima esposizione di questa branca della matematica è contenuta in un testo cinese di duemila anni fa. La versione moderna dell’algebra lineare affonda le sue radici nel lavoro di molti matematici, ma soprattutto di Gauss, Gottfried Wilhelm Leibniz, Wilhelm Jordan, Gabriel Cramer, Hermann Günther Grassmann, James Joseph Sylvester e Arthur Cayley.

A metà degli anni Cinquanta del secolo scorso, la matematica di base che si sarebbe rivelata necessaria per la costruzione di macchine in grado di apprendere era già disponibile, ma i matematici continuarono a sviluppare nuove conoscenze e a far progredire il campo dell’informatica. Pochi avrebbero potuto immaginare che quei primi progressi matematici sarebbero stati alla base degli stupefacenti sviluppi nel campo dell’AI, avvenuti nell’ultimo mezzo secolo, in particolare nell’ultimo decennio. Adesso possiamo legittimamente immaginare

una parvenza del tipo di futuro che Rosenblatt aveva prefigurato, in modo troppo ottimistico, negli anni 1950.

Questo libro racconta la storia di un viaggio straordinario, dal perceptron di Rosenblatt alle moderne “reti neurali profonde” o “deep neural network” (reti composte da unità computazionali chiamate “neuroni artificiali”), attraverso la lente di ingrandimento delle idee matematiche che sono alla base del campo dell’apprendimento automatico. All’inizio il testo si addentra molto dolcemente nella matematica, per poi, poco alla volta, aumentare la difficoltà, passando dalle idee relativamente semplici degli anni Cinquanta alla matematica e agli algoritmi un po’ più complessi che alimentano i sistemi di machine learning moderni.

Per questo motivo, abbracceremo senza paura equazioni e concetti provenienti da almeno quattro grandi campi della matematica: algebra lineare, calcolo infinitesimale, probabilità/statistica e teoria dell’ottimizzazione, in modo tale da acquisire le conoscenze teoriche e concettuali minime necessarie per apprezzare l’impressionante potere che stiamo conferendo alle macchine. Solo quando avremo compreso l’inevitabilità del machine learning saremo pronti ad affrontare un futuro in cui l’AI sarà onnipresente, nel bene e nel male.

Entrare nel vivo della matematica dell’apprendimento automatico è fondamentale per capire non solo la potenza della tecnologia, ma anche i suoi limiti. I sistemi di machine learning stanno già prendendo decisioni che ci cambiano la vita: approvano le carte di credito e i mutui ipotecari, determinano lo stadio di avanzamento di un tumore, stabiliscono la prognosi di una persona in declino cognitivo (si ammalerà di Alzheimer?) e decidono se concedere la libertà provvisoria a qualcuno. L’apprendimento automatico sta permeando anche la scienza: sta influenzando la chimica, la biologia, la fisica e tutto il resto. Viene utilizzato nello studio dei genomi, dei pianeti extrasolari, delle complessità dei sistemi quantistici e molto altro ancora. E, mentre sto scrivendo, il mondo dell’AI è in fermento per l’avvento dei modelli linguistici denominati “Large Language Model”, come ChatGPT. La palla è stata appena lanciata.

Non possiamo però lasciare solo ai suoi ideatori le decisioni sul modo in cui l’AI sarà costruita e impiegata. Se vogliamo regolamentare efficacemente questa tecnologia estremamente utile, ma dirompente e potenzialmente minacciosa, anche altri strati della società (educatori, legislatori, comunicatori scientifici e perfino i semplici utilizzatori dell’AI) devono affrontare la matematica alla base dell’apprendimento automatico. Nel suo libro *Is Math Real?*, Eugenia Cheng scrive del processo graduale di apprendimento della matematica: “Ci può sembrare di procedere con passi molto piccoli e che non stiamo arrivando da nessuna parte, ma poi, improvvisamente, ci guardiamo alle spalle

e scopriamo di aver scalato una montagna gigantesca. Le difficoltà ci possono sconcertare, ma l'accettazione di un po' di disagio intellettuale (a volte molto) è parte essenziale del progresso nel campo della matematica".

Fortunatamente, il "disagio intellettuale" che ci attende è facilmente sopportabile e più che compensato dal "guadagno intellettuale", perché alla base del moderno ML c'è una matematica relativamente semplice ed elegante, una nozione che è illustrata meglio con un aneddoto riguardante Ilya Sutskever. Oggi Sutskever è conosciuto soprattutto come cofondatore di OpenAI, l'azienda alle spalle di ChatGPT. Più di dieci anni fa, quando era un giovane studente universitario alla ricerca di un tutor accademico presso l'Università di Toronto, Sutskever bussò alla porta di Geoffrey Hinton. Hinton era già un nome noto nel campo del "deep learning", una forma di apprendimento automatico, e Sutskever voleva lavorare con lui. Hinton diede a Sutskever alcuni documenti da leggere, che egli divorò. Ricorda di essere rimasto perplesso dalla semplicità della matematica, rispetto alla matematica e alla fisica dei suoi normali corsi di laurea. Poteva leggere questi documenti sull'apprendimento profondo e comprendere concetti potenti. "Com'è possibile che sia così semplice... così semplice da poterlo spiegare agli studenti delle scuole superiori senza troppi sforzi?", mi raccontò. "Penso che sia davvero miracoloso. Per me è anche un'indicazione che probabilmente siamo sulla strada giusta. Non può essere una coincidenza che concetti così semplici arrivino così lontano".

Naturalmente, Sutskever aveva già delle conoscenze matematiche sofisticate, quindi ciò che sembrava semplice per lui potrebbe non esserlo per la maggior parte di noi, me compreso. Vedremo.

Questo libro vuole raccontare la semplicità concettuale che sta alla base del machine learning e del deep learning. Non vuol dire, però, che tutto quello che stiamo vedendo oggi nell'AI, in particolare il comportamento delle deep neural network e dei large language model, sia analizzabile con una matematica semplice. In realtà, l'epilogo di questo libro ci porta in un luogo che alcuni potrebbero trovare sconcertante, mentre altri lo troveranno esaltante: le reti neurali e l'AI stessa sembrano ignorare alcune delle idee fondamentali che per decenni sono state alla base dell'apprendimento automatico. È come se l'evidenza empirica avesse spezzato la "schiena dell'asino" del campo teorico, nello stesso modo in cui le osservazioni sperimentali del mondo naturale, all'inizio del ventesimo secolo, diedero un colpo di coda alla fisica classica. Abbiamo bisogno di qualcosa di nuovo per dare un senso all'incredibile mondo che ci aspetta.

Mentre facevo ricerche per questo libro, notai uno schema di apprendimento personale che mi ricordò il modo stesso in cui le moder-

ne reti neurali artificiali imparano: a ogni passaggio che l'algoritmo effettua sui dati impara qualcosa in più sugli schemi che esistono in tali dati. Un solo passaggio può non essere sufficiente, né dieci, né cento. A volte le reti neurali imparano dopo decine di migliaia di iterazioni sui dati a loro disponibili. Questo è il modo in cui studiai l'argomento per poterne poi scrivere. Ogni passaggio attraverso qualche ambito di questa vasta base di conoscenze fece sì che alcuni neuroni del mio cervello creassero nuove connessioni, sia in senso fisico che metaforico. Le cose che non avevano senso la prima o la seconda volta, con i passaggi successivi lo acquisivano.

Ho così scelto di utilizzare questa tecnica per aiutare i lettori a creare dei collegamenti simili: nel corso della stesura di questo libro ho ripetuto idee e concetti, a volte usando la stessa identica formulazione e, altre volte, sfruttando una diversa interpretazione del medesimo concetto. Queste ripetizioni e riformulazioni sono intenzionali: rappresentano un modo con cui la maggior parte di noi, che non siamo matematici o specialisti di ML, ci avviciniamo a un argomento teoricamente semplice, ma a prima vista complesso. Una volta esposta un'idea, il nostro cervello può scorgere degli schemi e creare delle nuove connessioni quando incontra altrove quella stessa idea, dandole più senso di quanto ne aveva a prima vista.

Spero che ai vostri neuroni questo processo piaccia tanto quanto è piaciuto ai miei.