

Fuzzy logic ed ecologia

Cristina Da Rold

Con l'avanzare della tecnologia, anche il mestiere dell'ecologo si evolve, presupponendo competenze informatiche sempre più approfondite. Anno dopo anno si sviluppano nuovi modelli in grado di valutare quantitativamente parametri sfuggibili e misurare fattori intrinsecamente incerti. Nel frattempo anche le problematiche ambientali si arricchiscono di nuove variabili. Studiare un ecosistema, cioè costruire un modello che lo descriva e che permetta un'analisi scientifica, richiede conoscenze, tempi e strumenti sempre più complessi

All'interno dei modelli matematici per l'ecologia vi è spesso il problema di riuscire a quantificare le espressioni che descrivono gli ecosistemi e di tradurli con un linguaggio informatico attraverso un sistema formale che ne preservi il più possibile le sfumature. L'incertezza infatti è insita nella scienza. Vi è l'incertezza dell'errore e quella del modello o della misura. Vi sono sistemi in cui si osserva un'alta incertezza di stato, come i sistemi di gestione degli impianti, e sistemi invece ad alta incertezza funzionale, come tutto ciò che ha a che vedere con la meteorologia e l'oceanografia. Negli anni per entrambe queste tipologie di incertezza, gestionale e funzionale, sono state studiate tecniche in grado di trattare le sfumature, quantificarle con precisione, e uno di questi metodi, non certo l'unico, è la logica *fuzzy*.

Come è noto, i nostri computer funzionano sostanzialmente attraverso un sistema binario, tutto ruota cioè intorno a due valori di verità possibili: il vero e il falso, il sì e il no, lo 0 e l'1. Un po' come un interruttore che può essere acceso o spento. Se consideriamo una qualsiasi frase che pronunciamo, i sistemi logici classici ci diranno due cose: primo, che quel proferimento può essere o vero o falso; infine, che quando è vero è vero al 100%, quando è falso lo è al 100%.

LA VERITÀ NON È UNA SOLA

secondo la logica *fuzzy*, invece, le cose possono andare diversamente e una frase può dirsi vera anche se non lo è del tutto. I sistemi *fuzzy* sono stati sviluppati più di quarant'anni fa a partire da un'idea di Lofti Zadeh, un matematico e ingegnere statunitense oggi quasi centenario, e ri-

entrano in quelle che vengono definite logiche a più valori di verità, in cui cioè ogni concetto può avere un certo grado di verità: essere per esempio vero all'1%, al 56%, al 71% o anche al 100%. Sistemi formali i cui modelli comprendono l'incertezza al loro interno, non come fattore che aumenta l'imprecisione della teoria stessa, ma come informazione aggiunta che il modello utilizza nell'elaborazione dei dati. Evidentemente qui non si sta parlando di riconsiderare i parametri chimico fisici usati comunemente per la valutazione degli ecosistemi. La *fuzzy logic* è piuttosto una tecnica computazionale, una possibilità di categorizzare le asserzioni del linguaggio naturale in modo da inserirle come input all'interno di un processo informatico.


La domanda che potrebbe sorgere a prima vista è la seguente: perché dovrebbero interessarci teorie come questa in un settore così empirico come l'ecologia? La risposta è tripla: primo, poiché gli ecosistemi sono realtà complesse non lineari, multidimensionali e ricchi di gradienti ambientali; secondo, perché le valutazioni ecologiche prima ancora che essere quantitative sono qualitative, usano cioè il linguaggio naturale prima di quello numerico; terzo, perché la continua varietà dei fattori chimici e fisici rende i dati ambientali per loro natura vaghi e mutevoli, difficilmente definibili con precisione millimetrica. La *fuzzy logic* offre anzitutto un modello non lineare basato sul concetto di vaghezza e per questo ha la sua ragion d'essere come tecnica ecologica.

L'idea alla base di questo sistema è quindi molto semplice, ma dal punto di vista matematico risulta più articolata rispetto al sistema classico a due valori di verità,

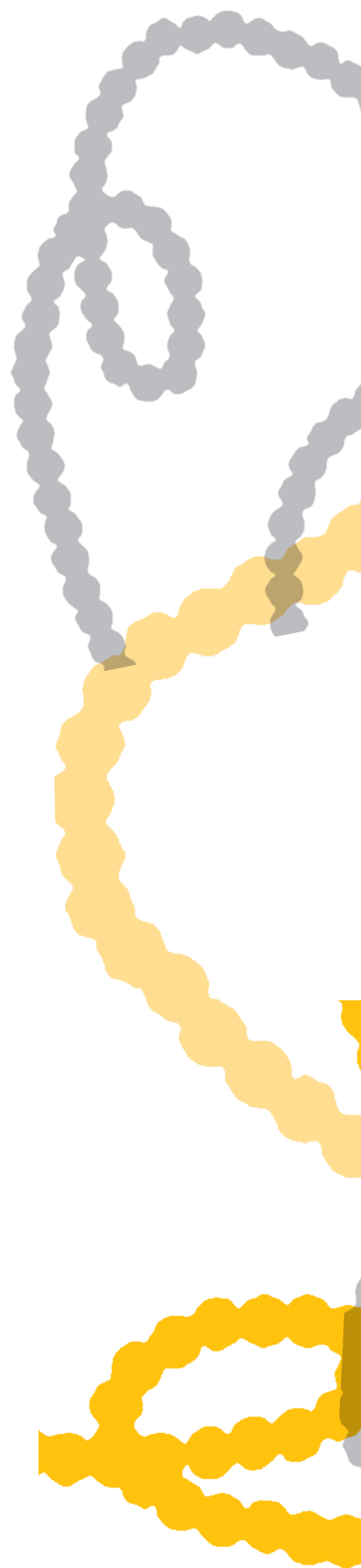


0 e 1, secondo cui se un qualcosa è vero, lo è al 100%, cioè con grado di certezza pari a 1. Secondo il sistema *fuzzy*, infatti, ogni espressione come “a is a *good* environment” può avere un valore di verità compreso nell’insieme dei numeri reali fra 0 e 1, un insieme quindi infinito di possibilità, così come è infinito l’intervallo dei numeri reali [0,1]. Una differenza che fa sì che alcune espressioni possano essere classificate all’interno dell’analisi qualitativa come “più vere” di altre. Evidentemente questo concetto vale anche nel caso in cui si esprimano delle proprietà, come ad esempio la proprietà “essere inquinato”. In termini logici, se un certo lago *a* possiede la proprietà “essere inquinato” con grado 0,6 e un lago *b* la possiede con grado 0,5, significa che *a* è più inquinato di *b*. Rispetto alla logica classica siamo in grado quindi di quantificare dal punto di vista computazionale un’informazione in più, e cioè non solo che sia *a* che *b* appartengono all’insieme dei laghi inquinati, ma che *a* è più inquinato di *b*.

Ciò che è interessante di una teoria logica sono però i suoi possibili risvolti pratici e, in questo senso, negli ultimi 15 anni sono state proposte strategie *fuzzy* in diversi ambiti: dall’ecologia del paesaggio [Steinhardt, 1998], allo studio dei cambiamenti climatici [Scherm, 2000], dall’inquinamento dell’aria [Fisher, 2003], alla qualità dell’acqua [Liou, 2003], solo per citare alcuni esempi. Anche in Italia sono diversi i gruppi a livello universitario che studiano le possibili applicazioni di questi sistemi formali, a partire appunto dall’ecologia: uno di questi gruppi si trova a Pavia, presso il Dipartimento di Scienze della Terra e dell’Ambiente, dove da anni si analizzano le applicazioni della lo-

 I “modelli *fuzzy*” comprendono al loro interno l’incertezza come informazione aggiunta che viene utilizzata nell’elaborazione dei dati

gica *fuzzy* all’ecologia marina. Nella città lombarda, già a partire dal 1998 un team di ricercatori ha pubblicato diverse ricerche sull’argomento e negli anni si è costituito un piccolo team di ricercatori che si occupa anche di formare gli ecologi sul tema *fuzzy logic*. Anche nello scorso febbraio, ad esempio, si è tenuto presso il Dipartimento un corso curato annualmente da Agnese Marchini, nell’ambito





del dottorato internazionale Erasmus Mundus – MARES (*Doctoral Programme on Marine Ecosystem Health and Conservation*).

Il meccanismo è semplice e può essere rappresentato come una macchina di Turing: si prende un input numerico o un'espressione nel linguaggio naturale, la si "fuzzifica", si compiono le operazioni che si desiderano fare su di esso ottenendo un output numerico *fuzzy*, che poi viene "defuzzificato", producendo l'output vero e proprio della nostra ipotetica macchina di Turing. Entriamo ora nel vivo di questa macchina di Turing. Il primo step è appunto la "fuzzificazione", tramite una funzione detta *membership function* che determina per ogni input il grado di appartenenza all'insieme *fuzzy* di riferimento. In altre parole, se l'input è a e l'insieme "l'insieme di tutti i laghi inquinati", si attribuisce a ogni input, incluso a , un numero compreso nell'intervallo reale fra 0 e 1, cioè fra l'assoluta falsità e l'assoluta verità. A questo punto verranno eseguite le eventuali operazioni matematiche ottenendo un altro valore, sempre *fuzzy*, che significherà anch'esso una certa appartenenza a un insieme, che rappresenta quanto a appartiene all'insieme di tutti gli elementi inquinati. In altre parole, quanto a è inquinato. Eseguire questa operazione per più elementi (b , c ,...) permette di creare una scala ordinata di questi elementi a seconda del grado di inquinamento.

Infine, il numero può essere "defuzzificato", cioè tradotto in termini di linguaggio naturale, che produce un valore di verità "ambiguo" ma corretto al posto di uno all'apparenza più preciso, ma scorretto, e quindi realmente inutile all'analisi qualitativa in ambito ecologico.



Queste teorie sono utili in ecologia perché gli ecosistemi sono realtà complesse non lineari e multidimensionali

Per fornire risultati questo metodo deve essere compatibile con gli approcci non *fuzzy*, quelli che vengono definiti *crisp*. Proviamo a entrare nel merito con un esempio semplice di applicazione della *fuzzy logic* all'ambito ecologico. L'esempio in questione riguarda i sei settori della laguna veneziana (bocche, vivificato, eutrofo mosso, eutrofo calmo, urbano, dissalto), che sono stati descritti proprio in uno studio del

gruppo pavese, usando un modello *fuzzy*. La descrizione di questi settori era stata fatta preventivamente in modo qualitativo e l'obiettivo era tradurre queste considerazioni all'interno di un modello matematico. La tecnica utilizzata, come si diceva, si compone di tre momenti: la "fuzzificazione", cioè la traduzione del linguaggio naturale in input numerici *fuzzy*, l'elaborazione numerica che produce inferenze, e infine, eventualmente, la "defuzzificazione", cioè la riconversione dei risultati numerici *fuzzy* in linguaggio naturale. Nell'esempio che stiamo considerando, il primo passo è stata l'individuazione delle variabili. Lo studio ne individua quattro: abbondanza di specie marine, abbondanza di specie lagunari, abbondanza di specie dissalate e abbondanza totale della comunità. Ognuna di queste variabili è stata poi descritta utilizzando tre insiemi *fuzzy* relativi a tre livelli di abbondanza, cioè scarsa, media e elevata. Valutando ogni regola su ognuno dei sei output considerati (cioè ognuno dei sei settori) quello che si ottiene è il grado di appartenenza dell'input a ciascuno dei sei settori ecologici. Si può scoprire per esempio che un dato input ha un grado di appartenenza minore al settore "urbano" rispetto a quello "vivificato", ma maggiore rispetto al settore "eutrofo mosso".

Dall'esempio emergono dunque in maniera evidente due elementi: primo, che qui a fare davvero la differenza non sono le regole logiche quanto piuttosto le scelte preliminari dell'ecologo, scelte che si traducono anzitutto nell'individuazione degli input, degli output e delle loro relazioni, oltre alle strategie di fuzzificazione che devono riflettere l'obiettivo dello scienziato. Secondo, che allo stesso tempo le operazioni di somma o di moltiplicazione sono funzioni, operatori logici, con regole matematiche precise, e proprio questa è una delle maggiori difficoltà che incontra l'ecologo che desidera avvicinarsi alle tecniche della *fuzzy logic*. Una complessità insomma, che richiede precise competenze di logica di base e di algebra, incluse raramente nella formazione del professionista in ecologia.