

Archeologia e Calcolatori
14, 2003, 97-110

LA LOGICA FUZZY E LE SUE APPLICAZIONI ALLA RICERCA ARCHEOLOGICA

1. RICERCA ARCHEOLOGICA E CLASSIFICAZIONE TIPOLOGICA

La classificazione tipologica dei materiali costituisce uno degli strumenti principali per l'individuazione della cultura a cui appartiene un sito archeologico (TRIGGER 1968). Per raggiungere questo scopo, i manufatti oggetto della classificazione vengono infatti raggruppati, ad esempio secondo il materiale (ceramica, pietra, metallo, e così via), e quindi analizzati e descritti, classificandone gli attributi secondo tipi di riferimento definiti *a priori* in base a una particolare tipologia (TIXIER 1967), significativa per il caso in esame. Il principio su cui ci si basa è che ogni cultura archeologica può essere descritta da un insieme di caratteristiche, espresso nella cultura materiale come un gruppo di tipi unici che lo rappresentano (HOURS 1974) che deve comparire in un lasso di tempo ben definito, delimitando una situazione culturale statica (WILLEY, PHILLIPS 1958). Perciò, un aspetto fondamentale della ricerca archeologica, cioè l'individuazione dell'appartenenza culturale di un sito, si basa sulla classificazione tipologica (WHITTAKER *et al.* 1998) che è, secondo BORDES (1950, 1961), la scienza che permette il riconoscimento, la definizione e la classificazione di strumenti (ad esempio litici) rinvenuti in un sito; la stessa cosa vale per i tipi ceramici o qualsiasi altro raggruppamento di cultura materiale.

L'accuratezza della ricerca tipologica è dunque direttamente influenzata dalla capacità di definire l'insieme dei tipi significativi che rappresentano una cultura; essi devono avere due caratteristiche di base: identità e significato. Come già riconosciuto in passato, i tipi sono definiti in parte intuitivamente e in parte razionalmente, in parte in base alla natura dell'oggetto e in parte in base alle sue caratteristiche. Pertanto molte liste tipologiche sono politetiche, e non ci sono criteri fissi di "tipicità": i tipi archeologici sono in generale distinti l'uno dall'altro in termini di "norme" o tendenze centrali piuttosto che in base a delimitazioni ben precise che li separano l'uno dall'altro (ADAMS, ADAMS 1991). Così, anche se la maggior parte di tipi "ideali" sono definiti in base a criteri precisi, "scientifici" (vedi per esempio BORDES 1950; LAPLACE 1966), l'interpretazione del materiale archeologico analizzato e la sua classificazione nei tipi previsti è largamente influenzata dall'esperienza del ricercatore, com'è riconosciuto da Demars e Laurent: «...le bon typologiste perçoit avec l'expérience après avoir analysé quelques milliers de pièces...», spendendo una buona quantità di tempo «...au course de longs tête-à-tête avec les outillages lithiques...» (DEMARS, LAURENT 1992, 30).

Come di recente evidenziato (BISSON 2000), ci sono stati negli ultimi anni vari sforzi per ridurre o eliminare la soggettività della ricerca tipologica, con la proposta di tipologie alternative (LAPLACE 1966), o l'applicazione di metodi statistici (BAILEY 1994; READ, RUSSELL 1996; SHOTT 2000; DJINDJIAN 2001), oppure valutando con metodi bayesiani l'“errore soggettivo del tipologista” (ad esempio READ 1989; WHITTAKER *et al.* 1998; GNADEN, HOLDAWAY 2000). Il punto debole di questi metodi è che essi si basano sull'ipotesi che i tipi abbiano una definizione precisa, con confini chiari e non soggetti a interpretazione, e che il processo di classificazione tipologica sia poi guidato dalla logica aristotelica. Tuttavia, questa logica non è applicabile in tutti i casi in cui è richiesta una valutazione del ragionamento umano, per sua natura più approssimato che esatto.

I logici hanno proposto vari approcci per affrontare il problema del ragionamento approssimato, specialmente estendendo il campo dei valori di verità di una proposizione, ma in genere rispettando il principio che in una deduzione l'antecedente deve coincidere esattamente con la premessa (YING 1994). Traducendo tutto ciò nel campo della ricerca tipologica, possiamo asserire che un certo oggetto può essere classificato in un certo tipo quando l'insieme degli attributi che definiscono quest'ultimo sono riconoscibili anche nell'oggetto.

In conclusione, ad alcune domande base della ricerca archeologica come “A quale cultura appartiene un determinato sito?” e “Qual è la natura di un determinato sito?” si può rispondere con l'analisi della relativa cultura materiale e in particolare con la sua classificazione tipologica. Infatti, la ricerca tipologica è basata sull'ipotesi che ogni cultura sia definita da un insieme preciso di tipi di oggetti caratteristici e che ogni tipo sia definito da un insieme preciso di attributi. Tale insieme, data l'appropriata lista di tipi, può essere riconosciuto da qualunque ricercatore competente. In tutti i passaggi di questo tipo di ricerca si applica, dunque, la logica booleana, anche se non sempre le caratteristiche che definiscono una specifica cultura sono tutte presenti nei materiali analizzati, i tipi utilizzati non hanno delimitazioni precise e la loro definizione comprende attributi intuitivi, e dunque, come già mostrato in vari esempi (HERMON, NICCOLUCCI 2002), l'identificazione è soggetta a differenti interpretazioni da parte di ricercatori diversi. Perciò un procedimento di per sé già arduo, come caratterizzare una “cultura” sulla base della classificazione degli strumenti da essa utilizzati, potrebbe essere inficiato da un'erronea, o quantomeno imprecisa, interpretazione di tali strumenti.

Un altro settore che presenta difficoltà di classificazione analoghe è quello, apparentemente assai diverso, delle ricerche basate sullo scavo delle necropoli. In questo caso sono state già lucidamente analizzate le difficoltà di comprendere una civiltà di vivi basandosi su una civiltà di morti, che è l'unica cui possiamo in qualche modo accedere (D'AGOSTINO 1985). A ciò si aggiungo-

no problemi simili a quelli sopra descritti, soprattutto quando si va ad analizzare il corredo delle sepolture: è infatti determinante attribuire correttamente il sesso e l'età di ciascun defunto. Per l'attribuzione del sesso ci si potrebbe basare sull'analisi del DNA, ma non sempre ciò è possibile per l'assenza di materiali organici adatti o per problemi di carattere tecnico-organizzativo. Ci si basa quindi più frequentemente su considerazioni di carattere archeologico relative al corredo funerario, oppure sui risultati di un'indagine di antropologia fisica, che utilizza metodi basati su elementi statistici, come ad esempio quello di ACSÁDI e NEMESKÉRY (1970).

Si potrebbe osservare che utilizzare il corredo per l'attribuzione del sesso in base a ipotesi di carattere culturale ("se c'è una spada, è un maschio") e quindi trarre delle conclusioni sempre di carattere culturale, che almeno in senso lato includono anche queste ipotesi, in quanto basate su tali attribuzioni, introduce nel ragionamento una *petitio principii*; si tratta tuttavia di un circolo vizioso per lo più innocuo, perché le ipotesi sono corroborate da una serie di argomenti indipendenti ("per vari motivi ho ragione di ritenere che questa è la cultura X; so da altre indagini che nella cultura X la spada è associata a tombe maschili"), ma questa innocuità resta tale finché l'argomento non è spinto troppo in dettaglio, come invece spesso avviene ("se c'è una spada, è un maschio adulto di cetò elevato").

L'aiuto dell'antropologia fisica è in un buon numero di casi solo apparente: capita infatti che dai resti non si possa determinare con precisione l'età, e in qualche caso neppure il sesso, e quindi la tomba viene etichettata, ad esempio, come "Maschio? Giovane?". Andando a guardare i dati di scavo si scopre infatti che non di rado sono più le attribuzioni con punto interrogativo di quelle senza. Nel trarre le conclusioni, in questi casi, il ricercatore si affida dunque a dati imprecisi: perché la scienza non è in grado di classificare la tomba nella tipologia dei sessi (in questo caso si tratta di incapacità di assegnare l'oggetto tomba a uno dei due tipi maschile o femminile); oppure perché la classificazione di riferimento si serve di concetti imprecisi, come le fasce d'età "giovane", "adulto", "anziano" che in generale non sono definiti in base a delimitazioni precise e immutabili. In conclusione, l'attribuzione del sesso e dell'età si basa spesso su elementi imprecisi, anche quando risultati di carattere scientifico forniscono informazioni importanti; l'indagine archeologica è quindi costretta a prendere delle decisioni rispetto alla classificazione anche quando si è in presenza di tali elementi di incertezza, facendo diventare certo quello che certo non è.

L'alternativa che proponiamo in questo articolo è di usare i concetti della logica fuzzy tutte le volte che il processo scientifico-deduttivo utilizza tipologie imprecise, come i tipi archeologici e le culture archeologiche o, per altri versi, le fasce d'età dei defunti, oppure quando l'informazione di cui si è in possesso non consente di assegnare con certezza l'"oggetto" a una tipologia ben definita, come la distinzione fra i sessi.

2. LA LOGICA FUZZY

La teoria fuzzy si basa sul concetto che la logica Vero-Falso è quasi sempre inapplicabile alla realtà e molti dei concetti che utilizziamo quotidianamente sono semplificazioni, talvolta grossolane, di categorie dai contorni sfumati; ciò è particolarmente vero per quanto riguarda la classificazione, che è peraltro uno strumento ineliminabile del nostro modo di pensare e di esprimerci. Questa considerazione nasce da alcuni paradossi, come quello di Sorite (da quante monete è composto un mucchio? Se ne togliamo una, resta un mucchio? E quando, continuando a toglierne, cessa di essere tale?), che sono presenti anche nelle scienze “esatte”, o come il paradosso di Woodger in biologia (MC NEILL, FREIBERGER 1993) o, infine, come i numerosi paradossi della geografia (dove finisce la pianura e inizia la montagna?).

Per trattare questi e altri casi simili, negli anni '60 è stata creata la logica fuzzy (ZADEH 1965; ZIMMERMANN 1984) che sostituisce alla tradizionale logica binaria Vero-Falso una logica basata su un *continuum* di stati di verità minore (valore 0) o maggiore (valore 1). Dunque si tratta di un sistema formale che opera su valori logici compresi nell'intervallo $[0, 1]$ anziché sui soli valori 0 e 1 come quella booleana. Analogamente alla dualità tradizionale fra logica e insiemistica (Vero-Falso corrisponde a Appartenente-Non appartenente) si può definire il concetto di insieme fuzzy, che anzi è il punto di partenza della costruzione del sistema formale, e quindi l'appartenenza fuzzy: un insieme fuzzy è, in termini discorsivi, un insieme i cui contorni sono sfumati, non ben definiti. Per un determinato oggetto, non si può stabilire quindi se appartiene o no a tale insieme, ma solo “quanto” gli appartiene.

Il vantaggio della logica fuzzy sta quindi nel consentire di esprimere il concetto di appartenenza in situazioni per le quali questa non può essere agevolmente definita (MCALLISTER 1985), ma soprattutto, dal punto di vista della comunicazione, nel poter esprimere con chiarezza e senza ambiguità il valore soggettivo che si attribuisce a tali asserzioni. A nostro modo di vedere quest'ultimo è l'aspetto più significativo per i nostri scopi. In molte applicazioni l'obiettivo è “de-fuzzificare”, cioè individuare procedimenti che, eliminando l'ambiguità, consentono di prendere delle decisioni. Non è questo, però, il caso delle applicazioni di cui stiamo trattando: l'ambiguità, se riconosciuta, va accuratamente conservata e comunicata come una delle caratteristiche del caso in studio. Come vedremo, ciò non è possibile usando ad esempio un DBMS (Data Base Management System) di tipo tradizionale, per cui situazioni ambigue come la necropoli di cui sopra divengono assolutamente certe quando sono archiviate in un database: occorre anche in questo caso utilizzare strumenti nuovi.

Si consideri il seguente esempio relativo allo studio di un campione di tombe della necropoli etrusca di Pontecagnano (NICCOLUCCI *et al.* 2001). L'ana-

lisi osteologica ha determinato per un defunto un'età compresa fra 22 e 30 anni e per un altro un'età compresa fra 23 e 39. Quale dei due deve essere considerato più giovane? L'intuito direbbe il primo, ma non è vero. Infatti l'analisi osteologica è di carattere statistico ed occorre considerare le "code" della distribuzione che ad un livello di confidenza del 5% danno un *range* di 2,56 anni per il primo e 5,12 anni per il secondo. Quindi l'intervallo di età, considerando anche le code ad un livello di confidenza del 5%, è 19,44 - 32,56 per il primo soggetto e 17,88 - 44,12 per il secondo. A questo punto, chi è il più giovane?

Dunque, quando vi è incertezza nell'attribuzione di un oggetto a una categoria, l'atteggiamento giusto non è quello di creare una categoria di "Varie" in cui allocare tutti gli oggetti incerti, perché si rischia di perdere così informazioni importanti (COPELAND 1997); né, tantomeno, assegnare gli oggetti a qualche categoria, con una decisione che gli elementi disponibili non autorizzano a prendere. Una possibile soluzione è invece assegnare un grado di appartenenza, cioè un numero compreso fra 0 e 1, che esprime il nostro livello soggettivo di "confidenza" nell'assegnazione in questione.

Questa definizione fornisce la risposta alla domanda che tutti fanno quando si introduce la logica fuzzy: ma come si valuta questo coefficiente di appartenenza? La risposta è, appunto: "soggettivamente" (che non significa arbitrariamente). È una risposta nel solco di una tradizione di approccio soggettivo all'incertezza che ha visto fra i suoi maggiori esponenti Bruno De Finetti (DE FINETTI 1970) per la teoria delle probabilità e Leonard Savage (SAVAGE 1972) per la statistica.

Si potrebbe anche dire che per questo coefficiente non esiste un valore "giusto" e altri "errati", ma che esso è l'esplicitazione in termini numerici di una serie di elementi valutati soggettivamente dal ricercatore, in cui confluiscono la sua esperienza, la sua intelligenza e la sua correttezza scientifica. In alcuni casi è possibile appoggiarsi ad altri elementi quantitativi per assegnare un valore numerico a questo coefficiente di appartenenza, come nel caso della valutazione del sesso dei defunti per la quale ci si può basare sul coefficiente già citato di Acsàdi e Nemeskéry per calcolare il coefficiente fuzzy (NICCOLUCCI *et al.* 2001); in altri, come ad esempio per il concetto di "adulto", ci si può basare su aspetti più o meno empirici, per cui certe età di sicuro non corrispondono al concetto di adulto (valore fuzzy 0), certe età di certo vi corrispondono (valore fuzzy 1) e per la fascia "grigia" delle età intermedie si assegna un valore intermedio ottenuto o per interpolazione lineare (NICCOLUCCI *et al.* 2001) o con funzioni matematiche più complesse ma più "arrotondate", ad esempio di tipo sinusoidale; in altri casi ancora, il coefficiente esprime semplicemente una valutazione del tutto individuale (ma non arbitraria!) dell'esperto che sta eseguendo la classificazione e che con questo coefficiente espone alla comunità scientifica le sue certezze (o incertezze).

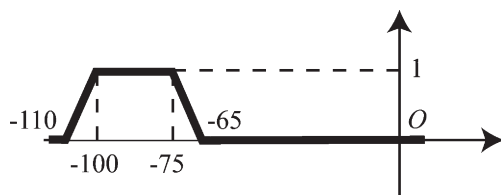


Fig. 1 – Funzione di appartenenza per l'espressione “Primo quarto del I° secolo a.C.”

La Fig. 1 rappresenta una funzione fuzzy di appartenenza, corrispondente all'espressione temporale “primo quarto del I° secolo a.C.”: certamente vi appartengono gli anni che vanno dal 100 a.C. al 75 a.C., mentre il limite per la non appartenenza si può (soggettivamente) indicare come 10 anni prima e 10 anni dopo.

La scelta di utilizzare un *range* di 10 anni prima e dopo, ciascuno pari al 40% dell'intervallo di validità, è del tutto soggettiva ed esplicita la confidenza che il ricercatore è in grado di attribuire alla propria assegnazione cronologica e il senso che assegna a un'espressione di uso così largo quanto nebuloso; a seconda dei casi tale *range* (la “coda” statistica) potrà essere più o meno ampio.

Quanto sopra espresso in termini discorsivi trova una sistemazione rigorosa in termini logico matematici, per la quale si rinvia alla bibliografia sopra citata sulla teoria degli insiemi fuzzy. Basterà qui ricordare che su queste basi è possibile definire operatori logici analoghi a quelli booleani come AND e OR. Ad esempio, date due proposizioni A e B con coefficienti fuzzy rispettivamente f_A e f_B , allora $C = A \text{ AND } B$ ha un coefficiente $f_C = \min(f_A, f_B)$ e $A \text{ OR } B$ ha un coefficiente fuzzy $\max(f_A, f_B)$.

Le considerazioni precedenti mostrano l'utilità metodologica di adottare la logica fuzzy nelle situazioni di incertezza e come queste siano presenti, almeno in teoria, in alcuni casi importanti nella ricerca archeologica. Resta, forse, il dubbio che tutto ciò sia di qualche utilità pratica. Gli esempi che seguono, relativi ad alcuni casi già pubblicati (NICCOLUCCI *et al.* 2001; HERMON, NICCOLUCCI 2002, 2003; HERMON *et al.* c.s.), mostreranno dunque come in varie circostanze, riferite a situazioni di ricerca affatto diverse, il mancato utilizzo della logica fuzzy potrebbe portare a erronee conclusioni. Si tratta sempre di situazioni in cui gli errori indotti da tante piccole semplificazioni si cumulano in misura tale da poter alterare, in modo significativo, il risultato finale.

3. DATABASE FUZZY E APPLICAZIONE A UNA NECROPOLI

Il problema archeologico preso in esame (CRESCIOLI *et al.* 2000; NICCOLUCCI *et al.* 2001) consiste in un campione di tombe della necropoli etrusca di Pontecagnano, e precisamente quello edito da A. SERRITELLA (1995). Il volume

in cui sono pubblicati i dati di scavo, oltre a presentare i risultati dell'indagine, fornisce anche i dati grezzi, fra cui quelli dell'indagine antropologica condotta sui resti. Una semplice analisi statistica mostra tuttavia che l'attribuzione del sesso non è immediata e infatti molte tombe presentano attribuzione incerta.

Si è perciò creato un sistema di gestione dei dati in cui viene conservata l'incertezza delle attribuzioni di sesso, età e datazione, introducendo nel database in cui si archiviano i dati di scavo la possibilità di gestire valori fuzzy sia nel caso di "etichette" (maschio, femmina) sia per valori numerici (età, datazione).

Ciò ha reso necessario sviluppare nuovi tipi di dato, nuovi operatori e nuove funzioni, sfruttando la possibilità del DBMS Postgres di creazione di tipi di dati, costanti e funzioni definiti. Si sono così create le seguenti definizioni:

– Il tipo di dato FUZZY_LABEL, definito come un insieme di n etichette predefinite, comuni a tutti i dati, e un insieme di n numeri compresi fra 0 e 1 associati ad ognuna di queste e variabili per i diversi soggetti; ad esempio, FUZZY_GENDER, che appartiene a questa tipologia, ha le 2 etichette comuni {"M"; "F"}, ed ogni entità "defunto" possiede come attributo una coppia di numeri, ad esempio (0,7; 0,4), che ne specificano l'appartenenza rispettivamente ai due sessi. Le costanti di questo tipo di dato sono, ad esempio, MASCHIO = (1; 0), FEMMINA = (0; 1).

– Il tipo di dato FUZZY_VALUE, definito come un insieme di n coppie di numeri di cui il secondo compreso fra 0 ed 1; tali numeri rappresentano i vertici della funzione fuzzy di appartenenza. Questo tipo di dato si applica a tutti gli attributi quantitativi, come l'età e la datazione. Per la funzione descritta nel caso precedente, ad esempio, si avrebbero questi valori: {(-110; 0); (-100; 1); (-75; 1); (-65; 0)}. Alcune costanti relative all'età sono, ad esempio, GIOVANE = {(13; 0); (15; 1); (20; 1); (22; 0)}, ADULTO = {(16; 0); (21; 1); (40; 1); (45; 0)}; così, un'età di 14 anni è definita come GIOVANE al livello 0,5 (cioè 50%).

– L'operatore FUZZY_EQUAL che consente di valutare la "somiglianza" fra due soggetti rispetto a uno stesso attributo fuzzy, etichetta o valore. Tale operatore associa a due attributi fuzzy un numero fra 0 e 1 determinando, per ogni caso possibile, il minore dei due coefficienti fuzzy relativo a quel caso (cioè il più basso livello soggettivo di confidenza per quel caso), quindi calcolando il massimo di tali valori per tutti i casi possibili.

Ad esempio fra i due FUZZY_GENDER seguenti FG1 = (0,8; 0,4) e FG2 = (0,3; 0,4), i due valori da confrontare sono $\min(0,8; 0,3) = 0,3$ e $\min(0,4; 0,4) = 0,4$ e quindi la somiglianza fra i due è al livello $\max(0,3; 0,4) = 0,4$. Il motivo della definizione è il seguente: per ogni possibile caso, ci si pone prima di tutto dal punto di vista, per così dire pessimistico, di cercare la corrispondenza peggiore; nell'esempio precedente la possibilità che entram-

bi siano maschi va valutata sul meno probabile dei due casi. La somiglianza fra i due soggetti si valuta poi globalmente rispetto alla possibilità che essi corrispondano allo stesso caso, indipendentemente da quale esso sia, quindi il massimo dei valori calcolati in precedenza. Per comodità si indica l'operatore con il simbolo \sim e quindi si può scrivere:

$$(FG1 \sim FG2) = 0,4$$

leggendo tale formula come “la somiglianza fra FG1 e FG2 è al livello 0,4”. Altri esempi possono illustrare le motivazioni:

$((0,9; 0,6) \sim (0,3; 0,9)) = 0,6$ la possibile somiglianza è affidata all'appartenenza al genere F;

$((1; 0,2) \sim (0,5; 0,5)) = 0,5$ il secondo soggetto determina la somiglianza, vedi anche:

$$((0; 1) \sim (0,5; 0,5)) = 0,5$$

Questa definizione si dimostra dunque “ragionevole”. In termini matematici essa risulta la seguente: dati due soggetti X e Y e uno stesso attributo fuzzy a avente A come insieme di possibili valori, la somiglianza, o uguaglianza fuzzy, fra X e Y rispetto ad a è definita come:

$$\max (\min (a_x(x), a_y(x)) \text{ per } x \in A$$

Un'applicazione immediata riguarda i conteggi e le percentuali. Usando l'approccio tradizionale, per conteggiare il numero di tombe contenenti donne o quelle contenenti bambini è necessario assegnare definitivamente ciascuna sepoltura ad una determinata categoria, anche nei casi incerti. Un'erronea attribuzione potrebbe però inficiare le conclusioni, dato l'alto numero di attribuzioni insicure. Con l'approccio fuzzy, è invece possibile trasferire nel conteggio gli elementi di incertezza aggiungendo il valore del coefficiente fuzzy, quindi calcolando un numero totale ponderato in base ai coefficienti fuzzy, che comprende l'approccio tradizionale come caso particolare, essendo in questo caso il coefficiente sempre uguale a 1. Negli articoli sopra citati è illustrato un esempio di tale conteggio e le conseguenze di carattere archeologico che ne derivano, per quanto riguarda l'interpretazione di tre distinte aree della necropoli.

4. APPLICAZIONI ALLA CLASSIFICAZIONE DEI MATERIALI

Un'altra applicazione della metodologia fuzzy riguarda la classificazione dei materiali. Il primo esempio, descritto dettagliatamente da HERMON, NICCOLUCCI 2002, 2003 e di cui riassumeremo la metodologia e le conclusioni, si riferisce a un insieme di manufatti litici provenienti da un sito protostorico nella parte meridionale dello Stato di Israele. Secondo l'approccio tradizionale, si fornisce una lista di possibili tipi e ogni oggetto è assegnato a uno,

e uno solo, di questi. Dunque, rispetto ai vari tipi, per ciascun oggetto viene assegnato il valore 1 a un tipo soltanto, mentre a tutti gli altri si assegna il valore 0. Per calcolare la composizione dell'insieme si contano gli oggetti appartenenti ai diversi tipi (sommando cioè tutti i valori 1), si calcolano le percentuali e si traggono conclusioni basate su queste percentuali.

Per adottare l'approccio fuzzy, si utilizza invece una tabella come la seguente:

	Tipo A	Tipo B	Tipo C	...	R
Oggetto 1	0,6	0,2			0,45
Oggetto 2	1		1		0,5
Oggetto 3		0,7			0,7
...					
N. di oggetti	1,6	0,9	1
R	0,625	0,545	1		0,296

Spiegheremo subito il significato e le modalità di calcolo dell'indice R. Per quanto riguarda la costruzione della tabella, il metodo adottato è il seguente. Si consideri l'oggetto 1. Si è abbastanza sicuri che appartenga al tipo A, ma c'è una possibilità, piccola, che appartenga al tipo B. Il coefficiente viene quindi assegnato pari a 0,6 per l'appartenenza al tipo A e 0,2 al tipo B. L'oggetto 2 appartiene sicuramente al tipo A o al tipo C, ma non siamo in grado di scegliere fra i due (ad esempio perché la caratteristica discriminante tra i due tipi manca dall'oggetto). Per l'oggetto 3, l'unica possibilità, con qualche incertezza, è che appartenga al tipo B.

Il valore dei coefficienti è deciso dal ricercatore con una metodologia esplicita e precisa, ma soggettiva, ad esempio:

- Si considerano le caratteristiche specifiche di ogni tipo e si assegna un valore proporzionale al coefficiente; così, supponendo che il tipo A sia caratterizzato da 5 elementi, e ne riscontrano solo 3 nell'oggetto 1, mentre se il tipo B caratterizzato da 10 attributi ne sono presenti 2 nell'oggetto 1 e 7 nell'oggetto 2.
- Il coefficiente numerico esprime un "voto" di affidabilità (ad es. "certo" = 1, "quasi certo" = 0,75 ecc.) attribuito sulla base dell'esperienza del ricercatore.

Per il conteggio e per il calcolo delle percentuali, si utilizzano i valori fuzzy come mostrato nell'esempio.

L'indice R che compare nella tabella esprime l'affidabilità dell'assegnazione ed è ottenuto con la formula seguente. Se x_1, x_2, \dots, x_m sono i coefficienti fuzzy relativi ai tipi 1, 2, ... m, il coefficiente di affidabilità è:

$$R(x_1, x_2, \dots, x_m) = \frac{\left(\max_k x_k\right)^2}{\sum_k x_k}$$

definendo $R = 0$ se tutti gli x_1, x_2, \dots, x_m sono nulli.

La *ratio* di tale formula può essere spiegata così. L'affidabilità dipende direttamente dalla "migliore" assegnazione che si può fare (max x_k a numeratore) e inversamente dal numero (e dal valore) delle assegnazioni alternative che sono possibili (la somma a denominatore). Il quadrato a numeratore è necessario per evitare che il numeratore possa semplificarsi con il denominatore fornendo valori incongrui. Ad esempio se tutti gli x_1, x_2, \dots, x_m sono nulli, eccetto $x_1 = 0,01$ (assegnazione incertissima al tipo 1 che esclude gli altri tipi), con la formula suddetta si ottiene il valore plausibile $R = 0,01$ mentre senza il quadrato si avrebbe il risultato incongruo $R = 1$.

Si verifica facilmente che R è compreso fra 0 e 1, che vale 0 se e solo se tutti gli x_1, x_2, \dots, x_m sono nulli (assegnazione impossibile) e vale 1 se e solo se uno degli x_1, x_2, \dots, x_m è 1 e tutti gli altri sono 0 (assegnazione certa).

Il valore di R può essere calcolato anche per le colonne, e in questo caso rappresenta la significatività di un determinato tipo per l'insieme di oggetti. Nell'esempio precedente il tipo C risulta significativo, mentre A e B hanno una significatività abbastanza bassa.

È anche possibile calcolare nello stesso modo il coefficiente R globale che rappresenta l'affidabilità globale dell'insieme di oggetti, nell'esempio precedente essa risulta molto bassa, essendo $R = 0,296$. Ciò significa che le conclusioni che si possono trarre da tale insieme di oggetti rispetto a questa classificazione tipologica sono decisamente incerte.

La medesima metodologia è stata applicata a un certo numero di casi di studio fornendo in più d'uno interpretazioni alternative aventi un chiaro significato archeologico.

Nel primo caso (HERMON, NICCOLUCCI 2002) si è preso in esame un insieme di 50 oggetti provenienti dal sito dell'Età Media del Bronzo di Beer Resisim (ROSEN *et al.* c.s.) nella parte meridionale dello Stato di Israele, attualmente in corso di studio. La tabella seguente riporta le percentuali per tipo dell'inventario dei materiali, con il metodo tradizionale e quello fuzzy:

Tipo Metodo	Gratt.	Punter.	Bulino	Tronc.	Scheggia ritocc.	Intacc.	Dentic.	Lama rit.	Lama a f.	Lamella rit.	Bifacc.
Tradizionale	20%	14%	2%	10%	14%	20%	4%	10%	2%	2%	2%
Fuzzy	14%	12%	1%	8%	12%	18%	14%	9%	7%	1%	2%

Si verifica così che l'assegnazione del campione (ed eventualmente del sito) basata sui tipi modali di grattatoio e nucleo è parzialmente modificata dal metodo fuzzy, per il quale solo il secondo di essi è un tipo modale e la distribuzione è molto più piatta, con un notevole incremento della presenza del tipo denticolato; tale discrepanza può portare a interpretazioni diverse relativamente all'economia del sito e alla sua affiliazione culturale.

Il secondo esempio (HERMON *et al.* c.s.) riguarda la classificazione di resti dentali di capra e pecora raccolti nella cisterna di una villa romana nei

pressi di Vicenza e risalenti al periodo tardo-antico. I valori sono contenuti nella tabella seguente:

Età Metodo	Molto giovane	Giovane	Adulto giovane	Adulto	Vecchio
Tradizionale	8%	31%	0%	54%	8%
Fuzzy	5%	40%	20%	30%	6%

I risultati forniscono interpretazioni diverse: con il metodo tradizionale risulta che gli animali macellati sono prevalentemente adulti, mentre con quello fuzzy c'è una prevalenza di animali giovani. Ovviamente anche in questo caso l'interpretazione che ne consegue è diversa, in termini di dieta, economia, ecc.

L'ultimo esempio (HERMON *et al.* c.s.) riguarda l'analisi delle tracce d'uso su 69 manufatti litici provenienti dalla cava di Corrugì in Sicilia. I risultati percentuali sono riassunti nella tabella seguente (alcuni valori pari a zero sono risultati di arrotondamenti nel calcolo delle percentuali):

Attività Metodo	Perforare	Tagliare	Scolpire	Dividere	Squamare	Lavorare la pietra	Lavorare piante	Raschiare
Tradizionale	4%	10%	12%	2%	4%	1%	10%	57%
Fuzzy	6%	13%	7%	0%	3%	18%	20%	33%

Materiali lavorati Metodo	Pelle	Osso	Piante	Canne	Legno	Pietra	Conch.	Pesce	Carne	Radici	Miner.
Tradizionale	4%	22%	33%	7%	22%	2%	3%	4%	2%	1%	0%
Fuzzy	2%	30%	17%	7%	16%	20%	0%	3%	2%	0%	3%

Le differenze fra i risultati ottenuti con i due metodi sono evidenti e incidono nuovamente sull'interpretazione archeologica dei dati.

5. CONCLUSIONI

Perché dunque usare la logica fuzzy nella ricerca archeologica? Da quando la teoria degli insiemi fuzzy è stata proposta nel 1965, vi sono stati dedicati migliaia di articoli e un gran numero di libri; inoltre, intere riviste scientifiche e associazioni se ne occupano in modo esclusivo. Applicazioni della logica fuzzy sono presenti nelle scienze naturali, in ingegneria e informatica, coprendo gran parte dei campi moderni di ricerca, e molti apparecchi di uso quotidiano si basano su di essa per il proprio funzionamento. La logica fuzzy si è dimostrata un valido strumento di ricerca anche nelle scienze umane, ad esempio nelle scienze sociali (RAGIN 2000), in antropologia (RUIZ 1999), nelle ricerche testuali (CHOI 2003), in economia (DOLAN 1994), negli studi religiosi (RAPOSA 1993), nelle scienze naturali (ROBERTS 1986, 1989; MORACZEWSKI 1993; SATTLER 1996; HALL 1997; MUCINA 1997; OLANO *et al.* 1998), in geografia (FISHER 2000; HARRIS *et al.* 1993) e in antropologia fisica (WILLERMET, HILL 1997). Una recente applicazione della logica fuzzy ai modelli predittivi in archeologia è in HATZINIKOLAOU *et al.* 2003.

Poiché molti concetti in archeologia sono “vaghi”, o fuzzy, e il modo umano di ragionare è molto più spesso approssimato che esatto, la logica fuzzy può provvedere il quadro metodologico necessario e la teoria degli insiemi fuzzy gli strumenti necessari per la ricerca. Inoltre, presentando i dati in formato fuzzy, il lettore può avere un quadro più chiaro del processo analitico del ricercatore e l’affidabilità che egli attribuisce alle interpretazioni; i risultati sono più trasparenti e i dati grezzi più accessibili e meno affetti dalle conseguenze della soggettività del ricercatore, permettendo una distinzione fra dati “reali”, presentati in formato fuzzy, e “interpretati”, come lo sono sempre quelli presentati in formato tradizionale.

Ringraziamenti

Nei casi di studio citati in precedenza, Francesca Alhaique ha analizzato i materiali zoologici e Maria Rosa Iovino ha eseguito l’analisi delle tracce d’uso. L’analisi dei materiali di Beer Resisim è stata finanziata dall’Accademia delle Scienze Israeliana.

FRANCO NICCOLUCCI
Dipartimento di Urbanistica
Università degli Studi di Firenze

SORIN HERMON
Ben-Gurion University of the Negev,
Beer-Sheva, Israele

BIBLIOGRAFIA

- ACSÁDI G., NEMESKÉRY J. 1970, *History of Human Life, Span and Mortality*, Budapest, Akadémiai Kiado.
- ADAMS W.E., ADAMS E.W. 1991, *Archaeological Typology and Practical Typology*, Cambridge, Cambridge University Press.
- BISSON M.S. 2000, *Nineteenth century tools for twenty-first century archaeology? Why the Middle Paleolithic typology of François Bordes must be replaced*, «Journal of Archaeological Method and Theory», 7, 1, 1-48.
- BAILEY K.D. 1994, *Typologies and Taxonomies*, Thousand Oaks, CA., Sage University Press.
- BORDES F. 1950, *Principe d’une méthode d’étude des techniques et de la typologie du Paléolithique ancien et moyen*, «L’Anthropologie», 54, 19-34.
- BORDES F. 1961, *Typologie du Paléolithique Ancien et Moyen*, Bordeaux, Delmas.
- COPELAND B.J. 1997, *Vague identity and fuzzy logic*, «The Journal of Philosophy», 94, 10, 514-534.
- CHOI D. 2003, *Enhancing the power of Web search engines by means of fuzzy query*, «Decision Support Systems», 35, 1, 31-44.
- CRESCIOLI M., D’ANDREA A., NICCOLUCCI F. 2000, *A GIS-based analysis of the Etruscan cemetery of Pontecagnano using fuzzy logic*, in G.R. LOCK (ed.), *Beyond the Map: Archaeology and Spatial Technologies*, Amsterdam, IOS Press, 157-179.
- D’AGOSTINO B. 1985, *Società dei vivi, comunità dei morti: un rapporto difficile*, «Dialoghi di Archeologia», 1.3, III s., 47-58.
- DE FINETTI B. 1970, *Teoria delle probabilità*, Torino, Einaudi.
- DEMARS P.Y., LAURENT P. 1992, *Types d’outils lithiques du Paléolithique Supérieur en Europe*, Paris, Presses du CNRS.

- DJINDJIAN F. 2001, *Artefact Analysis*, in Z. STANČIČ, T. VELJANOVSKI (eds.), *Computing Archaeology for Understanding the Past*, Oxford, Archaeopress, 41-52.
- DOLAN C. 1994, *The magic of fuzzy logic*, «Global Investor», 74, 11.
- FISHER P. 2000, *Sorites paradox and vague geographies*, «Fuzzy Sets and Systems», 113, 1, 7-18.
- GNADEN D., HODAWAY S. 2000, *Understanding observer variation when recording stone artifacts*, «American Antiquity», 65, 4, 739-747.
- HALL A.V. 1997, *A generalized taxon concept*, «Botanical Journal of the Linnean Society», 125, 169-180.
- HARRIS T.R., STODDARD S.W., BE J.C. 1993, *Application of fuzzy set clustering for regional typologies*, «Growth and Change», 24, 2, 155-165.
- HATZINIKOLAOU E., HATZICHRISTOS T., SIOLAS A., MANTZOURANI E. 2003, *Predicting archaeological site locations using G.I.S. and fuzzy logic*, in M. DOERR, A. SARRIS, *The Digital Heritage of Archaeology. Proceedings of CAA2002*, Athens, Archive of Monuments and Publications, Hellenic Ministry of Culture, 169-177.
- HERMON S., NICCOLUCCI F. 2002, *Estimating subjectivity of typologists and typological classification with fuzzy logic*, «Archeologia e Calcolatori», 13, 217-232.
- HERMON S., NICCOLUCCI F. 2003, *A fuzzy logic approach to typology in archaeological research*, in M. DOERR, A. SARRIS, *The Digital Heritage of Archaeology. Proceedings of CAA2002*, Athens, Archive of Monuments and Publications, Hellenic Ministry of Culture, 307-310.
- HERMON S., NICCOLUCCI F., ALHAIQUE F., IOVINO M.R., LEONINI V. c.s., *Archaeological typologies, an archaeological fuzzy reality* (comunicazione presentata a CAA2003, Vienna, Aprile 2003), in corso di stampa.
- HON G. 1995, *Going wrong: To make a mistake, to fall into an error*, «The Review of Metaphysics», 49, 3-20.
- HOURS F. 1974, *Remarques sur l'utilisation de listes-types pour l'étude du Paléolithique supérieur et de l'Épipaléolithique du Levant*, «Paleorient», 2, 3-18.
- LAPLACE G. 1966, *Recherches sur l'origine et l'évolution des complexes leptolithiques*, Paris, E. de Boccard.
- KOSKO B. 1993, *Fuzzy Thinking: The New Science of Fuzzy Logic*, New York, Hyperion.
- MCALLISTER M.L.N. 1985, *Can you ski?*, «Mathematics Magazine», 58, 5, 287-294.
- MORACZEWSKI I.R. 1993, *Fuzzy logic for phytosociology II. Generalizations and predictions*, «Vegetatio», 106, 1, 13-20.
- MCNEILL D., FREIBERGER P. 1993, *Fuzzy Logic*, New York, Simon and Shuster.
- MUCINA L. 1997, *Classification of vegetation: Past, present and future*, «Journal of Vegetation Science», 8, 6, 751-760.
- NICCOLUCCI F., D'ANDREA A., CRESCIOLI M. 2001, *Archaeological applications of fuzzy databases*, in Z. STANČIČ, T. VELJANOVSKI (eds.), *Computing Archaeology for Understanding the Past*, Oxford, Archaeopress, 107-116.
- NOVÁK, V. 1989, *Fuzzy Sets and their Applications*, Bristol, Adam Hilger.
- OLANO M., LOIDI J.J., GONZÁLES A., ESCUDERO A. 1998, *Improving the interpretation of fuzzy partitions in vegetation science with constrained ordinations*, «Plant Ecology», 134, 113-118.
- RAGIN C.C. 2000, *Fuzzy-Set Social Science*, Chicago, University of Chicago Press.
- RAPOSA M. 1993, *The fuzzy logic of religious discourse*, «American Journal of Semiotics», 10, 1-101.
- READ D.W. 1989, *Intuitive typology and automatic classification - divergence or full circle*, «Journal of Anthropological Archaeology», 8, 2, 158-188.
- READ D.W., RUSSELL G. 1996, *A method for taxonomic typology construction and an example: Utilized flakes*, «American Antiquity», 61, 4, 663-684.
- ROBERTS D.W. 1986, *Ordinations on the basis of fuzzy set theory*, «Vegetatio», 66, 123-134.

- ROBERTS D.W. 1989, *Fuzzy systems vegetation theory*, «Vegetatio», 83, 71-80.
- ROSEN S., HERMON S., VARDI, J., ABADI Y. c.s., *The chipped stone assemblage from Be'er Resisim: A preliminary study*, in S. GITLIN, T. WRIGHT (eds.), *Festschrift in Honor of William G. Dever*, «Bulletin of the American Schools of Oriental Research», in corso di stampa.
- RUIZ B. 1999, *Science and philosophy*, «Diogenes», 188, 73-84.
- SATTLER R. 1996, *Classical morphology and continuum morphology: Opposition and continuum*, «Annals of Botany», 78, 577-581.
- SAVAGE L. 1972, *The Foundation of Statistics*, New York, Dover.
- SERRITELLA A. 1995, *Pontecagnano II.3 Le nuove aree di necropoli del IV e III sec. a.C.*, Annali del Dipartimento di Studi del Mondo Classico e del Mediterraneo Antico dell'Istituto Universitario Orientale n. 9, Napoli.
- SHOTT M.J. 2000, *The quantification problem in stone-tool assemblages*, «American Antiquity», 65, 4, 725-738.
- TAKEUTI G., TITANI S. 1984, *Intuitionistic fuzzy logic and intuitionistic fuzzy set theory*, «Journal of Symbolic Logic», 49, 3, 851-866.
- TIXIER J. 1967, *Procèdes d'analyse et questions de terminologie dans l'étude des ensembles industriels du Paléolithique récent et de l'Épipaléolithique en Afrique du Nord-Ouest*, in W.W. BISHOP, J.D. CLARK (eds.), *Background to Evolution in Africa*, Chicago, The University Press of Chicago, 771-820.
- TRIGGER B.C. 1968, *Beyond History: The Methods of Prehistory*, New York, Holt, Reinhart and Winston.
- WHITTAKER J.C., CAULKINS D., KAMP K.A. 1998, *Evaluating consistency in typology and classification*, «Journal of Archaeological Method and Theory», 5, 2, 129-164.
- WILLERMET C.M., HILL B. 1997, *Fuzzy set theory and its implications for speciation model*, in G.A. CLARK, C.M. WILLERMET (eds.), *Conceptual Issues in Modern Human Origins Research*, New York, Aldine de Gruyter, 77-88.
- WILLEY G.R., PHILLIPS P. 1958, *Method and Theory in American Archaeology*, Chicago, Chicago University Press.
- YING M. 1994, *A logic for approximate reasoning*, «Journal of Symbolic Logic», 59, 3, 830-837.
- ZADEH L.A. 1965, *Fuzzy Sets*, «Information and control», 8, 338-353.
- ZIMMERMAN H.J. 1984, *Fuzzy Set Theory and its Applications*, Dordrecht, Kluwer-Nijhoff Publishing.

ABSTRACT

This paper deals with the applications of fuzzy logic to archaeological research. Fuzzy logic is based on a continuum of truth value ranging from 0 (False) to 1 (True) and thus may help whenever there exists some uncertainty on data assignment to predetermined categories.

After examining the features and drawbacks of typological classification and the problem of gender and age assignment in cemetery excavations, the fundamentals of fuzzy logic are summarily recalled. Four examples of archaeological applications are then presented. The first example deals with a necropolis in which tombs present a high degree of uncertainty as far as sex and age of the deceased are concerned. Therefore it is suggested to use a fuzzy database management system, i.e. a DBMS implementing fuzzy logic and function, for data storage and processing. Such a database software was previously developed for this application. In the following three examples, classification problems are considered and it is shown how the use of fuzzy logic may change their archaeological interpretation. The authors claim that a generalized use of fuzzy logic, as it widely happens in other sciences, may improve the quality of data processing and above all produce reliable and transparent results, or at least illustrate the degree of reliability the researcher grants to those data.