

# Sistemi Intelligenti I fuzzy system

Alberto Borghese

Università degli Studi di Milano  
 Laboratory of Applied Intelligent Systems (AIS-Lab)  
 Dipartimento di Scienze dell'Informazione  
[Alberto.borghese@unimi.it](mailto:Alberto.borghese@unimi.it)



## Overview



I fuzzy set

I fuzzy system

$\theta'$ \ $\theta$	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
NL				PL			
NM				PM			
NS				PS	NS		
ZE	PL	PM	PS	ZE	NS	NM	NL
PS			PS	NS			
PM				NM			
PL				NL			

**B. Kosko, Neural Networks and Fuzzy Systems, Prentice Hall.**



## La logica classica



Logica a 2 valori:  $A = \{T, F\}$ .

La funzione verità  $T: \{\text{proposizione}\} \rightarrow \{0, 1\}$  definisce la logica classica e può essere implementata come tabella della verità: descrizione esaustiva del funzionamento della funzione per **tutti** i possibili (discreti) valori in ingresso.

$T(A, B, C, D) = \{T, F\}$  nel caso di una funzione a più valori.

Inoltre valgono le proprietà:

$$A \cap A^c = \emptyset.$$

$$A = T \text{ (True)} \Leftrightarrow A^c = F \text{ (False)}.$$



## I Fuzzy set



Nella logica fuzzy, tutto è questione di gradazione.

Dal punto di vista matematico, fuzzy è equivalente ad una proposizione logica che può assumere un numero infinito di valori tra vero e falso.



La funzione verità generalizzata  $T: \{\text{proposizione}\} \rightarrow [0, 1]$  definisce la logica fuzzy o  $L_1$ .



## La funzione verità fuzzy

La funzione verità generalizzata  $T: \{\text{proposizione}\} \rightarrow [0, 1]$  definisce la logica fuzzy o  $L_1$ .

$A \cap A^c \neq \emptyset$  Viene violata la legge di non contraddizione.

$A \cup A^c \neq X$  Viene violata la legge del terzo escluso.



## Esempio di Fuzzy set

Costruiamo una montagnetta di granelli di sabbia  $S(\cdot)$  è l'affermazione "è una montagnetta di sabbia" ed è funzione del numero di granelli,  $d$ .

Non esiste un particolare numero di granelli,  $n^*$ , per cui  $S_{n^*} = T$  diventi  $S_{n^*-1} = F$ .

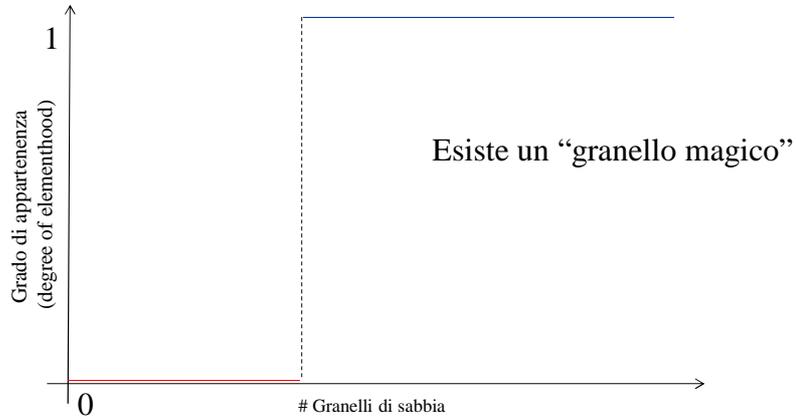
Supponendo di avere una montagnetta di  $n$  granelli di sabbia, possiamo scrivere:  $T(S_{(n-m)}) = 1 - d_{n-m}$ ,  $T(S_n) = 1$ ,  $T(0) = 0$ .  $d$  esprime un margine di dubbio. (cf. l'esperimento di Moravec: the prosthetic brain).

Vale la relazione  $0 = d_0 \leq d_1 \leq d_2 \leq d_3 \leq \dots \leq d_{n-1} \leq d_n = 1$ .

Nulla è detto ancora sulla forma della funzione che passa da 0 ad 1.



## Esempio di funzione di appartenenza (logica classica)



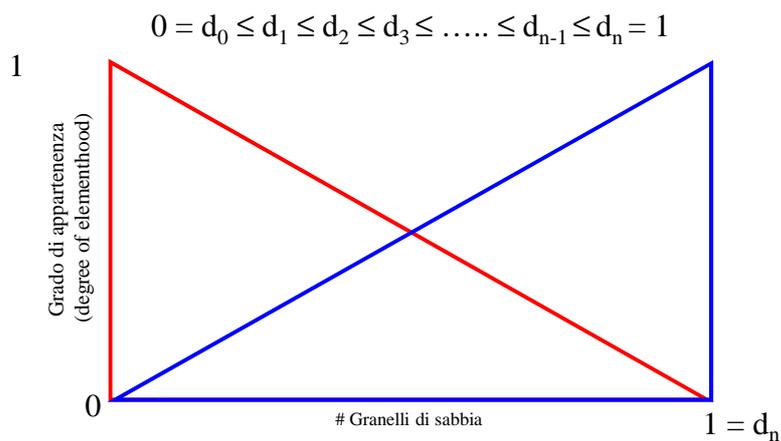
$m(X)_{\text{castello\_false}}$   
 $m(X)_{\text{castello\_true}}$

Sono 2 proposizioni antitetiche. In questo caso vale:

$$m(X)_{\text{castello\_false}} = 1 - m(X)_{\text{castello\_true}}$$



## Esempio di funzione di appartenenza (logica fuzzy)



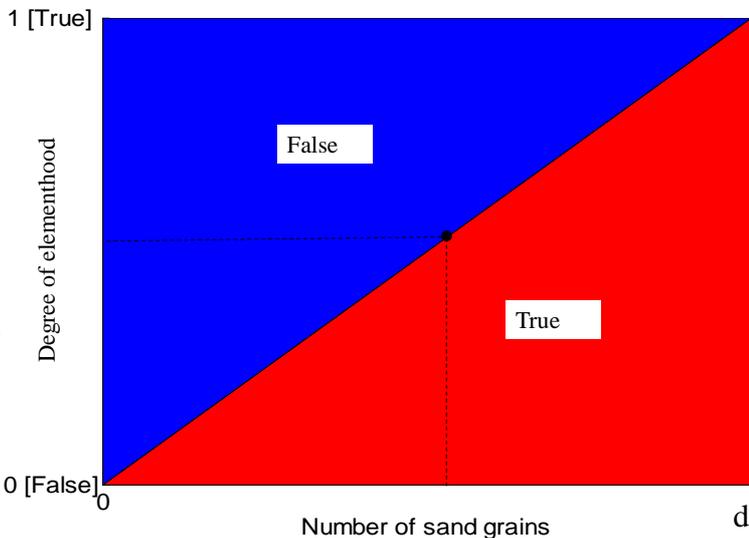
$m(X)_{\text{castello\_false}}$   
 $m(X)_{\text{castello\_true}}$

Sono 2 proposizioni antitetiche. In questo caso vale:

$$m(X)_{\text{castello\_false}} = 1 - m(X)_{\text{castello\_true}}$$



## Esempio di funzione di appartenenza (membership function, $m_A(x)$ )



Insieme A:  
montagnetta  
di sabbia

$$S(d_n) = T$$
$$S(0) = F$$

$m_A(x) = \text{Degree}(x \in A)$  è membership value or fit value

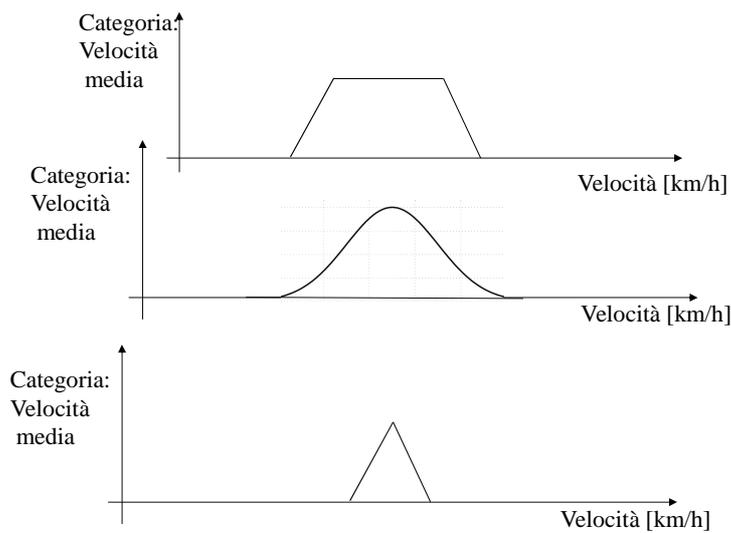
A.A. 2015-2016

9/39

<http://borghese.di.unimi.it/>



## Altre forme di funzioni di appartenenza (membership function, $m_A(x)$ )



Le funzioni di membership si possono sovrapporre?

A.A. 2015-2016

10/39

<http://borghese.di.unimi.it/>



## Una variabile per più classi - I



Velocità (km/h)	Grado di appartenenza a (membership)		
	BASSA	MEDIA	ALTA
10	1	0	0
20	1	0	0
30	0.5	0.5	0
40	0	1	0
50	0	1	0
60	0	1	0
70	0	0.5	0.5
80	0	0	1

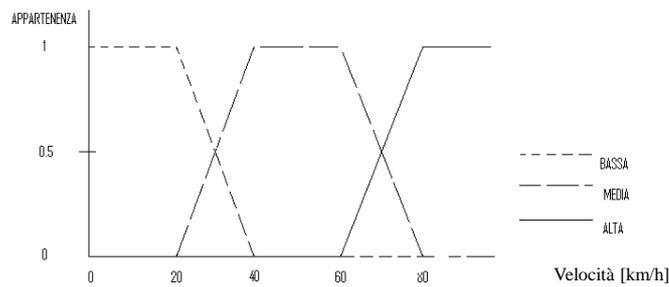
Differenti idee su cosa sia velocità bassa, media o alta.

In generale le funzioni di membership hanno forma trapezoidale o triangolari.

Sovrapposizione tra le funzioni circa 25%

$$T(\text{Alta}) = F(\text{Media})$$

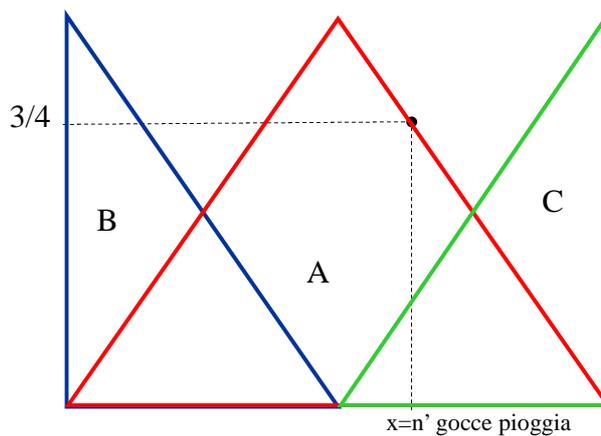
$$T(\text{Media}) + F(\text{Media}) = 1$$



A.A. 2015-2016



## Una variabile, più classi - II



Tre insiemi fuzzy  
(e.g. pioggia):

- A) Pioggia leggera.
- B) Qualche goccia.
- C) Pioggia intensa.

Esempio:

$$m_A(x=n') = \frac{3}{4}$$

$$m_C(x=n') = \frac{1}{4}$$

*Sta piovendo in modo leggero?*

A.A. 2015-2016

12/39

<http://borghese.di.unimi.it/>



## Fuzzyness versus probability



La **fuzzyness** descrive l'ambiguità insita in un evento.

La **probabilità** descrive l'incertezza che l'evento avvenga.

Che un evento accada o meno è una questione di probabilità, in quale misura accada è un questione di fuzzyness.

*Esempio:* "C'è il 20% di probabilità che domani ci sia pioggia leggera".

*Ma anche:* "Errori piccoli", "Clienti soddisfatti", "paesi in via di sviluppo", "segnali affetti da rumore",....

Una soluzione potrebbe essere utilizzare delle misture di probabilità e quindi test statistici sull'ipotesi nulla, vedremo più avanti quando tratteremo l'apprendimento statistico.



## Fuzzyness versus Probabilità (esempi)



- Propongo un libro ad un editore (che può rispedirlo al mittente o chiederne la revisione, problema di royalties!).



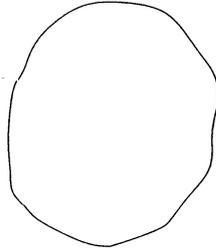
- Apro il frigorifero in cui trovo una mezza mela (bicchiere mezzo pieno e mezzo vuoto).

- Parcheggio la mia automobile (non è previsto che venga parcheggiata a cavallo delle strisce: si rischia la contravvenzione).

*Dopo che un evento è avvenuto, la sua probabilità svanisce.*



## Fuzzy versus probabilità (formalmente)



Ha più senso dire che questo è un ellisse fuzzy o che è probabilmente un ellisse?

Pur essendoci tutti gli elementi dell'evento, l'incertezza rimane. A cosa è dovuta?

Ha senso scrivere che:  $m_A(x) = \text{Prob}\{x \in A\}$  true?

*La fuzzyness è un'incertezza deterministica.*



## Gli operatori logici nella logica fuzzy



Introduzione di una norma, detta T-norm (Lukasiewics, 1970)

$$\mathbf{T(A \text{ AND } B)} = \mathbf{min(T(A), T(B))} \quad 0 \leq T(A) \leq 1$$

$$\mathbf{T(A \text{ OR } B)} = \mathbf{max(T(A), T(B))}$$

$$\mathbf{T(NOT-A)} = \mathbf{1 - T(A)} \quad \text{Zadeh, 1969.}$$

Si noti che gli operatori min e max valgono anche per la logica classica.

Segue che:  $\mathbf{T(A \text{ AND } A^c) + T(A \text{ OR } A^c) = 1}$  (dimostrare!).

*Rapporto con gli operatori della logica classica? Cosa succede se  $B = !A$ ?*

Valgono se vale il principio di mutua esclusione e del terzo escluso.



## Come combinare operatori logici fuzzy



Eventi: A and B

4 fuzzy classes: a, b, c, d

$$A = (1 \ .8 \ 0 \ .5)$$

$$B = (.4 \ .4 \ .7 \ .7)$$

$$A = (1 \ 0 \ 0 \ 1)$$

$$B = (0 \ 0 \ 1 \ 1)$$

OR	$A \cup B = (1 \ .8 \ .7 \ .7)$	← Logica fuzzy	$A \cup B = (1 \ 0 \ 1 \ 1)$
AND	$A \cap B = (.4 \ .4 \ 0 \ .5)$	→ Logica classica	$A \cap B = (0 \ 0 \ 0 \ 1)$

$$A^c = (0 \ .2 \ 1 \ .5)$$

$$A \cap A^c = (0 \ .2 \ 0 \ .5)$$

$$A \cup A^c = (1 \ .8 \ 1 \ .5)$$

$$A \cap A^c \neq \emptyset$$

$$A \cup A^c \neq X$$

$$A^c = (0 \ 1 \ 1 \ 0)$$

$$A \cap A^c = (0 \ 0 \ 0 \ 0)$$

$$A \cup A^c = (1 \ 1 \ 1 \ 1)$$

$$A \cap A^c + A \cup A^c = 1$$

$$A \cap A^c + A \cup A^c = 1$$

$A \cup B$  Caratteristica presente al minimo grado in entrambi gli insiemi.

$A \cap B$  Caratteristica presente al massimo grado in entrambi gli insiemi.

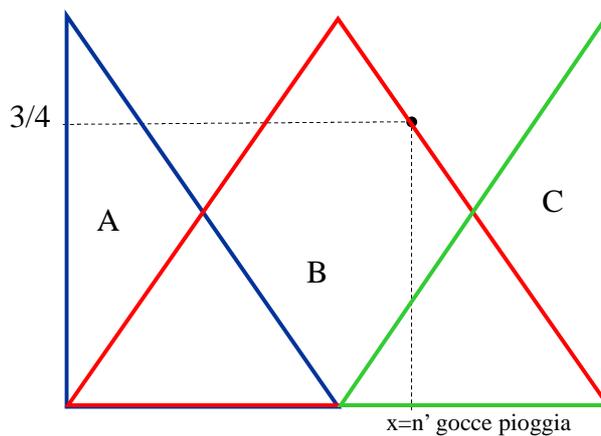
A.A. 2015-2016

17/39

<http://borghese.di.unimi.it/>



## Una variabile, più classi



*Sta piovendo in modo leggero?*

Tre insiemi fuzzy  
(e.g. pioggia):

- A) Qualche goccia.
- B) Pioggia leggera.
- C) Pioggia intensa.

Esempio:

$$m_A(x=n') = 3/4$$

$$m_C(x=n') = 1/4$$

A.A. 2015-2016

18/39

<http://borghese.di.unimi.it/>



## Riassunto

- Fuzzyness descrive l'ambiguità di un evento.
- La funzione di appartenenza descrive il grado di appartenenza di un evento ad una o più classi (non mutuamente esclusive, le funzioni di membership sono parzialmente sovrapposte).
- La fuzzyness si distingue dalla probabilità che misura la probabilità che un evento, nella sua interezza si verifichi o meno.
- Si possono definire attraverso la T-norm, le operazioni logiche tra insiemi fuzzy: AND, OR e NOT.
- Un oggetto fuzzy si può rappresentare come un punto all'interno di un ipercubo di dimensionalità pari al numero di elementi che caratterizzano l'oggetto.
- E' possibile associare ad un insieme fuzzy una misura di entropia che rappresenta il rapporto tra la misura della violazione della legge di non contraddizione e del terzo escluso.



## Overview

I fuzzy set

I fuzzy system

$\theta'$ \ $\theta$	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
NL				PL			
NM				PM			
NS				PS	NS		
ZE	PL	PM	PS	ZE	NS	NM	NL
PS			PS	NS			
PM				NM			
PL				NL			



## Breve storia



Max Black (1937). Applico' i principi della logica fuzzy a liste di elementi o simboli. Sviluppo' la prima funzione di appartenenza fuzzy e chiamo' l'incertezza dell'appartenenza **vaghezza** (vagueness).

Lofti Zadeh (1965). "Fuzzy sets" sviluppo' una teoria sugli insiemi fuzzy ed una logica (fuzzy) in grado di lavorare su questi insiemi.

Ebrahim Mamdani (1974) dimostrò come utilizzare la logica fuzzy per risolvere problemi applicativi (inferenza fuzzy).

Dal 1985 ad oggi applicazioni tecnologiche con successo crescente in campi più diversi, dal controllo, alla ricerca nei data base, all'elaborazione delle immagini alla classificazione. Vediamo di capirne i fondamenti del successo.



## Sistemi esperti



- E' basato su regole in parallelo (legate da **AND** e **OR**) che rappresentano la conoscenza.
- Funziona mediante un motore inferenziale che lavora sulle regole. Il motore è del tipo: IF ..... THEN ..... ELSE (*reasoning engine*). Si parla anche di intelligenza artificiale.
- La risposta T / F (modalità del tipo winner-take-all). Eventualmente più di una risposta Crisp.
- Sistemi di analisi di guasti, sistemi di diagnosi automatica (Computer-Aided Diagnosis), ragionamento automatico....



## Funzionamento di un sistema fuzzy



- L'uscita di ogni regola (attivata) è considerata con un certo grado di membership o verosimiglianza.
- Vengono utilizzate più regole in parallelo (legate da **AND** e **OR**) che rappresentano la conoscenza.
- L'uscita è ottenuta pesando il grado di attivazione delle regole, ovvero sia quanto ciascuna regola pesa nella formazione dell'output.

Dal punto di vista geometrico, mappa un ipercubo n-dimensionale in un ipercubo p-dimensionale:

→ **FAM** (*Fuzzy Associative Memories*).

$$S : I^n \rightarrow I^p$$

c



## Fuzzy Associative Memory (FAM)



Una FAM **trasforma** uno spazio di input in uno spazio di output.

- 1) Spazi continui.
- 2) Spazi fuzzy.

Dal punto di vista logico, una FAM implementa un insieme di regole su delle variabili logiche (fuzzy) in ingresso.

Le regole sono regole della logica classica, le variabili sono fuzzy.

Matematicamente una FAM opera la seguente trasformazione:

$I^n \rightarrow I^p$  dove n è il numero di classi della variabile fuzzy di ingresso e p è il numero di classi della variabile fuzzy di uscita.



## Esempio di Fuzzy Associative Memory (FAM)



Una FAM **trasforma** uno spazio di input in uno spazio di output.

- 1) Spazi continui.
- 2) Spazi fuzzy.

Dato un insieme fuzzy  $A \in I^n$ , viene definito un insieme  $B \in I^p$ , che gli corrisponde (notazione alternativa  $(A,B)$ )

E.g.      Traffico:                               $A \in I^n = [\text{Assente, leggero, medio, pesante}]$        $n = 4$   
              Durata semaforo verde:       $B \in I^p = [\text{Breve, media, lunga}]$                                $p = 3$

Esempio di regola: (Traffico\_leggero, Durata\_semaforo\_media)

Un input può attivare più classi di uscita.



## Descrizione di una FAM



Una FAM **trasforma** uno spazio di input in uno spazio di output.

- 1) Spazi continui.
- 2) Spazi fuzzy.

Dato un insieme fuzzy  $A \in I^n$ , viene definito un insieme  $B \in I^p$ , che gli corrisponde (notazione alternativa  $(A,B)$ ).

La trasformazione **continua** da  $A$  a  $B$ , può essere descritta mediante l'insieme **finito** delle trasformazioni (**regole**) tra gli insiemi che costituiscono  $A$  e  $B$   $\{(A_i, B_j)\}; 1 \leq i \leq n; 1 \leq j \leq p$ .

E.g.      Traffico:                                       $A \in I^n = \{\text{Assente, leggero, medio, pesante}\}$ .  
              Durata semaforo verde:               $B \in I^p = \{\text{Breve, media, lunga}\}$

Esempio di regola:  
 (Traffico\_leggero, Durata\_semaforo\_breve) --  $(A_2, B_3)$       + grado di fit della regola



## Come si definisce la trasformazione codificata in una FAM?



La FAM traduce delle definizioni linguistiche.

Le associazioni sono tra A e B. Ovverosia ad ogni insieme (fuzzy) di A (input), viene associato un insieme (fuzzy) di B (output). E.g. Se il traffico è leggero, regola la durata del verde a media.

Fino qui siamo nel dominio della logica classica. Qual'è il problema?

- L'associazione è tra 2 classi ( $A_i, B_j$ ). Ma l'evento (densità di traffico) può appartenere a due classi diverse,  $A_i$ , che sono associate a due o più classi tra le possibili classi,  $B_j$ , di uscita. Cosa facciamo?
- Le due classi rappresentano un intervallo di valori, come lo trattiamo?



## Esempio di costruzione di una FAM



Controllore di un semaforo.

Ingresso: misura del traffico. 3 classi fuzzy: SCARSO, MEDIO, PESANTE.

Uscita: durata verde: 2 classi fuzzy: BREVE, LUNGO.

$I^3 \rightarrow I^2$

(regola 1) IF (SCARSO) THEN (BREVE)  
(regola 2) IF (MEDIO) THEN (LUNGO)  
(regola 3) IF (ALTO) THEN (LUNGO)

← FAM

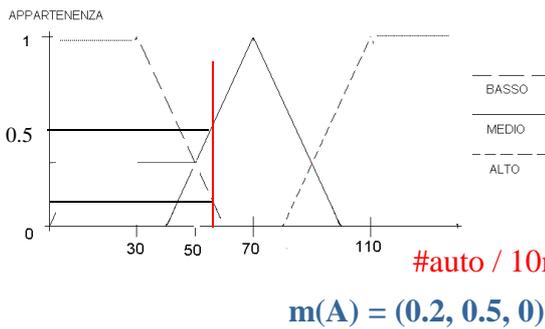


## Fuzzyficazione: dalla misura alle classi fuzzy



Misuriamo la portata del traffico e vogliamo un controllore che generi una lunghezza in secondi.

Necessità di tradurre l'approccio linguistico in numeri.



Fuzzyficazione viene risolta con le funzioni di membership: 55 auto/10min è un traffico *Scarso* con grado di fit 0.2 *Medio* con grado di fit 0.5.

A.A. 2015-2016

29/39

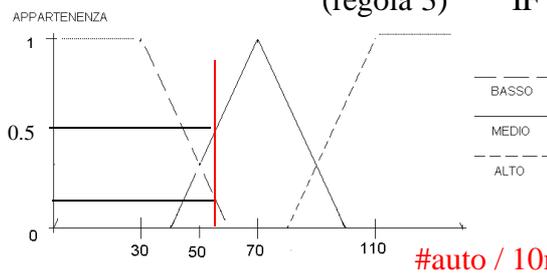
<http://borghese.di.unimi.it/>



## Utilizzo della FAM



- (regola 1) IF (BASSO) THEN (BREVE)
- (regola 2) IF (MEDIO) THEN (LUNGO)
- (regola 3) IF (ALTO) THEN (LUNGO)



**$m(A) = (0.2, 0.5, 0)$**

#auto / 10m : densità di traffico.

Solamente le prime 2 regole (associate a traffico *Scarso* e *Medio*) vengono attivate.

If ( $A_1$ ) then  $B_1$       Se è basso allora breve, grado 0.2  
 If ( $A_2$ ) then  $B_2$       Se è medio allora lungo, grado 0.5

**Durata?**

A.A. 2015-2016

30/39

<http://borghese.di.unimi.it/>

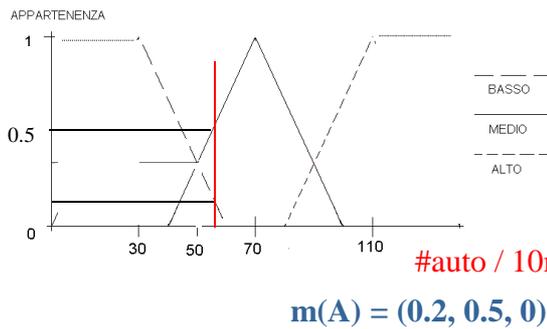


## Fuzzyficazione: dalla misura alle classi fuzzy



Misuriamo la portata del traffico e vogliamo un controllore che generi una lunghezza in secondi.

Necessità di tradurre l'approccio linguistico in numeri.



Fuzzyficazione viene risolta con le funzioni di membership: 55 auto/10min è un traffico *Scarso* con grado di fit 0.2 *Medio* con grado di fit 0.5.

A.A. 2015-2016

31/39

<http://borghese.di.unimi.it>



## Dalle classi fuzzy alla generazione dell'output

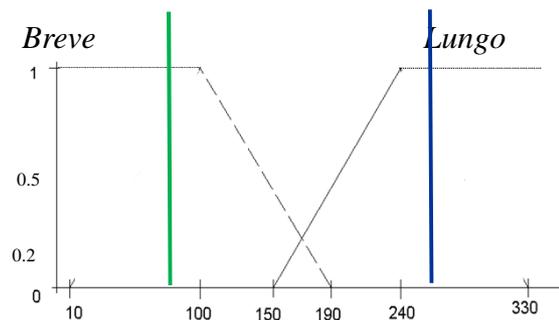


L'output viene mappato in classi fuzzy analogamente all'input.

Breve = 80s

Lungo = 260s

Quanto deve durare il semaforo?



A.A. 2015-2016

32/39

<http://borghese.di.unimi.it>



## Defuzzyficazione mediante massimo



$$y = \max_{1 \leq j \leq k} m_B(y_j)$$

Viene scelta l'uscita proveniente da una proposizione linguistica

=

Viene utilizzata un'unica regola.

La scelta della regola dipende dal valore di fit della classe in ingresso.



## Defuzzyficazione mediante media pesata



$$Uscita = y = \frac{\sum F_i * y_i}{\sum F_i} \quad \begin{array}{l} F_i \text{ peso della regola } i \text{ attivata, fit della regola} \\ y_i \text{ azione associata alla regola } (A_i, B_i) \end{array}$$

L'uscita di ciascuna regola viene pesata con il grado di fit della classe in ingresso alla regola.

Tanto maggiore è il grado di fit, di verosimiglianza, della variabile in ingresso, tanto maggiore sarà il peso dell'azione intrapresa in funzione di quella variabile.

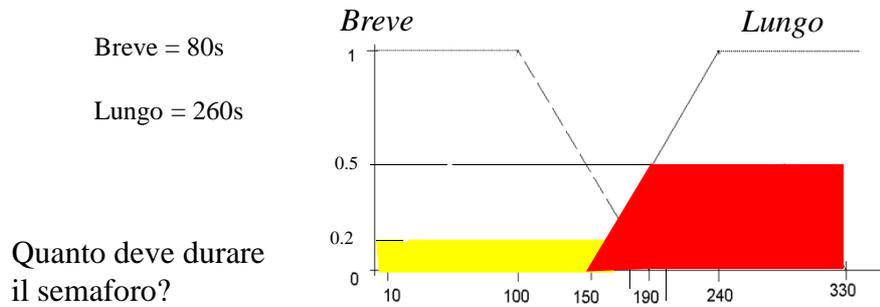
Non interessa qui la forma degli insiemi fuzzy di output.



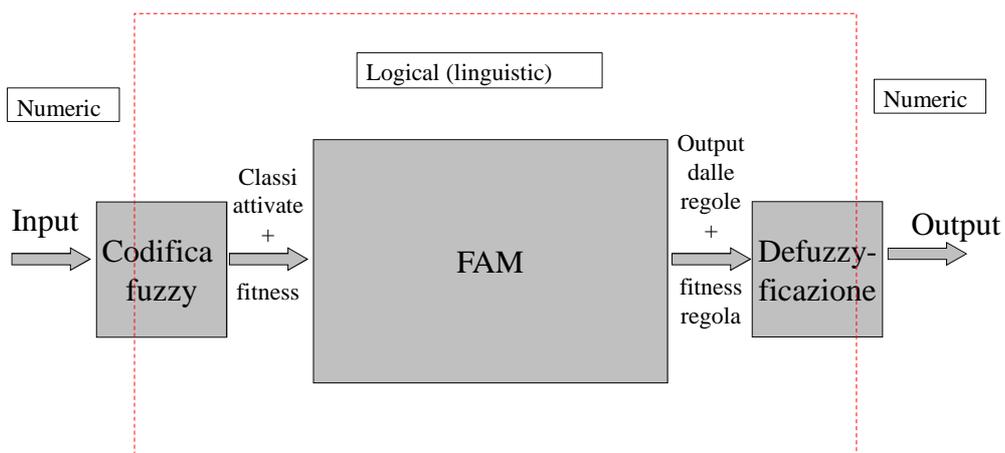
## Dalle classi fuzzy alla generazione dell'output



L'output viene mappato in classi fuzzy analogamente all'input.



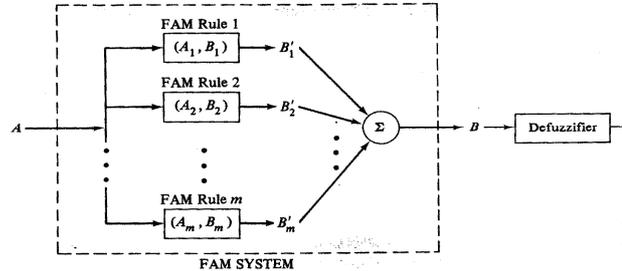
## Struttura di un sistema fuzzy



Tutte le regole della FAM ricevono un input, sono effettivamente attivate quelle che hanno un input con fitness > 0



## Progettazione di un sistema fuzzy: struttura



Per tutti i modelli

- 1) Identificazione delle variabili di I/O del sistema e del loro range (A e B).
- 2) Identificazione delle classi fuzzy in cui le variabili sono da suddividere e dei loro boundaries.
- 3) Definizione della trasformazione I/O come insieme di regole fuzzy: per ogni combinazione di classi fuzzy (con OR e/o AND) di input è possibile definire una classe di output (FAM).
- 4) Modalità di de-fuzzyficazione.

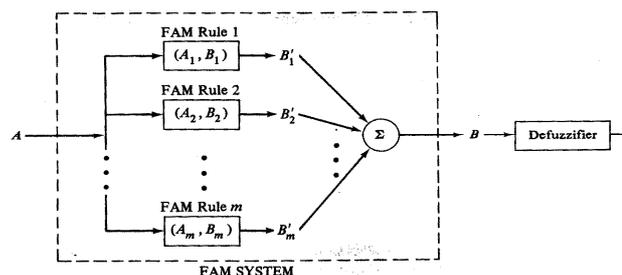
A.A. 2015-2016

37/39

<http://borghese.di.unimi.it/>



## Progettazione di un sistema fuzzy: funzionamento



- 1) Identificazione delle regole attivate da un certo insieme fuzzy in ingresso.
- 2) Valutazione del grado di fit degli insiemi.
- 3) Identificazione delle regole attivate.
- 4) Valutazione del grado di fit della regola.
- 5) Unione degli insiemi fuzzy di output risultanti e calcolo di un singolo valore numerico (defuzzyficazione).

A.A. 2015-2016

38/39

<http://borghese.di.unimi.it/>



# Overview



I fuzzy set

I fuzzy system

$\theta'$ \ $\theta$	NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
NL				PL			
NM				PM			
NS				PS	NS		
ZE	PL	PM	PS	ZE	NS	NM	NL
PS			PS	NS			
PM				NM			
PL				NL			