

**Università della Calabria**

**FACOLTA' DI INGEGNERIA**

**Corso di Laurea in Ingegneria Civile**

**CORSO DI IDROLOGIA N.O. Prof. Pasquale Versace**

**SCHEDA DIDATTICA N° 23**

**IL MODELLO FLAIR**



**A.A. 2011-12**

## IL MODELLO FLaIR

### Descrizione del modello

Il modello idrologico **FLaIR** (Forecasting of Landslides Induced by Rainfalls), proposto da Sirangelo e Versace nel 1992, costituisce uno strumento di interpretazione della relazione tra precipitazioni e fenomeni franosi.

Il modello è basato sulla definizione della **funzione di mobilitazione**  $Y(t)$  che, in ogni istante  $t$ , dipende dalla quantità d'acqua infiltratasi nel sottosuolo prima dell'istante stesso:

$$Y(t) = f[I(\tau)] \quad -\infty < \tau \leq t \quad (1)$$

dove  $I(\tau)$  è l'intensità dell'infiltrazione al tempo  $\tau$ .

Tale funzione non rappresenta una grandezza dal preciso significato fisico, ma indirettamente consente di interpretare i meccanismi di innesco di un fenomeno franoso.

Si può affermare che la funzione di mobilitazione rappresenta un indicatore sintetico del rischio di mobilitazione.

Nel modello FLaIR il legame tra il valore della funzione di mobilitazione e la probabilità di attivazione di un movimento franoso è espresso tramite una relazione del seguente tipo:

$$P[E_t] = \begin{cases} 0 & \text{se } Y(t) < Y_1 \\ g[Y(t)] & \text{se } Y_1 \leq Y(t) \leq Y_2 \\ 1 & \text{se } Y(t) > Y_2 \end{cases} \quad (2)$$

in cui  $P[E_t]$  è la probabilità di mobilitazione al tempo  $t$  e  $g[Y(t)]$  una funzione non decrescente definita sull'intervallo  $[Y_1; Y_2]$  avente codominio  $[0,1]$ .

Per valori della funzione di mobilitazione inferiori a  $Y_1$  la generica distribuzione di probabilità  $P[E_t]$  considera l'evento  $E_t$  impossibile, mentre per valori superiori ad  $Y_2$  ritiene lo stesso evento certo.

Si possono individuare due casi estremi:

- 1) si fissa  $Y_1 = 0$  e  $Y_2 = \infty$ ; ne deriva che non esisterà alcun valore di  $Y(t)$  che comporti mobilitazione impossibile o certa;
- 2) si pone  $Y_1 = Y_2 = Y_{lim}$  in modo tale che l'evento risulti certo quando  $Y(t) > Y_{lim}$  o impossibile per  $Y(t) < Y_{lim}$ .

Questo caso è noto come lo *schema a soglia*, che può essere riscritto nel seguente modo:

$$P[E_t] = \begin{cases} 0 & \text{se } Y(t) \leq Y_{lim} \\ 1 & \text{se } Y(t) > Y_{lim} \end{cases} \quad (3)$$

dove  $Y_{lim}$  è propriamente definito come il valore soglia di innesco.

Su questa logica è basato il modulo **RL** (Rainfall-Landslide), che rappresenta il primo dei due moduli di cui si compone il modello FLaIR.

In particolare il modulo RL associa la probabilità  $P[E_t]$  di mobilitazione al tempo  $t$  al raggiungimento della funzione  $Y(t)$  del valore  $Y_{lim}$ .

Il secondo modulo, denominato **RF** (Rainfall-Forecasting), utilizzando la modellazione stocastica delle precipitazioni, permette di simulare le piogge che potranno verificarsi in un prefissato intervallo temporale, e, parallelamente, di valutare la probabilità di superamento delle soglie di innesco.

La relazione che intercorre tra la funzione di mobilitazione  $Y(t)$  e l'intensità dell'infiltrazione  $I(\tau)$  è espressa attraverso un legame di tipo convolutivo:

$$Y(t) = c \int_0^t \psi(t - \tau) I(\tau) d\tau \quad (4)$$

dove  $c$  è una costante che dipende dalle caratteristiche idrologiche del versante e dalle peculiarità del corpo di frana e  $\psi(t)$  è la **funzione di trasferimento** o filtro.

Tale funzione modella il legame tra infiltrazione e mobilitazione, sintetizzando i fenomeni fisici che avvengono nel sottosuolo.

Per la funzione di trasferimento possono essere adottate diverse strutture analitiche, quali la forma rettangolare, gamma, beta, ecc., trattate nel dettaglio nel paragrafo seguente.

Proprio l' ampia possibilità di scelta conferisce grande flessibilità al modello FLaIR, tanto da essere applicabile in contesti anche molto diversi tra loro.

Quello che è importante tenere presente è che la determinazione della funzione di trasferimento dipende dalla stima di un certo numero di parametri, in seguito rappresentati dal vettore  $\underline{\theta}$ .

L'identificazione parametrica, come sarà evidenziato in seguito, verrà effettuata sulla base di due informazioni:

- la serie storica delle altezze di precipitazione
- la localizzazione temporale delle mobilizzazioni storicamente note

che rappresentano due dati di ingresso indispensabili per l'applicazione del modello FLaIR.

### **Struttura analitica della funzione di trasferimento**

#### *Forma rettangolare*

Si tratta della più semplice struttura attribuibile alla funzione di trasferimento che in questa maniera risulta essere caratterizzata dall'unico parametro  $t_0$  (avente le dimensioni di un tempo) :

$$\psi(t) = \begin{cases} 1/t_0 & \text{per } 0 < t \leq t_0 \\ 0 & \text{altrove} \end{cases} \quad (5)$$

E' possibile notare che alla funzione di mobilizzazione viene assegnato il valore dell'infiltrazione cumulata sull'intervallo di durata  $t_0$  antecedente l'istante  $t$ .

Lo svantaggio di questa forma consiste nella sua incapacità di interpretare il reale legame tra infiltrazione e mobilizzazione.

### *Forma esponenziale*

L'attribuzione della forma esponenziale alla funzione di trasferimento avviene attraverso la seguente relazione:

$$\psi(t) = \frac{I}{k} e^{-\frac{t}{k}} \quad t \geq 0; k > 0 \quad (6)$$

caratterizzata dal solo parametro  $k$  che ha le dimensioni di un tempo.

Contrariamente a quanto avviene per la funzione rettangolare, l'utilizzo della forma esponenziale comporta l'attribuzione di un peso man mano decrescente ai valori più remoti dell'intensità dell'infiltrazione.

### *Forma gamma*

La forma gamma della funzione di trasferimento si ottiene dalla seguente espressione:

$$\psi(t) = \frac{b^a}{\Gamma(a)} t^{a-1} e^{-bt} \quad t \geq 0; a > 0; b > 0 \quad (7)$$

in cui  $\Gamma(\cdot)$  è la funzione gamma completa, mentre  $a$  e  $b$  sono due parametri.

In particolar modo il primo è adimensionale, il secondo invece presenta le dimensioni del reciproco di un tempo. Si può notare che per  $a=1$  e  $b=1/k$  viene riprodotta la forma esponenziale.

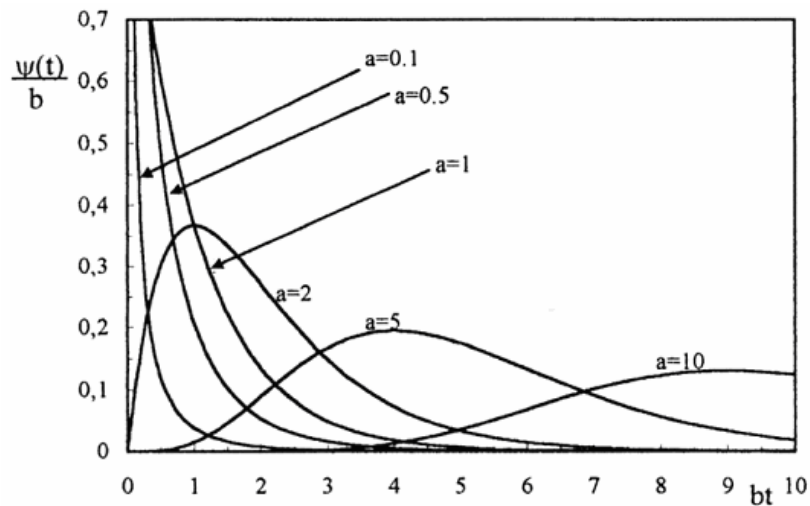


Fig. 1 - Andamento della funzione di trasferimento gamma per diversi valori del parametro  $a$ .

La forma gamma offre un soddisfacente livello di flessibilità, pertanto si rivela essere adatta a riprodurre i differenti legami che possono intercorrere tra l'acqua infiltrata e la mobilizzazione del corpo di frana.

#### Forma beta

L'espressione che contraddistingue la forma beta è la seguente:

$$\psi(t) = \begin{cases} \frac{(s-r)^{l-p-q}}{B(p,q)} (t-r)^{p-1} (s-t)^{q-1} & \text{per } r \leq t \leq s \\ 0 & \text{altrove} \end{cases} \quad (8)$$

$$\text{con } p \geq 1, q \geq 1, r > 0, s > r$$

dove  $B(p,q)$  è la funzione beta completa,  $p, q, r$  ed  $s$  quattro parametri di cui i primi due sono adimensionali mentre i restanti due presentano le dimensioni di un tempo ed hanno il compito di definire l'estensione dell'intervallo di efficacia dei contributi  $I(\tau)$ .

Si osservi che per  $p = q$  ed  $r = 0$  si ha la forma rettangolare, con  $s = t_0$ .

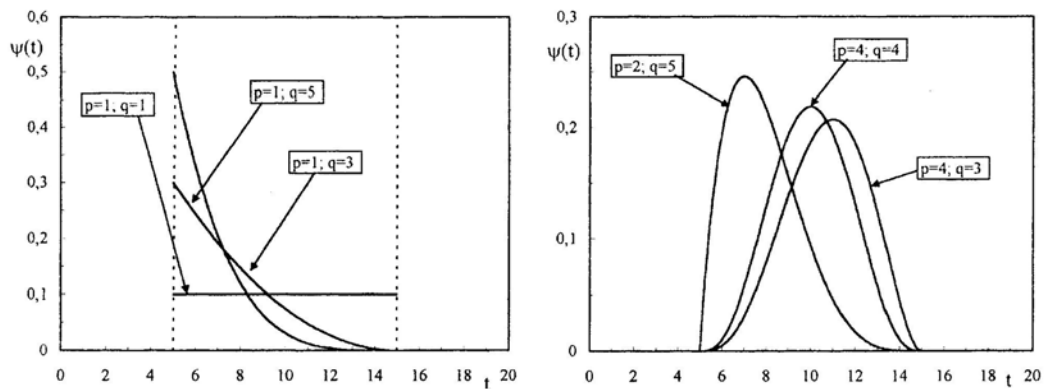


Fig. 2 - Andamento della funzione di trasferimento beta per diversi valori dei parametri p e q con r=5 ed s=15.

*Forma doppio esponenziale*

Infine è possibile attribuire alla funzione di trasferimento la forma miscela di due esponenziali definita dall'espressione:

$$\psi(t) = \omega b_1 \exp(-b_1 t) + (1-\omega) b_2 \exp(-b_2 t) \quad t \geq 0; b_1 > 0, b_2 > 0, 0 \leq \omega \leq 1 \quad (9)$$

dove i parametri  $b_1$  e  $b_2$  hanno le dimensioni del reciproco di un tempo, mentre il parametro  $\omega$  è adimensionale.

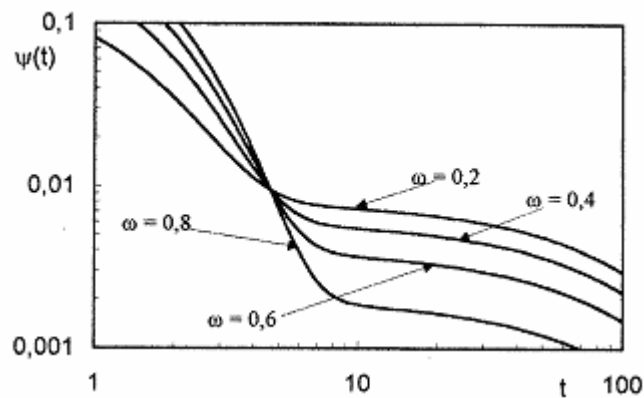


Fig. 3 - Andamento della funzione di trasferimento doppio esponenziale per diversi valori del parametro  $\omega$  con  $b_1=1, b_2=0,01$ .

L'utilità di questa forma si manifesta nell'analisi di mobilizzazioni dovute all'azione di due diversi processi caratterizzati da differenti scale temporali.

Si può notare che per  $\omega = 0$  viene riprodotta la forma esponenziale, con  $b_2 = 1/k$ .

### **Identificazione parametrica**

Una delle maggiori difficoltà che si presentano nell'applicare il modello FLAIR consiste nella valutazione dei parametri della funzione di trasferimento. Il problema sorge a causa della scarsità di informazioni circa le mobilizzazioni storiche dei pendii oggetto di studio. La maggior parte delle volte, infatti, si è a conoscenza di un'unica mobilizzazione. Laddove, poi, siano note più mobilizzazioni, spesso queste non presentano collocazione temporale certa o risalgono a periodi per i quali non sono disponibili le dovute informazioni circa le precipitazioni.

Ne deriva l'indeterminatezza della stima parametrica del modello in quanto set di parametri, anche molto diversi tra loro, risultano compatibili con i criteri di identificazione adottati.

In definitiva non è possibile individuare un particolare vettore di parametri accettabili rispetto ai dati di cui si dispone, ma solo una regione di ammissibilità costituita dall'insieme di tutti i vettori  $\underline{\theta}$  soddisfacenti il criterio di stima adottato.

### *Criterio del 'ranking'*

Per determinare la regione di ammissibilità dei parametri della funzione di trasferimento è possibile ricorrere al criterio del 'ranking'.

Il metodo in questione consiste nel considerare ammissibili i parametri capaci di indurre la funzione di mobilizzazione ad assumere, in corrispondenza delle  $k$  mobilizzazioni storiche, valori che si trovino nelle prime  $k$  posizioni della successione dei valori della funzione di



mobilizzazione ordinata in senso decrescente. Nella realizzazione di tale sequenza è necessario far riferimento ai soli valori che riproducano effetti di eventi piovosi ben separati, esaminando solo i massimi locali della funzione di mobilizzazione.

Se è storicamente nota una sola mobilizzazione del corpo di frana il vettore dei parametri stimati deve soddisfare la condizione:

$$\hat{\underline{\theta}} = \underline{\theta} : \begin{cases} Y(t_{*1}; \underline{\theta}) = \max_{t \in T} [Y(t; \underline{\theta})] \\ t_{*1} - u'_* \leq t_{*1} \leq t_{*1} + u''_* \end{cases} \quad (10)$$

nella quale  $t_{*1}$  è l'istante della mobilizzazione nota,  $u'_*$  ed  $u''_*$  sono eventuali tolleranze che tengono conto dell'incertezza della collocazione temporale dell'evento franoso, mentre  $T$  rappresenta l'estensione della serie storica di dati di pioggia disponibile.

Valutando la funzione di mobilizzazione per tutti i parametri ritenuti ammissibili è possibile definire due funzioni limite: la funzione limite inferiore,  $f_l(\underline{\theta})$ , e la funzione limite superiore,  $f_s(\underline{\theta})$ , che rappresentano i valori della funzione  $Y(\cdot)$  che rispettivamente non hanno dato luogo ed hanno dato luogo a mobilizzazione.

Nella seguente figura viene riportato un esempio grafico dei valori delle funzioni limite:

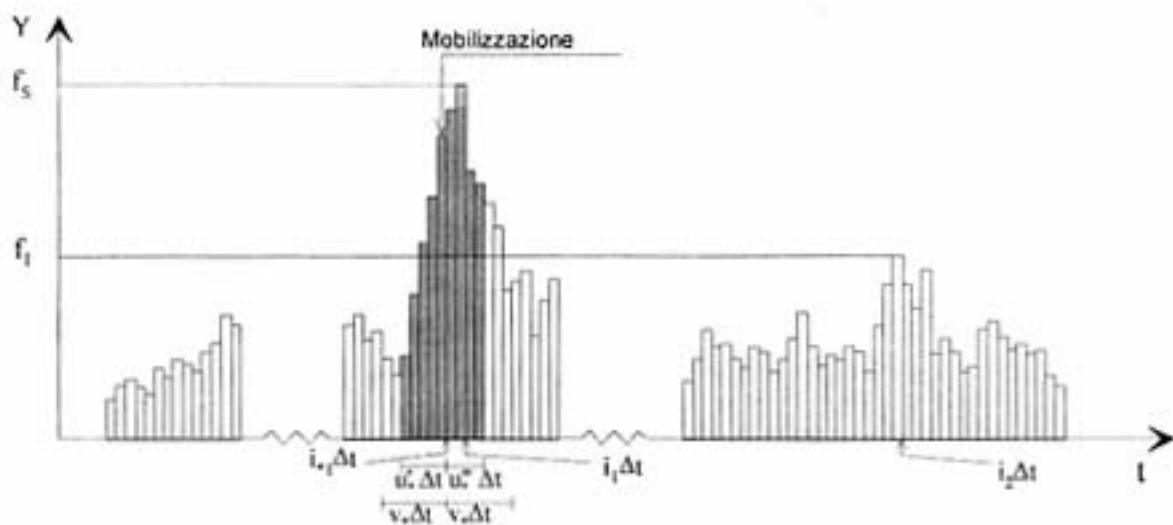


Fig. 4 - Applicazione del criterio ranking: definizione delle funzioni  $f_s$  ed  $f_l$ .

## **Contenuto informativo degli eventi**

La conoscenza dei fenomeni franosi avvenuti in passato consente di acquisire indicazioni sul comportamento del versante. Il numero delle informazioni per ogni singolo evento è maggiore o minore in base alle caratteristiche dell'evento stesso messe in relazione con la pluviometria che lo ha causato.

A proposito del contenuto informativo degli eventi, da un punto di vista qualitativo, è possibile distinguere due situazioni.

La prima riguarda quelle frane dovute a piogge intense ma non molto più di quelle avutesi in altri periodi non caratterizzati dal verificarsi di movimenti; questo è il caso in cui si possiede un elevato contenuto informativo. Un evento del genere è prevedibile solo se la frana è stata esaminata in modo accurato; il suo verificarsi aggiunge molte informazioni sul pendio, fornendo una regione di ammissibilità dei parametri molto limitata. Non risulta essere complicata l'individuazione della soglia d'innescio in quanto le funzioni limite inferiore e superiore assumono valori abbastanza prossimi tra loro.

Il secondo caso, invece, è quello in cui il movimento avviene in seguito a precipitazioni nettamente superiori a quelle registrate in tutto il periodo d'osservazione. In tali circostanze si ha un basso contenuto informativo: il campo di ammissibilità dei parametri può essere molto ampio perché la funzione di mobilitazione in prossimità dell'evento è parecchio influenzata dai valori delle precipitazioni e poco dal peso che, tramite la funzione di trasferimento, viene ad esse assegnato. Se, andando ad analizzare un movimento franoso, si dispone solo di tale tipologia di evento, è necessario prestare molta attenzione nell'individuazione della soglia d'innescio in quanto il modello previsionale è fortemente influenzato da tale scelta. Infatti applicando il criterio del ranking, assumendo come soglia la funzione limite inferiore, il modello potrebbe fornire falsi allarmi con notevole frequenza. Contrariamente se si sceglie

come soglia la funzione limite superiore il modello potrebbe non identificare situazioni di reale rischio. In questa seconda possibilità appare preferibile ricorrere al criterio del ‘crossing’, per il quale si rimanda alla bibliografia (Sirangelo e Versace, 2000).

### **Uso del modello FLaIR per scopi previsionali.**

La caratteristica principale dei modelli di intervento di protezione civile per la difesa dalle frane e dalle inondazioni è rappresentata dalla definizione delle soglie di attenzione, di preallarme e di allarme.

La fase di attenzione è un momento di sola osservazione strumentale e viene avviata tramite segnalazione da parte della Veglia Meteo del Dipartimento di Protezione Civile.

Nell’applicazione del modello FLaIR si procede con l’attivazione dello stato di attenzione nel caso in cui la funzione di mobilitazione  $Y(t)$  superi il valore di soglia di attenzione:

$$Y_{\text{attenzione}} = \xi_1 \cdot Y_{\text{lim}} \quad (11)$$

Il parametro adimensionale  $\xi(t)$ :

$$\xi(t) = \frac{Y(t)}{Y(\text{lim})} \quad (12)$$

è un indicatore della pericolosità del fenomeno in atto ed ingloba sia il coefficiente di sicurezza legato all’incertezza di stima di  $Y_{\text{lim}}$ , sia un coefficiente introdotto per tenere conto del bisogno di attivare con adeguato anticipo gli interventi di protezione civile.

La fase di preallarme consiste nell’osservazione diretta nei punti di possibile crisi.

Nell’utilizzo del modello FLaIR questo stato viene attivato nel momento in cui la funzione di mobilitazione  $Y(t)$  superi il valore di soglia di preallarme:

$$Y_{\text{preallarme}} = \xi_2 \cdot Y_{\text{lim}} \quad (13)$$

Infine la fase di allarme prevede la messa in sicurezza della popolazione e viene attivata, adottando come sistema di preannuncio il modello FLAIR, in seguito al superamento da parte della funzione  $Y(t)$  del valore di soglia di allarme:

$$Y_{allarme} = \xi_3 \cdot Y_{lim} \quad (14)$$

Per quanto riguarda i valori da assegnare a  $\xi_1$  e  $\xi_2$  che caratterizzano, rispettivamente, il passaggio tra le fasi di attenzione e preallarme e tra le fasi di preallarme ed allarme, possono essere fissati i valori compresi nei seguenti intervalli:

$$\xi_1 = 0.60 : 0.80$$

$$\xi_2 = 0.70 : 0.90$$

Di seguito si riporta una rappresentazione grafica dello schema di intervento nelle tre fasi di attenzione, preallarme ed allarme.

Modello di intervento di protezione civile

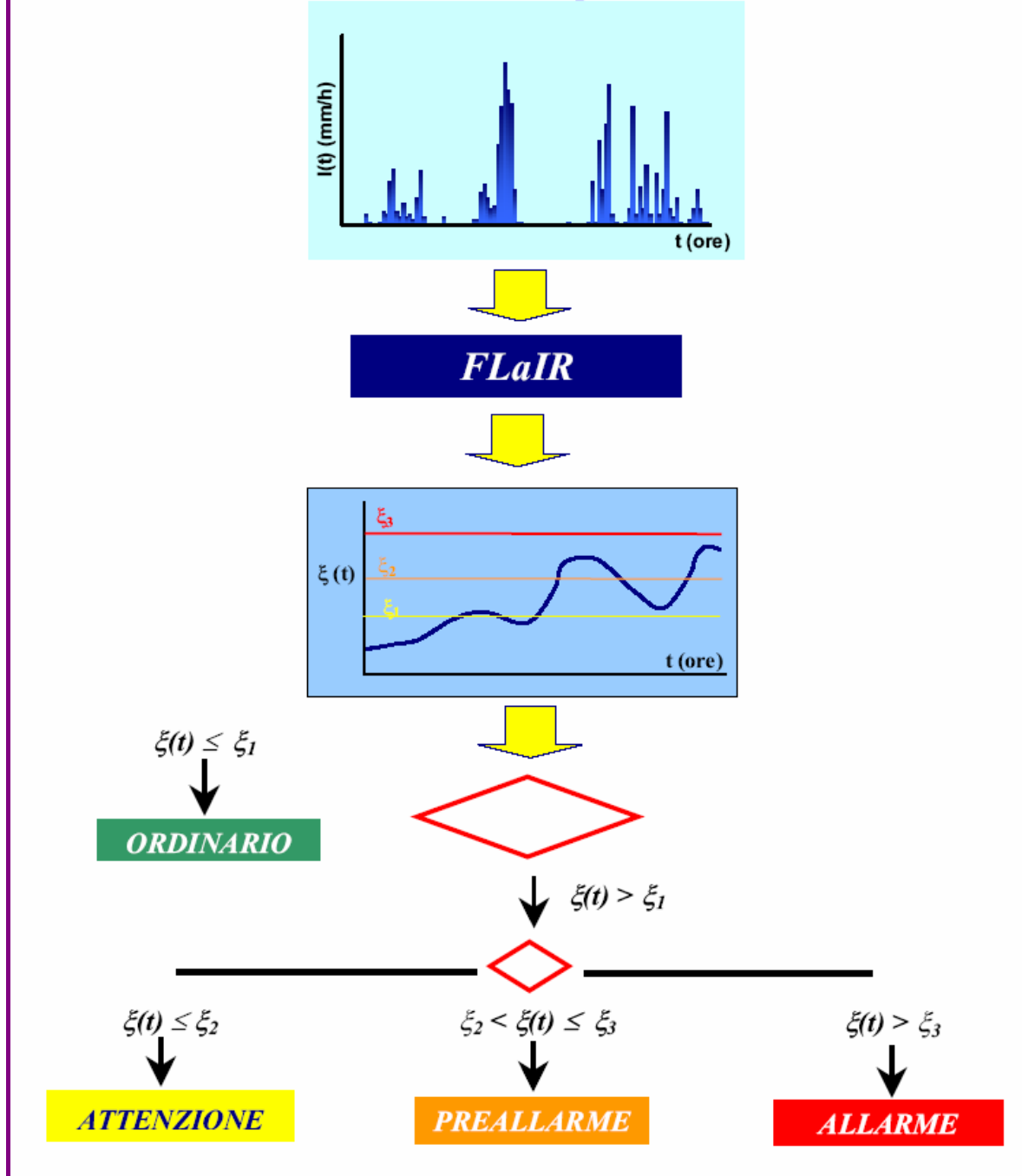


Fig. 5 - Schema di intervento nelle tre fasi di attenzione, preallarme, allarme. "Il modello di soglia pluviometrica FLaIR" – M. Casseti, P. Versace, A. Magliulo