

2. Il modello FLORA-2D

2.1. Introduzione

Lo studio delle inondazioni avviene attraverso l'utilizzo di modelli monodimensionali o bidimensionali di simulazione idraulica.

Il modello monodimensionale è applicabile quando il percorso del fluido è orientato, sezione per sezione, pressoché in una sola direzione. È questo il caso di un fiume con argini ben definiti e regolari senza brusche modifiche nella sezione oppure di un corso d'acqua che scorre all'interno di un alveo inciso. Attraverso lo schema bidimensionale è invece possibile simulare numericamente la propagazione dell'onda nel piano. Pertanto, il suo impiego è più utile nella descrizione di piene in aree vaste e pianeggianti, dove non è possibile ipotizzare a priori una direzione principale di propagazione dei volumi esondati.

La parte più innovativa e anche più laboriosa della presente tesi di dottorato riguarda l'implementazione del modello numerico bidimensionale di simulazione idraulica denominato FLORA-2D (FLOOD and Roughness Analysis) realizzata nell'ambito della collaborazione tra il Dipartimento di Ingegneria e Fisica dell'Ambiente (DIFA) dell'Università degli Studi della Basilicata e la società di ricerca RSE (Ricerca sul Sistema Energetico).



Figura 2.1. Logo del modello FLORA-2D.

Partendo dalla metodologia proposta nel 1994 da Molinaro et al. riguardante un modello bidimensionale per lo studio degli allagamenti in alvei a topografia complessa e in presenza di singolarità artificiali e naturali, si è implementato un modello idraulico capace di computare la variazione sia spaziale che temporale del coefficiente di resistenza al moto offerto dalla vegetazione. Infatti, come descritto nel capitolo precedente, tale coefficiente dipende non solo dalle caratteristiche della copertura vegetale ma anche dall'altezza d'acqua che investe la pianta e che, a sua volta, varia nel tempo durante l'evento di piena.

I modelli di simulazione idrodinamica mono e bidimensionali, commerciali e non, prevedono di specificare in input la resistenza al moto mediante un coefficiente di scabrezza caratteristico dell'area di studio, generalmente variabile nello spazio, ma costante nel tempo, trascurando la dipendenza di tale parametro dal livello idrico.

FLORA-2D consente di calcolare il coefficiente di scabrezza n di Manning distinguendo tra vegetazione rigida e flessibile risolvendo l'equazione di Petryk e Bosmajian nel primo caso e quella di Freeman et al., invece, nel secondo. Per la vegetazione flessibile è altresì possibile distinguere la condizione di totale sommersione da quella di parziale sommersione.

2.2. Le equazioni utilizzate

Il modello FLORA-2D, essendo un modello bidimensionale, considera le due componenti orizzontali del moto trascurando le sole componenti verticali, di entità generalmente modesta, e si basa sulle cosiddette “shallow water equations” o “equazioni delle acque basse” scritte in forma bidimensionale. Sviluppando le derivate dei termini convettivi, tali equazioni assumono la seguente forma (Molinari et al., 1994):

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial q_x}{\partial t} + u \frac{\partial q_x}{\partial x} + v \frac{\partial q_x}{\partial y} + u \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) + (gh - u^2) \frac{\partial h}{\partial x} - uv \frac{\partial h}{\partial y} + gh(C_f q_x - S_x) = 0 \\ \frac{\partial q_y}{\partial t} + u \frac{\partial q_y}{\partial x} + v \frac{\partial q_y}{\partial y} + v \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \right) + (gh - v^2) \frac{\partial h}{\partial y} - uv \frac{\partial h}{\partial x} + gh(C_f q_y - S_y) = 0 \end{cases} \quad (2.1)$$

dove:

- x, y, t coordinate spaziali e temporali;
- h profondità dell'acqua;
- u, v componenti rispettivamente lungo gli assi x e y del vettore velocità mediato rispetto alla profondità;
- q_x, q_y componenti rispettivamente lungo gli assi x e y del vettore portata per unità di larghezza;
- g accelerazione di gravità;

- S_x, S_y pendenza del fondo del terreno nelle direzioni degli assi;
- C_f termine relativo alla resistenza offerta localmente dal terreno.

I termini convettivi, che considerano gli effetti dell'energia cinetica posseduta dalla corrente e quindi le forze dinamiche collegate alla variazione di quantità di moto, possono in alcuni casi essere trascurati.

Ciò accade nei fenomeni di inondazione di vaste aree pianeggianti, dove l'importanza di queste forze risulta relativamente ridotta rispetto alle altre forze presenti (inerzia, attrito, gravità, spinte idrostatiche). In questi casi, inoltre, le dimensioni generalmente significative delle celle del dominio fanno sì che le derivate spaziali discretizzate abbiano, in genere, denominatori molto grandi e quindi importanza relativa minore nelle equazioni.

Nei fenomeni di piena, infine, elevate velocità dell'acqua vengono raggiunte solo in zone generalmente ben localizzate; il loro effetto viene però distribuito a causa delle dimensioni stesse della griglia di calcolo.

In base a queste considerazioni, trascurando per semplicità i termini convettivi, il sistema di equazioni da risolvere diviene:

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial q_x}{\partial t} + gh \frac{\partial h}{\partial x} + gh(C_f q_x - S_x) = 0 \\ \frac{\partial q_y}{\partial t} + gh \frac{\partial h}{\partial y} + gh(C_f q_y - S_y) = 0 \end{cases} \quad (2.2)$$

Tali equazioni vengono poi discretizzate, secondo uno schema alle differenze finite.

2.3. La discretizzazione numerica

Uno schema possibile per discretizzare nel tempo le equazioni semplificate è il seguente:

$$\begin{cases} \frac{h^{n+1}-h^n}{\Delta t} + \left(\frac{\partial q_x}{\partial x}\right)^{n+1} + \left(\frac{\partial q_y}{\partial y}\right)^{n+1} = 0 \\ \frac{q_x^{n+1}-q_x^n}{\Delta t} + gh^n \left(\frac{\partial h}{\partial x}\right)^{n+1} + gh^n (C_f^n q_x^{n+1} - S_x)^{n+1} = 0 \\ \frac{q_y^{n+1}-q_y^n}{\Delta t} + gh^n \left(\frac{\partial h}{\partial y}\right)^{n+1} + gh^n (C_f^n q_y^{n+1} - S_y)^{n+1} = 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

Gli apici “n” ed “n+1” indicano rispettivamente le grandezza misurate al tempo t e t+Δt dell’intervallo temporale Δt di calcolo. Effettuando la discretizzazione temporale si ottiene quindi un sistema di equazioni differenziali a coefficienti costanti in quanto ogni grandezza incognita (indice “n+1”) viene moltiplicata per grandezze note (indice “n”). In tale modo il sistema risolvete risulta di più agevole e rapida soluzione.

La discretizzazione spaziale, utilizzata per le derivate rispetto agli assi x e y, è ottenuta basandosi su due griglie sfalsate come di seguito rappresentato:

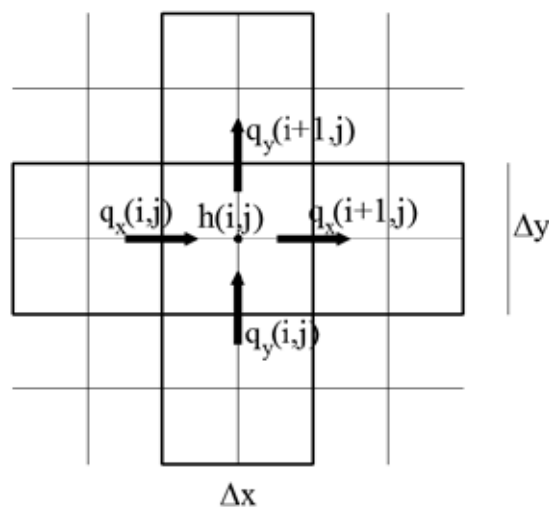


Figura 2.2. Discretizzazione spaziale attraverso l’utilizzo di due griglie sfalsate.

La grandezza h (profondità dell'acqua) è localizzata nel centro della cella della griglia principale, mentre le portate q_x e q_y sono situate rispettivamente sui lati perpendicolari agli assi x e y della stessa maglia. L'utilizzo di maglie sfalsate è preferibile se si vogliono evitare oscillazioni anomale della soluzione (chess-bordering).

Le derivate spaziali, che compaiono nelle equazioni di continuità e del moto viste in precedenza, assumono forma discretizzata. Le distanze Δx e Δy al denominatore hanno significato di lato della cella della maglia principale di calcolo per quanto riguarda le derivate della portata (equazione di continuità) e di distanza fra i centri della cella della maglia principale (o fra i lati della maglia secondaria), quando si tratta di derivate dei livelli (equazioni del moto).

2.4. L'equazione risolvente

Il sistema di equazioni differenziali, semplificato e discretizzato come visto precedentemente, viene risolto numericamente con un procedimento basato sull'annullamento del residuo.

L'equazione risolvente vincola fra loro il livello della cella cui si riferisce con i livelli delle quattro celle adiacenti e con le portate sui quattro lati della cella stessa e può essere ottenuta secondo la procedura descritta di seguito.

Dette h^p , q_x^p e q_y^p , i valori delle incognite alla p -esima iterazione dell' $n+1$ -esimo passo temporale Δt , si calcolano per ogni lato della cella (ovvero per i lati verticali quando consideriamo l'equazione del moto lungo l'asse x e per i lati orizzontali quando consideriamo l'equazione del moto lungo l'asse y), i valori q_x^p e q_y^p dalla 2^a e dalla 3^a equazione del sistema 2.3 scritte nella forma:

$$\frac{q_x^p - q_x^n}{\Delta t} + gh^n \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)^p + gh^n (C_f^n q_x^p - S_x)^p = 0$$

$$\frac{q_y^p - q_y^n}{\Delta t} + gh^n \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right)^p + gh^n (C_f^n q_y^p - S_y)^p = 0$$

dove:

n = indice per i valori noti (tempo precedente);

p = indice per i valori all'iterazione p-esima.

Si ottengono quindi:

$$q_x^p = -\frac{gh^n \Delta t}{1+gh^n C_f^n \Delta t} \left(\frac{\partial h}{\partial x} \right)^p + \frac{gh^n S_x \Delta t + q_x^n}{1+gh^n C_f^n \Delta t} \quad (2.4a)$$

$$q_y^p = -\frac{gh^n \Delta t}{1+gh^n C_f^n \Delta t} \left(\frac{\partial h}{\partial y} \right)^p + \frac{gh^n S_y \Delta t + q_y^n}{1+gh^n C_f^n \Delta t} \quad (2.4b)$$

dove h^p , che compare discretizzando le derivate spaziali, è un valore di tentativo che si può inizialmente assumere pari a quello ricavato nel passo temporale precedente.

Sostituendo i valori trovati di q^p ed il valore utilizzato di h^p nell'equazione di continuità (1^a equazione della 2.3) si ottiene:

$$\frac{h^p - h^n}{\Delta t} + \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} \right)^p + \left(\frac{\partial q_y}{\partial y} \right)^p = R^p \quad (2.4c)$$

che è l'espressione del residuo R in funzione di h^p , cioè dell'altezza d'acqua alla iterazione p-esima.

Affinchè sia $R(h^p + \Delta h^p) = 0$ bisogna valutare la correzione Δh^p da apportare ad h^p .

Se si sostituisce al posto di h^p , il valore $(h^p + \Delta h^p)$ nelle espressioni scritte in precedenza, q^p assumerà il valore $(q^p + \Delta q^p)$ e l'espressione del residuo $R(h^p + \Delta h^p)$ da porre uguale a zero è:

$$\frac{(h^p + \Delta h^p) - h^n}{\Delta t} + \frac{\partial(q_x^p + \Delta q_x^p)}{\partial x} + \frac{\partial(q_y^p + \Delta q_y^p)}{\partial y} = R(h^p + \Delta h^p) = 0 \quad (2.5a)$$

Dalle equazioni utilizzate per il calcolo della portata si ottiene:

$$(q_x^p + \Delta q_x^p) = -\frac{gh^n \Delta t}{1 + gh^n C_f^n \Delta t} \frac{\partial(h^p + \Delta h^p)}{\partial x} + \frac{gh^n S_x \Delta t + q_x^n}{1 + gh^n C_f^n \Delta t} \quad (2.5b)$$

$$(q_y^p + \Delta q_y^p) = -\frac{gh^n \Delta t}{1 + gh^n C_f^n \Delta t} \frac{\partial(h^p + \Delta h^p)}{\partial y} + \frac{gh^n S_y \Delta t + q_y^n}{1 + gh^n C_f^n \Delta t} \quad (2.5c)$$

Derivando le espressioni (2.5b) e (2.5c) rispettivamente lungo l'asse x e lungo l'asse y e considerando che le grandezze al tempo "n" sono note o costanti, si ottiene:

$$\frac{\partial(q_x^p + \Delta q_x^p)}{\partial x} = -\frac{gh^n \Delta t}{1 + gh^n C_f^n \Delta t} \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}\right)^p - \frac{gh^n \Delta t}{1 + gh^n C_f^n \Delta t} \left(\frac{\partial^2 \Delta h}{\partial x^2}\right)^p \quad (2.5d)$$

$$\frac{\partial(q_y^p + \Delta q_y^p)}{\partial y} = -\frac{gh^n \Delta t}{1 + gh^n C_f^n \Delta t} \left(\frac{\partial^2 h}{\partial y^2}\right)^p - \frac{gh^n \Delta t}{1 + gh^n C_f^n \Delta t} \left(\frac{\partial^2 \Delta h}{\partial y^2}\right)^p \quad (2.5e)$$

Sostituendo le espressioni ora ottenute nella (2.5a) si ha:

$$\begin{aligned} & \frac{(h^p + \Delta h^p) - h^n}{\Delta t} - \frac{gh^n \Delta t}{1 + gh^n C_f^n \Delta t} \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2}\right)^p - \frac{gh^n \Delta t}{1 + gh^n C_f^n \Delta t} \left(\frac{\partial^2 \Delta h}{\partial x^2}\right)^p + \\ & - \frac{gh^n \Delta t}{1 + gh^n C_f^n \Delta t} \left(\frac{\partial^2 h}{\partial y^2}\right)^p - \frac{gh^n \Delta t}{1 + gh^n C_f^n \Delta t} \left(\frac{\partial^2 \Delta h}{\partial y^2}\right)^p = 0 \end{aligned}$$

Ponendo per semplicità di scrittura:

$$A = \frac{gh^n \Delta t}{1 + gh^n C_f^n \Delta t}$$

si può scrivere:

$$\frac{h^p - h^n}{\Delta t} - A \left(\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \right)^p - A \left(\frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \right)^p + \frac{\Delta h^p}{\Delta t} - A \left(\frac{\partial^2 \Delta h}{\partial x^2} \right)^p - A \left(\frac{\partial^2 \Delta h}{\partial y^2} \right)^p = 0$$

Dato che i primi tre termini di questa equazione coincidono con l'espressione del residuo R^p vista in precedenza, si può scrivere l'espressione per valutare la correzione “ Δh^p ” da apportare ad h^p perché sia $R(h^p + \Delta h^p) = 0$:

$$\frac{\Delta h^p}{\Delta t} - A \left(\frac{\partial^2 \Delta h}{\partial x^2} \right)^p - A \left(\frac{\partial^2 \Delta h}{\partial y^2} \right)^p + R^p = 0 \quad (2.6)$$

Questa equazione (di tipo parabolico) può essere risolta rispetto alle incognite “ Δh^p ”, dapprima lungo le righe (asse x) e poi lungo le colonne (asse y).

Agendo in tal modo compariranno in ogni equazione del sistema risolvete le tre sole incognite Δh^p_{i-1} , Δh^p , Δh^p_{i+1} , mentre per le celle di inizio e fine di ogni tratto le incognite contenute da ciascuna equazione saranno solamente due. Ogni tratto orizzontale o verticale di celle limitrofe sarà descritto pertanto da un sistema con matrice a banda tridiagonale.

Quando la massima correzione Δh^p_{\max} incontrata risulta minore di un certo valore ε , i cicli di calcolo sulle righe e sulle colonne del dominio vengono arrestati e viene accettato il risultato raggiunto.

Il test di convergenza è quindi il seguente:

$$|\Delta h^p_{\max}| \leq \varepsilon \quad (2.7)$$

2.5. Il trattamento degli argini

Particolare attenzione viene rivolta al processo di interpolazione dell'altezza d'acqua di passaggio fra due celle limitrofe, per simulare processi di incipiente esondazione, di sormonto degli argini o del semplice passaggio di acqua su un terreno inclinato.

La rappresentazione topografica a gradoni del fondo del dominio di calcolo può non essere sempre idonea alla rappresentazione del comportamento fisico reale del moto dell'acqua durante una inondazione. Infatti l'altezza d'acqua di passaggio fra due celle limitrofe HN, cioè la profondità nota all'inizio del processo iterativo, è valutata come media delle profondità dei due centri cella (Molinaro et al., 1994). Con questo criterio si rende uniforme la pendenza del piano campagna; tuttavia esistono situazioni per le quali la conformazione a gradoni del fondo del dominio di calcolo raffigura un reale profilo del suolo (casi di incipiente esondazione o casi di caduta da un argine). In queste condizioni la valutazione della altezza di passaggio HN, come precedentemente descritta, non ha più alcuna giustificazione fisica e l'altezza di passaggio dell'acqua non deve essere valutata utilizzando le quote di fondo delle due celle limitrofe, ma considerando opportunamente la sola altezza della cella con quota di fondo più elevata. Queste condizioni danno origine a diversi criteri di valutazione di HN che discendono da differenti stime della quota di fondo ZFFON e della quota di pelo libero media fra le due celle.

Poiché l'utilizzo di parametri di controllo, per la valutazione dei differenti criteri da adottare, può generare delle discontinuità nella stima dei successivi valori di HN,

dovute a brusche discontinuità nella valutazione della quota di fondo ZFFON fra le due celle, i valori di quest'ultima grandezza vengono calcolati pesando le due valutazioni possibili in funzione dei parametri di controllo stabiliti.

Per effettuare i confronti fra i valori vengono utilizzati i parametri DH e HN rispettivamente uguali al modulo della differenza fra le altezze d'acqua presenti sulle due celle contigue (che può essere considerata nel caso di pelo libero suborizzontale una misura della differenza fra le quote di fondo delle due celle) e la media fra le altezze d'acqua presenti sulle due celle.

Il rapporto DH/HN fornisce una misura della disuniformità dell'altezza d'acqua, e del fondo, nel caso di pelo libero suborizzontale. Questo rapporto viene pertanto utilizzato dal codice per decidere se ci troviamo di fronte ad una soglia o se, in caso contrario, la quota di fondo fra le due celle deve essere ricavata come di norma per interpolazione. Il confronto viene effettuato utilizzando il parametro VMRH, definito fra i dati di input del codice come rapporto fra la altezza d'acqua minore e quella maggiore delle due celle.

In particolare:

- 1) se $DH/HN \geq VMRH$, la differenza di tirante è elevata rispetto all'altezza media di passaggio dell'acqua; pertanto si ritiene che essa sia dovuta alla grande irregolarità del fondo e quindi si è in presenza di una soglia (cioè che non sia dovuta alla raffigurazione a gradoni del suolo, ma ad una effettiva irregolarità), e la quota di fondo fra le due celle viene scelta identificando il valore più elevato delle due quote di fondo, cioè:

$$ZFFON = ZFMAX = \max(ZF(I, J), ZF(I - 1, J));$$

- 2) se $DH/HN < VMRH$, si ritiene che la soglia, ridotta rispetto all'altezza media di passaggio dell'acqua fra le due celle, sia dovuta esclusivamente alla raffigurazione a gradoni della topografia del suolo e la quota di fondo tra le due celle dovrebbe essere ricavata mediando tra le due quote di fondo delle celle stesse, cioè:

$$Z_{FFON} = \left(1 - \frac{DH}{HN}\right) * Z_{FMED} + \left(\frac{DH}{HN}\right) * Z_{FMAX}$$

La formula precedente assicura la continuità nella valutazione di Z_{FFON} nel caso si passasse dalla condizione 1) alla 2). Un'eventuale discontinuità, infatti, potrebbe innescare fittizie oscillazioni delle portate e dei livelli, difficilmente controllabili dal punto di vista numerico.

Il significato di ogni termine può essere meglio compreso attraverso il seguente schema:

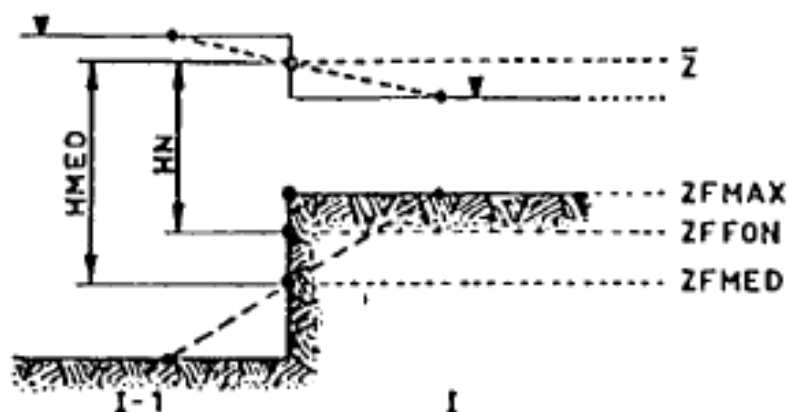


Figura 2.3. Trattamento degli argini: schema considerato. Tratto da Molinaro, Di Filippo e Ferrari in "Modelling of Flood Wave Propagation Over Flat Dry Areas of Complex Topography in Presence of Different Infrastructures" (1994).

Facendo riferimento allo schema sopra riportato, dove è illustrato il significato di ogni termine, se H è la profondità dell'acqua in corrispondenza del centro di una cella, la profondità media dell'acqua è:

$$HMED = 0.5 * [H(I,J) + H(J - 1,J)]$$

mentre la quota media del pelo libero è pari a:

$$\bar{Z} = ZFMED + HMED$$

e l'altezza di passaggio dell'acqua fra le due celle risulta pari a:

$$HN = \bar{Z} - ZFFON$$

Se il valore di HN è minore o uguale a 0 allora la portata viene posta pari a 0. Da applicazioni pratiche si evince che il valore ottimale di $VMRH$ varia in un intervallo compreso tra 0.25 e 0.5.

Le possibili situazioni considerate dal codice sono riportate nella seguente figura:

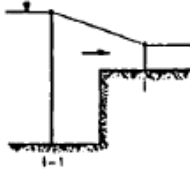
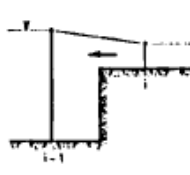

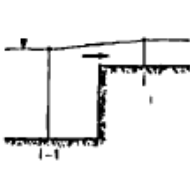
1) GROWING FLOOD		$\frac{\partial Z}{\partial x} < 0, q > 0, \frac{\partial ZF}{\partial x} \geq 0$ <p>THEN</p> $HN = \bar{Z} - ZFFON$ <p>WHERE</p> $\bar{Z} = \frac{Z_i + Z_{i-1}}{2}$
2) FLOOD GROWING AFTER A DECREASING PHASE		$\frac{\partial Z}{\partial x} < 0, q < 0, \frac{\partial ZF}{\partial x} \geq 0$ <p>THEN</p> $HN = \bar{Z} - ZFFON$ <p>WHERE</p> $\bar{Z} = \frac{Z_i + Z_{i-1}}{2}$
3) DECREASING FLOOD AND ALSO PROPAGATION ON AN ALMOST DRY BOTTOM OR WATER FALL		$\frac{\partial Z}{\partial x} > 0, q \leq 0, \frac{\partial ZF}{\partial x} \geq 0$ <p>THEN</p> $HN = \bar{Z} - ZFFON$ <p> $HN < \frac{h_i}{2}$ $HN = \frac{h_i}{2}$ </p>
4) BEGINNING OF THE DECREASING PHASE OF THE FLOOD		$\frac{\partial Z}{\partial x} > 0, q > 0, \frac{\partial ZF}{\partial x} \geq 0$ <p>THEN</p> $HN = \bar{Z} - ZFFON$ <p>WHERE</p> $\bar{Z} = \frac{Z_i + Z_{i-1}}{2}$

Figura 2.4. Situazioni considerate dal codice. Tratto da Molinaro, Di Filippo e Ferrari in “Modelling of Flood Wave Propagation Over Flat Dry Areas of Complex Topography in Presence of Different Infrastructures” (1994). - 1) Fase di piena crescente; 2) Fase di piena crescente dopo una fase di decrescita; 3) Fase di piena decrescente e propagazione su un tratto asciutto o caduta d’acqua; 4) Inizio fase decrescente della piena.

2.6. Le componenti del modello

Il codice proposto, scritto in Fortran, richiede per l’inserimento dei dati di input la creazione di quattro differenti file, ciascuno relativo ad una tipologia di informazione in ingresso: il primo relativo al terreno, il secondo che riguarda il dominio, il terzo relativo alle condizioni iniziali ed al contorno necessarie per la soluzione delle equazioni utilizzate ed infine, in aggiunta a quanto proposto da Molinaro et al., un

quarto opzionale nel caso si voglia tenere conto della variabilità nel tempo del coefficiente di scabrezza. Vediamo nel dettaglio le informazioni contenute in ciascuno di questi file:

1) TERRENO: contiene le quote di fondo di ciascuna cella compresa nel dominio in studio. È composto da tre diversi tipi di schede:

- la scheda n.1 ha il compito di abbinare ad ogni cella della griglia di calcolo sia la quota di fondo che un codice numerico. Quest'ultimo identifica gruppi di celle (aree omogenee) del dominio in studio, caratterizzati da alcuni parametri caratteristici del calcolo definiti nelle schede del file "CONDIZIONI INIZIALI E AL CONTORNO";
- la scheda n.2 contiene le quote di fondo riferite alle celle della riga j-esima;
- la scheda n.3 contiene i codici numerici dell'aree omogenee riferite alle celle della riga j-esima.

Le schede permettono all'utente di gestire autonomamente il file "TERRENO", qualora sorgesse l'esigenza di modificare localmente la quota di fondo o il codice numerico dell'area omogenea di appartenenza di una o più celle.

La numerazione delle righe e delle colonne della griglia è riferita alla cella (numero di riga e numero di colonna uguale a 1) posta in basso a sinistra nella griglia.

1	512	512																		
	0.76																			
163																				
2	510	513																		
	1.01		0.98	0.80	-2.52															
161	163	163	163																	
3	508	514																		
	1.11		1.31	1.13	0.83	0.79	0.27	-2.52												
161	163	163	163	163	160															
4	507	515																		
	1.30		0.98	1.22	1.02	0.79	0.69	0.27	-0.28											
-2.52																				
161	163	163	163	163	163	160	161													
5	505	515																		
	2.30		1.96	1.54	0.95	0.97	0.95	0.68	0.60											
0.32			-0.29	-2.52																
161	177	163	163	163	163	163	160	160												
6	504	516																		
	1.78		1.77	1.92	1.86	1.02	0.95	0.93	0.67											
0.60			0.12	-0.27	-0.33	-2.52														
161	177	177	163	163	163	163	163	160	160											
7	502	516																		
	1.47		1.70	1.27	1.64	1.90	1.64	0.99	1.01											
1.08			0.67	0.51	0.11	-0.31	-0.29	-2.52												
161	177	177	177	163	163	163	163	163	160	160										
8	501	517																		
	1.23		1.26	1.29	2.00	1.15	1.38	1.50	1.32											
1.08			0.86	0.79	0.41	0.31	-0.25	-0.26	-0.30											
-2.52																				
161	177	177	177	177	163	163	163	163	163	163	160	160	160							
160																				
9	499	518																		
	1.15		0.89	1.26	1.48	0.84	0.86	1.08	1.72											
1.64			1.40	1.45	1.05	0.71	0.33	0.18	-0.18											
-0.23			-0.27	-2.52	-2.52															
161	177	177	177	177	177	163	163	163	163	163	163	163	160							
160	160	160	161																	
10	498	518																		
	1.73		0.95	1.15	1.31	2.77	0.59	0.89	1.37											
1.14			1.09	1.37	1.90	1.21	0.51	0.19	0.06											
-0.31			-0.26	-2.52	-2.52	-2.52														
161	177	177	177	177	177	177	163	163	163	163	163	163	163							

Figura 2.5. Esempio di file "TERRENO" di FLORA-2D.

2) DOMINIO: contiene la definizione della griglia di calcolo a celle rettangolari e la definizione del contorno del dominio da studiare. È composto da cinque diversi tipi di schede:

- la scheda n.1 permette all'utente di fornire al codice FLORA-2D la prima definizione del dominio di calcolo ricorrendo a dei punti sulla griglia che delimitano in senso antiorario il dominio in studio;
- la scheda n.2 permette di definire le ascisse che definiscono la griglia del dominio di calcolo in studio;
- la scheda n.3 permette di definire le ordinate che definiscono la griglia del dominio di calcolo in studio;

- le schede n.4 e n.5 permettono all'utente di fornire al codice FLORA-2D la seconda definizione del dominio di calcolo, basata sull'individuazione di gruppi di celle contigue, detti tratti, per ogni riga (scheda 4) e per ogni colonna (scheda 5);

Anche in questo caso le diverse schede permettono all'utente di gestire autonomamente il file "DOMINIO", qualora sorgesse l'esigenza di modificare localmente il dominio di calcolo o le dimensioni della griglia.

Anche nel file "DOMINIO" la numerazione delle righe e delle colonne della griglia è riferita alla cella (numero di riga e numero di colonna uguale a 1) posta in basso a sinistra nella griglia.

21	1		
482	0	527	3
22	1		
480	0	527	3
23	1		
479	0	528	3
24	1		
477	0	529	3
25	1		
476	0	529	3
26	1		
474	0	530	3
27	1		
473	0	531	3
28	1		
471	0	531	3
29	1		
470	0	532	3
30	1		
468	0	533	3
31	1		
467	0	533	3
32	1		
465	0	534	3
33	1		
464	0	535	3
34	1		
462	0	535	3
35	1		
461	0	536	3

Figura 2.6. Esempio di file "DOMINIO" di FLORA-2D.

3) CONDIZIONI INIZIALI E AL CONTORNO: contiene i valori iniziali imposti a tutte le celle del dominio per le portate e per il livelli o le altezze d'acqua (condizioni iniziali), le tabelle con gli andamenti imposti alle suddette grandezze sulle celle di contorno aperto del dominio in studio (condizioni al contorno) e i parametri caratteristici del calcolo (coefficiente di scabrezza di Manning, porosità, ecc.). È composto da nove diversi tipi di schede:

- la scheda n.1 contiene le informazioni che riguardano gli istanti di inizio e fine simulazione, il passo di integrazione temporale costante e l'intervallo di tempo per il quale stampare i dati elaborati dal codice;
- la scheda n.2 riporta il valore di confronto per stabilire se durante la simulazione del fenomeno di inondazione si possa ritenere che le differenze di quota del suolo fra due celle limitrofe siano dovute a golene o argini oppure a una pendenza del suolo pressoché uniforme. Inoltre contiene il valore minimo di altezza d'acqua per riconoscere le celle della griglia come bagnate ed il valore di tolleranza usato durante il calcolo iterativo per verificare l'avvenuta convergenza del sistema. In essa è indicato anche il numero massimo di iterazioni oltre il quale il codice arresta il processo iterativo di convergenza e ritiene raggiunta la soluzione del sistema per il corrente passo temporale;
- la scheda n.3 consente di escludere o utilizzare l'aggiornamento automatico del dominio di calcolo in studio, in funzione dell'allagamento e del prosciugamento delle celle della griglia. Escludendo le celle asciutte dal calcolo la soluzione risulta più rapida. In tal modo si può ottenere un risparmio di tempo più o meno considerevole in funzione del

tipo di studio e del numero di celle escluse dal calcolo ad ogni passo temporale. Quando il numero di celle inondate rimane pressoché costante e copre quasi interamente il dominio definito, la soluzione risulterà più rapida evitando di attivare la procedura di ridefinizione dell'area allagabile;

- la scheda n.4 indica ogni quanti passi di integrazione temporale si debba stampare il file di controllo VOLUMI che contiene i dati di controllo ottenuti dal bilancio dei volumi. Essa inoltre stabilisce la stampa o meno delle matrici delle quote di fondo e dei codici delle aree omogenee, della situazione istantanea iniziale del calcolo e, per ogni situazione istantanea, delle matrici e dei vettori che definiscono il dominio allagato per tratti (insiemi di celle contigue) di righe e di colonne;
- la scheda n.5 permette di abbinare ad ogni codice numerico che identifica gruppi di celle (aree omogenee) del dominio di calcolo, i valori di alcuni parametri caratteristici per ognuna di queste aree (coefficiente di scabrezza di Manning, porosità urbana lineare e porosità urbana areale);
- la scheda n.6 permette di definire la tipologia delle tabelle delle condizioni al contorno. Ogni tabella è associata ad un codice numerico diverso da 0 abbinato a quelle parti del contorno per le quali è prevista una condizione al contorno diversa dal flusso nullo. L'attribuzione di tale codice numerico è effettuata con le schede del file "DOMINIO". I tipi di condizione al contorno che si possono inserire sono 4 e precisamente:

- 1) $q(t)$: flusso entrante assegnato;
- 2) $q(t)$: flusso uscente assegnato;

- 3) $h(t)$: altezza assegnata;
 - 4) $q(h)$: portata uscente in funzione dell'altezza;
- la scheda n.7 permette di inserire i valori delle tabelle delle condizioni al contorno;
 - la scheda n.8 permette di definire le celle per le quali si desidera conoscere l'evoluzione temporale dell'altezza d'acqua;
 - La scheda n.9 contiene i dati iniziali per il calcolo, e ha significato solo se non si devono considerare i risultati ottenuti da una precedente esecuzione del codice.

1	3	0	0	1	!	altezza a mare alla foce													
2	1	2	2	0	!	portata in ingresso													
3	4	3	3	0	!	scala di deflusso													
3																			
1	0	2	!	Tabella per il tratto n. 1 : altezza alla foce															
0.0	0.96	252000.0	0.96																
2	0	71	!	Tabella per il tratto n. 2: portata entrante per ogni metro di bordo cella															
0.0	0.06	3600.0	0.06	7200.0	0.10	10800.0	0.19												
14400.0	0.29	18000.0	0.34	21600.0	0.39	25200.0	0.56												
28800.0	0.91	32400.0	1.40	36000.0	1.97	39600.0	2.62												
43200.0	3.30	46800.0	3.97	50400.0	4.80	54000.0	5.87												
57600.0	7.13	61200.0	8.56	64800.0	10.14	68400.0	11.57												
72000.0	13.05	75600.0	14.92	79200.0	16.55	82800.0	17.96												
86400.0	19.67	90000.0	21.67	93600.0	23.55	97200.0	24.85												
100800.0	25.33	104400.0	25.06	108000.0	24.22	111600.0	23.03												
115200.0	21.61	118800.0	20.05	122400.0	18.46	126000.0	16.91												
129600.0	15.44	133200.0	14.02	136800.0	12.63	140400.0	11.29												
144000.0	10.10	147600.0	9.12	151200.0	8.38	154800.0	7.82												
158400.0	7.38	162000.0	7.04	165600.0	6.74	169200.0	6.48												
172800.0	6.26	176400.0	6.05	180000.0	5.87	183600.0	5.70												
187200.0	5.55	190800.0	5.42	194400.0	5.29	198000.0	5.18												
201600.0	5.08	205200.0	4.99	208800.0	4.89	212400.0	4.77												
216000.0	4.62	219600.0	4.46	223200.0	4.31	226800.0	4.20												
230400.0	4.10	234000.0	3.98	237600.0	3.82	241200.0	3.63												
244800.0	3.46	248400.0	3.30	252000.0	3.13														
3	1	16	!	Tabella per il tratto n. 3															
0.0	0.0	0.10	0.1	0.16	0.2	0.21	0.3												
0.29	0.5	0.47	1.0	0.61	1.5	0.74	2.0												
0.97	3.0	1.37	5.0	2.17	10.0	3.44	20.0												
6.34	50.0	10.06	100.0	15.98	200.0	19.51	270.0												
4																			
1	766	536																	
2	904	579																	
3	909	485																	
4	711	876																	
0	0.0		0.0	0.0															
0	0.1																		

Figura 2.7. Esempio di file "CONDIZIONI INIZIALI E AL CONTORNO" di FLORA-2D.

4) TABELLE SCABREZZE: contiene i dati relativi alle tipologie vegetative presenti (rigide o flessibili). Questo file va creato nel caso in cui si decide di considerare la variabilità del coefficiente di scabrezza nel tempo, altrimenti si inserisce un valore

costante del coefficiente n di Manning all'interno della scheda delle condizioni iniziali e al contorno.

Per le aree ricoperte da vegetazione rigida, è necessario che le tabelle che mettono in relazione, attraverso l'applicazione dell'equazione di Petryk e Bosmajian (1.4), il coefficiente di Manning con il tirante vengano costruite prima della simulazione e per ogni tipologia arborea individuata (figura 2.8).

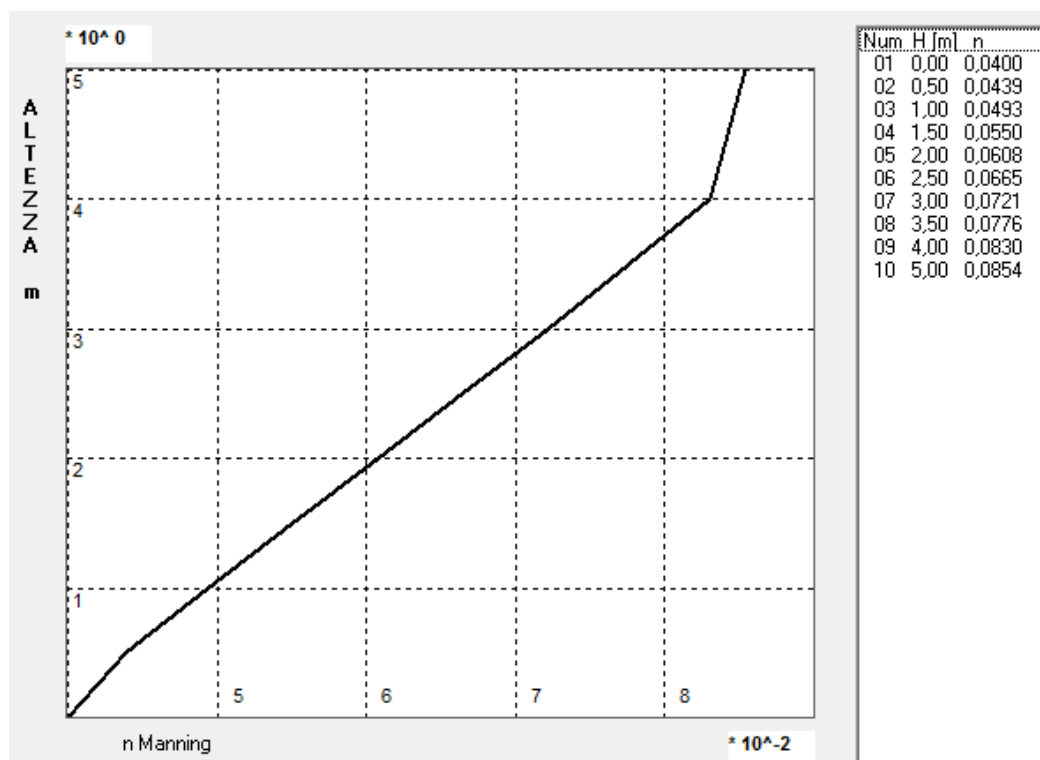
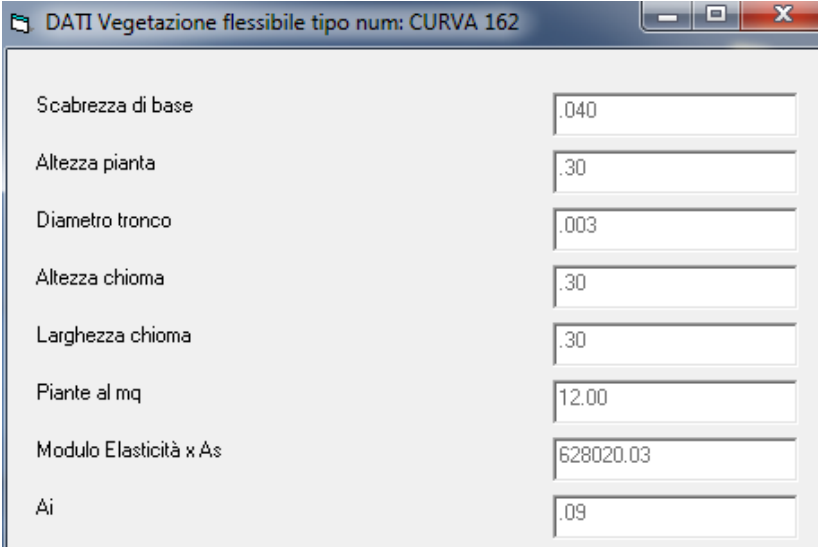


Figura 2.8. Esempio di tabella delle scabrezze nel caso di vegetazione rigida prodotta dal modello FLORA-2D.

Per quanto riguarda le aree ricoperte da vegetazione flessibile nella fase di preprocessing vengono create le tabelle contenenti le informazioni necessarie all'applicazione delle formule di Freeman et al. nel caso di vegetazione totalmente sommersa (1.7) e parzialmente sommersa (1.8). Durante la computazione la stima del

coefficiente di scabrezza n di Manning è eseguita istante per istante sulla base dei valori del tirante, della velocità e della pendenza della linea dell'energia.



Parametro	Valore
Scabrezza di base	.040
Altezza pianta	.30
Diametro tronco	.003
Altezza chioma	.30
Larghezza chioma	.30
Piante al mq	12.00
Modulo Elasticità $\times A_s$	628020.03
Δi	.09

Figura 2.9. Esempio di tabella delle scabrezze nel caso di vegetazione flessibile prodotta dal modello FLORA-2D.

Nella figura seguente si riporta un diagramma di flusso che rappresenta in maniera semplificata il funzionamento del modello per quel che riguarda l'attribuzione del coefficiente di scabrezza.

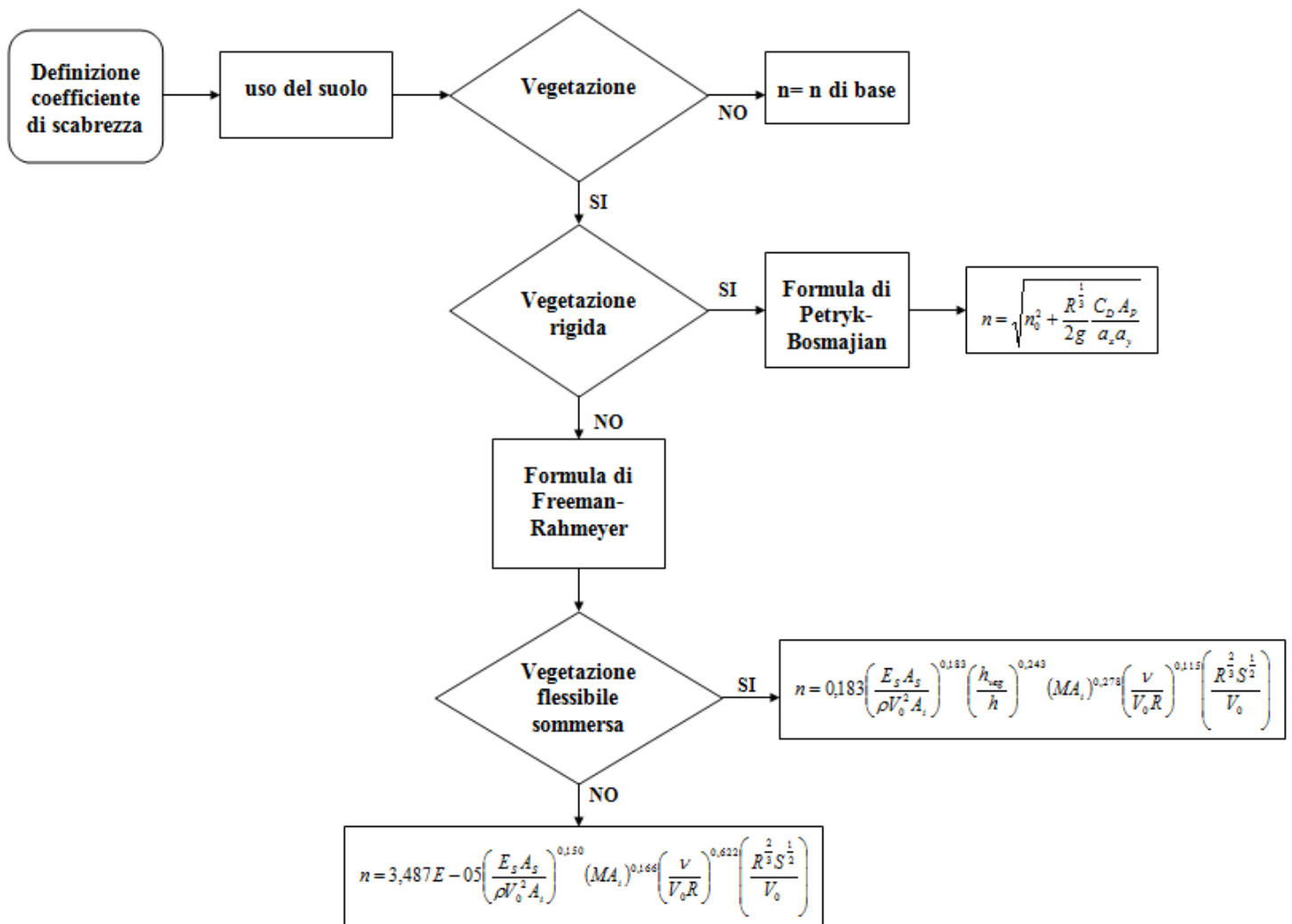


Figura 2.10. Schema di calcolo del coefficiente di scabrezza nel modello FLORA-2D.

Per facilitare l'esecuzione della simulazione, è stata creata un'interfaccia grafica che consente di richiamare tutti i file di input. Una volta avviata la simulazione è possibile verificare il tempo trascorso dall'inizio della computazione e l'istante temporale a cui è giunta.



Figura 2.11. Interfaccia grafica del modello FLORA-2D.

Il codice fornisce in output tutta una serie di informazioni quali la definizione del dominio allagato, l'identificazione delle celle allagate, l'altezza d'acqua in ogni cella, la portata sui lati di ogni cella, il numero di Froude, l'involuppo dei massimi dell'altezza d'acqua e della portata fino all'istante di tempo considerato, le evoluzioni temporali dell'altezza d'acqua, della velocità e del coefficiente di scabrezza nelle celle del dominio scelte in fase di input, le informazioni su come la soluzione è riuscita a giungere a convergenza ad ogni passo temporale, il bilancio dei volumi entranti, uscenti

ed accumulati per ogni passo temporale. Attraverso quest'ultimo controllo è possibile verificare la correttezza e la coerenza dei parametri di input della simulazione.

Infine, per la creazione dei file di input e per l'esportazione e la lettura delle schede di output del modello in ambiente GIS, si sono create delle apposite utility che consentono la loro conversione in formati compatibili con i software GIS:

- GRID TO FLORA-2D: partendo dal file del terreno creato in ambiente GIS nel formato raster ASCII grid (vedi http://en.wikipedia.org/wiki/Esri_grid) e nel quale ad ogni cella è associata una quota, permette di ricavare il file "TERRENO" nel formato richiesto dal codice. La stessa utility permette di ricavare il file "TABELLE SCABREZZE" a partire da un file di tipo raster ASCII grid nel quale ad ogni cella è associato il codice dell'area omogenea e da un file di testo nel quale per ogni tipologia vegetativa rigida o flessibile sono elencate le caratteristiche necessarie per l'applicazione delle formule di letteratura;
- CREADOM: partendo dal file del dominio creato in ambiente GIS nel formato raster ASCII grid e nel quale ad ogni cella del contorno è associato un numero identificativo del tipo di condizione al contorno presente, permette di ricavare il file "DOMINIO" nel formato richiesto dal codice;
- WRITE OUTPUT: esporta in ambiente GIS nel formato SHAPE file e geo TIFF i risultati della simulazione per ogni istante temporale per il quale è stato chiesto al codice di stampare i dati elaborati, nonché per il file che contiene i dati dell'inviluppo dei massimi.