

EFFETTI DELLA CONVERGENZA VERSO I CORSI D'ACQUA DEL FLUSSO IDRICO SOTTERRANEO SULL'EQUILIBRIO IDROGEOLOGICO DELLA PIANURA LOMBARDA

Vincenzo Francani (Tethys s.r.l.)

Premessa

Nella pianura padana e lungo il bordo prealpino gli acquiferi sono sottoposti a rilevanti oscillazioni piezometriche per l'afflusso in alcuni periodi dell'anno di rilevanti contributi idrici dalle aree circostanti. Tale incremento è in buona parte determinato da quello delle nuove abitazioni in alcuni centri urbani periferici alle grandi città, nei quali i sistemi di smaltimento fognario non si sono sufficientemente rinnovati. Di conseguenza in queste aree si sviluppano dissesti idrogeologici (frane, alluvioni, impaludamenti) che producono seri danni. Intento di questo studio è quello di esporre in quali circostanze la struttura idrogeologica favorisce l'eccessiva convergenza di acque sotterranee nei punti vulnerabili al dissesto, e quali rimedi si possono contrapporre in modo da evitare l'insorgenza di nuovi problemi con costi proporzionati alle necessità dei siti.

Le aree nelle quali sono stati notati questi fenomeni sono tutte caratterizzate da una bassa soggiacenza della falda freatica ;fra questi settori si possono individuare in particolare:

- a) Bordi dei laghi prealpini, dove si registrano impaludamenti dovuti all'emersione della falda: , antico Seveso (figura 1) laghi di Montorfano, Alserio, Pusiano, parte della Franciacorta
- b) Paleoalvei del F.Ticino e dei fiumi Lambro,Adda, Serio,Oglio ,Chiese e alluvioni recenti di questi fiumi interessate dallo sviluppo di meandri , dove si originano esondazioni, salti dei meandri, erosioni spondali e crevasse display
- c) Aree circostanti le risorgenze idriche rappresentanti emersioni della falda (fontanili), dove si registrano esondazioni ed impaludamenti su vaste aree.

Nelle aree montane si registrano fenomeni analoghi, resi complessi dalla maggiore violenza delle precipitazioni e delle conseguenti piene. Di seguito si descrivono alcuni esempi di interesse, per la particolare predisposizione al dissesto offerta da alcune strutture idrogeologiche, in vista di una previsione e attenuazione dei fenomeni.

1.Cenni di letteratura sulla convergenza piezometrica

Numerosi esempi di anomala concentrazione di flusso di idrico sono disponibili dalle conoscenze di letteratura sugli anfiteatri morenici del laghi prealpini , costituiti da semicerchi concentrici di archi collinari al cui centro si trova una zona depressa formata dall' escavazione glaciale. Le acque sotterranee e superficiali confluiscono quindi verso le conche di sovra escavazione, provenendo da ampie aree in cui l'infiltrazione è modesta, essendo formate da terreni moderatamente permeabili. Lungo le ripe lacustri si determina allora un eccesso di afflusso, mentre nelle depressioni si nota la formazione di paludi , ristagni e torbiere .

La convergenza del flusso dovuto a strutture idrogeologiche singolari interessa anche i corsi d'acqua, che già in condizioni normali ricevono e trasmettono notevoli flussi idrici. Lo schema degli scambi fiume falda è sintetizzato nella figura seguente, che abbraccia un tratto di pianura alluvionale comprendente non solo le alluvioni attuali del fiume, ma anche quelle più antiche e quelle dei corsi d'acqua affluenti. Si nota che l'area dalla quale provengono gli apporti da falda può essere anche molto estesa, comprendere non solo apporti dalla prima falda, ma anche da quelle più profonde come indicato in figura 1 , che sintetizza quanto espresso da una vasta bibliografia.

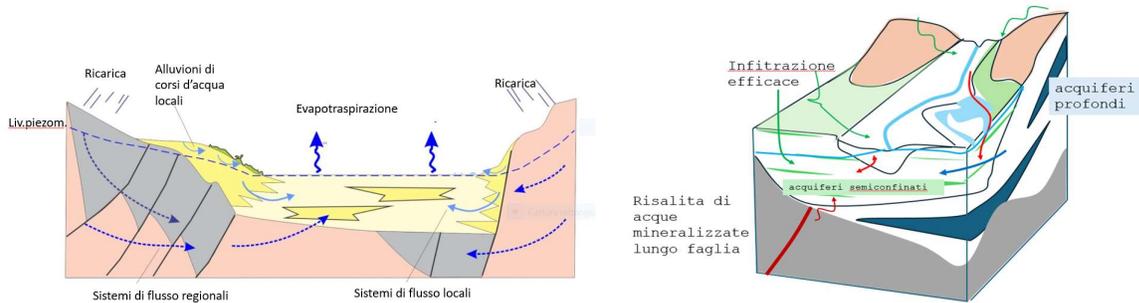


Figura 1: Modello concettuale degli scambi tra acquiferi e corsi d'acqua nelle pianure alluvionali: rapporti fiume-falda in sezione e in 3D

Si nota dalla figura 1 come la falda che è in contatto con il fiume scambia attivamente importanti flussi idrici con quelle costituite da unità più antiche, che sono per lo più in contatto di erosione tra di loro, attraverso le frequenti interruzioni dei livelli impermeabili. Per meglio rappresentare questi scambi, a sinistra sono rappresentati i particolari delle modalità di alimentazione in una sezione e a destra altri dettagli, di natura geologica, in tre dimensioni.

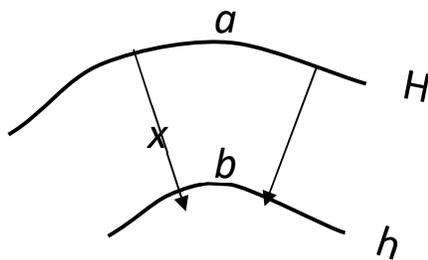


Figura 3 rappresentazione di una maglia di una falda convergente

Dalla relazione di Kaminsky (figura 3)

$$Q = T (H-h) = (a-b)/x \ln(a/b)$$

si può dedurre che la relazione $(a-b)/L = c$ può ben rappresentare l'effetto sulla portata della falda verso il fiume per il chiudersi delle isopiezometriche intorno al corso d'acqua.

Quindi appare utile tener conto che a parità di trasmissività e abbassamento , con l'aumentare della differenza fra a e b aumenta la portata unitaria che attraversa b , e c può essere utilizzato come indice di concentrazione

I tratti propensi a franare sono evidenziabili sia dagli aspetti morfologici che contraddistinguono i dissesti (fenditure, cadute saltuarie di massi, movimenti della compagine rocciosa o del terreno), sia dall'analisi di stabilità. Molti Autori hanno analizzato questo problema, suggerendo relazioni utili a valutare le condizioni di stabilità ; ad esempio Darby (2000) propone una relazione valida nel caso di scivolamento semplice di un blocco separato dalla sponda da una frattura di profondità F e da una superficiale K :

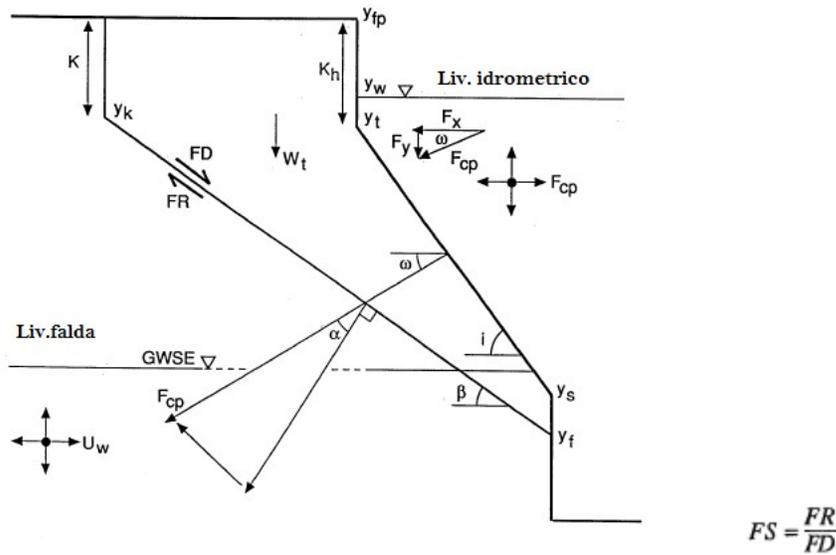


Figura 4 : condizioni di stabilità delle ripe in condizioni statiche

Secondo Darby(2000) infatti , la stabilità della sponda può essere valutata in condizioni statiche tenendo conto sia della pressione F_{cp} sulla superficie unitaria esercitata dall'acqua del fiume, sia di quella esercitata dall'acqua di falda U_w , sia della coesione c , sia degli angoli formati dalla sponda con l'orizzontale , e dalla superficie di rottura potenziale con la normale a F_{cp} .

Considerato il fatto che le forze resistenti FR sono date dal peso del terreno W_t , al quale viene sottratta la pressione neutra U_w e viene sommata la pressione normale esercitata dall'acqua moltiplicata per l'angolo di attrito ϕ ,

$$FR = c L + ((W_t - U_w) \cos\beta + F_{cp} \cos\alpha) \tan\phi$$

Considerato che

$$W_t = \frac{\gamma}{2} \left(\frac{H^2 - K^2}{\tan\beta} - \frac{H^2 - K_h^2}{\tan i} \right)$$

e

$$L = \frac{H - K}{\sin\beta}$$

Si ottiene la relazione :

$$FS = \frac{\frac{C(H - K)}{\sin\beta} + \left(\left(\frac{\gamma}{2} \left(\frac{H^2 - K^2}{\tan\beta} - \frac{H'^2 - K_h^2}{\tan i} \right) - U_w \right) \cos\beta + F_{cp} \cos\alpha \right) \tan\phi}{\frac{\gamma}{2} \left(\frac{H^2 - K^2}{\tan\beta} - \frac{H'^2 - K_h^2}{\tan i} \right) \sin\beta - F_{cp} \sin\alpha}$$

che rappresenta il fattore di sicurezza in condizioni stazionarie. Si può constatare dalla relazione riportata che la risalita del livello di falda produce, con l'aumento di U_w , oltre all'aumento della forza di filtrazione, anche una riduzione del fattore di sicurezza. Il controllo del livello di falda e della cadente piezometrica riveste quindi secondo Darby notevole importanza nella valutazione della stabilità.

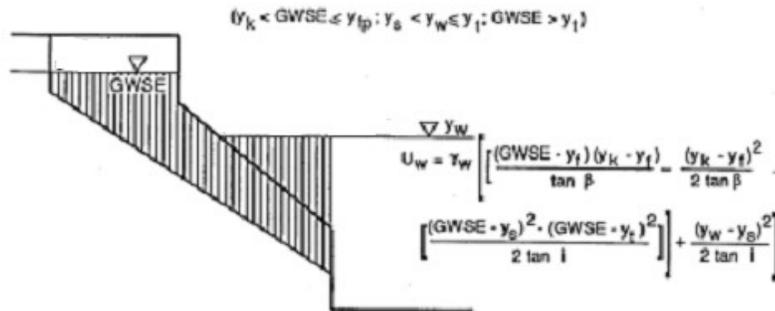


Figura 5

Darby (2000) introduce quindi una variazione nella relazione precedente, tenendo conto del cambiamento della pressione esercitata dalle acque di falda, come riportato nella figura 5 che esplicita il rapporto fra il livello idrometrico e quello piezometrico.

2. Le strutture idrogeologiche che accentuano gli effetti della convergenza del flusso

Tale premessa era indispensabile per evidenziare alcuni aspetti geologici di interesse, quali ad esempio quali siano le strutture idrogeologiche favoriscono l'insorgere di dissesti nelle sponde. Una struttura idrogeologica molto estesa e frequente, capace di produrre seri dissesti, è ad esempio la convergenza di acqua proveniente da grandi estensioni di territorio verso particolari settori dei corsi d'acqua.

In Lombardia si notano in particolare le convergenze verso dei fiumi Ticino, Lambro, Adda e Oglio che assommano a un'estensione di circa 5000 km². Di questi, più di un quinto, disposti nelle fasce circostanti i fiumi, risente in modo tangibile dell'eccesso di flusso idrico.

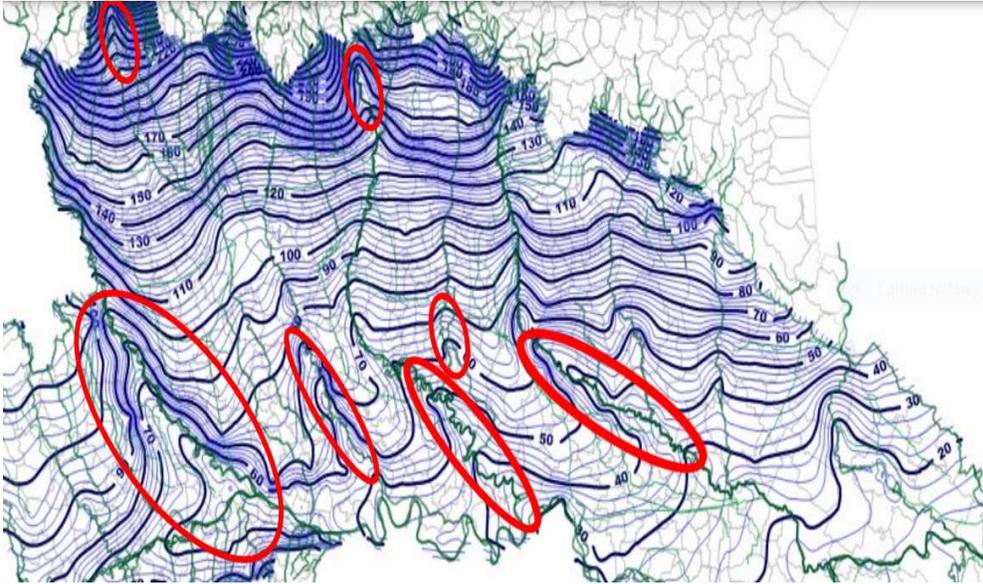


Figura 7 Piezometria della media e bassa pianura, che mostra nelle aree cerchiare un elevato valore dell'indice di convergenza



Figura 8 Gli esempi di strutture meandriche sono particolarmente frequenti nella pianura lombarda. Qui vengono indicate con il cerchio rosso le zone a meandri lungo il F. Adda in prossimità della confluenza con il F. Po

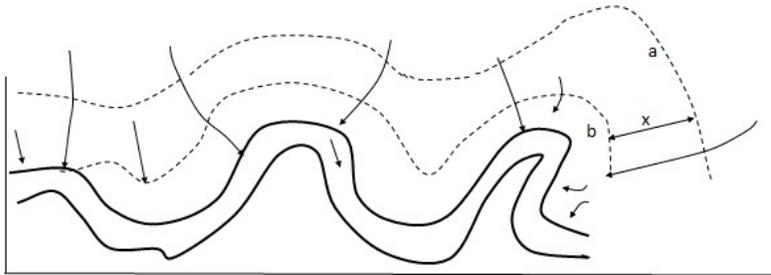


Figura 9. Si evidenzia un aumento di c intorno a un corso d'acqua in un tratto a meandri. Le zone più esposte al dissesto risultano evidentemente quelle in cui le linee di flusso della falda si concentrano, determinando una maggiore forza di filtrazione anche per l'accentuazione della cadente piezometrica.

Nei tratti a meandri il valore di indice di concentrazione c può essere anche molto elevato, evidenziando consistenti afflussi verso il fiume. Infatti la ricostruzione della rete di flusso verso un corso d'acqua mostra come il valore del rapporto c dei tubi di flusso nel caso di meandri possa aumentare notevolmente con la distanza dal fiume. Si nota che la conformazione della rete di flusso comporta la convergenza delle linee di flusso verso i vertici del meandri, che ricevono quindi un afflusso per unità di sezione (portata unitaria) più elevato. Questa difformità della distribuzione della portata unitaria determina, come mostra la figura 9, una maggiore forza di filtrazione verso vertici dei meandri, con i possibili effetti sulla stabilità descritti nella relazione di Darby e dalle relazioni similari proposte da numerosi Autori.

3. Altre strutture idrogeologiche vulnerabili agli effetti della concentrazione del flusso sotterraneo

Risulta quindi utile evidenziare quali siano, oltre alla morfologia meandriche, le condizioni idrogeologiche capaci di produrre valori della forza di filtrazione così alti da determinare gravi condizioni di instabilità. Una situazione che si propone frequentemente è l'aumento dell'infiltrazione efficace nei corso di prolungati periodi di precipitazioni importanti, che produce l'innalzamento della superficie piezometrica fra due tratti dello stesso corso d'acqua o fra corsi d'acqua diversi, anche se non si verificano sollevamenti importanti del livello idrometrico. In queste circostanze, il livello piezometrico dei flussi regionali (figura 1) rimane a lungo più elevato del livello del fiume, che riceve un importante contributo idrico dalla falda. Si riportano di seguito alcuni esempi, dei quali i primi riguardano strutture idrogeologiche trattabili anche **con soluzioni analitiche** sperimentate dalla letteratura; gli ultimi quelle che possono essere analizzate correttamente con modelli matematici.

Strumenti analitici (come la nota relazione di Bear, 1979) descritta nella figura 10,

$$h^2 = -\frac{2R}{K}x^2 - C_1x + C_2$$

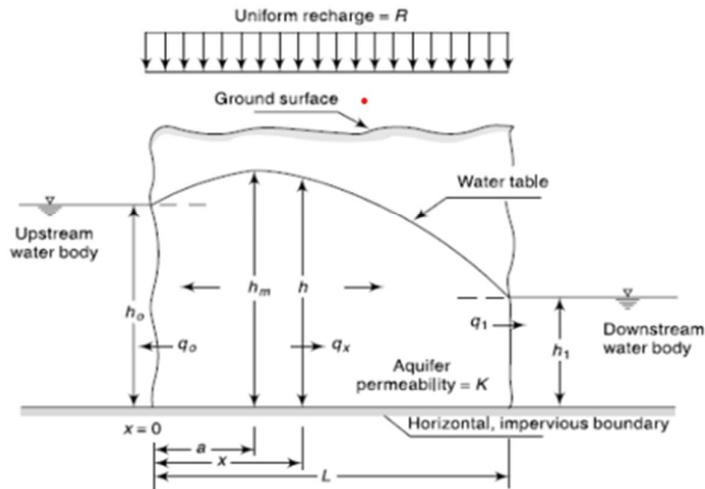


Figura 10: la ricarica costante R determina un sollevamento della falda nell'interfluvio calcolabile con la relazione di Bear, 1979, riportata nella figura.

consentono di determinare nelle linee essenziali gli effetti dell'infiltrazione sulla piezometria; tale relazione prevede la presenza di un substrato impermeabile a contatto con il fondo dei due corsi d'acqua; il dislivello dovuto all'infiltrazione si attenua man mano che il fondo del corso d'acqua si allontana dal substrato. E'

evidente che, se invece del substrato impermeabile si trova un substrato semipereabile che separa la falda freatica da una falda profonda semiartesiana dotata di carico idraulico superiore a quello freatico, gli apporti dalla falda profonda verso il fiume possono determinare problemi di stabilità (figura 11).

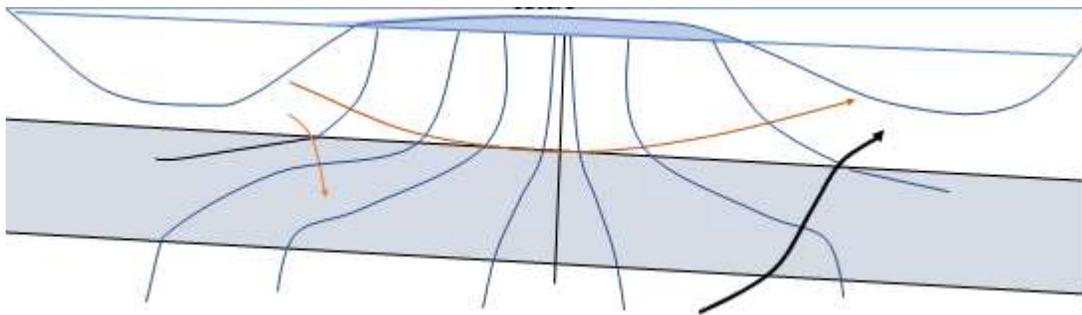


Figura 11— si nota l'effetto dell'alimentazione della falda regionale profonda (semiconfinata localmente), che incrementa a valle l'afflusso verso il corso d'acqua, ponendo a rischio la stabilità dell'alveo e delle rive. In azzurro i terreni non saturi.

Una struttura idrogeologica frequente e altrettanto insidiosa è quella determinata dalla locale presenza di livelli impermeabili in un acquifero trasmissivo, che determinano l'aumento localizzato della velocità di flusso e della capacità erosiva della falda nell'alveo e sulle rive (figura 12).

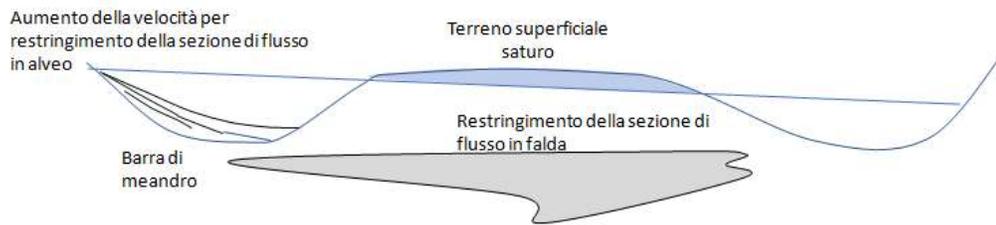


Figura 12 si evidenzia del fenomeno per il restringimento verso valle della sezione di flusso del corso d'acqua, che lo espone a maggior erosione e più facile esondazione è per il conseguente aumento della velocità di flusso (Bernoulli)

Si deve anche ricordare che l'accentuazione della forza di filtrazione è sufficiente per dare luogo al trasporto di granuli di materiale fine all'interno di meati più aperti o di condotti, caso ben studiato da numerosi Autori (piping). In alcuni casi queste strutture semplici possono essere studiate con relazioni analitiche, ma i casi che si presentano sono generalmente complessi, e richiedono la modellazione matematica, come quello di figura 13, dove è descritto il salto del meandro per erosione dei vertici di due meandri adiacenti.

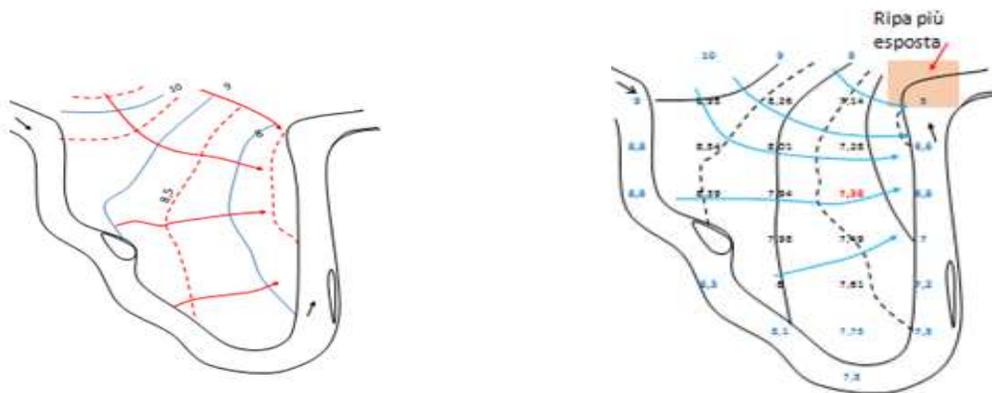


Figura 13 L'aumento di circa 2 m del livello piezometrico della falda affluente produce un consistente aumento della forza di filtrazione nel vertice del meandro posto a valle, agevolando il processo di erosione della sponda nella ripa più esposta, in particolare se il livello idrometrico del corso d'acqua non subisce sensibili incrementi.

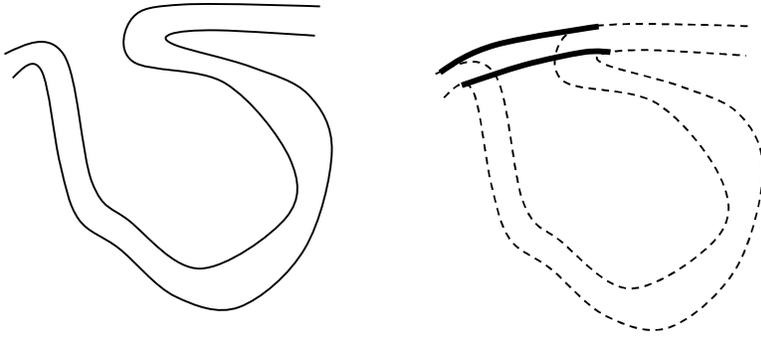


Figura 13 : la figura mostra come l'erosione del vertice del meandro chiuso possa portare al collasso del settore che separa i due vertici adiacenti.

Una palese conseguenza della concentrazione del flusso in alcuni settori della pianura si ricava dalla cartografia delle aree esondabili della Regione, che mostra come proprio nelle zona a meandri si sviluppino in modo particolare questi dissesti.



Figura 14 Aree allagabili della pianura lombarda, dal portale della Regione.

4. Effetti favorevoli della concentrazione del flusso delle acque sotterranee

Le condizioni idrogeologiche tipiche di queste aree comportano che in spazi relativamente ristretti intorno alle depressioni morfologiche dei corsi d'acqua, vengano ad affluire i contributi di settori molto vasti della pianura, garantendo così l'alimentazione della falda di subalveo durante tutto l'anno anche in periodi di precipitazioni nulle. Le zone circostanti gli alvei fluviali sono quindi quelle che hanno le migliori possibilità di difesa dalle carenze idriche e una maggiore resilienza, costituendo quasi sempre vere e proprie aree di riserva di emergenza, anche per l'ampia consistenza delle riserve idriche immagazzinate

Conclusioni

Lo studio ha evidenziato l'esistenza di vaste aree nelle quali la convergenza del flusso crea permanenti effetti di instabilità delle ripe e difficoltà per le infrastrutture dovute alla ridotta soggiacenza. Si è chiarito che è possibile stabilire agevolmente indici di convergenza che sono in grado di permettere di classificare l'esposizione a questo fenomeno in base alla ricostruzione della piezometria regionale, a partire da ben note relazioni analitiche.

Infine si sono indicati alcuni casi, in parte risolvibili con relazioni analitiche e in parte con modelli matematici, nei quali la struttura idrogeologica espone in modo particolare il territorio agli effetti della convergenza del flusso, che si risolvono in una consistente accentuazione della propensione al dissesto e al franamento delle sponde anche su vaste estensioni di territorio.

L'ampiezza delle fasce di terreno allagabile in Lombardia, in particolare in queste zone di convergenza di flusso, testimonia una delle più visibili conseguenze di questo stato di cose.

D'altra parte queste strutture idrogeologiche, alle quali affluisce il contributo di aree periferiche molto estese, hanno creato notevoli riserve idriche dotate di notevole persistenza anche in periodi assenza di precipitazioni, costituendo così vere e proprie aree di riserva di emergenza per le riserve idriche regionali.

Bibliografia

C. Anibas, B. Verbeiren, K. Buis, J. Chormanski, L. De Doncker, T. Okruszko, P. Meire, and O. Batelaan (2011) - A hierarchical approach on groundwater-surface water interaction in wetlands along the upper Biebrza River, Poland. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 8, 9537–9585, www.hydrol-earth-syst-sci-discuss.net/8/9537

Bear J (1979) – *Hydraulics of groundwater*. McGraw-Hill, London

Crosta, G., and C. di Prisco. 1999. On slope instability induced by seepage erosion. *Can. J. Geotech.* 36:1056–1073.

Darby, S.E., M. Rinaldi, and S. Dapporto. 2007. Coupled simulations of fluvial erosion and mass wasting for cohesive river banks. *J. Geophys. Res.*

.R.T Van Balen C. Kasse J. De Moor (2008) - Impact of groundwater flow on meandering; example from the Geul River, The Netherlands. *Earth Surface Processes and Landforms*

R. Revelli F. Boano C. Camporeale, L. Ridolfi (2008). Intra-meander hyporheic flow in alluvial rivers. *Water Resources Research*, Vol. 44, W12428, doi:10.1029/2008WR007081.

S.E. Darby, C.R. Thorne (1994) - Prediction of tension crack location and riverbank erosion hazards along destabilized channels. *Earth processes and landforms*

Rinaldi, M., and N. Casagli. 1999. Stability of streambanks formed in partially saturated soils and effects of negative pore water pressures: The Siene River (Italy). *Geomorphology* 26:253–277.

Rinaldi, M., B. Mengoni, L. Luppi, S.E. Darby, and E. Mosselman. 2008. Numerical simulation of hydrodynamics and bank erosion in a river bed. *Water Resour. Res.* 44:W09428, doi:10.1029/2008WR007008.