

Analisi della predisposizione al manifestarsi di sorgenti in area appenninica: un approccio statistico applicato all'area del Monte Modino (Provincia di Modena)

Federico Cervi¹, Alessandro Corsini¹, Alessandro Ghinoi¹, Francesco Ronchetti¹ & Maurizio Pellegrini¹

¹Università di Modena e Reggio Emilia – Dipartimento di Scienze della Terra

INTRODUZIONE

Negli ultimi anni l'Appennino settentrionale, nonostante la sensibile riduzione della popolazione residente, ha visto aumentare il proprio fabbisogno idrico a causa di diversi fattori ricollegabili principalmente allo sviluppo di nuovi insediamenti industriali e al crescente sfruttamento turistico sia nel periodo estivo che in quello invernale. Il reperimento di acqua è prevalentemente legato alla presenza di sorgenti, che sono distribuite in maniera disuniforme sul territorio, sono sovente scarsamente produttive (portate inferiori al litro/secondo) e mostrano una notevole variabilità del regime delle portate nell'anno idrologico. Durante le ultime estati, la riduzione della risorsa idrica erogata ha messo in crisi il sistema socio-economico appenninico. In casi estremi, come nell'estate 2003, è stato necessario l'intervento di autobotti a sopperire le esigenze della popolazione e del tessuto produttivo in diverse località. A tal fine, oltre ad una diversificazione delle metodologie di approvvigionamento idrico (creazione di invasi, soglie/captazioni lungo i corsi d'acqua) è tuttora utile pervenire al riconoscimento/caratterizzazione delle sorgenti e alla identificazione di aree predisposte al manifestarsi delle stesse. Il lavoro, centrato sull'applicazione di codici di calcolo statistici in ambiente Arc-GIS già utilizzati nel campo della ricerca geomineraria, integrati con l'analisi dei complessi idrogeologici, permette l'individuazione delle zone potenzialmente idonee al reperimento ed eventuale captazione della risorsa. Il tipo di informazione ottenuta, integrata ad una carta dei complessi idrogeologici, è utile per la pianificazione dello sfruttamento e per la tutela della risorsa idrica.

AREA DI STUDIO

Lo studio ha interessato un'area di circa 68 Km² posta nel settore sud-occidentale della Provincia di Modena, nei comuni di Montefiorino e Frassinoro (Figura 1). L'area è delimitata dai Torrenti Dolo e Dragone e presenta quote comprese tra i 1413 metri del M. Modino e i 450 metri circa del fondo d'alveo dei due torrenti. I terreni affioranti in questa porzione di catena appenninica sono ascrivibili ai Domini Toscani, Liguri e Sub-Liguri, rappresentati da sequenze torbiditiche a rappor-

to arenaria-pelite variabile, che possono raggiungere spessori di centinaia di metri (Arenarie del Cervarola, Formazione di Monte Venere, Formazione di Monghidoro, Arenarie di Poggio Mezzature) e da litologie argillose marnose di potenza variabile (Argille a Palombini, Argilliti dell'Uccelleria, Marne di Marmoreto).

Frequenti, all'interno dell'area, i movimenti franosi di tipo complesso (roto-traslativi a monte, che verso valle si evolvevano in colata). Non mancano comunque fenomeni di scivolamento in roccia, favoriti sia da dislocazioni di tipo tettonico che dalla presenza di interstrati pelitici.

La zona è caratterizzata da una discreta disponibilità di acqua, che ha fatto sì che quest'area fosse abitata fin dalla Età del Bronzo. In epoca romana si segnala l'apertura della Via Bibulca, importante strada di collegamento che congiungeva l'area a Roma. Proprio per alleviare la fatica ai viandanti sorgevano, ai fianchi di questa via di comunicazione, diversi punti di protezione, gli Hospitali, sempre posti vicino a sorgenti. Dal 1920 molte sorgenti furono captate ed incanalate con opere in muratura. Le stesse sono gestite attualmente, a seconda dei casi, da soggetti quali comuni, singoli privati, consorzi di privati, Meta Modena (ora parte del Gruppo HERRA s.p.a.). Nell'area sono state censite, durante la raccolta dei dati per il presente lavoro, 201 sorgenti e 14 emergenze non captate. Le portate medie misurate, manualmente od in continuo in 14 sorgenti ritenute rappresentative (durante il periodo 2005-2006), sono quasi sempre inferiori a 1 l/s, e solo in alcuni casi si sono avute punte massime che si aggirano sui 5-6 l/s. I dati di portata evidenziano un'estrema variabilità nell'anno idrologico con punte di magra che ricadono frequentemente a fine settembre ed inizio ottobre (Cervi F., 2005). L'analisi incrociata di questo dato e dei parametri chimico-fisici (temperatura, conducibilità e pH) ha portato alla conclusione che la quasi totalità delle sorgenti che ricadono nell'area di studio drenano circuiti sub-superficiali (profondità massime nell'ordine dei 50 metri). Tali sorgenti vengono a giorno a causa di limiti o soglie di permeabilità dovute rispettivamente a variazioni della permeabilità all'interno dello stesso mezzo idrogeologico che alimenta la sorgente (si pensi ad esempio alla diminuzione della apertura di una discontinuità) e alla presenza di strutture tettoniche tipo faglie e sovrascorri-

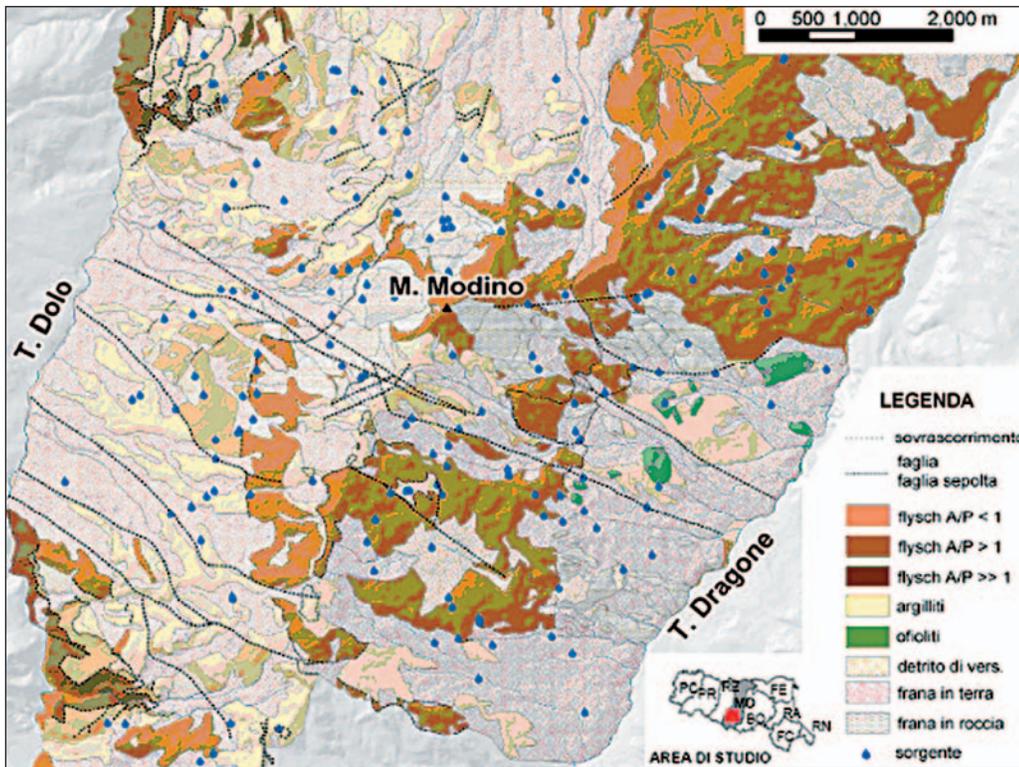


Figura 1. Inquadramento idrogeologico dell'area studiata e localizzazione sorgenti.

menti che causano la sovrapposizione di mezzi idrogeologici a permeabilità differente (Civita, 2005). Da segnalare comunque la presenza di estese e diffuse coperture detritiche, quasi sempre di scarsa potenza, interessate da diverse sorgenti di piccole dimensioni, contraddistinte da portate praticamente nulle nei mesi estivi.

METODO D'ANALISI

Il metodo statistico utilizzato per l'analisi della predisposizione (o suscettibilità) al manifestarsi di sorgenti nelle diverse porzioni dell'area di studio è il Weight of Evidence (WofE) proposto da Bonham-Carter et al. (1989) e Bonham-Carter (1994). Questo rientra nella categoria dei metodi di analisi probabilistica condizionale, ed è stato applicato con buoni risultati in vari campi, quali principalmente la ricerca mineraria (Bonham-Carter et al., 1990; Chung C.F and Agterberg F.P., 1980; Chung C.F and Keating P.B, 2002) e l'analisi del dissesto per frana (Agterberg, 1974; Neuland, 1976; Herbaugh et al., 1977; Bernknopf et al., 1988; Chung et al., 1988; Yin e Yan, 1988; Van Westen, 1993; Mark and Ellen, 1995).

Le unità di terreno che meglio si prestano all'applicazione di tale metodologia sono le cosiddette *unique-condition units* (UCU). Si tratta, in pratica, di unità di terreno che vengono generate, solitamente in ambiente GIS, dall'intersezione spaziale di diversi tematismi e risultano caratterizzate da una combinazione univoca delle classi rappresentate nei diversi tematismi da cui derivano. Le UCU possono essere di tipo vettoriale o di tipo raster. Nel nostro caso si è adottato questo secondo tipo, ottenendo quindi diverse UCU rappresentate ognuna da

gruppi di pixels caratterizzati da analoga combinazione delle classi dei fattori considerati. La sommatoria dell'area dei diversi pixels ricadenti nella medesima UCU rappresenta l'area complessiva dell'UCU stessa.

Il *Weight of Evidence* (WofE) rientra tra i metodi bivariati e multifattoriali. In pratica considera separatamente il contributo di ogni classe dei fattori predisponenti al verificarsi dell'evento di interesse (nel caso specifico il manifestarsi di una sorgente), determina l'indipendenza reciproca tra i fattori considerati e, infine, combina i diversi contributi arrivando a definire una complessiva probabilità a posteriori del verificarsi dell'evento di interesse.

Il metodo WofE si basa principalmente sul teorema di Bayes, che in riferimento ad ogni fattore predisponente considerato (identificato con "B"), ad ogni classe in esso rappresentato (identificato con "Bi"), ed alla presenza/assenza dell'evidenza di supporto (sorgente, "s") stabilisce quanto segue.

La probabilità condizionale di avere "s", data la classe "Bi", indicata con $P(s | Bi)$, è:

$$P(s | Bi) = \{P(Bi | s) * P(s)\} / P(Bi)$$

dove:

$P(Bi | s)$ è la probabilità condizionale di avere la classe "Bi", data "s"

$P(s)$ è la probabilità a priori di trovare l'evento "s" (sorgente) entro l'area di studio "AS"

$P(Bi)$ è la probabilità a priori di trovare la classe "Bi" entro l'area di studio "AS"

La probabilità condizionale di avere "s", non data la classe "Bi", indicata con $P(s | Bi^{\wedge})$, è:

$$P(s | Bi^{\wedge}) = \{P(Bi^{\wedge} | s) * P(s)\} / P(Bi^{\wedge})$$

dove:

$P(B_i | s)$ la probabilità condizionale di non avere la classe "Bi", data "s"

$P(s)$ è la probabilità a priori di trovare l'evento "s" (sorgente) entro l'area di studio "AS"

$P(B_i)$ è la probabilità a priori di non trovare la classe "Bi" entro l'area di studio "AS"

In pratica, si può calcolare:

$$P(s) = \text{area "s"} / \text{area "AS"}$$

$$P(B_i) = \text{area "Bi"} / \text{area "AS"}$$

$$P(B_i | s) = \text{area "Bi"} / \text{area "AS"}$$

$$P(s | B_i) = (\text{area "s _ Bi"} / \text{area "Bi"}) / P(B_i)$$

$$P(B_i | s) = (\text{area "s _ Bi"} / \text{area "Bi"}) / P(s)$$

$$P(s | B_i) = (\text{area "s _ Bi"} / \text{area "Bi"}) / P(B_i)$$

$$P(B_i | s) = (\text{area "s _ Bi"} / \text{area "Bi"}) / P(s)$$

Il WofE, partendo dalle probabilità condizionali definite col metodo di Bayes, definisce i pesi di ciascuna classe di fattori, ovvero dei diversi patterns binari individuati, attraverso sia una correlazione positiva che una correlazione negativa. La formulazione di tali pesi è:

$$W^+ = \ln \{ P(B_i | s) / P(B_i) \}$$

$$W^- = \ln \{ P(B_i | s) / P(B_i) \}$$

Da tali fattori si può inoltre calcolare il "contrasto" ($C = W^+ - W^-$). Un contrasto uguale a zero indica che la classe del fattore considerato non è significativa per l'analisi che si sta compiendo. Un contrasto positivo indica una correlazione spaziale positiva, viceversa per un contrasto negativo.

La carta della predisposizione (o suscettibilità) al manifestarsi di un determinato evento, ovvero nel nostro caso la presenza di una sorgente, si ottiene attraverso una combinazione lineare dei pesi delle diverse classi di fattori, ovvero calcolando, per ogni UCU, un valore di probabilità a posteriori ($Pp(s)$) dato da:

$$Pp(s) = \sum w_i * \ln P(s)$$

E' possibile inoltre validare i risultati ottenuti. Per far ciò le diverse evidenze di supporto (sorgenti) sono state divise in due gruppi quantitativamente analoghi. Un gruppo (training set), sulla base del quale è stata calcolata la probabilità a posteriori col metodo illustrato, ed un gruppo (validation set), sulla base del quale è possibile verificare la percentuale di sorgenti che ricadono nelle diverse classi di suscettibilità e per le rispettive percentuali dell'area di studio.

APPLICAZIONE

La distribuzione delle sorgenti nell'area di studio, che rappresentano l'evidenza di supporto a tutta l'analisi, è stata determinata partendo da documentazioni tecniche e attraverso rilievi sul terreno. In totale sono state localizzate 215 sorgenti, che hanno permesso di realizzare:

- un training set con 108 punti sorgente
- un validation set con 107 punti sorgente

Entrambi i dataset sono stati rasterizzati con dimensione di cella di 10x10 m.

Tra i vari fattori considerati predisponenti al manifestarsi di sorgenti citati in bibliografia (Celico, 1993; Civita, 2005), sono stati considerati i seguenti: tipologia di complesso idrogeologico, assetto giaciturale, distanza da faglie e sovrascorrimenti (Tabella 1). Tali informazioni sono state sintetizzate in layers di poligoni o linee alla scala nominale 1:10.000 in ambiente GIS (Figura 1) (Figura 2), poi rasterizzati con dimensione di cella di 10x10 m. Si tiene a precisare che, per ottenere l'assetto delle giaciture sono state incrociate una carta di esposizione del versante, una carta di acclività ed un layer poligonale che associa ad ogni area un determinato valor medio di direzione di immersione e di inclinazione del substrato. Si è resa necessaria la creazione di un ulteriore classe fittizia priva di dato in quanto alcune formazioni si presentano talmente tettonizzate da impedire la determinazione della giacitura.

L'applicazione del metodo Weights of Evidence è stata effettuata grazie al software Arc-SDM Spatial Data Modeller Extension (Kemp, L.D., et al. 2001), che si integra nei GIS Arc-View 3.2, ArcGIS 8.3, 9.0 e 9.1. Vengono descritti in seguito, per ogni fattore considerato predisponente, il peso ed il contrasto di ogni singola classe al fine di valutare l'effettiva influenza delle stesse al verificarsi del fenomeno. Nella Tabella 1 sono riportate le classi che, secondo l'analisi ponderata dei fattori, hanno un maggior peso (W^+) nella possibile venuta a giorno delle emergenze idriche.

Tabella 1 - Fattori predisponenti considerati nel calcolo della suscettibilità e relative classi.

| Fattore | n° classi | Tipo classi | Metodo |
|---|-----------|--|--|
| Complessi idrogeologici del substrato | 5 | Flysch a/p <1 Flysch a/p >1 Flysch a/p >>1 Argilliti Ofiolti | Affinamento della cartografia esistente, rilievi di terreno, stime di permeabilità da prove in foro e da rilievi strutturali delle discontinuità |
| Complessi idrogeologici dei depositi superficiali | 3 | Detrito di versante s.l. Frana in terra Frana in roccia | Affinamento della cartografia esistente, rilievi di terreno, stime di permeabilità da prove in foro e da rilievi strutturali delle discontinuità |
| Assetto giaciturale | 6 | Orizzontale Franapoggio < pendio Franapoggio > pendio Reggipoggio Traverspoggio No data | Incrocio tra un layer che associa ad ogni area un determinato valore medio di direzione di immersione e di inclinazione (ottenuto da rilievi di terreno), e carte di acclività ed esposizione ricavate da un Modello Digitale d'Elevazione con maglia 10 x 10 m e equidistanza in quota di 10 m. |
| Distanza da faglie certe | 15 | Buffer di 150 m diviso in classi di 10 m | Faglie presenti nel Foglio 235 "Pievepelago" della Carta Geologica d'Italia |
| Distanza da faglie presunte | 15 | Buffer di 150 m diviso in classi di 10 m | Faglie ipotizzate da fotointerpretazione |
| Distanza da sovrascorrimenti certi | 15 | Buffer di 150 m diviso in classi di 10 m | Sovrascorrimenti presenti nel Foglio 235 "Pievepelago" della Carta Geologica d'Italia |
| Distanza da sovrascorrimenti presunti | 15 | Buffer di 150 m diviso in classi di 10 m | Sovrascorrimenti ipotizzati da fotointerpretazione o mascherati da detrito o corpi di frana |

1) Complessi idrogeologici: Formazioni geologiche

Le classi litologiche che presentano W+ e Contrasto maggiori, che indicano una correlazione spaziale positiva, sono le ofioliti ed i flysch con rapporto arenaria/pelite >1 e <1 (Figura 2). Tra i flysch la classe più significativa è quella con rapporto arenaria/pelite >1 in quanto, pur avendo peso minore, ma comunque prossimo a quello che caratterizza la classe con rapporto arenaria/pelite >1 ha un valore di Contrasto sensibilmente superiore. La classe dei complessi idrogeologici flyschoidi con rapporto arenaria/pelite >>1 presenta valori nulli in quanto non ricadono sorgenti al suo interno; la causa sarebbe da ricercarsi nello scarso sviluppo areale complessivo di queste litologie (1,34 Km²), oltretutto localizzate sempre a ridosso del Torrente Dolo. E' quindi probabile che la venuta a giorno dei circuiti idrici sotterranei impostati all'interno di questi complessi avvenga in subalveo. Lo stesso problema relativo alla scarsa rappresentazione areale interessa anche la classe delle ofioliti, che occupano un regione veramente esigua di tutto il territorio studiato (0,57 Km²).

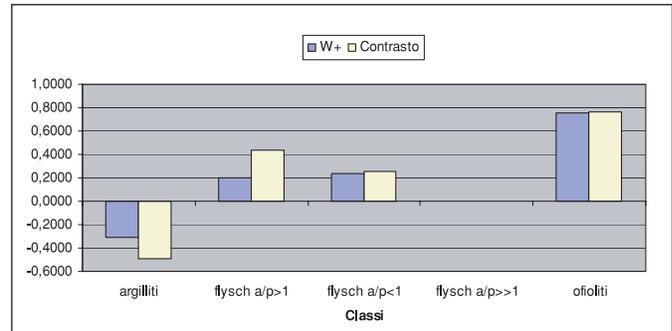


Figura 2. W+ e Contrasto nelle classi litologiche considerate.

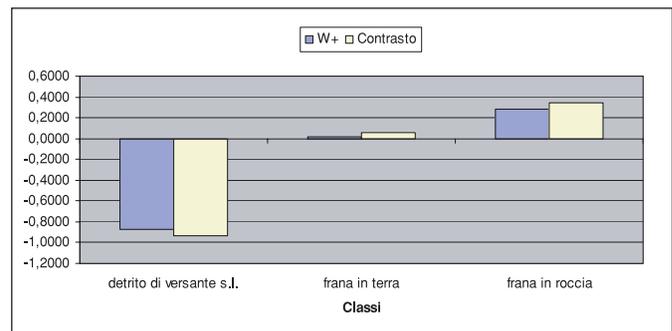


Figura 3. W+ e Contrasto nelle classi di depositi superficiali considerate.

2) Complessi idrogeologici: Depositi superficiali

In questo caso l'unica classe che presenta W+ e Contrasto positivi è quella relativa alle frane in roccia (Figura 3). Si nota una correlazione decisamente negativa per la classe del detrito di versante s.l. mentre, per la classe delle frane in terra, il valore di Contrasto circa nullo segnala una mancanza di relazione fra le sorgenti e questa tipologia di deposito.

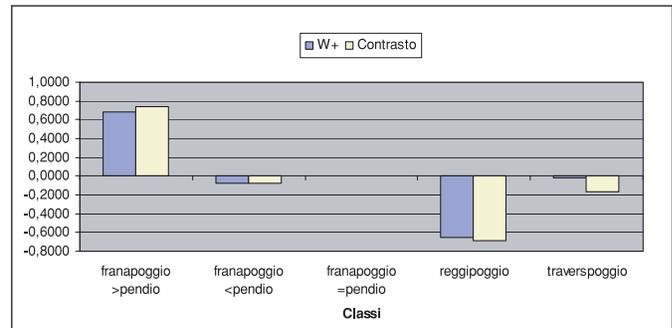


Figura 4. W+ e Contrasto nelle classi di giacitura considerate.

3) Assetto giaciturale

Una sola classe, quella relativa al franapoggio > pendio, presenta W+ e Contrasto decisamente positivi (Figura 4). La classe delle giaciture a franapoggio = pendio non presenta valori in quanto non ricadono sorgenti al suo interno; da non trascurare che questa classe risulta arealmente poco rappresentata.

4) Distanza da faglie

Inizialmente si sono valutati singolarmente i layer riguardanti le faglie certe e le faglie presunte; non essendo emerse sostanziali differenze durante il calcolo della suscettibilità, si è deciso di considerare un unico grafico finale (Figura 5) in cui è riportata la somma delle risultanti dei pesi e dei contrasti per ciascuna classe. La correlazione spaziale positiva è effettivamente riscontrata per le classi 1, 3, 5, 6 e 7 ovvero per una distanza dalla lineazione pari a 70 metri. Si nota la diminuzione di entrambi gli indici all'aumentare della distanza dalla linea di discontinuità.

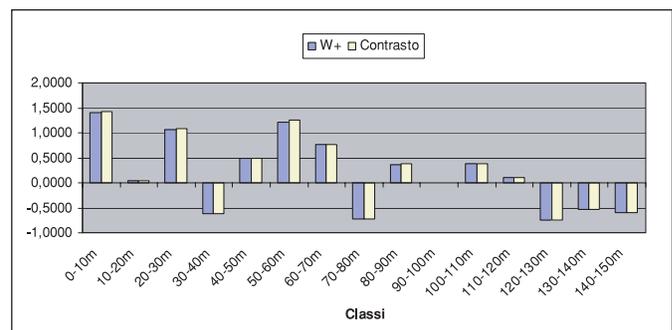


Figura 5. W+ e Contrasto nelle classi di distanza dalle linee di faglia.

5) Distanza da sovrascorrimenti

Analogamente al calcolo della suscettibilità effettuato per le faglie si è deciso di separare i sovrascorrimenti direttamente visibili e cartografabili sul terreno (layer

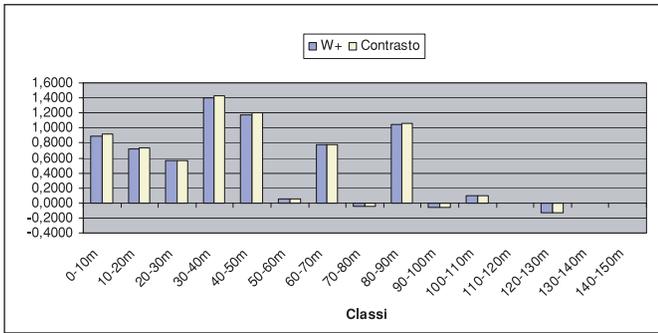


Figura 6. W+ e Contrasto nelle classi di distanza dai sovrascorrimenti certi.

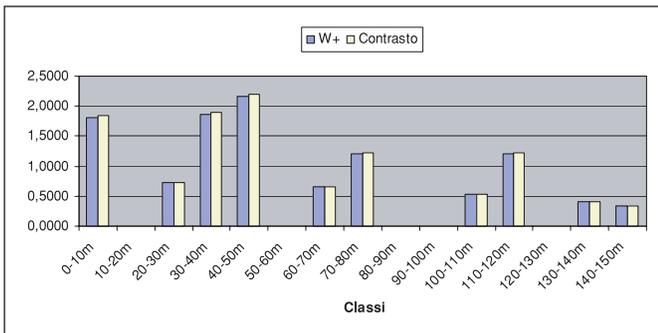


Figura 7. W+ e Contrasto nelle classi di distanza dai sovrascorrimenti presunti.

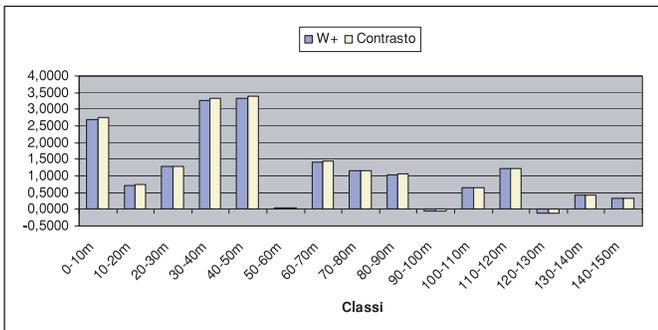


Figura 8. W+ e Contrasto nelle classi di distanza dai sovrascorrimenti.

dei sovrascorrimenti certi) da quelli ipotizzabili ma mascherati da coltri di detrito o corpi di frana (layer dei sovrascorrimenti presunti). L'analisi ha permesso di evidenziare valori di W+ positivi nelle prime nove classi dei sovrascorrimenti certi, ovvero fino a 90 metri di distanza dalla lineazione stessa (Figura 6). Nei layer dei sovrascorrimenti presunti la correlazione spaziale positiva si mantiene, seppur con valori di W+ e Contrasto sensibilmente inferiori, anche nelle classi più distanti (Figura 7). Ciò è probabilmente dovuto alla copertura, di spessore più o meno rilevante, che maschera tali sovrascorrimenti e che costringe le acque a venire a giorno solo dopo aver percorso un'ulteriore tragitto entro un mezzo a diversa permeabilità. Questo provoca con ogni probabilità la dispersione spaziale della venuta a giorno delle acque di circolazione.

Tabella 2 - Fattori predisponenti e classi a maggiore suscettibilità.

| Fattori predisponenti | Classe | W + | Contrasto |
|-------------------------------|-----------------------------|---------|-----------|
| Litologia | Flysch con rapporto a/p < 1 | 0,2339 | 0,2502 |
| | Flysch con rapporto a/p > 1 | 0,2004 | 0,4381 |
| Assetto | Franapoggio > pendio | 0,6861 | 0,7346 |
| Depositi superficiali | Frane in roccia | 0,2838 | 0,3427 |
| Distanza dalle faglie | 0-10 metri | 1,3976 | 1,4331 |
| | 10-20 metri | 0,0510 | 0,0519 |
| | 20-30 metri | 1,0654 | 1,0761 |
| | 30-40 metri | -0,6128 | -0,6207 |
| | 40-50 metri | 0,4856 | 0,4927 |
| | 50-60 metri | 1,2108 | 1,2509 |
| Distanza dai sovrascorrimenti | 60-70 metri | 0,7583 | 0,7650 |
| | 0-10 metri | 2,6977 | 2,7512 |
| | 10-20 metri | 0,7235 | 0,7331 |
| | 20-30 metri | 1,289 | 1,3018 |
| | 30-40 metri | 3,2646 | 3,3165 |
| | 40-50 metri | 3,3340 | 3,4016 |

Successivamente si sono sommati, per ciascun intervallo di distanza, i valori calcolati di peso e di contrasto, come peraltro già effettuato nel calcolo della suscettibilità per le linee di faglia; il risultato (Figura 8) è che la correlazione spaziale si mantiene sostanzialmente positiva sino a 90 metri di distanza; risultano però decisamente elevati i valori di W+ e Contrasto calcolati entro le prime 5 classi, con valori decisamente superiori all'unità.

La tabella finale (Tabella 2) riassume i risultati delle analisi dei pesi effettuate su ogni singolo layer; si evince che i sovrascorrimenti, tra tutti i fattori considerati, hanno i valori di W+ e Contrasto più elevati, cioè sono i più predisponenti alla venuta a giorno delle emergenze idriche.

Dopo aver determinato quali sono le classi più significative per ogni fattore considerato è stata calcolata la probabilità a posteriori sommando il peso di ogni classe col logaritmo naturale della probabilità a priori calcolato in precedenza. Ciò ha portato alla redazione di diverse carte di suscettibilità che combinano in modo differente i fattori predisponenti valutati nell'analisi. È stata scelta come carta finale quella che prende in considerazione tutti i fattori predisponenti poiché la validazione di tale risultato ha mostrato come essa sia quella con i valori di suscettibilità più alti, sia in termini assoluti che in rapporto alla percentuale di area di studio da essi occupata.

La validazione è stata ottenuta incrociando il gruppo di sorgenti di validazione (validation set) e la carta suscettibilità ottenuta partendo dal layer delle sorgenti di allenamento (training set). In un grafico (Figura 9) è stata riportato sull'asse delle ordinate la percentuale di sorgenti del "validation set" e sull'asse delle ascisse la percentuale di area di studio in ordine decrescente di suscettibilità. Dall'analisi del grafico

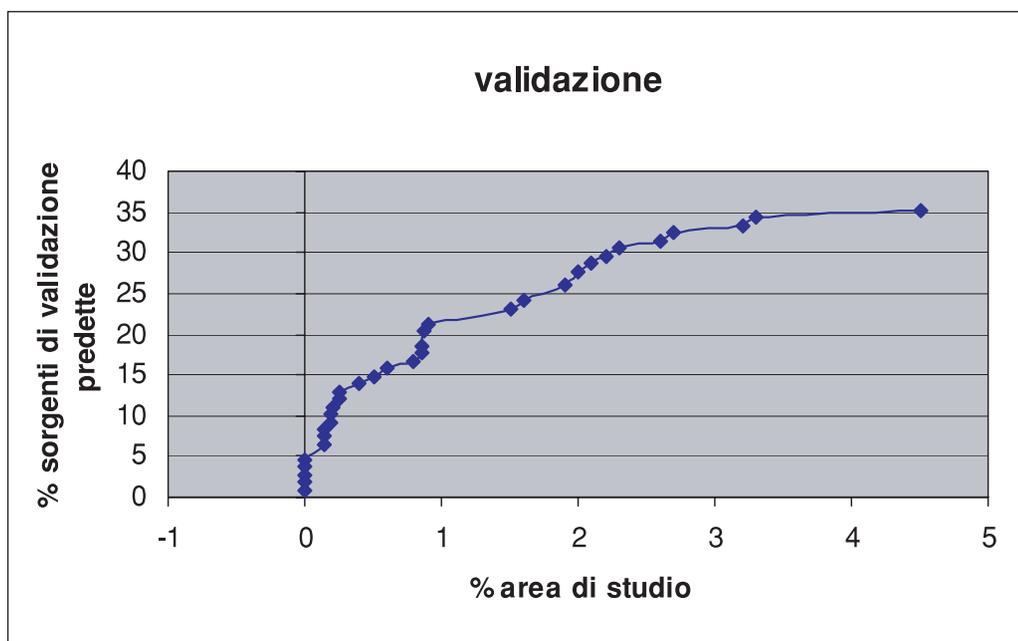


Figura 9. Grafico di validazione.

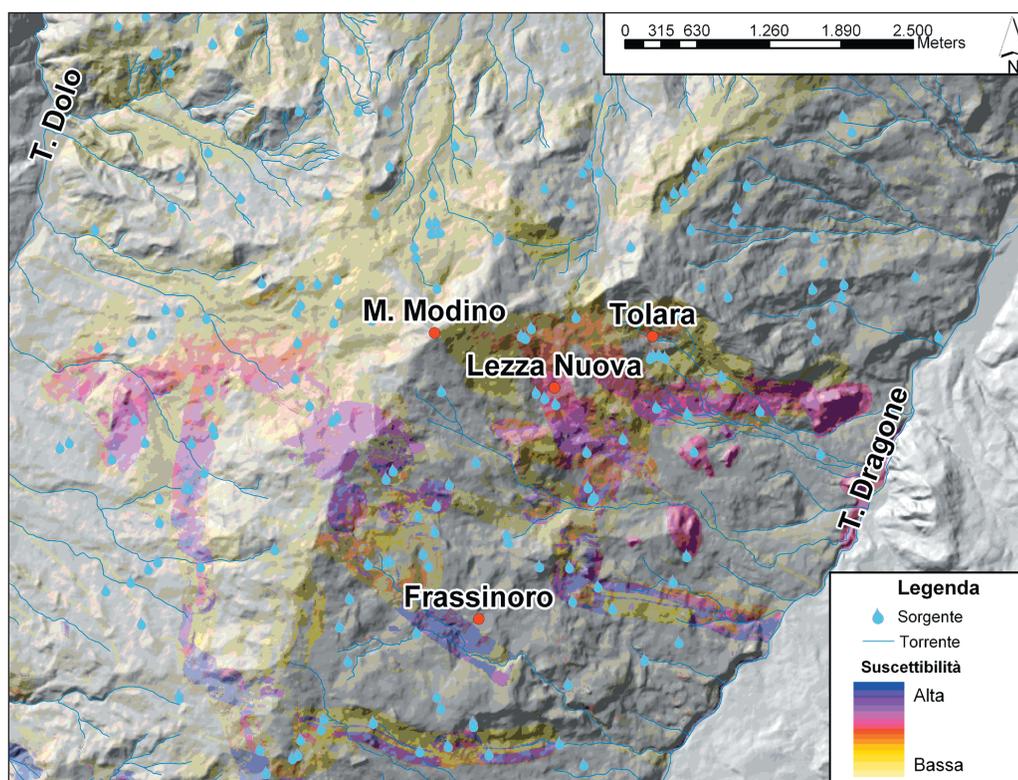


Figura 10. Suscettibilità al manifestare sorgenti su DEM.

risulta che oltre il 36% di sorgenti di validazione ricade all'interno del 4,49% di area di studio corrispondente al valore di suscettibilità più alta.

La carta finale della suscettibilità è rappresentata in Figura 10 sovrapposta al Digital Elevation Model con maglia 10 x10 m.

Le zone a maggiore suscettibilità sono localizzate prevalentemente al contatto fra ammassi flyschoidi permeabili e formazioni argillose sottoposte. Nell'area

la disposizione delle sorgenti risulta quindi fortemente condizionata dalla tettonica, che ha determinato la netta sovrapposizione di complessi idrogeologici a differente permeabilità. Ciò risulta ben visibile sia in Val Dolo (parte occidentale della carta) che in Val Dragone (porzione orientale della carta), con i sovrascorrimenti delle unità idrogeologiche flyschoidi a rapporto a/p <1 e >1 (Arenarie di Poggio Mezzature e Flysch di Monte Venere) sulle unità idrogeologiche

argillitiche (Argilliti dell'Uccelleria e Argille a Palombini). Dall'analisi della carta di suscettibilità emerge inoltre la minore importanza dei complessi idrogeologici costituiti da depositi superficiali; le sorgenti risultano infatti essenzialmente relazionate ad un contatto tettonico tra litotipi diversi, se si esclude la zona ad alta suscettibilità situata nei pressi del coronamento di due frane (note col nome di Lezza Nuova e di Tolara, Figura 10). In quest'ultimo caso, sembra però assumere un'importanza notevole nel determinare l'alta suscettibilità la faglia che in tale zona attraversa il Flysch di Monte Venere e le Arenarie di Poggio Mezzature.

CONCLUSIONI

Il dato di suscettibilità al manifestare sorgenti, combinato alla carta dei complessi idrogeologici basata sulla classificazione della "permeabilità relativa" (Civita, 2005), ottenuta per mezzo di prove di permeabilità in foro (Lefranc e Slug-test) e rilievi geomeccanici, evidenzia come i complessi idrogeologici di tipo flyschoidi rappresentino i maggiori serbatoi idrici dell'area. Infatti le aree maggiormente produttive sono localizzate alla base di questi ultimi, che presentano conducibilità idrauliche comprese tra 10^{-5} e 10^{-6} m/s, in special modo laddove essi si trovino in contatto tettonico o stratigrafico con i complessi idrogeologici marnoso-argillosi, caratterizzati da permeabilità generalmente inferiori a 10^{-9} m/s. La presenza di frane in roccia impostate nei complessi idrogeologici flyschoidi, già permeabili per fratturazione, incrementa la conducibilità idraulica degli stessi (fino a 10^{-4} m/s) e permette un maggiore immagazzinamento della risorsa idrica; la situazione non sembra venir modificata dalla presenza dei corpi di frana in terra, che sono caratterizzati da permeabilità generalmente basse (circa 10^{-8} m/s) e non possono essere considerati acquiferi a tutti gli effetti.

La buona correlazione ottenuta tra fattori predisponenti e sorgenti, confermata dal grafico di Figura 9, caratterizzato infatti da una curva di validazione che riesce a riconoscere correttamente molti dei 107 punti sorgente nell'areale della classe più suscettibile, permette di evidenziare l'importanza degli approcci statistici "GIS-based" non solo nella stima della propensione al dissesto da frana e nella ricerca mineraria, come riportato in letteratura specifica, ma anche nella valutazione delle zone più idonee al reperimento della "risorsa acqua". Tale strumento permette infatti di focalizzare l'attenzione verso aree di estensione limitata dove, a valle di valutazioni idrogeologiche di maggior dettaglio e di stime costi-benefici, potranno essere pianificate e realizzate opere di captazione che possono contribuire a mitigare gli effetti della carenza idrica in zone di montagna.

BIBLIOGRAFIA

- Agterberg F.P. (1974) *Geomathematics*. Elsevier, Amsterdam, 596pp.
- Bernknopf R.L., Campbell R.H., Brookshire D.S., Shapiro C.D. (1988) – *A probabilistic approach to landslide hazard mapping in Cincinnati, Ohio, with applications for economic evaluation*. *Bull. Ass. Eng. Geol.*, 25 (1): 39-56.
- Bonham-Carter G.F., Agterberg F.P. & Wright D.F. (1988) – *Integration of geological datasets for gold exploration in Nova Scotia*. *Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(11): 1585-1592.
- Bonham-Carter G.F., Agterberg F.P. & Wright D.F. (1989) – *Weights of evidence modelling: a new approach to mapping mineral potential*. In: F.P. Agterberg & G.F. Bonham-Carter (Eds.): "Statistical applications in the Earth Sciences". Geological Survey of Canada, Paper 89(9): 171-183.
- Bonham-Carter G.F. & Agterberg F.P. (1990) – *Application of a microcomputer-based geographic information system to mineral potential mapping*. In: T. Hanley & D.F. Merriam (Eds.): "Microcomputers in Geology". Pergamon Pres.
- Bonham-Carter G.F., Agterberg F.P. & Wright D.F. (1990) – *Statistical pattern integration for mineral exploration*. Geological Survey of Canada, Inter. Rept. Ottawa.
- Celico P. (1993) – *Prospezioni Idrogeologiche Vol. 1 e 2*. Liguori Editore, Napoli.
- Cervi F. (2005) – *Assetto idrogeologico del Monte Modino (Alta Val di Secchia, Provincia di Modena)*. Tesi di laurea inedita, Università degli studi di Modena e Reggio Emilia.
- Civita M. (2005) – *Idrogeologia applicata e ambientale*. Casa Editrice Ambrosiana, Milano.
- Chung C. F. & Agterberg F.P. (1980) – *Regression models for estimating mineral resources from geological map data*. *Mathematical Geology*, 12(5): 473-488.
- Chung C. F., Fabbri A.G. & Sinding Larsen R. (Editors) (1988) – *Quantitative analysis for mineral and energy resources*. NATO – ASI series v. 223 Reidel Publ. Co. Dordrecht.
- Chung C. F. & Fabbri A. (1999) – *Prediction Models in Spatial Data Analysis*. Geological Survey of Canada, Ottawa.
- Chung C. F. & Keating P.B. (2002) – *Mineral potential evaluation based on airborne geophysical data*. *Exploration Geophysics*, 33:28-34.
- Kemp L.D., Bonham-Carter G.F., Raines G.L. and Looney C.G. (2001) – *Arc-SDM: Arcview extension for spatial data modelling using weights of evidence, logistic regression, fuzzy logic and neural network analysis*.
- Herbaugh J. W., Divedton J.H. & Davis J.C. (1977) – *Probability methods in oil exploration*. Wiley New York.
- Mark R.K. & Ellen S.D. (1995) – *Statistical sand simulation models for mapping debris-flow hazard*. Carrara and Guzzetti (Editors), Geographical Information system on Assessing Natural Hazard, Kluwer Pub., Dordrecht, The Netherlands.
- Neuland H. (1976) – *A prediction model of landslips*. *Catena*, 3: 215- 230.
- Van Wasten C. J. (1993) – *Application of Geographic Information System to landslide hazard zonation*. ITC – Publication No. 15, ITC, Enschede, 245pp.
- Yin K.L. & Yan T.Z. (1988) – *Statistical prediction model for slope instability of metamorphosed rocks*. *Proceed. 5th Int. Symp. Landslide, Lausanne*, v. 2: 1269 – 1272.