

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PISA
FACOLTÀ DI SCIENZE MATEMATICHE FISICHE E NATURALI



Corso di Laurea Specialistica in
Geofisica di Esplorazione ed Applicata



Anno Accademico 2009/2010

Candidato: **Serena Minucci**
Laurea Triennale: **Scienze Geologiche**

Titolo della tesi

Elaborazione e analisi multivariata di dati magnetometrici e spettrometrici eliportati.
Applicazione all'esplorazione per "Porphyry Copper Systems" nell'area di TAD/Toro
(Yukon Territory, Canada).

Relatore: **Paolo Costantini**
Correlatore: **Paolo Cantini**

Controrelatore: **Paolo Scandone**

Riassunto esteso

In questa tesi è descritto il lavoro di elaborazione e di interpretazione di dati geofisici al fine di individuare uno specifico target di natura mineraria: un sistema porfirico di rame, oro e molibdeno. Lo scopo di questo lavoro è stato quello di verificare le possibilità interpretative offerte da algoritmi di analisi integrata, utilizzando tecniche ed algoritmi mutuati dall'analisi multi-variabile (cluster analysis) tramite la loro applicazione ed il confronto con le metodologie, più classiche, di interpretazione qualitativa. I dati presi in considerazione, magnetometrici e spettrometrici, sono stati acquisiti, su piattaforma eliportata, su di un'area di circa 95 km², situata nel Dawson Range (Yukon, Canada) e denominata TAD/Toro (vd. Fig. 1 per la sua localizzazione geografica); questa zona, parzialmente esplorata con prospezioni a terra di tipo geologico e geochemico fin dagli anni '60, mostra infatti evidenze geologiche con le caratteristiche tipiche dei sistemi porfirici.

Dal punto di vista geologico, l'area di TAD/Toro è caratterizzata da un basamento Paleozoico, il Complesso Nasina, composto da scisti, gneiss e rocce plutoniche, intruso nel Cretaceo medio dal batolite del Dawson Range, costituito da rocce granitiche di composizione da intermedia a felsica, e dalla *suite* tardo-cretacica di Prospector Mountain, che è costituita principalmente da *stock* porfirici (graniti e monzoniti). La mineralizzazione (Au, Cu e Mo) è associata con gli episodi intrusivi tardo-mesozoici (Prospector Mountain) ed è caratterizzata da un sistema di alterazione idrotermale tipico che, sebbene limitato a questi corpi intrusivi, mostra praticamente tutte le facies di alterazione normalmente presenti nei sistemi tipo Porphyry (propilitica, fillica, argillica, potassica). Esempi di vene polimetalliche sono stati osservati nelle aree di affioramento del basamento paleozoico. Nel

tardo Cretaceo-Terziario, l'area è stata interessata dagli eventi vulcanici del Gruppo Carmacks rappresentato da basalti shoshonitici e da flussi mafici.

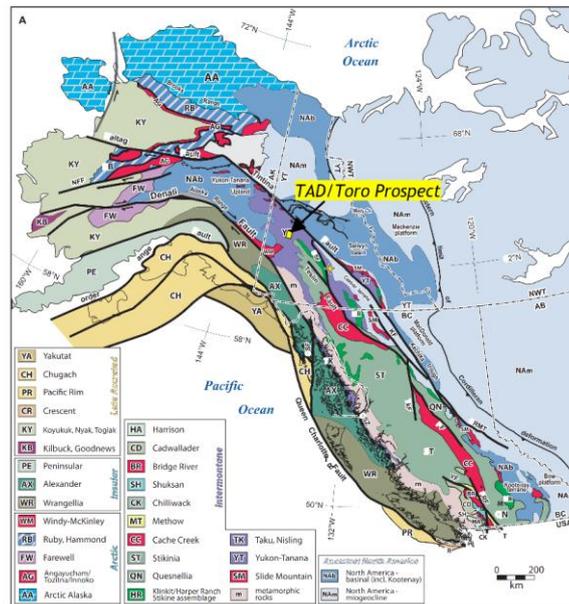


Fig. 1 - Posizione geografica dell'area studiata (base geologico strutturale da Colpron & Bennet, 2010)

La prima parte del lavoro di tesi è consistita in una ricerca bibliografica finalizzata all'inquadramento geologico e strutturale della zona; durante questa fase preliminare sono state inoltre studiate le caratteristiche mineralogico-geochimiche più generali dei Porphyry Systems, in maniera da poter definire le proprietà fisiche più diagnostiche, dal punto di vista dell'esplorazione

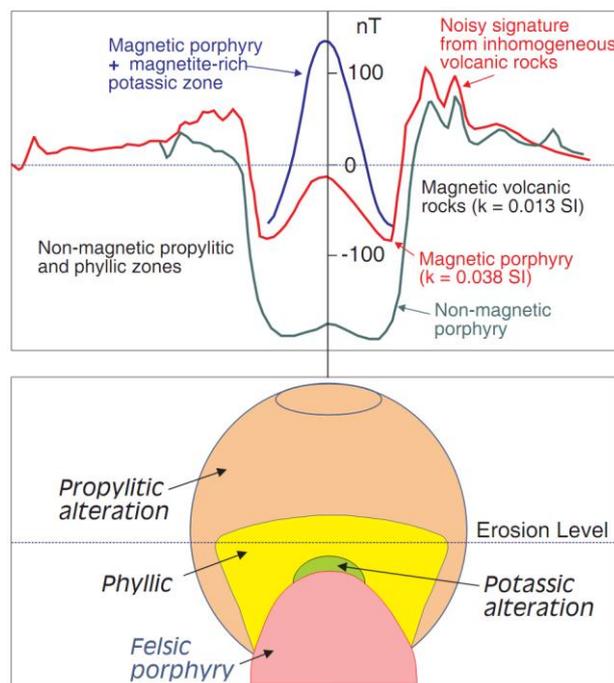


Fig. 2 - Andamento del campo magnetico in funzione del tipo di alterazione (da Ford et Al., 2007)

geofisica, delle facies di alterazione idrotermale associate con tali sistemi. La figura 2 mostra l'andamento del campo magnetico in funzione della presenza, o meno, di magnetite secondaria, nella zona di nucleo di un ipotetico sistema *porphyry*.

Successivamente, dopo una familiarizzazione con i metodi magnetometrici e spettrometrici, e sulle relative tecniche di elaborazione dati, è iniziata la fase di elaborazione vera e propria. A tal fine è stato impiegato il software Geosoft Oasis Montaj che, integrato per alcuni aspetti dal pacchetto Surfer (Golden Software), ha permesso di effettuare tutti i vari step di processing 2D.

La parte finale del lavoro di elaborazione dati, cioè la integrazione quantitativa dei vari livelli prodotti con l'elaborazione "classica", è stata effettuata utilizzando l'algoritmo di *Cluster Analysis* presente nel software SAGA-GIS (un *package Open-Source* sviluppato dal *Department of Physical Geography* dell'Università di Gottingen).

La prima fase di elaborazione dati (*pre-processing*) è consistita in una serie di operazioni, volte alla individuazione ed all'eliminazione di eventuali disturbi casuali (ad esempio *noise spikes*) e infine alla creazione di *grid* regolari, suscettibili di essere trattati tramite gli algoritmi FFT 2D impiegati nelle trasformazioni lineari. Nel caso dei dati magnetici, le tecniche utilizzate per l'eliminazione dei contributi legati a sorgenti non di interesse sono state, in particolare, il *de-spiking* non lineare, volto ad eliminare picchi di rumore dovuti ad errori strumentale e per loro natura difficilmente eliminabili o minimizzabili tramite algoritmi lineari; il *detrending*, che permette, tramite la residualizzazione effettuata rispetto ad una superficie polinomiale calcolata con i minimi quadrati, di escludere contributi dovuti a sorgenti la cui profondità è maggiore di quella di interesse, ed infine le correzioni degli effetti di linea (causati da variazioni a grande lunghezza d'onda spaziale presenti fra le linee, parallele, di acquisizione) tramite l'utilizzo di tecniche di *microlevelling*. Le stesse correzioni, con l'eccezione della residualizzazione, sono state anche applicate ai canali spettrometrici. Per la creazione dei *grid* regolari (di campo magnetico, e delle concentrazioni dei tre isotopi K, U e Th) è stato utilizzato, dopo alcune prove comparative con *Minimum Curvature* e *Bi-directional Spline gridding*, l'algoritmo di *Kriging*, dato che quest'ultimo ha mostrato il più alto livello di stabilità rispetto al rumore residuo e di coerenza interlinea. Al fine di limitare gli effetti di disturbo generati da non-periodicità o troncamento, ad esempio le oscillazioni di Gibbs, o *ringing*, per ognuna delle variabili trattate sono stati generati vari *grid*, con risoluzione e raggi di ricerca diversi e di questi sono stati scelti, per le elaborazioni successive quelli che presentavano le migliori distribuzioni spettrali.

Durante le fasi di elaborazione dati vera e propria sono state costruite, relativamente alla spettrometria, le mappe dei rapporti isotopici Th/K (diagnostica per quanto riguarda eventuali arricchimenti di potassio), U/K e U/Th (utili per distinguere risposte litologiche differenti) e la mappa ternaria (che permette di sintetizzare in un'unica rappresentazione, le relative concentrazioni dei tre isotopi). La figura 3 mostra la distribuzione del rapporto Th/K e la mappa ternaria.

Per quanto riguarda la magnetometria, sono state applicate varie trasformazioni lineari (utilizzando le trasformate FFT in 2D):

- Riduzione al Polo: essenziale per eliminare la dipendenza dell'anomalia dalla latitudine, centrando i massimi magnetici sugli eventuali corpi causativi.
- Gradiente Verticale: consistente nell'operazione di derivazione secondo la verticale, questa operazione elimina gli effetti a grande lunghezza d'onda e migliora la definizione delle anomalie.

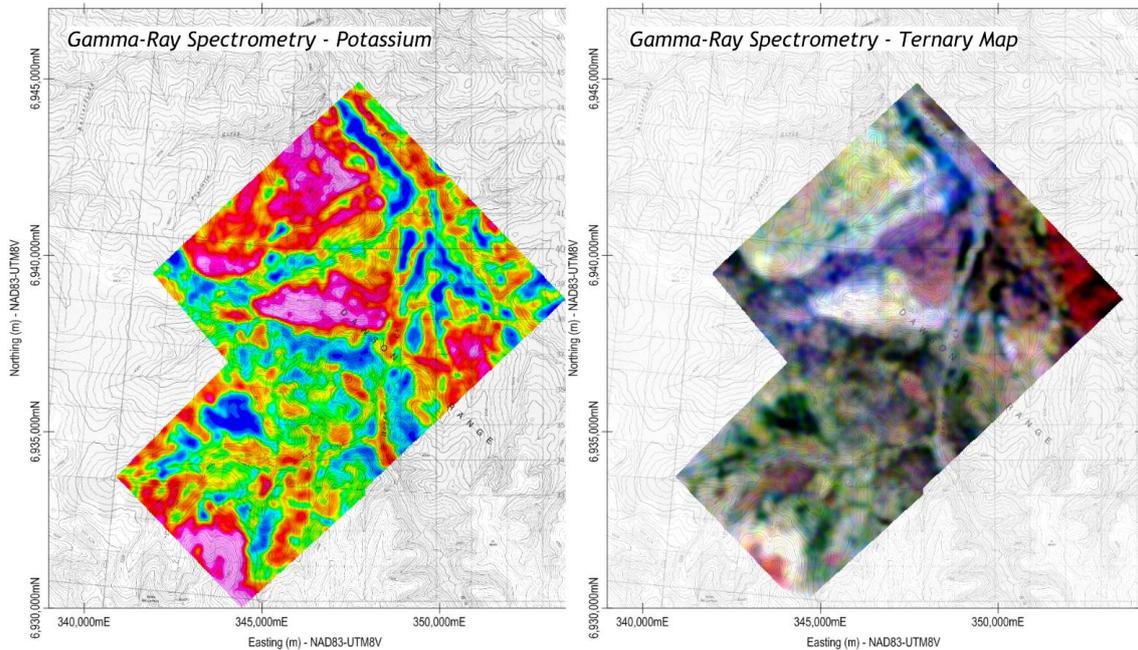


Fig. 3 - Carta del rapporto Th/K e mappa Ternaria (K, Th, U in Red-Green-Blue)

- Pseudo-gravità: tramite questo filtro si convertono le anomalie magnetiche (caratterizzate da una natura dipolare) nelle equivalenti anomalie (monopolari) di gravità. Questa trasformazione è particolarmente utile per creare dei dati di input per la successiva operazione di individuazione delle discontinuità.
- Gradiente Orizzontale Totale: questa trasformazione (non-lineare perché consistente nel modulo, euclideo, delle componenti X ed Y della derivata orizzontale) permette di localizzare, quando applicato sui dati della trasformata Pseudo-Gravitazionale, i limiti laterali dei corpi causativi.

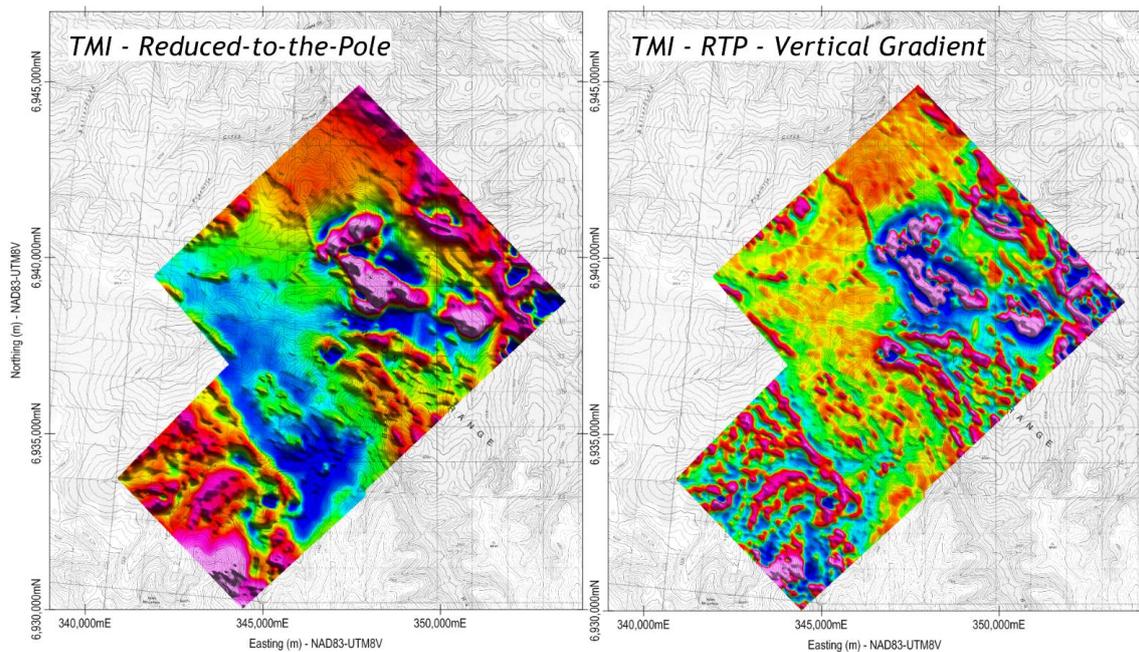


Fig. 4 - Carta del Campo Magnetico Ridotto al Polo (a sinistra) e suo Gradiente Verticale (a destra)

La prima fase dell'interpretazione è consistita quindi nella valutazione qualitativa delle varie mappe prodotte, prendendo in considerazione il tipo di informazione evidenziato dal tipo di processing applicato e creando quindi dei livelli interpretativi con uno specifico significato geologico-minerario.

I massimi del gradiente verticale delle anomalie magnetiche, definiti scegliendo un valore di soglia arbitrario, sono stati quindi utilizzati per evidenziare le zone di probabile arricchimento in magnetite secondaria, specialmente nei casi in cui la distribuzione spaziale permetteva di ipotizzare che quest'ultima fosse secondaria e coincidesse quindi con la zona di nucleo dell'eventuale (o eventuali) sistema *Porphyry*. Le discontinuità messe in evidenza tramite l'analisi del gradiente orizzontale sono state utilizzate per individuare possibili faglie o contatti geologici.

Dei dati spettrometrici, a questo fine, la carta del rapporto Th/K è risultata la più attendibile per la messa in evidenza e la delineazione spaziale delle zone di alterazione potassica (nucleo del sistema porfirico e parzialmente coincidente con gli alti magnetici): essendo il potassio, di per sé, non sufficiente a delineare tali zone, data la presenza, nell'area, di numerosi affioramenti di granitoidi ricchi in potassio ma non interessati da alterazione idrotermale.

La figura 5 riporta, in maniera sintetica, i principali risultati ottenuti tramite analisi delle discontinuità e delimitazione dei massimi magnetici (possibile presenza di magnetite secondaria) e dei minimi del rapporto Th/K (possibile alterazione potassica).

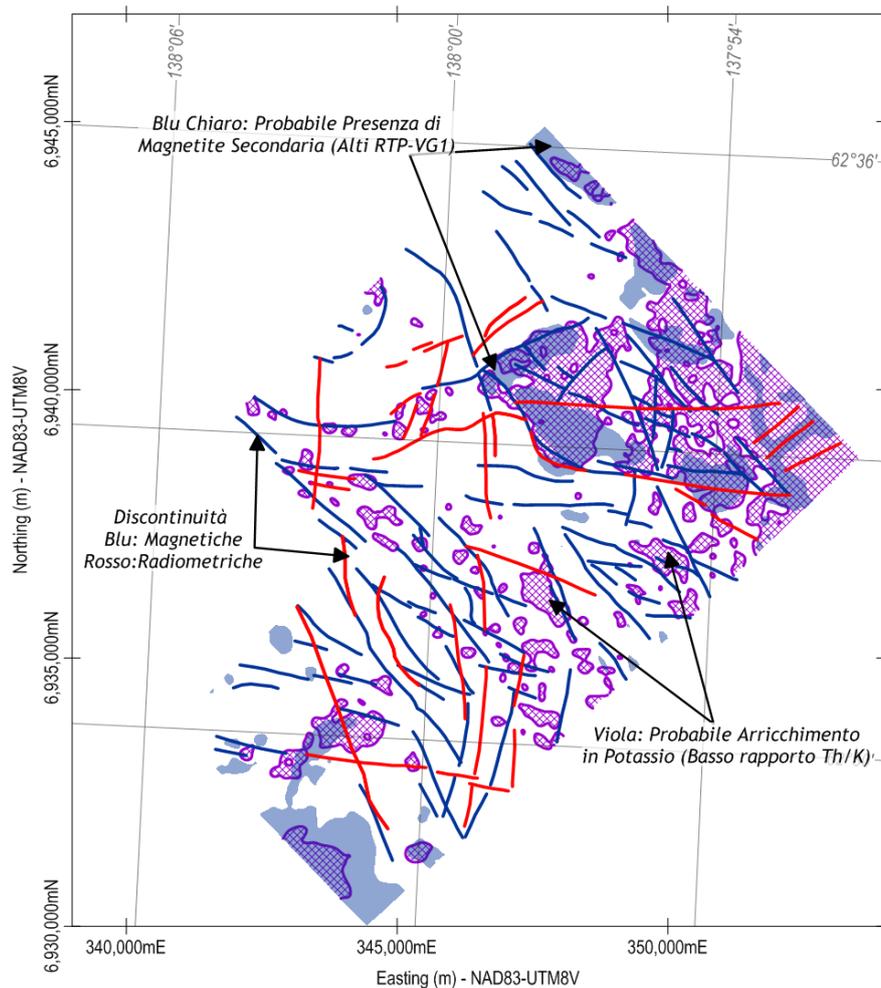


Fig.5 - Interpretazione Qualitativa: Carta di sintesi.

Un'ulteriore fase di elaborazione dei dati magnetici e spettrometrici ha riguardato la classificazione, automatica, della risposta fisica osservata. Ogni punto del *grid*, riferibile ad una certa porzione dell'area esplorata è stato quindi considerato nei termini delle dimensioni fisiche ad esso attribuibili: i sei valori derivati dai dati spettrometrici (isotopi e rapporti) più i due derivati da quelli magnetometrici (ridotta al polo e gradiente verticale). L'analisi multi-dimensionale è stata quindi effettuata con lo scopo di ottenere, per ogni cella del *grid* una combinazione specifica di questi otto indicatori, e di attribuire quindi a tale cella spaziale un tipo litologico e/o una facies di alterazione specifico.

Per l'analisi multi-variata è stato utilizzato un algoritmo di “*Unsupervised Classification*” che rientra nella categoria degli algoritmi di “*Cluster Analysis*”. In particolare, l'algoritmo impiegato è stato quello cosiddetto dei *k-means*, che permette di individuare, tramite una procedura iterativa, i raggruppamenti più significativi, richiedendo come input da parte dell'utente solamente il numero totale di gruppi (*clusters*) da prendere in considerazione.

I vantaggi connessi con l'uso di tali algoritmi, rispetto all'interpretazione “classica” di tipo qualitativo, consistono essenzialmente nella maggiore efficienza, in termini di tempo, e nella mancanza di fattori soggettivi nel processo interpretativo. Sebbene varie combinazioni dei *grid* in input siano state provate, la più efficace è risultata quella in cui sono stati impiegati tutti e otto i

livelli, per un totale di 10 *clusters* (numerati da 0 a 9); il risultato, in forma di mappa, è mostrato in figura 6.

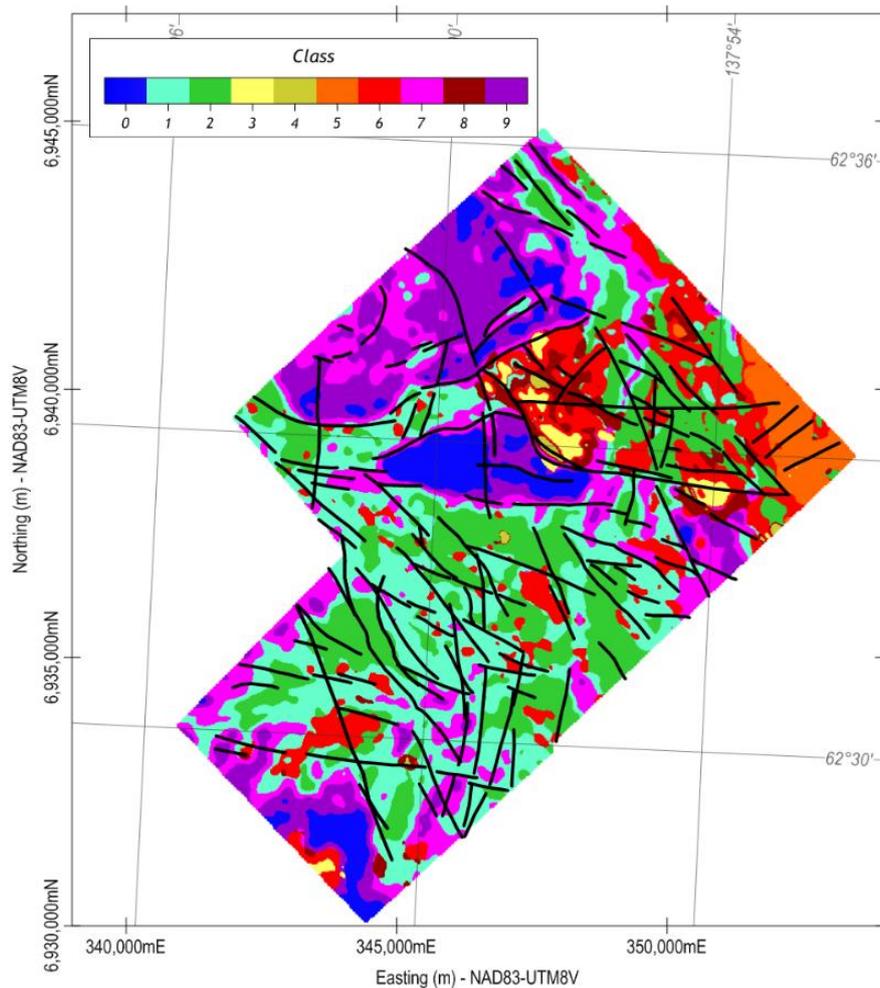


Fig. 6 - Cluster Analysis Map: MAG+RAD, 10 Classi.

Dal confronto dei risultati della *Cluster Analysis* con i dati originali, con le carte dell'interpretazione qualitativa e con i dati geologici disponibili, emerge una ottima corrispondenza e, per quanto riguarda i risultati della classificazione "automatizzata", una capacità risolutiva sia spaziale che di tipi litologici e facies di alterazione superiore e difficilmente ottenibile tramite le tecniche interpretative più convenzionali.

I settori anomali, evidenziati da classi caratterizzate da associazioni fisiche diagnostiche (alta suscettibilità magnetica e/o alto rapporto Th/K, Classi 3, 6 e 8) possono essere direttamente impiegati per la localizzazione di target minerali, mentre le altre classi identificate permettono di definire quasi altrettante classi litologiche e consentono potenzialmente di realizzare, ovviamente supportate dai necessari controlli sul terreno, una carta litologica e strutturale predittiva.