

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: **Martelli Cosimo**
Laurea Triennale: **Scienze Geologiche**

Titolo della tesi

Elaborazione integrata di dati geofisici per la stima del potenziale minerario (Porphyry Cu, Au, Mo); applicazione della metodologia all'area del Dawson Range, Yukon Territory (Canada).

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

Controrelatore: **Paolo Scandone**

Riassunto esteso

Il procedimento chiamato *Prospectivity Mapping* rappresenta un ben definito metodo d'approccio a ricerche di tipo minerario. Conosciuta anche come *Mineral prospectivity mapping* o *Mineral potential mapping*, questa tipologia d'esplorazione consiste fondamentalmente nell'elaborazione integrata di dati di natura sia geofisica che geochemica, nonché geologico-strutturale. La loro integrazione quantitativa consente di ottenere mappe a valori di probabilità relativa di rinvenimento per specifici depositi minerari. Tipicamente sono usati livelli informativi riguardanti la geologia, l'assetto strutturale, la geochemica, le immagini da satellite e dati di natura geofisica come gravimetria, magnetometria e radiometria, nonché modelli digitali della quota topografica. Fondamentalmente esistono due tipi d'approccio per tale lavoro: il primo, detto *data-driven*, sfrutta le conoscenze riguardo a mineralizzazioni eventualmente presenti, e le relaziona alle caratteristiche dell'area in esame; il secondo, chiamato *knowledge-driven*, non disponendo di dati derivanti da depositi già documentati, si avvale solo di dati indiretti (fatta eccezione per la geologia) e della letteratura eventualmente disponibile riguardo alla zona esaminata. Tuttavia, per entrambe le tipologie l'uso di sistemi informativi geografici, in cui l'informazione è georeferenziata e codificata numericamente, è fondamentale per ottenere mappe di prospettività mineraria; inoltre nella maggior parte dei casi, il tipo di approccio seguito rappresenta una via di mezzo tra i due sopradescritti, e si parla quindi di *Hybrid prospectivity maps*. I *targets* minerari presi in considerazione per questo lavoro di tesi sono depositi metalliferi chiamati *Porphyry systems*; si tratta di sistemi a bassi tenori nei minerali d'interesse (Cu, Au, Mo) che, coinvolgendo volumi molto estesi di roccia, risultano comunque spesso economicamente interessanti. Essi rappresentano la fonte più ricca di Rame, Molibdeno e spesso anche Oro e Argento. I *Porphyry system* presentano una serie di caratteristiche

specifiche sia dal punto di vista geologico-geochimico, che da quello geofisico; i contesti genetici più tipici sono quelli detti *intrusion related*, ovvero in corrispondenza di intrusioni magmatiche favorite da strutture tettoniche importanti a livello crostale. Il calore derivante dal magma mette in moto un complesso di fluidi idrotermali che, in seguito a lisciviazione delle formazioni rocciose attraversate, estraggono e riconcentrano tenori anomali di varie specie metalliche che si depositano poi laddove le condizioni di pressione e temperatura divengono favorevoli alla precipitazione. Nella maggior parte dei casi le intrusioni sono rappresentate da litologie a chimismo da intermedio a felsico, strutturate in *stocks* a diametro variabile tra 500 e 1500 m. Si distinguono tre facies d'alterazione principali, ognuna delle quali può essere messa ben in evidenza da un preciso metodo d'esplorazione geofisica. La zona d'alterazione potassica, più interna, risulta ricca in K-feldspati e ossidi di Ferro (Magnetite secondaria); la sua presenza può venire rilevata, in condizioni favorevoli, dai metodi radiometrici (anomalia in K), e magnetometrici (anomalie magnetiche). Più esternamente, l'alterazione fillica è dominata da solfuri (tipicamente Pirite); il metodo principe per la sua caratterizzazione è la Polarizzazione Indotta soprattutto in fasi di esplorazione a livello di dettaglio, mentre per indagini di tipo regionale tale zona può essere individuata con metodi magnetici, che permettono di riconoscere zone a bassi gradienti (demagnetizzazione); infine la zona d'alterazione propilitica, che è la più esterna, può altresì essere caratterizzata da bassi gradienti magnetici. L'area presa in considerazione con la presente tesi si trova nel *Dawson Range*, una zona dello Yukon, in Canada; tutti i dati utilizzati sia di natura geologico-strutturale, sia di natura geofisica sono stati scaricati dai siti web del *Geological Survey of Canada* e dello *Yukon Geological Survey*. L'assetto geologico nel *Dawson range* risulta caratterizzato da due domini principali: un complesso igneo intrusivo, principalmente Granodioritico e di età Mesozoica, che taglia l'intera area da NW a SE, e un complesso metamorfico Paleozoico rappresentato soprattutto da Scisti e Gneiss appartenenti al *package* della *Yukon-Tanana terrane*. La distribuzione delle *occurrences* di nostro interesse (i.e. tipologie a *Porphyry system*) segue in gran parte l'andamento delle Granodioriti Mesozoiche, che peraltro definiscono una zona ben documentata ed esplorata nota come *Dawson Range Mineral Belt*. L'area è dominata da un *set* strutturale di primo ordine dato da faglie trascorrenti destre di importanza crostale orientate NW-SE, e rappresentato da importanti fratture come la *Tintina fault* (a nord dell'area in esame), la *Big Creek fault* che compare nella zona d'interesse, e più a sud la *Denali fault*. Un altro gruppo di strutture (di secondo ordine), poco rappresentato nell'area, è quello delle faglie che si sviluppano in direzione NE, il cui rappresentante principale è la *Dip Creek fault* nell'area studiata (Fig. 1). Dopo una prima fase di recupero ed analisi del materiale a disposizione, è stato eseguito il *processing* dei *data layers* di natura geofisica (Gravimetria, Magnetometria e Spettrometria) i cui risultati sono riassunti nelle pagine seguenti. Contemporaneamente è stata implementata una procedura automatizzata per l'individuazione, tramite analisi della matrice di curvatura, delle discontinuità litologiche (*Discontinuity mapping*) sulla base dell'algoritmo di Phillips, Hansen & Blakely (2007). Tale codice, scritto in linguaggio *Matlab*, è stato particolarmente utile per l'individuazione ed il posizionamento dei contatti litologici attraverso lo studio dei massimi relativi su mappe di *Total Horizontal Gradient*, calcolabile per i campi di potenziale (Grav/Mag). Sulla base delle caratteristiche di curvatura di una superficie

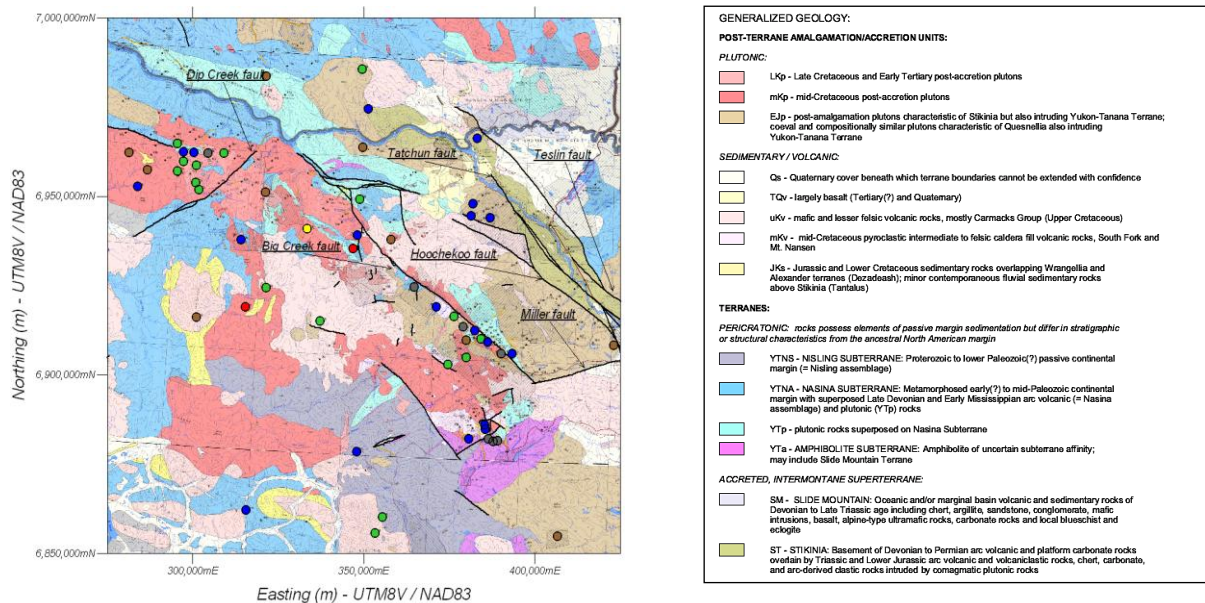
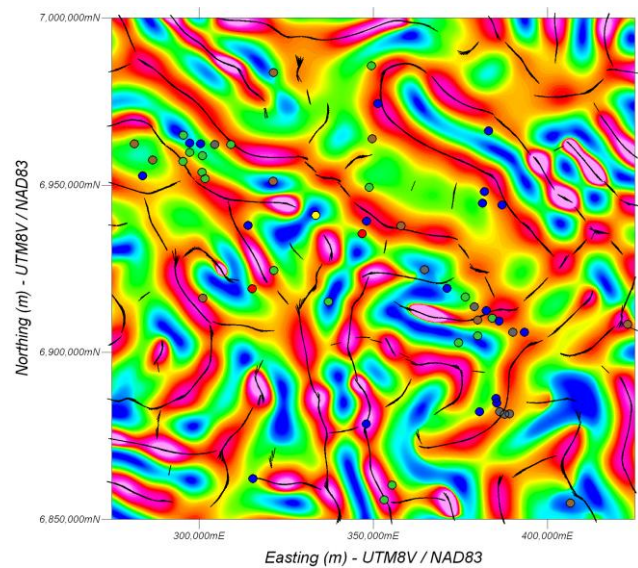
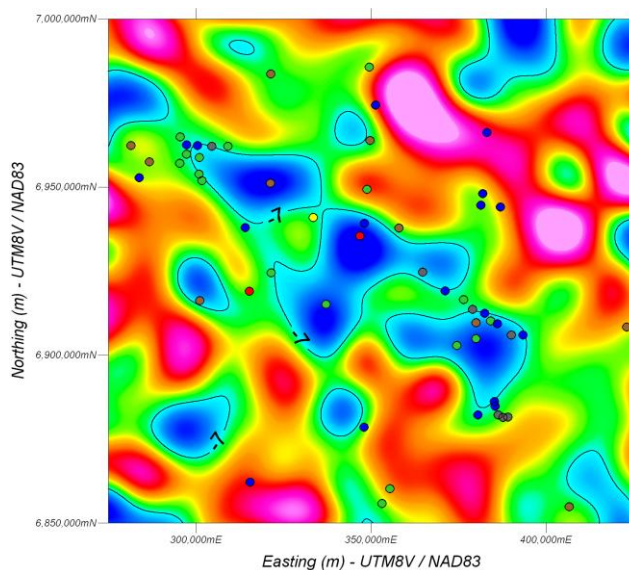


Fig. 1 – Carta geologica dell'area in esame e relative strutture tettoniche; i cerchi colorati rappresentano le Occurences del tipo Porphyry system

quadratica che approssima nove punti del *grid* alla volta, l'algoritmo è quindi in grado di individuare con precisione i massimi calcolati dalle derivate lungo *x* e lungo *y*, in modo tale da localizzare, senza alcun grado di soggettività, i contatti litologici che tali massimi esprimono. Per quanto riguarda l'integrazione dei diversi *data layers*, il lavoro di estrazione del maggior numero d'informazioni d'interesse è stato portato avanti secondo un procedimento di *trial and error*, affiancato dalla continua analisi dell'assetto geologico strutturale dell'area in esame, e delle varie *signature* di natura geologica e geofisica dei *targets* ricercati. La strategia d'integrazione adottata non deriva da uno schema predefinito, bensì si è cercato un modo che in base alle informazioni a disposizione, ottimizzasse il risultato. I dati geofisici sono stati così trattati: tramite la gravimetria è stata messa in evidenza una zona a maggior prospettiva coincidente con un importante batolite Mesozoico (il *Dawson Range Batholith*), all'interno della quale si è concentrato tutto il *focus* successivo. Dai dati magnetometrici, sono state circoscritte anomalie che presentassero caratteristiche fisiche e geometriche corrispondenti a quelle di intrusioni magmatiche tipiche dei sistemi *Porphyry*; dopo aver calcolato il baricentro di tali anomalie, sono state prese per buone solo quelle che si localizzavano all'interno dell'area d'interesse individuata con la gravimetria. A tali *features* si è attribuito poi un peso a seconda della loro occorrenza all'interno o all'esterno delle anomalie ad alta frequenza spaziale evidenziate dalla *Pseudogravity transform* (possibilmente associabili a varianti intrusive a chimismo intermedio): +1 se ricadevano dentro tali aree, 0 se fuori. Lo stesso criterio si è adottato per il risultato di *Discontinuity mapping*, attribuendo un peso maggiore in funzione della prossimità ai massimi individuati e aventi un *azimuth* selezionato (in linea con i *trend* strutturali di primo e secondo ordine dell'area) tra tutti quelli calcolati. Anche dalla Radiometria è stato estratto un ulteriore livello di informazione: il rapporto K/Th filtrato Passa Basso ha permesso di effettuare una sorta di *Lithology mapping* dell'area, evidenziando la presenza di zone litologicamente sfavorevoli (Sieniti medio-tardo Mesozoiche) nonostante la presenza di relativamente alti tenori di

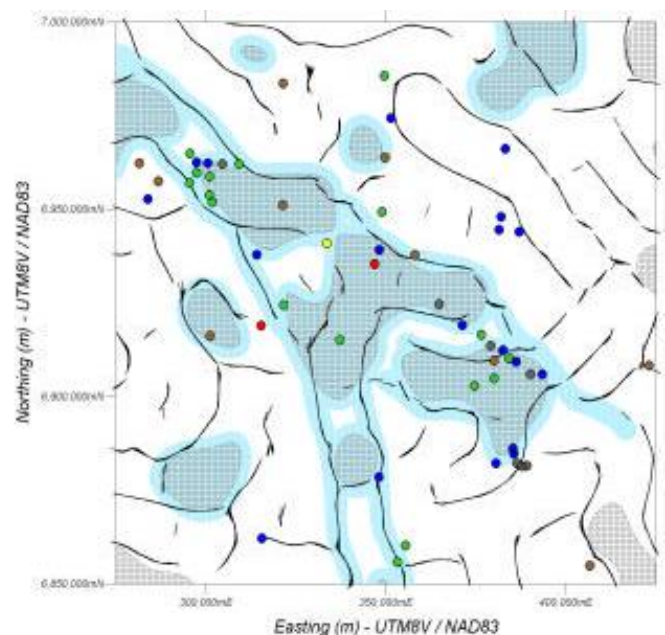
K, a cui si è attribuito un peso pari a 0; lo stesso rapporto, filtrato Passa Alto, ha circoscritto invece aree di massimo indicanti probabili zone di alterazione potassica (peso attribuito +1). Il risultato finale di questa strategia è quindi rappresentato da un set di dati spazialmente localizzati che, per ogni centroide selezionato, riporta la sommatoria dei vari pesi (secondo un criterio logico OR); la serie di punti pesati è stata quindi utilizzata per generare, con diversi algoritmi di interpolazione spaziale, una varietà di mappe i cui valori esprimono in termini probabilistici la distribuzione della “prospettività” mineraria (per sistemi *Porphyry-type*) nella porzione di territorio studiato. Di seguito vengono illustrati i risultati più significativi e le sintesi del *processing* per i tre *data layers* di natura geofisica

Gravimetria

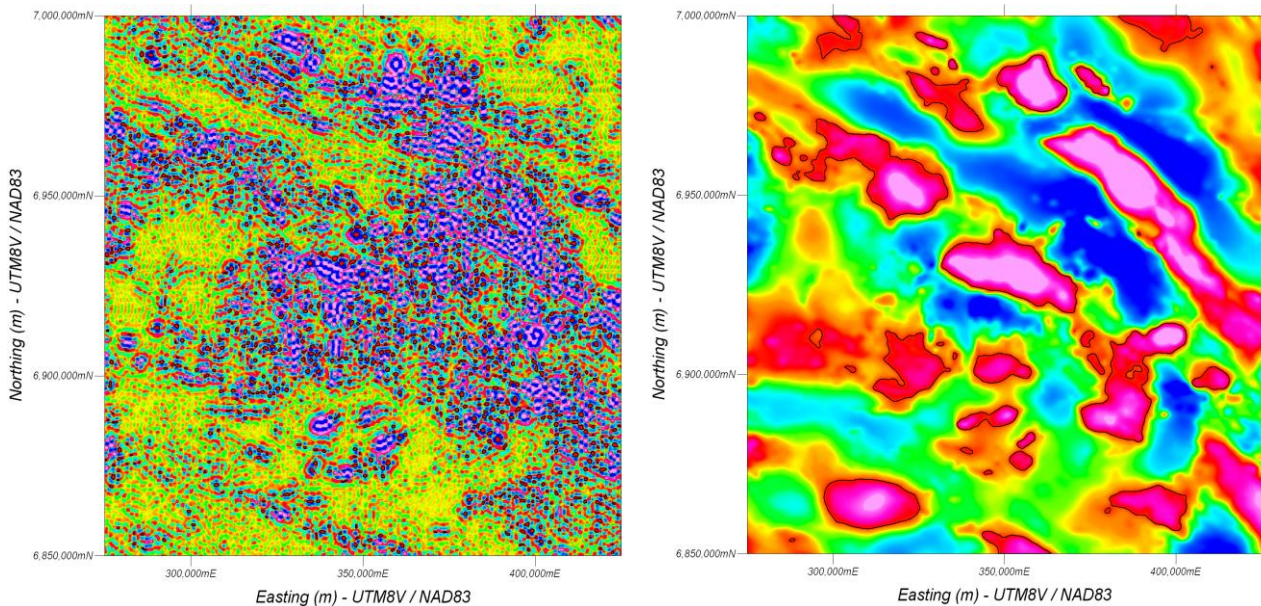


In alto a sinistra: grid risultante da un’operazione di derivata verticale di primo ordine sul dato corrispondente all’anomalia di *Bouguer* interpolata tramite algoritmo di *Kriging*, successivamente filtrata Passa Basso a 20Km; si notano le aree circoscritte dall’anomalia a $-7g.u.$ corrispondenti a *stocks* intrusivi granitici e granodioritici, associati alla maggior parte delle mineralizzazioni già scoperte nella zona (i cerchi colorati rappresentano le *occurrences* del tipo *Porphyry system*). **In alto a destra:** mappa di *Total Horizontal Gradient* sul quale è stata eseguita l’operazione di *Discontinuity mapping*; i massimi del grid corrispondono a contatti litologici, mentre i lineamenti neri sono il risultato dell’operazione eseguita dall’algoritmo di Phillips *et al.* (2007) implementato in linguaggio *Matlab*.

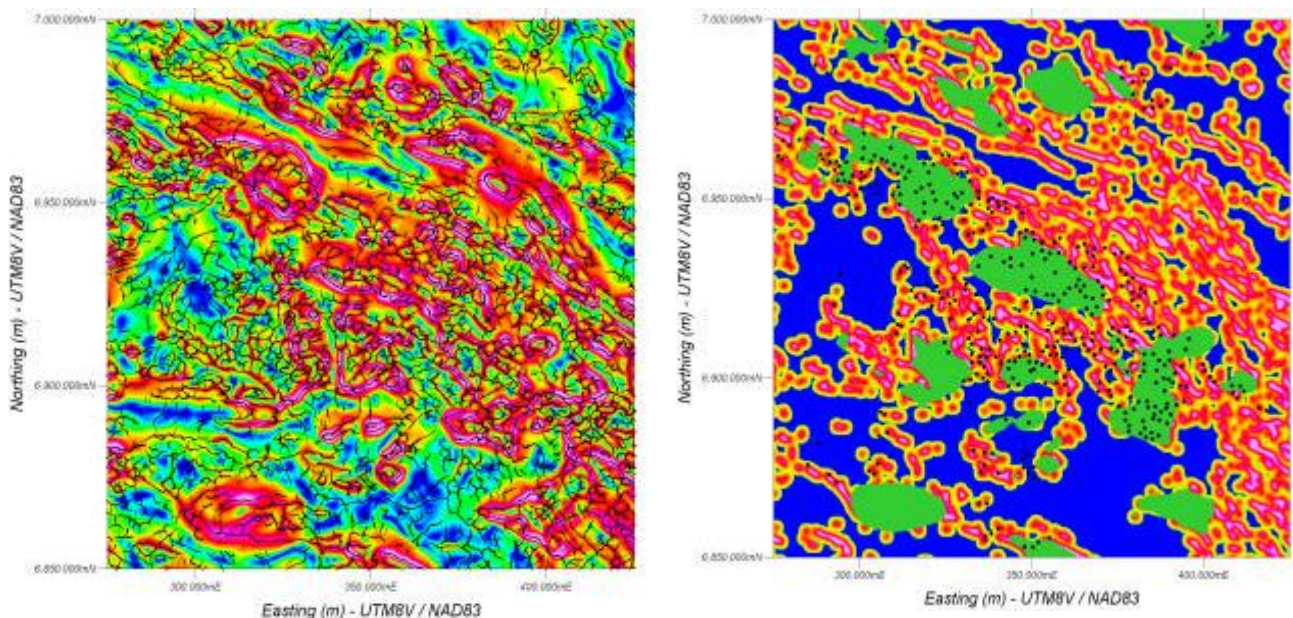
A destra: mappa riassuntiva per il dato gravimetrico; in azzurro, l’area ritenuta a maggior prospettiva, e all’interno della quale sarà concentrata l’attenzione per tutti i dati successivi (tutte le informazioni all’esterno di tale corridoio non verranno ulteriormente prese in considerazione). Tale risultato deriva dall’integrazione delle informazioni ottenute dai *grids* sopradescritti.



Magnetometria



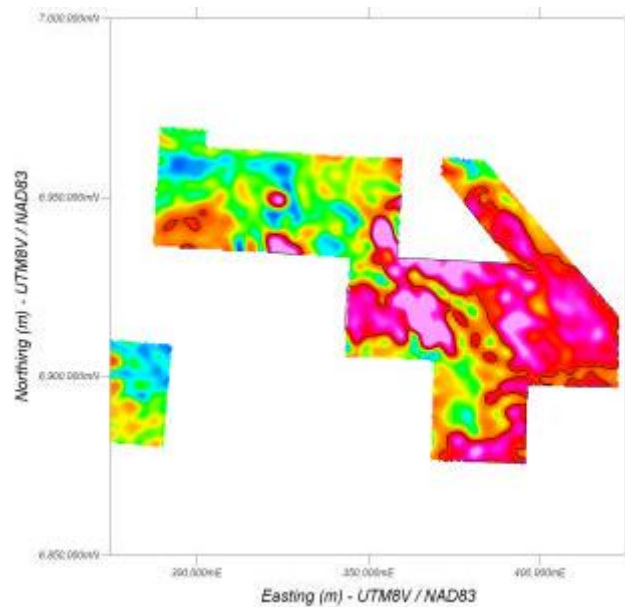
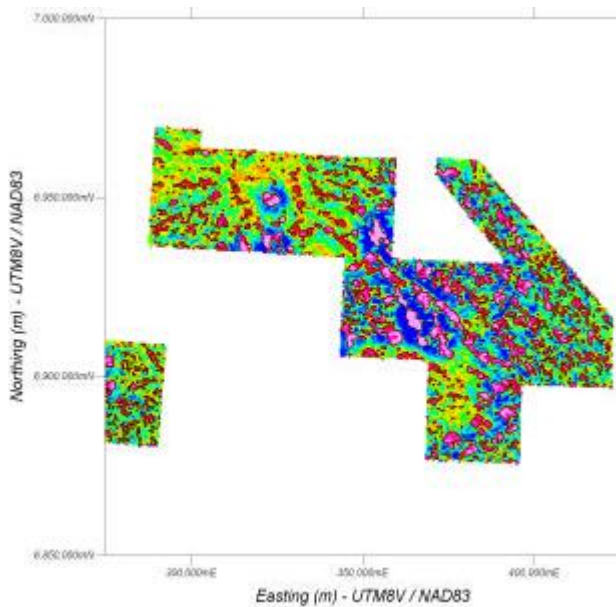
In alto a sinistra: risultato di un'operazione di derivata verticale di primo ordine filtrata Passa Alto a 2500 m su una mappa di *Total field intensity* ridotta al polo; le aree rosse sono le *stock like anomalies* evidenziate, aventi diametro compreso tra 500 m e 1500 m. **In alto a destra:** risultato di un'integrazione verticale sul campo magnetico ridotto al polo (corrispondente ad una *Pseudogravity transform*); i *contours* circoscrivono le aree corrispondenti a litologie da intermedio a felsico, e quindi di maggior prospettività in seno al corridoio evidenziato dalla gravimetria.



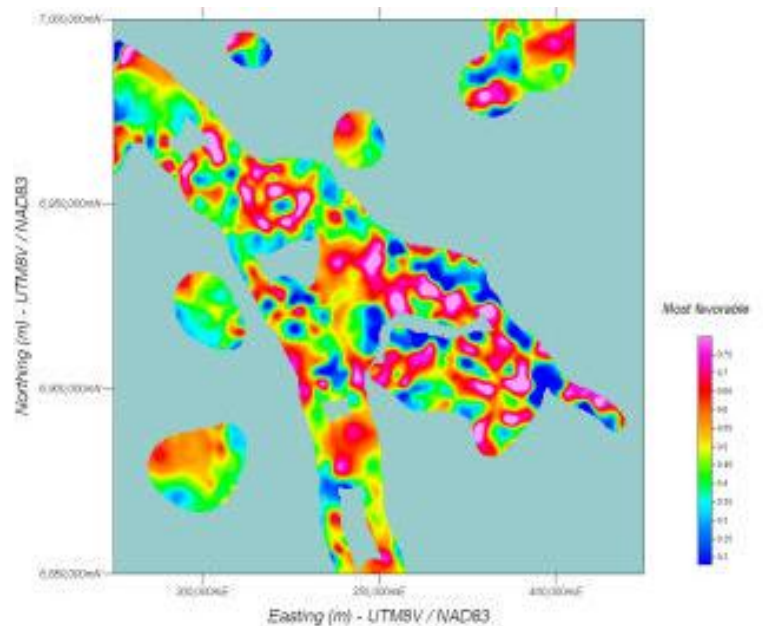
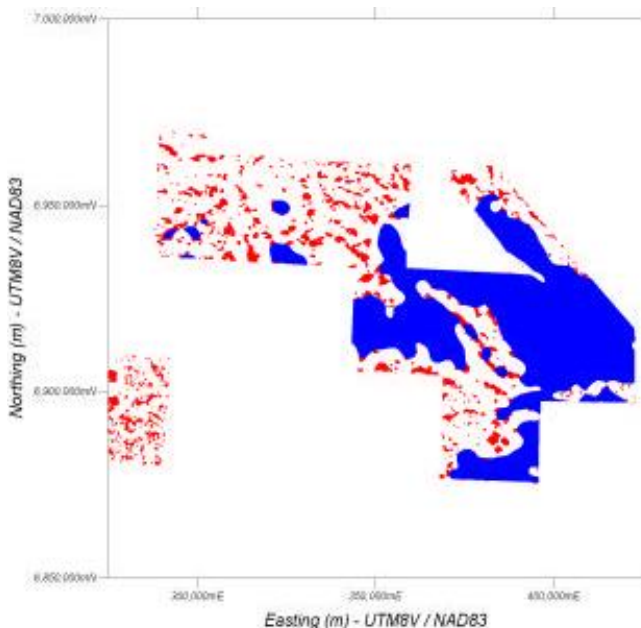
In alto a sinistra: *Discontinuity mapping* eseguito sul gradiente orizzontale totale della magnetometria; i lineamenti neri circoscrivono discontinuità magnetiche, e corrispondono ai massimi individuati dall'algoritmo implementato (si noti il maggior dettaglio rispetto al dato gravimetrico). **In alto a destra:** mappa di sintesi per la magnetometria; sullo sfondo si vedono le creste selezionate dal risultato di mappatura delle discontinuità litologiche, e aventi *azimuth* corrispondente a quello delle strutture tettoniche più importanti dell'area in esame. Le aree in verde sono quelle relative a zone di maggior prospettività date da

litologie da intermedio a felsico, mentre i punti neri rappresentano i centroidi (baricentri) delle *stock-like anomalies* selezionate, e localizzate all'interno del corridoio messo in evidenza dalla gravimetria.

Radiometria



In alto a sinistra: copertura radiometrica nell'area d'interesse; la mappa esprime il rapporto K/Th filtrato Passa Alto a 10Km. Valori elevati di tale rapporto indicano la possibile presenza di *facies* d'alterazione potassica, e quindi la probabile messa in posto di sistemi mineralizzati del tipo *Porphyry*. **In alto a destra:** stesso rapporto K/Th filtrato però Passa Basso a 5 Km; si è deciso, su base empirica supportata dalla base geologica disponibile, di attribuire a certi valori del *grid* un significato litologico. Sulla base di ciò, le aree inscritte dai *contours* in nero corrispondono a litologie (es. Sieniti mesozoiche o intrusioni ricche in K) sfavorevoli alla presenza di target di interesse.



In alto a sinistra: interpolazione dei risultati pesati tramite algoritmo di *Kriging*; come si vede, le zone a maggior prospettività sono allineate lungo un ben definito *trend* nord -ovest. **In alto a destra:** risultato derivante da un'operazione di sovrapposizione aritmetica fra i singoli livelli probabilistici (precedentemente definiti), interpolati tramite algoritmo di *Kriging*; il *grid* è stato successivamente filtrato Passa Basso, e ne è stata poi calcolata la derivata verticale di primo ordine. La rappresentazione è in forma normalizzata e scalata nell'intervallo 0-1.

Il metodo d'approccio all'integrazione dei vari livelli informativi non ricalca in maniera rigorosa nessuno dei modi ad oggi conosciuti; questo lavoro prende spunto da essi, adattando il contesto in esame alla qualità e alla tipologia dei dati a disposizione. In base a questi ultimi ed alle informazioni che è stato possibile estrarre, si è cercato di attribuire un significato ai risultati senza mettere in gioco complessi e talvolta instabili impianti matematici, ma allo stesso tempo, facendo in modo che il loro contributo risultasse ottimale e robusto ai fini del risultato.

La funzione di prospettività è stata ottenuta senza l'ausilio di nessun tipo di *constrain*, eccezion fatta per alcune informazioni sul *layer* gravimetrico (presenza di numerose *occurrences* sull'isolinea corrispondente all'anomalia - 7 *g.u.*). Il tipo di approccio già descritto, detto *data-driven*, è stato adottato nella fase finale, in maniera qualitativa, per verificare la bontà dei dati conseguiti mediante il confronto con mappe relative ad anomalie nei minerali d'interesse, e relativamente alle caratteristiche e posizionamento delle varie *occurrences* già scoperte.

Dal punto di vista della Geochimica, le anomalie di Au, Cu, Mo e As risultano importanti per l'individuazione dei *targets* in esame; la loro manifestazione può essere considerata un indicatore della presenza di mineralizzazioni in un intorno, per quanto riguarda i dati a nostra disposizione, a livello regionale.

NOTE: la pubblicazione a cui si fa riferimento per quanto riguarda l'implementazione di un algoritmo di *Discontinuity mapping* è: Phillips J. D., Hansen R.O., & Blakely R.J., 2007; *The use of curvature in potential-field interpretation*; Australian Society for Exploration Geophysicists (ASEG).