

Le immagini RapidEye nello studio del distretto minerario delle Colline metallifere

Teresa Balvis (*); Francesco Muntoni (**); Roberto Rizzo (**); Paolo Bevilacqua (***);
Fabiano Campo (****) e Alessandra Casini (*****)

(*) Libera professionista – Via Montevecchio 7A 09127 Cagliari. E-mail balvisteresa@tiscali.it
(**) Consorzio del Parco Geominerario Storico Ambientale della Sardegna - Via Monteverdi, 16 09016 - Iglesias
(***) Dipartimento di Ingegneria e Architettura – Università degli Studi di Trieste, Via Valerio 10 – Trieste
(****) IptSat - Via Sallustiana, 23 00187 Roma
(*****) Consorzio del Parco Nazionale delle Colline Metallifere Grossetane -
Loc. Piazzale Livello +240 Pozzo Impero 58023 Gavorrano

Riassunto

L'attività mineraria è tra le attività industriali che maggiormente possono generare un rilevante impatto ambientale. La dispersione nell'ambiente di elementi tossici come i metalli pesanti è senz'altro l'impatto più rilevante. Nell'ultimo trentennio, la necessità di coniugare le attività produttive e lo sviluppo economico con la salvaguardia dell'ambiente ha stimolato, soprattutto in paesi come USA, Canada e Australia, numerosi studi volti a comprendere i meccanismi della dispersione e conseguente mappatura degli elementi tossici in conseguenza dell'attività mineraria, al fine di prevedere e prevenire le conseguenze, e/o proporre idonee misure di contenimento e risanamento.

In questo contesto si inseriscono diversi studi che hanno come obiettivo quello di caratterizzare in maniera alternativa ed efficace queste aree inquinate, mediante tecniche di *remote and proximal sensing*. Soprattutto negli Stati Uniti, si è visto un crescente interesse nel utilizzo dei dati spettrali telerilevati per supportare la caratterizzazione e la bonifica di siti minerari inquinati, questo tipo di approccio aumenta l'efficienza del processo di risanamento del sito, risparmiando tempo e risorse preziose.

In Italia sono pochi gli studi in tal senso e questo studio vuole essere un contributo in questo settore, utilizzando dei nuovi dati satellitari.

L'area di studio è il distretto minerario delle Colline metallifere investigate con dati *RapidEye*, una costellazione di 5 satelliti artificiali eliosincroni allineati sulla stessa orbita e perfettamente identici che permettono l'acquisizione d'immagini alla risoluzione di 5 metri e in 5 bande multispettrali dal visibile al vicino infrarosso. L'analisi dei dati *RapidEye* mediante l'algoritmo SAM (*Spectral Angle Mapper*), che prevede l'utilizzo di una libreria di firme spettrali di minerali, ha consentito di mappare i principali minerali presenti nell'area. Quanto rilevato è in accordo con i dati di bibliografia e con i primi rilievi sul campo, tuttavia maggiori informazioni e conferme saranno possibili con il prosieguo della ricerca che prevede il prelievo dei campioni per le analisi mineralogiche – geochimiche.

Abstract

Mining is one of industrial activities with the most significant environmental impact. The dispersion of toxic elements such as heavy metals is doubtless the most significant one. In the last thirty years, the need to combine productive activities linked to economic development and environmental protection leads, especially in countries like USA, Canada and Australia to several studies on understanding the dispersion mechanisms of toxic elements deriving from the mining activity and

the subsequent mapping of it, in order to predict and prevent the consequences, and /or propose appropriate containment and remediation.

In this context several studies aim to characterize in an alternative and effective way these polluted areas, by means of remote and proximal sensing. Especially in the United States, we have seen a growing interest in the use of remotely sensed spectral data to support the characterization and remediation of contaminated mining sites. This approach increases the efficiency of the rehabilitation process of polluted sites, saving valuable time and resources.

In Italy there are still few studies in this field and this study, using the new satellite data, is a contribution in this area.

The case-study area is the mining district of metalliferous hills investigated with *RapidEye* data, a constellation of five heliosynchronous satellites, aligned on the same orbit and perfectly identical, that allow the acquisition of images at a 5 meters and 5-band multispectral resolution, from visible to near infrared. The analysis of the data using the *RapidEye* SAM (*Spectral Angle Mapper*) algorithm, which involves the use of a library of minerals spectral signatures, has allowed the mapping of the main minerals present in the area. The results confirm the reference data and those of the first field surveys. However, more information and precise confirmation will be possible with the further development of the research involving the sampling for mineralogical – geochemical analysis.

Introduzione

Le Colline metallifere sono state oggetto di attività mineraria e siderurgica per diversi millenni. Tali attività hanno prodotto modifiche nel territorio e nel paesaggio talmente profonde da apparire oggi come forme naturali, pur essendo frutto di una prolungata coltivazione mineraria. Negli ultimi due secoli l'intenso sviluppo dell'attività estrattiva, pur avendo generato ricchezza e lavoro, ha contemporaneamente modificato la morfologia del territorio con ferite profonde e con segni nel paesaggio estremamente forti. L'attività mineraria si è svolta secondo tecniche di coltivazione che avevano come unico fine la produttività, con scarsa considerazione per la salute e la sicurezza delle popolazioni e senza alcuna considerazione per l'ambiente. In nome del profitto intere colline sono state disboscate, altre sono state rase al suolo, torrenti sono stati tombati e valli riempite con sterile di miniera o con materiale in parte mineralizzato, da cui non era però economicamente conveniente estrarre i metalli. Lo sviluppo della moderna attività mineraria, che ha avuto una forte accelerazione negli ultimi due secoli, oltre a ripiassmare il paesaggio ha creato anche nuovi modelli insediativi che hanno trovato espressione nella costruzione dei principali centri minerari. Anche in questo caso le considerazioni ambientali hanno avuto scarso peso se si pensa che le società hanno realizzato i villaggi minerari in prossimità delle aree di coltivazione, spesso a fianco di bacini di decantazione e discariche minerarie. Tutto questo era considerato normale fino a pochi anni fa, quando il termine ecologia era sostanzialmente sconosciuto e nessuno aveva la consapevolezza degli impatti che i siti minerari arrecavano al territorio (Preite et al., 2009). L'impatto più rilevante e non immediatamente percepibile, è la dispersione nell'ambiente di elementi tossici, principalmente metalli pesanti (Fanfani, 1996). La dispersione di questi elementi può essere veicolata per via meccanica (scivolamenti gravitativi, ruscellamento, trasporto eolico) o per via chimica (trasporto in soluzione). Quest'ultima può rappresentare il rischio meno evidente, ma nel lungo tempo si configura come quello più pericoloso e limitante per le attività umane nonché quello più difficilmente eliminabile (Plumlee & Logsdon, 1999 e Blowes et al., 2003). Le fonti d'inquinamento sono rappresentate oltre che dalle mineralizzazioni rimaste esposte in sotterraneo, dai materiali di scarto accumulati all'esterno o costituenti la ripiena stessa delle miniere. Un ruolo preponderante è svolto dai fanghi di flottazione, originariamente depositi in bacini: in essi si ritrovano alte concentrazioni di metalli pesanti e la loro lisciviazione da parte degli agenti atmosferici determina un notevole inquinamento nelle aree minerarie. In ogni caso, il circuito delle acque superficiali rappresenta la via preferenziale di dispersione di questi elementi tossici anche a distanze notevoli dalla sorgente (Fanfani, et al., 2001).

Il Telerilevamento, l'attività di "rilevare da lontano", è una tecnica che può dare ottimi risultati nello studio del territorio, mediante l'analisi delle informazioni derivanti dallo spettro delle onde elettromagnetiche. Il principio di base consiste nella capacità di ogni corpo di riflettere, assorbire e trasmettere una radiazione incidente in percentuali differenti, a seconda delle proprie qualità strutturali, chimiche, fisiche. Le informazioni elettromagnetiche vanno convertite, attraverso la creazione di opportuni modelli multidisciplinari, nella stima delle variabili chimiche, fisiche o biologiche investigate. Il successo o il fallimento dell'utilizzo dei dati telerilevati nel valutare le alterazioni ambientali, dipendono quindi da modelli e algoritmi sviluppati e utilizzati per estrarre i parametri ambientali dal *continuum* di dati ottico-spettrali raccolti dai sensori e dal confronto con elementi di verità a terra (Gommarasca, 2004).

I sensori attuali consentono la misura a distanza, basata essenzialmente sul comportamento delle superfici dei corpi relativamente alle onde elettromagnetiche nel visibile, nell'infrarosso e nelle microonde; tali misure sono indirizzate al riconoscimento indiretto della struttura degli elementi territoriali o al rilevamento di alcune caratteristiche fisiche. Ciò ha consentito al telerilevamento, di accrescere il suo ruolo nella pianificazione territoriale e nella gestione delle risorse terrestri per lo studio e la comprensione di fenomeni non investigabili in altro modo e per il controllo delle dinamiche naturali.

Inquadramento geografico dell'area

L'area oggetto di studio è l'area mineraria di Niccioleta – Val d'Aspra situata a circa 6 km a NE del comune di Massa Marittima in provincia di Grosseto, individuabile nella tavoletta alla scala 1:25.000 della carta d'Italia dell'IGM, Foglio 306 Sezione II "Massa Marittima". Nella Carta Geologica d'Italia dell'IGM in scala 1:100.000, l'area di studio è compresa nel Foglio 119 Massa Marittima e nel Foglio 319 Massa Marittima nella Carta Geologica d'Italia dell'IGM in scala 1:50.000.

Si tratta di una miniera in cui sono state coltivate mineralizzazioni a pirite, a solfuri di Pb-Zn (Ag) e ad ossidi e idrossidi di Fe. Le mineralizzazioni polimetalliche sono state oggetto di attività estrattiva, sia pure con alterne vicende, dal periodo etrusco sino alla metà del XX secolo. Sino al 1992, anno di chiusura, le attività estrattive hanno interessato esclusivamente le mineralizzazioni a pirite, che veniva utilizzata sia per la produzione di acido solforico che di *pellets* di ferro, in un processo industriale che prevedeva anche il recupero a scopi energetici del calore prodotto (Lattanzi et al., 1985).

Attualmente l'area mineraria di Niccioleta rientra nel Parco Nazionale delle Colline Metallifere Grossetane – Tuscan Mining Geopark, ed è oggetto di bonifica con messa in sicurezza permanente (il procedimento è ancora attivo).



Figura 1. Area mineraria di Niccioleta (estrapolata da <http://it.bing.com/maps/>).

Materiali e metodi

Le immagini utilizzate per lo studio dell'area mineraria di Niccioletta, sono quelle del sensore *RapidEye*, acquisite il 10 giugno 2012. *RapidEye* è una costellazione di 5 satelliti artificiali eliosincroni allineati sulla stessa orbita e perfettamente identici che permettono l'acquisizione d'immagini alla risoluzione di 5 metri e in 5 bande multispettrali, di aree vaste, con un tempo di rivisitazione molto breve (anche giornaliero). Le bande utilizzate in questo lavoro sono quelle del visibile, del vicino e medio infrarosso cioè gli intervalli spettrali utilizzati negli studi geologico-mineralogici. Questo intervallo spettrale del VNIR, 0,440-0,850 μm (bande 1-5), permette l'identificazione di minerali in cui sono presenti i metalli di transizione in particolare il ferro.

Caratteristiche principali del sensore <i>RapidEye</i>			
Numero banda	Bande spettrali	Intervalli spettrali delle bande	Risoluzione spaziale
1	Blue	440 - 510 nm	5 m
2	Green	520 - 590 nm	
3	Red	630 - 685 nm	
4	Red Edge	690 - 730 nm	
5	Near Infrared	760 - 850 nm	

Elaborazione dei dati spettrali

Le immagini *RapidEye* sono state analizzate tramite l'algoritmo *Vegetation Delineation* che, dopo aver effettuato la correzione atmosferica, consente di identificare rapidamente la presenza e/o assenza di vegetazione e calcola l'indice NDVI. Questa procedura consente di identificare in maniera immediata le aree prive di vegetazione e quindi concentrare le analisi successive solo in queste aree. Per la classificazione è stato utilizzato l'algoritmo SAM *Spectral Angle Mapper* con associata la "Libreria Niccioletta", con valori di 0.5.

La libreria spettrale è stata realizzata partendo dalla libreria spettrale USGS *Mineral Spectral Library* (splib04), da essa sono stati selezionati i minerali che da bibliografia si sa per certo, essere presenti nell'area investigata. La "Libreria Niccioletta" è stata poi ricampionata sui dati *RapidEye*.

Risultati e discussione

Le immagini elaborate evidenziano che le aree di discarica sono state oggetto di bonifica. Infatti risultano in parte vegetate, tuttavia questo non ha impedito di evidenziare, nelle aree prive di vegetazione, la presenza di alcuni minerali che si formano in seguito all'ossidazione della pirite.

I minerali, che si sa per certo essere presenti nell'area, sono anche quelli che sono più facilmente rilevabili nelle bande del sensore *RapidEye*. Infatti tra i metalli di transizione il ferro è uno dei più importanti poiché la sua presenza, sia come ione ferroso (Fe^{2+}) che come ione ferrico (Fe^{3+}), questo permette una buona caratterizzazione spettrale dei minerali ferri. La presenza del ferro nei minerali e nelle rocce è evidenziata nelle rispettive firme spettrali da diverse bande di assorbimento ciascuna legata a uno specifico tipo di transizione. Per lo ione ferroso (Fe^{2+}) legato a ioni ossigeno la banda di assorbimento più intensa si trova a 1,1 μm , mentre bande ampie e meno intense si trovano nella regione dell'infrarosso a 0,43, 0,45, 0,51, 0,55 μm e nella regione dell'infrarosso vicino a 1,8 e 1,9 μm . Queste bande di assorbimento sono dovute a transizioni elettroniche tra i due gruppi di livelli elettronici in cui gli orbitali d si separano nel campo di coordinazione ottaedrica. Mentre lo ione ferrico (Fe^{3+}) presenta bande di assorbimento poco intense in corrispondenza di 0,40, 0,45, 0,49, 0,70 e 0,87 μm . I minerali che contengono il ferro si possono distinguere proprio per queste bande di assorbimento.

L'analisi delle immagini *RapidEye* ha quindi evidenziato la presenza della pirite seguita dall'arsenopirite e calcopirite, come peraltro confermato dai dati bibliografici. Infatti al momento della stesura di questo articolo, si stanno ancora effettuando le analisi mineralogiche dei campioni di substrato raccolti, che serviranno per un confronto più accurato di quanto già rilevato.

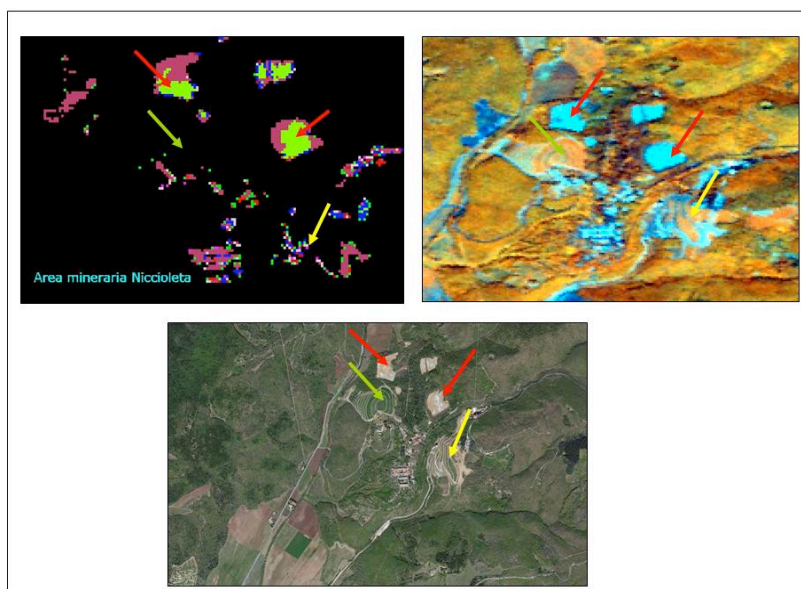


Figura 2. Confronto tra la classificazione dell'area mineraria di Niccioleta, una combinazione dell'immagine RapidEye_543 e l'ortofoto: le frecce rosse indicano le aree di discarica che sono in fase di bonifica e su queste è ancora possibile individuare i minerali presenti; le frecce verdi indicano le aree già bonificate, in buona parte ricoperte di vegetazione e in questo caso non è possibile individuare nessun minerale infine le frecce gialle indicano le aree bonificate ma non completamente vegetate che lasciano intravedere alcune fasi.

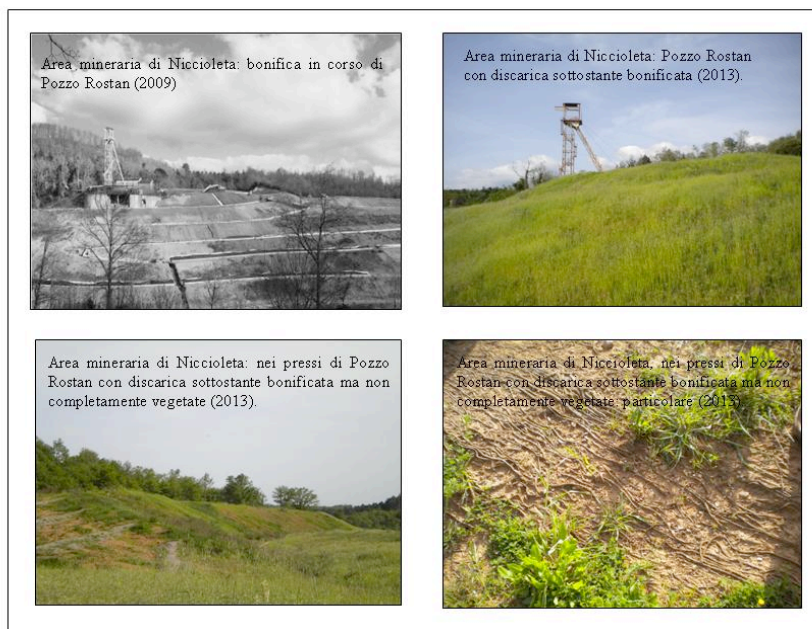


Figura 3. Area mineraria di Niccioleta: nei pressi di Pozzo Rostan.

Conclusioni

L'attività mineraria provoca sull'ambiente notevoli modifiche di carattere sia morfologico che chimico, ciò rappresenta un problema importante in una regione come la Toscana, dove esiste una grande tradizione mineraria, caratterizzata purtroppo in passato da una gestione scarsamente interessata ai problemi ambientali.

L'avvento delle nuove tecniche di telerilevamento, in particolare lo studio delle immagini satellitari, offre un nuovo approccio allo studio dei problemi ambientali. Gli studi recenti evidenziano come dall'analisi dei dati telerilevati sia possibile ottenere informazioni utili ad integrare dati mineralogici e geochimici per la caratterizzazione delle aree minerarie, mediante la realizzazione di mappe di distribuzione dei vari minerali presenti.

Scopo del presente lavoro è appunto quello di contribuire allo sviluppo di metodologie per l'indagine dei fenomeni di inquinamento nelle aree minerarie con un approccio che integrasse le conoscenze mineralogiche con nuovi dati telerilevati, come le immagini *RapidEye*. I risultati ottenuti evidenziano le potenzialità del telerilevamento applicato allo studio di queste aree minerarie, indicando i possibili vantaggi, sia di tempo che economici, che si potrebbero ottenere utilizzando queste tecniche.

Le immagini *RapidEye* si prestano molto ad essere utilizzate per monitorare le aree minerarie dismesse di giacimenti di minerali metalliferi, in cui i metalli della mineralizzazione primaria sono associati in prevalenza come solfuri e subordinatamente ossidi. Poiché i solfuri sono in generale instabili in condizioni esogene, l'esposizione dei corpi minerari all'ambiente superficiale provoca la loro ossidazione e/o dissoluzione, con conseguente rilascio dei metalli contenuti. Uno dei prodotti principali di queste reazioni è il ferro, la sua presenza, sia come ione ferroso (Fe^{2+}) che come ione ferrico (Fe^{3+}), permette una buona caratterizzazione spettrale dei minerali ferri. I minerali che contengono il ferro si possono perciò facilmente distinguere in virtù di queste bande di assorbimento e le immagini *RapidEye* consentono di identificare proprio questi minerali. Quindi, il loro utilizzo, vista anche la loro notevole risoluzione spaziale (5m), si presta molto bene per monitorare le aree minerarie dismesse caratterizzate da processi di ossidazione/dissoluzione della pirite, il solfuro più comune e abbondante.

Bibliografia

- Altınbaş U., Kurucu, Y. e Bolca M., 2005 – *Using Advanced Spectral Analyses Techniques as possible Means of Identifying Clay Minerals* – Turk Journal Agric. For. Vol. 29.
- Beddel R., 2004 – *Remote Sensing in Mineral Exploration*. – SEG Newsletter – Society of Economic Geologists.
- Benvenuti M., Mascaro I., Corsini F., Lattanzi P., Parrini P. e Tanelli G., 1997 - *Mine waste dumps and heavy metal pollution in abandoned mining district of Boccheggiano (Southern Tuscany, Italy)* - Environmental Geology 30 (3/4).
- Bioshop L. J. e Murad E., 2005 – *The visible and infrared spectral properties of jarosite and alunite* – America Mineralogist, Vol. 90.
- Brizzi G., Capperi M. e Casotti A., 1989 – *La miniera di pirite di Niccioleta, Massa Marittima (GR)* 1^a parte – Rivista mineralogica italiana, 4.
- Brizzi G., Capperi M. e Casotti A., 1990 – *La miniera di pirite di Niccioleta, Massa Marittima (GR)* 2^a parte – Rivista mineralogica italiana, 1.
- Brizzi G., Capperi M. e Casotti A., 1990 – *La miniera di pirite di Niccioleta, Massa Marittima (GR)* 3^a parte – Rivista mineralogica italiana, 2.
- Blowes D. W., Ptacek C. J. e Jurjovec J., 2003 – *Mill tailings: hydrogeology and geochemistry. Chapter 5* – In Environmental Aspects of Mine Wastes. Canada Short Course Series Vol. 31., 95-116, Jambor J. L., Blowes D. W. e A.I.M. Ritchie Editors.
- Chen X., Warner T. A. e Campagna D., 2007 – *Integrating visible, near-infrared and short-wave infrared hyperspectral and multispectral thermal imagery for geological mapping at Cuprite, Nevada* – Remote Sensing of Environment, Vol. 110.

- Clark R. N., Swayze G. A., Wise R., Livio K. E., Hoefen T. M., Kokaly R. F. e Sutley S. J., 2007 - *USGS Digital Spectral Library splib06a* - U. S. Geological Survey Data Series 231; 20 Settembre (<http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06>).
- Clark R.N., Boardman J., Mustard J., Kruse F., Ong C., Pieters C. e Swayze G. A., 2006 - *Mineral Mapping and Applications of Imaging Spectroscopy* - IGARSS 2006, 31 Luglio – 4 Agosto, Denver, Colorado (Abstract, submitted, 01/2006).
- Clark R.N., Swayze G. A., Wise R., Livo K. E., Hoefen T. M., Kokaly R. F. e Sutley S. J., 2003 - *USGS Digital Spectral Library splib05a* - U.S. Geological Survey, Open File Report 03-395.
- Clark, R. N., 1999 - *Chapter 1: Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy* - In: *Manual of Remote Sensing*, Volume 3, Remote Sensing for the Earth Sciences, (A.N. Rencz, ed.) John Wiley and Sons, New York.
- Clark R. N., Swayze G. A., Gallagher A. J., King T. V. V. e Calvin W. M., 1999 - *The U. S. Geological Survey, Digital Spectral Library: Version 1 (0.2 to 3.0 μ m)* - U.S. Geological Survey, Open File Report 93-592.
- Clark R.N., 1995 – *Reflectance Spectra* – American Geophysical Union.
- Clark R. N., Swayze G. A., Gallagher A. J., King T. V. V. e Calvin W. M., 1993 - *The U. S. Geological Survey, Digital Spectral Library: Version 1 (0.2 to 3.0 μ m)* - U. S. Geological Survey, Open File Report 93-592.
- Di Gregorio F. e Massoli-Novelli R., 1992 – *Geological Impact of Some Tailings Dams in Sardinia, Italy* – Environ Geol. Water Sci. Vol. 19, No. 3.
- Fanfani L., Caboi R., Cidu R., Cristini A., Frau F., Lattanzi P. & Zuddas P. 2001 - *Impatto ambientale dell'attività mineraria in Sardegna: studi mineralogici e geochimici*. - Rend. Semin. Fac. Sci. Univ. Cagliari 70 (suppl.), 249-264.
- Fanfani L., 1996 – *Mobilizzazione di metalli pesanti nelle aree minerarie abbandonate*. – Quaderni di Geologia Applicata 4 suppl..
- Gomarasca M. A., 2004 - *Elementi di geomatica* - AIT ,Associazione Italiana di Telerilevamento.
- Grove C. I., Hook S.J. e Paylor E. D., 1992 - *Laboratory reflectance spectra for 160 minerals 0.4-2.5 micrometers: JPL Publication 92-2* - Jet propulsion Laboratory, Pasadena, California.
- Hubbard B. E., Crowley J. K. e Zimelman D. R., 2003 - *Comparative Alteration Mineral Mapping Using Visible to Shortwave Infrared (0.4 – 2.4 μ m) Hyperion, Ali and Aster Imagery* - IEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 41, n° 6.
- Kruse F.A., 2004 - *Comparison of ATREM, ARCON, and FLAASH atmospheric corrections using low-altitude Aviris data of Boulder, Co* - In proceedings 13th JPL Airborne Geoscience Workshop, Jet Propulsion Laboratory, 31 Marzo – 2 Aprile, Pasadena, CA (in press).
- Kruse F. A., 2003 - *Mineral Mapping with AVIRIS and EO-1Hyperion*. - Presentato alla 12° JPL Airbone geoscience Workshop, 24-28 Febbraio, Pasadena, California.
- Kruse F. A., 2002 - *Comparison of AVIRIS and Hiperyon for Hyperspectral Mineral Mapping*. - Presentato alla 11° JPL Airbone geoscience Workshop, 4-8 Marzo, Pasadena, California.
- Kruse F. A., Boardman J. W. e Lefkoff A. B., 2000 - *Extraction of Compositional Information for Trafficability Mapping from Hyperspectral Data* - SPIE International Symposium on AeroSense, 24-28 Aprile, Orlando, FL., Vol. 4049.
- Kruse F. A., 1998 - *Advances in hyperspectral remote sensing for geologic mapping and exploration* -Presentato al 9° Australian Remote Sensing Conference, Sydeny, Australia.
- Kruse F. A., 1997 - *Characterization of active hot - springs enveroniments using multispectral and hyperspectral remote sensing*. - Presentato al Twelfth International Conference and Workshops an applied Geologic Remote Sensing, Denver, Colorado.
- Kruse F. A., Lefkoff A. B., Boardman J. W., Heidebrecht K.B., Shapiro A. T., Barloon, P. J. e Goetz A. F. H., 1993 – *The spectral image processing system (SIPS) – Interactive visulization and analysis of imaging spectrometer data*. – Remote Sensing Environment, Vol. 44.
- Lattanzi P. e Tanelli G. 1978 - *Considerazioni genetiche sulla cotunnite del giacimento a pirite di Niccioleta (Toscana)* - RENDICONTI Società Italiana di Mineralogia e Petrologia, 34 (1), 37-44

- Lattanzi P. e Tanelli G. 1985 – *La mineralizzazione a pirite, a ossidi di Fe e Pb-Zn (Ag) nella zona di Niccioleta (Grosseto)* - RENDICONTI Società Italiana di Mineralogia e Petrologia, 40, 385-408
- Leone A. P., 2000 - *Spettrometria e valutazione della riflettanza spettrale dei suoli nel dominio ottico 400 – 2500 nm.* - AIT informa-Rivista Italiana di TELERILEVAMENTO, n° 19.
- Montero I. C., Brimhall G. H., Alpers C. N. e Swayze G. A., 2005 - *Characterization of waste rock associated with acid drainage at the Penn Mine, California, by ground-based visible to short-wave infrared reflectance spectroscopy assisted by digital mapping.* - Chemical Geology Vol. 215.
- Montero I. C. e Brimhall G. H., 2001 - *Semi-automated Mineral Identification Algorithm for Ultraviolet, Visible and Near Infrared Reflectance Spectroscopy* - Presentato al Annual Conference of the International Association for Mathematical Geology. IAMG, Kansas.
- Plumlee G. S., 1999 – *The environmental geology of mineral deposits – Charter 3* – In Reviews in Economic Geology-Vol.6A: The environmental geochemistry of mineral deposits. Part A: Processes, Techniques and Health Issues.
- Preite M., 2009 – *MASTERPLAN – La valorizzazione del paesaggio minerario* - Parco Nazionale Tecnologico e Archeologico delle Colline Metallifere Grossetane – Edizioni Polistampa
- RSI – Research Systems Inc., 2003 – *Envi User's Guide.*
- Shrestha D. P., Margate D. E., Van der Meer F. e Anh H. V., 2005 – *Analysis and classification of hyperspectral data for mapping land degradation: an application in southern Spain* - International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, Vol. 7.
- Vatteroni C., 2005 - *IN VOLO NEL PRESENTE - L'utilizzo della fotografia aerea nella documentazione dei siti archeoindustriali: il caso di Niccioleta (Massa Marittima, GR).* - Università degli Studi di Siena - Master di II livello Universitario archeologia territoriale e gestione informatica dei dati archeologici. Archeologia urbana e medievale. Tesi finale.