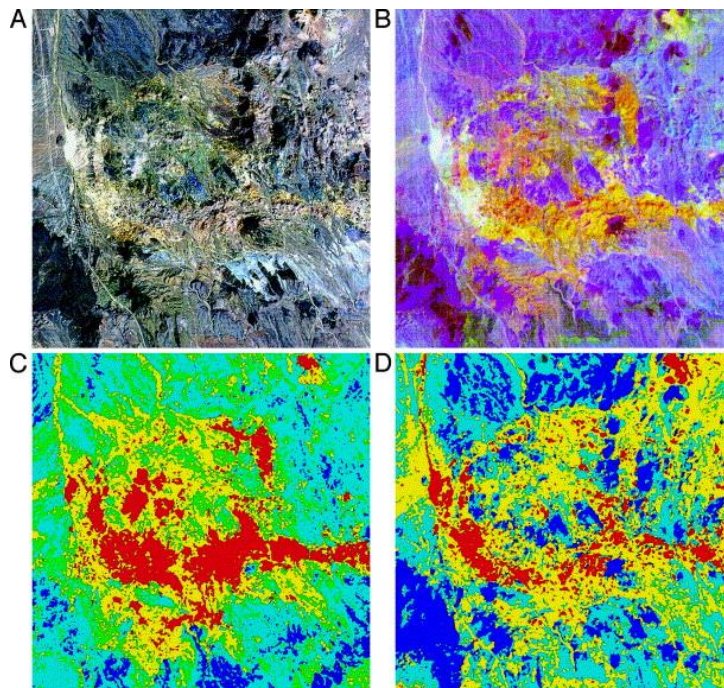




ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΟ ΙΔΡΥΜΑ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ  
ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΑΝΤΙΡΡΥΠΑΝΣΗΣ  
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΓΕΩΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

# « Η χρήση της τηλεπισκόπησης στη μεταλλευτική έρευνα»



**ΣΠΟΥΔΑΣΤΡΙΑ: ΣΕΪΤΑΡΙΔΟΥ ΑΘΗΝΑ**

**ΕΙΣΗΓΗΤΗΣ: ΔΡ. ΚΑΠΑΓΕΡΙΔΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ**

**ΚΟΖΑΝΗ 2017**

## **Περίληψη**

Η τηλεπισκόπηση, πέρα από τις ποικίλες τεχνολογικές εφαρμογές της, αποτελεί σημαντικό εργαλείο μελέτης και για τη μεταλλευτική έρευνα. Τα δεδομένα που λαμβάνονται από ειδικά σχεδιασμένες συσκευές, αυτούσια ή με κατάλληλη επεξεργασία, βοηθούν τους επιστήμονες στην εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την ύπαρξη και επιρροή των μεταλλευμάτων στη φύση.

Οι πρακτικές που ακολουθούνται, επιλέγονται σε σχέση με την περιοχή που εξετάζεται κάθε φορά, δεδομένου ότι το έδαφος παρουσιάζει σημαντικές εναλλαγές σε διάφορα σημεία του πλανήτη. Όποια, όμως, και αν είναι η ιδιαιτερότητα της εκάστοτε περιοχής, η κατάλληλη και ορθή χρήση της τηλεπισκόπησης, μπορεί να αποτελέσει πολύτιμη πηγή πληροφοριών για την επιστημονική μελέτη.

## **Abstract**

Remote sensing, in addition to a variety of technological applications, is an important study tool for mineral exploration. Data obtained by specially designed devices, individually or with appropriate processing, help scientists to conclude on the existence and influence of minerals in nature.

The practices selected are in relation to the area under examination each time, because the soil shows significant changes at various points of the globe. What, however, are the specific characteristics of each region, appropriate and proper use of remote sensing can be a valuable source of information for scientific study.

## Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	7
1. Η ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ.....	8
1.1  Εννοιολογική προσέγγιση .....	8
1.2  Η εξέλιξη της τηλεπισκόπησης στο χρόνο.....	10
2. Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ ΣΤΗ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	12
2.1  Η μεταλλευτική έρευνα.....	12
2.2  Η τηλεπισκόπηση στη μεταλλευτική έρευνα.....	13
2.3  Συστήματα τηλεπισκόπησης στη μεταλλευτική έρευνα.....	13
2.3.1  Εικόνες Landsat .....	13
2.3.2  SPOT.....	18
2.3.3  Πολυφασματικά συστήματα απεικόνισης.....	18
2.3.4  Συστήματα Radar.....	19
2.3.5  Ψηφιακή επεξεργασία εικόνας.....	19
2.4  Επισκόπηση της μεταλλευτικής έρευνας.....	20
2.5  Χαρτογράφηση της υδροθερμικής αλλοίωσης σε αποθέματα επιθερμικών φλεβών. 21	
2.5.1  Γεωλογία, αποθέματα ορυκτών και υδροθερμική αλλοίωση .....	22
2.5.2  Αναγνώριση υδροθερμικών αλλοιώσεων σε εικόνες Landsat .....	24
2.5.3  Αλουμινίτης και αργιλικά ορυκτά σε εικόνες με αναλογία 5/7.....	24
2.5.4  Ορυκτά σιδήρου σε εικόνες αναλογίας 3/1.....	28
2.5.5  Χρωματικά σύνθετες εικόνες σε αναλογία.....	29
2.5.6  Εικόνες ταξινόμησης .....	29
2.5.7  Εντοπισμός υδροθερμικής αλλοίωσης σε υπερφασματικές εικόνες .....	30
2.5.8  Εικόνες AVIRIS του Goldfield.....	33
2.5.9  Λοιπά παραδείγματα εικόνων AVIRIS.....	33
2.6  Χαρτογράφηση υδροθερμικής αλλοίωσης σε εναποθέσεις πορφυρίτη και χαλκού - Collahuasi, Χιλή .....	35
2.6.1  Μοντέλο αλλοίωσης.....	35
2.6.2  Γεωλογικό κι ερευνητικό υπόβαθρο .....	37
2.6.3  Τηλεπισκόπηση .....	39
2.6.4  Γεωφυσικές χαρτογραφήσεις.....	40
2.6.5  Ανακαλύψεις Ορυκτών.....	42
2.7  Ορυκτά βόριου- Salar de Uyuni, Βολιβία .....	43
2.8  Μεταλλευτική έρευνα σε καλυμμένη έκταση .....	46

2.9 Τεχνολογία του μέλλοντος .....	50
3. Συμπεράσματα .....	53
Βιβλιογραφία .....	54
Ελληνική .....	54
Ξενόγλωσση .....	54
Ηλεκτρονικές πηγές.....	54

## Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1. Φάσματα ανάκλασης χλωρίδας και ιζηματογενών πετρωμάτων.....	14
Εικόνα 2. Ορατές και ανακλώμενες υπέρυθρες ζώνες στη μεταλλευτική περιοχή του Goldfield.....	16
Εικόνα 3. Ορατές και ανακλώμενες υπέρυθρες ζώνες στη μεταλλευτική περιοχή του Goldfield με τη χρήση χρώματος.....	17
Εικόνα 4. Χάρτης με τη γεωλογική και υδροθερμική αλλοίωση στην περιοχή εξόρυξης του Goldfield.....	22
Εικόνα 5. Εντοπισμός υδροθερμικών αργίλων και αλουμινίτη από δεδομένα θεματικού χαρτογράφου στην περιοχή εξόρυξης του Goldfield. ....	27
Εικόνα 6. Εντοπισμός υδροθερμικών ορυκτών σιδήρου από δεδομένα θεματικού χαρτογράφου στη περιοχή εξόρυξης του Goldfield. ....	28
Εικόνα 7. Εργαστηριακό φάσμα μεταλλευμάτων αλλοίωσης στη ζώνη 2.0 έως 2.5μm. ....	31
Εικόνα 8. Υπαίθρια φάσματα αλλοιωμένων και μη πετρωμάτων στη περιοχή εξόρυξης του Goldfield.....	35
Εικόνα 9. Μοντέλο ζωνών υδροθερμικής αλλοίωσης που σχετίζεται με αποθέματα πορφυρίτη και χαλκού. ....	36
Εικόνα 10. Γεωλογικός χάρτης της περιοχής εξόρυξης του Collahuasi. Οι ανωμαλίες από τις υδροθερμικές αλλοιώσεις έχουν επεξεργαστεί από απεικονίσεις αναλογιών Landsat.....	38
Εικόνα 11. Περιοχή εξόρυξης του Collahuasi. Οι Ζώνες Landsat δίδονται σε κόκκινο, πράσινο και μπλε αναμεμιγμένες με πανχρωματική απεικόνιση SPOT. ....	39
Εικόνα 12. Τοπογραφικός χάρτης τιμών αντίστασης, περιοχή εξόρυξης του Collahuasi. Η- υψηλές τιμές, L- χαμηλές τιμές. Οι υδροθερμικές ανωμαλίες έχουν επεξεργαστεί μέσω αναλογικών εικόνων Landasat. ....	42
Εικόνα 13. Απεικόνιση Landsat Ζώνης 4 της περιοχής Salar de Uyuni, νοτιοδυτική Βολιβία. ....	44
Εικόνα 14. Χάρτης του Salar de Uyuni. Τα τρίγωνα δείχνουν υψηλές τιμές αναλογίας 4/7 θεματικού χαρτογράφου που συσχετίζονται με υψηλή συγκέντρωση ουλεξίτη. Οι σχηματισμοί δείχνουν συγκέντρωση βόριου κοντά στην επιφάνεια. ....	45
Εικόνα 15. Φάσματα ανάκλασης αλίτη και ουλεξίτη. Οι Ζώνες 4 και 7 του θεματικού χαρτογράφου χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία εικόνας με αναλογία 4/7.....	46
Εικόνα 16. Εμπλουτισμός βλάστησης με χαλκό και χόμα υπερκείμενο αποθέματος χαλκού. ....	47
Εικόνα 17. Φάσματα ανάκλασης ελάτης και ερυθρελάτης που αναπτύσσονται σε κανονικό έδαφος και σε έδαφος εμπλουτισμένο σε χαλκό και μολυβδαίνιο. ....	49
Εικόνα 18. Φάσματα ανάκλασης από αερομεταφερόμενο φασματογράφο σε κωνοφόρα στο Cotter Basin.....	50
Εικόνα 19. Θερμική εκπομπή φασμάτων πυριγενών πετρωμάτων με διαφορετικό περιεχόμενο πυριτίου και χαλαζία. Τα βέλη δείχνουν τα κέντρα των ζωνών απορρόφησης. Οι θέσεις των φασματικών ζωνών καταγράφονται από ASTER και TIMS.....	51

## Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1. Υπολογισμός τιμών αναλογίας 5/7 θεματικού χαρτογράφου.....	25
Πίνακας 2. Επεξήγηση των χρωμάτων στην ταξινόμηση εικόνας από την περιοχή εξόρυξης του Goldfield. ....	30

## Πρόλογος

Η τεχνολογική εξέλιξη των τελευταίων δεκαετιών, έχει επιφέρει σημαντικές μεταβολές σε όλους τους τομείς της ανθρώπινης δράσης. Η αλματώδης εξέλιξη των μέσων έχει διευκολύνει κατά το μέγιστο κάθε επιστημονική έκφραση, προωθώντας την περαιτέρω εξέλιξη.

Μέσω της τεχνολογίας, είναι δυνατή η δημιουργία και χρήση συσκευών κι εργαλείων που βοηθούν σημαντικά το ερευνητικό έργο των επιστημόνων στην υγεία, τη μηχανική, αλλά και το περιβάλλον. Τα μέσα αυτά δίνουν τις απαραίτητες πληροφορίες στους επιστήμονες, προκειμένου να εξάγουν συμπεράσματα σε σχέση με τη λειτουργία του ανθρώπινου σώματος και του περιβάλλοντος, για παράδειγμα, καθώς και τη δυνατότητα εξαγωγής απαντήσεων σε ποικίλα ζητήματα.

Μια τέτοια τεχνολογική μέθοδος που βρίσκει εφαρμογή και στη μεταλλευτική έρευνα, είναι η τηλεπισκόπηση. Η μέθοδος της τηλεπισκόπησης, με τη χρήση συγκεκριμένων μεθόδων, δίνει τη δυνατότητα στους γεωεπιστήμονες να μελετούν λεπτομερώς την ύπαρξη και την επιρροή των μεταλλευμάτων στο γήινο έδαφος, καθώς και την αλληλεπίδρασή τους με τα λοιπά στοιχεία της φύσης.

Σκοπό της παρούσας εργασίας αποτελεί η έκθεση των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για τη τηλεπισκοπική μελέτη των μεταλλευμάτων. Η εργασία αποτελείται από 2 Κεφάλαια. Στο Κεφάλαιο 1, γίνεται μια εισαγωγική αναφορά σε σχέση με το περιεχόμενο της τηλεπισκόπησης ως τεχνικής μεθόδου, καθώς ο προσδιορισμός των χαρακτηριστικών της μεταλλευτικής έρευνας. Στο Κεφάλαιο 2, δίνεται εκτενής έκθεση διαφόρων μεθόδων τηλεπισκόπησης που εφαρμόζονται αποκλειστικά στα πλαίσια της μεταλλευτικής έρευνας. Αναφέρονται συγκεκριμένα μέσα που χρησιμοποιούνται από τους επιστήμονες, ενώ σχολιάζονται παραδείγματα περιοχών ανά τον κόσμο όπου έχουν εφαρμοστεί διάφορες μέθοδοι τηλεπισκόπησης με τη παράθεση και εικόνων.

# 1. Η ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ

## 1.1 Εννοιολογική προσέγγιση

Τηλεπισκόπηση καλείται, γενικά, η τεχνική συλλογής στοιχείων για τον προσδιορισμό της φύσης και των ιδιοτήτων ενός ή περισσοτέρων αντικειμένων μιας περιοχής, από απόσταση, μέσω αεροπλάνων και δορυφόρων, χωρίς να υφίσταται φυσική επαφή με τα αντικείμενα αυτά. Αυτό επιτυγχάνεται με τη βοήθεια ειδικών συστημάτων καταγραφής δεδομένων και με τη βοήθεια εξειδικευμένων συστημάτων οπτικής και ψηφιακής επεξεργασίας των δεδομένων που λαμβάνονται (Αστάρας, 2006).

Τα συστήματα που λαμβάνουν τα δεδομένα- οι δέκτες- χωρίζονται σε 2 κατηγορίες:

1. Τα συστήματα τηλεπισκόπησης που καταγράφουν την «φυσική» ακτινοβολία και ονομάζονται παθητικά. Για την ανακλώμενη ενέργεια αυτό συμβαίνει κατά την διάρκεια της ημέρας όταν ο ήλιος φωτίζει τμήματα της Γης, ενώ δεν υπάρχει ανακλώμενη ενέργεια την νύχτα. Η με φυσικό τρόπο εκπεμπόμενη ενέργεια (θερμικό υπέρυθρο) μπορεί να καταγραφεί ημέρα ή νύχτα και εφόσον το ποσό της ενέργειας είναι τέτοιο ώστε να είναι δυνατή η καταγραφή. Τα παθητικά συστήματα χρησιμοποιούν το τμήμα του φάσματος από πολύ μικρά μήκη κύματος (μικρότερα του 0.4  $\mu\text{m}$ ) έως την περιοχή του μήκους κύματος 1000  $\mu\text{m}$ .
2. Τα ενεργά συστήματα είναι εκείνα που καταγράφουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα που εκπέμπονται από άλλη εξωτερική πηγή ή από το ίδιο το όργανο καταγραφής. Συνήθως το σύστημα καταγραφής είναι αυτό που εκπέμπει και την ενέργεια προς την επιφάνεια και στην συνέχεια ανακλάται επιστρέφει και καταγράφεται η «ηχώ» του σήματος από το ίδιο το σύστημα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου τύπου οργάνου είναι τα Radars που εκπέμπουν στην περιοχή των μικροκυματικών. Η ανάγκη των ενεργών συστημάτων σε ενέργεια είναι μεγάλη για το λόγο αυτό και η λειτουργία τους δεν είναι συνεχής. Οι σαρωτές μπορεί να είναι αερομεταφερόμενοι (συνήθως σε αεροπλάνα) ή σε διαστημικές εξέδρες (δορυφόρους) (Σπυρόπουλος, 2012).

Στην ουσία, η επιστήμη της τηλεπισκόπησης, ασχολείται με την απόκτηση πληροφοριών για μια γήινη επιφάνεια με την μέτρηση και αποτύπωση της



ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που ανακλάται ή εκπέμπεται από την επιφάνεια της γης και την ατμόσφαιρα.

Η τηλεπισκόπηση έχει τριπλή διάσταση, που περιλαμβάνει τις ακόλουθες τρεις παραμέτρους:

- τους στόχους που συνιστούν τα υπό μελέτη αντικείμενα ή τα φαινόμενα μιας περιοχής.
- την τεχνική συλλογής δεδομένων με τη βοήθεια οργάνων που βρίσκονται σε απόσταση από τους στόχους, και
- την ανάκλαση και την ερμηνεία των δεδομένων.

Η τηλεπισκόπηση περιλαμβάνει την ανθρώπινη όραση, τις ακτίνες X των ιατρικών επιστημών, τις συμβατικές φωτογραφίες, τις αεροφωτογραφίες, τη λήψη εικόνων με Radar, τις δορυφορικές εικόνες, τις μετρήσεις του πεδίου βαρύτητας της γης κ.α. Πιο διαδεδομένες είναι οι αεροφωτογραφίες και οι δορυφορικές εικόνες. Ιδιαίτερα αναπτυγμένη είναι η δορυφορική τηλεπισκόπηση που ασχολείται με την καταγραφή δεδομένων από ανιχνευτές δορυφόρων που ανιχνεύουν και καταγράφουν την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που είτε ανακλάται ή εκπέμπεται από κάποια επιφάνεια σε διάφορες φασματικές περιοχές. Η ακτινοβολία που καταγράφουν οι δορυφορικοί αισθητήρες έχει διαμορφωθεί από την αλληλεπίδραση της με την επιφάνεια και την ατμόσφαιρα της γης και συνεπώς μεταφέρει πληροφορίες για τις χημικές και φυσικές ιδιότητες της επιφάνειας και της ατμόσφαιρας (Καρτάλης και Φείδας, 2006) .

Η επιστήμη της τηλεπισκόπησης δίνει λύση στα προβλήματα συλλογής δεδομένων από περιοχές μεγάλης έκτασης. Το κόστος αγοράς και επεξεργασίας των δορυφορικών εικόνων είναι ιδιαίτερα χαμηλό σε σχέση με την έκταση της περιοχής που καλύπτουν και την ακρίβεια της πληροφορίας που παρέχουν. Η παρατήρηση και παρακολούθηση της γης από το διάστημα αποτελεί τα τελευταία χρόνια σημαντικό εργαλείο για τη μελέτη του περιβάλλοντος, τη κατανομή του παγκόσμιου κλίματος αλλά και το σχεδιασμό και την ενίσχυση αναπτυξιακών και παραγωγικών δραστηριοτήτων σε μία περιοχή, σε μια χώρα ή σε ολόκληρο το πλανήτη ( Μελιάδου και Μελιάδης, 2014).

## 1.2 Η εξέλιξη της τηλεπισκόπησης στο χρόνο

Η απεικόνιση των αντικειμένων από απόσταση, άρχισε να βρίσκει μεγάλη απήχηση κατά τη διάρκεια του Α΄ Παγκόσμιου πολέμου. Τα αναγνωριστικά αεροπλάνα, πετώντας πάνω από τα στρατεύματα και τις δυνάμεις του εχθρού, κατέγραφαν τις κινήσεις του μέσω απλών φωτογραφικών μηχανών. Από τις φωτογραφίες έπαιρναν πληροφορίες για τη θέση και τις ενέργειες του εχθρού.

Κατά τη διάρκεια του Β΄ Παγκόσμιου πολέμου, οι τεχνικές βελτιώθηκαν πολύ περισσότερο. Για την προετοιμασία της απόβασης στη Νορμανδία χρησιμοποιήθηκαν αεροφωτογραφίες με σκοπό να χαρτογραφηθούν οι ακτές και να εντοπιστούν τα ευνοϊκότερα σημεία προς απόβαση. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι χρησιμοποιήθηκε υπέρυθρο φιλμ, για την ταυτοποίηση της βλάστησης και το διαχωρισμό της από τα δίκτυα, που τοποθετούσαν οι εχθρικές δυνάμεις ως καμουφλάζ.

Στη δεκαετία του '60 δημιουργήθηκαν φιλμ ευαίσθητα σε διάφορα μήκη κύματος. Τα φιλμ αυτά, χρησιμοποιήθηκαν για τη χαρτογράφηση διάφορων χαρακτηριστικών του εδάφους όπως οι διάφοροι τύποι βλάστησης. Στη συνέχεια, άρχισε η μεταφορά και συστημάτων Radar από αεροσκάφη.

Το 1960 εκτοξεύθηκε ο πρώτος μετεωρολογικός δορυφόρος (TIROS), με σκοπό την καταγραφή μετεωρολογικών δεδομένων. Ο δορυφόρος αυτός εφοδίαζε καθημερινά τη Μετεωρολογική Υπηρεσία των Ηνωμένων Πολιτειών, λαμβάνοντας φωτογραφίες, που παρουσίαζαν σχηματισμούς νεφών . Ουσιαστικά, μεγάλη ώθηση δόθηκε στην τηλεπισκόπηση από το 1960 και μετά. Το γεγονός αυτό, οφείλεται κυρίως στον ψυχρό πόλεμο, ο οποίος ενέτεινε τον ανταγωνισμό στις διαστημικές και δορυφορικές έρευνες και στη δημιουργία της Αμερικάνικης NASA. Με την πάροδο του χρόνου τα δορυφορικά συστήματα καταγραφής, τα οποία αναπτύχθηκαν για στρατιωτικούς σκοπούς, άρχισαν να χρησιμοποιούνται σε διάφορα επιστημονικά πεδία και εφαρμογές , όπως για παράδειγμα στη χαρτογράφηση χρήσεων γης, στη διαχείριση των οικοσυστημάτων του περιβάλλοντος, στη παρατήρηση και απογραφή καλλιεργειών, στην παρακολούθηση περιβαλλοντικών θεμάτων κ.τ.λ. Ραγδαία ήταν και η εξέλιξη των συστημάτων Radar και των τεχνικών χαρτογράφησης στο εγγύς υπέρυθρο και θερμικό κανάλι.

Σταδιακά, έκαναν την εμφάνιση τους νέα συστήματα με καλύτερη χωρική, ραδιομετρική, φασματική και χρονική διακριτική ικανότητα. Τα συστήματα αυτά αναπτύχθηκαν, βελτιώθηκαν και συνεχίζουν να βελτιώνονται. Πλέον οι λειτουργίες τους, συνδέονται άμεσα με τεχνικές πληροφορικής και αυτοματισμού.

Η ραγδαία ανάπτυξη της δορυφορικής τηλεπισκόπησης τις δύο τελευταίες δεκαετίες σε συνδυασμό με τη μείωση του κόστους εκτόξευσης των δορυφορικών συστημάτων, διαχείρισης και επεξεργασίας των δορυφορικών δεδομένων, οδήγησε με ταχύ ρυθμό στην πλήρη επικράτηση της, έναντι των άλλων μορφών τηλεπισκόπησης όπως οι αεροφωτογραφίες.

Η δορυφορική τηλεπισκόπηση μπορεί να συνεισφέρει σε πλήθος εφαρμογών, όπως στη γεωλογία, στη σεισμολογία, στη δασολογία, στη γεωργία, στην υδρολογία, στην τοπογραφία, στη μετεωρολογία, στη μελέτη της ατμόσφαιρας και του κλίματος, στην ωκεανογραφία, κ.α. Έτσι, τα περισσότερα από τα παγκόσμια περιβαλλοντικά προβλήματα μπορούν να μελετώνται και να παρακολουθούνται από δορυφόρους.

Σήμερα, υπάρχουν διάφορα δορυφορικά συστήματα, που καταγράφουν πληροφορία σχεδόν σε όλα τα μέρη του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Ο αριθμός των καναλιών και το μέγεθος της εικονοψηφίδας ποικίλουν, αφού καθορίζονται από τα χαρακτηριστικά του αισθητήρα που χρησιμοποιείται (European Space Agency, 2010).

Ολοένα και περισσότεροι δορυφόροι (μετεωρολογικοί και περιβαλλοντικοί), εξοπλισμένοι με αισθητήρες πολύ υψηλής ανάλυσης που συλλέγουν δεδομένα τμήματα του φάσματος, βρίσκονται σε τροχιά ή προγραμματίζεται η εκτόξευσή τους, διευρύνοντας και ενισχύοντας τα πεδία εφαρμογής της τηλεπισκόπησης.

Οι κύριες εφαρμογές αφορούν τη χαρτογράφηση χρήσεων γης και εδαφοκάλυψης, καθώς και τον υπολογισμό ποσοτικών δεικτών και μοντέλων που συμβάλουν στην παρακολούθηση και στη διαχείριση του αγροτικού και αστικού περιβάλλοντος. Πέρα από αυτές, η τηλεπισκόπηση, είτε δορυφορική είτε σε εικόνες από αεροπλάνο, αποτελεί σημαντικό εργαλείο σε πάρα πολλά πεδία. Ενδεικτικά αναφέρονται μερικά από αυτά (Γεωανάλυση, 2015):

- Παραγωγή ορθοφωτοχαρτών και υποβάθρων υψηλής ανάλυσης με φυσική απεικόνιση.

- Ταξινομήσεις καλλιεργειών, προσδιορισμός δεικτών βλάστησης, εκτίμηση γεωργικής παραγωγής.
- Παρακολούθηση, εκτίμηση και διαχείριση καταστροφών (φωτιές, πλημμύρες, ξηρασία, κλπ).
- Εντοπισμός αρχαιολογικών χώρων – κτισμάτων και γενικά θαμμένων σχηματισμών κάτω από την επιφάνεια του εδάφους.
- Προσδιορισμός ψηφιακών μοντέλων εδάφους (DTM).
- Χαρτογράφηση γεωλογικών σχηματισμών, γεωμορφολογική - μορφομετρική ανάλυση ανάγλυφου.
- Παρακολούθηση θαλάσσιας ρύπανσης.
- Προσδιορισμός εδαφικής υγρασίας, παραμέτρων και συνιστωσών υδατικού ισοζυγίου.

Η τηλεπισκόπηση, όπως γίνεται αντιληπτό, αποτελεί σημαντικό βοηθητικό μέσο καταγραφής και μελέτης δεδομένων κι έτσι δε θα μπορούσε να μην αξιοποιηθεί και από την μεταλλευτική έρευνα με τρόπους που αναλύονται στο επόμενο Κεφάλαιο.

## 2. Η ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΗΣ ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ ΣΤΗ ΜΕΤΑΛΛΕΥΤΙΚΗ ΕΡΕΥΝΑ

### 2.1 Η μεταλλευτική έρευνα

Η μεταλλευτική έρευνα ασχολείται με την έρευνα εντοπισμού των μεταλλευμάτων, ενώ περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα δραστηριοτήτων, από τη γεωλογική χαρτογράφηση επιφανειών με αεροφωτογράφιση μέχρι αντιπροσωπευτική δειγματοληψία εδαφών. Συγκεκριμένα, περιλαμβάνει σύγχρονες γεωφυσικές μεθόδους, δηλ. με την εξέταση ανωμαλιών σε φυσικές ιδιότητες γεωλογικών σωμάτων, κλπ. οι οποίες συμπληρώνονται από την γεωχημική έρευνα, δηλαδή, όπου αναζητούνται ανωμαλίες στην συγκέντρωση και κατανομή ιχνοστοιχείων στα εδάφη και τα νερά. Η μεταλλευτική έρευνα έχει συχνά σημαντικό κόστος σε χρόνο, χρήμα αλλά και σημαντικό ρίσκο. Όταν από τις ανωτέρω ερευνητικές μεθόδους, εντοπισθεί μετάλλευμα ή γενικότερα ενδιαφέρων γεωλογικός σχηματισμός, η μεταλλευτική έρευνα περνά στην επόμενη φάση της αξιολόγησης (Τζεφέρης, 2015).

## 2.2 Η τηλεπισκόπηση στη μεταλλευτική έρευνα

Στο παρόν, υπάρχουν συγκεκριμένα συστήματα που αξιοποιούνται στα πλαίσια της μεταλλευτικής έρευνας. Κάποια από αυτά χρησιμοποιούνται από τους δορυφόρους, ενώ άλλα αξιοποιούνται μόνο από αεροπλάνα. Τα συστήματα Radar χρησιμοποιούνται τόσο από δορυφόρους, όσο και από αεροσκάφη (Sabins, 1999).

Οι εικόνες που λαμβάνονται δορυφορικά, έχουν τα εξής πλεονεκτήματα:

- Τα αρχεία παγκόσμιας προέλευσης είναι άμεσα διαθέσιμα.
- Οι εικόνες καλύπτουν μεγάλο τμήμα του εδάφους.
- Οι τιμές ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο είναι γενικά χαμηλότερες.

Υπάρχουν, όμως, και μειονεκτήματα, όπως:

- Η τελευταία υπερφασματική τεχνολογία είναι διαθέσιμη μόνο σε αεροσκάφη.
- Οι αεροπορικές αποστολές διαμορφώνονται στα πλαίσια συγκεκριμένων προγραμμάτων.

## 2.3 Συστήματα τηλεπισκόπησης στη μεταλλευτική έρευνα

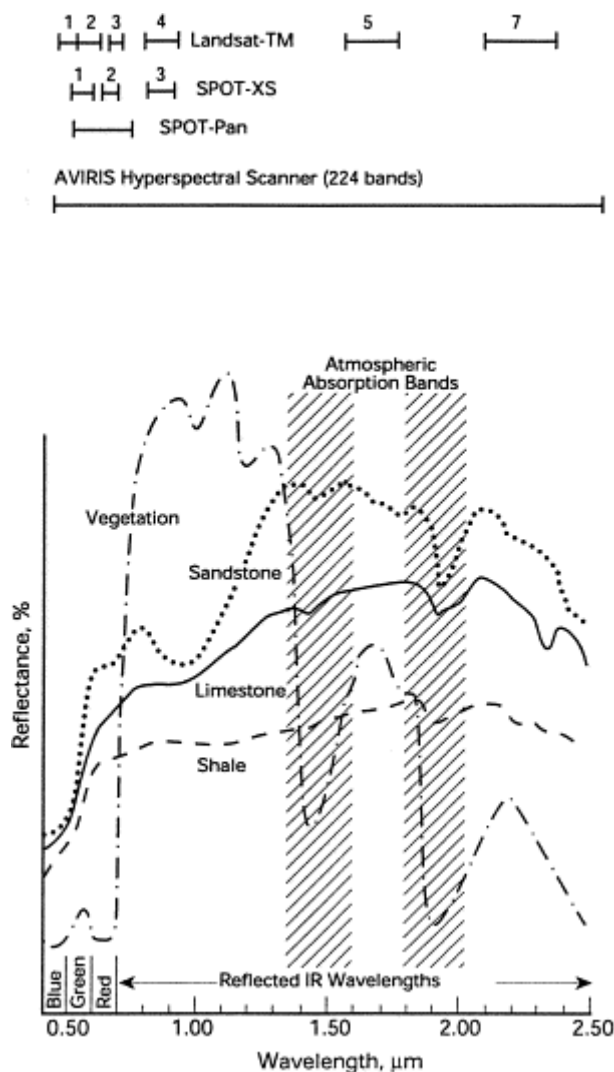
### 2.3.1 Εικόνες Landsat

Η NASA έχει παρουσιάσει δυο τύπους μη επανδρωμένων δορυφόρων οι οποίοι έχουν ανακτήσει πολύτιμα τηλεπισκοπικά δεδομένα σε σχέση με τη μεταλλευτική έρευνα, αλλά και άλλες εφαρμογές.

Και οι δύο τύποι είχαν τοποθετηθεί σε τροχιές συγχρονισμένες με τον ήλιο που παρέχουν επαναλαμβανόμενες εικόνες ολόκληρης της γης, εκτός των ακραίων πολικών περιοχών. Ο πρώτος τύπος λειτούργησε από το 1972 έως και το 1985 και στην ουσία αντικαταστάθηκε από τον δεύτερο, πιο εξελιγμένο τύπο. Ο δεύτερος τύπος χρησιμοποιήθηκε το 1982 και συνεχίζει μέχρι και σήμερα. Ο Landsat 6 της δεύτερης γενιάς παρουσιάστηκε το 1993, αλλά απέτυχε να μπει σε τροχιά. Οι εικόνες αποκτώνται από τον θεματικό χαρτογράφο (Thematic Mapper- TM), ο οποίος είναι ένας μηχανικός σαρωτής. Ένας ταλαντευόμενος σαρωτής με καθρέφτη, σαρώνει το πεδίο του οπτικού συστήματος σε όλο το έδαφος σε ορθή γωνία προς τη διαδρομή τροχιάς του δορυφόρου. Ένα φασματόμετρο διαχωρίζει την ηλιακή ενέργεια που

ανακλάται από την επιφάνεια της γης σε στενό μήκος κύματος διαστήματα που ονομάζονται φασματικές ζώνες, ενώ κάθε ζώνη καταγράφεται ως ξεχωριστή εικόνα.

Στη πιο κάτω εικόνα, αναπαριστώνται τα φάσματα ανάκλασης για τη χλωρίδα και τρία κοινά ιζηματογενή πετρώματα.



Εικόνα 1. Φάσματα ανάκλασης χλωρίδας και ιζηματογενών πετρωμάτων.

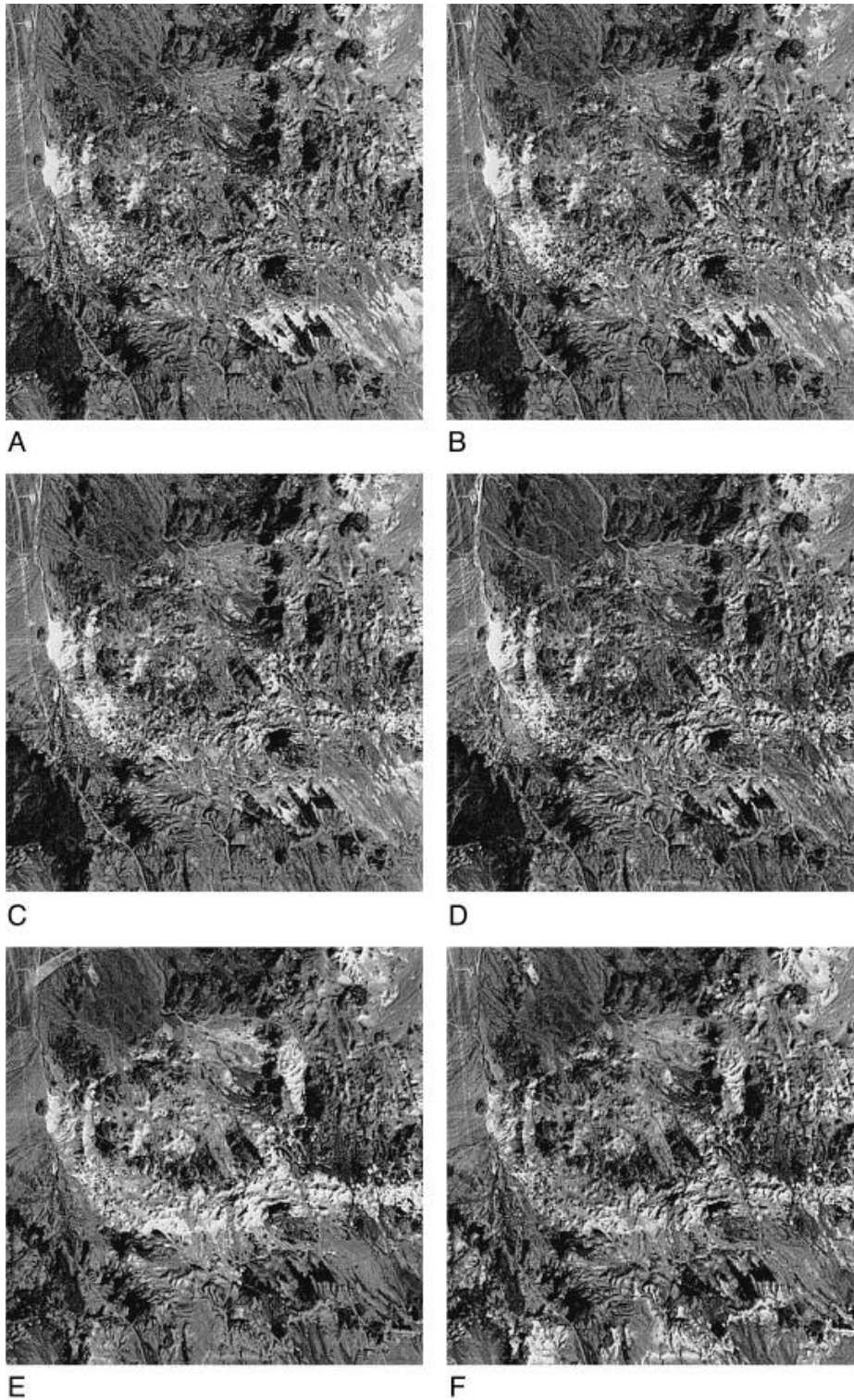
Πηγή: Sabins, 1999.

Ο κάθετος άξονας δείχνει το ποσοστό του προσπίπτοντος ηλιακού φωτός που αντικατοπτρίζεται από τα υλικά, ενώ ο οριζόντιος άξονας δείχνει τα μήκη κύματος της ενέργειας για την ορατή φασματική περιοχή (0,4 έως 7,0 χιλιοστά) και το ανακλώμενο τμήμα (0.7 έως 3,0 χιλιοστά) της υπέρυθρης περιοχής (IR). Η ανακλώμενη υπέρυθρη περιοχή αποτελείται σε μεγάλο βαθμό από την ηλιακή ενέργεια που ανακλάται από την γη σε μήκη κύματος μεγαλύτερο από το εύρος

ευαισθησίας του οφθαλμού. Το θερμικό ποσοστό της υπέρυθρης περιοχής (3,0 έως 1000 χιλιοστά) αποτελείται από ραδιενέργεια ή θερμότητα και δεν αναπαριστάται στο Σχήμα 1.

Ο θεματικός χαρτογράφος καταγράφει 3 μήκη κύματος της ορατής ενέργειας και τρεις ζώνες της ανακλώμενης υπέρυθρης ενέργειας, τα οποία αναπαριστώνται στο Σχήμα 1. Αυτές οι ορατές και ανακλώμενες υπέρυθρες ζώνες έχουν χωρική ανάλυση 30m. Η Ζώνη 6, που δεν αναπαριστάται στο Σχήμα 1, καταγράφει θερμική υπέρυθρη ενέργεια (10,5 έως 12, χιλιοστά) με χωρική ανάλυση 120m. Κάθε λήπτης του θερμικού σαρωτή καταγράφει 170 με 185 χιλιόμετρα έκτασης εδάφους, ενώ τα δεδομένα τηλεμετρώνται σε επίγειους σταθμούς λήψης.

Στην Εικόνα 2, αναπαριστώνται 6 ορατές και ανακλώμενες υπέρυθρες ζώνες μιας μικρής περιοχής που τη μεταλλευτική περιοχή του Goldfield. Οποιοσδήποτε τρεις από τις ζώνες μπορούν να συνδυαστούν σε μπλε, πράσινο και κόκκινο χρώμα ώστε να δημιουργηθούν χρωματικά σύνθετες εικόνες.

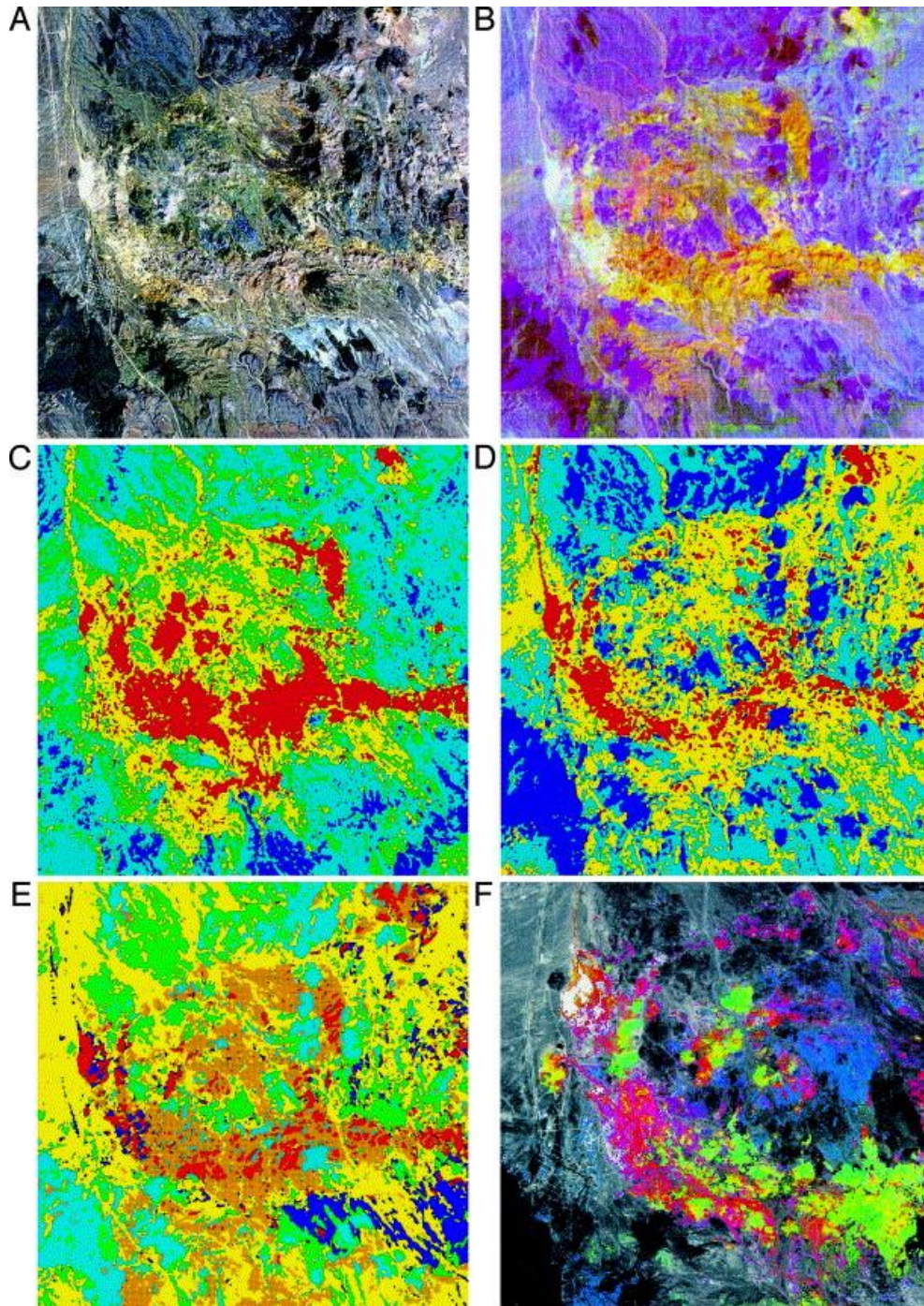


*Εικόνα 2. Ορατές και ανακλώμενες υπέρυθρες ζώνες στη μεταλλευτική περιοχή του Goldfield.*

*Πηγή: Sabins, 1999.*



Η Εικόνα 3.Α αναπαριστά ζώνες 1-2-3 συνδυασμένες σε μπλε, πράσινο και κόκκινο ώστε αν δημιουργηθεί, αντίστοιχα μια χρωματική εικόνα όμοια με αυτή που παρατηρείται μέσω του οφθαλμού ή καταγράφεται από έγχρωμη φωτογραφία.



Εικόνα 3. Ορατές και ανακλώμενες υπέρυθρες ζώνες στη μεταλλευτική περιοχή του Goldfield με τη χρήση χρώματος.

Πηγή: Sabins, 1999.

Ο δεύτερος τύπος των δορυφόρων Landsat, διευρύνθηκε με τον Landsat 7, που παρουσιάστηκε τον Απρίλιο του 1999 με βελτιωμένο σύστημα θεματικού χαρτογράφου. Στο νέο δορυφόρο, προστέθηκε μια χρωματική Ζώνη 8 (0,52 έως 0,90 χιλιοστά) με χωρική ανάλυση 15m. Η Ζώνη 8 μπορεί να συνδυαστεί με τις ορατές και ανακλώμενες υπέρυθρες ζώνες ώστε να εξαχθεί εικόνα άμεσης ανάλυσης 15m. Η χωρική ανάλυση της θερμικής υπέρυθρης Ζώνης 6, βελτιώθηκε από 120m σε 60m (Sabins, 1999).

### 2.3.2 SPOT

Το 1986, η γαλλική εταιρεία SPOT Image, παρουσίασε μια σειρά μη επανδρωμένων δορυφόρων, συγχρονιζόμενους με τον ήλιο, που ανακτούν εικόνες με δύο λειτουργίες. Η πολυφασματική λειτουργία (XS), ανακτά 3 ζώνες δεδομένων σε πράσινο, κόκκινο και μπλε, καθώς και υπέρυθρα μήκη κύματος, με χωρική ανάλυση 20m. Η πανχρωματική λειτουργία ανακτά μια μεμονωμένη ζώνη δεδομένων, κυρίως, μήκη κύματος σε πράσινο και κόκκινο, με χωρική ανάλυση 10m. Και οι 2 λειτουργίες καλύπτουν 60 επί 60 χιλιόμετρα έκτασης και μπορούν να ληφθούν σε στερεοσκοπική μορφή (Sabins, 1999).

### 2.3.3 Πολυφασματικά συστήματα απεικόνισης

Συμβατικά πολυφασματικά συστήματα σάρωσης, όπως ο θεματικός χαρτογράφος Landsat και ο SPOT XS, καταγράφουν μέχρι 10 φασματικές ζώνες με εύρος 0,10m. Οι υπερφασματικοί σαρωτές είναι ένας ειδικός τύπος πολυφασματικού σαρωτή που καταγράφει πολλά δέκατα ζωνών με εύρος της τάξης του 0,01m. Πολλά μέταλλα έχουν χαρακτηριστικά φασματικά πρότυπα ανάκλασης σε ορατά μήκη κύματος και ειδικά σε ανακλώμενα υπέρυθρα μήκη κύματος (Hunt, 1980, αναφέρεται στον Sabins, 1999). Κάτω από επιθυμητές συνθήκες, πολλά μέταλλα είναι δυνατόν να αναγνωριστούν με κατάλληλη επεξεργασία των υπερφασματικών δεδομένων. Στην Εικόνα 1. δίδεται η φασματική περιοχή που καλύπτεται από 224 φασματικές ζώνες που καταγράφονται από το ιπτάμενο ορατό φασματόμετρο AVIRIS που είναι ένα υπερφασματικό σύστημα που μεταφέρεται από αεροσκάφος σε μεγάλα υψόμετρα από τη NASA. Οι λωρίδες απεικόνισης του AVIRIS έχουν πλάτος 10,5 χιλιομέτρων και μήκος πολλών δεκάτων χιλιομέτρων. Το ιπτάμενο σύστημα λειτουργεί σε πειραματική βάση (Sabins, 1999).

### 2.3.4 Συστήματα Radar

Τα Radar είναι ένα ενεργό σύστημα τηλεπισκόπησης που παρέχει τη δική του πηγή ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας ώστε να φωτίζεται το έδαφος. Η ενέργεια των Radar μετράται με μήκη κύματος εκατοστών που διαπερνούν τη βροχή και τα σύννεφα, που αποτελεί πλεονέκτημα για τις τροπικές περιοχές. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι οι εικόνες των Radar μπορούν να λαμβάνονται υπό χαμηλή γωνία κι έτσι επισημαίνονται έντονα φωτεινές περιοχές και σκιές που ενισχύουν τα τοπογραφικά χαρακτηριστικά. Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι κοινώς οι εκδηλώσεις των ρηγμάτων, των ρωγμών και της λιθολογίας. Οι εικόνες των Radar από καλλιεργούμενες εκτάσεις καταγράφουν τη καλλιεργούμενη επιφάνεια, παρά την υπόγεια περιοχή (Sabins, 1999).

### 2.3.5 Ψηφιακή επεξεργασία εικόνας

Τα σύγχρονα συστήματα τηλεπισκόπησης καταγράφουν δεδομένα εικόνων σε ψηφιακή μορφή που είναι κατάλληλη για ηλεκτρονική επεξεργασία, με την άμεση χρήση λογισμικού και ηλεκτρονικού υπολογιστή. Ο Sabins (1997, αναφέρεται στον Sabins, 1999), κατηγοριοποιεί τις ομάδες μεθόδων ψηφιακής επεξεργασίας σε τρεις πρακτικές κατηγορίες, όπως αυτές που δίδονται στη συνέχεια.

- Αποκατάσταση της εικόνας: αντισταθμίζει τα λάθη στην εικόνα, τον ήχο και τις γεωμετρικές παραμορφώσεις που δημιουργούνται κατά τη διαδικασία της σάρωσης και καταγραφής. Ο απώτερος σκοπός είναι η αποκατεστημένη εικόνα να ομοιάζει με την πραγματική του εδάφους. Συνήθεις διαδικασίες τέτοιου είδους είναι:
  - Αποκατάσταση των περιφερειακών γραμμών.
  - Επαναφορά της περιοδικής διαγράμμισης.
  - Επαναφορά των μετατοπίσεων των γραμμών.
  - Φιλτράρισμα των τυχαίων ήχων.
  - Διόρθωση της ατμοσφαιρικής διαβάθμισης.
  - Διόρθωση των γεωμετρικών παραμορφώσεων.
- Βελτίωση της εικόνας: τροποποιεί τον οπτικό αντίκτυπο που έχει η εικόνα στον λήπτη. Σκοπός είναι η βελτίωση της πληροφορίας που συνδέεται με την εικόνα. Τέτοιες διαδικασίες είναι:
  - Βελτίωση της αντίθεσης.

- Βελτίωση της πυκνότητας.
  - Βελτίωση των αιχμών.
  - Δημιουργία ψηφιακών μωσαϊκών.
  - Μετατροπή στην ένταση και την απόχρωση.
  - Συγχώνευση συνόλων δεδομένων.
  - Συνθετικές στερεοφωνικές εικόνες.
- Εξαγωγή πληροφοριών: γίνεται χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή ώστε να γίνει συνδυασμός και αλληλεπίδραση μεταξύ διαφορετικών διαστάσεων ενός συνόλου δεδομένων. Σκοπός είναι η εμφάνιση φασματικών και άλλων χαρακτηριστικών μιας εικόνας που δεν είναι εμφανή σε αποκατεστημένες και βελτιωμένες εικόνες. Διαδικασίες επεξεργασίας τέτοιας φύσης είναι:
- Οι εικόνες βασικών συνιστωσών.
  - Οι εικόνες αναλογιών.
  - Η πολυφασματική ταξινόμηση.
  - Οι εικόνες με αλλαγές αντίχενυσης.

Οι εικόνες που δίδονται στη παρούσα εργασία, έχουν επεξεργαστεί με ένα συνδυασμό από τις αναφερόμενες μεθόδους.

## 2.4 Επισκόπηση της μεταλλευτικής έρευνας

Βάσει πρόσφατων ερευνών, υπάρχουν 2 προσεγγίσεις σχετικά με την μεταλλευτική έρευνα.

Η πρώτη αναφέρεται ως χαρτογράφηση των γεωλογικών δομών και των δομών των ρηγμάτων σε περιφερειακή και τοπική κλίμακα. Γεωλόγοι έχουν από καιρό αναγνωρίσει τη σημασία της περιφερειακής και τοπικής δομής σαν παράγοντες ελέγχου των ορυκτών αποθεμάτων. Οι Rowan και Wetlaufer(1975, αναφέρονται στον Sabins, 1999), ένα μωσαϊκό της Νεβάδα, μέσω Landsat, για να ερμηνεύσουν τα περιφερειακά χαρακτηριστικά. Ο Nicolais(1974, αναφέρεται στον Sabins, 1999), εξήγησε τις τοπικές δομές των ρωγμών μέσω εικόνας Landsat στο Κολοράντο. Τα ορυχεία τείνουν να εμφανίζονται σε περιοχές με μεγάλο αριθμό ρωγμών και μεγάλη συγκέντρωση σε διασταυρώσεις ρωγμών. Οι Rowan και Bowers (1995, αναφέρονται στον Sabins, 1999), χρησιμοποίησαν θεματικό χαρτογράφο- TM- και εικόνες Radar από αεροσκάφος για να ερμηνεύσουν γραμμικά χαρακτηριστικά στη Δυτική Νεβάδα.

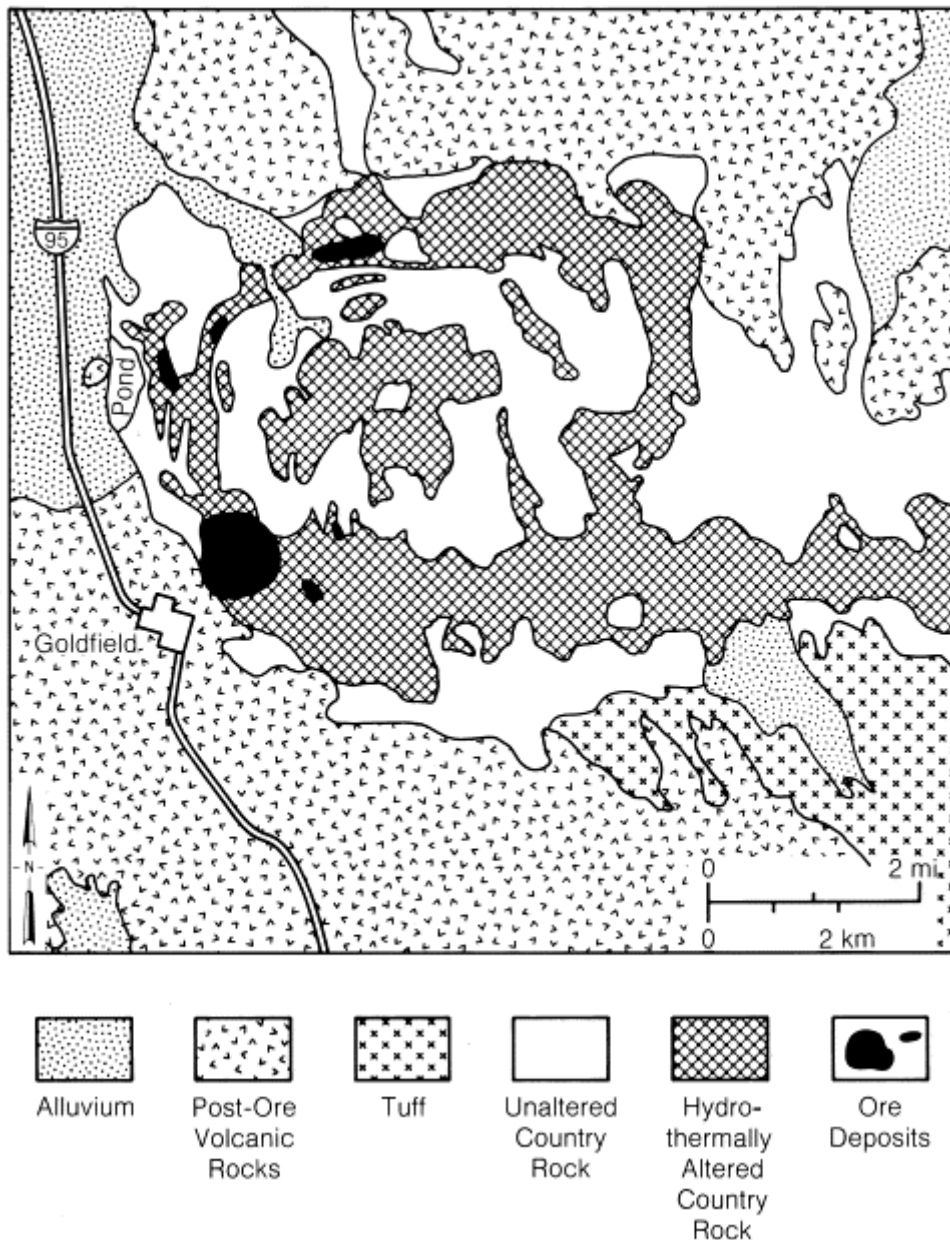
Κατέληξαν στο ότι τα γραμμικά χαρακτηριστικά συσχετίζονται με τις γεωλογικές δομές που ελέγχουν την ορυκτοποίηση.

Η δεύτερη προσέγγιση, αναγνωρίζει ότι τα υδροθερμικά μεταβαλλόμενα πετρώματα μπορεί να σχετίζονται με την ύπαρξη αποθεμάτων μετάλλων. Οι φασματικές ζώνες του θεματικού χαρτογράφου Landsat είναι κατάλληλες για την αναγνώριση του συνόλου της αλλοίωσης των ορυκτών (όπως του σιδήρου και του άργιλου) που εμφανίζονται σε υδροθερμικά μεταβαλλόμενα πετρώματα.

Σύμφωνα με τον Sabins (1999), ο συνδυασμός των δύο πιο πάνω μεθόδων, δίνει τα καλύτερα ερευνητικά αποτελέσματα.

## 2.5 Χαρτογράφηση της υδροθερμικής αλλοίωσης σε αποθέματα επιθερμικών φλεβών

Τα περισσότερα αποθέματα επιθερμικών φλεβών συνοδεύονται από υδροθερμική αλλοίωση των πετρωμάτων της προσκείμενης υπαίθρου. Δεν σχετίζονται όλες οι αλλοιώσεις με ορυκτά σώματα και δεν εξυπακούεται ότι όλα τα ορυκτά σώματα συνοδεύονται από αλλοιώσεις, αλλά η παρουσία αλλοιωμένων πετρωμάτων είναι ένας πολύτιμος δείκτης για την ύπαρξη πιθανών αποθεμάτων. Μελετητές έχουν αντιληφθεί προ πολλού τη συσχέτιση μεταξύ υδροθερμικά αλλοιωμένων πετρωμάτων και ορυκτών αποθεμάτων. Πολλά ορυχεία ανακαλύφθηκαν μέσω της αναγνώρισης της επιφανειακής ύπαρξης αλλοιωμένων πετρωμάτων, την οποία ακολούθησε η ανάλυση δειγμάτων από τα πετρώματα. Πριν τη τηλεπισκόπηση, τα αλλοιωμένα πετρώματα αναγνωρίζονται από την εμφάνιση στις ορατές φασματικές ζώνες. Σήμερα, η τηλεπισκόπηση και η ψηφιακή επεξεργασία εικόνας δίνουν τη δυνατότητα χρήσης επιπλέον φασματικών ζωνών για τη μεταλλευτική έρευνα. Σε περιοχές όπου εκτίθενται τα βραχώδη υποστρώματα, η τηλεπισκόπηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ώστε να εντοπιστούν αλλοιωμένα πετρώματα, επειδή το φάσμα ανάκλασης διαφέρει από τις περιοχές όπου δεν υπάρχουν αλλοιώσεις. Η περιοχή εξόρυξης του Goldfield στη νοτιοδυτική Νεβάδα είναι η πρώτη περιοχή όπου χρησιμοποιήθηκε η τηλεπισκόπηση για τον εντοπισμό υδροθερμικά αλλοιωμένων πετρωμάτων (Sabins, 1999).



Εικόνα 4. Χάρτης με τη γεωλογική και υδροθερμική αλλοίωση στην περιοχή εξόρυξης του Goldfield.

Πηγή: Sabins, 1999.

### 2.5.1 Γεωλογία, αποθέματα ορυκτών και υδροθερμική αλλοίωση

Η περιοχή εξόρυξης του Goldfield, θεωρούνταν ανέκαθεν από τις πιο πλούσιες σε μεταλλεύματα. Πάνω από 4 εκατομμύρια ούγγιες (130.000 κιλά) χρυσού με ασήμι και χαλκός παράγονταν, κυρίως, τη περίοδο της ακμής μεταξύ 1903 και 1910. Η γεωλογική και υδροθερμική αλλοίωση της περιοχής έχει χαρτογραφεί και αναλυθεί λεπτομερώς, γεγονός που καθιστά το Goldfield την ιδανική περιοχή για την ανάπτυξη και δοκιμή των μεθόδων τηλεπισκόπησης για τη μεταλλευτική έρευνα.

Η ηφαιστειότητα ξεκίνησε την Ολιγόκαινο εποχή με την έκρηξη ρωών χαλαζία και τη μορφοποίηση μιας μικρής καλντέρας κι ενός κυκλικού συστήματος ρωγμών. Η υδροθερμική αλλοίωση και η ορυκτή εναπόθεση παρουσιάστηκαν κατά τη δεύτερη περίοδο της ηφαιστειότητας, στις αρχές της Μειόκαινου εποχής όπου εξωθήθηκαν ροές δακίτη και ανδεσίτη. Η θερμότητα σε συνδυασμό με την ηφαιστειακή δραστηριότητα σε βάθος, προκάλεσαν θερμική ροή καυτών, όξινων και υδροθερμικών διαλυμάτων μέσα από τα πετρώματα. Η κίνηση του υγρού συγκεντρώθηκε στις ρωγμές και στα ρήγματα του κυκλικού συστήματος ρωγμών. Στη συνέχεια, η περιοχή επικαλύφθηκε από επακόλουθες εναποθέσεις ορυκτών. Η μετέπειτα διάβρωση έχει εκθέσει το παλαιότερο ηφαιστειακό κέντρο με αλλοιωμένα πετρώματα και εναποθέσεις ορυκτών.

Στο χάρτη της Εικόνας 4, τα υδροθερμικά αλλοιωμένα πετρώματα επισημαίνονται με τεμνόμενη διαγράμμιση, ενώ τα μη αλλοιωμένα πετρώματα φαίνονται στα σημεία όπου δεν υπάρχει κανένα είδος επισήμανσης, πρόκειται για τα λευκά σημεία. Περίπου 40 τετραγωνικά χιλιόμετρα της περιοχής υπόκεινται σε αλλοιωμένα πετρώματα, αλλά λιγότερα από 2 τετραγωνικά χιλιόμετρα της αλλοιωμένης περιοχής περιέχει αποθέματα μεταλλευμάτων, που επισημαίνονται στα μαύρα σημεία του χάρτη. Οι ζώνες σε σχήμα οβάλ των αλλοιωμένων πετρωμάτων ελεγχόταν από το κυκλικό σύστημα ρωγμών με μια γραμμική επέκταση προς τα ανατολικά. Το κεντρικό κομμάτι της αλλοιωμένης γης που δίδεται στο χάρτη ελεγχόταν από παρακείμενες ρωγμές και ρήγματα. Τα περισσότερα αλλοιωμένα πετρώματα είναι οι φλέβες μικροκρυσταλλικού χαλαζία με κάποια ποσότητα αλουμινίτη. Τα μεταλλεύματα εμφανίζονται στις φλέβες, αλλά η πλειοψηφία των φλεβών είναι άγονες. Δίπλα στις φλέβες, το υπαίθριο πέτρωμα έχει μεταβληθεί σε αργιλικά ορυκτά ιλλίτη, καολινίτη, μοντμοριλλονίτη και αλουμινίτη. Αυτή η συνάθροιση αλλοιωμένων μεταλλευμάτων ονομάζεται αργιλική ζώνη (Harvey και Vitaliano, 1964, αναφέρονται στον Sabins, 1999).

Τα υδροθερμικά διαλύματα, εναπόθεσαν, επίσης, ιαροσίτη και πυρίτη στις φλέβες και τα αργιλικά πετρώματα. Ο πυρίτης διαβρώνεται σε οξειδία του σιδήρου τα οποία προσδίδουν ροζ και κόκκινες αποχρώσεις στα αλλοιωμένα πετρώματα. Τα υδροθερμικά αλλοιωμένα πετρώματα του Goldfield, καθώς και άλλα επιθερμικά αποθέματα, χαρακτηρίζονται από 2 μεταλλευτικές συγκεντρώσεις:

- Αλουμινίτη και αργιλικών ορυκτών.
- Ορυκτών σιδήρου.

### 2.5.2 Αναγνώριση υδροθερμικών αλλοιώσεων σε εικόνες Landsat

Η Εικόνα 2 δείχνει τις ορατές και ανακλώμενες υπέρυθρες ζώνες προερχόμενες από τον θεματικό χαρτογράφο στη περιοχή του Goldfield. Η Εικόνα 3.A είναι μια βελτιωμένη χρωματικά απεικόνιση των ζωνών 1-2-3 του θεματικού χαρτογράφου και διαφαίνονται σε μπλε, πράσινο και κόκκινο, αντίστοιχα. Η κίτρινη περιοχή βορειοανατολικά της πόλης του Goldfield δημιουργήθηκε από τις χωματερές και τις διαταραχές στο έδαφος της κύριας μεταλλευτικής περιοχής. Το λευκό τμήμα 3 χιλιομέτρων βόρεια του Goldfield είναι η ξηρή περιοχή απορριμμάτων του εγκαταλελειμμένου μύλου Columbia, όπου ο χρυσός διαχωριζόταν από το αλλοιωμένο πέτρωμα που τον περιείχε. Η περιοχή αυτή είναι ένα χρήσιμο σημείο αναφοράς, επειδή περιέχει μια συγκέντρωση αλλοιωμένων ορυκτών υλικών. Τα σκοτεινά σημεία στα περιθώρια της εικόνας είναι ηφαιστειακά πετρώματα και είναι μεταγενέστερα των ορυκτών εναποθέσεων και των αλλοιωμένων πετρωμάτων. Τα χαρακτηριστικά μπλε σημεία στο νοτιοανατολικό τμήμα είναι επιφανειακή παρουσία ηφαιστειακής τέφρας. Η χρωματική απεικόνιση από τον θεματικό χαρτογράφο ή άλλοι εναλλακτικοί συνδυασμοί χρωματικών ζωνών, δεν είναι σε θέση να διαγνώσουν τα υδροθερμικά αλλοιωμένα πετρώματα. Γι' αυτό, χρειάζεται επιπλέον ψηφιακή επεξεργασία ώστε να χαρτογραφηθεί η υδροθερμική αλλοίωση μέσω δεδομένων από τον θεματικό χαρτογράφο (Sabins, 1999).

### 2.5.3 Αλουμινίτης και αργιλικά ορυκτά σε εικόνες με αναλογία 5/7

Η Εικόνα 5.A δείχνει ανακλώμενο φάσμα αλουμινίτη και 3 συνηθισμένων υδροθερμικών αργιλικών ορυκτών, ιλλίτη, καολινίτη και μοντμοριλλονίτη. Αυτά τα μεταλλεύματα έχουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά απορρόφησης σε μήκη κύματος εντός της Ζώνης 7 του θεματικού χαρτογράφου, που φαίνεται στο διάστικτο μέρος της Εικόνας 5.A. Τα αλλοιωμένα μεταλλεύματα έχουν υψηλότερες τιμές ανάκλασης εντός της Ζώνης 5 του θεματικού χαρτογράφου. Οι εικόνες σε αναλογία μπορούν να εστιάζουν και ποσοτικοποιούν αυτές τις φασματικές διαφορές. Μια εικόνα θεματικού χαρτογράφου αποτελείται από εικονικά στοιχεία (pixel) τα οποία αντιπροσωπεύουν εδαφική συγκέντρωση 30 επί 30m. Για κάθε pixel οι τιμές ανάκλασης για όλες τις ζώνες, καταγράφονται σαν ψηφιακοί αριθμοί (DNs) σε μια κλίμακα 8 βαθμίδων από



το 0 έως το 255. Οι εικόνες σε αναλογία προκύπτουν από τη διαίρεση της τιμής μιας ζώνης με τιμή μιας άλλης, αφού έχουν προηγηθεί ατμοσφαιρικές διορθώσεις.

Ο Πίνακας 1 εξηγεί πως η αναλογία 5/7 του θεματικού χαρτογράφου διακρίνει αλλοιωμένα πετρώματα που περιέχουν άργιλο και αλουμινίτη, από μη αλλοιωμένα πετρώματα.

*Πίνακας 1. Υπολογισμός τιμών αναλογίας 5/7 θεματικού χαρτογράφου.*

	<b>Ζώνη ανάκλασης 5</b>	<b>Ζώνη ανάκλασης 7</b>	<b>Αναλογία 5/7</b>	<b>Ψηφιακοί αριθμοί για αναλογία 5/7</b>
<b>Μη αλλοιωμένα πετρώματα (χωρίς αλουμινίτη και άργιλο)</b>	160	160	1,00	100
<b>Αλλοιωμένα πετρώματα (με αλουμινίτη και άργιλο)</b>	160	110	1,45	145

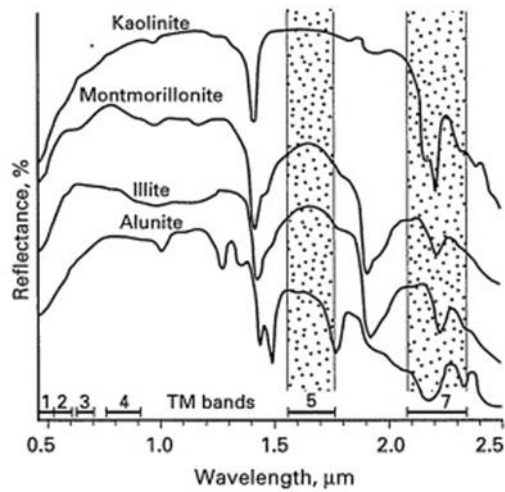
*Πηγή: Sabins, 1999.*

Και τα 2 είδη πετρωμάτων έχουν ίδια τιμή στη Ζώνη 5. Η ανακλαστικότητα των μη αλλοιωμένων πετρωμάτων στη Ζώνη 7 είναι παρόμοια με αυτή της Ζώνης 5. Για το λόγο αυτό, η αναλογία 5/7 στα μη αλλοιωμένα πετρώματα ισούται με τη μονάδα. Τα αλλοιωμένα πετρώματα, όμως, έχουν μικρότερη ανακλαστικότητα στη Ζώνη 7 εξαιτίας της απορρόφησης που προκαλείται από τα μεταλλεύματα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.A. Γι' αυτό, η αναλογία 5/7 για τα αλλοιωμένα πετρώματα είναι μεγαλύτερη της μονάδας, δηλαδή 1,45.

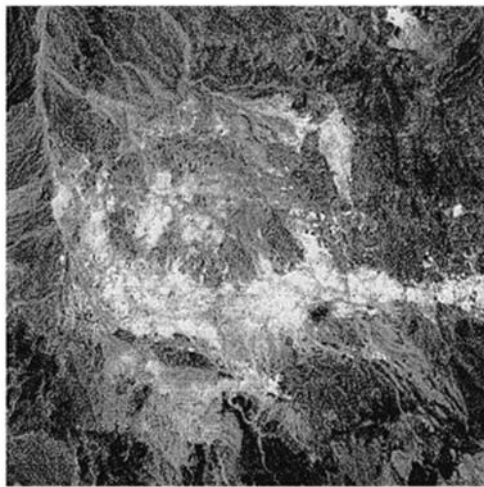
Η Εικόνα 5.B είναι μια απεικόνιση σε αναλογία 5/7 του Goldfield, με τις υψηλότερες τιμές αναλογίας να φαίνονται με φωτεινότερους τόνους. Συγκρίνοντας την εικόνα με τον χάρτη της Εικόνας 4, φαίνεται ότι οι υψηλές τιμές αναλογίας

συσχετίζονται με υδροθερμικά αλλοιωμένα πετρώματα. Η Εικόνα 5.C είναι ένα ιστόγραμμα της εικόνας με αναλογία 5/7 που δείχνει τις υψηλότερες τιμές σε αναλογία των αλλοιωμένων πετρωμάτων. Οι χαμηλές τιμές αναλογίας αντιπροσωπεύουν τα μη αλλοιωμένα πετρώματα.

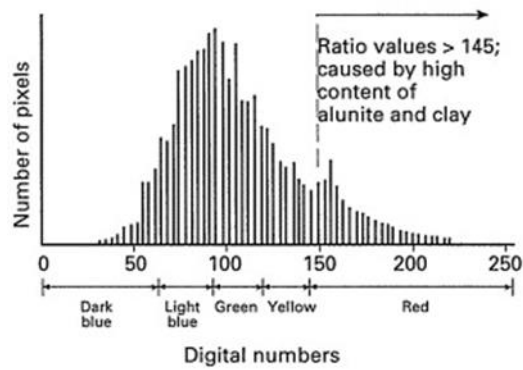
Η Εικόνα 3.C είναι μια έγχρωμη εκδοχή της πυκνότητας της εικόνας με αναλογία 5/7 στην οποία η γκρι κλίμακα έχει αντικατασταθεί από τα χρώματα που δίδονται στο ιστόγραμμα της Εικόνας 5.C. Οι υψηλότερες τιμές αναλογίας φαίνονται με κόκκινο χρώμα, με τις επόμενες υψηλότερες τιμές να γίνονται ορατές σε κίτρινο. Το κόκκινο και κίτρινο χρώμα στην εικόνα αναλογίας συσχετίζονται με τα αλλοιωμένα πετρώματα.



A. Laboratory reflectance spectra.



B. Ratio image of TM bands 5/7.



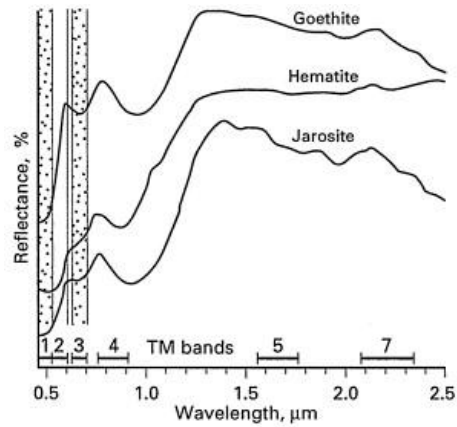
C. Histogram for 5/7 image.

Εικόνα 5. Εντοπισμός υδροθερμικών αργίλων και αλουμινίτη από δεδομένα θεματικού χαρτογράφου στην περιοχή εξόρυξης του Goldfield.

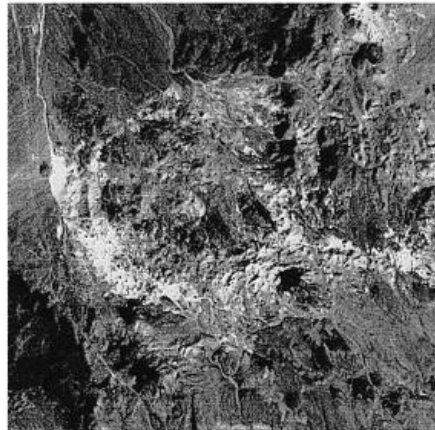
Πηγή: Sabins, 1999.

#### 2.5.4 Ορυκτά σιδήρου σε εικόνες αναλογίας 3/1

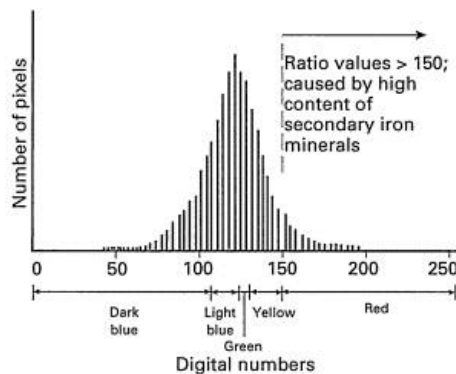
Τα οξείδια σιδήρου και θείου είναι η δεύτερη ομάδα μεταλλευμάτων που σχετίζεται με τα υδροθερμικά αλλιωμένα πετρώματα.



A. Laboratory reflectance spectra.



B. Ratio image of TM bands 3/1.



C. Histogram for 3/1 image.

*Εικόνα 6. Εντοπισμός υδροθερμικών ορυκτών σιδήρου από δεδομένα θεματικού χαρτογράφου στη περιοχή εξόρυξης του Goldfield.*

*Πηγή: Sabins, 1999.*

Η Εικόνα 6.A εμφανίζει φάσμα των ορυκτών σιδήρου που έχουν χαμηλή μπλε ανάκλαση (Ζώνη 1 θεματικού χαρτογράφου) και υψηλή κόκκινη ανάκλαση (Ζώνη 3 θεματικού χαρτογράφου). Γι' αυτό το λόγο, υδροθερμικά αλλοιωμένα πετρώματα που φέρουν κηλίδες σιδήρου έχουν υψηλές τιμές σε εικόνες αναλογίας 3/1. Η Εικόνα 3.B είναι μια απεικόνιση σε αναλογία 3/1 με υψηλούς ψηφιακούς αριθμούς, που διαφαίνονται με τα φωτεινά χρώματα. Η Εικόνα 3.D αποτελεί συμπυκνωμένη χρωματική απεικόνιση της εικόνας σε αναλογία 3/1, με χρωματική διαβάθμιση που δίδεται στο ιστόγραμμα της Εικόνας 6.C. Οι υψηλότερες τιμές σε αναλογία (με ψηφιακούς αριθμούς άνω του 150) διαφαίνονται με κόκκινο χρώμα, με τις επόμενες υψηλότερες (με διακύμανση ψηφιακών αριθμών μεταξύ 135 και 150), διαφαίνονται με κίτρινο. Το κόκκινο και το κίτρινο χρώμα, έτσι, συσχετίζονται με τα αλλοιωμένα πετρώματα (Sabins, 1999).

#### 2.5.5 Χρωματικά σύνθετες εικόνες σε αναλογία

Οι σύνθετες χρωματικά εικόνες σε αναλογία, δημιουργούνται από το συνδυασμό 3 εικόνων σε αναλογία σε μπλε, πράσινο και κόκκινο χρώμα. Η Εικόνα 3.B αναπαριστά αναλογίες 3/5, 3/1 και 5/7 σε κόκκινο, πράσινο και μπλε, αντίστοιχα. Οι πορτοκαλί και κίτρινες αποχρώσεις σκιαγραφούν τις εξωτερικές και εσωτερικές περιοχές των αλλοιωμένων πετρωμάτων σε μοτίβο παρόμοιο με αυτό των συμπυκνωμένων χρωματικά απεικονίσεων σε αναλογία. Ένα πλεονέκτημα της χρωματικές απεικόνισης σε αναλογία είναι το ότι συνδυάζει τις κατανομές των διατάξεων των ορυκτών σιδήρου και των υδροθερμικών αργίλων. Ως μειονέκτημα θεωρείται ότι οι χρωματικές απεικονίσεις δεν είναι το ίδιο ευδιάκριτες όπως στη περίπτωση των μεμονωμένων εικόνων πυκνότητας (Sabins, 1999).

#### 2.5.6 Εικόνες ταξινόμησης

Η πολυφασματική ταξινόμηση είναι μια εφαρμογή σε ηλεκτρονικό υπολογιστή για την εξαγωγή πληροφοριών όπου τα pixel χωρίζονται σε κατηγορίες, βάσει των όμοιων φασματικών ιδιοτήτων. Στη πολυφασματική ταξινόμηση που πραγματοποιείται υπό επιτήρηση, ο χρήστης ορίζει τις κατηγορίες που θα χρησιμοποιηθούν. Στη διαδικασία όπου δεν υπάρχει επιτήρηση, η κατηγοριοποίηση επιλέγεται από τον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Πολυφασματική ταξινόμηση χωρίς επιτήρηση εφαρμόστηκε στις ζώνες του θεματικού χαρτογράφου στην Εικόνα 2, με αποτέλεσμα τη δημιουργία 12 ομάδων. Αυτές οι κατηγορίες συγκεντρώθηκαν στις 6

ομάδες που δίδονται στην Εικόνα 3.Ε, με χρωματικές αποχρώσεις που δίνονται στο πιο κάτω πίνακα.

*Πίνακας 2. Επεξήγηση των χρωμάτων στην ταξινόμηση εικόνας από την περιοχή εξόρυξης του Goldfield.*

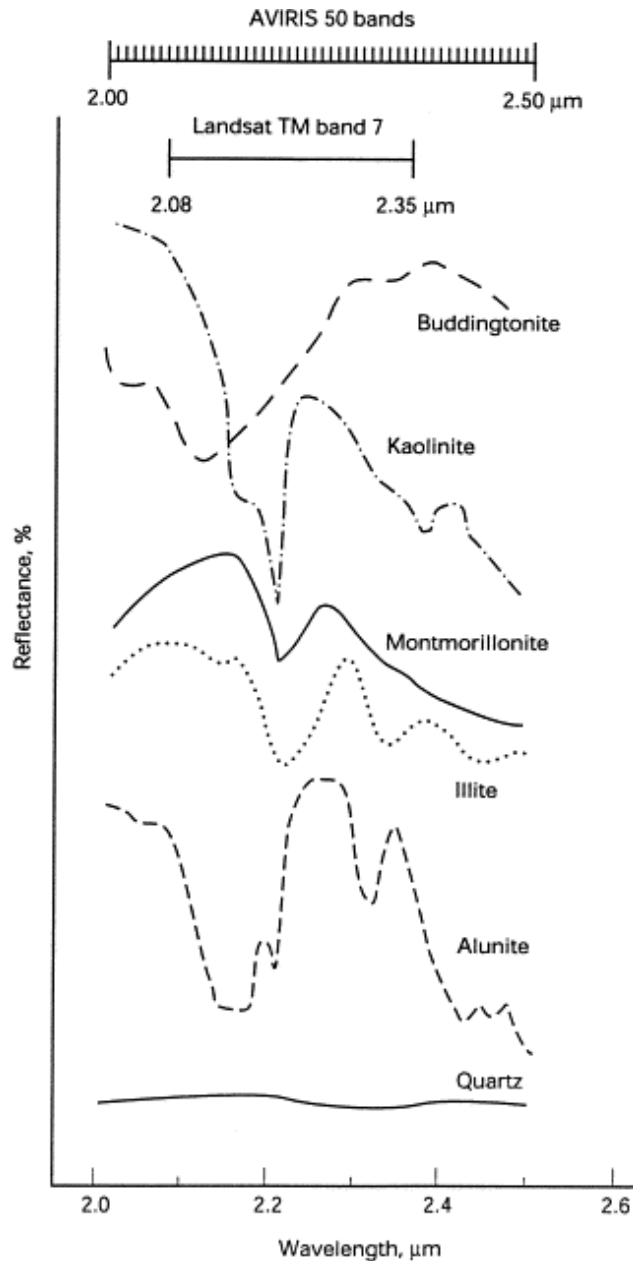
<b>Χρώμα</b>	<b>Ταξινόμηση</b>	<b>Ποσοστό εικόνας</b>
Κίτρινο	Αλλουβιακές αποθέσεις	39,2
Μπλε	Βασάλτης	14,0
Μωβ	Τέφρα	6,6
Κόκκινο	Αλλοιωμένα πετρώματα, Α	5,3
Πορτοκαλί	Αλλοιωμένα πετρώματα, Β	18,3
Πράσινο	Μη αλλοιωμένα πετρώματα	16,6

*Πηγή: Sabins, 1999.*

Προσδιορίστηκαν 2 τύποι αλλοιωμένων πετρωμάτων. Η κατηγορία Α, που δίδεται με κόκκινο χρώμα, αναφέρεται σε αλλοιωμένα πετρώματα, αλλά δεν καταδεικνύει την απόλυτη έκταση της αλλοίωσης. Η κατηγορία Β, που δίδεται με πορτοκαλί χρώμα, περιλαμβάνει όλα τα εναπομείναντα αλλοιωμένα πετρώματα, καθώς και μερικά εκτός της ζώνης αλλοίωσης. Ο βασάλτης (μπλε χρώμα), η ηφαιστειακή τέφρα( μωβ) και τα μη αλλοιωμένα πετρώματα (πράσινο) είναι εμφανώς ορισμένα. Οι αλλουβιακές αποθέσεις (κίτρινο) είναι ιδιαίτερος πιο εκτεταμένες στην εικόνα ταξινόμησης (3.Ε), παρά στον γεωλογικό χάρτη (Εικόνα 4). Η μελέτη του εδάφους και η σύγκριση με χρωματική απεικόνιση (Εικόνα 3.Α) καταδεικνύει ότι αρκετά μεγάλο τμήμα του υποστρώματος είναι καλυμμένο από συντρίμια και είναι σωστά προσδιορισμένα από τον υπολογιστή ως αλλουβιακές αποθέσεις (Sabins, 1999).

#### 2.5.7 Εντοπισμός υδροθερμικής αλλοίωσης σε υπερφασματικές εικόνες

Λόγω των εκτεταμένων ζωνών φάσματος, οι εικόνες από τον θεματικό χαρτογράφο δεν μπορούν να εντοπίσουν συγκεκριμένα μεταλλεύματα αλλοίωσης, όπως ιαροσίτη, αλουμινίτη και τα μεμονωμένα αργιλικά μεταλλεύματα. Τέτοιες ταυτοποιήσεις θα μπορούσαν να είναι χρήσιμες στη χαρτογράφηση των υδροθερμικών ζωνών. Αυτές οι λεπτομέρειες, μπορούν να ανακτηθούν από υπερφασματικούς σαρωτές.



Εικόνα 7. Εργαστηριακό φάσμα μεταλλευμάτων αλλοίωσης στη ζώνη 2.0 έως 2.5μm.

Πηγή: Sabins, 1999.

Η Εικόνα 7, δείχνει εργαστηριακό φάσμα συνηθισμένων μεταλλευμάτων αλλοίωσης σε ατμοσφαιρικό παράθυρο από 2,0 έως 2,5 μm και τις 50 φασματικές ζώνες καταγεγραμμένες από τον υπερφασματικό σαρωτή AVIRIS για αυτό το μεσοδιάστημα μηκών κύματος. Επίσης, δίνεται και η ανάλυση της Ζώνης 7 του θεματικού χαρτογράφου, για σύγκριση. Οι Van der Meer (1994, αναφέρεται στον Sabins, 1999), Kruse, (1996, αναφέρεται στον Sabins, 1999) και λοιποί έχουν

καταδειξεί ότι ο AVIRIS διαθέτει τη φασματική ανάλυση για τον εντοπισμό μεμονωμένων μεταλλευμάτων αλλοίωσης.

Στη συνέχεια, περιγράφονται εικόνες μέσω του AVIRIS που δείχνουν την πληθώρα και τη κατανομή συγκεκριμένων μεταλλευμάτων αλλοίωσης. Παρόλα αυτά, υπάρχουν 2 τεχνικές προκλήσεις σε σχέση με την δημιουργία τέτοιων εικόνων (Sabins, 1999):

- ❖ Μερικά μεταλλεύματα αλλοίωσης, κυρίως τα αργιλικά, έχουν παρόμοια φάσματα. Το βασικό χαρακτηριστικό ενσωμάτωσης κοντά στα 2,2μm εμφανίζεται σε ελαφρώς διαφορετικά μήκη κύματος για διαφορετικά αργιλικά ορυκτά και αλουμινίτη. Υπάρχουν επιπλέον δευτερεύοντα χαρακτηριστικά ενσωμάτωσης που βοηθούν τη διάκριση του φάσματος. Τα προγράμματα επεξεργασίας εικόνας μπορούν να εντοπίσουν το καταγεγραμμένο φάσμα για ένα συγκεκριμένο pixel σε εικόνα AVIRIS με τη σύγκριση της αναφοράς σε φάσματα γνωστών μεταλλευμάτων. Αυτή η διαδικασία είναι μια μορφή ταξινόμησης υπό επιτήρηση. Η διαδικασία είναι αποτελεσματική, αλλά μόνο σε περιπτώσεις σπάνιας εδαφικής σύνθεσης όπου εντοπίζεται μόνο ένα είδος μεταλλεύματος.
- ❖ Κάθε κελί εδαφικής ανάλυσης από τον AVIRIS τυπικά υπολογίζει 20 επί 20 μέτρα. Σε περιοχές με περίπλοκη γεωλογία, όπως το Goldfield, τα 400 τετραγωνικά μέτρα ενός κελιού, περιλαμβάνουν έναν αριθμό διαφορετικών μεταλλευμάτων. Το pixel που προκύπτει χαρακτηρίζεται μεικτό επειδή το φάσμα του είναι ένας συνδυασμός των φασμάτων από τα διάφορα μεταλλεύματα που απαρτίζουν το κελί της ανάλυσης. Αυτά τα ιδιαίτερα είδη μεταλλευμάτων ονομάζονται καθαροί φασματικοί στόχοι. Τα αμιγώς ψηφιακά προγράμματα χρησιμοποιούνται για την απόκτηση των φασμάτων από τους καθαρούς φασματικούς στόχους σε κάθε μεικτό pixel. Για κάθε μέταλλευμα, δημιουργείται μια λεπτομερής εικόνα καθαρού φασματικού στόχου που δείχνει την ανάλογη πληθώρα σε μέταλλευμα.



### 2.5.8 Εικόνες AVIRIS του Goldfield

Οι εικόνες του Goldfield προερχόμενες από τον υπερφασματικό σαρωτή AVIRIS, υπέστησαν ψηφιακή επεξεργασία. Η Εικόνα 3.F είναι μια εικόνα χρωματικής σύνθεσης από το συνδυασμό της πυκνότητας των καθαρών φασματικών στόχων ιλλίτη σε μπλε, αλουμινίτη σε πράσινο και καολινίτη σε κόκκινο. Η ασπρόμαυρη βάση είναι η Ζώνη 30 του AVIRIS. Τα βασικά χρώματα δείχνουν περιοχές με μεγάλη συγκέντρωση των συγκεκριμένων ορυκτών. Τα λοιπά χρώματα αφορούν τη συνύπαρξη μεταλλευμάτων καθαρών φασματικών στόχων. Το κίτρινο, για παράδειγμα, καταδεικνύει ένα μείγμα καολινίτη και αλουμινίτη. Ο καολινίτης (κόκκινο χρώμα) και ο ιλλίτης (πράσινο χρώμα) είναι τα μεταλλεύματα αλλοίωσης που εντοπίζονται σε μεγαλύτερη ποσότητα. Η διάταξή τους συμπίπτει με τον χάρτη αλλοίωσης της Εικόνας 4 που είχε διαμορφωθεί από την εδαφική χαρτογράφηση.

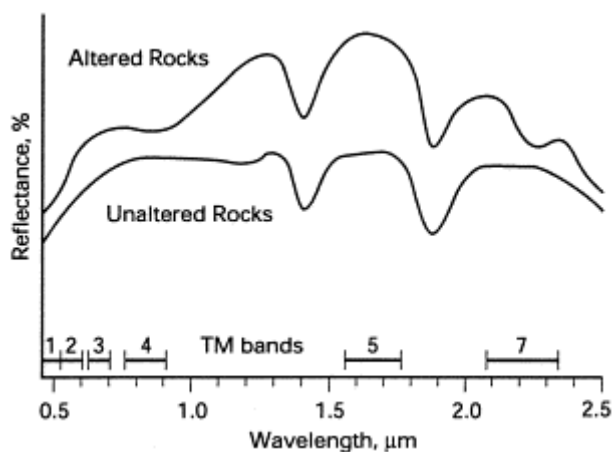
Η εικόνα AVIRIS καλύπτει το δυτικά 2/3 της αναλογικής εικόνας 5/7 του θεματικού χαρτογράφου που δίδεται στην Εικόνα 3.C. Η σύγκριση των εικόνων δίνει σημαντικές πληροφορίες. Το κίτρινο και κόκκινο χρώμα της αναλογικής εικόνας 5/7 του θεματικού χαρτογράφου δείχνει τη συνολική διασπορά των αργίλων και του αλουμινίτη. Τα χρώματα της εικόνας AVIRIS δείχνουν τη διασπορά μεμονωμένα των μεταλλευμάτων αλλοίωσης. Συνολικά, οι εικόνες του θεματικού χαρτογράφου δίνουν μια διευρυμένη απεικόνιση της υδροθερμικής αλλοίωσης, ενώ οι εικόνες AVIRIS δείχνουν τη διασπορά συγκεκριμένων μεταλλευμάτων αλλοίωσης (Sabins, 1999).

### 2.5.9 Λοιπά παραδείγματα εικόνων AVIRIS

Η περιοχή Cuprite, 25 χιλιόμετρα νότια του Goldfield, αποτελείται από ηφαιστειακά πετρώματα που έχουν μεταβληθεί έντονα σε διοξείδιο του πυριτίου, σπάλιο και άργιλο. Δεν εντοπίζονται συγκεκριμένα αποθέματα μεταλλευμάτων, αλλά η περιοχή έχει χρησιμοποιηθεί επί μακρόν για δοκιμές στη τηλεπισκόπηση. Οι Goetz και Srivastava (1985, αναφέρονται στον Sabins, 1999), ανέλυσαν υπερφασματικές εικόνες με ένα σύστημα προγενέστερο του AVIRIS. Εντόπισαν φάσματα ποικίλων ορυκτών αργίλου κι επιπλέον άστριο που είχε εντοπιστεί και παλαιότερα στο Cuprite. Η Εικόνα 7 δείχνει το διακριτικό φάσμα του άστριου. Το άστριο συνδέεται με υδροθερμικά αλλοιωμένα πετρώματα σε πολλές περιοχές των δυτικών Η.Π.Α (Krohn et al., 1993, αναφέρονται στον Sabins, 1999).

Οι Crosta et al. (1998, αναφέρονται στον Sabins, 1999), ανέλυσαν εικόνες AVIRIS από την περιοχή εξόρυξης του Bodie στην ανατολική Καλιφόρνια, που υπήρξε σημαντικό σημείο εξόρυξης χρυσού και ασημιού στο δεύτερο μισό του 19<sup>ου</sup> αιώνα. Οι βραχώδεις μάζες υποδοχής βρίσκονται ενδιάμεσα των ηφαιστειακών πετρωμάτων. Ο χρυσός εμφανίζεται σε φλέβες χαλαζία και αποθέσεις που σχετίζονται με υδροθερμικά αλλοιωμένα πετρώματα. Η περιοχή του πυριτίου στο κέντρο περιβάλλεται από ζώνες καλίου, περιοχές αλλοίωσης αργίλου και σερισίτη και μια εξωτερική ζώνη αλλοίωσης προπυλίτη. Τα δεδομένα από τον AVIRIS, επεξεργάστηκαν μέσω αλγορίθμων που ταξινομήσαν τα φάσματα εικόνας και τα σύγκριναν με τα σύγκριναν με τα καταγεγραμμένα φάσματα. Ο χάρτης που προέκυψε δείχνει τη κατανομή 3 ξεχωριστών μεταλλευμάτων, τεσσάρων ορυκτών αργίλου, καθώς και μοσχοβίτη (Sabins, 1999).

Τα φάσματα των ορυκτών αλλοίωσης (Εικόνες 5.A, 6.A και 7) καταγράφηκαν στο εργαστήριο με τη χρήση καθαρών μετάλλων. Οι εικόνες από τη τηλεπισκόπηση καταγράφουν στοιχεία από διαβρωμένες εναποθέσεις που είναι μείγματα από πετρώματα και μεταλλεύματα μαζί με χρώμα και βλάστηση. Παρά αυτές τις δυσκολίες, οι ψηφιακά επεξεργασμένες εικόνες δίνουν μια ακριβή εικόνα του βαθμού αλλοίωσης στη περιοχή του Goldfield. Στη προσπάθεια να καλυφθεί το κενό μεταξύ του εργαστηρίου και της υπαίθρου, οι Rowan et al. (1979, αναφέρονται από τον Sabins, 1999), χρησιμοποίησαν ένα φορητό φασματοόμετρο στην ύπαιθρο για να καταγράψουν φάσματα πολλών εκατοντάδων αντιπροσωπευτικών εναποθέσεων αλλοιωμένων και μη πετρωμάτων στη περιοχή του Goldfield. Η Εικόνα 8, συνοψίζει τα αποτελέσματά τους σε καμπύλες μέσης ανακλαστικότητας για αλλοιωμένες και μη εναποθέσεις.



Εικόνα 8. Υπαίθρια φάσματα αλλοιωμένων και μη πετρωμάτων στη περιοχή εξόρυξης του Goldfield.

Πηγή: Sabins, 1999.

Οι καμπύλες αυτές υπολείπονται της φασματικής λεπτομέρειας των καμπυλών προερχόμενων από το εργαστήριο, αλλά οι διαφορές μεταξύ αλλοιωμένων και μη πετρωμάτων διαφαίνονται καθαρά. Τα αλλοιωμένα πετρώματα έχουν σαφώς χαμηλότερη ανάκλαση στη Ζώνη 7 από ότι στη Ζώνη 5. Τα μη αλλοιωμένα πετρώματα έχουν παρόμοιες τιμές σε αυτές τις Ζώνες. Στο ορατό κομμάτι του φάσματος, τα αλλοιωμένα πετρώματα έχουν μεγαλύτερη κόκκινη ανάκλαση, εξαιτίας των υδροθερμικών μεταλλευμάτων σιδήρου. Αυτό το πεδίο φασμάτων υποστηρίζει τη χρήση των αναλογιών 5/7 και 3/1 του θεματικού χαρτογράφου για τον εντοπισμό των μεταλλευμάτων αλλοίωσης (Sabins, 1999).

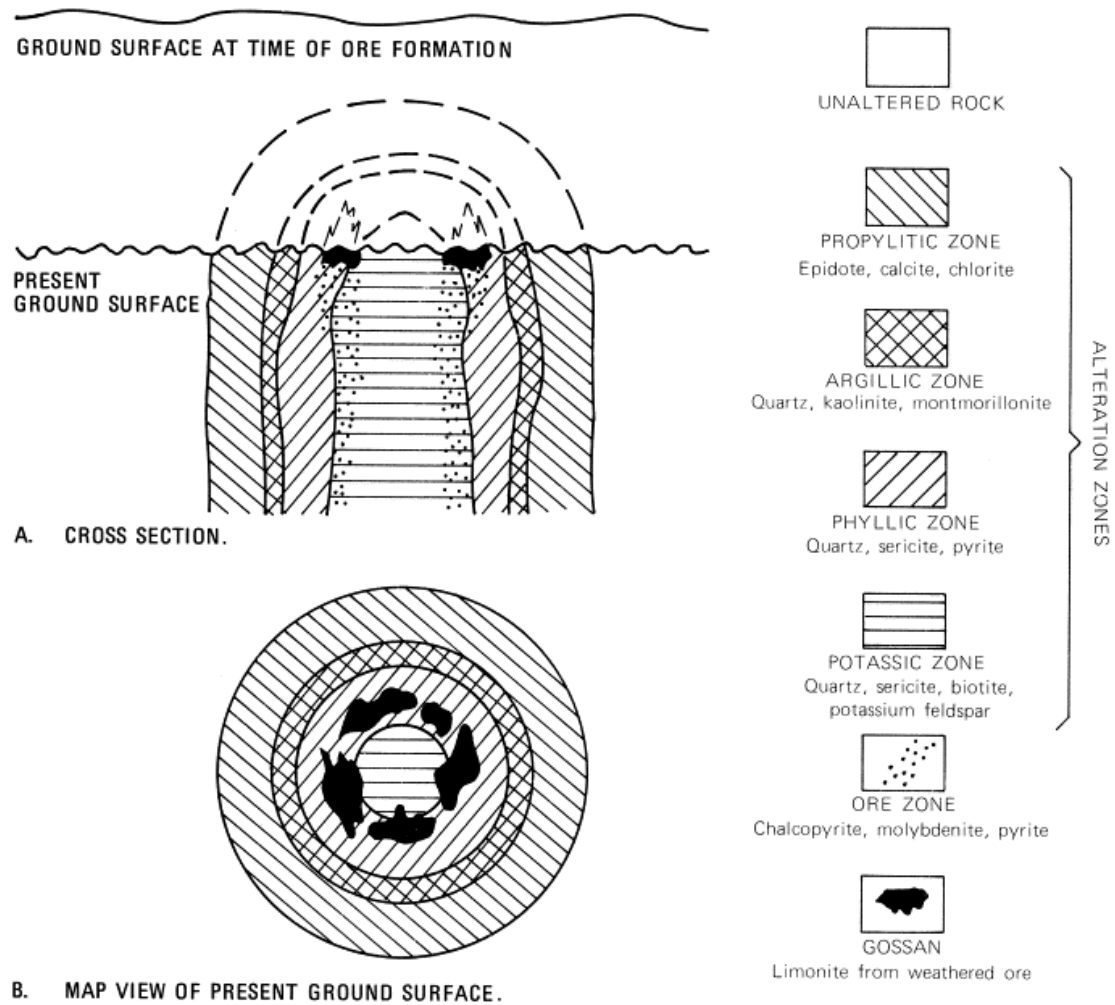
## 2.6 Χαρτογράφηση υδροθερμικής αλλοίωσης σε εναποθέσεις πορφυρίτη και χαλκού - Collahuasi, Χιλή

Το μεγαλύτερο ποσοστό χαλκού εξάγεται από εναποθέσεις πορφυρίτη, που εμφανίζονται σε διαφορετικά γεωλογικά περιβάλλοντα σε κοιτάσματα τύπου Goldfield. Η υδροθερμική αλλοίωση είναι, επίσης, κοινή σε αποθέματα πορφυρίτη και μπορεί να εντοπιστεί με τις μεθόδους που εφαρμόστηκαν στο Goldfield.

### 2.6.1 Μοντέλο αλλοίωσης

Η Εικόνα 9 είναι μια απεικόνιση της υδροθερμικής αλλοίωσης αποθεμάτων πορφυρίτη και χαλκού που δημιουργήθηκε από τους Lowell και Guilbert (1970, αναφέρονται στον Sabins, 1999). Η πιο έντονη αλλοίωση εμφανίζεται στο πυρήνα της

περιοχής του πορφυρίτη και φθίνει σταδιακά προς τα έξω με μια σειρά ομόκεντρων ζωνών που περιγράφονται στη συνέχεια.



Εικόνα 9. Μοντέλο ζωνών υδροθερμικής αλλοίωσης που σχετίζεται με αποθέματα πορφυρίτη και χαλκού.

Πηγή: Sabins, 1999.

→ Ζώνη καλίου: περιλαμβάνει τα πιο έντονα αλλοιωμένα πετρώματα του πυρήνα. Χαρακτηριστικά μεταλλεύματα είναι ο χαλαζίας, ο σερικίτης, ο βιοτίτης, το άστριο και το κάλιο. Τα φάσματα ανάκλασης του βιοτίτη και του σεριτίτη έχουν ελάχιστη απορρόφηση στη Ζώνη 7 του θεματικού χαρτογράφου, παρόμοια με τα φάσματα των αργίλων. Η αναλογία 5/7 του

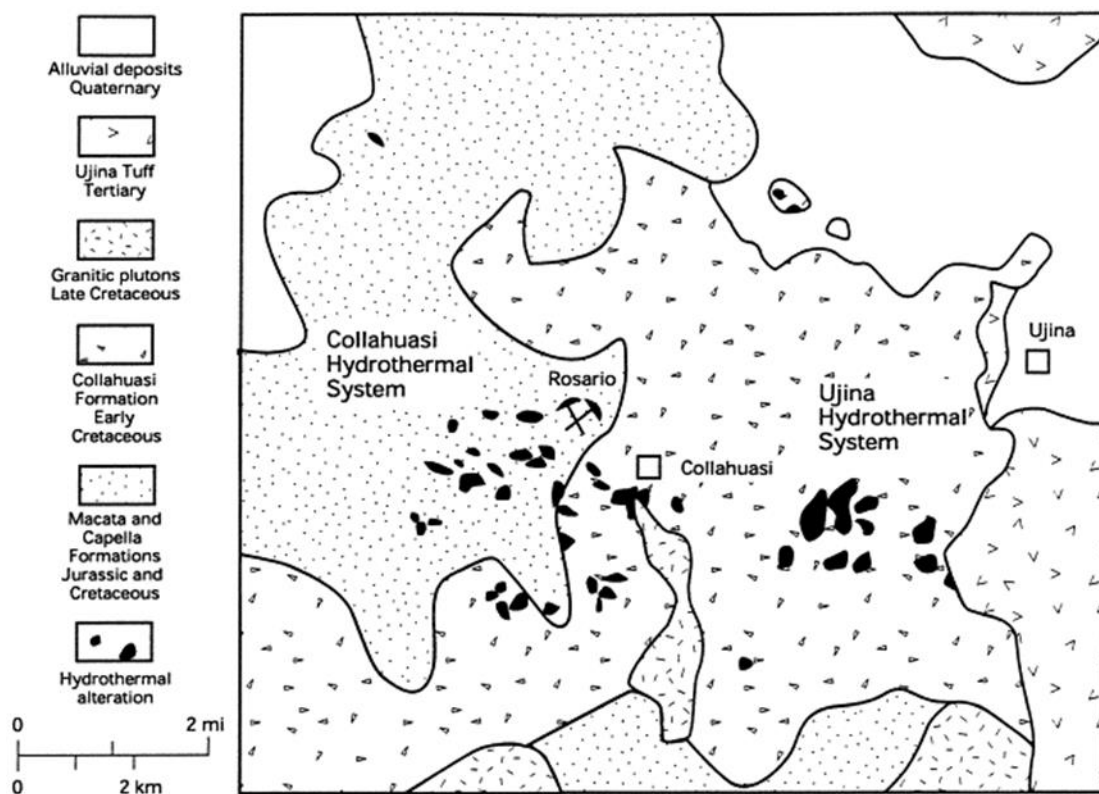
- θεματικού χαρτογράφου είναι αποτελεσματική στον εντοπισμό αυτών των μαρμαρυγών, που έχουν φάσματα ανάκλασης παρόμοια με αυτά των αργίλων.
- Φυλλική ζώνη: περιλαμβάνει χαλαζία, σεριτίτη και σιδηροπυρίτη.
  - Μεταλλευτική ζώνη: περιέχει διάχυτους κόκκους χαλκοπυρίτη, μολυβδαινίτη, σιδηροπυρίτη και άλλων θειούχων μετάλλων. Αρκετή ποσότητα του μεταλλεύματος εμφανίζεται σαν ένα κυλινδρικό κέλυφος κοντά στα όρια ανάμεσα της ζώνης καλίου και της φυλλικής ζώνης. Ο χαλκός, γενικώς, αποτελείται από 1% ή λιγότερο από το πέτρωμα, αλλά η μεγάλη ποσότητα του ορυκτού είναι κατάλληλη για την εξόρυξη μέσω ανοιχτής τάφρου. Στα σημεία όπου η ορυκτή ζώνη είναι εκτεθειμένη από τη διάβρωση, το πυρίτιο οξειδώνεται και δημιουργείται μια κόκκινη προς καφέ σιδηρούχα κρούστα. Οι κρούστες αυτές είναι χρήσιμοι δείκτες για τα υποδόρια αποθέματα μεταλλευμάτων, αν και δεν συνδέονται πάντα με αποθέματα ορυκτών.
  - Ζώνη αργίλου: ο χαλαζίας, ο καολινίτης και ο μοντμοριλλονίτης είναι χαρακτηριστικά ορυκτά της ζώνης αργίλου σε αποθέματα πορφυρίτη, καθώς σχετίζονται με την αργιλική ζώνη στο Goldfield, αλλά και αλλού.
  - Ζώνη προπυλίτη: ασβεστίτης και χλωρίτης εμφανίζονται σε αυτά τα ελαφρώς αλλοιωμένα πετρώματα. Η προπυλιτική αλλοίωση έχει μικρή έκταση κι έχει μικρή βαρύτητα σε σχέση με την μελέτη ορυκτών.

Ελάχιστα κοιτάσματα πορφυρίτη έχουν τη συμμετρία και την ολότητα του μοντέλου της Εικόνας 9. Δομική παραμόρφωση, διάβρωση κι εναποθέσεις συχνά καλύπτουν μεγάλα ποσοστά του συστήματος. Παρόλα αυτά, ο εντοπισμός μικρών τμημάτων αλλοιωμένων πετρωμάτων σε εικόνες μέσω τηλεπισκόπησης μπορεί να είναι βασικός παράγοντας συμπερασμάτων (Sabins, 1999).

#### 2.6.2 Γεωλογικό κι ερευνητικό υπόβαθρο

Η περιοχή εξόρυξης του Collahuasi, βρίσκεται στη βόρεια Χιλή, 180 χιλιόμετρα νοτιοανατολικά της πόλης του Iquique. Η περιοχή εκτείνεται εντός μιας ζώνης αποθεμάτων πορφυρίτη, με πορεία προς τα βόρεια που περιλαμβάνει σημαντικά ορυχεία στις πόλεις El Teniente, Disputada, El Salvador, Escondida και Chuquicamata. Η περιοχή του Collahuasi οριοθετείται από τα δυτικά από ένα εκτενές περιφερειακό σύστημα ρωγμών το οποίο διέρχεται και το λατομείο του Chuquicamata. Η Εικόνα 10 είναι ένας γεωλογικός χάρτης που δείχνει τη κατανομή

των σχηματισμών Macata, Capella και Collahuasi, από την Ιουρασική και τη Κρητιδική περίοδο. Σε αυτά τα υπαίθρια πετρώματα έχουν παρεισφρήσει αποθέματα γρανίτη από τη Κρητιδική έως τη Τριτογενή περίοδο που είναι ξενιστές για τις εναποθέσεις πορφυρίτη.



Εικόνα 10. Γεωλογικός χάρτης της περιοχής εξόρυξης του Collahuasi. Οι ανωμαλίες από τις υδροθερμικές αλλοιώσεις έχουν επεξεργαστεί από απεικονίσεις αναλογιών Landsat.

Πηγή: Sabins, 1999.

Η μεταλλευτική παραγωγή στη περιοχή του Collahuasi ξεκίνησε στις αρχές του 1800 όταν εξάχθηκε χαλκός από φλέβες στο Rosario, ενώ δεν ήταν γνωστή η σύνδεση με το σύστημα πορφυρίτη. Κατά τη δεκαετία του 1930, αυτές οι φλέβες ήταν οι τρίτες μεγαλύτερες παραγωγές χαλκού στη Χιλή. Η σύγχρονη έρευνα ξεκίνησε το 1976 όταν η κοινοπραξία της Superior Oil και της Falconbridge, απέκτησε τη περιοχή του Collahuasi. Η κοινοπραξία, ανακάλυψε αποθέματα πορφυρίτη στο Rosario. Το 1985, η ιδιοκτησία άλλαξε με την είσοδο και της Chevron. Από το 1985 έως τις αρχές του 1991, οι έρευνες στόχευαν στην εκτίμηση των αποθεμάτων του Rosario, που αποτελεί, όμως, μικρό τμήμα του Collahuasi. Υπήρχαν ενδείξεις από άλλα

μεταλλευτικά κέντρα εντός της περιοχής, αλλά οι γεωλογικές πληροφορίες ήταν ανεπαρκείς και χρειαζόταν επιπλέον έρευνα (Sabins, 1999).

### 2.6.3 Τηλεπισκόπηση

Το Ερευνητικό Κέντρο Τηλεπισκόπησης του Chevron επεξεργάστηκε δορυφορικές εικόνες από την περιοχή του Collahuasi και παρακείμενων περιοχών. Η Βόρεια Χιλή είναι ιδανική για τέτοιου είδους έρευνες, διότι η βλάστηση, το χώμα και τα σύννεφα απουσιάζουν από το άνυδρο περιβάλλον των Άνδεων. Οι Ζώνες Landsat 2-4-7 συνδυάστηκαν σε μπλε, πράσινο και κόκκινο για να δημιουργηθεί μια εικόνα που είναι ιδανική για γεωλογική κατανόηση σε αυτό το άνυδρο έδαφος. Μια πανχρωματική εικόνα SPOT αναμίχθηκε με μια εικόνα του θεματικού χαρτογράφου ώστε να παραχθεί η Εικόνα 11.



*Εικόνα 11. Περιοχή εξόρυξης του Collahuasi. Οι Ζώνες Landsat δίδονται σε κόκκινο, πράσινο και μπλε αναμεμιγμένες με πανχρωματική απεικόνιση SPOT.*

*Πηγή: Sabins, 1999.*

Εικόνες με αναλογία 3/1 και 5/7 από το θεματικό χαρτογράφο, δημιουργήθηκαν με τη χρήση των μεθόδων που εφαρμόστηκαν στο Goldfield. Οι αναλογικές εικόνες μελετήθηκαν για τον εντοπισμό περιοχών με υψηλή συγκέντρωση ορυκτών οξειδίου του σιδήρου, αργίλου και αλουμινίτη. Αυτές οι περιοχές, αποκαλούμενες ως

ανωμαλίες, σχεδιάστηκαν για τη δημιουργία προκαταρκτικού χάρτη. Οι ανωμαλίες από τον θεματικό χαρτογράφο εκτιμήθηκαν για να εξαλειφθούν οι ανωμαλίες.

Υπάρχουν τριών ειδών ανωμαλίες:

- Ιζηματογενή πετρώματα, όπως ο σχιστόλιθος, που είναι πλούσια σε άργιλο.
- Πετρώματα με καθαρά ερυθρό χρώμα, όπως τα σιδηρούχα ηφαιστειογενή πετρώματα και τα υποστρώματα ερυθρών σχιστόλιθων.
- Διάβρωση από εκτεθειμένα, αλλοιωμένα πετρώματα. Αυτές οι πρόσφατες αλλουβιακές αποθέσεις και τα κανάλια μπορεί να υποδεικνύουν την εγγύτητα σε αλλοιωμένα πετρώματα.

Οι επεξεργασμένες ανωμαλίες φαίνονται με μαύρο χρώμα στην Εικόνα 10. Ένα κυκλικό σύμπλεγμα ανωμαλιών, με διάμετρο πάνω από 6 χιλιόμετρα, εμφανίζεται νότια και δυτικά του Collahuasi και του Rosario και ονομάζεται Υδροθερμικό Σύστημα του Collahuasi. Οι εναποθέσεις του Rosario, με διάμετρο 1,5 χιλιόμετρα, καταλαμβάνουν μόνο ένα μικρό ποσοστό του βόρειου τμήματος του συστήματος. Το υπόλοιπο μέρος του Υδροθερμικού Συστήματος του Collahuasi, παραμένει ανεξερεύνητο.

Ένα δεύτερο σύμπλεγμα ανωμαλιών, με πλάτος 3 χιλιόμετρα, εμφανίζεται νοτιοδυτικά της Ujina και ονομάζεται Υδροθερμικό Σύστημα της Ujina. Στη περιοχή αυτή, έχει εντοπιστεί δευτερεύουσας σημασίας αλλοίωση, αλλά δεν έχει εξεταστεί σε μεγάλη έκταση στο παρελθόν. Η αλλοίωση που φαίνεται στις αναλογικές εικόνες είναι πιο εκτεταμένη από αυτήν που είχε εντοπιστεί παλαιότερα (Sabins, 1999).

#### 2.6.4 Γεωφυσικές χαρτογραφήσεις

Προκειμένου να εκτιμηθούν οι ανωμαλίες που εντοπίστηκαν μέσω των εικόνων LANDSAT, πραγματοποιήθηκαν γεωφυσικές χαρτογραφήσεις. Οι Dick et al. (1993, αναφέρονται στον Sabins, 1999) παρέχουν λεπτομέρειες των σχηματισμών και αποτελέσματα από γεωφυσικές χαρτογραφήσεις. Όλη η περιοχή καλύφθηκε από ένα αερομαγνητικό χαρτογράφο, μεταφερόμενο από ελικόπτερο που κατέγραψε τις γεωλογικές δομές και τη διάταξη των μαγνητικών μεταλλευμάτων. Ο αερομαγνητικός χάρτης δείχνει ότι τα υδροθερμικά συστήματα του Collahuasi και της Ujina είναι τοποθετημένα σε διασταυρώσεις των βασικών ρωγμών με τάση προς βορειοανατολικά και βορειοδυτικά. Το σύστημα της Ujina, έχει ένα κυκλικό χείλος



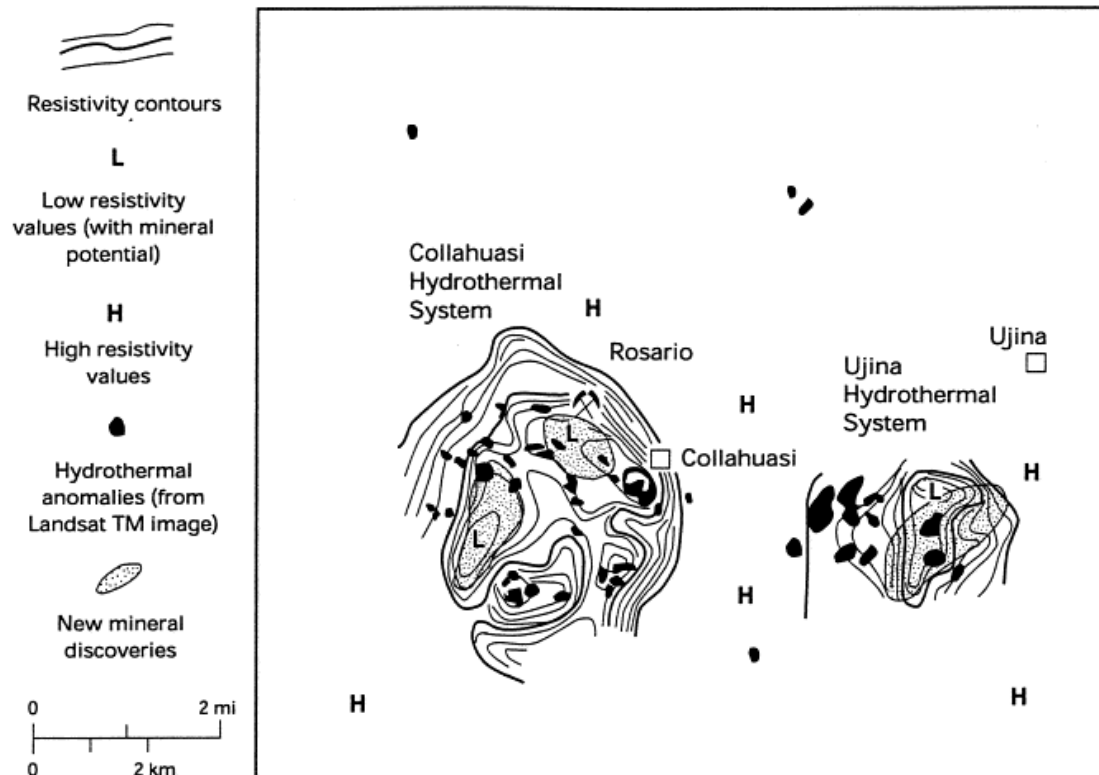
υψηλών μαγνητικών τιμών που γίνεται αντιληπτό σαν ένα ορυκτό κέλυφος εντός του αποθέματος πορφυρίτη, παρόμοιο με αυτό που δίδεται στο μοντέλο πορφυρίτη (Εικόνα 9).

Ένας χαρτογράφος εδάφους καταμέτρησε την αντίσταση των πετρωμάτων. Τα μη αλλοιωμένα πετρώματα, γενικά, έχουν υψηλές αντιστάσεις. Τα μεταλλικά ορυκτά, όπως τα σουλφίδια του χαλκού, παρουσιάζουν μειωμένη αντίσταση. Για αυτό το λόγο, τα μεταλλευτικά πετρώματα έχουν χαμηλή αντίστασης.

Η Εικόνα 12 είναι ένας τοπογραφικός χάρτης με καταγραφή της αντίστασης στην ίδια κλίμακα με την Εικόνα 11 και τον χάρτη της Εικόνας 10. Οι ψηλές τιμές αντίστασης φαίνονται με το γράμμα H και οι χαμηλές με L.

Τα αποτελέσματα της χαρτογράφησης της αντίστασης είναι εξαιρετικά. Κυκλικοί σχηματισμοί χαμηλών τοπογραφικών αντοχών, εμφανίζονται τόσο στο υδροθερμικό σύστημα του Collahuasi, όσο και στην Ujina. Αυτοί οι σχηματισμοί είναι ανάλογοι με τους τυπικούς σχηματισμούς των αποθεμάτων πορφυρίτη. Στο Collahuasi, ο σχηματισμός της αντίστασης έχει διάμετρο 5 χιλιόμετρα. Οι χαμηλότερες τιμές δημιουργούν οριακό χείλος που μπορεί να αντιπροσωπεύει το ορυκτό κέλυφος του μοντέλου πορφυρίτη. Η πολύ χαμηλή αντίσταση στο Collahuasi γίνεται αντιληπτή ως μια εκτεταμένη ανάπτυξη μιας φλέβας ορυκτοποίησης.

Το υδροθερμικό σύστημα της Ujina έχει έναν κυκλικό σχηματισμό τοπογραφικής αντίστασης με διάμετρο 3 χιλιόμετρα. Το ανατολικό τμήμα της περιοχής αντίστασης είναι καλυμμένο από τέφρα μεταγενέστερη της υδροθερμικής δραστηριότητας. Οι ανωμαλίες που εντοπίστηκαν μέσω Landsat συμπίπτουν με το εκτεθειμένο δυτικό τμήμα του συστήματος (Sabins, 1999).



Εικόνα 12. Τοπογραφικός χάρτης τιμών αντίστασης, περιοχή εξόρυξης του Collahuasi. H- υψηλές τιμές, L- χαμηλές τιμές. Οι υδροθερμικές ανωμαλίες έχουν επεξεργαστεί μέσω αναλογικών εικόνων Landsat.

Πηγή: Sabins, 1999.

### 2.6.5 Ανακαλύψεις Ορυκτών

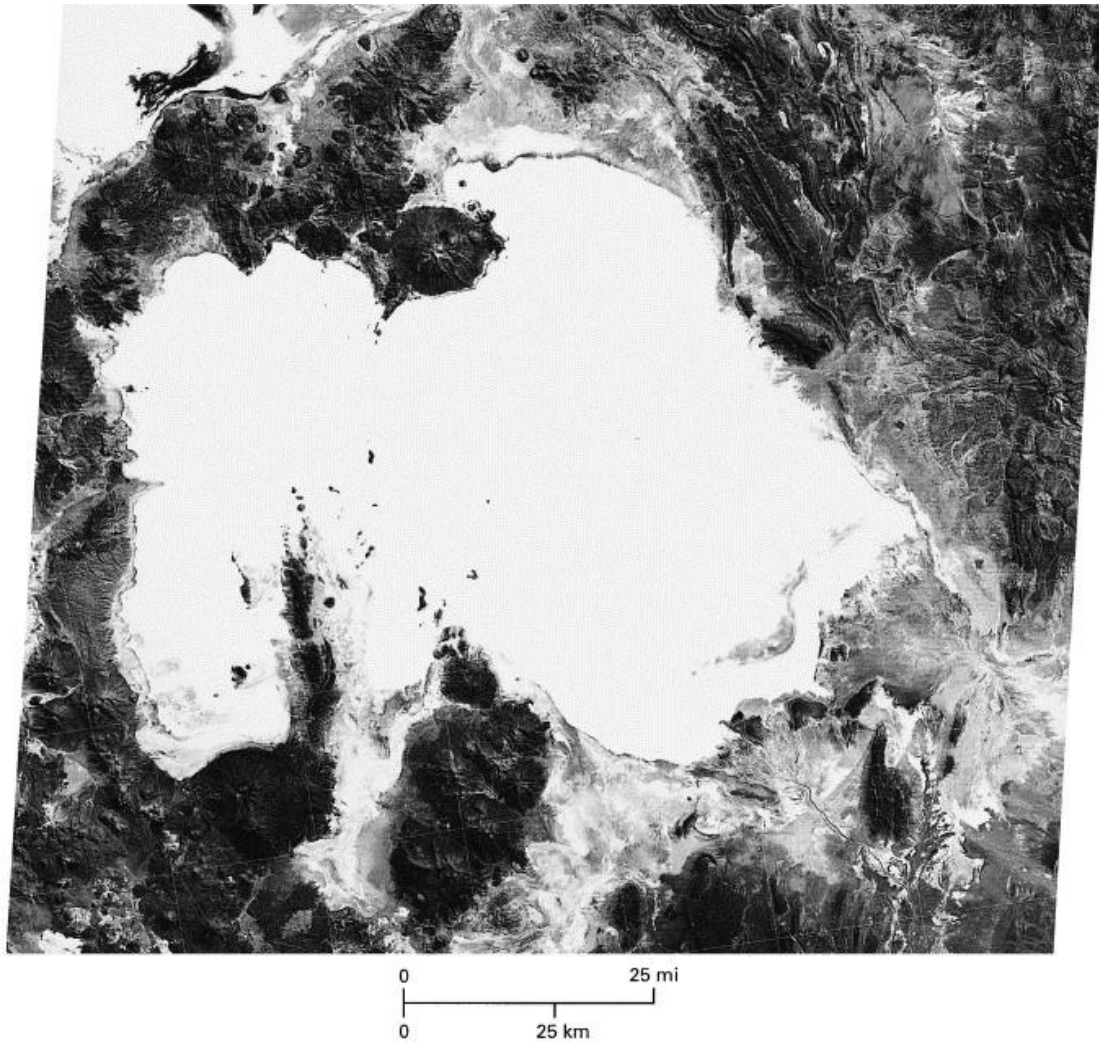
Για την εκτίμηση των υδροθερμικών συστημάτων που είχαν οριστεί από τη τηλεπισκόπηση και τις γεωφυσικές έρευνες, έγιναν γεωτρήσεις. Οι αρχικές γεωτρήσεις εξέτασαν τις χαμηλές τιμές αντίστασης στο Rosario, στο βόρειο χείλος του συστήματος στο Collahuasi, όπου εντοπίστηκαν ζώνες δομικά ελεγχόμενες από χάλκινη ορυκτοποίηση. Αυτά τα αποτελέσματα οδήγησαν στην ανακάλυψη 2 βασικών ορυκτών κορμών στο σύστημα του Collahuasi που αναπαριστώνται με κουκίδες στην Εικόνα 12.

Στην Ujina, η γεώτρηση στο τμήμα αντοχής αποκάλυψε ένα νέο απόθεμα πορφυρίτη που στην Εικόνα 12 αναπαριστάται στα τμήματα με κουκίδες. Το βασικό ορυκτό κοίτασμα βρίσκεται πάνω από δευτερεύον ορυκτό κοίτασμα. Μέχρι το 1993, οι γεωτρήσεις είχαν εκθέσει πάνω από 15 εκατομμύρια τόνους εμπλουτισμένου ορυκτού με ποσοστό 1,8% σε χαλκό.

Στο τέλος του 1992, η εταιρεία Chevron αποφάσισε να πουλήσει τις μεταλλευτικές της εκτάσεις με σκοπό να εστιάσει στη παραγωγή ενέργειας. Η εταιρεία πούλησε το 1/3 της έκτασης του Collahuasi που κατείχε στην εταιρεία Minorco έναντι 190 εκατομμυρίων δολαρίων. Η συνολική επένδυση της Chevron στη περιοχή, εκτιμάται στα 23 εκατομμύρια δολάρια. Η τηλεπισκοπική εργασία που συνέβαλλε σημαντικά στην αυξανόμενη αξία της περιοχής, κόστισε λιγότερο από 50 χιλιάδες δολάρια. Το 1995, η Minorco και η Falconbridge αγόρασαν το 1/3 της Shell έναντι 195 εκατομμυρίων δολαρίων. Η Minorco και η Falconbridge δαπάνησαν 1,3 δισεκατομμύρια δολάρια προκειμένου η περιοχή εξόρυξης του Collahuasi να καταστεί ανάμεσα στις πρώτες σε εξόρυξη χαλκού παγκοσμίως. Η παραγωγή ξεκίνησε στο τέλος του 1998 και θα διαρκέσει 45 χρόνια. Το απόθεμα χαλκού που παράγεται ανέρχεται σε 14 εκατομμύρια τόνους, που σε τιμές του 1994, αποτιμάται σε 36,4 δισεκατομμύρια δολάρια. Ο ρόλος της τηλεπισκόπησης ήταν σημαντικός στην ανάδειξη της περιοχής (Sabins, 1999).

## 2.7 Ορυκτά βόριου- Salar de Uyuni, Βολιβία

Το βόριο και οι χημικές του ενώσεις εμφανίζονται ως ορυκτά βόριου στη κρούστα και στην άλμη συγκεκριμένων εναποθέσεων και στις σύγχρονες αποξηραμένες λίμνες αλμυρού νερού, που στα Ισπανικά ονομάζονται salars. Η Εικόνα 13, είναι μια απεικόνιση από θεματικό χαρτογράφο του Salar de Uyuni στη νοτιοδυτική Βολιβία, η οποία αποτελεί τη μεγαλύτερη περιοχή salar με έκταση 10.000 τετραγωνικών χιλιομέτρων. Η περιοχή είναι γνωστό ότι περιλαμβάνει μεταλλεύματα βόριου, αλλά τα ορυκτά αποθέματα και οι οικονομικές δυνατότητες δεν έχουν εκτιμηθεί πλήρως. Ο Risacher(1989, αναφέρεται στον Sabins, 1999), ανέλυσε δείγματα άλμης από 68 ρηχές οπές και προετοίμασε έναν χάρτη με τη συγκέντρωση βόριου που δίνεται στην Εικόνα 14. Εάν οι οπές ήταν ομοιόμορφα κατανεμημένες στη περιοχή κάθε μια θα αντιπροσώπευε 147 τετραγωνικά χιλιόμετρα, που αποτελεί αραιή δειγματοληψία. Ο Landsat, όμως, καλύπτει με περισσότερα από 1 εκατομμύρια κελιά ανάλυσης που το καθένα αντιπροσωπεύει  $9 \times 10^{-4}$  τετραγωνικά χιλιόμετρα. Η βολιβιανή κυβέρνηση συμφώνησε με την εταιρεία Intercontinental Resources, ώστε να επιτελεστεί εκτίμηση Landsat στη περιοχή του Salar.

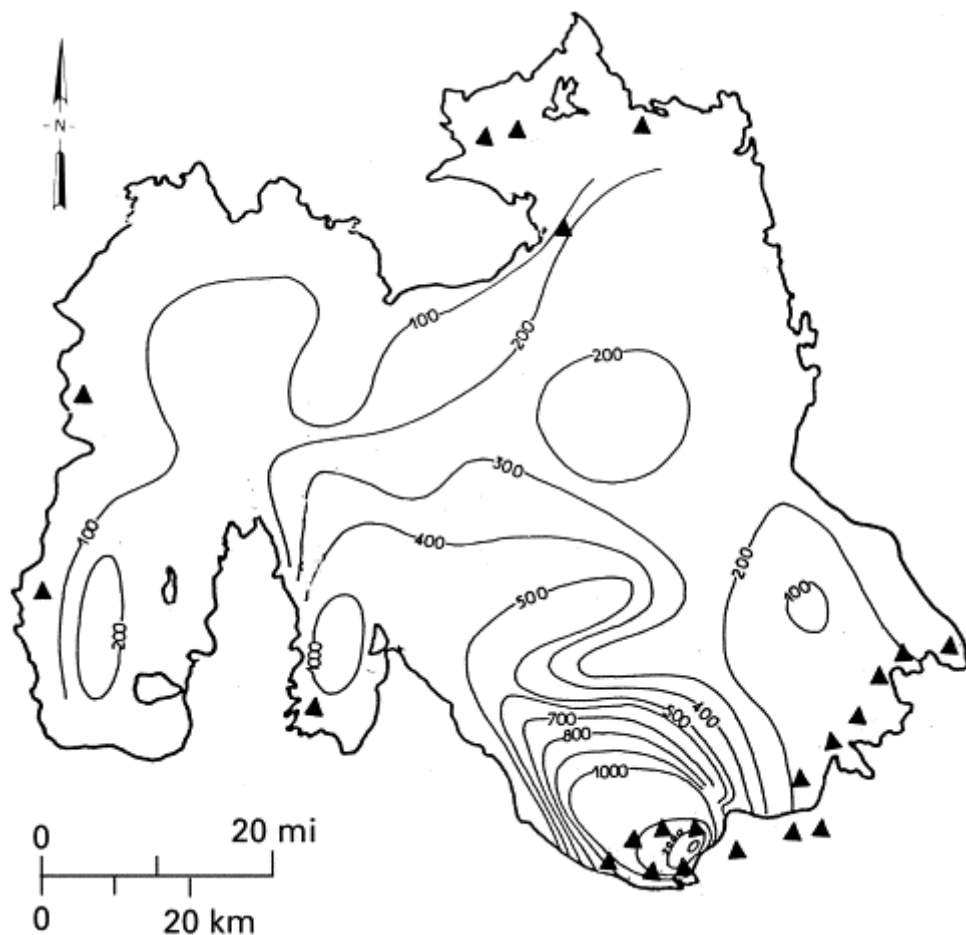


*Εικόνα 13. Απεικόνιση Landsat Ζώνης 4 της περιοχής Salar de Uyuni, νοτιοδυτική Βολιβία.*

*Πηγή: Sabins, 1999.*

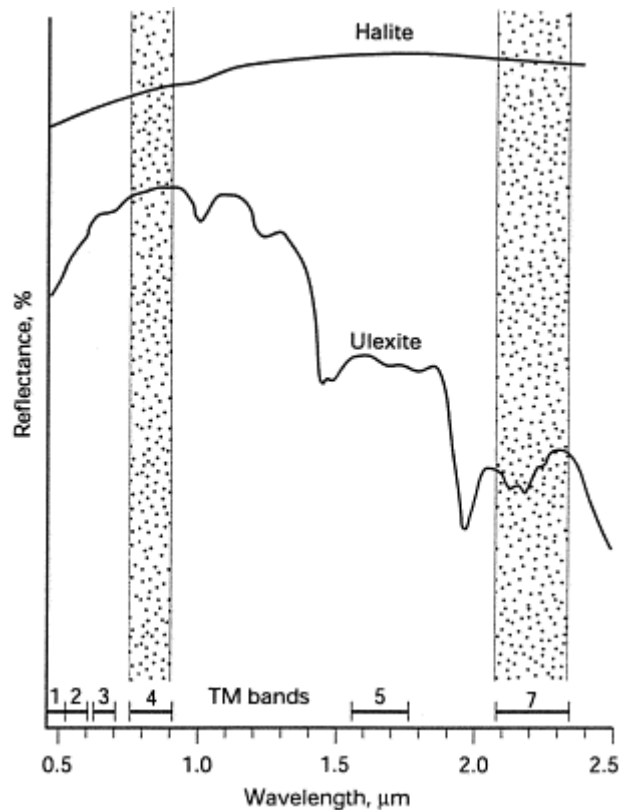
Το βασικό ζήτημα σχετικά με την εκτίμηση ήταν το κατά πόσο τα ορυκτά βόριου στην κρούστα του Salar είχαν φασματικά χαρακτηριστικά που θα μπορούσαν να εντοπιστούν στα δεδομένα του θεματικού χαρτογράφου. Η Εικόνα 15 δείχνει την φασματική ανάκλαση του ουλεξίτη που είναι βασικό ορυκτό βόριου στο Salar. Η ίδια εικόνα, επίσης, δείχνει τα φάσματα αλίτη ή ορυκτού άλατος, που συγκροτεί περισσότερο από 90% της κρούστας. Η αναλογική εικόνα 4/7 του θεματικού χαρτογράφου θα έπρεπε να έχει υψηλές τιμές για τον ουλεξίτη και χαμηλές για τον αλίτη. Δημιουργήθηκε μια εικόνα αναλογίας 4/7 και η πυκνότητα κατατιμήθηκε ώστε να τονισθούν οι υψηλότερες τιμές αναλογίας που αναπαριστώνται με τρίγωνα στο χάρτη (Εικόνα 14). Οι υψηλότερες τιμές αναλογίας συσχετίζονται με τους

σχηματισμούς της υψηλότερης συγκέντρωσης σε βόριο σε έναν κόλπο στο νότιο τμήμα του Salar. Επιπλέον τρίγωνα στη γύρω περιοχή του Salar καταδεικνύουν τη πιθανή ύπαρξη αποθεμάτων βόριου που δεν ανιχνεύτηκαν από το δειγματοληπτικό πρόγραμμα (Sabins, 1999).



Εικόνα 14. Χάρτης του Salar de Uyuni. Τα τρίγωνα δείχνουν υψηλές τιμές αναλογίας 4/7 θεματικού χαρτογράφου που συσχετίζονται με υψηλή συγκέντρωση ουλεξίτη. Οι σχηματισμοί δείχνουν συγκέντρωση βόριου κοντά στην επιφάνεια.

Πηγή: Sabins, 1999.



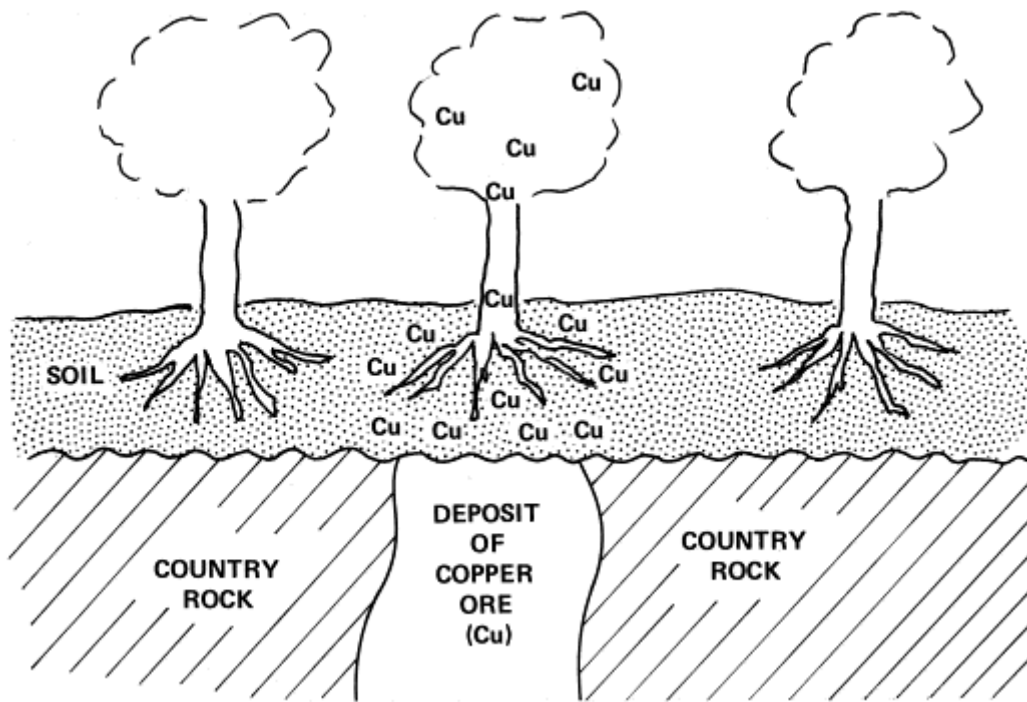
Εικόνα 15. Φάσματα ανάκλασης αλίτη και ουλεξίτη. Οι Ζώνες 4 και 7 του θεματικού χαρτογράφου χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία εικόνας με αναλογία 4/7.

Πηγή: Sabins, 1999.

## 2.8 Μεταλλευτική έρευνα σε καλυμμένη έκταση

Οι περιοχές του Collahuasi και του Goldfield βρίσκονται σε άγονες εκτάσεις με εκτεταμένες εκθέσεις του γεωλογικού υπόβαθρου κι ελάχιστο χόμα και βλάστηση. Μεγάλο μέρος του κόσμου έχει εύκρατο έως υγρό κλίμα, παρόλα αυτά, και τα ορυκτά κοιτάσματα καλύπτονται ή αποκρύπτονται από χόμα και βλάστηση. Η τηλεπισκόπηση δεν είναι σε θέση να αναγνωρίσει υδροθερμικά αλλοιωμένα πετρώματα όταν η βλάστηση και το χόμα φτάνουν καλύπτοντας το 50% του εδάφους. Η τηλεπισκόπηση, ειδικά τα radar, μπορεί να χαρτογραφήσει τη δομή των λίθων σε καλυμμένες περιοχές.

Οι ειδικοί έχουν εντοπίσει τη σχέση μεταξύ βλάστησης, χόματος και υπόγειων αποθεμάτων μεταλλευμάτων όπως φαίνεται διαγραμματικά στην Εικόνα 16.



Εικόνα 16. Εμπλουτισμός βλάστησης με χαλκό και χώμα υπερκείμενο αποθέματος χαλκού.

Πηγή: Sabins, 1999.

Οι τεχνικές της γεωχημικής έρευνας αναλύουν το μεταλλικό περιεχόμενο δειγμάτων βλάστησης, χώματος ή νερού. Περιοχές με υψηλή περιεκτικότητα σε μέταλλα αποτελούν στόχους για περαιτέρω έρευνα. Οι υψηλές συγκεντρώσεις μετάλλων στο χώμα, μπορεί να προκαλέσει μεταβολές στη βλάστηση όπως:

Έλλειψη βλάστησης: αυτή μπορεί να προκληθεί από συγκεντρώσεις μετάλλων στο χώμα που είναι τοξικά για τα φυτά. Αυτές οι περιοχές αποκαλούνται συχνά άγονες περιοχές χαλκού, αφού περιέχουν μεγάλη ποσότητα αυτού του μεταλλεύματος. Οι περιοχές που δεν έχουν βλάστηση είναι ορατές σε εικόνες τηλεπισκόπησης. Αυτές οι περιοχές, βέβαια, μπορεί να μεταβάλλονται κι από άλλες αιτίες.

Φυτά δείκτες: είναι είδη που αναπτύσσονται σε συγκεκριμένες υπαίθριες εκτάσεις που περιέχουν συγκεκριμένα στοιχεία. Για παράδειγμα, στη Κατάνγκα που είναι περιοχή του νότιου Ζαΐρ, φύεται ένα συγκεκριμένο είδος μέντας μπλε χρώματος, σε έκταση όπου υπάρχει κάλυψη από χαλκό.

Αλλαγές στη φυσιολογία: η υψηλή συγκέντρωση σε μέταλλα στο χώμα μπορεί να προκαλέσει μη φυσιολογικό μέγεθος, σχήμα και χαρακτηριστικά φασματικής ανάκλασης της βλάστησης. Μια συσχέτιση μεταξύ των φασματικών χαρακτηριστικών ανάκλασης στα φυτά και το περιεχόμενο σε μέταλλα του χώματος που αναπτύσσονται, θα μπορούσε να αποτελέσει τη βάση για τη τηλεπισκόπηση ορυκτών αποθεμάτων σε περιοχές με βλάστηση.

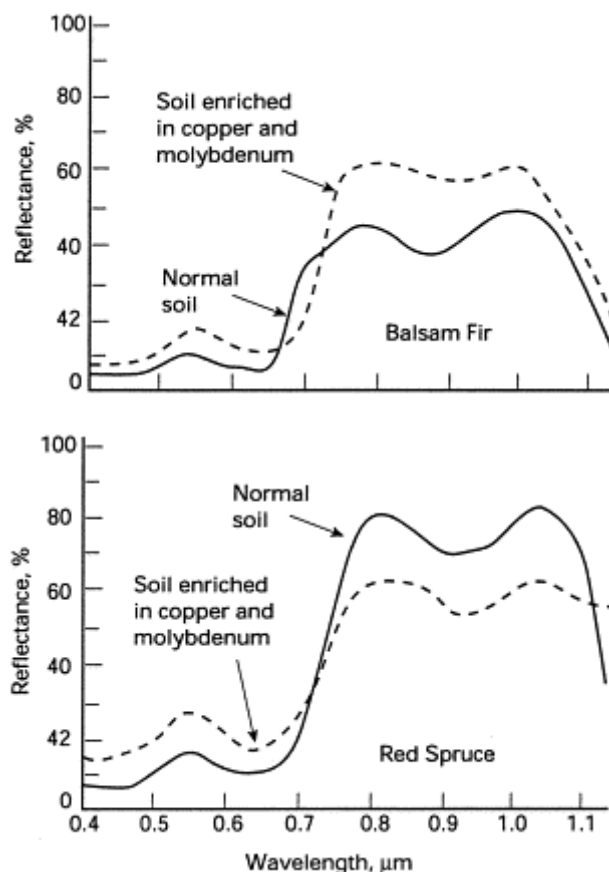
Είναι αναμενόμενο ότι η βλάστηση που φύεται σε εκτάσεις με ορυκτά αποθέματα να έχει διαφορετικά μοτίβα φασματικής ανάκλασης, σε σχέση με φυτά που αναπτύσσονται σε περιοχές χωρίς μεταλλεύματα. Η τηλεπισκόπηση τέτοιων φασματικών διαφορών θα μπορούσε να είναι μια μέθοδος έρευνας σε καλυμμένες εκτάσεις.

Φυτά καλλιεργήθηκαν υδροπονικά με μεταλλικά άλατα που προστέθηκαν στο θρεπτικό διάλυμα. Μια ομάδα ελέγχου καλλιεργήθηκε με φυσιολογικά θρεπτικά συστατικά. Οι φασματικές ανακλάσεις των 2 ομάδων συγκρίθηκαν κατά το κύκλο ανάπτυξης, αλλά τα αποτελέσματα ήταν αναποτελεσματικά.

Οι Yost και Wenderoth (1971, αναφέρονται στον Sabins, 1999), χρησιμοποίησαν το μεγάλο, χαμηλόβαθμο, χαλκο-μολυβδαίνιο απόθεμα στο Catheart Mountain, στο Maine, σαν περιοχή δοκιμής τηλεπισκόπησης. Τα υπαίθρια φασματομέτρα μέτρησαν την ανάκλαση δέντρων που αναπτύσσονταν σε φυσιολογικό χώμα και σε χώμα με μέταλλα, υπερκείμενο του αποθέματος (Εικόνα 17). Η ερυθρελάτη και η ελάτη που αναπτύσσονταν σε χώμα με μεταλλεύματα είχαν μεγαλύτερη συγκέντρωση σε μέταλλα από ότι τα δέντρα σε χώμα χωρίς μεταλλεύματα. Στην περιοχή της υπέρυθρης ανάκλασης, οι ελάτες με μέταλλα είχαν μεγαλύτερη ανάκλαση από τα φυσιολογικά δέντρα, ενώ η ερυθρελάτη με μέταλλα εμφάνισαν χαμηλότερη ανάκλαση από τα φυσιολογικά δέντρα (Εικόνα 17). Στην περιοχή του πράσινου φάσματος, τα δέντρα με μέταλλα και των 2 ειδών είχαν υψηλότερη ανάκλαση. Οι Labovitz et al. (1983, αναφέρονται στον Sabins, 1999), συνόψισαν άλλες μελέτες σε φάσματα βλάστησης. Αναμενόμενα, οι ανακλάσεις της βλάστησης στις κόκκινες και πράσινες ζώνες, γενικά, αυξάνουν με την αύξηση συγκέντρωσης μετάλλων στο χώμα. Στην περιοχή της υπέρυθρης ανάκλασης, όμως, υπάρχει λιγότερη συμφωνία. Μερικές μελέτες καταδεικνύουν αυξημένη ανάκλαση της βλάστησης, ενώ άλλες μειωμένη. Οι Labovitz et al. (1983, αναφέρονται στον



Sabins, 1999), επίσης, παρατήρησαν ότι το γεωβοτανικό μοντέλο της Εικόνας 16, δεν είναι σωστό σε παγκόσμια βάση. Στη Βιρτζίνια, ανακάλυψαν ότι τα φύλλα βελανιδιών που αναπτύσσονται σε χώμα εμπλουτισμένο με μέταλλα, μπορεί να έχουν χαμηλότερο περιεχόμενο μετάλλων από φύλλα δέντρων που αναπτύσσονται σε φυσιολογικό χώμα.



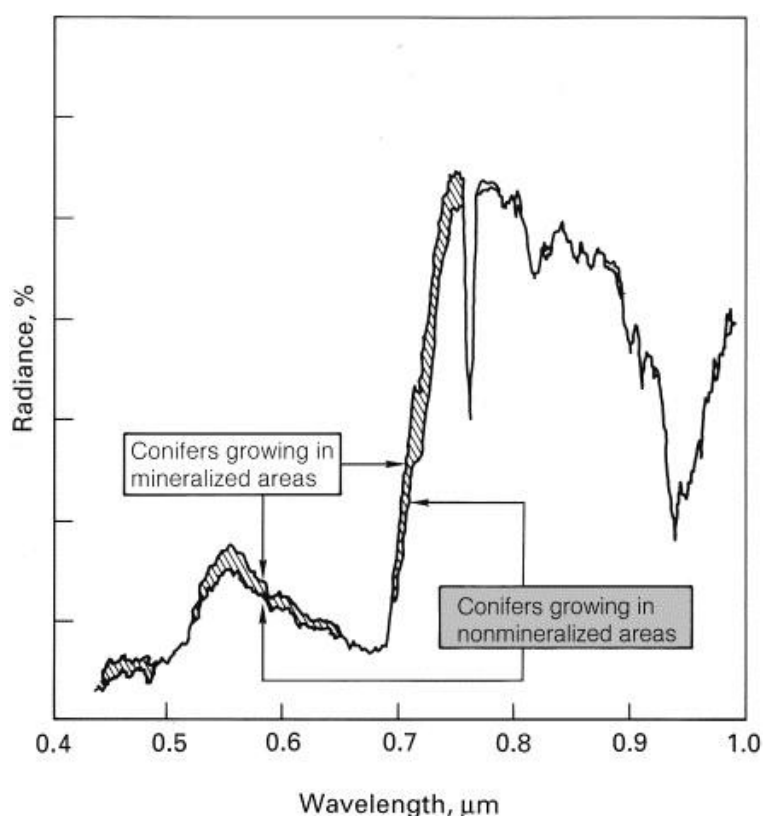
Εικόνα 17. Φάσματα ανάκλασης ελάτης και ερυθρελάτης που αναπτύσσονται σε κανονικό έδαφος και σε έδαφος εμπλουτισμένο σε χαλκό και μολυβδαίνιο.

Πηγή: Sabins, 1999.

Η Γεωφυσική Περιβαλλοντική Έρευνα, χρησιμοποίησε ένα ανεικονιστικό αερομεταφερόμενο σύστημα που αποκτά λεπτομερή ανάκλαση φασμάτων. Τα φάσματα στην Εικόνα 18 αποκτήθηκαν για τα κωνοφόρα αναπτυσσόμενα μέσα σε περιοχή με μεταλλεύματα και σε μια παρακείμενη περιοχή χωρίς τη παρουσία μεταλλευμάτων. Στη πράσινη ζώνη η ανάκλαση είναι υψηλότερη για τα δέντρα της περιοχής με τα μεταλλεύματα, γεγονός που ταυτίζεται και με άλλες μελέτες. Ξεκινώντας με ένα μήκος κύματος περίπου 0,7μm, τα φάσματα της βλάστησης έχουν μια απότομη ανοδική κλίση προς υψηλές τιμές ανάκλασης στην υπέρυθρη περιοχή.

Στην Εικόνα 18, αυτή η απότομη κλίση μετατοπίζεται ελαφρώς προς μικρότερα μήκη κύματος για τα κωνοφόρα που αναπτύσσονται στην μεταλλευτική έκταση. Αυτή η κλίση, που ονομάζεται μπλε κλίση, έχει παρατηρηθεί σε εκτάσεις βλάστησης σε πολλές περιοχές με μεταλλεύματα (Collins et al., 1983, αναφέρονται στον Sabins, 1999) και μπορεί να έχει σημαντικές ερευνητικές δυνατότητες.

Είναι γεγονός ότι η έρευνα με τηλεπισκόπηση σε φάσματα βλάστησης είναι περιορισμένη είτε γιατί οι μελετητές έχουν αποσυρθεί είτε γιατί απασχολούνται σε περιβαλλοντικά προγράμματα. Η δυνατότητες των υπερφασματικών δεδομένων είναι ικανή να ενθαρρύνει νέες μελέτες (Sabins, 1999).



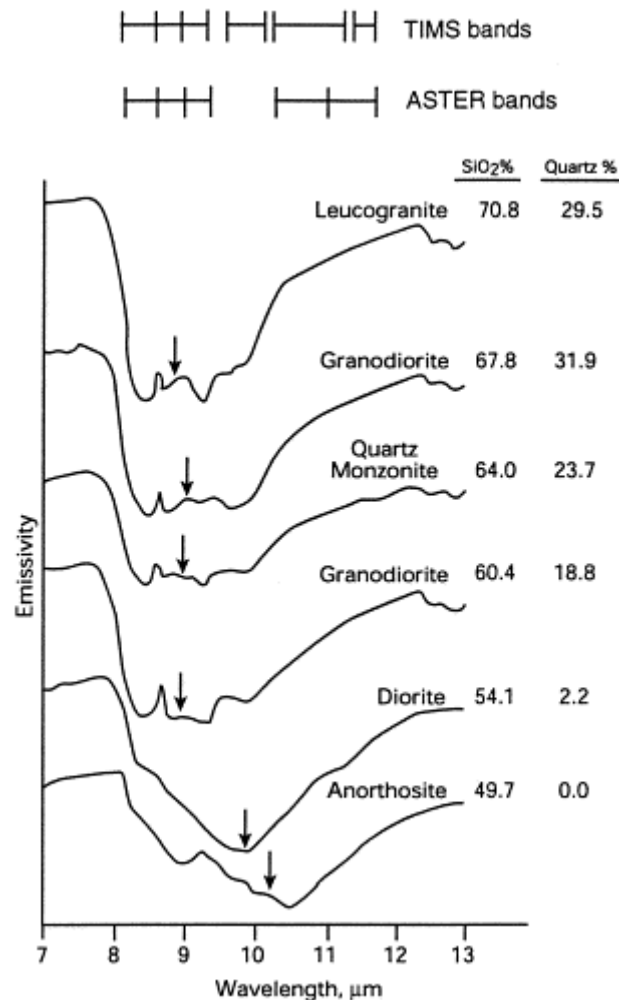
Εικόνα 18. Φάσματα ανάκλασης από αερομεταφερόμενο φασματογράφο σε κωνοφόρα στο Cotter Basin.

Πηγή: Sabins, 1999.

## 2.9 Τεχνολογία του μέλλοντος

Το δευτερεύων πυρίτιο σε μορφή χαλαζία αποτελεί σημαντικό συστατικό των υδροθερμικά αλλιωμένων συστημάτων, αλλά δεν έχει διαγνωστικά φασματικά

χαρακτηριστικά στις ορατές ή ανακλώμενες υπέρυθρες περιοχές φασμάτων (Εικόνα 7). Αυτή η αδυναμία στον εντοπισμό χαλαζία είναι ένα μειονέκτημα για την τηλεπισκόπηση, ασχέτως από την φασματική ανάλυση που προσφέρεται. Μια πιθανή λύση εντοπίζεται στην υπέρυθη θερμική περιοχή όπου το περιεχόμενο σε πυριτία προσδιορίζεται από το μήκος κύματος όπου εμφανίζεται η μεγαλύτερη απορρόφηση ενέργειας.



Εικόνα 19. Θερμική εκπομπή φασμάτων πυριγενών πετρωμάτων με διαφορετικό περιεχόμενο πυριτίου και χαλαζία. Τα βέλη δείχνουν τα κέντρα των ζωνών απορρόφησης. Οι θέσεις των φασματικών ζωνών καταγράφονται από ASTER και TIMS.

Πηγή : Sabins, 1999.

Η Εικόνα 19 δείχνει φάσματα εκπομπής πυριγενών πετρωμάτων στη θερμική περιοχή από 8 έως 14 mm. Όλα τα φάσματα περιέχουν ευρεία ελάχιστη εκπομπή, που ονομάζονται ζώνες απορρόφησης, που προκαλούνται από το περιεχόμενο σε πυρίτιο

των βράχων. Τα βέλη δείχνουν το κέντρο της κάθε ζώνης απορρόφησης. Τα βέλη κλίνουν περισσότερο σε μακρύτερα μήκη κύματος, καθώς η περιεκτικότητα του πυριτίου των βράχων μειώνεται.

Ο θερμικός υπέρυθρος πολυφασματικός σαρωτής (TIMS), είναι ένα σύστημα αεροσκάφους της NASA που ανακτά απεικονίσεις έξι ζωνών στην θερμική, υπέρυθρη περιοχή. Η Εικόνα 19 δείχνει τις ζώνες TIMS που έχουν τοποθετηθεί για τη καταγραφή της ελάχιστης απορρόφησης. Οι Hook et al. (1992, αναφέρονται στον Sabins, 1999), επεξεργάστηκαν TIMS δεδομένα από τη περιοχή του Cuprite, στη Νεβάδα και αναγνώρισαν την υψηλή συγκέντρωση πυριτίου που εμφανίζεται στα υδροθερμικά αλλοιωμένα πετρώματα.

Η NASA σχεδιάζει να αναπτύξει την προηγμένη διαστημική θερμική εκπομπή και το ραδιόμετρο ακτινοβολίας (ASTER) στο πρώτο Δορυφόρο Γήινης Παρατήρησης που μπορεί να ξεκινήσει στο μέλλον. Η Εικόνα 19, δείχνει τις 5 υπέρυθρες θερμικές ζώνες που καταγράφηκαν από το ASTER, που δίνουν τη δυνατότητα εντοπισμού ποικιλομορφίας στο περιεχόμενο πυριτίου. Τα δεδομένα από τον TIMS και το ASTER, μπορούν να εντοπίσουν υψηλές συγκεντρώσεις σε πυρίτιο, αλλά δεν μπορούν να διαχωρίσουν το υδροθερμικό πυρίτιο από άλλες μορφές όπως το πυριγενές πυρίτιο και το ιζηματογενές πυρίτιο. Το υδροθερμικό πυρίτιο μπορεί να εντοπιστεί από εικόνες TIMS και ASTER σε συνδυασμό με εικόνες που αναπαριστούν γεωλογικά και διαφορετικά αλλοιωμένα μεταλλεύματα.

Στην Αυστραλία, οργανώνεται στήριξη για τη δημιουργία δορυφόρου που θα περιλαμβάνει έναν υπερφασματικό σαρωτή στο σύνολο των οργάνων του. Η ικανότητα απόκτησης υπερφασματικών εικόνων σε παγκόσμιο επίπεδο αποτελεί σημαντική εξέλιξη στην μεταλλευτική έρευνα (Sabins, 1999).

### 3. Συμπεράσματα

Η τηλεπισκόπηση έχει παράσχει πολύτιμη βοήθεια κατά την αναζήτηση ορυκτών πόρων. Πολλά κοιτάσματα εντοπίζονται κατά μήκος των περιφερειακών και τοπικών σχημάτων ρωγμών υπό την προϋπόθεση ότι οι αγωγοί κατά μήκος των οποίων σχηματίζονται τα αποθέματα μεταλλευμάτων, έχουν διεισδύσει στα πετρώματα υποδοχής. Εικόνες Landsat και ραντάρ χρησιμοποιούνται για την χαρτογράφηση αυτών των σχηματισμών ρωγμών. Τα υδροθερμικά αλλοιωμένα πετρώματα που σχετίζονται με πολλά αποθέματα μεταλλευμάτων έχουν συγκεκριμένα φασματικά χαρακτηριστικά που αναγνωρίζονται σε ψηφιακά επεξεργασμένες εικόνες θεματικού χαρτογράφου. Μελλοντικά, οι υπερφασματικοί σαρωτές μπορεί να είναι σε θέση να εντοπίζουν μεταλλεύματα αλλοίωσης.

Η ανίχνευση υδροθερμικά αλλοιωμένων πετρωμάτων δεν είναι δυνατή σε περιοχές με βλάστηση, έτσι για το περιβάλλον αυτό απαιτούνται διαφορετικές τεχνικές τηλεπισκόπησης. Τα φάσματα ανάκλασης για φυλλώματα που αναπτύσσονται σε περιοχή με μεταλλεύματα μπορεί να διαφέρουν από αυτών που αναπτύσσονται σε κανονικό έδαφος. Οι φασματικές διαφορές, παρόλα αυτά, μπορεί να ποικίλλουν για διαφορετικά είδη φυτών. Χρειάζεται επιπλέον έρευνα κι ανάπτυξη για τον εντοπισμό μεταλλευμάτων σε περιοχές με βλάστηση, με τη χρήση τηλεπισκοπικών μέσων.

Αν και υπάρχουν επιστήμονες που υποστηρίζουν ότι η τηλεπισκόπηση δεν αποτελεί αξιόπιστη μέθοδο έρευνας, εάν εφαρμοστεί σωστά αποτελεί μια πολύτιμη τεχνική πηγή για την μεταλλευτική έρευνα.

## Βιβλιογραφία

### Ελληνική

Αστάρης, Θ., (2006), *Τηλεπισκόπηση στις Γεωεπιστήμες*, Τμήμα Γεωλογίας, Α.Π.Θ.

Καρτάλης, Κ. και Φείδας, *Αρχές κι Εφαρμογές Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης*, Αθήνα: Εκδόσεις Γκιούρδας.

Μελιάδου, Β. και Μελιάδης, Μ., (2014), «Εφαρμογή των σύγχρονων τεχνολογιών στην εκτίμηση των μεταβολών στη παράκτια περιοχή του Δέλτα Αξιού», *Geography in Action*.

Σπυρόπουλος, Β., Ν., (2012), *Τηλεπισκόπηση και δορυφορικά δεδομένα υψηλής ανάλυσης στη γεωργία ακριβείας*, LIFE+ Environment Policy and Governance Programme, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Τζεφέρης, Π., (2015), «Μεταλλευτική Έρευνα και Αξιολόγηση των Μεταλλευμάτων», *Ορυκτός Πλούτος*, διαθέσιμο στο: [http://www.oryktosploutos.net/2015/04/blog-post\\_12.html#.VgvT0pd7ySo](http://www.oryktosploutos.net/2015/04/blog-post_12.html#.VgvT0pd7ySo), ανακτήθηκε την 30/9/2015.

### Ξενόγλωσση

Sabins, F., F.,(1999), “Remote sensing for mineral exploration”, *Ore Geology Reviews*, pp.157-183.

### Ηλεκτρονικές πηγές

«Η ιστορία της Παρατήρησης της Γης», (2010), *European Space Agency*, διαθέσιμο στο: [http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace\\_GR/SEMSTS4PVFG\\_2.html](http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_GR/SEMSTS4PVFG_2.html), ανακτήθηκε την 28/9/2015.

«Τηλεπισκόπηση: Δυνατότητες», (2015), *Γεωανάλυση*, διαθέσιμο στο: <http://www.geoanalysis.gr/index.jsp;jsessionid=E9BDF1686FF1B0053BE5E6A5C9EB2BBA?CMCCode=10030302&extLang=>, ανακτήθηκε την 28/9/2015.