

USO DE IMAGENES LANDSAT EN EXPLORACION MINERA : UN EJEMPLO EN EL NORTE DE CHILE

KEN OBARA Metal Mining Agency Japan
CARLOS HUETE Inst. Invest. Geológicas

RESUMEN

Dentro de un programa de exploración por yacimientos del tipo cobre porfídico en una zona de la cordillera andina del norte de Chile, entre los yacimientos de El Abra y Quebrada Blanca, se hizo un análisis de imágenes Landsat destinado a diferenciar zonas con alteración hidrotermal.

Los métodos usados comprendieron técnicas analógicas y digitales. En base a imágenes blanco y negro de la banda 7, se hizo un mapa fotogeológico en que se distinguieron 13 unidades y las estructuras predominantes, que correspondió bastante bien con los antecedentes conocidos del área.

Las zonas de alteración hidrotermal se trataron de diferenciar analógicamente por: a) medio de composiciones de color en un visor multibanda y b) extracción mecánica, diferenciando directamente granitoides y zonas alteradas en base a las características de los yacimientos El Abra y Quebrada Blanca. Todos estos métodos permitieron distinguir 110 zonas posibles de contener alteración hidrotermal. Los resultados de terreno indicaron que los métodos analógicos fueron poco satisfactorios para la discriminación de zonas alteradas.

El análisis digital se hizo usando el yacimiento El Abra como patrón de comparación; se hicieron histogramas y razones de banda que permitieron la selección de la razón de bandas 4/6 como la más adecuada para distinguir las zonas alteradas. En base a mapas de esa razón de las 110 áreas detectadas por métodos analógicos, se concluyó que 19 mostraban las mayores semejanzas con El Abra; 5 de éstos fueron seleccionados para estudios de terreno de las cuales 2 tenían fuerte alteración, pero sin mineralización asociada de importancia.

Se concluye que el análisis de imágenes Landsat es un buen complemento a los programas de exploración, sobre todo para preparar mapas preliminares donde existen escasos antecedentes y para identificar estructuras que puedan estar asociados a yacimientos.

La discriminación directa de zonas alteradas parece posible por medio de análisis digitales, de los cuales las razones de bandas es muy prometedora, pero son necesarios estudios y comparaciones de terreno para aplicarlos ampliamente, además de que deben hacerse para cada caso en particular, cuidadosos análisis de costo-beneficio.

ABSTRACT

Landsat imagery analysis was used for differentiating areas of hydrothermal alteration; these analysis were tested in a wider "porphyry copper exploration program", carried out in northern Chilean Andes, between El Abra and Quebrada Blanca ore deposits.

These methods include analogical and digital techniques. A photogeologic map, based on band 7 black and white images, was drawn. Thirteen units and predominant structures, were distinguished, which fit fairly well the known geological information of the area.

Hydrothermal alteration zones were analogically selected by: a) means of color composites formed in a multiband viewer and b) mechanic extraction, aiming to separate directly granitoids and altered zones that had the El Abra and Qda. Blanca deposits patterns. As a whole, 110 zones were separated with probable hydrothermal alteration. Field results proved that analogical methods were not suitable for altered zone discrimination.

Digital analysis was carried out taking El Abra deposit as training area; histograms and band ratios allowed the selection of 4/6 band ratio as the most adequate to distinguish altered zones. Band ratio maps corresponding to the 110 areas were prepared. It was concluded that 19 of them show mayor similarities with El Abra. Five of this zones were chosen for field surveys and two of them show strong alteration but lack of important associate mineralization.

It is concluded that Landsat images analysis is a useful complement for exploration programs, especially for the elaboration of preliminary maps of poorly known areas and for the identification of structures that could be associated to ore deposits.

Direct discrimination of altered areas seems possible by means of digital analysis, among which band-ratios are a very promising tool. However field work is necessary before widespread application, and careful cost-benefit analysis should be done for each particular case due to the high cost of the equipments involved.

INTRODUCCION

Con el lanzamiento del primer satélite orientado específicamente a la investigación de recursos naturales (ERTS-1) en 1972 se abrió un nuevo campo para enfrentar diversos problemas afines a la geología y otras ciencias que investigan los recursos naturales. Es así que se empezaron a generar una serie de aplicaciones específicas, técnicas de análisis, etc., tendientes a obtener la máxima utilización de esta moderna herramienta. Esto se tradujo en numerosas publicaciones especializadas, cuyo número va en aumento año a año.

En Chile el uso de las imágenes de satélites en geología ha sido limitado, y se ha circunscrito principalmente, al análisis fotointerpretativo directo de la imagen generalmente en blanco y negro. El uso de análisis multiespectral y de técnicas para realzar ciertos elementos de la imagen, como composiciones de color, análisis digital, etc., se ha realizado solo parcialmente, porque no se ha contado con los medios para efectuarlos, y porque los geólogos chilenos no conocen mayormente de estas técnicas.

Durante 1975 y 1976 el IIG realizó un programa de exploración de pórfidos cupríferos en una franja de la Cordillera Andina entre los yacimientos El Abra y Quebrada Blanca, en cooperación con una misión técnica japonesa de la Metal Mining Agency de Japan (MMAJ) dentro de un programa de cooperación de gobierno a gobierno. Como parte de este programa se incluyó el análisis de imágenes de satélites a manera de experimento para complementar la investigación geológica. El estudio de imágenes satélites incluyó diversas técnicas de análisis, incluso las digitales y sus resultados unidos al resto de las investigaciones geológicas se entregaron en un informe denominado "Report on the Geological Survey of the Quebrada Blanca-El Abra Area. Phase I and Phase II" (1976-1977).

Debido a la escasez de publicaciones en castellano sobre este tema, especialmente de aplicaciones geológicas en Chile, se consideró de interés que los resultados derivados de ese trabajo fueran publicados.

Toda la interpretación de las imágenes fue he-

cha en Japón por un equipo de geólogos de ese país encabezado por el Sr. Ken Obara. El coautor, responsable de la redacción, discusión y conclusiones generales, participó activamente en el programa en referencia y tuvo la oportunidad de conocer directamente de estas técnicas en Japón gracias a una invitación del Gobierno de ese país.

ANTECEDENTES GENERALES SOBRE IMAGENES DE SATELITES LANDSAT

Lo que se entrega a continuación es información extractada libremente de numerosas publicaciones especialmente del United States Geological Survey.

Los satélites Landsat están destinados específicamente a los estudios de recursos naturales. Hasta la fecha se han lanzado al espacio tres de estos satélites: Landsat 1 (ERTS-1) en Julio de 1972, que dejó de operar oficialmente el presente año después de obtener sobre 200.000 imágenes de la tierra, Landsat 2, en Enero de 1975, que continúa en operación y el Landsat 3, en Marzo de 1978.

Estos satélites cubren en forma sistemática y repetitiva la superficie de la tierra girando alrededor de ella cada 103 minutos en una órbita circular, polar, sincrónica con el sol a 920 km de altura. El satélite cubre cada 18 días la superficie terrestre y pasa por el mismo sitio a la misma hora local, (aproximadamente, 9.30 hrs. en el Ecuador).

Los satélites usan tres sistemas colectores de datos: a) un barredor multiespectral de cuatro canales (MSS); b) un sistema de televisión (Vidicon) de tres cámaras con haz de retorno (RBV) y c) un colector de datos (DCS) para información ambiental enviada desde plataformas en tierra (DCP). El satélite Landsat 3, tiene esencialmente los mismos sensores, aunque más perfeccionados, e incluye además una banda de radiación termal.

El sensor principal es el barredor multiespectral (MSS) y es al que nos referimos en este trabajo. El lector que desee información en castellano sobre los otros sistemas que tienen los Landsat, y en general sobre sensores remotos, puede con-

sultar los trabajos de Faúndez (1977) y de González y Dalannais (1974).

El sistema de exploración multispectral (MSS) de 4 bandas instalado en los Landsat está constituido por un mecanismo electrónico capaz de captar los reflejos de la luz y el calor solar que proyecta la superficie de la tierra. El instrumento consta de un espejo oscilante que barre un espacio de 185 km de ancho (Fig. 1). El espejo a través de un telescopio refleja las imágenes sobre fibras de cristal a través de 4 filtros de colores y los hace llegar a 24 detectores de luz. Como cada objeto terrestre radía o absorbe la luz o energía calórica del sol de manera diferente, la energía reflejada en las 4 bandas del MSS crea las correspondientes señales electrónicas. Estas señales se transforman en una secuencia de datos numéricos que registran cintas grabadoras en el propio satélite, para retransmitirse posteriormente, o son enviadas directamente a una estación receptora en la tierra.

Estos datos son convertidos de señales electrónicas en imágenes fotográficas o cintas magnéticas para computador (CCT) en el centro de la NASA en Maryland y son distribuidos a todos los usuarios a través de EROS DATA CENTER en Dakota del Sur, USA.

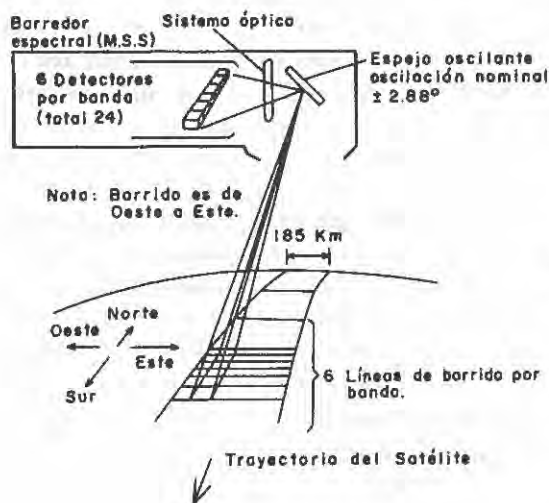


Fig. 1. Esquema de las características principales del sistema MSS.

Las imágenes obtenidas por este sistema abarcan un área de 180 x 180 km con una resolución de 79 m. Las cuatro bandas y las longitudes de ondas que registran son: banda 4 (MSS4—verde 0.5–0.6 μm), banda 5 (MSS5—rojo 0.6–0.7 μm), banda 6 (MSS6—infrarrojo 0.7–0.8 μm) y banda 7 (MSS7—infrarrojo 0.8–0.1 μm).

El recubrimiento de las imágenes es un 10% en la trayectoria del satélite; el recubrimiento lateral depende de la latitud, varía de 14% en el Ecuador a 50% en la latitud 54°.

Las imágenes son entregadas con indicadores de ubicación, coordenadas geográficas, fecha de la información y una escala de colores grises para controlar la impresión y que sirve de referencia para el análisis de las imágenes. Imágenes en falso color también son obtenibles del EROS DATA CENTER.

Las escalas en que se entregan las imágenes fotográficas, en productos convencionales o transparencias, son 1:3.360.000 o sus ampliaciones 1:1.000.000, 1:500.000 y 1:250.000.

La información puede ser también obtenida en cintas magnéticas que pueden ser procesadas por computador (CCT). En cuatro cintas se obtiene la información original del área cubierta por una imagen. Con estas cintas se puede obtener el máximo de resolución teórica que entrega el sistema LANDSAT ya que está registrada la información de cada *pixel* (área mínima de registro de información). Cada imagen tiene 2340 líneas y cada línea contiene 3240 *pixels*, de los cuales se pueden obtener 128 tonos de gris, a diferencia de los 15 a 30 que se obtienen en los productos fotográficos.

Las ventajas del sistema Landsat respecto a otros sistemas convencionales son:

- Entrega una visión sinóptica de un área de gran extensión permitiendo análisis regionales, sobre todo estructurales, que difícilmente se pueden hacer de otro modo.
- Información repetitiva, lo que permite controlar fenómenos dinámicos que ocurren en la superficie terrestre, y observar una misma zona bajo diferentes condiciones climáticas y de luminosidad.
- Tiene una gran flexibilidad ya que el procesamiento de los datos recogidos permite un análisis y entrega de resultados en diferentes formas.
- Disponibilidad sin restricciones a bajo costo de la información original.

METODOS DE ANALISIS

GENERALIDADES

El análisis de las imágenes Landsat básicamente corresponde a una fotointerpretación, en que las imágenes pueden ser modificadas mediante técnicas orientadas a realzar ciertos elementos (image enhancement).

Las técnicas de realce, algunas de gran complejidad, en muchos casos están sólo en la etapa de experimentación de su aplicación a problemas específicos, pero su potencialidad es enorme. Estas técnicas se dividen en general, en dos grandes campos: aquellos que usan el valor de cada punto de la imagen, sin considerar los valores vecinos a éste, y las que toman el conjunto de estos valores para el análisis. Así se tienen por ejemplo, técnicas en que el valor de cada punto es reemplazado por un intervalo de clase (density slicing); se adicionan, restan, multiplican o dividen valores; se acentúa la intensidad (contrast modification); se filtran usando una serie de técnicas matemáticas, etc.

El procesamiento para modificar y extraer información de las imágenes puede ser analógico (continuo) o digital (discreto) y las soluciones empleadas incluyen métodos fotográficos, ópticos—electrónicos y con computadora digital. El criterio geológico es básico, tanto para la elección de la técnica a emplear, como para discriminar sobre la validez de los resultados entregados por estos métodos o técnicas, del mismo modo que en cualquier otro método de exploración.

TECNICAS DE ANALISIS

Una breve descripción general de algunos métodos empleados para interpretar las imágenes Landsat, especialmente de los usados en este trabajo, y en general de imágenes multispectrales, se expone a continuación.

Análisis fotogeológico (Pattern analysis)

Este análisis es fundamentalmente similar al trabajo fotointerpretativo normal, con la diferencia que con las imágenes Landsat no se puede trabajar estereoscópicamente en forma directa.

En este caso después de estudiar imágenes de la zona en las 4 bandas a la escala 1:1.000.000 se seleccionó la banda 7 por presentar mejor los rasgos geológicos (Fig. 2).

De esta banda se preparó imágenes 1:200.000, sobre las que se marcaron diversos elementos geológicos tales como lineamientos, estructuras,

etc., y en base a tono, textura y rasgos topográficos se separaron unidades "fotogeológicas". Esta información es comparada y complementada con la información geológica conocida y con el análisis de fotos aéreas convencionales.

Análisis espectrales

En estos análisis se usa la información de las diferentes bandas que proporciona el satélite, en técnicas destinadas a realzar ciertos elementos; esta capacidad multispectral hace diferentes a las imágenes Landsat de una foto aérea tomada a gran altura.

Los elementos que se quería resaltar eran zonas de alteración hidrotermal del tipo de los cobres porfíricos, por lo que los yacimientos El Abra y Quebrada Blanca sirvieron de modelos de control y comparación para estos análisis.

Métodos analógicos

a) Composición de color

Con la ayuda de diferentes técnicas se pueden producir imágenes de falso color que ayudan al intérprete a destacar rasgos que le interesan. En este caso se usó un método óptico—fotográfico en que se combinan transparencias blanco y negro de las distintas bandas, con filtros de colores (azul, verde y rojo) en un visor multi-banda modelo 600 I²S cuyas especificaciones se indican en el Anexo 1. La imagen de falso color es producida por adición de bandas (color additive method). El costo de un visor es del orden de los US\$ 10.000.

Otro método que está ganando mucha aceptación por sus buenos resultados y su bajo costo es la técnica *díazo*. Es un método en que las imágenes de falso color son producidas por sustracción de bandas, mediante una técnica esencialmente fotográfica.

b) Extracción mecánica

Este método analógico ocupa un sistema óptico—electrónico para realzar elementos de la imagen mediante un análisis de densidad de la foto (density analysis).

El aparato, barre a través de una cámara de TV la imagen fotográfica y la transforma en impulsos eléctricos. El intérprete combina bandas y filtros de colores de modo tal que sobre un monitor de TV, aparezca claramente delineado el



Fig. 2. Mosaico de imágenes Landsat en el área de estudio. (Band 7).

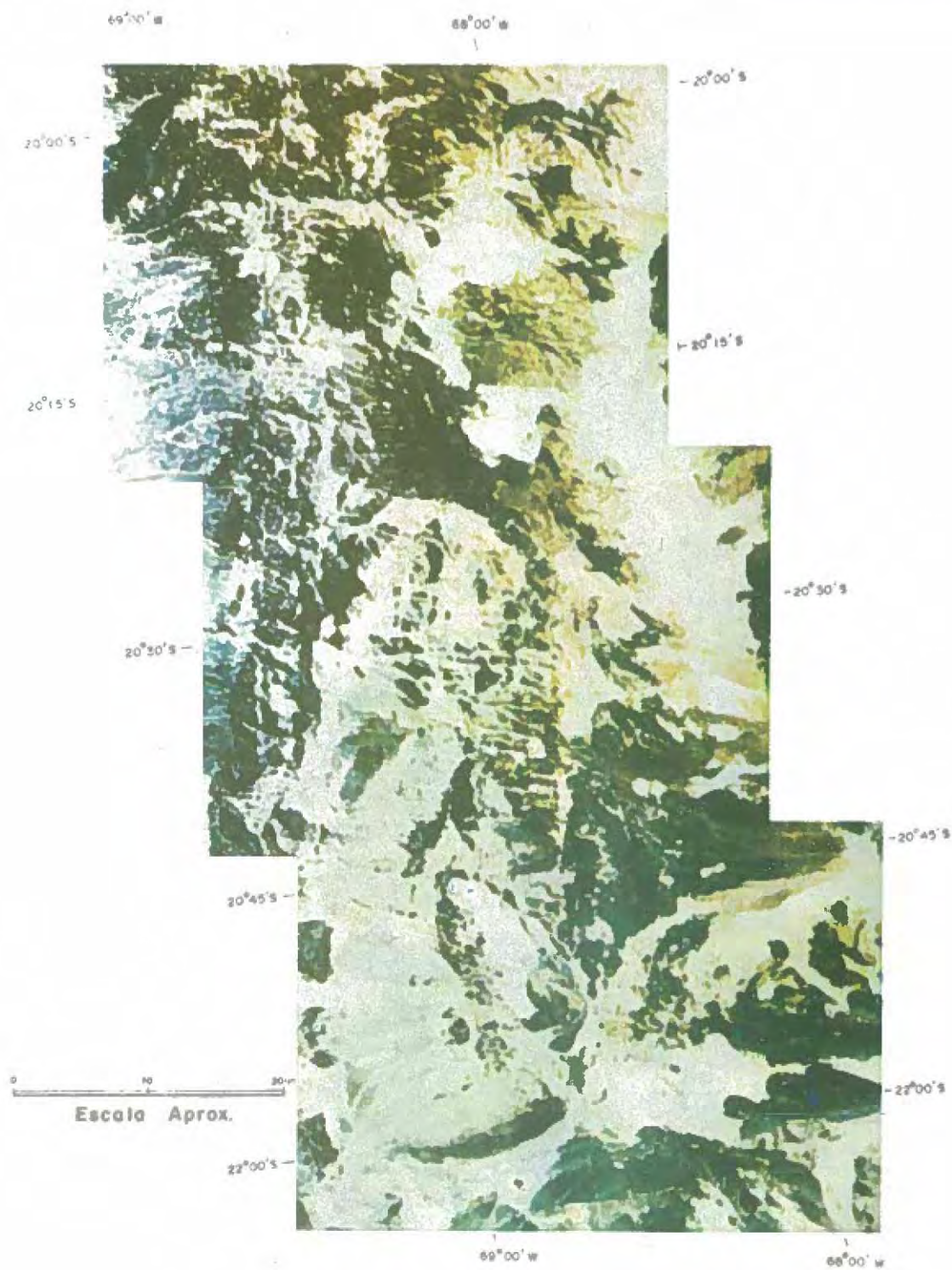


Fig. 3. Imagen falso color producida directamente de la cinta CCT. (sin corrección geométrica). Compárese con Fig. 2.

elemento que quiere destacar. El aparato registra automáticamente la "reflectancia" del elemento y muestra en la pantalla o en un listado digital, todas las zonas que dentro de la imagen tengan iguales características al elemento elegido.

En este caso se intentó separar granitoides y zona de alteración hidrotermal con características similares a las que presentan los yacimientos El Abra y Quebrada Blanca. El equipo usado fue un NAC Multicolor Data System 4200 de un costo del orden de US\$ 100.000 y cuyas especificaciones se indican en el Apéndice 2.

Métodos Digitales

Las cintas magnéticas CCT, permiten el tratamiento directo de los datos originales de la imagen con un computador y de este modo usar al máximo el poder de resolución del sistema Landsat.

Aparte de la ventaja en la precisión de los datos sobre las imágenes fotográficas, la que por otro lado se pierde en las sucesivas reproducciones, trabajar con datos digitales permite mayor flexibilidad analítica y resultados reproducibles.

Al estar registrados los datos radiométricos punto por punto (*pixel*) son numerosas las técnicas matemáticas que se pueden aplicar para realzar ciertos elementos de la imagen y por otro lado el analista cuenta con diversos sistemas para apreciar los resultados ya que los datos se pueden re-

gistrar en papel fotográfico pantallas de televisión, listados digitales, etc.

El tratamiento digital para este trabajo fue realizado en el General Institute of Japan Univac Ltd. y en la Empresa NAC INC. En ese Instituto se usó un computador UNIVAC 1108 y programas especialmente desarrollados por ellos. En NAC INC. se usó un computador IBM SYSTEM 7 y el equipo NAC-TIPS, con programas desarrollados por esa empresa. El costo de este equipo incluido el computador, es del orden de US\$ 1.000.000.

Existen algoritmos que permiten entre otras cosas:

- Corregir el formato de las cintas, correcciones geométricas, compensar las variaciones en sensibilidad de los sensores, etc.
- Preparar imágenes falso color asignando a cada nivel de gris un color arbitrario.
- Ampliaciones que generalmente son mejores que las fotográficas.
- Variaciones en la escala de grises de la imagen, por ejemplo, convirtiendo ciertos tonos que se quieren destacar en negro y todo el resto en blanco. (*density slicing*).
- Razones de banda en que a cada *pixel* se le asigna un valor, que es la razón de sus niveles de gris en dos bandas (*band ratio*).

Un ejemplo de la calidad de una imagen a color obtenida de las cintas CCT por medio de un computador se muestra en la Fig. 3.

SELECCION DE AREAS ALTERADAS HIDROTHERMALMENTE

GENERALIDADES

El área de estudio (Fig. 4) está ubicada en la Alta Cordillera de la II Región en una zona en que las condiciones atmosféricas permiten una muy buena reflectancia de la luz solar y donde prácticamente la cubierta vegetal no existe o es muy escasa.

La zona fue elegida para hacer exploración por yacimientos de cobres porfíricos debido a su ubicación dentro de la franja de esos yacimientos (Ruiz y otros, 1965).

Antes de iniciar la primera campaña de terreno se realizó una interpretación analógica de las imágenes Landsat en Japón, la que fue complementada con fotos aéreas y con información de un mapa geológico preliminar 1:250.000. En base a esta interpretación se seleccionaron algunas zonas para ser estudiadas en terreno.

La exploración en terreno se realizó en dos campañas en años consecutivos. Esta exploración consistió en el primer año en levantamientos detallados, con geoquímica, de las zonas elegidas por el análisis Landsat, y simultáneamente en un levantamiento geológico 1:50.000, con geoquímica regional, de toda el área. En el segundo año se estudiaron en detalle las zonas alteradas definidas por el mapeo regional. Antes de iniciar el segundo año de trabajos en terreno, se hizo un análisis digital de las imágenes Landsat, cuando ya se tenía un buen conocimiento de la geología regional del área y de las posibles zonas de interés.

Las imágenes usadas en estos análisis y la fecha de su obtención fueron las siguientes (Fig. 4).

E-1010 - 14042	del 2	de Agosto	de 1972
E-1241 - 14060	del 24	de Marzo	de 1973
E-2024 - 13542	del 15	de Febrero	de 1973

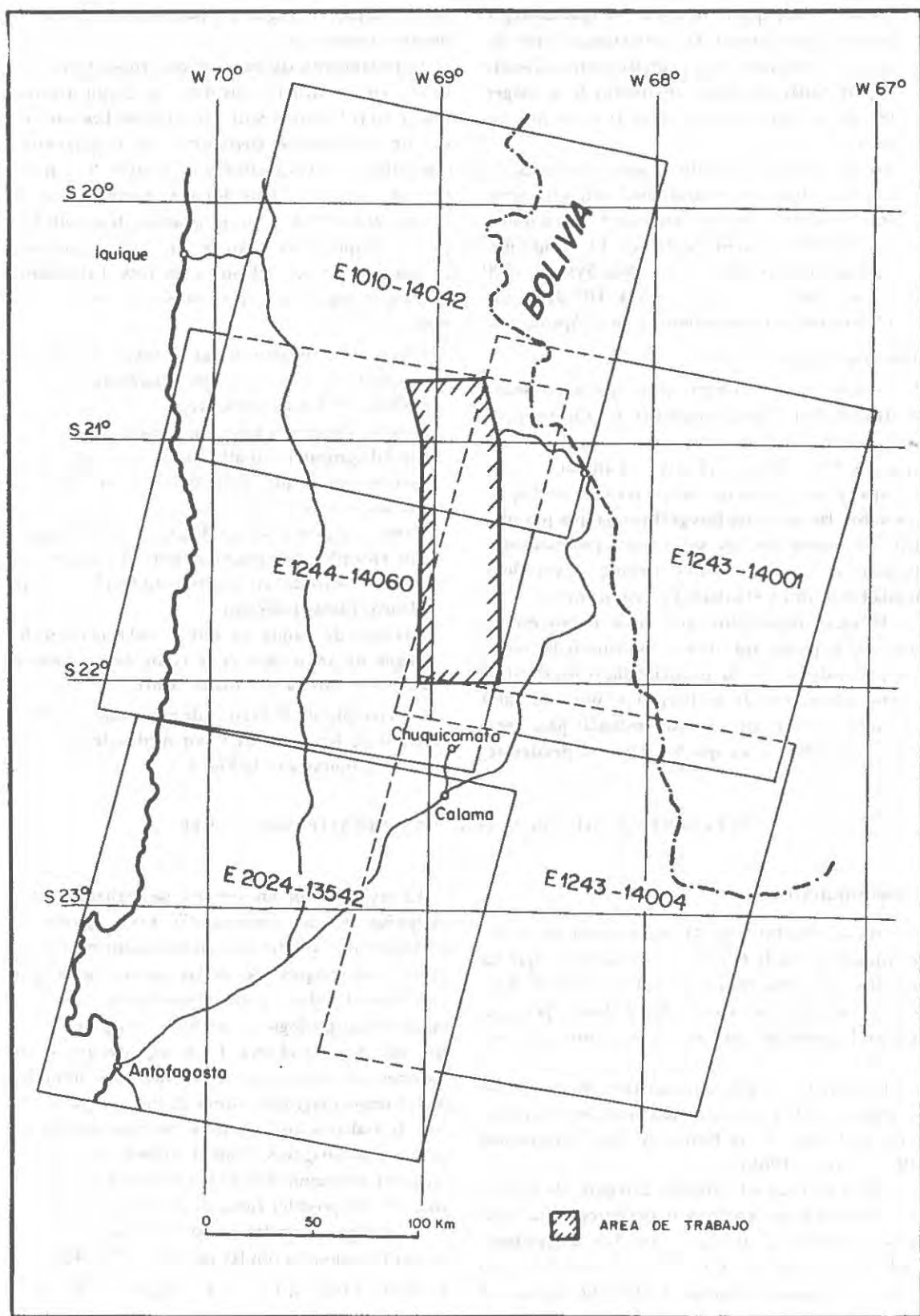


Fig. 4. Ubicación del área de trabajo y las imágenes Landsat que la cubren.

E-1243 - 14001 del 23 de Marzo de 1973
E-1243 - 14004 del 23 de Mayo de 1973

La cinta usada (CCT) fue la E - 1244 - 14060 del 24 de Marzo de 1973.

MARCO GEOLOGICO REGIONAL

Estratigrafía

En el área predominan las rocas ígneas, fundamentalmente granitoides, y rocas volcánicas andesíticas y riolíticas. Estas rocas constituyen un 60% de toda el área. La siguen en importancia rocas sedimentarias marinas y continentales, areniscas, calizas y conglomerados que constituyen un 30% del área. Rocas metamórficas, esquistos y gneisses, constituyen el 3% del área y la cubierta aluvial el restante 7%.

Estas rocas se pueden separar en un basamento y una cobertura andina (Maksaev 1978).

El basamento está constituido por rocas metamórficas y granitoides que las instruyen; aflora en una franja aproximadamente norte sur, principalmente en el sector oeste del área. Las edades de estas rocas oscilan entre Ordovícico-Silúrico y Pérmico inferior (Huete y otros 1977).

La cobertura andina está formada por: a) una serie sedimentaria del Lías Medio a Oxfordiano caracterizada por facies calcáreas y pelíticas, dispuestas sobre el basamento en forma discordante, b) una serie sedimentaria continental del Jurásico Superior, concordante sobre la anterior y con buena distribución en la mitad norte del área, c) una serie volcánica andesítica del Cretácico medio, caracterizada por facies clástico-volcánicas y volcánicas, también tiene su mejor desarrollo en la mitad norte del área, d) serie riolítica del Cretácico Superior caracterizada por facies intrusivas y efusivas de difícil separación en terreno; esta unidad de gran desarrollo se distribuye en una franja casi continua en la parte central y este del área, e) serie sedimentaria continental del Cretácico Superior Terciario Inferior caracterizada por facies psamíticas rojas; aflora en el sector sur del área en su parte central-este, f) serie volcánica andesítica Eocena, caracterizada por volcanitas principalmente expuestas en el sector sur del área en su parte central, g) serie sedimentaria continental del Oligoceno a Mioceno caracterizada por facies psefíticas y psamíticas; esta serie aflora en una franja discontinua principalmente en el límite oeste del área, h) serie efusiva riolítica del Mioceno, que aflora en una franja en el extremo este del área,

donde es cortada longitudinalmente por el río Loa y en pequeños parches distribuidos en toda el área, i) depósitos aluviales Plio-Cuaternario de tipo piedemonte.

Los intrusivos andinos son fundamentalmente granitoides que van desde el Cretácico al Mioceno. Predominan principalmente en la parte central sur del área. De estos granitoides, los más importantes para la prospección son los del Oligoceno pues tienen alteración hidrotermal del tipo de los cobres porfídicos.

Estructura

Las estructuras principales corresponden a fallas de las cuales los sistemas predominantes son aproximadamente norte sur. Las más importantes son normales, algunas de gran extensión como la denominada Falla Oeste que aparentemente tiene algún control sobre los yacimientos de El Abra y Chuquicamata.

Con excepción de los sedimentos marinos toda la cubierta andina Mesozoica está levemente plegada.

Yacimientos Minerales

El área está ubicada dentro de la llamada franja de los cobres porfídicos teniendo en sus extremos norte y sur a los yacimientos de Quebrada Blanca y El Abra, respectivamente. Estos yacimientos están asociados a granitoides del Terciario inferior y en esta región están relacionados, al menos espacialmente, con estructuras mayores como la denominada Falla Oeste.

Aparte de los yacimientos del tipo cobre porfídico, se conoce la existencia de yacimientos vetiformes principalmente cupríferos, que están desde largo tiempo inactivos (Guacazul, Jovita, etc.).

RESULTADOS DEL ANALISIS LANDSAT

Las técnicas empleadas fueron analógicas, previas a la primera campaña de terreno, y digitales al finalizar esa etapa, y cuando ya se tenía un buen conocimiento geológico del área.

Una limitación para comparar exhaustivamente los resultados de la interpretación de las imágenes con los métodos tradicionales, es que este análisis fue enfocado con propósito experimental y realizado en forma complementaria a la exploración geológica, sobre todo en la interpretación digital; sin embargo, es posible obtener algunas conclusiones importantes acerca del uso de esta moderna herramienta:

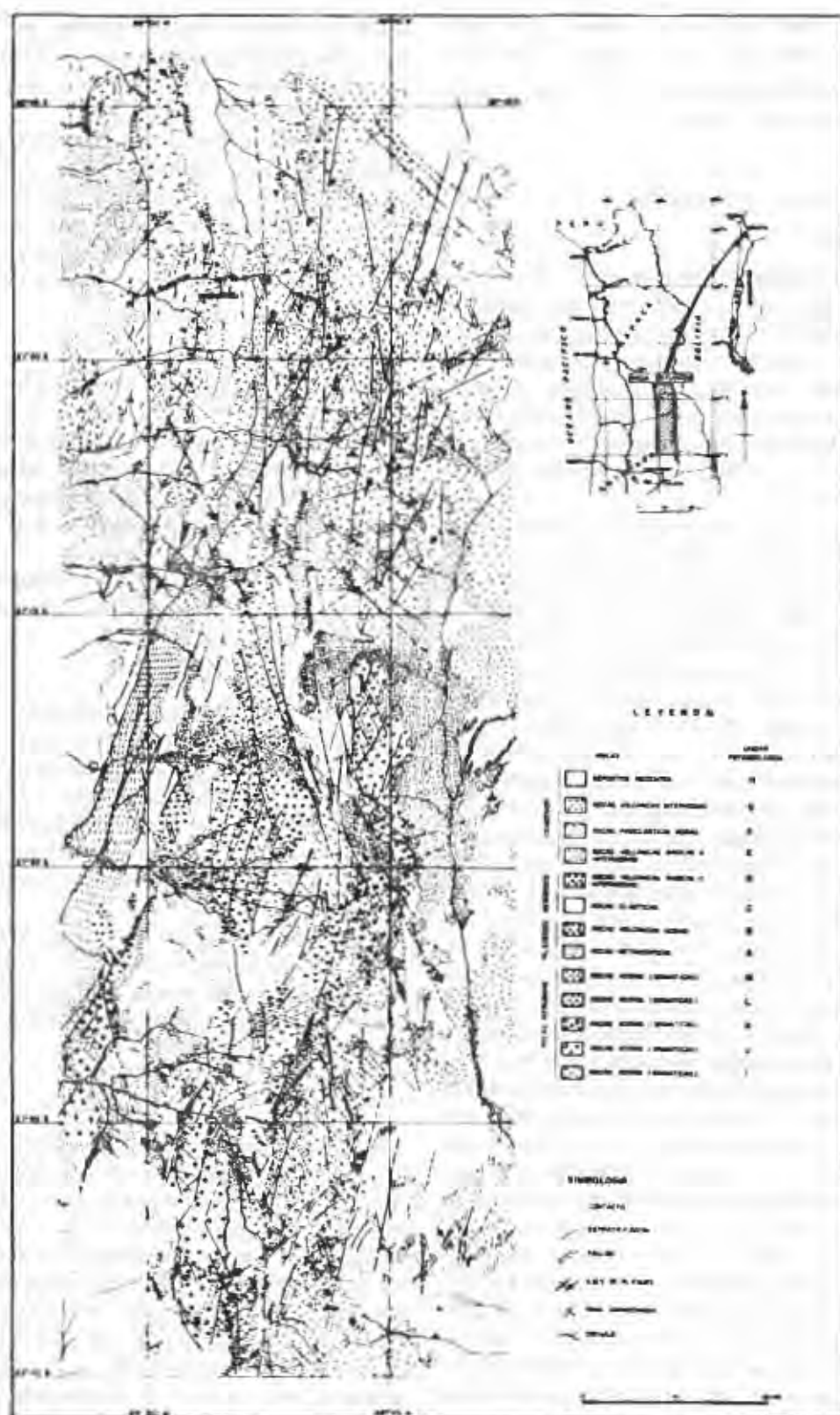


TABLA 1
CARACTERÍSTICAS DE LAS UNIDADES FOTOGEOLÓGICAS (EL ABRA – Q. BLANCA)
(BANDA 7)

Unidades fotogeo- lógicas	Características fotográficas			Características Topográficas					Lineamientos y estratificación			Litología Probable	Mapa Geológico
	Tono	Textura	Forma	Densidad	Drenaje Tipo	Roca	Sección Valle	Montaña	Densidad	Intensidad	Tipos		
H	gris > gris claro	Fina, suave	Paralelo	Muy pobre	Perma- nente	Muy débil	∨	∩	Pocos	Muy débil	Falla fractura	Depósitos recientes	Depósitos Terciarios, Quaternarios
G	gris > os- curo	Fina, gruesa	Radial	Pobre	Corto	Débil medio	∨	∩	Pocos	Débil	Fractura	Rocas volcánicas intermedias	Rocas básicas volcánicas
F	claro > gris	Fina, media	Dendrítico parcialmente paralelo	Pobre media	Perma- nente	Débil	∨	∩	Medio- muchos	Débil- media	Fractura falla	Rocas piroclásti- cas ácidas	Rocas volcánicas ácidas
E	gris	Fina-media algo suave	Dendrítico parcialmente paralelo	Media	Corto medio	Medio	∪	∩	Muchos	Media	Fractura falla	Rocas volcánicas básicas interme- dias	Rocas volcánicas básicas
D	os- curo > gris	Media	Paralelo	Media	Medio	Medio- débil	∨	∩	Muchos	Media	Fractura falla	Rocas volcánicas básicas interme- dias	Rocas básicas
C	gris > os- curo	Media-fina	Dendrítico paralelo	Media densa	Medio permanente	Débil	∨	∩	Muchos	Media fuerte	Estratificación, fractura, falla	Rocas clásticas	Sedimentos marinos y continentales
B	gris claro	Media	Dendrítico	Pobre media	Corto- medio	Medio	∨	∩	Media	Media	Fractura falla	Rocas metavol- cánicas ácidas	Rocas ácidas volcánicas
A	gris > os- curo	Gruesa- parcialmen- te suave	Dendrítico	Densa	Medio	Fuerte	∨	∩	Media	Fuerte	Estratificación, esquistosidad, fractura, falla	Rocas metamór- ficas (basamento)	Rocas metamórficas, esquistos gneises, areniscas, grauwacas
M	claro > gris claro	Fina-gruesa	Sub-rectan- gular	Media	Medio	Medio fuerte	∨	∩	Muchos	Media	Fractura falla	Granitoides	Granodiorita
L	gris	Gruesa	Dendrítico	Media	Medio	Débil medio	∨	∩	Media	Media	Fractura falla	Granitoides	Granodiorita
K	claro > gris claro	Fina-gruesa	Paralelo	Media	Medio	Medio- fuerte	∨	∩	Media	Débil media	Fractura falla	Granitoides	Granodiorita granito migmatita
J	gris > gris claro	Medio- gruesa	Dendrítico	Media	Corto medio	Débil medio	∨	∩	Media	Débil media	Fractura	Granitoides	Diorita
I	gris claro > gris	Fina-gruesa	Dendrítico	Media	Corto medio	Medio fuerte	∨	∩	Media	Media	Fractura falla	Granitoides	Anortosita

a) Análisis fotogeológico

El estudio de la banda 7 de las imágenes blanco y negro a escala 1:200.000, (Fig. 2) complementado con fotos aéreas, permitió preparar un mapa con 13 unidades fotogeológicas, (Fig. 5) que en general corresponden bastante bien con los antecedentes geológicos del área. La Tabla 1 muestra en forma esquematizada las principales características fotogeológicas de las distintas unidades.

En este análisis fue posible identificar fácilmente los lineamientos y posibles fallas, cuyas orientaciones son predominantemente norte-sur y cuya continuidad es difícil de seguir en fotos aéreas convencionales.

b) Análisis espectrales analógicos

Con el objeto de discriminar zonas de alteración se hicieron análisis con composiciones de falso color y por el método de extracción mecánica.

- Composiciones de falso color

En el visor multibanda después de realizar varias combinaciones de bandas, filtros, etc., buscando las que mejor expresaban o diferenciaban los yacimientos El Abra y Quebrada Blanca, se eligieron en las condiciones indicadas en la Tabla 2, dos composiciones de color (Fig. 6).

Ambas imágenes son similares excepto por el color usado para caracterizar las posibles zonas alteradas hidrotermalmente. Estas posibles zonas se muestran como púrpura rojizo y marrón amarillento y aparecen con gran distribución especialmente en el sector noreste del área. En la práctica con este método fue difícil diferenciar, por sus tonalidades similares, zonas

con posible alteración, de varias unidades geológicas como rocas volcánicas terciarias, (ignimbritas) y depósitos continentales Cuaternarios. Por otro lado, la imagen así obtenida no es homogénea en su color ya que se producen distorsiones en los bordes debido principalmente, a la superposición de los filtros. Como iba a ser imposible, o muy difícil, separar directamente por este método las áreas de alteración se decidió tratar de separar granitoides y zonas de alteración hidrotermal asociadas a ellos por un método de extracción mecánica.

- Extracción mecánica

Las condicionantes técnicas empleadas para caracterizar (extraer), zonas con granitoides y zonas con alteración hidrotermal similares a las de El Abra y Quebrada Blanca dentro del área, se muestran en la Tabla 3 y las imágenes finalmente elegidas, en la Fig. 7 (Ver también Apéndice 2).

Las áreas identificadas como granitoides en base a comparación con las condiciones de El Abra, aparecen en rojo en la Fig. 6a y representan el 8.9% del área total.

Los granitoides así extractados están incluidos en varias unidades geológicas de las diferenciadas en el análisis fotogeológico como se indica en la Tabla 4 y en la Fig. 8a. Sólo un 25% de los granitoides obtenidos en el análisis fotogeológico, tendrían las características de los asociados a El Abra y por lo tanto de poder estar mineralizados.

Las zonas identificadas como alteración hidrotermal, en base a las características de El Abra, fueron 280 y aparecen de color blanco en la Fig. 7b. Estas zonas corresponden a un 3.1%

TABLA 2. Condiciones usadas para la obtención de composiciones de color en el Visor Multibanda

Figura Número	Imagen	Banda Usada	Film	Filtro	Intensidad Luminosa	Características
Fig. 6a	E-1244- 14060	4	P	G	8.8	Zonas alteradas muestran color púrpura rojizo.
		5	P	B	5.1	
		6	P	R	2.5	
		7	P	R	4.3	
Fig. 6b	E-1244- 14060	4	P	B	7.7	Zonas alteradas muestran color marrón con tinte amarillento.
		5	P	G	8.8	
		7	P	R	5.0	

B : Blue - G : Green - R : Red - P : Positivo



(a)



(b)

Fig. 6. Composiciones de color obtenidas en un visor multibanda para seleccionar áreas alteradas en base a los yacimientos El Abra y Quebrada Blanca: a) zonas alteradas se presentan con color púrpura-rojizo; b) zonas alteradas se presentan con color marrón-amarillento.



(a)



(b)

Fig. 7. Elementos realzados de imágenes Landsat usando un sistema de extracción mecánica analógico (MCDS 4200 C), en base a las características de los yacimientos El Abra y Quebrada Blanca. a) Granitoides (en rojo); b) Zonas alteradas (en blanco).

	Area medida
4, 6, 7	Banda
B, G, R	Bluc, green, red
R, G, R - Ex	Bandas de extracción mecánica (R: banda 7; B: banda 5; G: banda 6)

8 %	Porcentaje del área extractada en el total
P - N	Film positivo o negativo
41 : 44	Nivel de gris de la zona extractada

TABLA 3. Condiciones usadas en el realce de elementos (método de extracción mecánica)

Figura N°	Imagen usada	Banda	Film	Filtro	Intensidad de gris de la zona a extraer	Color de unidad extractada	Porcentaje areal de la unidad extractable	Objetivo
Figura N° 7a	E-1244	4	P	B	50-58	R	8.9 %	Extracción de granitoides
	-14060	6	P	G	49-50			
		7	P	R	50-51			
Figura N° 7b	E-1244	4	P	B	41-44	W	3.1 %	Extracción de zonas alteradas
	-14060	6	N	G	53-55			
		7	N	R	48-48			

B : Blue - G : Green - R : Red - W : White

P : Positivo - N : Negativo

TABLA 4. Relación entre las unidades fotogeológicas y las zonas extractadas como granitoides

Litología	Unidades fotogeológicas	Zonas extractadas como granitoides
Sedimentos recientes	H	22
Rocas piroclásticas ácidas	F	69
Rocas graníticas	I,J,K,L,M	23
Otras	A,B,C,D,E	19

TABLA 5. Relación entre las unidades fotogeológicas y las zonas extractadas como alteración hidrotermal

Litología	Unidades fotogeológicas	Zonas extractadas como de alteración hidrotermal	Porcentaje
Sedimentos recientes	H	42	15
Piroclásticos ácidos	F	40	14.3
Rocas volcánicas	D,E,G	43	15.3
Rocas clásticas	C	59	21.1
Granitoides	I,J,K,L,M	75	26.8
Rocas metamórficas	A	21	7.5
Total		280	100

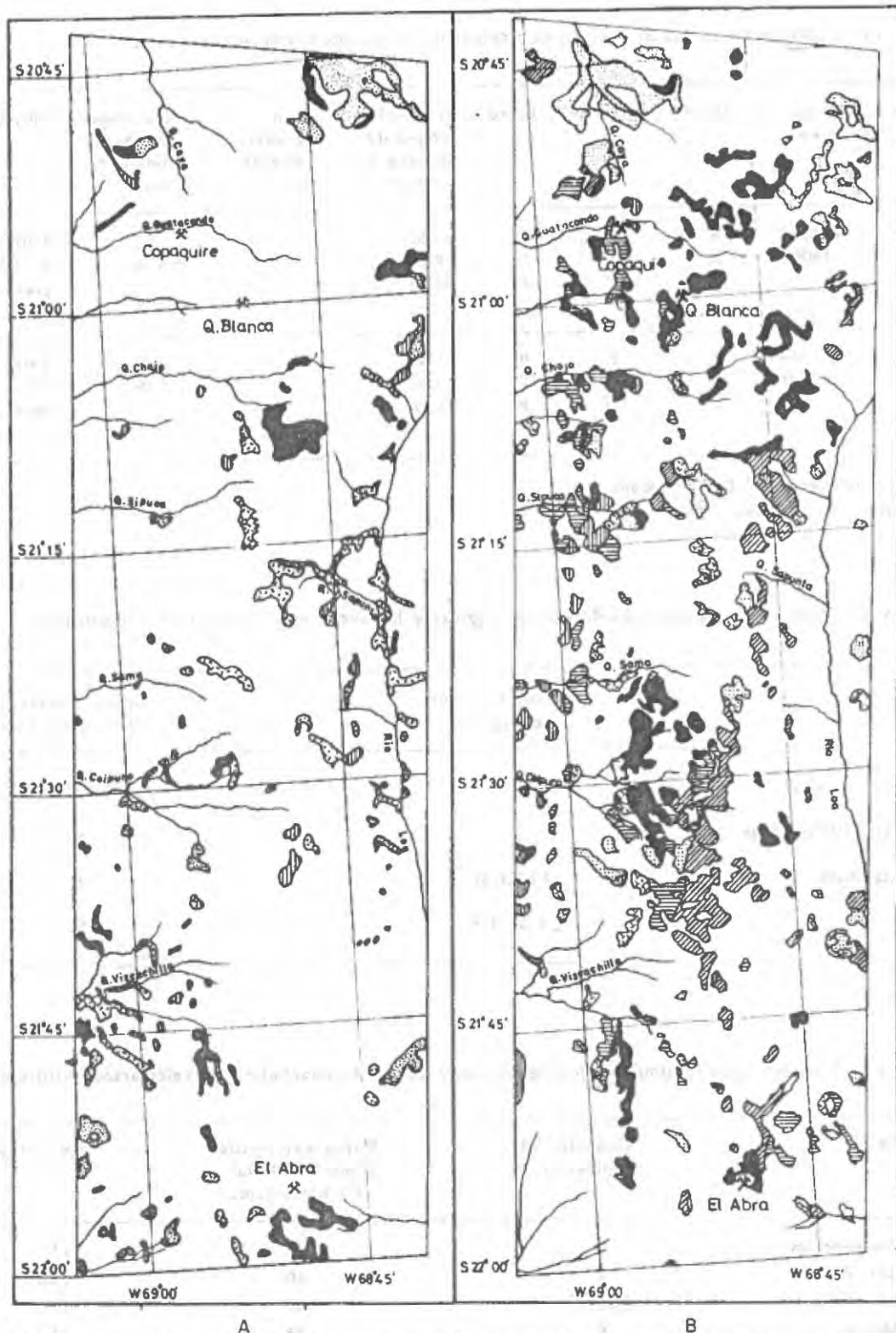
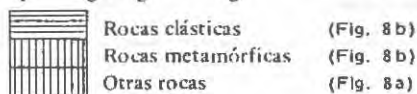
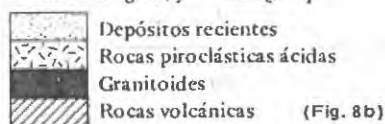


Fig. 8 (a y b). Zonas extraídas mecánicamente como granitoides (a) y como alteración hidrotermal (b), usando un sistema analógico, y la litología que cubren según mapa fotogeológico de Fig. 5.



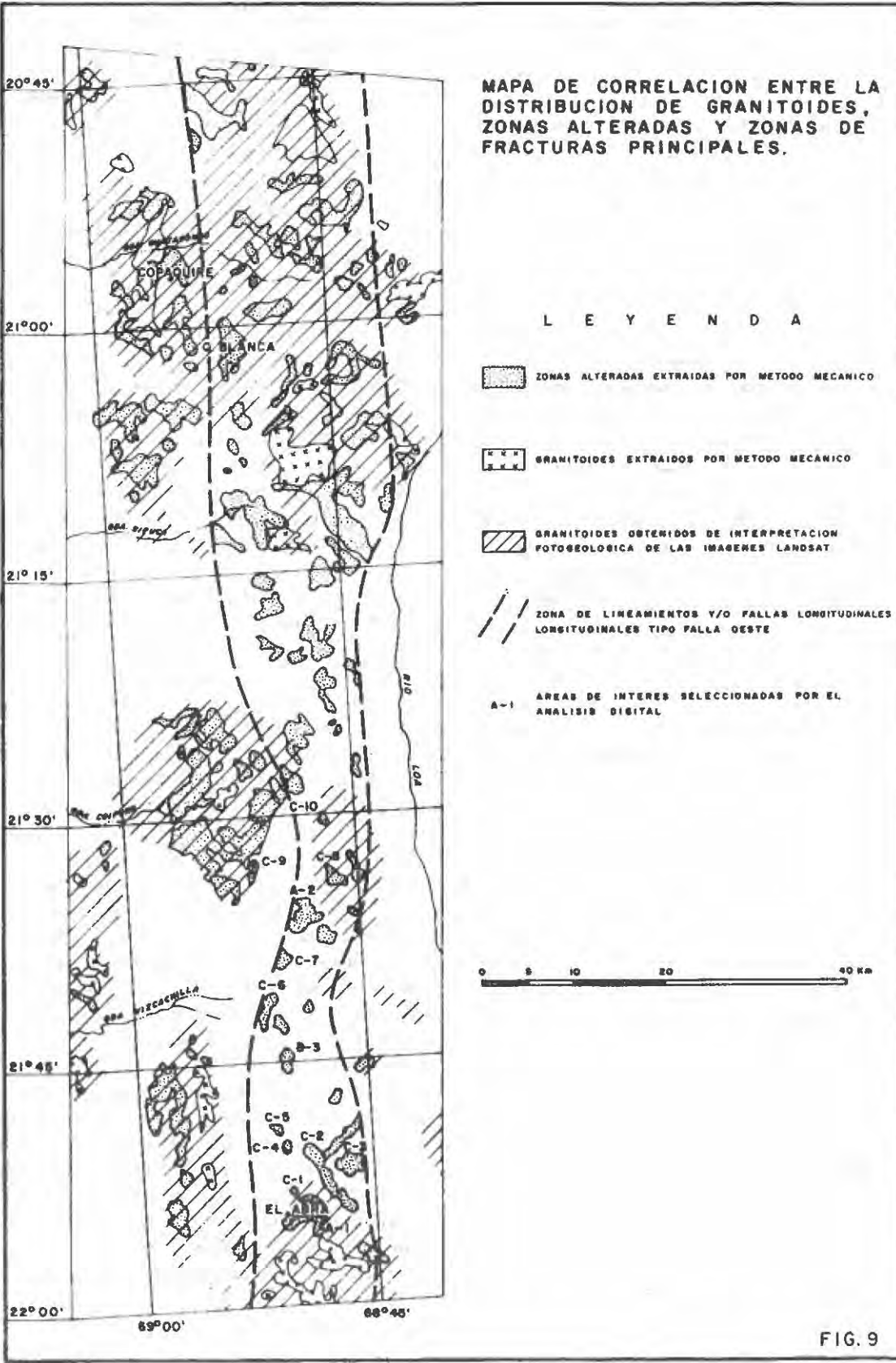


FIG. 9

del área total. Las unidades fotogeológicas en las que aparecen estas zonas alteradas se muestran en la Tabla 5 y en la Fig. 8b. De esto se deduce que un 71% de las áreas extractadas tendrían posibilidades de corresponder realmente a zonas alteradas hidrotermalmente lo que representa un 2.2% del área total.

La correspondencia de este análisis, con el análisis fotogeológico fue mejor en la extracción de las zonas alteradas que en la de los granitoides.

Es importante hacer notar que los granitoides extractados por este método no hubieran sido los mismos si las condiciones elegidas como modelo comparativo hubieran correspondido a las de Quebrada Blanca en lugar de El Abra. De todos los análisis efectuados con las imágenes Landsat, se preparó un mapa general (Fig. 9) que correlacionase todos los elementos favorables para la posible existencia de yacimientos y de esa manera elegir posibles zonas de alteración hidrotermal que deberían ser objeto de comprobaciones en terreno.

Los factores favorables fueron, la correlación entre las zonas alteradas y granitoides, zonas de fracturamiento, y asociación con la Falla Oeste. El número total de posibles zonas de alteración hidrotermal fue de 110; de éstas se eligieron 5 zonas ubicadas en el extremo norte del área, al noroeste del yacimiento de Quebrada Blanca, para ser comprobada por estudios geológicos de terreno.

Los levantamientos de semidetalle realizados en esas zonas, tanto geológicos como geoquímicos, evidenciaron que la alteración hidrotermal era restringida en extensión y muy débil en intensidad y no contenía mineralización de importancia, por lo que se consideró que las áreas carecerían de importancia económica. Por otro lado, debido a la escala de trabajo (1:200.000) en que se efectuó el análisis Landsat, fue difícil ubicar las zonas anómalas en terreno; además se perdía exactitud al traspasar la información obtenida, a cartas topográficas de detalle.

c) Análisis digitales

Al finalizar la primera campaña de terreno en la zona se decidió hacer un análisis digital de las imágenes Landsat en base a la información original que contienen las cintas CCT. Con es-

to sería posible usar al máximo la capacidad de resolución del sistema Landsat (57 x 79 m, aproximadamente) y ubicar mas exactamente las posibles zonas de alteración hidrotermal. Con el objeto de definir los parámetros para caracterizar las zonas alteradas, se eligió la zona de El Abra como área piloto de comparación. (Training area).

La figura 10 muestra el flujo esquemático de el análisis efectuado. Después de comprobar y hacer que los datos fueran compatibles con el computador, se hicieron histogramas de la intensidad de la reflectancia, de toda el área y de El Abra respectivamente (Fig. 11). En Base a ello se eligieron 10 rangos de intensidad a los que se les asignó una simbología gradacional y digital y se prepararon mapas de cada banda en base a esos rangos.

Se hicieron varias pruebas con razones de bandas y con técnicas para obtener mejor contraste de las imágenes (contrast stretching) las que sirvieron para elegir la razón de banda 4/6 como la que mejor mostraba las características de la zona de alteración de El Abra (Fig. 12). Ejemplos de las variaciones en los contrastes de las imágenes que el analista controla directamente en una pantalla de TV se muestra en la Fig. 13. De las 110 anomalías detectadas, el primer año se analizaron noventa (las ubicadas al sur de Quebrada Blanca) y se clasificaron en un rango descendente de A a D de acuerdo a su grado de similitud con El Abra. Un total de 10 zonas caen dentro de las categorías A a C y de ellas se preparan planos de la razón de banda 4/6 con simbología gradacional y digital (Fig. 14). En base a la semejanza en los valores de razón de banda 4/6 de estas zonas con los de El Abra, a la distribución de los valores de reflectancia, tamaño de la zona, geología asociada, etc., se seleccionaron 5 zonas para ser comprobadas en terreno.

Los levantamientos geológicos de detalle realizados en estas zonas seleccionadas, mostraron que dos de ellas presentaban alteración hidrotermal intensa pero escasa mineralización asociada. La ubicación geográfica de las áreas mejoró apreciablemente en relación al análisis analógico, pero la forma del área alterada seleccionada fue bastante distante con la realidad del mapeo geológico.

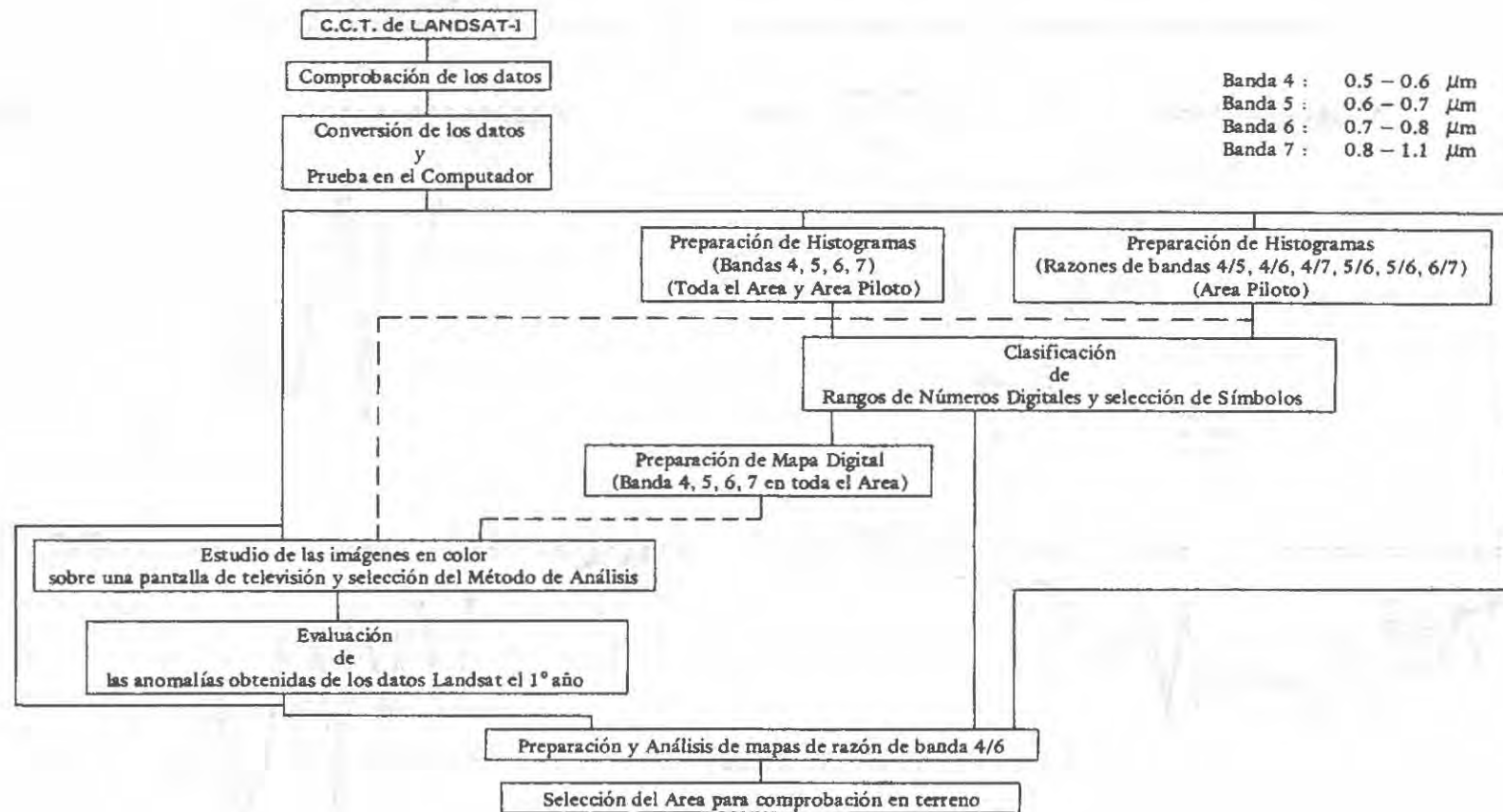


Fig. 10. Flujo esquemático mostrando las etapas del Análisis Digital.

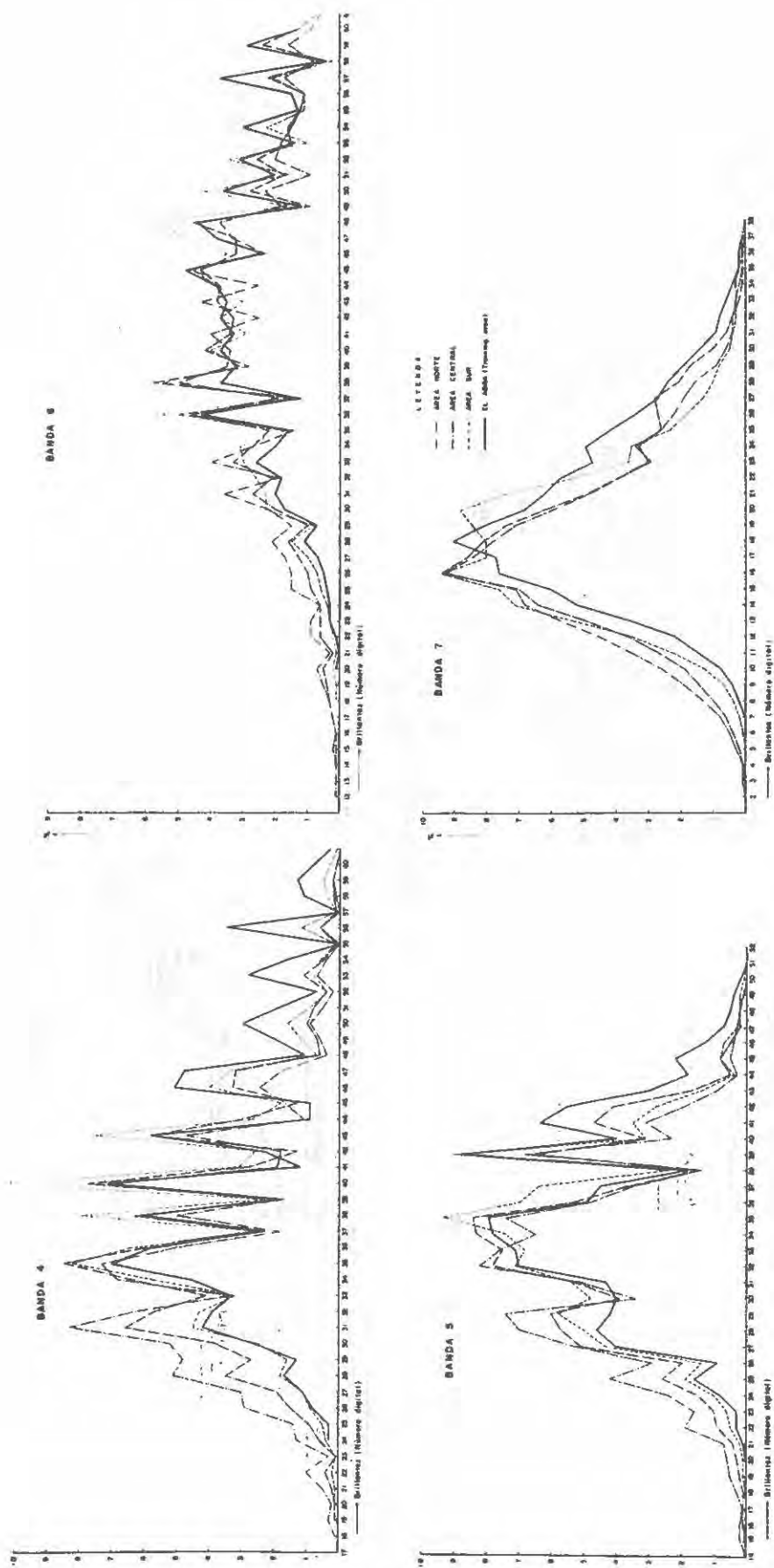
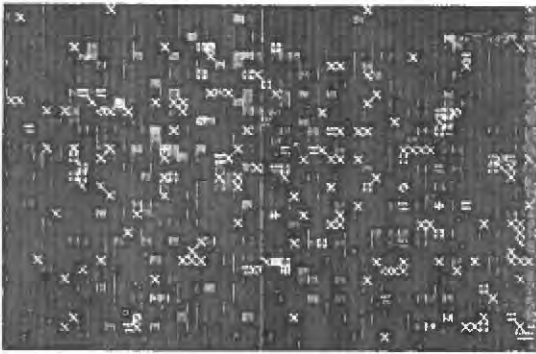
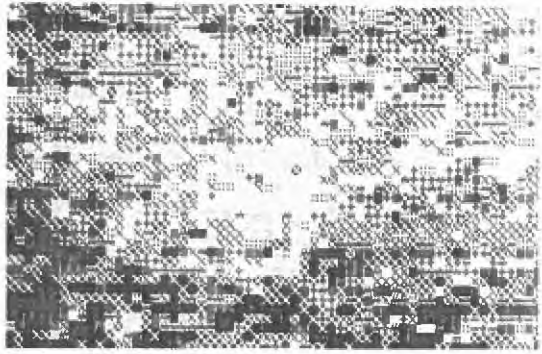


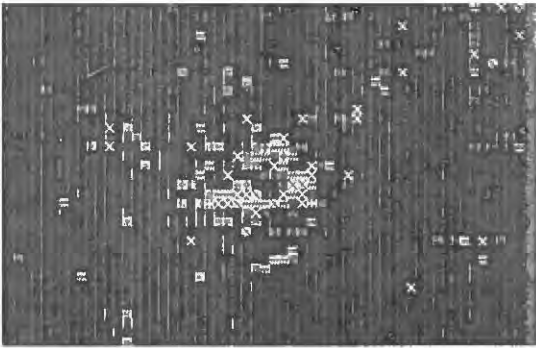
Fig. 11. Histogramas de valores de reflectancia o brillantez de las distintas bandas de las imágenes Landsat en base a los datos de las cintas CCT.



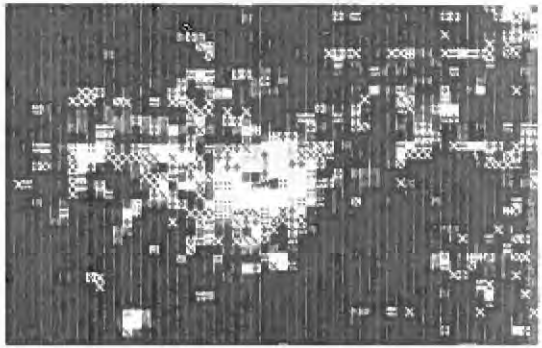
4/5



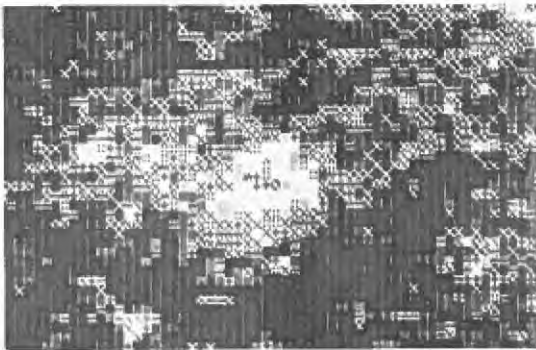
4/6



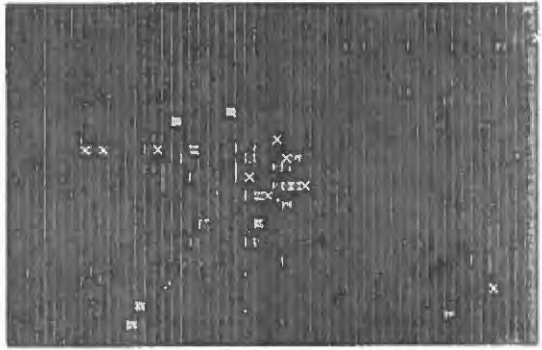
4/7



5/6



5/7



6/7

Fig. 12. Mapas de la zona de El Abra en las distintas razones de banda obtenidas del análisis digital. La razón 4/6 muestra mejor las características del yacimiento.

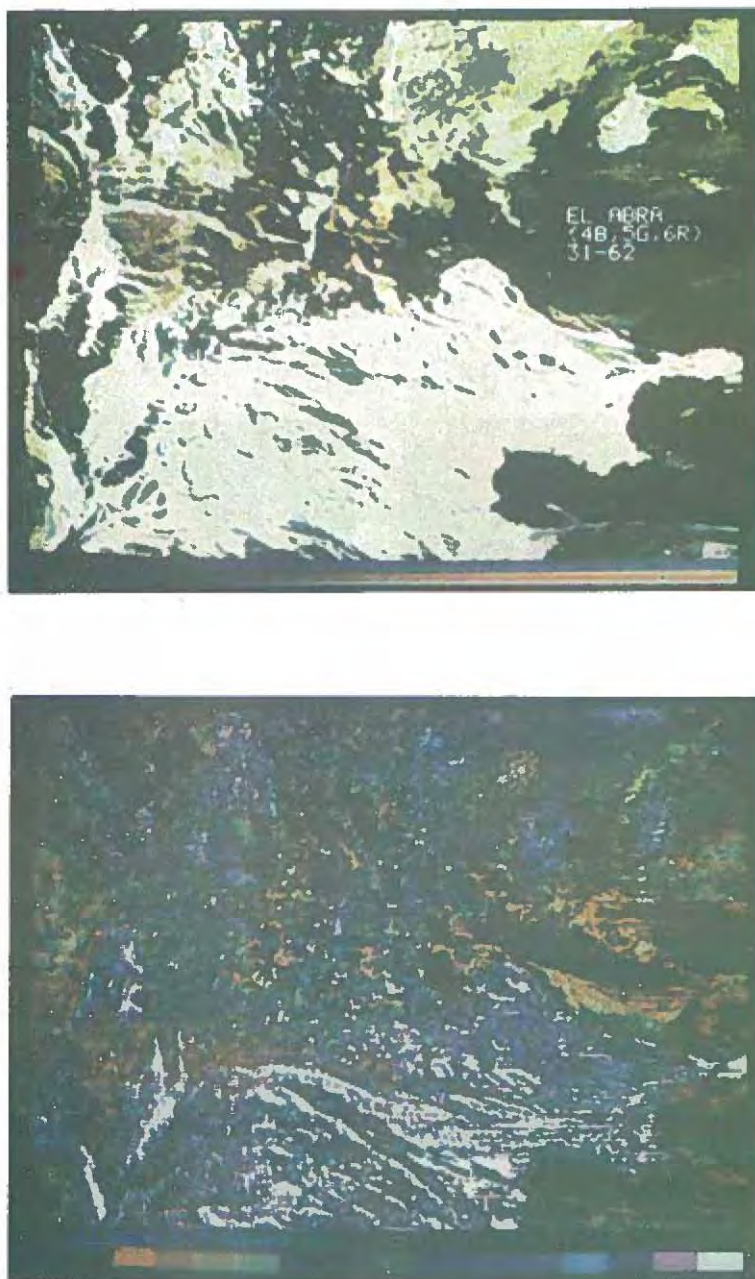


Fig. 13. Variaciones en las imágenes que se obtienen mediante el análisis digital y que el operador observa directamente en una pantalla de TV. Ambas fotos corresponden a la misma zona en El Abra: la superior es una composición de color y la inferior muestra la razón de bandas 5/7.

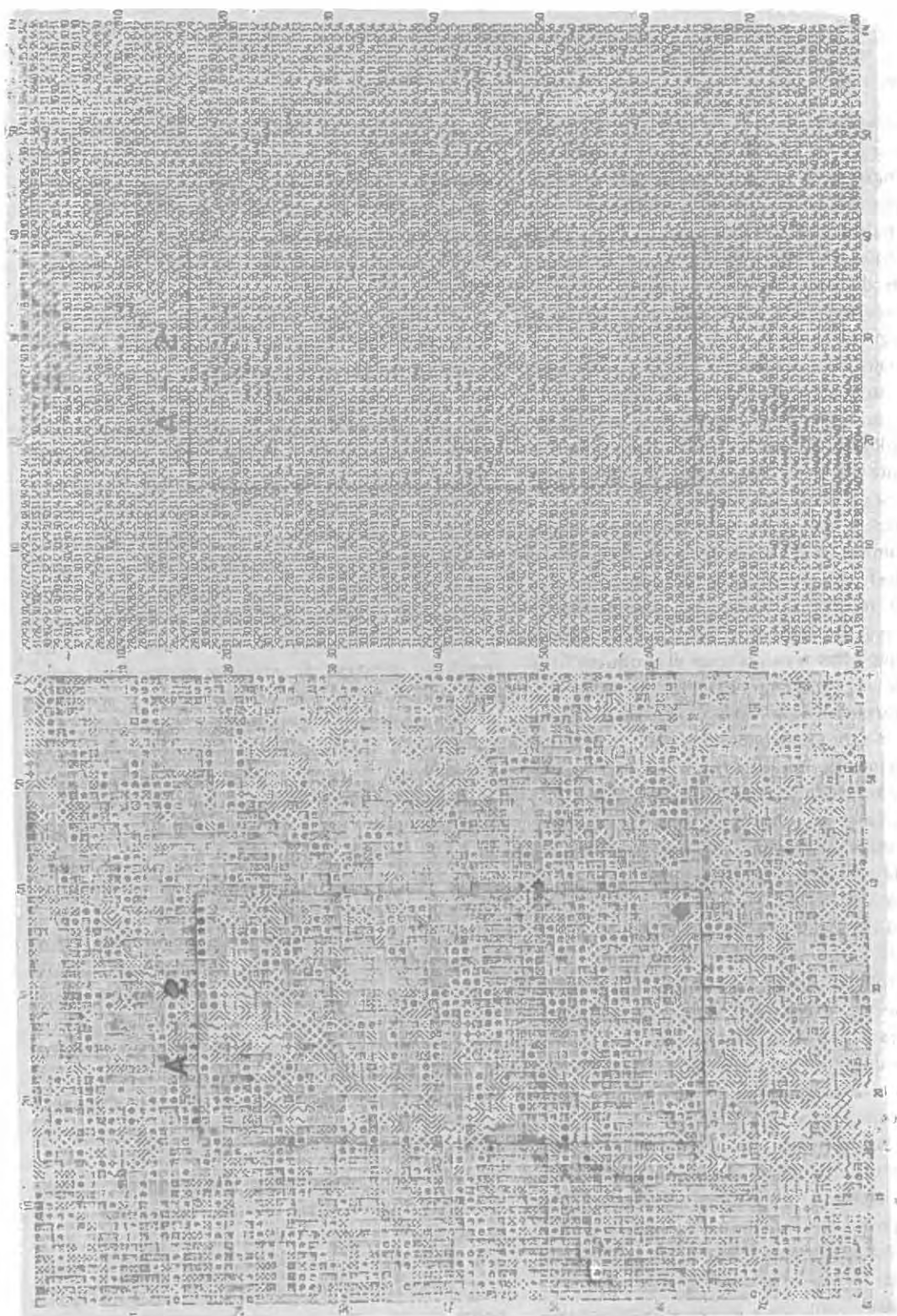


Fig. 14. Ejemplo de un mapa de la razón de bandas 4/6 con simbología gradacional y digital de una zona de interés seleccionado en base a su similitud con El Abra (su ubicación aparece en la Fig. 9).

DISCUSION Y CONCLUSIONES

DISCUSION

El uso de imágenes Landsat como ayuda para resolver diversos problemas geológicos (geotecnia, hidrogeología, geología regional, análisis estructurales, exploración, etc.) ha sido enfatizado en numerosas publicaciones (Ej. U.S.G.S. Prof. paper 929, 1976) a pesar de que según algunos autores las bandas del espectro electromagnético que registran estos satélites, no son las más adecuadas para fines geológicos (Henderson, 1978).

El trabajo realizado por el IIG y MMAJ en la cordillera andina, si bien contó con serias limitaciones (esencialmente, el desconocimiento del ambiente geológico de parte de los técnicos japoneses) permite extraer conclusiones generales sobre el uso de esta moderna herramienta.

Las técnicas analógicas empleadas directamente para discriminar zonas alteradas o rocas favorables (granitoides) para yacimientos del tipo cobre porfídico, no mostraron resultados muy satisfactorios. La causa de estos resultados, puede deberse al hecho que estas técnicas usan el producto fotográfico de las imágenes Landsat directamente. Las transparencias empleadas tienen las limitaciones que son reproducciones, a escala 1:1.000.000 o ampliaciones de esa escala, y sobre todo que el número de tonos de gris que aportan, base de todo el análisis, es escaso. Por otro lado, las combinaciones de estos productos hace que se produzcan pérdidas de resolución o distorsiones como en el caso de los visores. Esto incide en que al analista le es difícil distinguir o definir el elemento a usar en toda el área como patrón de comparación.

Estos problemas se vieron claramente expresados en que la "extracción" de granitoides obtenida hubiera sido distinta si se hubiera usado otro yacimiento del mismo tipo como modelo. En este aspecto las técnicas digitales parecen tener mucho mayores posibilidades. Sin embargo, técnicas analógicas usadas en forma indirecta pueden y deben ser de gran utilidad en programas de exploración minera. En efecto, la preparación de mapas regionales fotogeológicos, preliminares, en áreas con escasos antecedentes geológicos de terreno puede ser hecha en forma satisfactoria, más aún, si es complementado con fotos aéreas convencionales; por otro lado, la detección de lineamientos y es-

tructuras mayores que pueden estar asociadas genéticamente a yacimientos, parece ser una de las mayores ventajas del sistema Landsat y sobre lo cual hay una voluminosa bibliografía. (Ejs. Fernández y otros (1974); Offield y otros (1977); Brockmann y otros (1977); Salas (1977), Hodgson (1977), etc.).

El mapa fotogeológico obtenido en este trabajo en base a las imágenes Landsat blanco y negro, complementado con fotos aéreas convencionales, fue bastante satisfactorio. Una limitación para obtener mejores resultados fue que no se usaron, para estos fines, imágenes falso color que aparentemente aportan muchos antecedentes. Fernández y Brockman (1974) trabajando en un área de características relativamente similares llegaron a la conclusión que en general se pueden distinguir un 40% más de elementos analizando estas composiciones de color que en las imágenes blanco y negro. A este respecto la técnica *díazo* para producir este tipo de imágenes parece tener grandes posibilidades por su bajo costo y sencillez.

Son numerosos los ejemplos de la aplicación de técnicas digitales en el análisis de imágenes Landsat con fines de exploración minera (Albert y Chavez (1977); Schmidt (1976); Schmidt y Bernstein (1977); Lyon (1977); Halbouty (1976); Vincent (1977), Hord (1977); etc., y específicamente en la discriminación de zonas alteradas (Rowan y otros (1974), (1977), etc.).

Conjuntamente a las composiciones en falso color, una de las técnicas digitales más usadas es la de razones de banda (band ratio) del espectro electromagnético para realzar o distinguir tipos de suelos o rocas alteradas (Vincent 1977b). Se están haciendo experiencias para medir en terreno los rangos espectrales de asociación de minerales o rocas (spectral signatures) que son de interés para la exploración de un determinado tipo de yacimientos, para luego, en base a esos valores y usando estas técnicas, seleccionar áreas en zonas de geología favorables, no sólo con imágenes de satélite sino también con imágenes multispectrales obtenidas por métodos aerotransportados.

Las razones de bandas y las técnicas de con-

traste permiten distinguir y separar valores de reflectancia dentro del amplio espectro que registra cada banda del satélite. En nuestro caso se usó la técnica de razones de banda aplicada a un área patrón, sin contar con datos de terreno detallados. Comparando esta área patrón con otras zonas, se seleccionaron 19 áreas de interés, de las cuales 5 parecían promisorias para estudios de terreno; de éstas, 2 contenían alteración fuerte. Estos resultados fueron muy superiores a los analógicos sobre todo en la ubicación geográfica de las áreas.

Los resultados obtenidos de la aplicación de la técnica digital con propósitos prospectivos, se consideran moderadamente satisfactorios en cuanto a distinguir zonas de posible interés, si bien, la forma y distribución de la alteración en cada zona fue bastante diferente a lo observado en el terreno.

CONCLUSIONES

- Las imágenes Landsat son un valioso complemento a todo trabajo de exploración minera. Las imágenes blanco y negro y las composiciones de color, obtenidas por diversas técnicas de las cuales el visor y la técnica *díazo* pare-

cen ser las más comunes, deberá ser de valiosa ayuda para preparar mapas fotogeológicos preliminares, sobre todo para distinguir rasgos estructurales que puedan estar relacionados a la ocurrencia de yacimientos.

- De las técnicas directas usadas para discriminar rocas alteradas, el análisis digital parece ser el de mayores expectativas. Es necesario, sin embargo, una serie de experiencias previas, con obtención de datos en terreno, para su aplicación en forma amplia. Por otro lado el alto costo de los equipos requeridos para efectuar estos análisis hacen necesario un cuidadoso estudio del factor costo-beneficio del programa en cuestión. En nuestro caso el mapeo geológico 1:50.000 unido a técnicas geoquímicas regionales fue ampliamente satisfactorio para definir zonas de interés.
- Debido a que el principio inherente a todo análisis de imágenes es la comparación con una realidad de terreno, la interpretación de las imágenes debe ser hecha, incluso cuando se usan las técnicas más sofisticadas, con participación directa del geólogo que conoce el terreno y quién, en definitiva, debe resolver el problema planteado.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue posible gracias al convenio suscrito por la Japan International Cooperation Agen-

cy, Metal Mining Agency, Corporación del Cobre y el Instituto de Investigaciones Geológicas.

ANEXO 1.

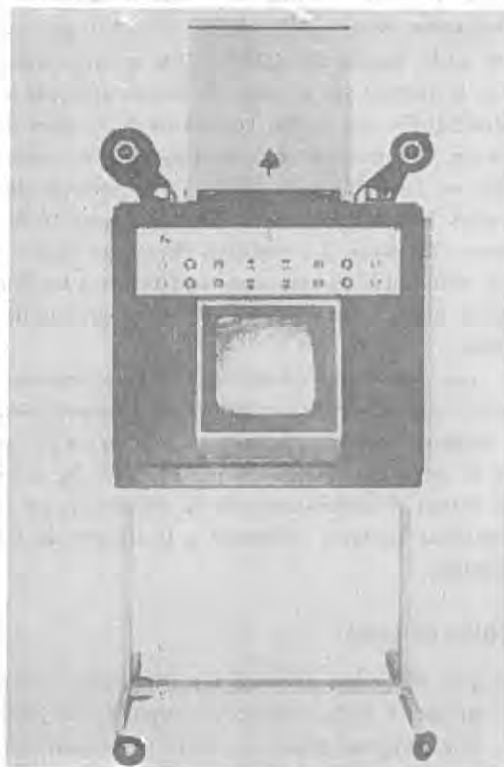
VISOR MULTIBANDA MODELO 600 I²S

La composición es hecha de la combinación de hasta 4 juegos de filtros de los colores primarios y películas de diferentes longitudes de ondas.

La selección de lentes, filtros y la intensidad de luz para cada lente puede ser seleccionada independientemente.

Especificaciones

Película	:	9,5 x 250 pies
Registro	:	Coordenadas x - y $\pm 0,19$
Pantalla	:	9" x 9"
Lentes	:	150 m/m (4) f5-b.
Energía	:	110 v, 50-60 Hz, 25 Amps
Dimensiones	:	30" x 24" x 44"
Peso	:	45 kg aprox.



ANEXO 2.

MULTICOLOR DATA SYSTEM MODELO 4200C

Este sistema ha sido desarrollado para extraer información de imágenes fotográficas de sensores remotos, utilizando un sistema óptico electrónico.

Funciones

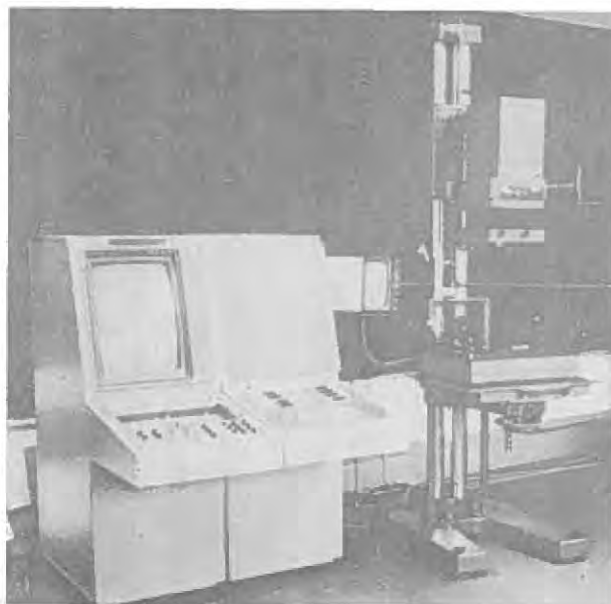
- Preparación de composiciones de color
- Extracción de modelos espectrales
- Clasificación y extracción de rasgos
- Interpretación de áreas
- Calibración
- Otras funciones optativas

Partes

- Multicámara de TV
- Plataforma para películas
- Unidad de control de video
- Unidad de control multicolor
- Monitor de color
- Convertido de frecuencia

Especificaciones

Input	:	Cámara de TV
Registro	:	Electromecánico
Niveles de gris	:	64 pasos para cada color
Clasificación	:	Automática
Output de la clasificación	:	En color, listado digital
Unidad de área	:	
Output	:	En color, numéricamente.



REFERENCIAS

- ALBERT, N.R.; CHAVEZ, P.S. 1977. Computer-enhanced Landsat imagery as a tool for mineral exploration in Alaska. USGS. Prof. Paper, 1015, p. 193 - 200.
- BROCKMANN, C.E.; BALLON, R.; CLAURE, H. 1977. Analysis of Geologic Structures based on Landsat-1 Images, in W.L. Smith, ed, Remote Sensing Applications for mineral exploration. Dowden, Hutchinson and Ross, p. 292 - 317.
- FAUNDEZ, U.T. 1977. Tipología de sistemas en percepción remota. Univ. de Chile, Fac. Ciencias Humanas, 80 p.
- FERNANDEZ, A.; BROCKMANN, C. 1974. Aplicación y evaluación de imágenes ERTS de composición de color al inventario de los recursos naturales, Rev. Téc. de YPFB, V III, p. 25 - 76.
- FERNANDEZ, A.C.; CLAURE, V.H.; ALCAZAR, F.G. 1974. Lineamientos en imágenes ERTS, su significado geológico y su aplicación en la exploración de minerales, Rev. Téc. YPFB, V. III, N° 3, p. 261 - 291.
- GONZALEZ, M.; DALANNAIS, G. 1974. La percepción remota multibanda como un medio analítico para algunos aspectos del suelo, el agua y las plantas. Inst. Recursos Nat. CORFO, 110 p.
- HALBOUTY MICHEL. 1976. Application of Landsat imagery to petroleum and mineral exploration A.A.P.G. Bull., V. 60, p. 745 - 793.
- HENDERSON, F.B. 1978. Future Geologic Remote sensing from Space - Potencial and Problems. (Abstract) Second Circum Pacific. Energy and Mineral Resources Conference A.A.P.G. Bull., V. 62, p. 1220.
- HODGSON, R.A. 1977. Regional linear analysis as a guide to mineral resource exploration using Landsat data. U.S. Geol. Survey. Prof. Paper 1015, p. 155 - 169.
- HORD, M. 1977. Digital enhancement of Landsat MSS data for mineral exploration, in W.L. Smith, ed., Remote Sensing Applications for mineral exploration, Dowden, Hutchinson, Ross Incl. p. 235 - 250.
- HUETE, C.; MAKSAEV, V.; MOSCOSO, R.; ULRIKSEN, C.; VERGARA, H. 1977. Antecedentes Geotecnológicos de Rocas Intrusivas y Volcánicas en la cordillera de Los Andes comprendida entre la Sierra de Moreno, el Río Loa y los 21° y 22° Lat. Sur, II Región, Chile. Rev. Geol. de Chile 4, p. 35 - 41.
- LYON, R.I.P. 1977. Mineral exploration applications of digitally processed Landsat imagery. USGS. Prof. Paper 1015, p. 271 - 292.
- MAKSAEV, V. 1978. Geología de los Cuadrángulos Chitigua y Cerro Palpana al oeste del curso superior del Río Loa, Región de Antofagasta, Memoria de prueba, Depto. Geología, U. de Chile, 245 p.
- OFFIELD, T.W.; ABBOTT, E.A.; GILLESPIE, A.R. and LOGUERCIO, S.O. 1977. Structure mapping on enhanced Landsat images of southern Brasil: Tectonic control of mineralization and speculations on metallogeny, Geophysics, V. 42, N° 3, p. 482 - 500.
- ROWAN, L.C.; GOETZ, F.H. and ASHLEY, R.P. 1977. Discrimination of hydrothermally altered and unaltered rocks in visible and near infrared multispectral images, Geophysics, V. 43, p. 522 - 535.
- ROWAN, L.C.; WETHAUER, P.H.; GOETZ, F.H.; BILLINGSLEY, F.C.; STEWART, J.H. 1974. Discrimination of rocks types and detection of hydrothermally altered areas in south-central Nevada by the use of computer enhanced ERTS Images, U.S. Geol. Survey Prof. Paper 883, 35 p.
- RUIZ, C.; AGUIRRE, L.; CORVALAN, J.; KLOHN, C.; KLOHN, E. y LEVI, B. 1965. Geología y Yacimientos Metalíferos de Chile. Inst. Invest. Geológicas, 306 p. Stgo., Chile.
- SALAS, G.P. 1977. Relations of mineral resources to linear features in Mexico as determined from Landsat data, U.S. Geol. Survey. Prof. Paper. 1015, 61 - 73 p.
- SCHMIDT, R.G. 1976. Detection of hydrothermal sulfide deposits Saindak area, western Pakistan, U.S. G.S. Prof. Paper, p. 89 - 91.
- SCHMIDT, R.G.; BERNSTEIN, R. 1977. Evaluation of improved digital processing techniques of Landsat data for sulfide mineral prospecting, U.S.G.S. Prof. Paper 1015, p. 201 - 212.
- VINCENT, R. 1977. Uranium exploration with computer-processed Landsat data, Geophysics, V. 42, N° 3, p. 536 - 541.
- VINCENT, R. 1977b. Geochemical mapping by spectral ratioing methods, in W.L. Smith, ed. Remote-Sensing Applications for mineral exploration, Dowden, Hutchinson, Ross Inc., p. 235 - 150.