


THE UNIVERSITY OF CHICAGO  
 LIBRARY  
 100 EAST EAST  
 CHICAGO, ILLINOIS 60607  
 TEL: 773-936-3200  
 FAX: 773-936-3200  
 WWW.CHICAGO.LIBRARY.EDU

UNIVERSITY OF CHICAGO LIBRARY

UNIVERSITY OF CHICAGO LIBRARY



J1143266(3)

UNIVERSITY OF CHICAGO LIBRARY

UNIVERSITY OF CHICAGO LIBRARY

MPN  
 01 (1)  
 8807



**INFORME  
SOBRE  
EL ANALISIS DE DATOS DE SATELITE  
PARA  
RECURSOS MINERALES  
EN  
LA REPUBLICA DE ARGENTINA**

**FEBRERO DE 1998**

**AGENCIA DE LA COOPERACION INTERNACIONAL DEL JAPON**

**AGENCIA DE MINERIA METALICA DEL JAPON**



1143266(3)

## PREFACIO

En respuesta a la solicitud del Gobierno de la República Argentina, el Gobierno del Japón decidió realizar el proyecto de exploración minera que comprende el análisis de imágenes de satélite y estudios geológicos a fin de comprobar el potencial minero de la Región Andina Oriental, provincias de La Rioja, San Juan y Mendoza, en las proximidades de la frontera con Chile, y encargó dicho estudio a la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA). Esta, a su vez, decidió encargar la realización del proyecto a la Agencia de Minería Metálica del Japón (MMAJ), un organismo especializado en estudios geológicos y de recursos minerales.

Dicho organismo envió para el primer año del estudio (ejercicio 1997) una misión integrada por cuatro especialistas, quienes realizaron los levantamientos en terreno del 6 de octubre al 13 de diciembre de 1997, cumpliendo completamente el cronograma propuesto, gracias a la colaboración del Ministerio de Economía y Obras y Servicios Públicos, Subsecretaría de Minería (SSM) y otras instituciones gubernamentales de la República Argentina.

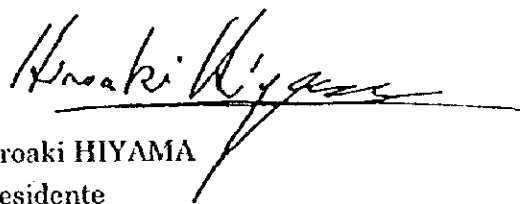
El presente informe reúne los resultados y las informaciones obtenidas en esta etapa del estudio, y forma parte integral del Informe Final.

Deseamos expresar nuestro profundo agradecimiento a las autoridades pertinentes del Gobierno de la República Argentina y de las Provincias involucradas, así como a los funcionarios de los ministerios de Relaciones Exteriores, Comercio Exterior e Industria, y de la Embajada del Japón en Argentina, y a todos quienes tuvieron la gentileza de brindar su estrecha cooperación a nuestra misión.

Febrero de 1998



Kimio FUJITA  
Presidente  
Agencia de Cooperación  
Internacional del Japón



Hiroaki HIYAMA  
Presidente  
Agencia de Minería  
Metálica del Japón



## RESUMEN

### 1. Generalidades del análisis

El presente análisis forma parte integral del Estudio Básico de Cooperación para el Desarrollo de Recursos, y consistió en realizar la interpretación fotogeológica mediante las imágenes LANDSAT TM en las extensas áreas que abarcan desde el extremo sur de Bolivia hasta la provincia Mendoza de Argentina, cuyos resultados fueron cotejados con otras literaturas disponibles para analizar integralmente la geología, los yacimientos y las posibles áreas de mineralización, a fin de identificar las áreas con alto potencial de desarrollo. El Área del Estudio abarca unas 650.000 Km<sup>2</sup> cubiertas por 23 escenas de las imágenes LANDSAT TM.

Con el fin de analizar la geología y la estructura, así como para identificar las zonas de alteración del Área del Estudio, se generaron las imágenes compuestas de falso color, imágenes de "ratio" en 23 escenas, y subsiguientemente las imágenes digitales de falso color en mosaico.

Con el uso de estas imágenes compuestas de falso color y de "ratio", se interpretaron y analizaron la geología y estructura de la región para identificar las zonas de alteración. Finalmente, mediante un análisis integral, se estudiaron las áreas promisorias de alto potencial de reservas.

### 2. Resultados del análisis geológico y estructural

El Proterozoico que forma el basamento del Área del Estudio y que está constituido por múltiples rocas metamórficas, afloran principalmente en Argentina, no pudiendo ser identificado en Chile. La distribución de este basamento presenta diferentes características al norte y sur de 27°S.

En el segmento norte donde se ubican las provincias Jujuy y Salta (al noreste del Área del Estudio), los bloques de las rocas del basamento constituyen el núcleo de las montañas locales. En general, las rocas de basamento se distribuyen de manera continua con rumbo N-S a NNE-SSO, y se halla separado de otras unidades mediante grandes lineamientos del mismo rumbo. El basamento se halla dividido en dos segmentos, norte y sur, a partir de 24,5°S, entre Jujuy y Salta. En el segmento sur, dos grandes franjas se distribuyen con un ancho de 40 a 50 Km, mientras que en el norte, convergen en una, reduciéndose drásticamente el ancho a 20 Km. Más al norte de 22°S, no afloran las rocas. En especial al sudeste y noroeste de Salta, se identificó un lineamiento de NO-SE en las imágenes. Este controla fuertemente la disposición del basamento, sugiriendo la presencia de una línea tectónica de basamento. En este informe, se ha denominado esta línea como "Línea Tectónica Calama".

El segmento sur de 27°S donde se ubica la provincia San Juan (al sudeste del Area del Estudio), las rocas del basamento constituyen montañas tipo montañas en bloque independientes. Las principales montañas se distribuyen en forma discontinua con un ancho de unos 40 Km y largo de 100 Km, con rumbo N-S a NNO-SSE o NO-SE. Estos se hallan delimitados en los bordes E-O con líneas casi rectas, sugiriendo la presencia de grandes fracturas, aunque no se han identificado lineamientos en las imágenes. La disposición del basamento de rumbo NO-SE alrededor de 30°S constituye una de las características estructurales importantes en esta área. La formación de un desnivel muy pronunciado en el margen sudoeste de las montañas del Proterozoico entre 30 y 31°S, sugiere la presencia de una línea tectónica de basamento importante en el mismo rumbo. Asimismo, las montañas proterozoicas ubicadas al norte de esta área (alrededor de 29°S) que se distribuyen con un rumbo regional de NO-SE, sugieren la presencia de una fractura del mismo rumbo regional. Esta línea será denominada tentativamente como "Línea Tectónica La Rioja".

En la zona fronteriza entre Argentina y Bolivia, al noreste del Area del Estudio (al norte de 24°S), el área de distribución del Paleozoico constituye extensas montañas de plegamiento N-S que presentan múltiples lineamientos. En especial, el Ordovícico de esta zona se caracteriza por el espeso estrato de rocas pelíticas que sugieren facies abisales, y se deduce la presencia de una cuenca sedimentaria grande y profunda en el Paleozoico Inferior. Al sur de 27°S que corresponde al segmento sur del Area del Estudio, el Paleozoico se distribuye en la frontera entre Argentina y Chile. En el segmento entre 27°S y 24°S, la distribución del Paleozoico es muy limitada, sugiriendo que la cuenca sedimentaria en ese período ha sido pequeña. Los dos extremos sur y norte de este segmento, coinciden con la ubicación de una posible línea tectónica de basamento, y probablemente forma una zona de elevación relativa con posterioridad al Proterozoico.

Las rocas graníticas paleozoicas se distribuyen con rumbo casi N-S, en todo el Area del Estudio, al igual que cada uno de los cuerpos de rocas. Las rocas graníticas del Mesozoico y Terciario se hallan principalmente dentro del territorio chileno, y se disponen al oeste del afloramiento de rocas graníticas paleozoicas, de rumbo N-S. La forma de cada uno de los cuerpos de rocas es variable, y el rumbo regional es de NNE-SSO más al norte del 26°S y de NNO-SSE al sur. En Argentina, estas rocas sólo afloran en algunas partes al noroeste.

El volcanismo del Paleoceno a Eoceno sólo se presentó al extremo oeste del Area del Estudio, y sus productos se distribuyen en Chile entre 24°S y 28,5°S, con rumbo N-S. Se asocian estrechamente con los cuerpos de rocas graníticas terciarias. El volcanismo del Mioceno y Plioceno predomina al norte de 27°S. Solamente existe una cadena volcánica que se distribuye a lo largo de la cordillera con rumbo N-S, aunque en Argentina existen otras cuatro cadenas derivadas de la principal, y que se distribuyen paralelamente con rumbo NO-SE a ONO-ESE con un intervalo de unos 100 Km. Esto sugiere que en Mioceno



y Plioceno existió una línea de fisura de NO-SE a ONO-ESE que provocaba las actividades volcánicas en las líneas bifurcadas.

El volcanismo del Cuaternario se delimita solamente en el segmento norte de 28°S, y las principales líneas de productos volcánicos coinciden con la distribución de los productos del Mioceno y Plioceno. Sin embargo, la línea bifurcada sólo se identifica en la tercera línea (26°S) contando desde el norte.

### **3. Zonas de alteración identificadas**

Las zonas de alteración muestran diferente distribución en el norte y sur de 27°S. En el segmento norte de 27°S, las zonas de alteración abarcan grandes extensiones, mientras que en el sur, su distribución es limitada.

Las zonas de alteración distribuidas en la provincia metalogénica del Mioceno a Plioceno Inferior que está al norte de la Línea Tectónica La Rioja, están divididas en dos grupos, norte y sur, por la Línea Tectónica Calama de NO-SE a 24°S.

En el segmento sur de la Línea Tectónica La Rioja (provincia metalogénica del Mioceno a Plioceno Inferior), las zonas de alteración se concentran en la parte oeste hasta 31°S, mientras que más al sur de la misma latitud, la densidad es sumamente baja.

### **4. Resultados del análisis integral**

De los resultados del análisis integral, se identificaron las siguientes áreas promisorias:

#### **(a) Pórfidos cupríferos**

- Zonas de alteración ubicadas en las proximidades, al sur y al norte de los yacimientos conocidos de la faja de pórfidos cupríferos del Eoceno Superior a Oligoceno Inferior, al norte del Area del Estudio.
- Grupo de zonas de alteración que incluyen los pórfidos cupríferos como Los Pelambres, El Pachón, Paramillos Sur, de la provincia metalogénica del Mioceno a Plioceno Inferior.
- Grupo de zonas de alteración de rumbo N-S, entre las Líneas Tectónicas Calama y La Rioja (se extiende hacia Bajo de la Alumbreira).

#### **(b) Yacimientos hidrotermales de oro-plata**

- Grupo de zonas de alteración (próximas al gran yacimiento de oro-plata) de las Fajas Maricunga y El Indio.
- Grupo de zonas de alteración de la Faja Castaño Nuevo al este de la Faja El Indio (su distribución muestra el mismo rumbo que la Faja El Indio).

#### **(c) Yacimientos vetiformes polimetálicos**

Es un grupo de zonas de alteración en Bolivia y al norte de Argentina.



## CONTENIDO

PREFACIO .....	i
RESUMEN.....	ii
CONTENIDO.....	v
LISTA DE FIGURAS Y TABLAS .....	vii
Capítulo 1 Introducción.....	1
1.1 Objetivo del análisis .....	1
1.2 Alcance del análisis .....	1
1.3 Datos utilizados .....	1
1.4 Metodología.....	5
1.5 Analistas .....	7
Capítulo 2 Descripción General del Area del Estudio.....	9
2.1 Situación general.....	9
2.2 Transporte .....	12
2.3 Geomorfología y ríos .....	13
Capítulo 3 Geología y Yacimientos del Area del Estudio.....	15
3.1 Descripción general de la geología .....	15
3.2 Estratigrafía .....	27
3.3 Estructura.....	32
3.4 Yacimientos .....	32
Capítulo 4 Procesamiento y Preparación de Imágenes.....	41
4.1 Preparación de las imágenes compuestas de falso color .....	41
4.2 Preparación de las imágenes de "ratio" .....	48
4.3 Preparación de imágenes en mosaico.....	50
Capítulo 5 Interpretación y Análisis de Imágenes.....	53
5.1 Area Alota .....	53
5.2 Area Atacama .....	62
5.3 Area Imilac .....	71
5.4 Area Salvador .....	81
5.5 Area Francisco.....	91
5.6 Area Puntilla .....	101

5.7	Area Vicuña .....	112
5.8	Area Illapel.....	121
5.9	Area Santiago.....	132
5.10	Area Tupiza .....	141
5.11	Area Susques .....	150
5.12	Area Pocitos .....	159
5.13	Area Antofagasta.....	167
5.14	Area Belén .....	176
5.15	Area Chilecito.....	184
5.16	Area San José.....	193
5.17	Area San Juan .....	202
5.18	Area Mendoza.....	212
5.19	Area Tarija.....	222
5.20	Area San Ramón.....	230
5.21	Area Salta.....	238
5.22	Area Rosario .....	246
5.23	Area Tucumán .....	254
Capítulo 6 Análisis de Imágenes Regionales del Area del Estudio .....		265
6.1	Características geológicas y estructurales de la región.....	265
6.2	Zonas de alteración y las provincias metalogénicas.....	276
6.3	Identificación de las áreas promisorias .....	278
Capítulo 7 Conclusión .....		281
Bibliografía .....		284

## LIST OF FIGURES

- Fig. 1 Location Map of the Study Area
- Fig. 2 Configuration of the Images Used
- Fig. 3 Simplified Geologic Map of the Study Area  
(adapted from UNESCO, 1978)
- Fig. 4 Tectonic Province of the Study Area (compiled from Sillitoe, 1981 etc.)
- Fig. 5 Geotectonic History of the Study Area (adapted from Coira et al., 1982)
- Fig. 6 Geologic Column of the Study Area  
(compiled from Boric et al., 1991 etc.)
- Fig. 7 Metallogenic Province of the Study Area (adapted from Sillitoe, 1991)
- Fig. 8 Changes of Brightness by Directional Reflectance
- Fig. 9 Simplified Geologic Map of the Alota Area
- Fig.10 LANDSAT TM False Color Composite Image of the Alota Area
- Fig.11 LANDSAT TM Ratio Image of the Alota Area
- Fig.12 Simplified Geologic Map of the Atacama Area
- Fig.13 LANDSAT TM False Color Composite Image of the Atacama Area
- Fig.14 LANDSAT TM Ratio Image of the Atacama Area
- Fig.15 Simplified Geologic Map of the Imilac Area
- Fig.16 LANDSAT TM False Color Composite Image of the Imilac Area
- Fig.17 LANDSAT TM Ratio Image of the Imilac Area
- Fig.18 Simplified Geologic Map of the Salvador Area
- Fig.19 LANDSAT TM False Color Composite Image of the Salvador Area
- Fig.20 LANDSAT TM Ratio Image of the Salvador Area
- Fig.21 Simplified Geologic Map of the Francisco Area
- Fig.22 LANDSAT TM False Color Composite Image of the Francisco Area
- Fig.23 LANDSAT TM Ratio Image of the Francisco Area
- Fig.24 Simplified Geologic Map of the Puntilla Area
- Fig.25 LANDSAT TM False Color Composite Image of the Puntilla Area
- Fig.26 LANDSAT TM Ratio Image of the Puntilla Area
- Fig.27 Simplified Geologic Map of the Vicuna Area
- Fig.28 LANDSAT TM False Color Composite Image of the Vicuna Area
- Fig.29 LANDSAT TM Ratio Image of the Vicuna Area
- Fig.30 Simplified Geologic Map of the Illapel Area
- Fig.31 LANDSAT TM False Color Composite Image of the Illapel Area
- Fig.32 LANDSAT TM Ratio Image of the Illapel Area
- Fig.33 Simplified Geologic Map of the Santiago Area
- Fig.34 LANDSAT TM False Color Composite Image of the Santiago Area
- Fig.35 LANDSAT TM Ratio Image of the Santiago Area
- Fig.36 Simplified Geologic Map of the Tupiza Area
- Fig.37 LANDSAT TM False Color Composite Image of the Tupiza Area

- Fig.38 LANDSAT TM Ratio Image of the Tupiza Area
- Fig.39 Simplified Geologic Map of the Susques Area
- Fig.40 LANDSAT TM False Color Composite Image of the Susques Area
- Fig.41 LANDSAT TM Ratio Image of the Susques Area
- Fig.42 Simplified Geologic Map of the Pocitos Area
- Fig.43 LANDSAT TM False Color Composite Image of the Pocitos Area
- Fig.44 LANDSAT TM Ratio Image of the Pocitos Area
- Fig.45 Simplified Geologic Map of the Antofagasta Area
- Fig.46 LANDSAT TM False Color Composite Image of the Antofagasta Area
- Fig.47 LANDSAT TM Ratio Image of the Antofagasta Area
- Fig.48 Simplified Geologic Map of the Belen Area
- Fig.49 LANDSAT TM False Color Composite Image of the Belen Area
- Fig.50 LANDSAT TM Ratio Image of the Belen Area
- Fig.51 Simplified Geologic Map of the Chilecito Area
- Fig.52 LANDSAT TM False Color Composite Image of the Chilecito Area
- Fig.53 LANDSAT TM Ratio Image of the Chilecito Area
- Fig.54 Simplified Geologic Map of the San Jose Area
- Fig.55 LANDSAT TM False Color Composite Image of the San Jose Area
- Fig.56 LANDSAT TM Ratio Image of the San Jose Area
- Fig.57 Simplified Geologic Map of the San Juan Area
- Fig.58 LANDSAT TM False Color Composite Image of the San Juan Area
- Fig.59 LANDSAT TM Ratio Image of the San Juan Area
- Fig.60 Simplified Geologic Map of the Mendoza Area
- Fig.61 LANDSAT TM False Color Composite Image of the Mendoza Area
- Fig.62 LANDSAT TM Ratio Image of the Mendoza Area
- Fig.63 Simplified Geologic Map of the Tarija Area
- Fig.64 LANDSAT TM False Color Composite Image of the Tarija Area
- Fig.65 LANDSAT TM Ratio Image of the Tarija Area
- Fig.66 Simplified Geologic Map of the San Ramon Area
- Fig.67 LANDSAT TM False Color Composite Image of the San Ramon Area
- Fig.68 LANDSAT TM Ratio Image of the San Ramon Area
- Fig.69 Simplified Geologic Map of the Salta Area
- Fig.70 LANDSAT TM False Color Composite Image of the Salta Area
- Fig.71 LANDSAT TM Ratio Image of the Salta Area
- Fig.72 Simplified Geologic Map of the Rosario Area
- Fig.73 LANDSAT TM False Color Composite Image of the Rosario Area
- Fig.74 LANDSAT TM Ratio Image of the Rosario Area
- Fig.75 Simplified Geologic Map of the Tucuman Area
- Fig.76 LANDSAT TM False Color Composite Image of the Tucuman Area
- Fig.77 LANDSAT TM Ratio Image of the Tucuman Area
- Fig.78 LANDSAT TM False Color Composite Mosaic Image of the Study Area
- Fig.79 Compiled Photogeologic Interpretation Map of the Study Area

Fig.80 Regional Interpretation Map of the Study Area

Table 1 Coordinates, Acquisition Date and Sun Position of Image of Each Area

## APPENDICES

Appendix 1	Known Ore Deposits and Mineralization Zones
Appendix 2	Characteristics of Photogeologic Units
Appendix 3	Occurrence of Photogeologic Units
Appendix 4	Alteration Zones

## LIST OF PLATES

Plate 1	Photogeologic Interpretation Map of the Alota Area (1:250,000)
Plate 2	Integrated Interpretation Map of the Alota Area (1:250,000)
Plate 3	Photogeologic Interpretation Map of the Atacama Area (1:250,000)
Plate 4	Integrated Interpretation Map of the Atacama Area (1:250,000)
Plate 5	Photogeologic Interpretation Map of the Imilac Area (1:250,000)
Plate 6	Integrated Interpretation Map of the Imilac Area (1:250,000)
Plate 7	Photogeologic Interpretation Map of the Salvador Area (1:250,000)
Plate 8	Integrated Interpretation Map of the Salvador Area (1:250,000)
Plate 9	Photogeologic Interpretation Map of the Francisco Area (1:250,000)
Plate 10	Integrated Interpretation Map of the Francisco Area (1:250,000)
Plate 11	Photogeologic Interpretation Map of the Puntilla Area (1:250,000)
Plate 12	Integrated Interpretation Map of the Puntilla Area (1:250,000)
Plate 13	Photogeologic Interpretation Map of the Vicuna Area (1:250,000)
Plate 14	Integrated Interpretation Map of the Vicuna Area (1:250,000)
Plate 15	Photogeologic Interpretation Map of the Illapel Area (1:250,000)
Plate 16	Integrated Interpretation Map of the Illapel Area (1:250,000)
Plate 17	Photogeologic Interpretation Map of the Santiago Area (1:250,000)
Plate 18	Integrated Interpretation Map of the Santiago Area (1:250,000)
Plate 19	Photogeologic Interpretation Map of the Tupiza Area (1:250,000)
Plate 20	Integrated Interpretation Map of the Tupiza Area (1:250,000)
Plate 21	Photogeologic Interpretation Map of the Susques Area (1:250,000)
Plate 22	Integrated Interpretation Map of the Susques Area (1:250,000)
Plate 23	Photogeologic Interpretation Map of the Pocitos Area (1:250,000)
Plate 24	Integrated Interpretation Map of the Pocitos Area (1:250,000)
Plate 25	Photogeologic Interpretation Map of the Antofagasta Area (1:250,000)

- Plate 26 Integrated Interpretation Map of the Antofagasta Area (1:250,000)
- Plate 27 Photogeologic Interpretation Map of the Belen Area (1:250,000)
- Plate 28 Integrated Interpretation Map of the Belen Area (1:250,000)
- Plate 29 Photogeologic Interpretation Map of the Chilecito Area (1:250,000)
- Plate 30 Integrated Interpretation Map of the Chilecito Area (1:250,000)
- Plate 31 Photogeologic Interpretation Map of the San Jose Area (1:250,000)
- Plate 32 Integrated Interpretation Map of the San Jose Area (1:250,000)
- Plate 33 Photogeologic Interpretation Map of the San Juan Area (1:250,000)
- Plate 34 Integrated Interpretation Map of the San Juan Area (1:250,000)
- Plate 35 Photogeologic Interpretation Map of the Mendoza Area (1:250,000)
- Plate 36 Integrated Interpretation Map of the Mendoza Area (1:250,000)
- Plate 37 Photogeologic Interpretation Map of the Tarija Area (1:250,000)
- Plate 38 Integrated Interpretation Map of the Tarija Area (1:250,000)
- Plate 39 Photogeologic Interpretation Map of the San Ramon Area (1:250,000)
- Plate 40 Integrated Interpretation Map of the San Ramon Area (1:250,000)
- Plate 41 Photogeologic Interpretation Map of the Salta Area (1:250,000)
- Plate 42 Integrated Interpretation Map of the Salta Area (1:250,000)
- Plate 43 Photogeologic Interpretation Map of the Rosario Area (1:250,000)
- Plate 44 Integrated Interpretation Map of the Rosario Area (1:250,000)
- Plate 45 Photogeologic Interpretation Map of the Tucuman Area (1:250,000)
- Plate 46 Integrated Interpretation Map of the Tucuman Area (1:250,000)
- Plate 47 Compiled Photogeologic Interpretation Map of the Study Area  
(1:2,000,000)
- Plate 48 Regional Interpretation Map of the Study Area (1:2,000,000)

### **LIST OF ATTACHED IMAGES**

- Attached Image 1 LANDSAT TM False Color Composite Image  
of the Alota Area (1:250,000)
- Attached Image 2 LANDSAT TM Ratio Image of the Alota Area (1:250,000)
- Attached Image 3 LANDSAT TM False Color Composite Image  
of the Atacama Area (1:250,000)
- Attached Image 4 LANDSAT TM Ratio Image of the Atacama Area  
(1:250,000)
- Attached Image 5 LANDSAT TM False Color Composite Image  
of the Imilac Area (1:250,000)
- Attached Image 6 LANDSAT TM Ratio Image of the Imilac Area (1:250,000)
- Attached Image 7 LANDSAT TM False Color Composite Image  
of the Salvador Area (1:250,000)
- Attached Image 8 LANDSAT TM Ratio Image of the Salvador Area  
(1:250,000)



- Attached Image 9 LANDSAT TM False Color Composite Image of the Francisco Area (1:250,000)
- Attached Image 10 LANDSAT TM Ratio Image of the Francisco Area (1:250,000)
- Attached Image 11 LANDSAT TM False Color Composite Image of the Puntilla Area (1:250,000)
- Attached Image 12 LANDSAT TM Ratio Image of the Puntilla Area (1:250,000)
- Attached Image 13 LANDSAT TM False Color Composite Image of the Vicuna Area (1:250,000)
- Attached Image 14 LANDSAT TM Ratio Image of the Vicuna Area (1:250,000)
- Attached Image 15 LANDSAT TM False Color Composite Image of the Illapel Area (1:250,000)
- Attached Image 16 LANDSAT TM Ratio Image of the Illapel Area (1:250,000)
- Attached Image 17 LANDSAT TM False Color Composite Image of the Santiago Area (1:250,000)
- Attached Image 18 LANDSAT TM Ratio Image of the Santiago Area (1:250,000)
- Attached Image 19 LANDSAT TM False Color Composite Image of the Tupiza Area (1:250,000)
- Attached Image 20 LANDSAT TM Ratio Image of the Tupiza Area (1:250,000)
- Attached Image 21 LANDSAT TM False Color Composite Image of the Susques Area (1:250,000)
- Attached Image 22 LANDSAT TM Ratio Image of the Susques Area (1:250,000)
- Attached Image 23 LANDSAT TM False Color Composite Image of the Pocitos Area (1:250,000)
- Attached Image 24 LANDSAT TM Ratio Image of the Pocitos Area (1:250,000)
- Attached Image 25 LANDSAT TM False Color Composite Image of the Antofagasta Area (1:250,000)
- Attached Image 26 LANDSAT TM Ratio Image of the Antofagasta Area (1:250,000)
- Attached Image 27 LANDSAT TM False Color Composite Image of the Belen Area (1:250,000)
- Attached Image 28 LANDSAT TM Ratio Image of the Belen Area (1:250,000)
- Attached Image 29 LANDSAT TM False Color Composite Image of the Chilecito Area (1:250,000)
- Attached Image 30 LANDSAT TM Ratio Image of the Chilecito Area (1:250,000)
- Attached Image 31 LANDSAT TM False Color Composite Image of the San Jose Area (1:250,000)
- Attached Image 32 LANDSAT TM Ratio Image of the San Jose Area (1:250,000)

- Attached Image 33 LANDSAT TM False Color Composite Image  
of the San Juan Area (1:250,000)
- Attached Image 34 LANDSAT TM Ratio Image of the San Juan Area  
(1:250,000)
- Attached Image 35 LANDSAT TM False Color Composite Image  
of the Mendoza Area (1:250,000)
- Attached Image 36 LANDSAT TM Ratio Image of the Mendoza Area  
(1:250,000)
- Attached Image 37 LANDSAT TM False Color Composite Image  
of the Tarija Area (1:250,000)
- Attached Image 38 LANDSAT TM Ratio Image of the Tarija Area (1:250,000)
- Attached Image 39 LANDSAT TM False Color Composite Image  
of the San Ramon Area (1:250,000)
- Attached Image 40 LANDSAT TM Ratio Image  
of the San Ramon Area (1:250,000)
- Attached Image 41 LANDSAT TM False Color Composite Image  
of the Salta Area (1:250,000)
- Attached Image 42 LANDSAT TM Ratio Image of the Salta Area (1:250,000)
- Attached Image 43 LANDSAT TM False Color Composite Image  
of the Rosario Area (1:250,000)
- Attached Image 44 LANDSAT TM Ratio Image of the Rosario Area (1:250,000)
- Attached Image 45 LANDSAT TM False Color Composite Image  
of the Tucuman Area (1:250,000)
- Attached Image 46 LANDSAT TM Ratio Image of the Tucuman Area  
(1:250,000)
- Attached Image 47 LANDSAT TM False Color Composite Mosaic Image  
of the Study Area (1:2,000,000)

# Capítulo 1 Introducción

## 1.1 Objetivo del análisis

El presente análisis forma parte integral del Estudio Básico de Cooperación para el Desarrollo de Recursos, y contempla realizar la interpretación fotogeológica mediante los imágenes LANDSAT TM del Area del Estudio, cuyos resultados serán cotejados con otras literaturas disponibles para estudiar integralmente la geología, yacimientos y reservas de las áreas mineralizadas, y de esta manera identificar las áreas con alto potencial de desarrollo.

## 1.2 Alcance del análisis

El Area del Estudio abarca una superficie extensa desde el extremo sur de Bolivia, siguiendo la frontera entre Argentina y Chile en rumbo sur, hasta llegar a Santiago, Chile y Mendoza, Argentina (véase la Figura 1), cuyo término ocupa unas 650.000 Km<sup>2</sup> cubiertas por 23 escenas de las imágenes LANDSAT TM (véase la Figura 2).

## 1.3 Datos utilizados

### (1) Imágenes LANDSAT TM

Se utilizaron los datos obtenidos por LANDSAT No. 5, y grabados en CCT (cinta procesable por computadora) sistemáticamente corregida. Estos fueron comprados a la empresa norteamericana EOSAT (Earth Observation Satellite Company) y a EROS Data Center de USGS (United States Geological Survey), a través de Remote Sensing Technolgy Center of Japan. En la Tabla 1 se resumen las fechas de toma de las imágenes y la posición solar de las 23 escenas.

Previo a la adquisición, el equipo de estudio se ha contactado, a través de Remote Sensing Technolgy Center of Japan, con las dos organizaciones norteamericanas mencionadas a fin de informarse sobre la disponibilidad de los datos LANDSAT TM del Area del Estudio. Además, se tomaron en cuenta los datos faltantes, volumen de nube y de nieve, así como la temporada de observación, para seleccionar los datos óptimos para el análisis de imágenes.

Como se muestra en la Tabla 1, se utilizaron preferentemente los datos tomados

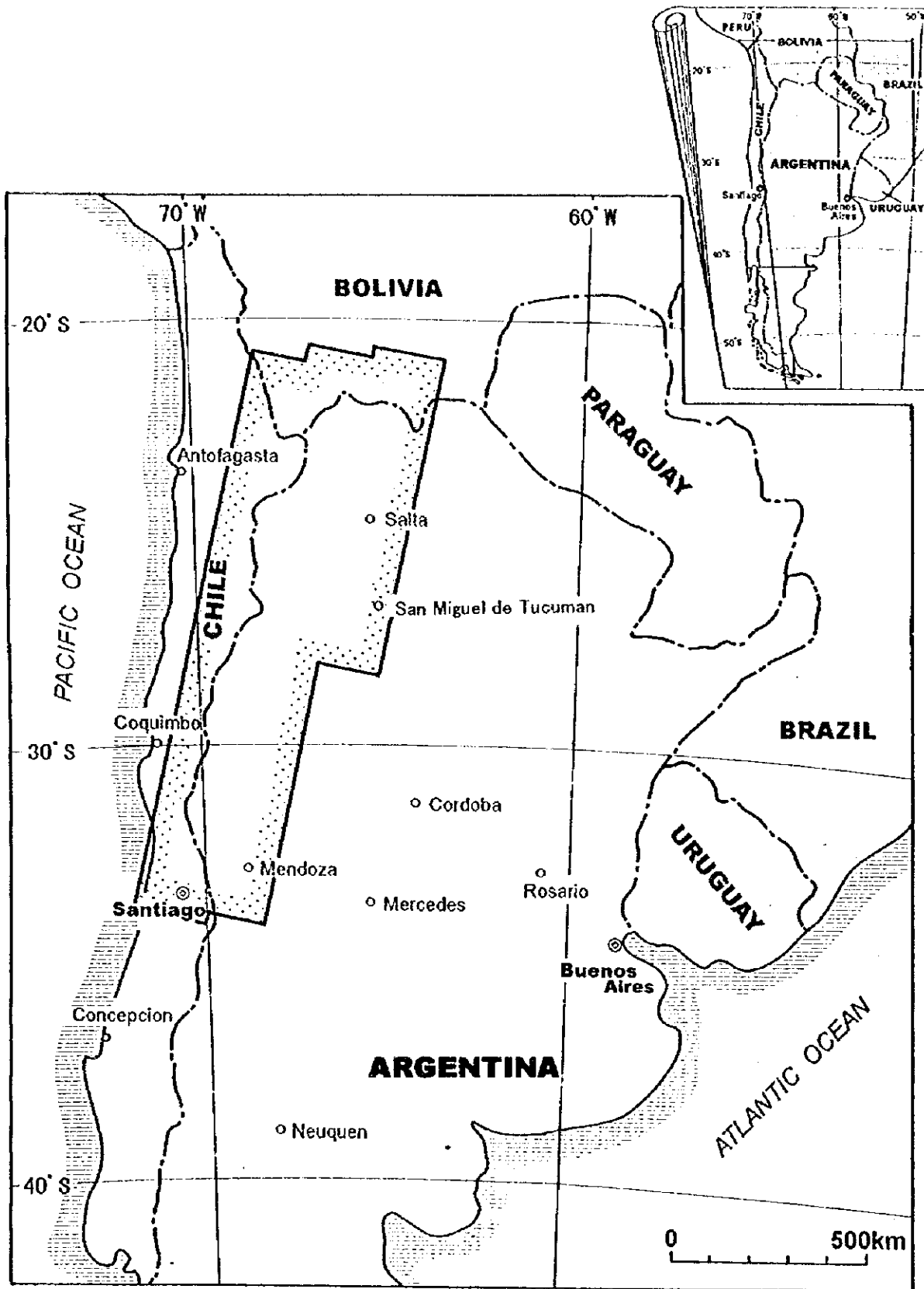


Fig. 1 Location Map of the Study Area

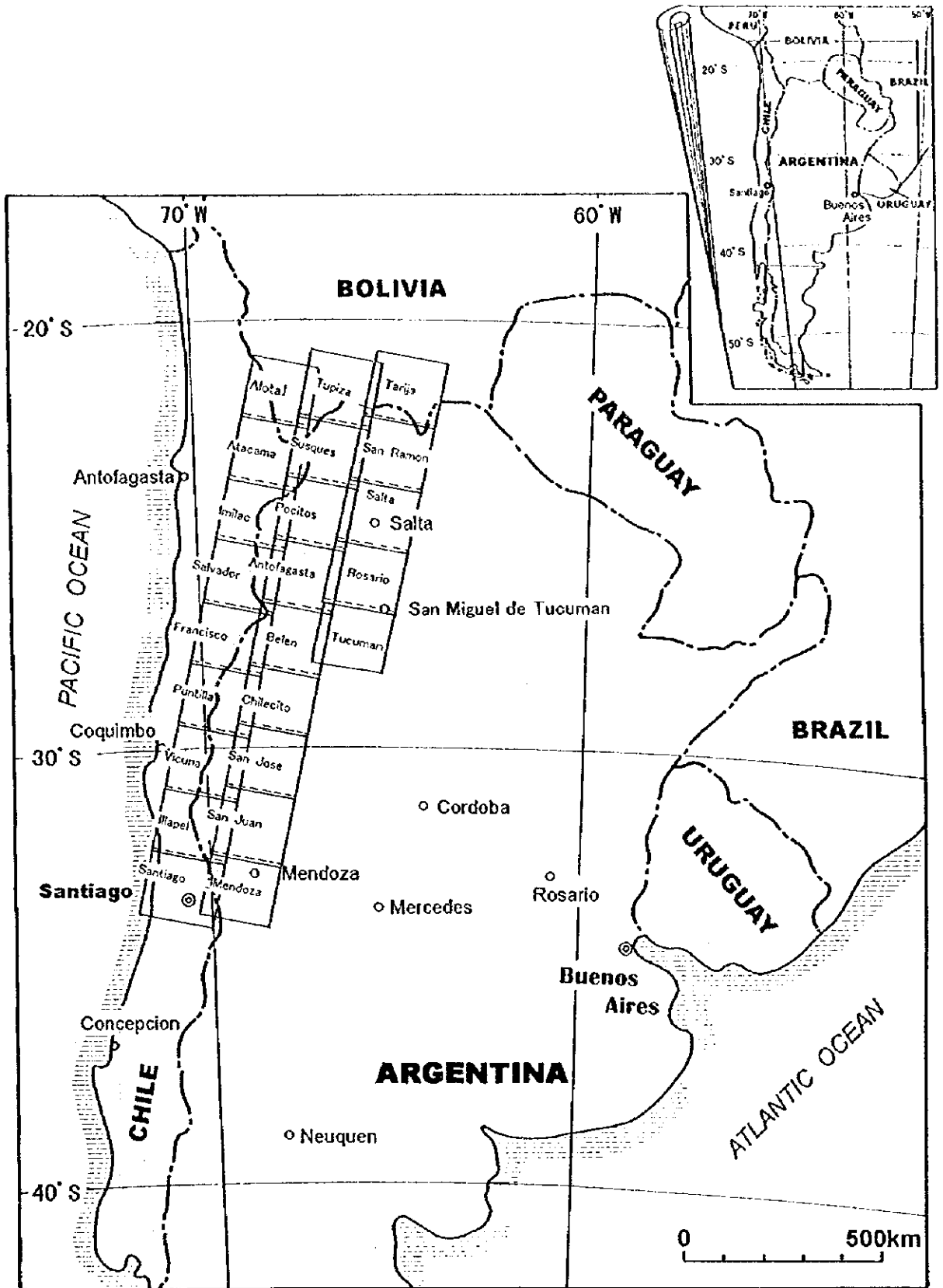


Fig. 2 Configuration of the Images Used

en verano, aunque para las nueve Areas (Vicuña, Santiago, San Juan, Mendoza, Tarija, San Ramón, Salta, Rosario y Tucumán), el equipo de estudio se vio obligado a utilizar los datos de invierno sea por el volumen de nube o por falta de datos.

En cuanto a los títulos de las imágenes, se procuró utilizar los nombres geográficos que aparecen en ellas, aunque algunos fueron abreviados cuando estos eran muy largos. En la Tabla 1 también se puede observar los nombres de las Areas utilizados en el presente Informe.

**Table 1 Coordinates, Acquisition Date and Sun Position of Image of Each Area**

Name of Area	Name of Area on Image	Path	Row	Data Acquisition Date	Sun Azimuth	Sun Elevation
Alota	Alota	233	75	1987/03/04	N76° E	46°
Atacama	San Pedro de Atacama	233	76	1987/03/04	N75° E	45°
Imilac	Imilac	233	77	1989/12/04	N85° W	57°
Salvador	El Salvador	233	78	1987/03/04	N73° E	44°
Francisco	Laguna del Francisco	233	79	1989/12/14	N89° W	57°
Puntilla	La Puntilla	233	80	1987/01/31	N84° E	48°
Vicuna	Vicuna	233	81	1989/07/07	N40° E	25°
Illapel	Illapel	233	82	1987/01/31	N82° E	47°
Santiago	Santiago	233	83	1989/07/07	N40° E	22°
Tupiza	Tupiza	232	75	1990/04/22	N53° E	38°
Susques	Susques	232	76	1991/02/04	N89° E	48°
Pocitos	Salar de Pocitos	232	77	1991/02/04	N87° E	48°
Antofagasta	Antofagasta de la Sierra	232	78	1987/02/09	N84° E	47°
Belen	Belen	232	79	1987/02/09	N82° E	47°
Chilecito	Chilecito	232	80	1987/02/09	N81° E	46°
San Jose	San Jose de Jachal	232	81	1987/02/09	N80° E	46°
San Juan	San Juan	232	82	1989/06/30	N40° E	23°
Mendoza	Mendoza	232	83	1989/06/14	N39° E	22°
Tarija	Tarija	231	75	1986/09/11	N59° E	44°
San Ramon	San Ramon de la Nueva Oran	231	76	1986/09/11	N58° E	43°
Salta	Salta	231	77	1986/09/11	N57° E	42°
Rosario	Rosario de Frontera	231	78	1986/09/11	N57° E	41°
Tucuman	San Miguel de Tucuman	231	79	1986/09/11	N57° E	40°

## (2) Literatura disponible

Se procedió a la revisión de las principales literaturas, cuya bibliografía aparece al final del Informe, incluyendo los mapas topográficos, mapas de distribución de yacimientos, etc.). Estas informaciones fueron utilizadas para el análisis integral y la preparación del Informe.

### **1.4 Metodología**

La interpretación fotogeológica de las imágenes satelitales incluye los siguientes cinco procedimientos:

- (1) Preparativo (obtención y orientación de los datos satelitales, recopilación y revisión de los informes geológicos y de yacimientos disponibles)
- (2) Procesamiento y generación de imágenes
- (3) Interpretación fotogeológica y análisis integral (preparación del mapa de análisis integral, y cotejo con los mapas geológicos existentes)
- (4) Levantamiento en terreno y re-interpretación
- (5) Preparación del Informe

De estos cinco, el presente Estudio no incluye el procedimiento (4) levantamiento en terreno y re-interpretación.

Los criterios de diagnóstico fotogeológico y la simbología aplicados son los siguientes:

#### (a) Características fotográficas

- Tonos: blanco, blanco grisáceo, gris, gris azulado, gris verdoso, verde, verde oscuro, gris violeta, etc.
- Textura: muy fina, moderadamente fina, poco fina, lisa, etc.

#### (b) Expresiones morfológicas

- Modelo de drenaje: dendrítico, paralelo, reja, pinnado, etc.
- Densidad de drenaje: muy baja, baja, media, alta, muy alta
- Resistencia de rocas (a la erosión eólica, hídrica, etc.): muy baja, baja, moderada, alta y muy alta

- Sección transversal: perfil de las laderas
- Desarrollo de la estratificación: desarrollado, parcialmente desarrollado, macizo, etc.

(c) Cobertura superficial

- Vegetación: espesa, moderada y dispersa
- Cultivo: intenso, común y raro

Por otro lado, se deduce que los lineamientos interpretados e identificados de las imágenes satelitales representan las fracturas existentes en la superficie o a poca profundidad de la superficie, cuya interpretación se basa sobre los siguientes criterios, según la metodología común de la interpretación fotogeológica:

- (a) Presencia de escarpes de falla
- (b) Presencia de los valles extensos lineales (valles de falla)
- (c) Presencia de los ríos con cauce muy recto
- (d) Presencia de kerncol (paso de falla) y kernbut (escalón de falla)
- (e) Cuando la línea divisoria de los montes es recta y continua
- (f) Cuando la inclinación leve de las rocas sedimentarias se convierte drásticamente en acantilado, y que éste traza una línea recta y continua
- (g) Desplazamiento de crestas o cauces de ríos
- (h) Anomalia del drenaje de un cauce (cuando las corrientes primarias en forma de rejas se distribuyen linealmente, o drenajes angulares)
- (i) Cuando los lagos, termas, cráteres, nacimientos, derrumbes, o deslizamientos se distribuyen linealmente)
- (j) Presencia de deslizamiento de abanicos aluviales
- (k) Presencia de desniveles rectas de terrazas fluviales (generalmente planas)

Estos fenómenos, que constituyen las claves de interpretación, presentan diferentes características según las rocas, estructuras y edades geológicas de la zona, de tal manera que aparecen en diferentes grados según el lugar. En el caso específico del Area del Estudio, se identificaron múltiples fenómenos de (a), (b) y (c), y parcialmente los (d), (e), (f), (g) y (h).

En cuanto a los fenómenos (i), (j) y (k), para su interpretación se requiere utilizar las imágenes de escala grande o estereoscópicamente observar las imágenes de SPOT HRV o las fotografías aéreas.



## 1.5 Analistas

Hiroyuki FUJIOKA	Interpretación fotogeológica, análisis integral y preparación del informe (JMEC*)
Tokichiro TANI	Interpretación fotogeológica, análisis integral y preparación del informe (JMEC*)
Masataka OCHI	Interpretación fotogeológica, análisis integral y preparación del informe (JMEC*)
Ken OBARA	Interpretación fotogeológica, análisis integral y preparación del informe (JMEC*)
Susumu TAKEDA	Interpretación fotogeológica y análisis integral (JMEC*)
Tetsuo SATO	Interpretación fotogeológica y análisis integral (JMEC*)
Yoneharu MATANO	Procesamiento de imágenes (JMEC*)
Kohei HIDA	Procesamiento de imágenes (JMEC*)
Osamu MIYAISHI	Procesamiento de imágenes (JMEC*)
Jiro KAMATA	Procesamiento de imágenes (JMEC*)
Tomoji SANGA	Procesamiento de imágenes (JMEC*)

\*JMEC: Japan Mining Engineering Center for International Cooperation



## Capítulo 2 Descripción General del Area del Estudio

### 2.1 Situación general

El Area del Estudio abarca la latitud sur de 21° a 34° y longitud oeste de 64° a 72°, cubierta por las 23 escenas de LANDSAT TM. Dado que el Area del Estudio pertenece a Argentina, Chile y Bolivia, a continuación se presenta un resumen de los tres países.

#### (1) Argentina

- Características geográficas:

Nombre oficial: República Argentina

Es un estado republicano que ocupa la parte sudeste del continente sudamericano. Se independizó en 1810, con lo que adoptó el nombre de Argentina (la Constitución Nacional fue promulgada en 1853). En la parte oeste es atravesado por la Cordillera de los Andes en dirección norte - sur, y a su pie se extienden la estepa y el desierto. Las partes noreste, centro-este y sur son denominadas Chaco, Pampa y Patagonia, respectivamente.

- Territorio nacional y población:

Superficie: 2.766.890 Km<sup>2</sup>

Población 34.670.000 habitantes(1996)

Capital: Buenos Aires (2.960.000 habitantes, 1991)

- Provincias: El país está constituido por 23 provincias y un Distrito Federal. De éstas, el Area del Estudio está incluido dentro de siete provincias, a saber: Salta, Jujuy, Catamarca, Tucumán, La Rioja, San Juan y Mendoza.

- Composición étnica: Descendientes europeos (principalmente españoles e italianos): 85 %, Indígenas y mestizos: 15 %.

- Religión: Católica romana (religión nacional): 90 %, Protestantismo: 2 %, Judaísmo: 2 %, Otras: 6 %.

- Lengua: Español (lengua oficial)

- Industrias: El principal sector industrial del país es la agricultura y ganadería, con mayor producción de trigo y maíz. La población agropecuaria y pesquera representa el 11 % del total (1995). Es uno de los principales países exportadores de carne. Entre los rubros de exportación se incluyen también la lana y caseína. El país está impulsando ambiciosamente la industrialización en los últimos años. La agricultura, industria y los servicios ocupan el 6 %, 31 % y 63 % del PIB, respectivamente (1992).

- Minería: Los principales minerales explotados son plomo, zinc, estaño, cobre, mineral de hierro, manganeso, petróleo, uranio, etc. Producción de principales metales: plomo 10.521 t, zinc 32.104 lb, oro 837 kg, plata 47,8 t (1995).

Las minas bajo explotación son:

-El Aguilar (Provincia de Jujuy, plomo, zinc, plata)

-Farallón Negro (P. de Catamarca, oro)

- Clima: El clima es favorable en general, salvo en el interior donde es árido, y en las proximidades del polo sur.

## (2) Chile

- Características geográficas:

Nombre oficial: República de Chile

Es un país republicano situado al sur del continente sudamericano ocupando la costa del Pacífico. Históricamente perteneció al Imperio Incaico, convirtiéndose en colonia española en 1541. El movimiento emancipador en Chile se inició en la segunda mitad del Siglo XVIII, llegando a establecer el gobierno autónomo en 1810. La tropa emancipadora presidida por O'Higgins y asistida por San Martín, derrotó a los españoles declarando la independencia en 1818.

El territorio nacional ocupa las vertientes del Pacífico de la Cordillera de los Andes. Ofrece una gran desproporción entre su longitud y su anchura: mientras que en el sentido de los meridianos es de 4.480 Km, su anchura varía entre 74 a 320 Km. En el extremo norte, el clima es desértico; en Chile central (aproximadamente desde el valle del río Aconcagua hasta el del Bío-Bío) el clima es mediterráneo; más al sur de la latitud sur 42°, el clima es frío y húmedo. Los principales cerros son Ojos del Salado y Tupungato de la Cordillera de los Andes.

- Territorio nacional y población:

Superficie: 756.950 Km<sup>2</sup>

Población: 14.330.000, habitantes (1996)

Capital: Santiago (5,08 millones de habitantes, 1995)

- Provincias: El país está dividido en 13 regiones. De éstas, el Area del Estudio está incluido dentro de cinco regiones, a saber: Antofagasta, Atacama, Coquimbo, Valparaíso y Santiago.
- Composición étnica: Mestizos (entre los descendientes europeos principalmente españoles y los grupos indígenas, como Araucano): 95 %, Indígenas: 3 %, Otros: 2 %.
- Religión: Católica romana: 89 %, Protestantismo: 11 %, Judaísmo: unos pocos.
- Lengua: Español (lengua oficial)
- Industrias: La agricultura se desarrolla en el valle central, con mayor producción de trigo, papas, maíz y remolacha azucarera. El sur se caracteriza por su gran reserva forestal, y por la pesquería. La ganadería se desarrolla en torno a la producción de carne y cuero. La población agroforestal y pesquera representa el 17,2 % del total (1995). La agricultura, minería, industria y servicios representan el 7,4 %, 8,0 %, 28,4 % y 56,2 % del PIB, respectivamente (1985). La exportación de los productos mineros

representa el 49,6 % del total (1995). Otros rubros importantes de exportación son: madera (7,1 %), productos pesqueros (9,8 %) y frutas (8,4 %).

- Minería: Además de cobre y salitre de Chile del norte, petróleo y carbón del sur, se explotan oro, plata, manganeso, etc. El cobre es el mineral de exportación más importante que representa el 41 %, mientras que otros minerales representan el 8,7 %. La producción total de cobre, oro y plata es de 2,5 millones de t., 44,6 t, y 1.041 t, respectivamente (1995).
- Clima: El extremo norte corresponde al clima árido y desértico. El valle central se halla dividida en varias cuencas, y pertenecen al clima mediterráneo. Más al sur de la latitud sur 42°, el clima es frío y húmedo. En general, es susceptible a la corriente fría del Perú de la Costa del Pacífico.

### (3) Bolivia

- Características geográficas:

Nombre oficial: República de Bolivia

Es un estado republicano que ocupa la parte central y oeste del continente sudamericano. Históricamente, perteneció al Imperio Incaico, y en 1533 fue convertido en colonia española tras haber sido conquistado por Francisco Pizarro. El interés de la región aumentó extraordinariamente cuando en 1544 fueron descubiertas las minas de plata del Potosí. Los minerales explotados por los indígenas fueron llevados a Europa por los españoles. Bolivia fue librado de los conquistadores por el movimiento insurreccional presidido por el mariscal Sucre, logrando su independencia en 1825, y adoptó el nombre Bolivia en homenaje al libertador Simón Bolívar. El país limita hacia el oeste con Chile y Perú. Es un país esencialmente andino y dentro de sus fronteras la cordillera alcanza su mayor amplitud tomando la forma de altiplano con altitud media de 3.962 m.s.n.m. Los principales lagos son el Titicaca y Poopó. Hacia el este de la llanura se levantan las sierras de 5.000 a 6.000 m de altura, y en la parte noreste se extienden las tierras bajas avenadas por los tributarios del Río Amazonas. La parte central a este está constituida por la llanura que se extiende hasta Brasil y Paraguay.

- Territorio nacional y población:

Superficie: 1.098.580 Km<sup>2</sup>

Población: 7,17 millones de habitantes (1996)

Capital constitucional: Sucre (130.000 habitantes, 1992)

Capital administrativa: La Paz (710.000 habitantes, 1992)

- Provincias: El país está dividido en nueve departamentos. De estos, el Area del Estudio está incluido dentro de dos departamentos, a saber, Potosí y Tarija.
- Composición étnica: Indígenas (Quechua y Aymara): 55 % Mestizos: 32 %, Descendientes europeos: 13 %.
- Religión: Católica romana: 95 %, Protestantismo y Otros: 5 %.
- Lenguas: Español 40 %, quechua y aymara (lenguas oficiales).

- **Industrias:** Los sectores industriales predominantes son la agricultura, pesca y minería. Los principales productos agrícolas son la caña de azúcar y papa. La ganadería se desarrolla en torno al ganado caprino, vacuno y alpaca. La población agroforestal y pesquera representa el 44,6 % (1995). Los principales rubros de exportación son los minerales (39 %), gas natural (9 %), piedras preciosas (11 %), soja (11 %) y madera (9 %).
- **Minería:** La explotación de la riqueza minera ha sido siempre el elemento motor de la economía. Los principales minerales explotados y exportados son estaño, plomo, cobre, oro, plata, zinc, antimonio, tungsteno, gas naturales, etc.
- **Clima:** El clima es frío en el Altiplano, subtropical en la vertiente este de la Cordillera de los Andes, y tropical (caliente y húmedo) en el sector amazónico.

## 2.2 Transporte

### (1) Argentina

La capital Buenos Aires está conectada con el mundo y con el interior del país por las líneas aéreas internacionales y nacionales. Existe una red vial que comunica las distintas ciudades permitiendo viajar en vehículos.

A continuación se presentan los principales índices de transporte y comunicación de Argentina.

Longitud total de las líneas férreas:	37.910 Km
Longitud total de las carreteras:	215.578 Km (pavimentadas: 61.440 Km)
Aeropuertos:	1.253
Abonados del servicio telefónico:	2,7 millones de habitantes
Estaciones radiodifusoras:	171 (AM), 231(TV)

### (2) Chile

La accesibilidad a Chile es la siguiente. Desde Japón se llega a Santiago vía EE.UU. (Nueva York, Miami, etc.) con las líneas aéreas internacionales. Los vuelos salen y llegan diariamente y el viaje demora más de 20 horas. Desde la capital se llega a otros principales urbes con vuelos nacionales, desde donde se puede alquilar vehículos para llegar hasta las proximidades del Área del Estudio. Al interior de los Andes o al Desierto de Atacama, se llega con vehículos de doble tracción, caballos o asnos.

A continuación se presentan los principales índices de transporte y comunicación de Chile.

Longitud total de las líneas férreas:	6.782 Km
Longitud total de las carreteras:	79.593 Km (pavimentadas: 10.984 Km)
Aeropuertos:	344
Abonados del servicio telefónico:	1,5 millones de habitantes
Estaciones radiodifusoras:	159(AM), 131(TV)

### (3) Bolivia

La accesibilidad a Bolivia es la siguiente. Hasta La Paz se llega en vuelos internacionales vía E.E.UU. Desde esta ciudad se accede a Potosí en líneas nacionales, desde donde se llega hasta las proximidades del Area del Estudio con vehículos alquilados. Más al interior, se debe utilizar los vehículos de doble tracción, caballos, etc.

A continuación se presentan los principales índices de transporte y comunicación de Bolivia.

Longitud total de las líneas férreas:	3.691 Km
Longitud total de las carreteras:	46.311 Km (pavimentadas: 1.910 Km)
Aeropuertos:	1.017
Abonados del servicio telefónico:	140.000 de habitantes
Estaciones radiodifusoras:	129(AM), 43(TV)

## 2.3 Geomorfología y ríos

### (1) Argentina

El noreste del territorio argentino se caracteriza por las extensas llanuras denominadas Pampa. Hacia el sur se extienden las mesas patagónicas, mientras que la parte oeste, la zona fronteriza con Chile se halla dentro de las zonas montañosas de la Cordillera de los Andes. Las siete provincias del noroeste donde se ubica el Area del Estudio, abarcan de oeste a este desde los vertientes orientales de la Cordillera de los Andes hasta las llanuras del Gran Chaco (planicie poco húmeda) que atraviesa de sur a norte al oeste de la Pampa. La región está constituida principalmente por las montañas, altiplano (Puna de Atacama) y valles. Se levantan de sur a norte los picos de la Cordillera de los Andes que superan los 5.000 m.s.n.m., y la eminencia del Area del Estudio es el Cerro Aconcagua de 6.960 m.s.n.m. Los principales ríos comprendidos en el Area son, de norte a sur: el Río Bermejo (Río Teuco), Río Salado, Río Bermejo, Río Colorado, etc. Los dos primeros avanan las vertientes occidentales de los Andes, y confluyen con el Río de la Plata que se desemboca al Océano Atlántico, mientras que los dos últimos se unen en la falda occidental del los Andes, y discurren en sentido sudeste para desembocarse al Océano Atlántico.

### (2) Chile

Por ser un país alargado en sentido de los meridianos, la disposición de sus relieves es muy variada en dirección este-oeste. La costa del Pacífico hacia el oeste está constituida por las llanuras atravesadas por las cadenas montañosas costeras. La parte central está formada por las cuencas intramontañosas fértiles, altiplano y quebradas. Hacia el este se levanta la Cordillera de los Andes que supera los 5.000 m de altura. Al norte del Area del Estudio se extiende el Desierto de Atacama que colinda hacia el este

con la Cordillera de los Andes, mientras que la parte sur está constituida por la Cordillera de los Andes y por el altiplano que se extiende al oeste. Todos ríos de la región nacen en los Andes y discurren en dirección oeste para desembocarse al Océano Pacífico. No existen grandes ríos como en las vertientes este de los Andes, sino que todos son relativamente cortos.

### (3) Bolivia

Hacia el oeste, el país está ocupado por la Cordillera Occidental, en el centro por la Cordillera Central, y en su medio, se extiende el altiplano de 3.000 a 4.000 m.s.n.m. La región amazónica del oriente se distingue por sus lomas y llanuras cubiertas por la selva tropical. La Provincia de Potosí, donde se ubica el Área del Estudio, es una región montañosa constituida por las Cordilleras Occidental y Central, y altiplano que se extiende en su medio. La Cordillera Occidental está formada por grandes macizos volcánicos de más de 5.000 m.s.n.m. La Provincia de Tarija al este, constituye la cuenca alta del Río Amazonas en las vertientes este de la Cordillera Central.

Los cursos de Potosí nacen en la Cordillera de los Andes y de estribación, y avanan el altiplano en dirección principalmente norte, para desembocarse al Salar de Uyuni. Mientras tanto, los cursos de Tarija nacen en la Cordillera Central y discurren en dirección este para confluirse con el Río Pilcomayo, que es el tributario del Río de la Plata que se desemboca al Océano Pacífico.



## Capítulo 3 Geología y Yacimientos del Area del Estudio

### 3.1 Descripción general de la geología

Como documentos que describen de manera uniforme toda la geología del Area del Estudio, se tiene el Mapa Tectónico de América del Sur (Figura 3) y sus Notas Explicativas (UNESCO, 1978). El mapa divide el Area del Estudio en tres grandes categorías de estructuras que son las regiones de plegamientos precámbricos, paleozoicos, y los mesozoicos y cenozoicos.

Los informes recientes (Mpodozis and Ramos, 1989, etc.) interpretan la distribución de las actividades volcánicas y de las unidades geológicas sobre la base de los movimientos de las placas. El margen oeste del continente Gondwana a principios del Paleozoico era una plataforma de carbonato. En el Mesozoico, el continente sudamericano se separó del continente africano, y continuaron formando las islas volcánicas y las plataformas continentales. Del Mesozoico al Cenozoico, la Placa Nazca se hundió por debajo de la Plataforma Sudamericana, y la variación de la velocidad y el sentido de estos movimientos relativos provocaron el cambio de las estructuras y de las actividades ígneas.

#### (1) Geología regional

En este apartado, se entrega la descripción general de la geología del Area del Estudio sobre la base del documento de UNESCO (1978) (Figura 3). La estructura del Area puede ser clasificada, a grosso modo, en plataformas y regiones de plegamientos. Estos últimos, a su vez, son subdivididos en pequeños grupos. A continuación, se describen las respectivas rocas componentes, así como las rocas plutónicas que se asocian con la formación del geosinclinal.

(a) Plataforma Sudamericana: Las cubiertas de la Plataforma Sudamericana (estratos del Triásico y posteriores) se distribuyen al margen este.

(b) Regiones de plegamientos: Las regiones de plegamientos del Area del Estudio se clasifican en tres grupos: las regiones de plegamientos del Precámbrico, del Paleozoico, y de los del Mesozoico al Cenozoico.

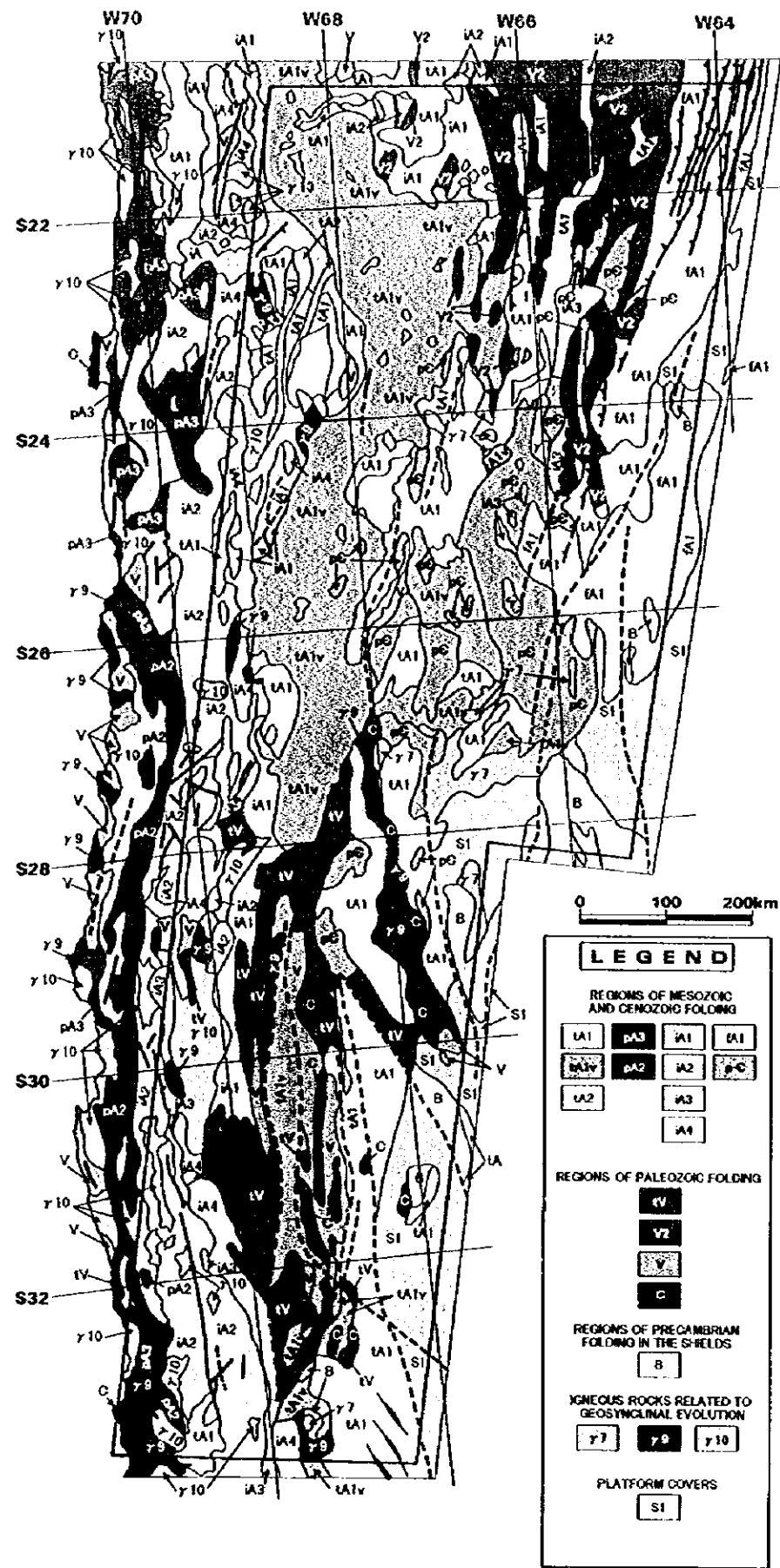
#### • Regiones de plegamientos precámbricos

Los plegamientos precámbricos fueron formados por el Ciclo Brasiliano después de 1.000 Ma, y se distribuyen al sudeste del Area. En la Figura 3 se muestran las rocas graníticas correspondientes con el símbolo  $\gamma 7$ .

#### • Regiones de plegamientos paleozoicos







## Legend

### Mesozoic-Cenozoic Folding Regions.

Late and post-tectonic Andean basins locally filled with marine deposits and volcanic materials.

- t A 1 Quaternary (partly Pliocene) sediments
- t A 1 v Pliocene-Quaternary (partly Miocene) Volcanics
- t A 2 Neogene (locally Paleogene) sediments

### Linear pericratonic zone

- p A 3 Late Jurassic (Oxfordian-Kimmeridgian) sediments ( Araucanean phase )
- p A 2 Cretaceous (Albian-Senonian) sediments

### Linear intracratonic zone

- i A 1 Middle Miocene-Early Pliocene sediments ( Quechua and Antillean phases )
- i A 2 Middle Eocene-Early Oligocene sediments ( Inca phases )
- i A 3 Senonian-Paleocene sediments
- i A 4 Late Cretaceous (pre-Maastrichtian) sediments ( Peruvian phase )
- f A 1 Sub-Andean foredeep ( Late Miocene-Pliocene )
- p C Precambrian blocks and nuclei ( especially Late Precambrian )

### Paleozoic Folding Regions.

#### Middle-late Paleozoic folding

- t V Late and post-tectonic basin sediments ( frequency extending to the Triassic or Jurassic )
- V 2 Late Devonian sediments ( locally reworked by Middle Permian? movements )
- V Undivided geosynclinal zone

#### Early Paleozoic folding

- C Undivided geosynclinal zone ( partially reworked by Paleozoic and Andean folding )

### Precambrian Folding Regions in the Shields

- B Brazilian folding and others of age between 1.000±50Ma and 500Ma

### Plutonic Rocks Related to Geosynclinal Evolution

- gamma 7 Precambrian-Early Paleozoic Granitoids ( 500-1.000Ma )
- gamma 9 Middle Paleozoic - Triassic granitoids
- gamma 10 Mesozoic - Cenozoic granitoids

### Platform Covers ( South American Platform )

- S 1 Post-Triassic covers

Fig. 3 Simplified Geologic Map of the Study Area (adapted from UNESCO, 1978)



Los plegamientos paleozoicos se dividen en los del Paleozoico Inferior y los del Paleozoico Medio a Superior. Los del Paleozoico Inferior se distribuyen al sur del Area del Estudio, de rumbo casi N-S. Los plegamientos del Paleozoico Medio a Superior están constituidos por los plegamientos del Devónico Superior (que incluyen los plegamientos no divididos que se distribuyen al sur de la región de rumbo N-S) y por los del Pérmico a Triásico o Jurásico (distribuidos al norte del Area de rumbo N-S, y están formados por las rocas de carbonato y fangolitas cámbricas a ordovícicas, flysch silúrico a carbonífero, molasas carboníferas a triásicas, etc.).

#### • Regiones de plegamientos del Mesozoico y Cenozoico

Los plegamientos del Mesozoico y Cenozoico yacen extensamente, y se clasifican en Pericratón (pA) e Intra-cratón (iA). Estos se clasifican, a su vez, en tres grupos según su período: Paleoceno Superior: pA1, del Albiano al Senoniano: pA2 y del Oxfordiano al Kimmeridgiano: pA3) y en cuatro grupos (del Mioceno Medio al Plioceno Inferior: iA1, Paleoceno Medio: iA2, del Senoniano al Paleoceno: iA3, y Cretácico Superior: iA4). Los sedimentos de la antefosa subandina (fA1) se distribuyen al noreste del Area del Estudio.

Las molasas y las rocas volcánicas (tA) derivadas de los movimientos orogénicos superiores y posteriores de la Orogenia Andina están constituidas principalmente por las molasas y rocas volcánicas neógenas (parcialmente paleocenas y eocenas) (tA1) y las del Cuaternario (parcialmente Plioceno) (tA2).

Los núcleos precámbricos afloran en los plegamientos cenozoicos y mesozoicos.

## (2) Geología según provincias tectónicas

Las estructuras del Area del Estudio, muchas veces son descritas sobre la base de su geomorfía. En este informe se describe la geología del Area del Estudio según las provincias tectónicas establecidas por Sillitoe (1981) y Pincock, Allen & Holt, Inc. (1993). La explicación de esta parte se basa sobre el informe de Pincock, Allen & Holt, Inc. (1993), Mpodozis & Ramos (1989), etc.

Las provincias tectónicas del Area del Estudio son, de oeste a este: la Cordillera de la Costa, Valle Longitudinal y Central (parte del Valles Longitudinales de Chile), Cordillera Principal, Cordillera Frontal, Puna (Altiplano), Precordillera, Sierras Transpampeanas Cordillera Oriental, Sierras Pampeanas y las Sierras Subandinas (Figura 4).

La Cordillera de la Costa está constituida por los sedimentos que son los prismas acrecionales provenientes de los movimientos de la placa deslizada por debajo del continente Gondwana y al microcontinente que se unió con éste después del Paleozoico Superior, así como por las rocas graníticas y riolíticas producidas en el arco ígneo durante el Paleozoico Superior al Mesozoico Inferior.

El Valle Longitudinal y Central en el presente Informe se refiere a la región circundada por las Cordilleras de la Costa y Principal, constituido por andesitas, riolitas y areniscas rojas continentales del Cretácico Superior al Eoceno.

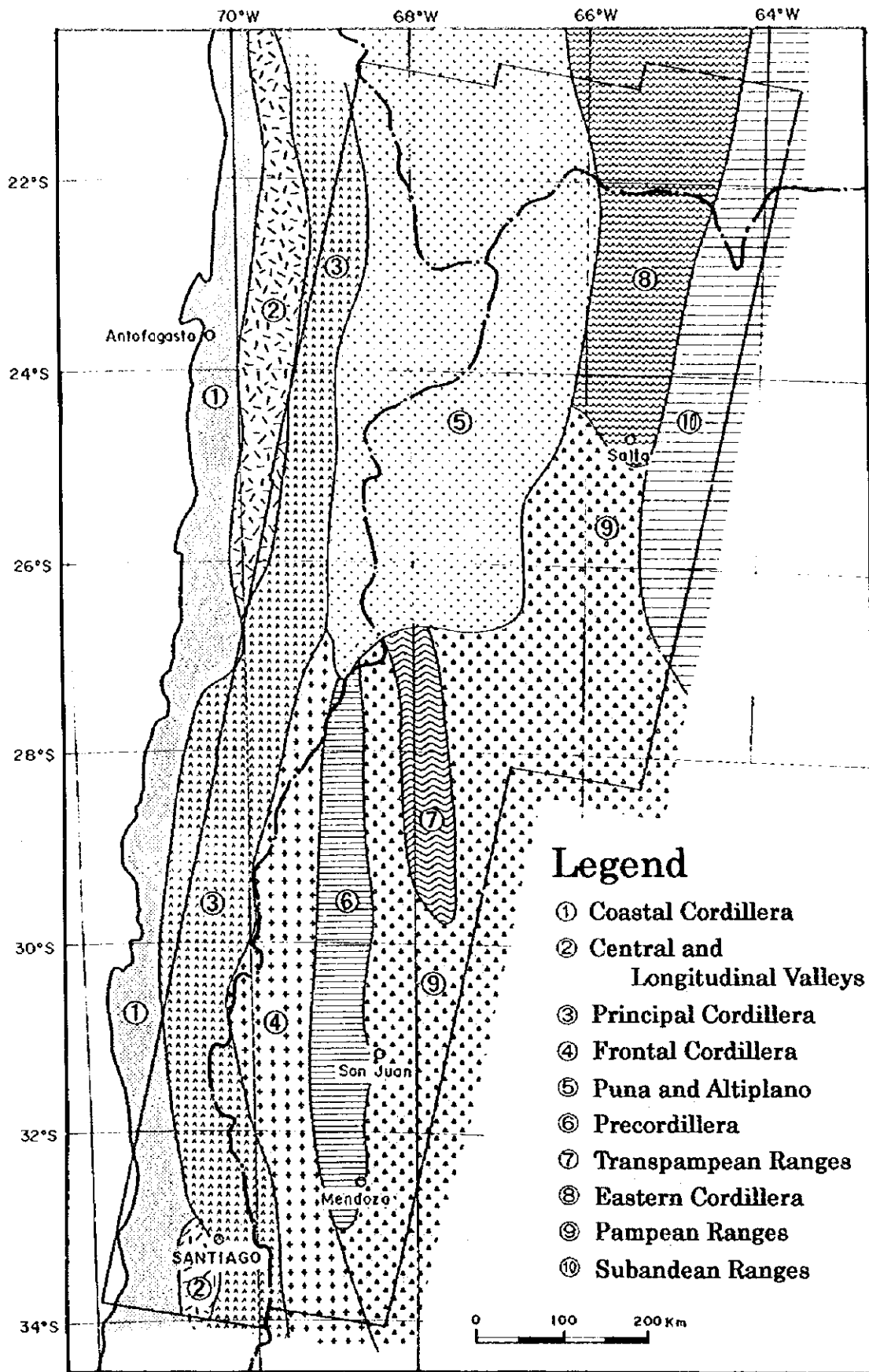


Fig. 4 Tectonic Province of the Study Area  
(compiled from Sillitoe, 1981 etc.)

La Cordillera Principal se caracteriza por las actividades ígneas y deformaciones ocurridas durante el Cretácico Superior y Terciario. La parte oeste está formada por las rocas ígneas, mientras que la parte este se constituye por una región de plegamientos formada por los mantos de corrimientos con inclinación hacia oeste de las rocas sedimentarias del Jurásico Superior al Cretácico Inferior.

La Cordillera Frontal es una provincia tectónica que colinda al este de la Cordillera Principal, más al sur de 26°S, y está constituida por las rocas volcánicas y sedimentarias paleozoicas superiores. También se identifican ofiolitas. Se deduce que la Cordillera Frontal yace sobre el microcontinente, aunque sus detalles se desconocen por la ausencia de afloramientos del Precámbrico.

La Puna (Altiplano) abarca el norte de Argentina y Bolivia, donde se distribuyen las rocas sedimentarias paleozoicas y los sedimentos continentales terciarios. Al finalizar la expansión cordones en las serranías marinas del Farallón-Nazca después del Mioceno Superior, simultáneamente con la iniciación de la expansión de rifts, se desarrollaron extensamente las actividades ígneas en el altiplano argentino.

La Precordillera se ubica al este de la Cordillera Frontal, entre 27° a 33°S. En el Paleozoico, ésta era una plataforma con sedimentación de rocas de carbonato al oeste del continente Gondwana. Entre la Precordillera y las Sierras Pampeanas se desarrolla la faja de melange, que corresponde el contacto de las placas de los terrenos de Precordillera y Pampeanas.

El basamento de las Sierras Transpampeanas está formado por las rocas metamórficas precámbricas a cámbricas. Estas se constituyen por los sedimentos continentales ordovícicos y las rocas graníticas que los instruyen, sedimentos continentales pérmicos, cretácicos y posteriores, así como las rocas volcánicas que se emplazan en ellos.

La Cordillera Oriental se localiza al oeste de Puna (Altiplano), más al norte de 25°S. Sobre el basamento precámbrico a cámbrico se distribuyen las rocas sedimentarias y volcánicas del Ordovícico, Silúrico, Devónico, Carbonífero, Cretácico y posteriores. El Paleozoico es fuertemente incidido por las deformaciones por plegamientos y fallamientos.

Las Sierras Pampeanas están constituidas por las rocas metamórficas del Precámbrico al Cámbrico, así como los sedimentos continentales carboníferos a pérmicos y las rocas sedimentarias cenozoicas.

Las Sierras Subandinas está constituida por las rocas metamórficas precámbricas a cámbricas distribuidas al este del Área del Estudio, y por las rocas sedimentarias paleozoicas, y se halla controlada por corrimientos de inclinación hacia oeste, formada por la subducción hacia el mismo sentido. Del Cenozoico Superior al Reciente, las deformaciones por la subducción se desplaza en rumbo este desde la Cordillera Oriental actual, dando lugar a fajas de plegamientos de corrimientos en las Sierras Subandinas.

### (3) Descripción general de los movimientos orogénicos



En este apartado se entrega un resumen sobre la historia tectónica de la región andina del Área del Estudio, sobre la base del informe de Mpodozis and Ramos(1989), Coira et al. (1982). Las estructuras del Área del Estudio después del Paleozoico se caracterizan por magmatismo, metamorfismo y fallas provocados por la orogenia que se debe a la subducción del margen oeste del Continente Gondwana.

#### • Orogenia Pampeana

La orogenia desde el Precámbrico Superior hasta el Cámbrico Inferior (parcialmente Ordovícico) dio lugar al basamento de rocas ígneas y metamórficas que actualmente se distribuyen en Puna, Cordillera Oriental y Sierras Pampeanas. Estas rocas fueron divididas en bloques por los fallamientos de la orogenia andina, del que se describe más tarde.

#### • Orogenia del Famatina

Las cuencas marinas al margen de la Plataforma Brasileña al oeste de Argentina se desarrollaron por la orogenia del Cámbrico Superior al Devónico, depositándose espesos sedimentos. Estos se distribuyen desde Bolivia hasta el norte de Argentina. Las lavas basálticas y las rocas ultrabásicas que afloran al oeste de Argentina corresponden a la corteza oceánica del Paleozoico, que son los prismas acrecionales sobre el continente sudamericano hasta a finales del Paleozoico.

#### • Orogenia de Gondwana

Está constituida por las calizas y sedimentos pelágicos del Devónico Superior al Mesozoico Inferior, como los prismas acrecionales por la orogenia del Paleozoico Superior al Mesozoico, con incidencia del metamorfismo de la facie del esquisto azul. Se distribuyen en las Cordilleras Frontal y de la Costa, granitos, riolitas e ignimbritas formados por estos movimientos orogénicos.

#### • Orogenia Andina

Corresponde a la orogenia del Mesozoico al Cenozoico que dio lugar a la topografía andina actual, cuyos movimientos continúan a la fecha. A partir de 27°S, las estructuras se diferencian al sur y al norte. A continuación se entrega una descripción general de los dos segmentos, y en el apartado posterior una descripción más detallada sobre la orogenia andina.

Del segmento situado al norte de 27°S, que abarca del norte de Chile al noroeste de Argentina, las actividades del arco magmático de la Cordillera de la Costa durante el Jurásico Inferior al Cretácico Inferior, dio origen a los sedimentos continentales y marinos triásicos superiores a cretácicos que se acumularon en la cuenca de posarco. Esta cuenca con corteza continental ha sufrido deformación durante el Cretácico Medio, dando lugar a la Proto-Cordillera de Domeyko. Ocurrió la migración del centro magmático del Cretácico Superior al Terciario hacia el este. Asimismo, el frente orogénico se desplazó en mismo rumbo hasta la faja de corrimientos y plegamientos activos de las Sierras Subandinas.

La geología del segmento situado al sur de 27°S se caracteriza por la ausencia de las actividades volcánicas cuaternarias y la presencia del Valle Central. Al contrario del segmento anterior, la deformación provocada por la orogenia andina se dio a más de 1.000 Km al este de la fosa submarina, en las Sierras Pampeanas donde se distribuye el basamento dividido en varios bloques por las fallas. Esta deformación a nivel regional se relaciona con faja Benioff de ángulo cerrado.

#### (4) Orogenia andina al norte de 27°S

A continuación se describe la evolución de la Orogenia Andina (Figura 5):

##### • Triásico al Cretácico Inferior

En el Mesozoico, se formó una cuenca pequeña a lo largo de la Cordillera de Domeyko al norte de Chile, donde se sedimentaron los conglomerados rojos y brechas provenientes de altiplanos del oeste. En el Jurásico Inferior, el mar que cubría la actual Cordillera de Domeyko se fue expandiendo progresivamente hacia el norte dando lugar a la cuenca profunda y alargada de Tarapacá, donde se acumularon miles de metros de rocas de carbonato y sedimentos terrestres. Del Jurásico Superior a finales del Jurásico, este segmento y parte del Cretácico Inferior habían estado cubiertos por el mar. En el Cretácico Inferior, se acumularon en la cuenca de posarco las areniscas rojas continentales provenientes del arco ígneo La Negra.

En la Cordillera de la Costa, los estratos alternados de los sedimentos marinos y piroclásticas del Jurásico Inferior se acumularon sobre los sedimentos continentales del Triásico Superior. Los productos del intensivo volcanismo y plutonismo (arco ígneo La Negra) se distribuyen formando franjas angostas de mil kilómetros aproximadamente, a lo largo de la Cordillera de la Costa actual, hasta Chañaral (26°S). Este estrato (La Negra) está formado por andesitas y basaltos con espesor de más de 1.000 m, intercalando esporádicamente los sedimentos marinos y continentales. Los yacimientos estratiformes de cobre se distribuyen dentro de lavas de este estrato. La acumulación de esta secuencia continuó hasta el Cretácico Inferior. Los grandes cuerpos intrusivos gabroicos y graníticos, con edades radiométricas entre 190 y 115 Ma se emplazan también en la Cordillera de la Costa. La Falla de Atacama es una falla de desplazamiento de rumbo, que se distribuye al oeste del Área del Estudio por un largo de 1.000 Km de rumbo N-S, y que se relaciona con el arco magmático La Negra, comenzó a ser activa en el Cretácico Inferior. Al sur de Antofagasta, varios cuerpos de rocas plutónicas se emplazaron a lo largo de la Falla de Atacama durante el Cretácico Inferior.

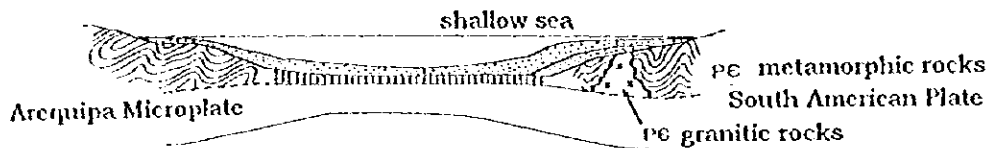
##### • Cretácico Medio

La elevación de la corteza continental ocurrido durante el Cretácico Medio, dio lugar a la topografía alta de la Proto-Cordillera de Domeyko. Se separaron la Cordillera de la Costa y la Puna (Altiplano) actual, deformando los sedimentos de la cuenca posarco. Después del Cretácico Medio, se desarrolló la cuenca sedimentaria (Cuenca Purilactis) al

**1. Famatinian orogeny (schematic section at 25° S)**

**a. Late Cambrian-Early Ordovician**

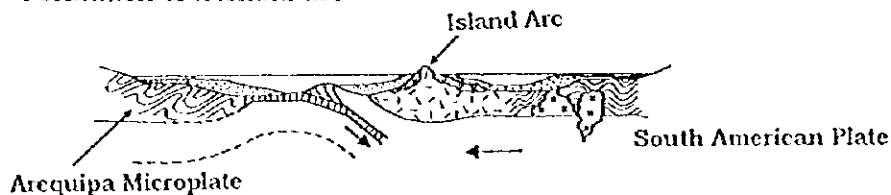
Sedimentation in the Puna and Eastern Cordillera



**b. Middle Ordovician**

Development of a magmatic arc

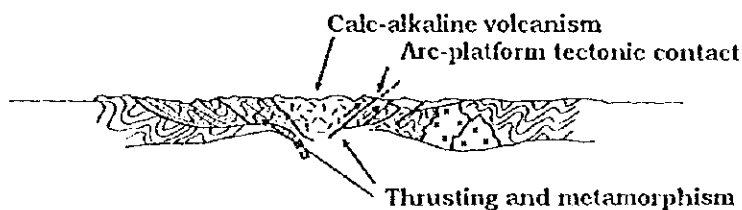
Formation of an island arc



**c. Late Ordovician (Ocoyic orogeny)**

Calc-alkaline volcanism

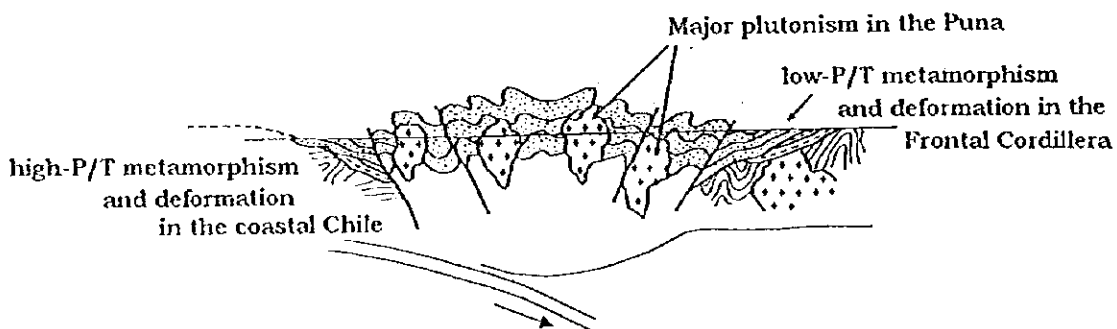
Collision of the Arequipa microplate against the South American Plate



**d. Early Late Devonian-Carboniferous**

Calc-alkaline volcanism (Early Carboniferous)

Plutonism in the Puna Region



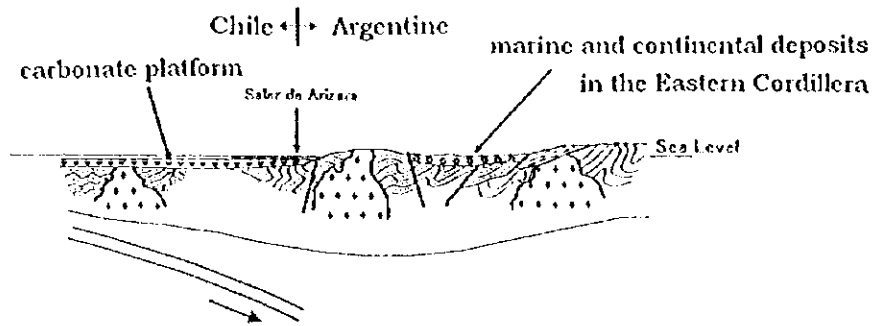
**Fig. 5 Geotectonic History of the Study Area  
(adapted from Coira et al., 1982)**

## 2. Gondwana orogeny

### a. Carboniferous-Early Permian

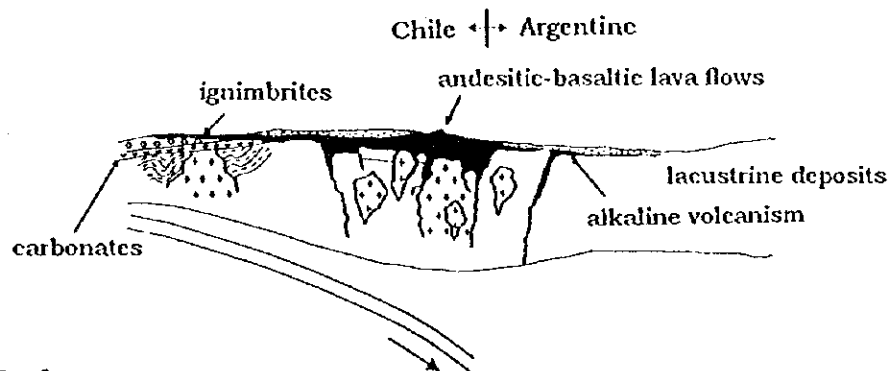
Carbonate sedimentation in the Chile

No magmatism



### b. Late Permian-Early Triassic

Intensive and extensive magmatic arc volcanism

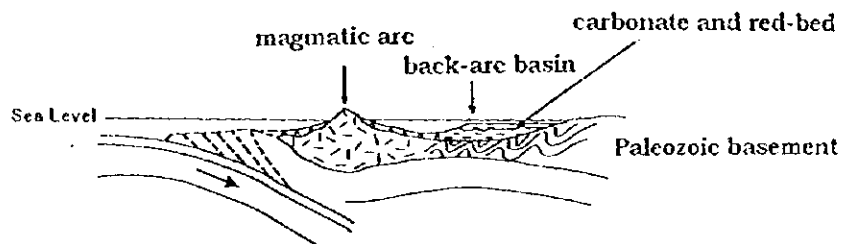


## 3. Andean orogeny

### a. Jurassic-Early Cretaceous

Development of a magmatic arc

Formation of a back-arc basin and sedimentation of red-bed sequences

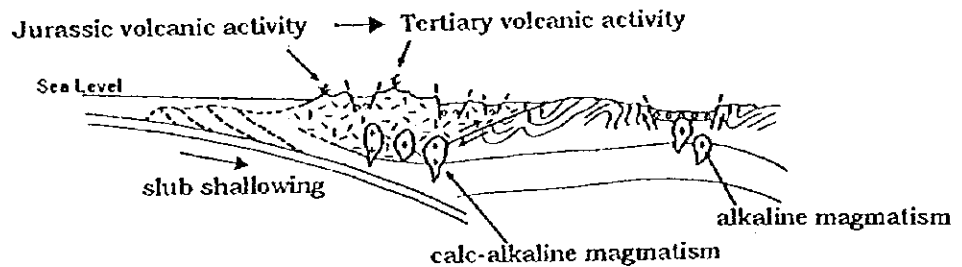


### b. Late Cretaceous-Present

Slab shallowing

Eastward shifting of the magmatic activity

Formation of continental intra-arc basin (troughs) in the Sub-Andean area



este de la Proto-Cordillera de Domeyko, acumulándose las areniscas rojas. Más al este, se formó la cuenca antepaís (Grupo de Cuencas Salta) donde se depositaron y extruyeron los conglomerados, areniscas rojas y las rocas volcánicas alcalinas. Estas rocas volcánicas e hipabisales fueron emplazadas durante tres ciclos: 130 a 100 Ma, de 80 a 75 Ma, de 65 a 60 Ma, asociándose con la formación de rift y sedimentación que dieron lugar a la cuenca sedimentaria.

#### • Terciario

La discontinua migración del magmatismo y deformación hacia el este ocurrió durante el Terciario. El volcanismo comenzó en el Cretácico Superior y continuó hasta el Eoceno, y se distribuye extensamente en el Valle Longitudinal de Chile actual. Estas rocas volcánicas están constituidas principalmente por andesitas y riolitas. Las rocas volcánicas y pórfidos son de edades K-Ar que varían de 72 a 39,9 Ma. Las actividades ígneas perdieron su intensidad durante el Oligoceno. En Puna de Chile y Argentina se acumularon los sedimentos continentales rojos y evaporitas.

Las subsiguientes actividades ígneas ocurrieron del Eoceno Superior al Oligoceno (de 48 a 28 Ma) a lo largo del eje de la Proto-Cordillera de Domeyko, e intruyeron las rocas ígneas relativas de grandes pórfidos cupríferos. Las actividades volcánicas han sido poco intensas en el Oligoceno, siendo el Granito del Nevado de Acay al noroeste de Argentina y las rocas volcánicas asociadas el único complejo ígneo del Oligoceno relativamente grande. Este intervalo de las actividades ígneas coincide con el período de la alta convergencia oblicua de la subducción de la Placa Nazca y por debajo de la Placa América del Sur. El pórfido cuprífero del Oligoceno se emplazó a lo largo del eje de la Proto-Cordillera de Domeyko, que es una zona crustal débil caracterizada por la falla de desplazamiento de rumbo como "West Fissure" en Chuquicamata.

Durante el Mioceno Inferior, el incremento de la tasa de convergencia de la Placa Nazca, así como de su velocidad, dieron lugar al metamorfismo de la Cordillera de Domeyko, que dieron como resultado a los plegamientos de los estratos del Eoceno Superior al Oligoceno y a la reactivación de las fallas inversas. Al mismo tiempo, comenzaron las intensivas actividades volcánicas. El volcanismo riolítico tipo caldera fue particularmente intenso al norte de 22°S, donde se formaron extensamente ignimbritas. Los estratovolcanes andesíticos predominaron al sur de 25°S. Estas actividades volcánicas se extendieron durante el Mioceno Superior, después de una nueva fase de deformación (Fase Quechua). El frente de la deformación por compresión migró al este durante el Cenozoico Superior. La deformación en el flanco al extremo este de las Sierras Subandinas continua hasta el día de hoy a lo largo de los corrimientos y los plegamientos.

#### (5) Orogenia andina al sur de 27°S

##### • Jurásico a Cretácico Inferior

En el Triásico Medio a Superior, dieron lugar la transgresión y las actividades volcánicas. En el Jurásico Inferior, el volcanismo fue intenso en la costa sur del Area del

Estudio (más al sur de 32°S, donde se distribuyen rocas piroclásticas riolíticas). La intercalación de calizas sugiere que parte de las erupciones volcánicas fueron submarinas. Al mismo tiempo, intruyeron las rocas plutónicas graníticas y gabroicas en la Cordillera de la Costa. Estos intrusivos muestran edades K-Ar entre 191 y 138 Ma.

En la región de cuencas de posarco al este, la transgresión marina ocurrida del Jurásico Inferior al Medio, dio lugar a la formación de la plataforma de rocas piroclásticas y de carbonato sobre el basamento ígneo del Paleozoico Superior de la Cordillera Frontal. Posteriormente, la regresión marina durante el Jurásico Superior provocó la sedimentación de espeso estrato de evaporitas como de yeso, que fue cubierta en el mismo período por areniscas rojas continentales contemporáneas. La región interior de areniscas rojas derivadas de la erosión de las rocas volcánicas corresponde a la Cordillera de la Costa. El estrato se vuelve poco espeso al este, y muestra una transición desde sedimentos de conos aluviales con intercalación esporádica de rocas volcánicas en Chile, hacia areniscas finas fluviales en Argentina.

Por la interdigitación de lavas y calizas en la frontera entre Argentina y Chile, el mar posiblemente volvió a cubrir grandes extensiones de la plataforma durante el Cretácico Inferior. Se deduce que durante Cretácico Inferior no se desarrolló la corteza oceánica y un gran volumen de andesitas y basaltos derivadas de las actividades volcánicas extruyó al margen del mar atravesando la corteza continental delgada y débil. A finales del Cretácico Inferior se depositaron lavas, y conglomerados rojos gruesos con intercalación de calizas.

#### • Cretácico Superior al Terciario

El Cretácico Superior al Terciario se caracteriza por la deformación progresiva y migración hacia el este del centro de la actividad ígnea. Las rocas sedimentadas al margen de cuenca en el Cretácico Superior fueron intruidas por las rocas graníticas. Esta actividad ígnea continuó hasta el Mioceno, que es más reciente en sentido este.

Las actividades volcánicas se reiniciaron durante el Cretácico Superior al oeste de la Cordillera Principal. Las lavas y rocas piroclásticas andesíticas a riolíticas del Mioceno (de 22 a 11 Ma) se distribuyen más al este. El magmatismo que dio lugar a las rocas plutónicas y volcánicas cesó al reducir la profundidad de la faja Benioff en estas latitudes, y por la desaparición de la cuña asthenosférica entre la corteza continental y la placa oceánica.

### **3.2 Estratigrafía**

Dada la inexistencia de una literatura que describe la estratigrafía de todo el Área del Estudio, se preparó la columna geológica (Figura 6) sobre la base de varios informes como: Boric et al.(1990), Franca (1995), Mon and Salfity (1995), etc.

#### (1) Basamento precámbrico

El basamento precámbrico que yace en el Area del Estudio está constituido por las rocas asociadas con la Orogenia Brasiliana que afloran en las Sierras Pampeanas, del este a sudeste del Area. Esta orogenia continuó hasta el Cámbrico, y las rocas metamórficas son intruidas por granitoides (de 1.000 a 500 Ma).

#### (2) Cámbrico y Ordovícico

El Cámbrico al Ordovícico se distribuye en la Cordillera de la Costa, Precordillera y en las Sierras Transpampeanas al sur del Area del Estudio, y están constituidos por basaltos asociados con las rocas ultrabásicas, sedimentos pelágicos, y rocas de carbonato. Los sedimentos contemporáneos de Puna están constituidos por turbiditas incididos por plegamientos paleozoicos y orogenia andina. La Cordillera oriental es una cuenca de posarco, constituida por sedimentos continentales de más de 3.000 m de espesor. Esta cuenca sedimentaria probablemente se cerró a raíz de la colisión (Orogenia Icolytic) entre las Plataformas de Arequipa del oeste y la de Antofalla del este.

#### (3) Silúrico y Devónico

El Silúrico está constituido por areniscas y lutitas y se distribuye desde Bolivia hasta el norte de Argentina, Puna (Altiplano), Cordillera Oriental y Precordillera, cubriendo discordantemente el Presilúrico. En la Cordillera Oriental, se distribuyen diamictitas, además de areniscas y lutitas. El Devónico se extiende en la región norte de Chile y Argentina, y está constituido por sedimentos neríticos como areniscas, lutitas y calizas, así como areniscas turbidíticas y rocas volcánicas, que han sufrido intensos plegamientos.

#### (4) Del Carbonífero al Triásico Inferior

El Carbonífero se distribuye desde Bolivia hasta el norte de Argentina, y está constituido por sedimentos incididos por glaciación de Gondwana, areniscas turbidítica y lutitas. En el Carbonífero Medio ocurrió hiato intenso, y el Carbonífero Medio a Superior está constituido por rocas clásticas silíceas, como areniscas. El Pérmico se distribuye en la frontera entre Argentina y Chile, y está constituido por areniscas y calizas. Los estratos del Carbonífero al Pérmico son sedimentos depositados en la cuenca de posarco, cuya estratigrafía es imprecisa, por ejemplo, en la Cordillera Oriental. El Triásico Inferior se distribuye en Chile, y está constituido por conglomerados y areniscas.

#### (5) Mesozoico





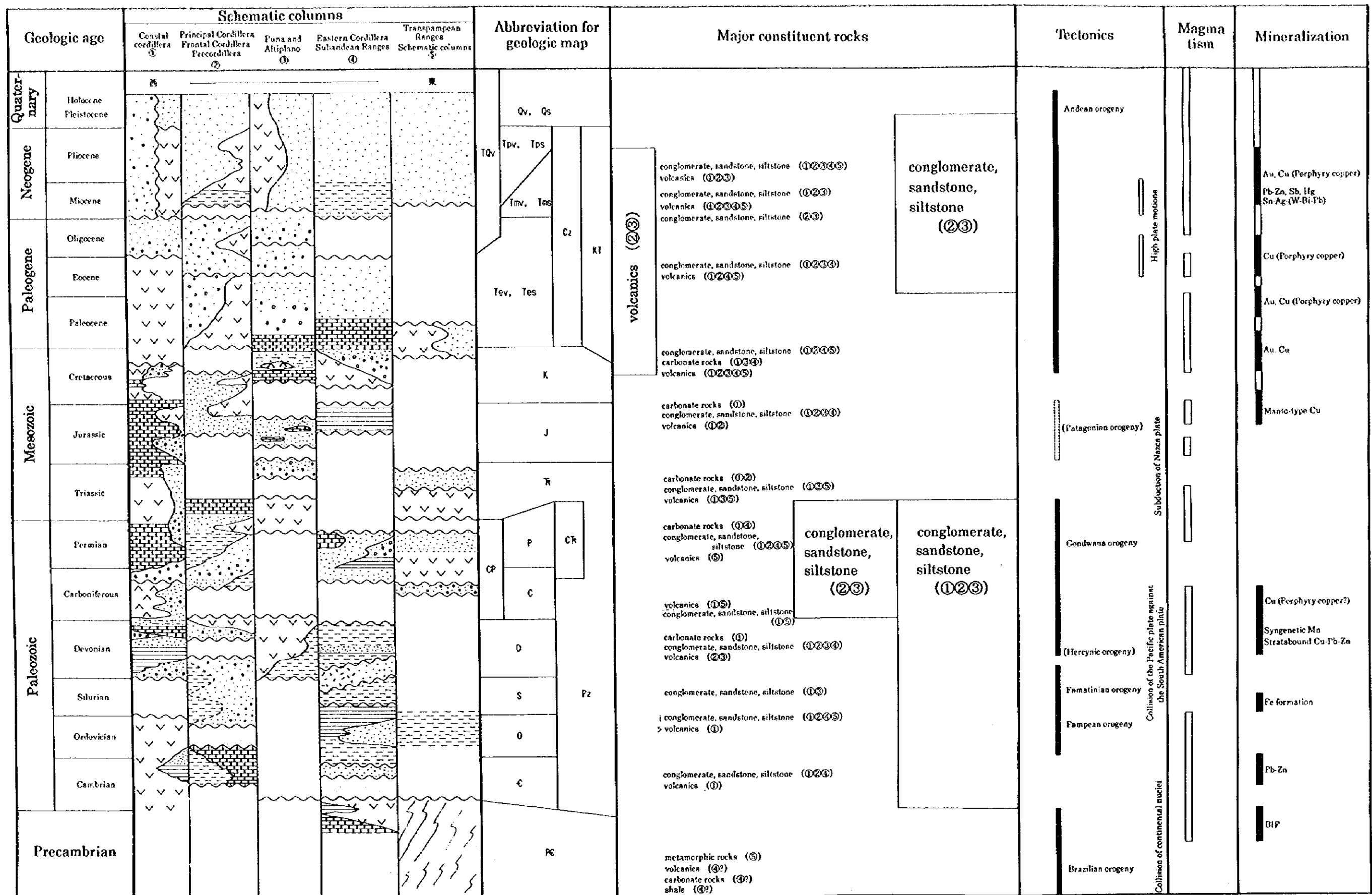


Fig. 6 Geologic Column of the Study Area (compiled from Boric et al., 1991 etc.)



Los sedimentos del Triásico Superior al Jurásico se distribuyen en la Cordillera de la Costa, y en Copiapó (Chile) de rumbo N-S. Estos están constituidos por conglomerados y areniscas en la Cordillera de la Costa, y por conglomerados, areniscas, calizas y rocas volcánicas al este de la cordillera, intruidas por las rocas graníticas. El Jurásico al Cretácico Inferior se distribuye en la Cordillera de la Costa, y consta de un espeso estrato de lavas andesíticas, con intercalación de areniscas y calizas. El Cretácico Superior está constituido por rocas andesíticas y calizas formadas por la subducción de la Placa Nazca, así como los sedimentos continentales como areniscas rojas depositados en cuenca de antearco.

#### (6) Cenozoico

El Cenozoico del Area del Estudio se caracteriza por las rocas volcánicas derivadas de la Orogenia Andina que continuó desde el Cretácico, y sigue depositándose conglomerados, areniscas y evaporitas en el Valle Longitudinal y Central. La distribución de las rocas volcánicas terciarias se difiere substancialmente en los segmentos del norte de 27°S, entre 27° y 33°S, y más al sur de 33°S, probablemente porque la inclinación de la subducción de la Placa Nazca se vuelve leve entre 27° y 33°S.

El volcanismo al norte de 27°S poco intenso en el Cretácico Superior, volvió a reactivarse en el Paleoceno, provocando la migración del foco magmático desde la Cordillera de la Costa hacia el este. Como consecuencia, se formó la actual Cordillera de los Andes constituida por las rocas volcánicas paleocenas a eocenas, y oligocenas superiores a cuaternarias.

Entre 27° y 33°S, se identifican las rocas volcánicas terciarias inferiores, al igual que más al norte de 27°S. Posteriormente, se extruyeron las rocas volcánicas del Oligoceno Superior al Mioceno Inferior, Medio y Superior. Esta zona se caracteriza por la ausencia de sedimentos volcánicos cuaternarios.

Más al sur de 33°S, no se distribuyen las rocas volcánicas terciarias inferiores, contactándose directamente las miocenas sobre las cretácicas. Las rocas volcánicas cuaternarias abarcan grandes extensiones.

Al noreste del Area del Estudio se distribuyen los sedimentos del Mioceno Superior al Plioceno que son sedimentos post-orogénicos (moladas) depositados en cuenca de antearco subandino.

#### (7) Intrusivos

Las rocas graníticas del Precámbrico al Terciario fueron intruidas por la orogenia, y se clasifican a grosso modo en los siguientes tres grupos:

- Rocas graníticas del Precámbrico al Paleozoico Inferior
- Rocas graníticas del Paleozoico Medio al Triásico
- Rocas graníticas del Mesozoico Medio a Terciario

### **3.3 Estructura**

Al igual que los apartados sobre las provincias tectónicas y sobre la estratigrafía, se entrega en este apartado una descripción general estructural del Área del Estudio sobre la base de los informes de Mon and Salfity (1995), Coira et al.(1982), etc.

El Área del Estudio abarca desde el margen occidental de la Plataforma Sudamericana hasta los Andes. La plataforma está constituida por el basamento anterior al Cámbrico y las cubiertas, y su perímetro ha sido incidido por la Orogenia del Precámbrico Superior y posteriores. En los Andes se distribuyen los estratos del Precámbrico Superior y posteriores, aunque la estructura que atraviesa la cordillera de rumbo N-S, se difiere de la estructura anterior al Paleozoico. En las Sierras Transpampeanas al noroeste de Argentina, Cordillera Oriental, Precordillera y Puna las rocas metasedimentarias y metavolcánicas son cubiertas por el Paleozoico Inferior no metamórfico con discordancias angulares.

Por otro lado, al centro de los Andes, el estrato cretácico superior en transición al estrato continental cubre discordantemente los estratos inferiores. Esta estructura es incidida por los plegamientos de los Movimientos Inca (del Paleoceno Inferior al Eoceno Medio) y por los plegamientos y fallamientos inversos de la Orogenia Quechua (del Mioceno Medio al Plioceno Inferior).

De las provincias tectónicas formadas por la Orogenia Andina, Puna corresponde la parte más oeste, donde los sedimentos continentales terciarios fueron corridos por el basamento paleozoico. En la Cordillera Oriental, al este de Puna, las rocas precámbricas forman el bloque tectónico, y las Sierras Subandinas fueron corridas por el Paleozoico de rumbo este. Las Sierras Subandinas corresponde al extremo este de la Orogenia Andina y se constituyen por anticlinales cortadas por fallas.

Tal como se ha explicado anteriormente, al sur de 27°S, la estructura de la Cordillera de los Andes se difiere de la del norte. Las estructuras de las Sierras Subandinas y de la Cordillera Oriental no son claras, y el basamento de rocas metamórficas precámbricas y las rocas graníticas paleozoicas intruidas en las fallas forman las Sierras Pampeanas.

### **3.4 Yacimientos**

#### **3.4.1 Descripción general de los yacimientos**

Los yacimientos del Área del Estudio muestran una gran variedad en sus elementos metálicos y tipos. Los elementos son predominantemente oro-plata, cobre, plomo-zinc, estaño-tungusteno, y mercurio-antimonio (véase el Apéndice 1, al final del Informe).

En el mapa de análisis integral se muestra la localización de cada uno de los yacimientos, según elementos metálicos. Estos pueden ser pórfidos cupríferos, yacimientos epitermales de oro-plata, yacimientos estratiformes de cobre, yacimientos estratiformes de plomo-zinc, etc. De estos, los tres primeros corresponden a yacimientos de mayor importancia en Chile, mientras que en Argentina, son importantes los pórfidos cupríferos que se ubican en las proximidades de la frontera con Chile, y el yacimiento estratiforme de plomo-zinc-cobre (Figura 7).

### 3.4.2 Yacimientos de Argentina

De acuerdo con Petersen (1989), los yacimientos metalíferos argentinos se clasifican de la siguiente manera:

- (1) Yacimientos sedimentarios de manganeso, yacimientos de enrejado de hierro y yacimientos de pegmatita del Precámbrico
- (2) Yacimientos del Carbonífero Inferior
  - 2a. Yacimientos singenéticos de hierro asociados a las rocas sedimentarias
  - 2b. Yacimientos de plomo-zinc-tungusteno
  - 2c. Yacimientos estratiformes de níquel-cobalto
  - 2d. Yacimientos estratiformes de cobre-plomo-zinc
- (3) Yacimientos volcánicos de cobre del Mesozoico
- (4) Yacimientos del Cretácico Superior al Terciario
  - 4a. Pórfidos cupríferos y de molibdeno
  - 4b. Skarn de cobre-plomo-zinc-oro
  - 4c. Yacimientos vetiformes a metasomáticos de cobre-plomo-zinc-plata
  - 4d. Yacimientos de enargita y metal precioso

Cabe anotar que Sollitoe (1977) incluye los pórfidos cupríferos argentinos a los yacimientos del Carbonífero Inferior (u Ordovícico: Taca Taca), del Carbonífero Superior al Pérmico Inferior (Alcaparrosa, del Triásico: Yalguaraz) y del Cretácico (74 Ma, Campa Mahuida que queda fuera del Area del Estudio).

Los yacimientos de Argentina presentan las siguientes características y relación con la orogenia, según Zappettini (1996):

#### (a) Yacimientos formados por la Orogenia Pampeana del Proterozoico Superior

Existe una faja orogénica del Proterozoico Superior al este de las Sierras Pampeanas, asociada con las rocas básicas y ultrabásicas. Esta faja constituye el arco magmático del Proterozoico Superior formado por la colisión de dos placas, y se caracteriza por la existencia de al menos dos sistemas de arco insular. La mineralización se relaciona con tholeiitos-basaltos de los sistemas del arco insular y cuenca de posarco.

Uno de los yacimientos de este período es el área de Novillo Muerto de la provincia de Catamarca.

**(b) Yacimientos formados por la Orogenia de Famatina del Cámbrico al Devónico**

La subducción de las Sierras Pampeanas ocurrido entre el Cámbrico y Devónico dio lugar a la intrusión de granitos al arco magmático, formándose así los yacimientos de estaño, bismuto y tungsteno.

En la región de Puna, la paleogeografía del Ordovícico muestra la Plataforma de Arequipa separado del Continente Gondwana. Entre estos dos, se desarrollaron dos cadenas eruptivas. En este período, se formaron el yacimiento de estaño de Pirquita y de oro de Rinconada en la provincia de Jujuy. En las áreas de plataforma se desarrollaron los yacimientos sedimentarios como el Aguilar y Helvecia de las provincias de Jujuy y La Rioja, respectivamente. Relacionado con las actividades magmáticas en la cuenca de posarco, se formaron los depósitos macizos de sulfuro, como son La Colorada (plata-plomo-zinc) de Salta, y Santa Elena de San Juan. Aguilar representa la concentración mineral de plomo-zinc, y es el yacimiento más grande en América del Sur. Las reservas totales (incluyendo la producción anterior) se estiman en por lo menos 30 MT (Pb+Zn+Cu 18 %). El depósito tiene origen en el yacimiento sedimentario exhalativo, y fue afectado por los eventos metasomáticos de las intrusiones graníticas del Cretácico.

Zapla de la provincia de Jujuy es un ejemplo del estrato de hierro formado dentro del estrato marino del Silúrico. En la Precordillera y la Cordillera Frontal existen los depósitos minerales singenéticos asociados con ofiolitas en las zonas suturas con cromo, magnetita, sulfuros macizos, etc.

**(c) Yacimientos formados por la Orogenia de Gondwana del Pérmico al Triásico**

La fragmentación de Pangea hacia el final de Paleozoico provocó la extrusión de riolitas, dando origen a los yacimientos polimetálicos relacionados con las fajas magmáticas pérmicas a triásicas en las Sierras Pampeanas, Precordillera y en la Cordillera Frontal. Tales son los casos de los yacimientos Caledonia y Albión (oro-plomo-zinc) de la provincia San Juan, El Santa Clara, El Portillo e Infiernillo (cobre-molibdeno) de la provincia de Mendoza. Como depósitos estratiformes, aflora el yacimiento de uranio en Sierra Pintada.

**(d) Yacimientos formados por la Orogenia Patagónica del Jurásico al Cretácico**

Los yacimientos estratiformes se formaron en estos períodos en antearco o plataforma ubicados dentro del campo de tensión de la Cordillera de los Andes. De estos, el Área del Estudio incluye el yacimiento vetiforme de cobre que tienen por roca encajadora a las rocas volcánicas. Tales son los casos de San José y El Burreo de la provincia de Mendoza. Asimismo se conocen los depósitos de tierras raras asociadas con carbonitita en las provincias de Jujuy y Salta.

**(e) Yacimientos formados por la Orogenia Andina del Cretácico Superior y posteriores**

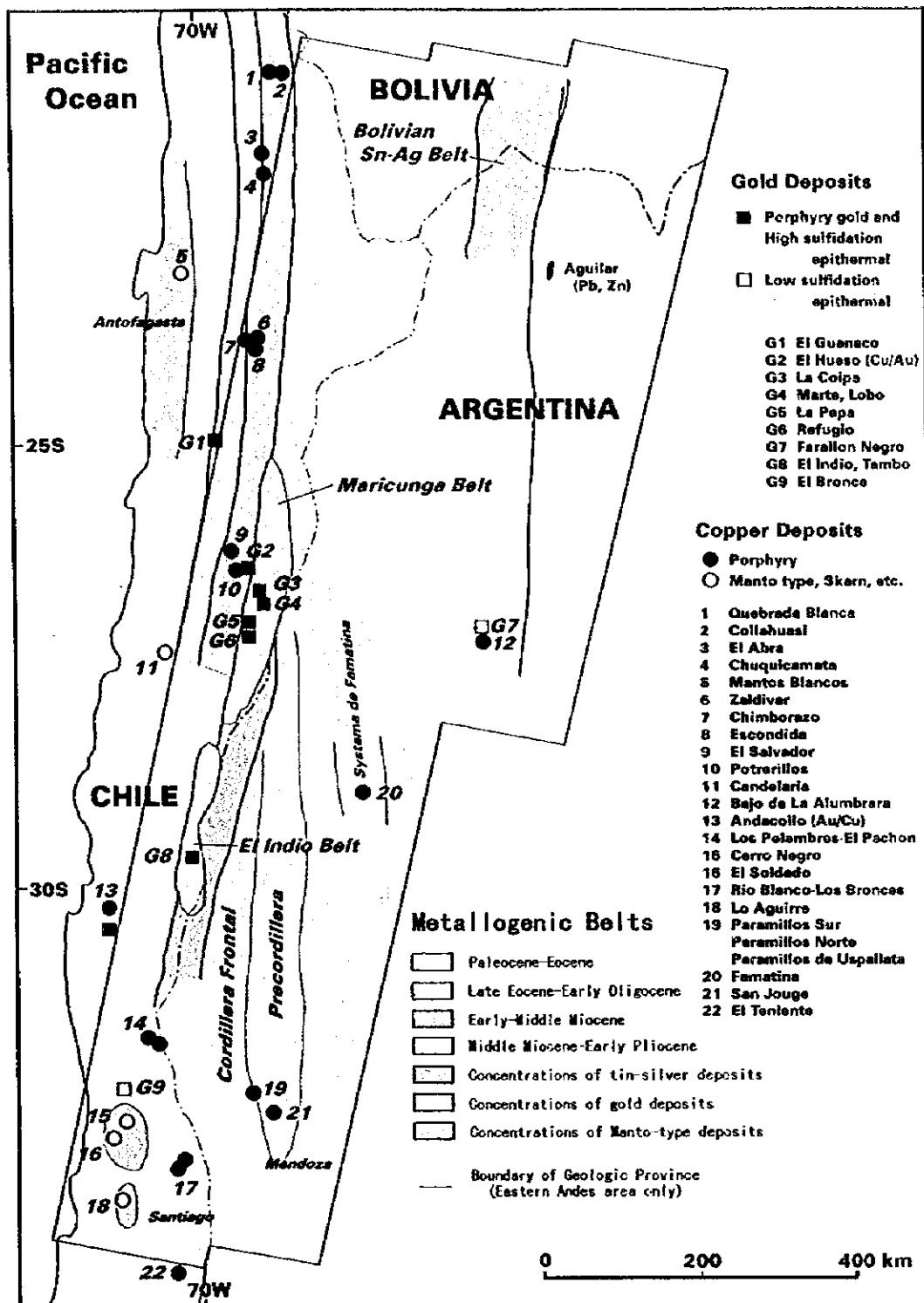


Fig. 7 Metallogenic Province of the Study Area (adapted from Sillitoe, 1991)





Entre los yacimientos de estos períodos se incluyen los pórfidos cupríferos y otros depósitos de alto interés económico, de los cuales se describirán con mayor detalle en el apartado correspondiente en los yacimientos de Chile. Asimismo, existen los yacimientos vetiformes a metasomáticos de cobre-plomo-zinc-plata del Cretácico Superior al Terciario Inferior, yacimientos estratiformes de cobre-uranio-vanadio contemporáneamente emplazados en los estratos de areniscas rojas al lado continental. De Catamarca a Salta se distribuyen múltiples yacimientos de plomo-zinc, que son vetiformes epitermales polimetálicos de plomo-zinc formados en el Terciario. El más representativo es el Diablillos. También es conocido el depósito volcánico supérgeno Hoyada.

### **3.4.3 Yacimientos de Chile**

#### **(1) Descripción general de los yacimientos de Chile**

Los principales yacimientos de Chile fueron formados asociándose con la orogenia Herciniana del Paleozoico Superior y la Orogenia Andina del Cretácico Superior y posteriores. La Orogenia Herciniana se asocia con la formación de yacimientos de hierro, cromo y níquel, mientras que la Orogenia Andina con los pórfidos cupríferos y yacimientos epitermales. El magmatismo asociada con tectogénesis al margen occidental de la Placa Sudamericana dio origen a las provincias metalogénicas que se distribuyen al este y al oeste. Al extremo oeste, se desarrollan los yacimientos metasomáticos de contacto de hierro y apatita y los yacimientos estratiformes de cobre. Al este del segmento, se desarrolla la faja de pórfidos de cobre-molibdeno y yacimientos polimetálicos de plata-plomo-zinc. Más al este, en altiplano boliviano se distribuye la faja de estaño-bismuto-tungusteno.

La distribución en las provincias metalogénicas refleja la variación de la posición geológica y del magma durante la evolución de la faja orogénica andina. El magmatismo muestra una transición desde la serie de rocas alcalinas calcáreas, parcialmente de tholeiitos, composición intermedia hasta la serie superior de rocas alcalinas calcáreas con abundante en potasio.

La mineralización de oro se da a lo largo de todo el ciclo de la Orogenia Andina. Camus (1990) expone 20 distritos productores de oro en Chile, de los cuales seis están dentro del Area del Estudio. Estos se clasifican en los siguientes grupos, en orden de antigüedad:

- (a) Del Jurásico al Cretácico Inferior: Las Vacas
- (b) Del Cretácico Superior al Terciario Inferior: El Bronce
- (c) Del Mioceno al Holoceno: El Indio, La Coipa, Marte y El Hueso

Los yacimientos de oro del Jurásico al Cretácico Inferior son predominantemente depósitos epitermales de baja sulfuración, mientras que los del Mioceno al Holoceno son depósitos epitermales de alta sulfuración.

## (2) Yacimientos tipo pórfido cuprífero

Salvo algunas pocas excepciones, los pórfidos cupríferos del Area del Estudio se clasifican en las siguientes provincias metalogénicas que se distribuyen de oeste a este: del Paleoceno al Eoceno Inferior, del Eoceno Superior al Oligoceno, del Mioceno Inferior a Medio, del Mioceno Medio al Plioceno Inferior. Al oeste del Area del Estudio, y al más oeste (Perú, saliendo del Area del Estudio) se distribuye una provincia del Paleoceno al Eoceno de rumbo sur. Sin embargo, no se conoce grandes pórfidos cupríferos dentro del Area. Al este, en la frontera entre Argentina y Chile, existen múltiples pórfidos cupríferos del Eoceno al Oligoceno que se extiende formando una provincia de rumbo N-S. Más al este, en la provincia metalogénica del Mioceno Inferior al Medio, están Los Pelambres y otros yacimientos al sur del Area del Estudio. Más al este, en la provincia metalogénica del pórfido cuprífero del Mioceno al Plioceno, se conoce el famoso y extenso Bajo de la Alumbrela desarrollado de rumbo N-S.

## (3) Yacimientos estratiformes de cobre

Al oeste de los pórfidos cupríferos se conocen dentro del Area del Estudio, los yacimientos estratiformes de cobre y plata como El Soldado.

## (4) Yacimientos epitermales de oro

### (a) Descripción general

Los yacimientos epitermales de oro de Chile están descritos en el informe de Davidson y Mpodozis (1991). Los depósitos epitermales de oro-plata se distribuye al este de la provincia de pórfidos cupríferos del Eoceno Superior al Mioceno Inferior. En especial, se conocen múltiples yacimientos en las Fajas Maricunga y El Indio, como son La Copia y Marte.

Los depósitos epitermales se formaron del Cretácico al Cenozoico. Las rocas ígneas relativas intruyeron al arco magmático de rumbo NNE-SSO, al borde de una placa oceánica-continental convergente y no colisional. La mayoría de los depósitos se asocian con pórfidos subvolcánicos que se ubican en los centros volcánicos erosionados. En el Cretácico Superior, se formaron las vetas y zonas de alteración hidrotermal como El Bronce y otros. Las rocas volcánicas del Paleoceno al Eoceno entre 21° y 26°S, contienen depósitos epitermales de metal precioso y de pórfido cuprífero.

El volcanismo al norte de Chile se disminuyó o cesó del Eoceno Superior al Oligoceno Inferior. Como yacimientos del Oligoceno, se conoce el pórfido cuprífero (Potrerillos) emplazado en las zonas transtensionales a lo largo de la falla de desplazamiento de rumbo, y el yacimiento epitermal (El Hueso) asociado con las tapones de intrusivos.

La provincia magmática del Oligoceno Superior al Mioceno Medio coincide con el segmento moderno, no volcánico (segmento de placa con inclinación leve) de los Andes de

Chile (del centro a norte) y emplaza múltiples yacimientos epitermales. Los depósitos como El Indio, Tambo, Nevada, La Pepa, Lobo, Marte y La Coipa tienen por roca encajadora a rocas volcánicas del Oligoceno al Mioceno.

Un evento más joven de alteración-mineralización tiene por roca encajadora al centro de los volcanes complejos del Mioceno Medio. Tales son los casos de Refugio y La Laguna. El evento de alteración más importante comenzó en 23 Ma, continuando hasta después de 18 a 16 Ma cuando ocurrieron las deformaciones, y finalizó entre 11 y 8 Ma.

Los depósitos y las zonas de mineralización de la provincia del Oligoceno al Mioceno, fueron expuestos a la erosión después de haber cesado la migración hacia el este del volcanismo en Mioceno Superior. El magmatismo del Mioceno Superior al Holoceno en Chile se presenta en dos segmentos donde la inclinación de la faja Benioff se vuelve acantilada: al norte de 27°S (cadena volcánica central) y al sur de 33°S (cadena volcánica meridional). La cadena central se caracteriza por las extensas zonas de alteración hidrotermal del Neógeno y los depósitos de azufre asociados con volcanes complejos, calderas, intrusiones de rocas hipabisales, y campos geotermales activos que son superpuestos sobre la faja volcánica del Oligoceno al Mioceno. Se deducen que estos representan un medio epiterminal erosionado a muy poca profundidad.

#### (b) Depósitos epitermales en la Faja El Indio

La Faja El Indio se extiende por 200 Km a lo largo de la frontera entre Argentina y Chile entre 29° a 31°S. Dentro de ella, se distribuyen las zonas de alteración hidrotermal caracterizadas por alteración argílica, alteración argílica avanzada y silicificación de las rocas volcánicas del Paleozoico, hasta los Oligoceno y Mioceno Medio. En general, las zonas de alteración se hallan preservadas con poca erosión debido a su localización en las fosas tectónicas delimitadas por fallas inversas de buzamiento acantilado. La mayoría de las zonas se asocian con la intrusión a poca profundidad. La mineralización epitermal rica en azufre incluye vetas de cuarzo-oro y enargita maciza (El Indio), baritina-oro-brechas (El Tambo), y alunita-oro-brechas (Sancarrón). La alteración ocurrió de 17 a 16 Ma, y de 11 a 8,7 Ma.

#### (c) Depósitos de oro-plata en la Faja Maricunga

Los intrusivos en esta Faja afloran menos que en la Faja El Indio. Se expone menos a la erosión, y está cubierta por espeso estrato de rocas volcánicas del Mioceno Superior al Reciente en la mitad este de la Faja. Excepcionalmente, las rocas volcánicas del Mioceno Medio en Aldebaran donde un volcán del Mioceno Medio profundamente erosionado muestra una sección vertical de menos de 1 Km a través del sistema hidrotermal. Más al norte de Aldebaran, la mayoría de los depósitos tienen por roca encajadora a intrusivos de pórfidos hipabisales del Oligoceno Superior al Mioceno Inferior y Mioceno Medio. Las rocas graníticas y riolíticas del Paleozoico Superior, las rocas sedimentarias continentales del Triásico y las rocas sedimentarias marinas del Jurásico Inferior al Medio también constituyen rocas encajadoras.

En general, las estructuras de la Faja Maricunga se hallan controladas por montañas en bloque y fosa tectónica delimitados por fallas de buzamiento acantilado de N-S. La Coipa es el depósito de metal precioso más importante en la Faja Maricunga. Su extensa fractura se desarrolla al pie del plegamiento formado durante Eoceno y Oligoceno Inferior. La alteración y mineralización se emplazan dentro de lutitas triásicas, así como en las cubiertas de tobas alteradas del Mioceno Inferior. La intrusión y extrusión de lavas dacíticas del complejo volcánico Cerros Bravos del Mioceno Superior (de 16 a 14,7 Ma) dieron lugar después de la alteración hidrotermal. Similares eventos de alteración-mineralización se registraron también en el depósito La Pepa. Las rocas volcánicas del Oligoceno al Mioceno Inferior se preservan en el lado de pared de base de las fallas inversas de buzamiento acantilado con inclinación hacia oeste, emplazando una gran zona de alteración que contiene vetas de oro y brechas.

La zona de alteración de La Pepa se halla cubierta por ignimbritas del Mioceno Superior (de 10,1 a 8,6 Ma). La Pepa, junto con Refugio, Santa Cecilia y Caserones se localizan al extremo oeste, y son las zonas de alteración y mineralización más antiguas en la Faja Maricunga. Una línea de áreas de mineralización más recientes se localizan de 20 a 30 Km más al este, donde se distribuyen las minas como Marte, Lobo, Vally, Escondida, Pantanillos, Amalia, Cacique y Aldebaran. La alteración en estas zonas se asocian con las actividades volcánicas principalmente del Mioceno Superior.

#### (d) Depósitos de oro El Bronce

El grupo de depósitos El Bronce se localiza más al lado del Océano Pacífico que las Fajas El Indio y Maricunga, y son yacimientos epitermales que tienen por roca encajadora a las rocas volcánicas cretácicas inferiores distribuidas dentro de los 3 Km en dirección E-O y 17 Km N-S.

### 3.4.4 Otros depósitos

#### (1) Depósito de antimonio-mercurio

En los Andes se distribuyen en grandes extensiones los depósitos de mercurio asociados con las actividades ígneas intensivas del Cenozoico, aunque todos son pequeños. También existen múltiples depósitos pequeños de antimonio entre Chile y Argentina.

#### (2) Depósitos de estaño-tungusteno

La provincia metalogénica de depósitos de estaño-tungusteno del Altiplano de Bolivia se extiende hasta el interior del Area del Estudio. La parte sur de esta provincia tiene por roca encajadora a las rocas volcánicas e intrusivos subterráneos, y sus elementos son predominantemente estaño-plata, asociados con tungusteno, bismuto y plomo. Al norte de Argentina se distribuyen los yacimientos vetiformes y del tipo skarn.

## Capítulo 4 Procesamiento y Generación de las Imágenes

Con el fin de analizar la geología y la estructura, así como para identificar las zonas de alteración del Área del Estudio, se generaron las imágenes de falso color, imágenes de "ratio" en 23 escenas, y subsiguientemente las imágenes digitales de falso color en mosaico. Para los efectos, se desarrolló una metodología que posibilite expresar en las mismas tonalidades los grupos de litofacies y de las zonas de alteración obtenidas en las diferentes escenas. Asimismo, se prepararon las imágenes digitales en mosaico de las 23 escenas que cubren la totalidad del Área del Estudio, mediante la combinación de las mismas bandas con las imágenes de falso color. En el proceso de disposición en mosaico, se procuró mantener el nivel de tonalidades de las imágenes adyacentes. A continuación se describe la metodología aplicada para la preparación de las imágenes.

### 4.1 Preparación de las imágenes compuestas de falso color

Tal como se ha señalado anteriormente, para preparar las imágenes compuestas de falso color, se hizo necesario realizar la calibración de la cantidad de radiación, cuya tarea incluyó la corrección del rayo incidente, de la atmósfera y del coeficiente de reflexión direccional. A continuación se describen las razones por las que se hizo necesario efectuar la corrección, así como la metodología aplicada.

#### (1) Necesidades de la calibración de la cantidad de radiación

El LANDSAT TM cubre en total 7 bandas (4 bandas de la región de radiaciones visible y de infrarrojo próximo; 2 bandas de la región de ondas cortas infrarrojas; y 1 banda de infrarrojo térmico. Los datos de las imágenes analógicas tomadas son convertidos en 256 valores digitales (de 0 a 255) por cada pixel.

Los valores de brillo obtenidos a través de los sensores ópticos como LANDSAT TM son, en el caso de la región de radiaciones visible y del infrarrojo próximo, el reflejo del rayo solar desde la superficie de la tierra, lo que plantea la posibilidad de identificar la naturaleza de los objetos terrestres por su respectiva reflectividad espectral específica. La energía radiante espectral que incide en el sensor del satélite, es la luz solar reflejada por la superficie terrestre y que atraviesa la atmósfera. Por lo tanto, la energía radiante captada por el sensor incluye, además de la luz reflejada desde la superficie terrestre, la denominada "energía radiante de trayecto" que es la luz difusa y dispersa desde la atmósfera, y la denominada "luz celestial" que es la radiación difusa producida por la dispersión de la luz solar en la atmósfera y que incide omnidireccionalmente. Por lo tanto, cuando el sensor percibe la longitud de onda  $\lambda$  directamente hacia abajo, el valor aproximado se calcula mediante la siguiente expresión:

$$L(\lambda_1, \lambda_2) = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} K(\lambda) [\tau a(\lambda) \{ U(\lambda) + P(\lambda) \} \rho(\lambda) + b(\lambda)] d\lambda$$

Donde,

- $L(\lambda_1, \lambda_2)$ : Factor de la energía radiante espectral entre las ondas  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  que penetran al sensor
- $K(\lambda)$ : Características de respuesta del sensor
- $\tau a(\lambda)$ : Permeabilidad de la luz reflejada en la atmósfera
- $U(\lambda)$ : Energía radiante de la luz solar directa
- $\rho(\lambda)$ : Factor de reflexión de la superficie terrestre
- $b(\lambda)$ : Radiación y difusión atmosférica entre el sensor y el objeto
- $P(\lambda)$ : Energía radiante de la luz celestial que es la luz difusa inferior de la luz solar

De estos,  $b(\lambda)$  es el factor aditivo del brillo que incide al sensor, mientras que  $U(\lambda)$ ,  $P(\lambda)$  y  $\tau a(\lambda)$  son factores de multiplicación. La incidencia de estos factores varía según el volumen de vapor y de aerosol en la atmósfera, lo cual plantea que los datos de un mismo objeto pueden variar si se toman en diferentes temporadas. De la misma manera, dado que la absorción y/o dispersión de luz dependen de las ondas, la relación de bandas de la reflectividad espectral de una determinada sustancia no es la misma en las imágenes tomadas en diferentes temporadas. Por lo tanto, en el caso de procesar imágenes sin las debidas correcciones de la cantidad de radiación de cada banda, las mismas sustancias pueden ser representadas en diferentes tonalidades, imposibilitando su comparación e identificación.

Por lo tanto, en este análisis, se procedió a la corrección de la cantidad de radiación de las imágenes tomadas en diferentes temporadas, sobre la base de las siguientes hipótesis:

- Las respuestas del sensor serán expresadas en modelo del rayo primario ( $y = ax$ ) en función del brillo incidente.
- La permeabilidad de la atmósfera a la luz reflejada es igual en todos los puntos de una imagen.
- La radiación y dispersión atmosférica entre el sensor y el objeto son iguales en todos los puntos de una imagen.
- La energía radiante de la luz celestial es igual en todas los puntos de una imagen.

## (2) Corrección de rayo incidente

La luz solar directa que incide en una determinada unidad de superficie puede variar según lugares en una misma imagen. Es decir, si en el cono sur la radiación solar proviene del norte, la luz directa que incide en una unidad de superficie dentro de una imagen es mayor en el norte que en el sur. La corrección del rayo incidente de luz se efectuó de manera tal que la altitud solar sea de  $60^\circ$  desde cualquier coordenada geográfica, azimut y altitud del sol de cada uno de los píxeles dados en una imagen.

### (3) Corrección Atmosférica

La corrección atmosférica consiste en rectificar los valores de “ $\tau a(\lambda)$ ” y “ $b(\lambda)$ ”, para lo que se requiere obtener previamente la incidencia  $\{U(\lambda) + P(\lambda)\}$  y la reflectividad terrestre de  $\rho(\lambda)$ .

La corrección del rayo incidente del numeral anterior (2) presume que todos los objetos que aparecen en la imagen son planos. Sin embargo, en realidad, debido a la presencia de los relieves topográficos, las imágenes tomadas en diferentes temporadas arrojan diferentes valores de  $\{U(\lambda) + P(\lambda)\}$  según la posición solar. Para su corrección se puede aplicar el DTM (Modelo terreno digital: Digital Terrain Model) de alta precisión, aunque éste método no resulta ser muy realista puesto que las áreas donde es aplicable el modelo son muy limitadas. Por lo tanto, en este análisis se aplicó otro método que consiste en seleccionar un determinado número de píxeles correspondientes entre dos imágenes, y procesar estadísticamente el traslapo de imágenes para anular la dependencia de los relieves topográficos.

El método de coincidencia de desviación estándar y del promedio de brillo basado sobre la estadística de toda la parte traslapada de las imágenes es el más utilizado, y consiste en lo siguiente:

$$P_{ij} = (P_{ij} - P_{av}) / \sigma_p \times \sigma_q + Q_{av}$$

$P_{ij}$ : Valor de conversión de nivel de gris	$P_{ij}$ : Un punto arbitrario en una imagen de conversión de brillo
$P_{av}$ : Brillo medio de las imágenes de conversión de brillo	$\sigma_p$ : Desviación estándar de brillo de las imágenes de conversión de brillo
$Q_{av}$ : Brillo medio de las imágenes de referencia	$\sigma_q$ : Desviación estándar de las imágenes de referencia

En este caso, se supone que no existen grandes variaciones en las coberturas terrestres en la parte traslapada de las imágenes, y que los valores  $\rho(\lambda)$  en las dos temporadas son iguales. Sin embargo, al utilizar las imágenes tomadas en dos estaciones diferentes, como en el caso del presente análisis, no se puede aplicar el promedio de brillo ni el método de desviación estándar debido al cambio de vegetación, cobertura de nieve, nube, neblina, lagos, cauce de los ríos y las estructuras terrestres en las partes traslapadas de las imágenes.

Por lo tanto, se aplicó el método que se describe a continuación:

Para todos los puntos correspondientes de la parte traslapada de las imágenes, se tomaron los valores de brillo de la imagen de referencia en el eje horizontal, y los valores de la imagen a procesar en el eje vertical. Subsiguientemente, se analizaron las diferencias de brillos entre los puntos. Al trazar los resultados en el gráfico de dispersión, la distribución de los puntos donde la variación de la reflectividad espectral ( $\lambda$ ) de los

objetos (como vegetación, sombras, nieve y nube) sea grande, aparecen en grupos de puntos singulares, facilitando la interpretación.

La mayoría de los puntos correspondientes, después de eliminar los singulares, no muestra grandes variaciones en  $\rho(\lambda)$ , y el grupo de puntos se distribuye en torno a una línea recta mostrando alta correlación. Tal distribución refleja la diferencia de  $\{U(\lambda) + P(\lambda)\}$  producida por los relieves topográficos. Al realizar la regresión primaria de estos puntos aplicando el método del mínimo cuadrado, se pudo anular el efecto de la topografía. De los valores de  $\{U(\lambda) + P(\lambda)\}$  y del método de regresión primaria corregida de  $\rho(\lambda)$ , se obtuvo el coeficiente de corrección atmosférica por  $\tau a(\lambda)$  y  $b(\lambda)$ .

La regresión primaria permite aproximar a la línea recta que pasa por el origen, si las imágenes han sido obtenidas en un mismo día, lo cual indica que la permeabilidad atmosférica  $\tau a(\lambda)$  y la radiación y dispersión atmosférica  $b(\lambda)$  muestran valores iguales en las dos imágenes.

En el caso de que las imágenes hayan sido obtenidas en diferentes fechas, la fórmula de regresión primaria puede ser expresada como  $y = ax + b$  sin pasar por el origen, indicando que los valores de la permeabilidad atmosférica  $\tau a(\lambda)$  y de la radiación y dispersión atmosférica  $b(\lambda)$  son diferentes, y que pueden ser igualados entre ambas imágenes aplicando dicha fórmula. Dado que la sensibilidad del sensor es diferente según la fecha de obtención de imágenes, los valores  $\tau a(\lambda)$  y  $b(\lambda)$  deben ser multiplicados por  $K(\lambda)$  para corregir la sensibilidad.

Considerando la alta precisión de corrección atmosférica en las mismas fechas de obtención de imágenes, se corrigieron las 23 escenas siguiendo los procedimientos que se describen a continuación:

- (a) Se efectuó la corrección atmosférica de cada Pista (Path), teniendo como imagen de referencia a la que está más al norte (Fila: Row 075) de cada pista.
- (b) Se efectuó la corrección de cada imagen desde el norte hacia el sur.
- (c) La corrección de tres pistas se basó sobre la pista central (P232).

Este método de procesamiento permite igualar la atmósfera de todas las imágenes a la de la pista central, fila norte (P232/F075).

Sin embargo, al efectuar la corrección desde el norte hacia el sur puede ir acumulando el error de corrección en las imágenes del sur, dificultando la aplicación de una misma línea de regresión primaria entre norte (Fila 075) y sur (Fila 083 ó 079) al momento de procesar dos pistas del este y oeste. Para solucionar esta inconveniencia, se compararon las líneas de regresión primaria en los tres puntos siguientes: Fila 075 del norte, Fila 080 del centro y Fila 083 del sur. Cabe recordar que en este procedimiento, no se incluyeron las áreas que mostraban grandes variaciones de coberturas terrestres (como vegetación, etc.) aplicando el método ya descrito anteriormente. De esta manera, se verificó que no existe una diferencia significativa entre la inclinación y segmentos de las líneas de regresión primaria derivada del error de corrección, y se confirmó que la corrección atmosférica es adecuada en dirección N-S.



Este método no puede ser aplicado si un elevado porcentaje de la parte traslapada de una de las imágenes está cubierta de nieve. Tal es el caso de las imágenes de P233/F080 y P233/F081, en la que la cobertura de nieve que ocupaba un elevado porcentaje en la segunda imagen no permitió realizar la corrección atmosférica de ambas. Por lo tanto, en el caso específico de la imagen P233/F081, se utilizó la parte este que no está cubierta de nieve, y se realizó la corrección con la imagen de P232/F081 ya corregida.

#### (4) Corrección del factor de reflexión direccional

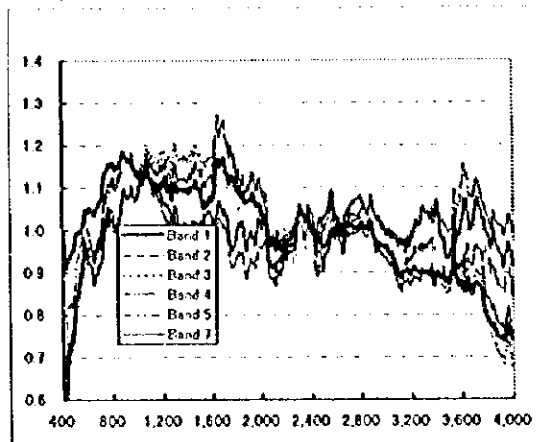
Se define que la reflectividad es 1 cuando se observa verticalmente la luz reflejada que incide verticalmente en un objeto de reflexión difusa perfecta. Al cambiar la posición de observación de vertical a horizontal en estas condiciones, el factor de reflexión se reduce dentro del rango de 1 a 0.

El ángulo de vista horizontal (casi E-O) de una imagen de LANDSAT TM es de  $16^\circ$  aproximadamente, lo cual plantea que cuando la luz solar penetra desde el lado derecho de la imagen, el ángulo entre el sol - objeto - observador difiere  $16^\circ$  entre derecha e izquierda, produciendo algo similar a cuando se ha observado el objeto de reflexión difusa perfecta desde distintos ángulos. Este factor de reflexión direccional difiere según los objetos y ondas, y depende de los relieves topográficos, lo que imposibilita la corrección por cada pixel. Sin embargo, al comparar los extremos este y oeste de una imagen (suponiendo que la posición del sol al lado este, azimut de  $90^\circ$ , altitud de  $60^\circ$ , que no existen relieves topográficos, y que se distribuyen las sustancias semejantes a basaltos de la luna), se produce una disminución de brillo por 10 % aproximadamente al lado derecho (este) de la imagen donde se abre el ángulo entre el sol - objeto - observador. Por lo tanto, al mirar tres imágenes en dirección E-O, suponiendo que el brillo es 1 en el extremo oeste de las imágenes adyacentes, éste se reduce por un 27 % ( $=0.9^3$ ) en el extremo este, resultando una imagen oscura en el lado este.

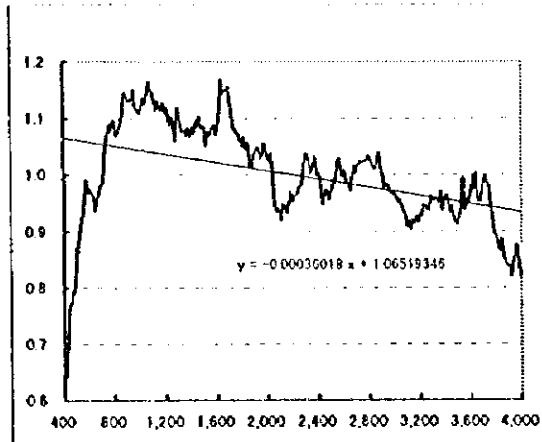
Por lo tanto, se efectuó el estudio de la variación de los valores de brillo de las imágenes sometidas a corrección atmosférica utilizando la estadística para anular los efectos de relieves topográficos y las diferencias de las sustancias terrestres. La estadística de cada fila estaba constituida por unos 13.000 datos. El estudio fue efectuado para 18 escenas, excluyendo los datos de las Areas de Tarija, San Ramón, Salta, Rosario y Tucumán (de P231/F075 a 079), donde las coberturas terrestres (vegetación) variaban sustancialmente. Se calcularon los promedios de cada columna y fila y la desviación estándar teniendo como determinantes a los valores de brillo de cada pixel. No obstante, dado que cada imagen constituye un paralelogramo, se desplazó el punto de inicio de obtención de imágenes del extremo oeste en sentido horizontal, a modo de tener una matriz homogénea.

El gráfico superior izquierdo de la Figura 8, indica la variación horizontal (E-O) de valores medios de filas (S-N). En el eje vertical, los valores medios de cada banda fueron expresados en función del promedio (1). La dirección E-O de este gráfico corresponde a dos escenas, y muestra que el brillo se reduce al este de la imagen. Por otro

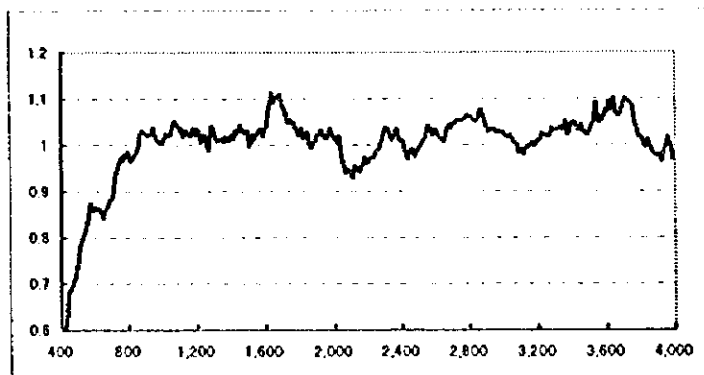
1. Rate of Changes of Brightness in Horizontal Direction  
By Band (before Correction of Brightness)



2. Rate of Changes of Brightness in Horizontal Direction  
(Average of Multi-Bands ; before Correction of Brightness)



3. Changes of Brightness in Horizontal Direction  
(Average of Multi-Bands ; after Correction of Brightness)



4. Changes of Brightness in Vertical Direction (Average of Multi-Bands)

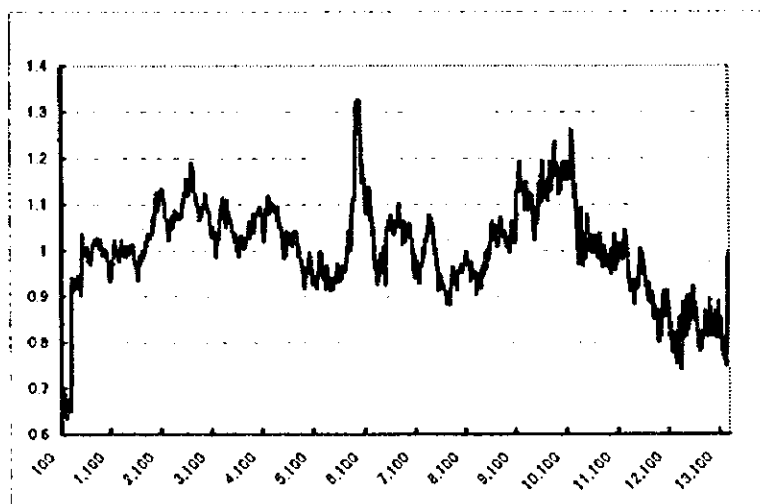


Fig. 8 Changes of Brightness by Directional Reflectance

lado, el gráfico superior derecho de la Figura 8, muestra el promedio de las bandas del 1 al 5 y 7, expresado por la línea de regresión primaria aplicando el método del mínimo cuadrado. Esta línea de regresión muestra que la relación de brillo varía en orden de  $\pm 7\%$  en los dos extremos este y oeste, en función del centro (1). Si bien es cierto que esta variación es menor al 10%, que es la tasa de reducción de brillo por el factor de reflexión direccional calculada sobre la base del valor teórico de basaltos de luna, los resultados se aproximaban a la predicción. A fin de corregir el factor de reflexión direccional, se corrigió el brillo de cada una de las imágenes aplicando esta línea de regresión, y se calculó nuevamente la estadística obteniendo la variación de brillo en dirección E-O casi pareja, tal como se ve en el gráfico central de la Figura 8.

El gráfico inferior de la Figura 8 muestra la media aritmética en dirección de columna. Dado el número reducido de datos (unos 4.000) utilizados para el cálculo de estadística de cada columna, este gráfico muestra una curva de variación de valores medios relativamente despareja, a consecuencia de los efectos de la topografía y distribución de sustancias. En este gráfico no se identifica una clara pendiente de brillo como en el gráfico superior derecha, lo cual indica que hay poca variación de brillo en dirección S-N.

La diferencia del rayo incidente producida por la diferencia de latitud constituye uno de los factores que altera el promedio en dirección S-N. Se considera que esta diferencia del rayo incidente se ve casi anulada por la corrección de incidencia efectuada a cada imagen, tal como se ha descrito anteriormente. De la misma manera, es mínima la variación del factor de reflexión direccional por variación de latitud, puesto que el azimut solar de las imágenes utilizadas está dentro del rango de 60 a 90°, y el sol se ubica al este. Por estas razones, se considera que no existe la variación S-N derivada del factor de reflexión direccional.

#### (5) Generación de imágenes de falso color

Efectuada la corrección de la cantidad de radiación, los valores de todas las escenas son homogéneos en función de la imagen P232/F075. Sin embargo, cabe recordar que las estadísticas (promedio, desviación estándar, asimetría) de los datos de imágenes de LANDSAT TM difieren según banda. Además, la dispersión de datos es insignificante, de 20 a 30 (256 tonos). Por lo tanto, al utilizar estas estadísticas sin la debida corrección, las imágenes resultarían ser inadecuadas para su interpretación, por el desequilibrio de colores y la poca dispersión de datos que resultan en tonalidades poco discriminables.

Para subsanar esta inconveniencia corrigiendo la cantidad de radiación de todas las escenas, se efectuó la misma corrección de brillo utilizando estiramiento no lineal. La metodología aplicada consistió en realizar el estiramiento no lineal de manera que el promedio de brillo sea de unos 115 (256 tonos) (puesto que la diferencia de tonos es más fácil de interpretar en áreas oscuras), y que la distribución sea lo más normal posible. La distribución normal fue calculada de tal manera que resulte 115 tonalidades al

multiplicar la desviación estándar por 2,5. Para el cálculo de todas las áreas, se excluyeron las nubes, nieve y cuerpos de agua.

Existen varios métodos de hacer más nítidas las imágenes, como la aplicación de filtros de Laplace o de Gauss, o aumentando la nitidez local. Sin embargo, tanto los filtros de Gauss como el método de aumentar la nitidez local suelen representar las mismas sustancias en distintas tonalidades según su ubicación, puesto que se utilizan diferentes métodos de estiramiento según lugares para resaltar hacer más discriminables. Para evitar tales inconveniencias, en este análisis solamente se utilizaron los filtros de Laplace.

Se estudiaron las combinaciones de bandas: 1/4/5, 1/4/7, o 4/5/7, y finalmente se seleccionó la de 1/4/5, considerando que en el Area del Estudio se distribuyen las rocas volcánicas intermedias en grandes extensiones. Se atribuyeron los colores azul, verde y rojo a las bandas 1, 4 y 5, respectivamente.

#### (6) Corrección geométrica

Con el uso de las imágenes de falso color y de un mapa topográfico de escala 1:500.000, se efectuó la conversión geométrica de las imágenes a las coordenadas UTM. Ha resultado difícil seleccionar puntos de control terrestre (GCP: Ground Control Point) de alta precisión, primero porque el mapa topográfico más preciso disponible fue únicamente el de escala 1:500.000, y segundo porque el Area de Estudio está constituido por zonas montañosas y desérticas, con pocas estructuras artificiales y/o ríos que sirvan de referencia. Se tomaron como GCP las bifurcaciones de los ríos, cruces de caminos, etc. y se seleccionaron de 15 a 20 puntos por cada imagen. Para la interpolación, se utilizó el método de transformación pseudoafín, y se excluyeron los GCP de baja precisión para que el error comparado con los resultados del cálculo por el método del mínimo cuadrado sea menos a 30 pixeles (1 Km aproximadamente).

Este margen de error de 30 pixeles corresponde a 2 mm aproximadamente en un mapa topográfico de 1:500.000, lo cual se aproxima al límite del error de corrección geométrica en el caso de considerar la precisión y localidad del mapa. Para la conversión geométrica se ha utilizado el método bilineal, y se repitió el muestreo teniendo el tamaño de 1 pixel de 30 m.

## 4.2 Preparación de las imágenes de "ratio"

### (I) Principios de "ratioing"

LANDSAT TM percibe la energía radiante espectral que incide en el sensor en siete bandas entre el infrarrojo visible y próximo, y el infrarrojo intermedio. La energía radiante  $N_i$  (unidad:  $mW/cm^2sr$ ) del objeto terrestre percibido por el sensor puede ser expresado con la siguiente fórmula matemática:

$$N_i = (1/\pi)(H_i R_i T_i A_i) + N_{pi}$$

Donde "H" es la irradiación solar, "R" es la reflectividad del objeto terrestre, "T" es la permeabilidad atmosférica (vertical), "A" es el coeficiente determinado por el ángulo entre la superficie terrestre y la línea que une el sol y el objeto terrestre y el ángulo entre el objeto terrestre y el sensor, "Np" es la energía radiante de trayectoria de la atmósfera, e "i" es la banda del sensor.

Si se puede estimar el valor "Np", "A" tendrá un valor fijo sea cual fuese el canal, y "H" y "T" tomarán valores fijos por cada canal, pudiendo resaltar las características espectrales al obtener la relación entre dos canales. Es decir, al relacionar los canales que detecten los valores máximo y mínimo en el patrón del espectro de reflexión de un determinado mineral, aumenta el valor de la relación de píxeles donde exista el mineral facilitando la discriminación con otros píxeles donde no existe tal mineral. La base conceptual del "ratioing" es resaltar las áreas de distribución de un determinado mineral en las imágenes, aprovechando estas características.

El "ratioing" supone el valor mínimo digital como la energía radiante de trayectoria de la atmósfera, y se deduce el valor mínimo de los valores digitales de cada banda, para calcular la relación de banda a banda de estos valores. Esta relación (valor de "ratioing") varía normalmente entre 0 y 10, aunque para representarla en las imágenes, se requiere efectuar la conversión de nivel de gris. Los procedimientos de la conversión de nivel de gris son los siguientes:

En primer lugar, se calcula la distribución de los valores de "ratioing" en las zonas de alteración sobre la base de las literaturas geológicas disponibles. Subsiguientemente, se determina el área de distribución de los valores ligeramente más extensa que la distribución de los valores de "ratioing", y se asigna el valor 0 a los píxeles que están fuera de esta área. El excluir el valor de "ratioing" 0, la dispersión de los demás valores sería menor a la original, permitiendo representar en diferentes niveles de gris al efectuar la debida conversión. La conversión de nivel de gris se efectúa aplicando la siguiente función lineal.

$$G_i = a \cdot F_i + b$$

En este caso, "F<sub>i</sub>" es el valor de "ratioing", "G<sub>i</sub>" es el nivel de gris en las imágenes, "a" es la sensibilidad y "b" es la polarización. Los valores de "a" y "b" deben ser determinados sobre la base de la distribución de los valores reales de "ratioing".

## (2) Generación de imágenes

EL Area del Estudio alberga múltiples yacimientos hidrotermales como los del tipo pórfido cuprífero, que se asocian con zonas de alteración hidrotermal peculiares. La validez del proceso de "ratioing" de 5/7, 5/4 y 3/1 para identificar estas zonas de alteración mediante los datos LANDSAT TM ha sido confirmada por trabajos similares efectuados en las áreas de Escondida y Veraguas-Progreso de la República de Chile.

En este análisis, se compararon las imágenes de "ratio" de dos áreas (P233/F076 y P233/F077) donde se distribuyen las zonas de alteración conocidas, para dos combinaciones 5/7, 5/4, 3/1, y 5/7, 4/7, 4/5. Los resultados mostraron que para identificar las zonas de alteración, las imágenes de "ratio" óptimas son las procesadas mediante la combinación de 5/7, 5/4, 3/1, asignando los colores rojo, verde y azul, respectivamente. Esta combinación representa las zonas de alteración en los colores rosado rojizo y rosado blanquecino. Para el procesamiento de imágenes de otras áreas, se utilizaron los valores medios de sensibilidad y polarización óptimas en estas dos áreas.

### (3) Análisis de componentes principales

Dependiendo de las características de las imágenes de "ratio", se puede eliminar las sombras proyectadas por los relieves topográficos. Sin embargo, esto presenta la desventaja de dificultar la interpretación de las características topográficas. Por lo tanto, en este análisis, se generaron las imágenes de "ratio" en las que se plasmaron las informaciones topográficas.

Existen dos métodos para representar las características topográficas: el de utilizar la banda 5 que refleja las informaciones topográficas, y el de utilizar el primer componente en el análisis de componentes principales. En este análisis, se aplicó el segundo. La proporción de cada banda en el primer componente de cada imagen varía entre 0,37 y 0,43 en todas las bandas, habiendo poca diferencia de la proporción entre imágenes de cada banda. Por lo tanto, se definió como proporción del primer componente a la proporción media de cada banda. Se multiplicó la proporción a cada banda, y a la suma de estos valores (en este caso el promedio de esta suma resulta ser 0) se definieron la sensibilidad y la polarización óptima, obteniéndose así el coeficiente de informaciones topográficas. Subsiguientemente, se multiplicó el coeficiente de informaciones topográficas a los valores de brillo de las imágenes de "ratio", generadas en el proceso (2) anterior, y se generaron las imágenes de "ratio" con informaciones topográficas.

Para la corrección geométrica, se utilizaron los mismos GCP utilizados en las imágenes de falso color (sección 4.1, anterior), y se efectuó la conversión geométrica al sistema de coordenadas UTM utilizando la metodología similar.

## 4.3 Preparación de imágenes en mosaico

### (1) Compresión de imágenes y conversión geométrica

Para generar las imágenes de falso color en mosaico de las 23 escenas, se comprimieron las imágenes, puesto que al no hacerlo, el volumen de datos sería enorme (las imágenes en mosaico tendrían  $27.000 \text{ pixeles} \times 52.000 \text{ pixeles} \times 6 \text{ bandas} = 8,4 \text{ GB}$ ) superando la limitación física de la salida de películas.

Para la compresión, se utilizaron las imágenes con radiación debidamente corregidas, a las que se aplicó el método de conversión geométrica que convierte 16 ( $4 \times 4$ ) píxeles en 1 píxel mediante el método bilineal. Subsiguientemente, se seleccionaron visualmente de 10 a 20 puntos correspondientes de la parte traslapada de dos imágenes, y se calculó el coeficiente de conversión geométrica mediante la transformación de Helmert aplicando el método del mínimo cuadrado. En este procedimiento, se excluyeron los datos que muestren un error grande, a fin de que el error del re-cálculo sea menor de 1 píxel, y se calculó el coeficiente de conversión de la transformación de Helmert. Para la conversión geométrica, se aplicó el método bilineal.

## (2) Alineación de imágenes

En las imágenes obtenidas en diferentes temporadas, pueden haber áreas de diferentes tonalidades en la unión de dos imágenes debido a la variación de las coberturas de tierras, variación, posición de las sombras y nubes, etc. Si bien es cierto que esta diferencia de tonalidades no impide la interpretación fotogeológica, produce una impresión de imágenes en mosaico "mal acabadas". Para subsanar esta inconveniencia, se desarrolló y se aplicó una nueva técnica denominada "método de alineación de márgenes en zigzag" que consiste en unir las imágenes buscando las áreas donde la diferencia de tonos sea la mínima. Este método permite unir las imágenes evitando las partes discordantes por la presencia de nube, sombras, etc.

La alineación de las márgenes consiste en unir sucesivamente las imágenes tomando como referencia a la imagen situada más al norte de cada pista. En este proceso, se generaron tres imágenes en mosaico alargadas: de P231/F075 a 079, de P232/075a 083 y de P233/075 a 083. Subsiguientemente, tomando como referencia a la imagen en mosaico de P232, se tomaron los puntos correspondientes de las imágenes de ambos lados, y después de efectuar la conversión geométrica mediante el método de transformación de Helmert, se fueron uniendo las imágenes de la forma como se describió anteriormente. De esta manera, se generaron tres imágenes con las pistas alineadas de aproximadamente  $5.000 \times 13.000$  píxeles.

## (3) Conversión geométrica

Las imágenes en mosaico abarcan grandes dimensiones de  $64$  a  $72^\circ\text{E}$ , y de  $21$  a  $34^\circ\text{S}$ , lo que hace difícil la aplicación del Sistema UTM para la proyección. Por lo tanto, en este análisis, se ha utilizado la proyección cónica de área equivalente de Lambert que es el método más adecuado para proyectar una extensa región de longitudes medias. Para ello, se utilizó el elipsoide de Bessel, tomando dos paralelos de referencia de  $24^\circ 30'\text{S}$  y  $30^\circ 30'\text{S}$ , y definiendo el meridiano central en  $68^\circ 00'\text{O}$ . Por la limitación de tamaño de las películas, se repitió el muestreo mediante el método bilineal teniendo 1 píxel de 200 m.

