

## PROVINCIAS MAGNETICAS DE CHILE CENTRAL

JUAN CARLOS PARRA  
GONZALO YAÑEZ

Servicio Nacional de Geología y Minería, Casilla 10465, Santiago, Chile

### RESUMEN

La interpretación cuantitativa del mapa magnético del país, entre los 31° y 35°S, ha permitido definir las siguientes provincias magnéticas: Costa Central, Valparaíso-San Antonio, Costa Centro Norte, Cordillera de la Costa y Cordillera Principal. En cada una de ellas existe una correlación entre la susceptibilidad magnética medida en rocas, el mapa magnético y la geología regional. Las anomalías de mayor intensidad conforman la provincia de la Cordillera de la Costa, en directa asociación con afloramientos de granitoides cretácicos, altamente magnéticos. Las provincias magnéticas de la franja costera (Costa Central, Valparaíso-San Antonio, Costa Centro Norte) están asociadas a rocas de baja a mediana susceptibilidad, intrusivos precretácicos, rocas sedimentarias y/o volcánicas, triásicas y jurásicas, y sedimentos neógenos. La Cordillera de los Andes presenta anomalías de alta frecuencia y mediana intensidad, relacionadas con intrusivos terciarios, y rocas volcánicas cretácico-terciarias, que presentan susceptibilidades moderadas. Los lineamientos magnéticos se asocian, en general, a fallas de rumbo y/o normales. En algunos casos, estos lineamientos definen zonas de debilidad, que parecen haber controlado el emplazamiento de los intrusivos cretácicos.

*Palabras claves: Magnetometría, Interpretación magnética, Provincias magnéticas, Susceptibilidad magnética, Chile Central.*

### ABSTRACT

Aeromagnetic studies carried out recently in Central Chile (31-35°S) allow to group the regional magnetic patterns into five magnetic provinces: Central Coast, Valparaíso-San Antonio, Central-North Coast, Coastal Range and Main Andean Range. Within each province there is a close correlation between rock magnetic susceptibility, map magnetic anomalies and regional geology. The most intense anomalies are in the Coastal Cordillera Province where they are closely related to the outcrops of highly magnetic Cretaceous granitoid plutons. The coastal magnetic provinces (Central Coast, Valparaíso-San Antonio, Central-North Coast) show low-intensity magnetic anomalies due to the widely distributed exposures of rocks with low magnetic susceptibility (Paleozoic basement, pre-Cretaceous granitoids, Triassic and Jurassic sedimentary and volcanic sequences and Neogene sediments). The Main Andean Range shows medium intensity, high-frequency, anomalies which correlate with Tertiary intrusives and Cretaceous-Tertiary volcanics, with moderate susceptibility. Magnetic lineaments are generally associated to strike-slip and normal faults. In the Coastal Range Province, some of these appear to coincide with zones of deep crustal weakness, along which the Cretaceous magmas could have been carried towards the upper crust.

*Key words: Magnetometry, Magnetic interpretation, Magnetic provinces, Magnetic susceptibility, Central Chile.*

### INTRODUCCION

En este trabajo se presenta una interpretación cualitativa de la Carta Magnética de Chile entre los paralelos 31° y 35°S, basada en la definición y caracterización de las principales provincias magnéticas de la región. En forma complementaria se efectúa un completo análisis de las susceptibilidades magnéticas de las rocas que afloran en la zona de estudio, y se establece una correlación entre la in-

formación magnética y la geología de superficie.

La información usada proviene del programa 'Levantamiento de la Carta Magnética de Chile', del Servicio Nacional de Geología y Minería. Los datos fueron obtenidos entre 1981 y 1984, a lo largo de líneas de vuelo de dirección norte-sur, espaciadas en 2,5 km como promedio y a una altura nominal de 600 m sobre la superficie. El equipo utilizado, per-

teneciente a la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN), consiste en: magnetómetro de precisión nuclear Geometrics, modelo G-803, con sensibilidad de 1 nT; unidad lectora de cinta magnética Kennedy, modelo 9.700; sistema de adquisición de datos Geometrics, modelo G-714; y una cámara con película de 35 mm, Automax, modelo GS-2FRP, para el replanteo de la trayectoria seguida por el avión. La navegación considera la aplicación de técnicas visuales, con la ayuda de un sis-

tema de navegación OMEGA. El procesamiento de los datos incluyó la sustracción del efecto de variación diurna y del Campo Magnético de Referencia Internacional (IGRF), con los coeficientes correspondientes al intervalo 1980-1985 (Fabiano *et al.*, 1982) actualizados a la fecha de cada vuelo. Con las anomalías residuales se generó una red regular de datos con 2,5 km de espaciamiento, que se presenta como un mapa de contornos magnéticos.

## GEOLOGIA REGIONAL

La evolución geológica de este segmento de los Andes (31-35°S) está directamente vinculada con el cambiante régimen de subducción imperante. Durante el Paleozoico se habría verificado una subducción constructiva con el desarrollo de prismas de acreción y adherencia de terrenos alóctonos (Ramos *et al.*, 1986). En el Mesozoico inferior, el régimen de subducción se acercó al tipo 'Marianas' (Uyeda y Kanamori, 1979) con erosión progresiva del prisma de acreción paleozoico, desarrollo de arco magmático y cuenca de tras-arco. Este régimen tectónico cambió a uno de mayor 'stress' al momento de la apertura del Atlántico en el Cretácico (Larson y Pitman, 1972), lo cual tuvo como consecuencia el cierre de las cuencas de tras-arco, dando paso a una subducción tipo 'Chilena' que se mantiene hasta el presente (Mpodozis, 1984; Mpodozis y Ramos, en prensa).

El Paleozoico está representado por rocas metamórficas y sedimentitas, que afloran en las planicies costeras, al sur de los 33°S (neises, anfibolitas, cuarcitas y esquistos), afectadas por un metamorfismo que gradúa desde baja P/T al oriente hacia facies de alta P/T al occidente. Dichas rocas se interpretan como representativas de un prisma de acreción metamorfozado y deformado durante el Carbonífero (Hervé *et al.*, 1981, 1984). El prisma de acreción está intruido, al este, por granitoides permo-carboníferos cuyas razones  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ , relativamente elevadas indican, una significativa contaminación con material cortical (Shibata *et al.*, 1984; Hervé *et al.*, 1988).

Al norte de los 31°S, el prisma de acreción (Complejo Metamórfico del Choapa) constituye el zócalo de una cuenca de ante-arco sobre la cual se depositaron formaciones sedimentarias marinas del Carbonífero-Pérmico (Sepúlveda, 1984; Rivano y

Sepúlveda, en prep.) cubiertas, a su vez, por secuencias sedimentarias y volcánicas del Triásico-Jurásico Inferior (Cecioni y Westermann, 1968) e intruidas por granitos del Jurásico Inferior (Unidad Millahue; Rivano *et al.*, 1985). Trabajos recientes de paleomagnetismo (Forsythe *et al.*, 1987) sugieren que parte de este conjunto constituiría un bloque desplazado 15° en latitud antes del Jurásico Medio, a lo largo de fallas de rumbo.

El cambio del régimen de subducción constructiva a uno tipo 'Marianas', es el evento que da inicio al Ciclo Andino. Este se caracteriza por el desarrollo de un arco magmático (Cordillera de la Costa), una cuenca extensional de tras-arco y una plataforma sedimentaria, que marca la transición hacia el antepaís (Mpodozis y Ramos, en prensa).

Estas características condicionaron una abundante depositación volcanoclástica con intercalaciones marinas en el arco y en la cuenca de tras-arco. Las secuencias estratificadas conforman gruesos paquetes volcano-sedimentarios, que se han preservado en dos franjas semicontinuas coincidentes con la Cordillera de la Costa (formaciones Ajial, Horqueta, Lo Prado, Las Chilcas), y la Cordillera Principal (Formación Colimapu, Los Pelambres) (Thomas, 1958; Nasí, 1984; Ramos, 1985; Davidson, 1988; Godoy *et al.*, 1988; Rivano y Sepúlveda, en prensa). Los cuerpos intrusivos, que constituyen las raíces de sucesivos eventos magmáticos, se distribuyen a lo largo del margen occidental de la Cordillera de la Costa, en una franja semicontinua, que aflora, con seguridad, al norte del río Aconcagua (Rivano *et al.*, 1985). Los granitos que conforman esta franja han sido agrupados en la Superunidad Cavilolén (Rivano *et al.*, 1985; Espiñeira, en prep.), que incluye gabros de anfíbola a monzogranitos, predominando las granodioritas y

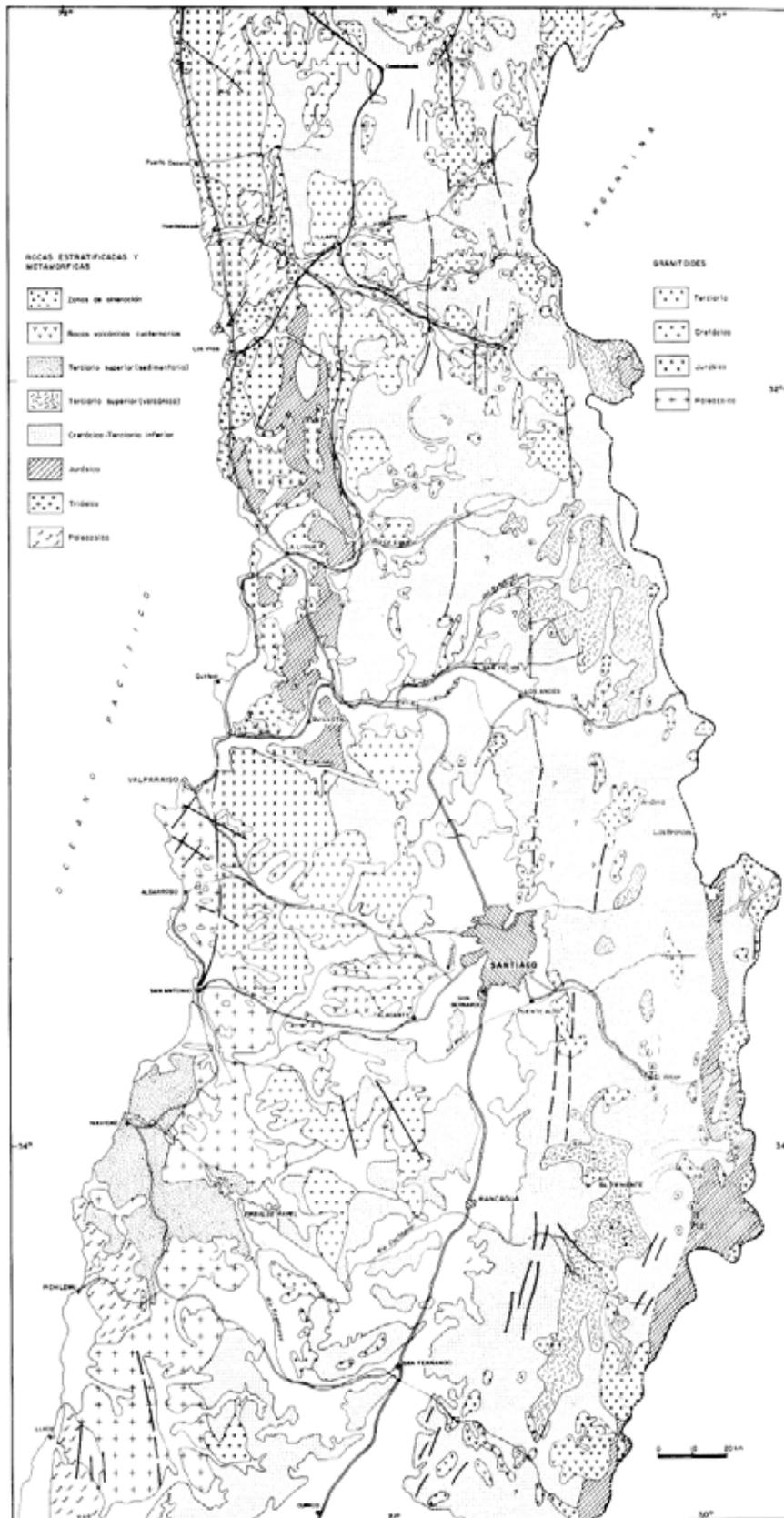


FIG. 1. Marco geológico del área estudiada.

tonalitas.

Como consecuencia de la apertura del Atlántico en el Cretácico (100 Ma) (Larson y Pitman, 1972; Zonhenzayn *et al.*, 1984), el margen occidental de Sudamérica se vio sometido a un régimen de mayor 'stress', que provocó el cambio a una subducción tipo 'Chilena', caracterizada por el cierre de las cuencas de tras-arco y el inicio de la migración del eje magmático hacia el este (Rivano *et al.*, 1985). El Cretácico Superior está representado por secuencias de conglomerados, piroclastos y lavas andesíticas, expuestas al norte del río Aconcagua (Thomas, 1967; Rivano y Sepúlveda, en prensa).

En la Alta Cordillera, la acumulación de formaciones volcanoclásticas continuó hasta el Reciente (formaciones Los Elquinos y Farellones) (Dediós, 1967; Thiele, 1980; Vergara *et al.*, 1988), con la excepción de la actividad volcánica cuaternaria, que no se desarrolló entre los 27° y 33°S debido al bajo ángulo de subducción que caracteriza a esa zona en la actualidad (Jordan *et al.*, 1983).

En este período los depósitos marinos se restringen a la zona de Navidad (Formación Navidad y Serie La Cueva; Escobar *et al.*, 1977: Avance geológico de las Hojas Rancagua, Talca-Linares, Chanco y Concepción-Chillán. *Instituto de Investigaciones Geológicas (SERNAGEOMIN)*, inédito, 56 p.), donde se observa un ambiente de cuenca de ante-arco. Esta cubierta, de edad mioceno-pliocena, se apoya directamente sobre el basamento paleozoico.

Los granitoides del Cretácico Superior (80-100 Ma) se disponen en una franja semi-continua en la

vertiente oriental de la Cordillera de la Costa. Estos cuerpos, de grandes dimensiones, están conformados, en general, por granodioritas, dioritas, granitos y tonalitas, con cuarzo-monzonitas, adamelitas y gabros subordinados (Superunidad Illapel; Rivano *et al.*, 1985; Rivano y Sepúlveda, en prensa).

En los intrusivos terciarios, que afloran al oriente de la franja del Cretácico Superior, se reconocen dos agrupaciones de características diferentes. Una franja noroccidental (67-38 Ma), con afloramientos que disminuyen en tamaño en dirección sur, y que desaparecen al norte del río Aconcagua. Los tipos petrológicos más frecuentes son las dioritas, monzodioritas cuaríferas y granodioritas, con leucogranitos y pórfidos andesíticos en menor proporción (Superunidad Cogotí; Rivano *et al.*, 1985). El segundo grupo de intrusivos, muchos de ellos subvolcánicos, de edad miocena (27-7 Ma) se ubica aún más al oeste, sus afloramientos son de pequeñas dimensiones, en comparación con los granitoides cretácicos, que están, frecuentemente asociados a fallas norte-sur y zonas de alteración (Moscoso *et al.*, 1982; JICAMMAJ-SERNAGEOMIN, 1984: Informe de estudios básicos sobre la exploración de recursos minerales en la zona central de la República de Chile. Informe integral de las tres fases (inédito), 83 p.).

La figura 1 corresponde a un mapa geológico esquemático, en el cual se han agrupado las principales unidades de la región, según el esquema desarrollado en los párrafos anteriores.

## SUSCEPTIBILIDAD MAGNETICA

Las anomalías magnéticas (AM) de interés geológico están directamente relacionadas con la distribución de minerales magnéticos en la corteza terrestre. Entre éstos, el más abundante es la magnetita y, en orden decreciente, titanio-hematita, magnetita, pirrotita y hierro nativo.

La magnetización de una roca corresponde a su capacidad de producir un campo magnético propio. Este campo tiene, por lo general, dos componentes, una paralela al campo geomagnético actual (magnetización inducida) y otra orientada en dirección diferente (magnetización remanente), que dice relación con la historia magnética de la roca. La intensidad del campo desarrollado por la

roca es proporcional al campo geomagnético global; la constante de proporcionalidad (susceptibilidad magnética, SM), es función de la abundancia de minerales magnéticos. Esta, rara vez supera el 1% en volumen total. De acuerdo a Grant (1984), la magnetización (y la SM) está controlada, fundamentalmente, por: 1. El contenido total de hierro. Las rocas ricas en hierro (básicas) son más propensas a generar magnetita (de aquí en adelante se usará este nombre genérico para hacer referencia a minerales magnéticos). 2. El grado de oxidación. La formación de magnetita requiere de un estado de oxidación intermedio; en caso contrario, el óxido de hierro degrada a ilmenita o hematita

[fugacidad de oxígeno (fO<sub>2</sub>) alta], o bien se une a los silicatos no magnéticos (anfíbola, piroxeno, biotita) en el caso que la fO<sub>2</sub> sea muy pequeña. 3. **El Grado de metamorfismo.** El progresivo aumento en el grado de metamorfismo favorece la formación de silicatos de hierro (no magnéticos) a partir de minerales originalmente magnéticos.

**SUSCEPTIBILIDAD MAGNETICA (SM) DE LAS ROCAS DE CHILE CENTRAL**

La tabla 1 resume el intervalo de SM en diferentes tipos de roca de acuerdo con la información compilada por Lindsley *et al.* (1966 in Bonini, 1984). En la tabla 2 se presenta un cuadro resumen de las SM de rocas pertenecientes a las principales unidades expuestas en el área de trabajo (información extraída del archivo del SERNAGEOMIN). En la figura 2, estos datos se agrupan en función de la edad y el tipo de roca, siendo presentados en diagramas de barras normalizado. Del análisis de esta información se extraen las siguientes conclusiones:

La SM del basamento granítico y metamórfico, paleozoico, es muy baja (0,0-0,2x10<sup>-3</sup> emu), presentándose una pequeña dispersión en las muestras correspondientes al Complejo Metamórfico del Choapa (Fig. 2,b).

Las rocas sedimentario-marinas (triásicas, jurásicas y cretácicas), presentan valores de SM muy bajos, con un máximo muy definido en el intervalo de 0,0-0,2x10<sup>-3</sup> emu (Fig. 2,a). Sólo en la Formación Navidad, el aporte detrítico proveniente de intrusivos del Cretácico Superior (fuertemente magnéticos) explicaría el aumento en los valores de SM

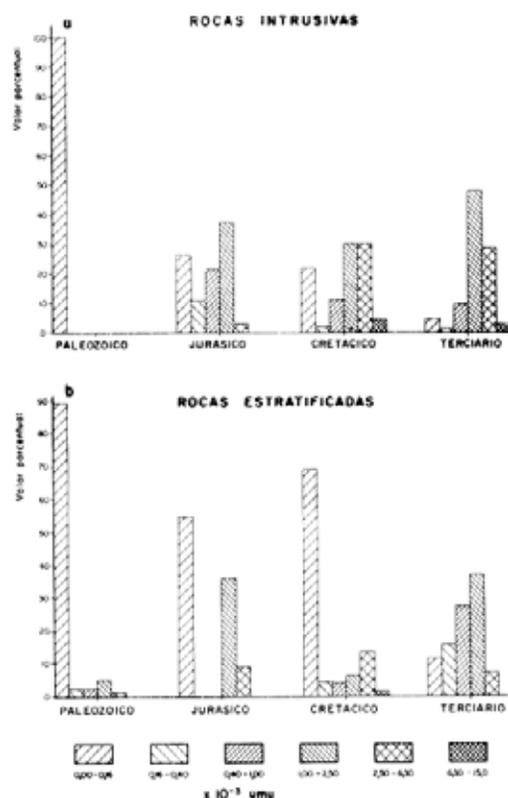


FIG. 2. Diagrama de barras normalizado para los valores de SM, agrupados de acuerdo con la edad.

observados (0,2-0,5x10<sup>-3</sup> emu).

Tal como fue establecido por Ishihara y Ulriksen (1980), las rocas intrusivas del Meso-Cenozoico presentan valores de SM mucho más altos que los intrusivos paleozoicos. Los valores máximos se encuentran en granitoides del Cretácico Superior, con un valor medio de 2,3x10<sup>-3</sup> emu; en orden decreciente se ubican las rocas terciarias (SM: 1,6x

TABLA 1. DISTRIBUCION PORCENTUAL DE SUSCEPTIBILIDADES MAGNETICAS EN DISTINTOS TIPOS DE ROCAS\*

Intervalo de SM (x10 <sup>-3</sup> emu)	Tipo de Rocas				
	Máficas Efusivas (%)	Máficas Plutónicas (%)	Graníticas (%)	Neises Esquistos (%)	Sedimentarias (%)
Menor que 0,1	5	24	60	71	73
Entre 0,1 - 1,0	29	27	23	22	19
Entre 1,0 - 4,0	47	28	16	7	4
Mayor que 4,0	19	21	1	0	4

\* Según Lindsay *et al.*, 1966.

TABLA 2. SUSCEPTIBILIDAD MAGNETICA EN MUESTRAS DE LA ZONA EN ESTUDIO

A. Rocas Intrusivas								
Unidad	No. Muestras	SM ( $\times 10^{-3}$ emu)						Edad
		(Porcentaje Total en cada Intervalo)						
		0,0-0,16	0,16-0,4	0,4-1,0	1,0-2,5	2,5-6,3	6,3-	
Batolito de la Costa <sup>1</sup>	8	100	-	-	-	-	-	Paleozoico superior
Tranquilla <sup>2</sup>	6	67	-	33	-	-	-	Triás. Sup.-Jurás. Inf.
Puerto Oscuro <sup>2</sup>	6	33	33	-	33	-	-	Triás. Sup.-Jurás. Inf.
Superunidad Caviolén <sup>2</sup>	18	22	11	28	39	-	-	Jurásico Sup.
Cachagua <sup>2</sup>	7	-	-	15	70	15	-	Jurásico Sup.
Limahuida <sup>2</sup>	7	57	-	-	29	14	-	Cretácico Inf.
Chalinga <sup>2</sup>	84	21	2	12	27	33	5	Cretácico Inf.
Batolito Central <sup>1*</sup>	7	-	-	14	72	14	-	Cretácico Sup.
Nogalada <sup>2</sup>	3	33	-	-	33	33	-	Cretácico Sup.
Fredes <sup>2</sup>	41	10	-	10	53	24	3	Cretácico Sup.
San Lorenzo <sup>2</sup>	19	16	5	11	32	36	-	Cretácico Sup.
El Polvo <sup>2</sup>	2	-	-	-	-	100	-	Terciario
Río Las Cuevas <sup>3</sup>	4	-	-	-	75	25	-	Terciario
Río Cerro Blanco <sup>2</sup>	6	-	-	-	83	17	-	Terciario
Intrusivos El Teniente <sup>4</sup>	10	-	-	20	40	30	10	Terciario
B. Rocas Estratificadas								
Unidad o Formación	No. muestras	SM ( $\times 10^{-3}$ emu)						Edad
		(Porcentaje Total en cada Intervalo)						
		0,0-0,16	0,16-0,4	0,4-1,0	1,0-2,5	2,5-6,3	6,3-	
Basamento Metamórfico <sup>5</sup>	24	100	-	-	-	-	-	Paleozoico
Complejo Metamórfico del Choapa <sup>6</sup>	12	67	8	8	17	-	-	Paleozoico
F. Arrayán <sup>6</sup>	8	100	-	-	-	-	-	Paleozoico
F. Huentelauquén (c) <sup>6</sup>	12	91	-	-	9	-	-	Paleozoico
F. El Quereo <sup>6</sup>	23	88	4	4	-	4	-	Triásico
F. Pichidangui <sup>6</sup>	4	75	-	-	25	-	-	Triásico
Estratos de Pupío <sup>6</sup>	11	55	-	-	36	9	-	Jurásico
F. Arqueros <sup>6</sup>	21	57	-	-	10	33	-	Cretácico
F. Pelambres <sup>6</sup>	15	60	7	12	7	7	7	Cretácico
F. Oda. Marquesa (b) <sup>6</sup>	25	88	-	4	4	4	-	Cretácico
F. Lo Valle <sup>7</sup>	4	50	50	-	-	-	-	Cretácico
F. Farellones <sup>6</sup>	47	13	17	21	36	13	-	Terciario
F. Navidad <sup>9</sup>	2	-	100	-	-	-	-	Terciario
Volcanismo Reciente <sup>9</sup> (Zona Central)	14	-	7	64	29	-	-	Cuaternario

1. Muñoz-Cristi, 1964; Godoy y Lozke, este volumen. 1\*. Muñoz-Cristi, 1964; 2. Rivano *et al.*, 1985; 2\*. Espifeira, en prep.; 3. Rivano *et al.*, en prep.; 4. JICA-MMAJ-SERNAGEOMIN, 1984; 5. Hervé *et al.*, 1981, 1984, 1988; 6. Rivano y Sepúlveda (en prensa); 7. Thomas, 1958; 8. Charrier (en prep.); 9. Cecioni y Westermann, 1968.

10<sup>-3</sup> emu) y jurásicas (SM: 0,3x10<sup>-3</sup> emu). La dispersión de SM en las rocas intrusivas jurásicas es grande, con tendencia al aumento en las unidades más recientes. En la agrupación cretácica, la mayoría de las muestras se concentra en torno al valor máximo; sin embargo, existe un 'peack' secundario en el intervalo 0,0-0,2x10<sup>-3</sup> emu, correspondiente a muestras de la Unidad Limahuida (Rivano *et al.*, 1985) fuertemente alteradas. De igual modo, la alteración hidrotermal, que normalmente acompaña a los cuerpos subvolcánicos terciarios, explicaría la dispersión de los valores de SM observada.

En formaciones volcano-sedimentarias del Terciario tales como Farellones, los valores de SM son más dispersos (Fig. 2a) destacando un máximo principal en el intervalo de 0,5-1,5x10<sup>-3</sup> emu (rocas volcánicas) y otro más pequeño entre 0,0-0,2x10<sup>-3</sup> emu (rocas sedimentarias marinas). En mediciones hechas sobre rocas volcánicas recientes, los valores se concentran, también, en el intervalo 0,5-1,5x10<sup>-3</sup> emu.

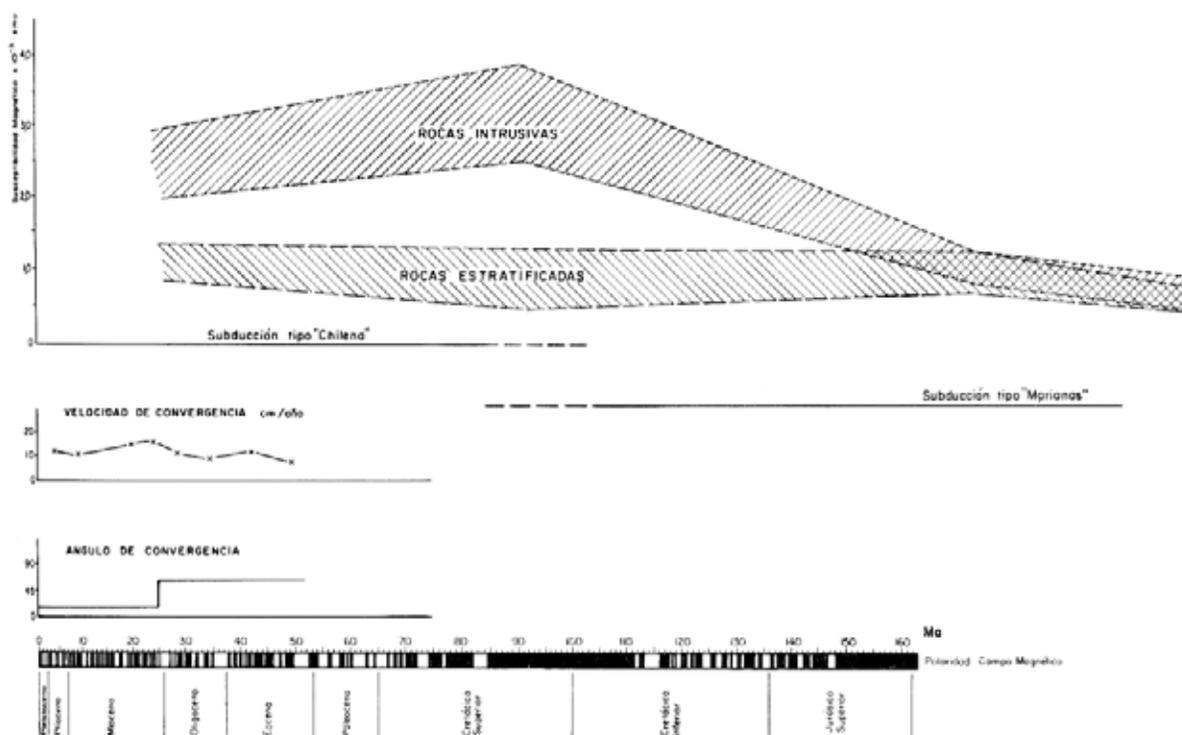
**RELACION ENTRE SUSCEPTIBILIDAD MAGNETICA E HISTORIA GEOLOGICA**

Sobre la base de las mediciones de SM descri-

tas en el párrafo anterior y resumidas en la tabla 2 y figura 2, se ha construido un gráfico de SM en función del tiempo (Fig. 3), en el cual se presentan, además, el tipo de subducción imperante, velocidades y ángulo de convergencia entre placas y polaridad del campo magnético terrestre. El análisis de esta figura muestra la gran sensibilidad de la SM en relación con los principales eventos geológicos.

La susceptibilidad de las rocas paleozoicas, es muy baja. En rocas sedimentarias y metamórficas, esto dice relación con su origen marino; en el caso de las rocas intrusivas, la apreciable contaminación con material cortical durante la magmagénesis (Hervé *et al.*, 1988) parece ser el principal factor en el comportamiento no-magnético de ellas. Cabe señalar que los granitoides paleozoicos fueron incluidos dentro de aquéllos de la 'Serie de Illmenita' por Shibata *et al.* (1984).

El inicio del Ciclo Andino en el Jurásico (subducción tipo 'Marianas') está relacionado con un incremento en la SM. El paso a una subducción tipo 'Chilena' (Cretácico Superior) marca el inicio de la tercera gran etapa en la evolución de este segmento de los Andes Centrales. El cierre de las cuencas de tras-arco restringió los depósitos marinos al dominio de ante-arco (principalmente en el Terciario),



acumulando potentes secuencias volcano-sedimentarias en los dominios de arco y tras-arco. La distribución de la SM es relativamente aleatoria, pero aumenta en las muestras más jóvenes. El análisis de SM de las rocas intrusivas permite hacer dos deducciones que merecen especial atención. En primer lugar, es evidente que éstas son superio-

res a sus equivalentes en roca efusivas (que poseen los valores máximos de las series de rocas estratificadas). En segundo lugar, destacan los máximos valores de SM en los intrusivos del Cretácico Superior (80-100 Ma) emplazados durante un período de 'quietud' magnética a escala mundial (Raymond y La Brecque, 1987) (Fig. 3).

#### ANALISIS CUANTITATIVO DE ANOMALIAS MAGNETICAS (PROVINCIAS MAGNETICAS)

Una AM da cuenta de un cuerpo con propiedades magnéticas que contrastan con las del medio circundante. La forma y amplitud de las anomalías están condicionadas, además, por los siguientes factores:

**Inclinación y magnitud del campo geomagnético (I y F).** El campo magnético terrestre es esencialmente dipolar, con intensidades que varían desde 25.000 nT, en el ecuador magnético (EM), a 60.000 nT en los polos magnéticos (PM); en consecuencia, la magnetización adquirida por una roca está condicionada por la 'latitud' geomagnética. De tal forma que si fuese posible trasladar una misma roca ubicada cerca del EM, hasta el PM, se observaría que la intensidad del campo magnético desarrollado en latitudes ecuatoriales sería considerablemente inferior al correspondiente en el PM; se apreciaría, además, que en las inmediaciones del EM la anomalía sería dipolar, mientras que en el PM, completamente monopolar.

**Distancia detector-fuente (R).** Está directamente relacionada con la amplitud y longitud de onda de las anomalías magnéticas; al ser mayor R decrece la amplitud y aumenta la longitud de onda. Esta relación de proporcionalidad inversa ( $c/r$ ) a la distancia es más o menos drástica, dependiendo de las dimensiones del cuerpo. En los de grandes dimensiones (comparada con R), la proporcionalidad es  $1/R$ ; en aquéllos que se extienden en una dirección predominante es  $1/R^2$ ; y en cuerpos de pequeño tamaño o puntuales, el factor de proporción es  $1/R^3$ .

**Rumbo y/o forma de las anomalías magnéticas.** Se sabe que ambos factores están relacionados con los rumbos estructurales y/o la forma de los cuerpos que producen las AM.

Las provincias magnéticas son determinadas sobre la base del carácter de las AM: su amplitud y longitud de onda, concentración areal y rumbo. Se

considera que el carácter de las AM refleja lineamientos y geometría de unidades geológicas, magnetización de rocas ígneas, intrusivas y efusivas, relieve superficial y profundidad del basamento magnético. Los contactos por fallas entre dos unidades magnéticamente diferentes se manifiestan a través de fuertes gradientes en las AM.

A la escala del presente trabajo, no se pueden identificar remanencias en el mapa de AM, si bien éstas deben existir. En consecuencia, los análisis efectuados sólo consideran las AM de cuerpos magnetizados por inducción del CM principal (magnetización inducida), las cuales se caracterizan por un máximo magnético al norte y un mínimo al sur. Sin embargo, el rumbo, manto y forma del cuerpo que produce la anomalía puede modificar este esquema, llegando a producirse anomalías con diversas proporciones de amplitud entre máximo y mínimo.

#### PROVINCIAS MAGNETICAS DE CHILE CENTRAL

El mapa de AM de Chile Central (Fig. 4) es el principal elemento utilizado en la definición de las provincias magnéticas; sin embargo, se obtiene valiosa información de los subproductos que se describen a continuación:

**Mapa de lineamientos (Fig. 5).** Trazos que unen los lineamientos magnéticos observados en el plano de AM (Fig. 4). Su uso es fundamental en la definición de rumbos, trazas de fallas, y otros.

**Mapa de pseudo-susceptibilidades magnéticas (Fig. 6).** Utilizando la teoría de fuentes equivalentes (descritas en Giavelli, 1987), se generó un mapa de pseudo-susceptibilidades magnéticas, normalizadas al valor más alto encontrado, considerando una superficie equivalente a 7.500 m bajo el punto de observación. Este mapa no permite es-



tablecer directamente la SM de cada cuerpo; sin embargo, es útil desde el punto de vista de un análisis comparativo de las distintas unidades magnéticas.

Utilizando el mapa de AM y los subproductos antes descritos, se han definido cinco provincias magnéticas (Fig. 4).

#### **COSTA CENTRAL**

Representa a una franja de aproximadamente 50 km de ancho, a lo largo de la costa al sur del río Maipo. Se caracteriza por presentar AM de baja intensidad y frecuencia. Este hecho concuerda con los valores de SM medidos en las rocas pertenecientes a las unidades que allí afloran (basamento metamórfico y granítico paleozoicos, sedimentos neógenos de la serie La Cueva y Formación Navidad). Al interior de esta provincia se ha separado la subprovincia de Navidad caracterizada por AM de mayor intensidad y menor frecuencia, lo que es consecuencia del contraste de SM entre el basamento y las sedimentitas neógenas (Tabla 2).

Las anomalías de esta provincia no tienen un rumbo predominante; sin embargo, es posible ubicar un lineamiento de AM de rumbo N-NW, que permite suponer una posible falla que estaría afectando los granitoides paleozoicos desde la costa al norte de Pichilemu hasta el valle del río Mataquito.

#### **VALPARAISO-SAN ANTONIO**

Comprende una franja de dirección norte-sur, de aproximadamente 50 km de ancho, entre Valparaíso y San Antonio. Las AM muestran una notoria orientación WNW-ESE, con mediana intensidad y gran continuidad en la dirección señalada. Una de las más importantes es la AM de Melipilla que marca la transición de esta provincia con la Provincia de la Costa Central a la latitud del río Maipo.

La razón entre los valores de pseudo-susceptibilidad de la Provincia de Valparaíso-San Antonio y la Provincia de la Costa Central es suficientemente grande como para afirmar que los granitos de la Provincia de Valparaíso-San Antonio pertenecen a la 'Serie de Magnetita' de la clasificación de Ishihara (1981). Este hecho puede deberse a que la franja de granitoides jurásicos, reconocida al norte del río Aconcagua (Rivano *et al.*, 1985; Irwin *et al.*, 1987; Espiñeira, en prep.), pudiera prolongarse más al sur de lo que indican los mapas geológicos

publicados de la región (Corvalán y Munizaga, 1972), donde estos intrusivos son considerados principalmente paleozoicos. Alternativamente, este contraste magnético podría explicarse por el aumento, en profundidad, de las intrusiones básicas, como aquéllas que constituyen la roca trama de las migmatitas reconocidas en la costa, entre Santo Domingo y Valparaíso (Muñoz-Cristi, 1962).

El rumbo WNW-ESE, característico de las AM en esta provincia, coincide con la dirección de las fallas regionales principales (Fig. 1). Un lineamiento importante de dirección NW-SE, coincide con el límite sur del Lago Peñuelas (Fig. 5), la que podría corresponder a una falla regional que atraviesa la provincia desde Valparaíso hacia el sureste, a lo largo de 60 km.

#### **COSTA CENTRO-NORTE**

Ocupa una franja de aproximadamente 30 km de ancho a lo largo de la costa entre la desembocadura del río Aconcagua y el extremo norte del área estudiada (31°S). Se caracteriza por AM de pequeña a mediana intensidad (inferior a 250 nT entre máximo y mínimo) y gran longitud de onda (fuentes profundas). Existen en esta provincia numerosos lineamientos magnéticos en dirección NNE y NNW, algunos de los cuales coinciden con fallas que han sido observadas en superficie.

Las AM muestran formas aproximadamente circulares y pueden ser atribuidas a rocas moderadamente magnéticas y de baja SM. Los sectores con menos AM o, con AM más pequeñas, coinciden con afloramientos de rocas sedimentarias marinas paleozoicas y triásicas (formaciones El Quereo y Huentelauquén), en las cuales se han medido valores de SM que no superan los  $200 \times 10^{-3}$  emu (Tabla 2). Los afloramientos volcano-sedimentarios del Jurásico y Cretácico Inferior coinciden con la posición de las anomalías más intensas.

Finalmente, cabe hacer mención de una AM importante, situada en el extremo norte de la provincia, en directa correspondencia con afloramientos de la Unidad Puerto Oscuro, del Jurásico, en la cual predominan las rocas básicas (gabros y dioritas) (Rivano y Sepúlveda, en prensa).

#### **CORDILLERA DE LA COSTA**

Se extiende como una franja paralela a la línea de la costa; por el oeste está en contacto con las

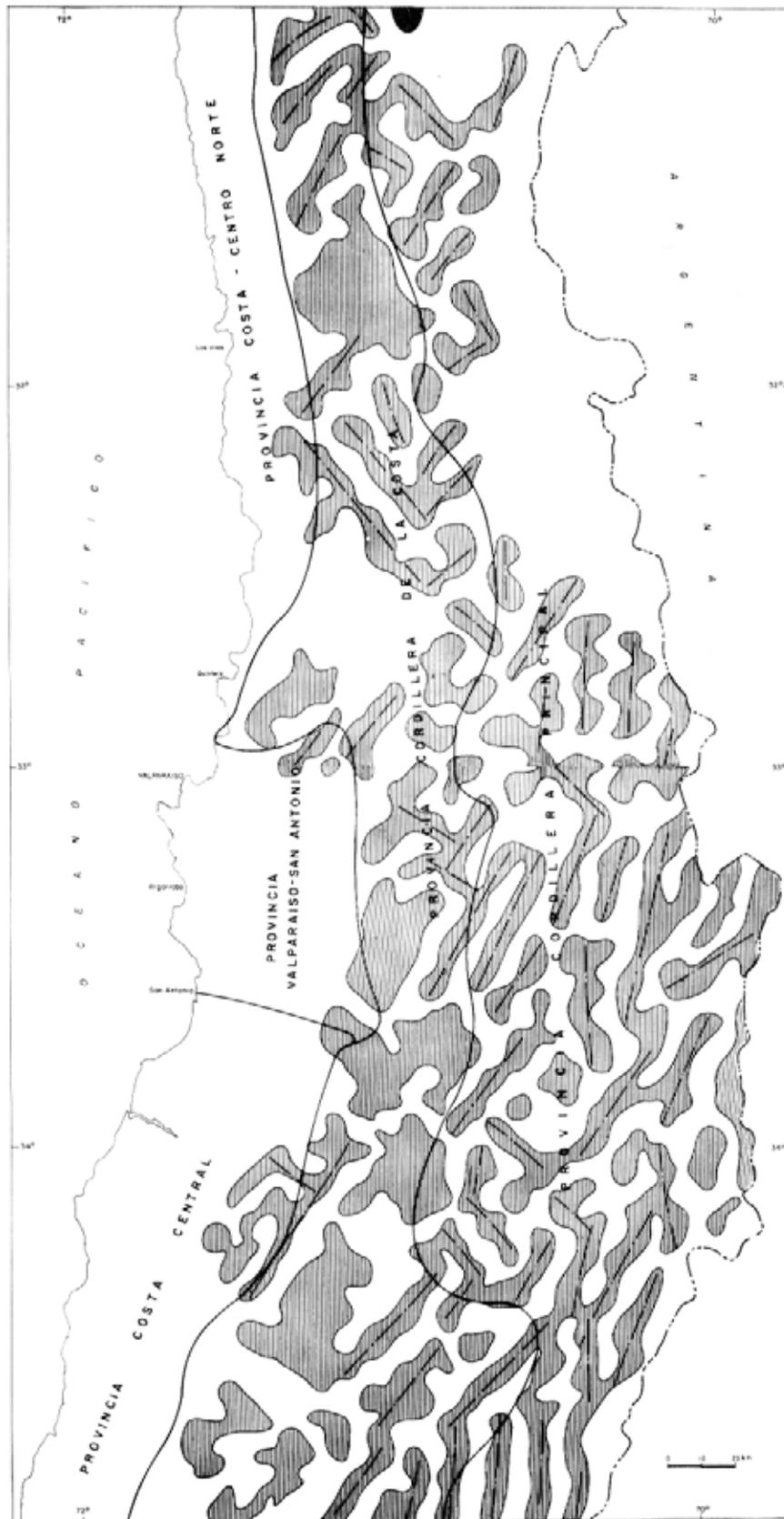


FIG. 5. Mapa de lineamientos magnéticos.

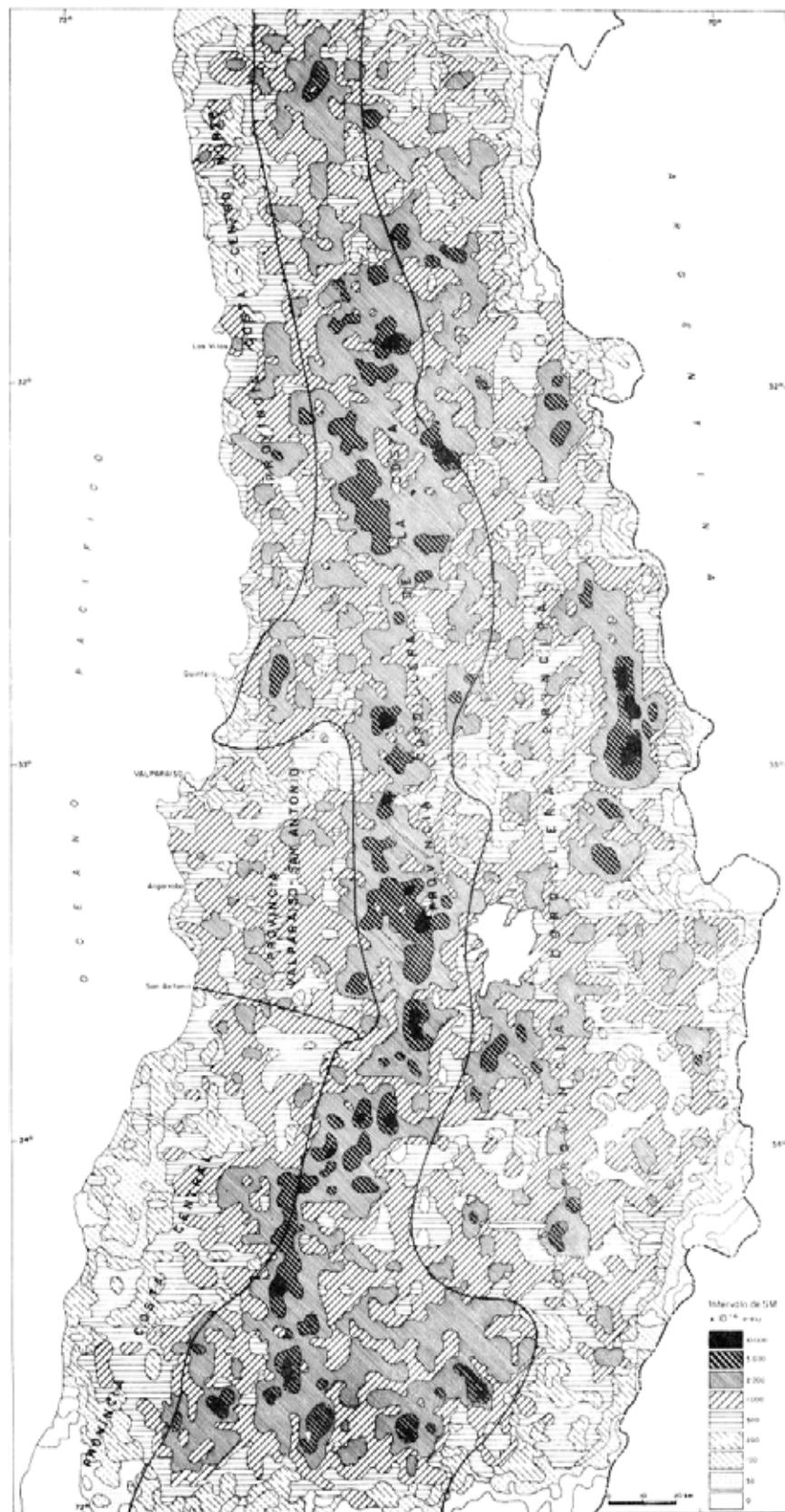


FIG 6. Mapa de seudo-susceptibilidades.

tres provincias ya mencionadas. Está relacionada con la Cordillera de la Costa aunque al sur de los 34°S abarca parte del valle central y de la Precordillera de los Andes. Su ancho varía desde menos de 20 km en las inmediaciones de los 33°S, hasta superar los 50 km en el extremo sur del área.

La característica más importante de esta provincia son AM de gran magnitud (amplitudes de hasta 1.500 nT entre máximo y mínimo) que comprometen áreas de hasta 200 km<sup>2</sup>. Estas anomalías tienen, en general, forma dipolar con un máximo al norte y un mínimo al sur, característica de cuerpos plutónicos magnetizados por inducción del campo magnético principal.

La SM de las rocas de esta provincia es, en general, alta, especialmente en los intrusivos cretácicos. Las AM principales coinciden con afloramientos de los granitoides cretácicos que se observan desde la vertiente oriental de la Cordillera de la Costa hacia el este. El mapa de pseudo-susceptibilidades (Fig. 6) revela que los valores de SM más altos del área en estudio se encuentran en esta provincia, lo cual corrobora las mediciones de SM efectuadas en laboratorio.

Las AM se orientan según dos direcciones principales, noreste y noroeste. Considerando que estas AM se asocian a cuerpos intrusivos, es razonable proponer que ellas coinciden con sistemas de fracturas corticales, a través de las cuales ascendieron los magmas que dieron origen a los batolitos cretácicos. En el mapa de lineamientos (Fig. 5), se observa que este sistema de anomalías, en direcciones ortogonales, tiene su mejor expresión al sur de los 33°30'S.

La saturación de AM impide el reconocimiento de otros tipos de lineamientos magnéticos. Sin embargo, entre los 31° y 32°S se observan dos lineamientos importantes, que también presentan rumbo noreste. El límite oriental de la provincia, en esta zona, puede corresponder a una falla de rumbo

general N10°W, la que ha sido mapeada en superficie (Rivano y Sepúlveda, en prensa). Entre los 32° y 33°45'S, la transición a la Provincia Magnética de la Cordillera de los Andes es gradual por lo que es difícil establecer un límite concreto, debido al aporte uniforme de rocas volcánicas del Cretácico Inferior, que afloran en ambas provincias.

#### CORDILLERA PRINCIPAL

Se desarrolla al oriente de las provincias anteriormente mencionadas, caracterizándose por AM de mediana amplitud y frecuencia, sin rumbo claramente definido.

Las rocas comprendidas en esta provincia son formaciones estratificadas, volcano-sedimentarias, del Cretácico Inferior; secuencias volcánicas del Mioceno-Plioceno; e intrusivos terciarios. En esta provincia existe una evidente asociación de las anomalías de baja magnitud con los afloramientos no magnéticos de las secuencias volcanoclásticas del Mioceno (Formación Farellones). Las AM de mayor magnitud coinciden con los granitoides terciarios.

En esta provincia se observan lineamientos magnéticos de dirección aproximada norte-sur que, en algunos casos, coinciden con fallas de ese rumbo (por ejemplo, Falla Pucuro). Al sur de los 33°S los lineamientos norte-sur, situados en los faldeos cordilleranos, deben estar asociados al sistema de fallas que constituye el borde oriental de la Depresión Intermedia.

Al norte de los 32°S, las AM de rumbo norte-sur son más abundantes, siguiendo la traza de los lineamientos magnéticos y en coincidencia con afloramientos de intrusivos sub-volcánicos. Al sur de los 32°S los lineamientos magnéticos, de dirección ENE y EW, involucran AM con gradientes moderadamente altos y baja intensidad.

#### DISCUSION Y CONCLUSIONES

Las provincias magnéticas definidas en las Zonas Central de Chile, basadas en la intensidad, rumbo y carácter de las AM, muestran una relación directa con la geología regional. Las mediciones de SM, en las diferentes unidades geológicas, presentan concordancia con el mapa de pseudo-suscepti-

bilidades (Fig. 6).

La Provincia magnética Costa Central, se caracteriza por AM de muy baja amplitud en asociación con el basamento paleozoico (granítico y metamórfico) y sedimentos neógenos. Hacia el este es posible determinar, con bastante exactitud, el límite

de esta provincia con la provincia magnética de la Cordillera de la Costa, que presenta AM de mayor magnitud. Esta diferencia en intensidad es producto de un fuerte contraste en SM, tal como se aprecia en el mapa de pseudo-susceptibilidades. En consecuencia y en concordancia con la geología del sector, se afirma que el límite entre ambas provincias está marcando el contacto entre intrusivos no-magnéticos paleozoicos y los intrusivos fuertemente magnéticos del Cretácico.

En la Provincia Valparaíso-San Antonio, existen algunos sectores con AM de mediana amplitud, en los cuales los mapas geológicos publicados (Corvalán y Munizaga, 1972) indican la presencia de intrusivos paleozoicos. Esta discrepancia puede deberse a una confusión en el reconocimiento geológico entre granitoides paleozoicos y jurásicos. La Provincia magnética Valparaíso-San Antonio presenta, además, la peculiaridad de estar limitada al norte y sur por AM de dirección este-oeste, cuyo carácter es absolutamente inédito en el área del presente trabajo. Yáñez *et al.* (1988) sugirieron que este sistema de anomalías sería producto del control estructural ejercido por la subducción, a esta latitud, de una 'paleo-dorsal' durante el Jurásico.

La característica fundamental de la Provincia Costa Centro-Norte es la gran cantidad de lineamientos magnéticos, en su mayoría de rumbos NNE y NNW. Se postula la asociación de estos lineamientos con fallas de rumbo. La intensidad de las AM observadas, de mediana a baja, está en concordancia con los valores de SM medidos en los afloramientos jurásicos del sector.

En la Provincia Cordillera de la Costa es notable la asociación de grandes AM con la franja de intrusivos cretácicos. Los rumbos conjugados de las AM (NW y NE) parecen indicar la forma y orientación de las grandes zonas de debilidad a través de las cuales habrían ascendido los magmas que dieron origen a los batolitos cretácicos.

Los lineamientos magnéticos en la Provincia Cordillera Principal, en general norte-sur, estarían asociados con fallas de rumbo y/o normales. Al sur de los 33°S, estos lineamientos se ubican en los faldeos cordilleranos, delimitando el margen oriental de la Depresión Intermedia.

Los valores de SM, mapa de pseudo-susceptibilidades y de AM, confirman que la unidad geológica que presenta las magnetizaciones mayores es la franja de intrusivos cretácicos (100-80 Ma). Una explicación razonable a este hecho sería una combinación favorable entre el gran tamaño de los cuerpos, alto contenido de hierro, emplazamiento y cristalización lentos y a su intrusión durante el período de 'quietud magnética' del Cretácico.

Los valores de SM, mapa de pseudo-susceptibilidades y de AM, confirman que la unidad geológica que presenta las magnetizaciones mayores es la franja de intrusivos cretácicos (100-80 Ma). Una explicación razonable a este hecho sería una combinación favorable entre el gran tamaño de los cuerpos, alto contenido de hierro, emplazamiento y cristalización lentos y a su intrusión durante el período de 'quietud magnética' del Cretácico.

#### AGRADECIMIENTOS

Se agradece a Reynaldo Charrier (Departamento de Geología y Geofísica, Universidad de Chile), Domingo Espiñeira, Patricio Sepúlveda y Sergio Rivano (SERNAGEOMIN), por su gentil y desinteresada cooperación en la realización de este trabajo. A Constantino Mpodozis, de esta última institución, por su incansable estímulo, co-

mo asimismo por su colaboración en la descripción de la geología de la zona estudiada. A Alfredo Eisenberg (Departamento de Geología y Geofísica, Universidad de Chile), Sergio Rivano y Ernesto Pérez (SERNAGEOMIN), por la lectura crítica del texto.

#### REFERENCIAS

- Bonini, W. 1984. Magnetic provinces in western Venezuela. *Geological Society of America, Memoir*, No. 162, p. 161-173.
- Cecioni, G.; Westermann, G. 1968. The Triassic/Jurassic marine, transition of coastal central Chile. *Pacific Geology*, Vol. 1, p. 41-75.
- Corvalán, J.; Munizaga, F. 1972. Edades radiométricas de rocas intrusivas y metamórficas de la Hoja Valparaíso-San Antonio. *Instituto de Investigaciones Geológicas*, Boletín, No. 28, 40 p.
- Davidson, J. 1988. El Jurásico y Cretácico Inferior en las nacientes del río Teno (Chile): una revisión. *In Congreso Geológico Chileno*, No. 5, Actas, Vol. 1, p. A453-A458. Santiago.
- Dediós, P. 1967. Cuadrángulo Vicuña. Provincia de Coquimbo. *Instituto de Investigaciones Geológicas*, Car-

- ta Geológica de Chile, No. 16, p. 1-65.
- Fabiano, E.B.; Peddie, W.; Barraclough, D.R.; Zunde, A. 1982. Geomagnetic Reference Field 1980; charts and grid values. *U.S. Geological Survey, Open File Report, No. 82-377*, 139 p.
- Forsythe, R.D.; Kent, D.V.; Mpodozis, C.; Davidson, J. 1987. Paleomagnetism of Permian and Triassic rocks, Central Chilean Andes. In *Gondwana Six* (Elliot, D.H.; Collison, J.W.; McKenzie, G.D.; editors). *American Geophysical Union, Geophysical Monograph Series*, p. 241-252. Washington.
- Giavelli, A. 1987. Tratamiento e interpretación de datos magnéticos en zonas de baja latitud geomagnética. Tesis de Grado (inédito). *Universidad de Chile, Departamento de Geología y Geofísica*, 180 p. Santiago.
- Godoy, E.; Castelli, J.C.; López, M.C.; Rivera, O. 1988. ...Y Klohn tenía razón: La Formación Colimapu recupera sus miembros basales. In *Congreso Geológico Chileno, No. 5, Actas*, Vol. 3, p. H101-H120. Santiago.
- Godoy, E.; Loske, W. 1988. Tectonismo sinplutónico de dioritas jurásicas al sur de Valparaíso: datos U-Pb sobre la "Fase Quintay". *Revista Geológica de Chile*, Vol. 15, No. 2, p. 119-127. Este volumen.
- Grant, F.S. 1984. Aeromagnetism, Geology and ore environments, I. Magnetite in igneous sedimentary and metamorphic rocks: an overview. *Geoexploration*, No. 23, p. 303-333.
- Hervé, F.; Davidson, J.; Godoy, E.; Mpodozis, C.; Covačevich, V. 1981. The late Paleozoic in Chile: stratigraphy, structure and possible tectonic framework. *Anais Academia Brasileira de Ciências*, Vol. 53, No. 2, p. 361-373.
- Hervé, F.; Kawashita, K.; Munizaga, F.; Bassei, M. 1984. R-Sr isotopic ages from Late Paleozoic metamorphic rocks of central Chile. *Journal of the Geological Society of London*, Vol. 11, p. 877-884.
- Hervé, F.; Munizaga, F.; Parada, M.A.; Brook, M.; Pankhurst, R.J.; Snelling, N.J.; Drake, R. 1988. Granitoids of the Coast Range of Central Chile: Geochronology and tectonic setting. *Journal of South American Earth Sciences*, Vol. 1, No. 2, p. 185-194.
- Irwin, J.J.; Sharp, W.; Spangler, R.; Drake, R. 1987. Some paleomagnetic constraints on the tectonic evolution of the coastal Cordillera of Central Chile. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 92, p. 3603-3614.
- Ishihara, S. 1981. The granitoid series and mineralization. *Economic Geology Publication Co., Special Issue*, p. 458-484.
- Ishihara, S.; Ulriksen, C. 1980. The magnetite-series and ilmenite-series granitoids in Chile. *Mining Geology*, Vol. 30, No. 3, p. 183-190.
- Jordan, T.E.; Isacks, B.L.; Allmendinger, R.W.; Brewer, J.A.; Ramos, V.A.; Ando, C.J. 1983. Andean tectonics related to geometry of subducted Nazca plate. *Geological Society of America, Bulletin*, Vol. 94, p. 341-361.
- Larson, R.L.; Pitman, W.C. 1972. World-wide correlation of Mesozoic magnetic anomalies and its implications. *Geological Society of America, Bulletin*, No. 83, p. 3645-3662.
- Moscoso, R.; Padilla, H.; Rivano, S. 1982. Hoja Los Andes, Región de Valparaíso. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile*, No. 52, 67 p.
- Mpodozis, C. 1984. Dinámica de los márgenes continentales activos. In *Seminario Actualización de la Geología de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Miscelánea*, No. 4, p. A1-A22.
- Mpodozis, C.; Ramos V.A. (in press) The Andes of Chile and Argentina. In *Geology of the Andes and its relationship to energy and mineral resources. Circum Pacific Conference. American Association of Petroleum Geologists*. Tulsa, Oklahoma.
- Muñoz-Cristi, J. 1962. Comentarios sobre los granitos chilenos. *Minerales*, No. 78, p. 185-194. Santiago.
- Muñoz-Cristi, J. 1964. Estudios petroráficos y petrológicos sobre el Batolito de la Costa de las provincias de Santiago y Valparaíso. *Universidad de Chile, Instituto de Geología, Publicación*, No. 25, 93 p.
- Nasi, C. 1984. Geología de la Cordillera de la Costa de Chile Central. In *Seminario Actualización de la Geología de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Miscelánea*, No. 4, p. L1-L17.
- Ramos, V.A. 1985. El Mesozoico de la Alta Cordillera de Mendoza: reconstrucción tectónica de sus facies. In *Congreso Geológico Chileno, No. 4, Actas*, Vol. 2, p. 492-513. Antofagasta.
- Ramos, V.A.; Jordan, T.E.; Allmendinger, R.W.; Mpodozis, C.; Kay, S.M.; Cortés, J.M.; Palma, M. 1986. Paleozoic terranes of the central Argentine-Chilean Andes. *Tectonics*, Vol. 5, p. 855-880.
- Raymond, C.A.; La Brecque, J.L. 1987. Magnetization of the oceanic crust: thermoremanent magnetization of chemical remanent magnetization? *Journal of Geophysical Research*, Vol. 92, No. B8, p. 8077-8088.
- Rivano, S. 1984. Geología del Meso-Cenozoico entre los 31° y 33°S. In *Seminario Actualización de la Geología de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Miscelánea*, No. 4, p. K1-K17.
- Rivano, S.; Sepúlveda, R.; Hervé, M.; Puig, A. 1985. Geocronología K-Ar de las rocas intrusivas entre los 31°-32° latitud sur, Chile. *Revista Geológica de Chile*, No. 24, p. 63-74.
- Rivano, S.; Sepúlveda, P. (en prensa). Hoja Illapel, Región de Coquimbo. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile*, No. 69.
- Sepúlveda, P. 1984. Geología del Paleozoico en la zona de la costa del Norte Chico. In *Seminario Actualización de la Geología de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Miscelánea*, No. 4, p. J1-J7.
- Shibata, K.; Ishihara, S.; Ulriksen, C. 1984. Rb-Sr ages and initial <sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr ratios of the Late Paleozoic granitic rocks from Northern Chile. *Geological Survey of Japan, Bulletin*, Vol. 35, No. 2, p. 537-545.

- Thiele, R. 1980. Hoja Santiago, Región Metropolitana. *Instituto de Investigaciones Geológicas, Carta Geológica de Chile*, No. 39, p. 1-51.
- Thomas, H. 1958. Geología de la Cordillera de la Costa entre el valle de La Ligua y la cuesta de Barriga. *Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín*, No. 2, 86 p.
- Thomas, H. 1967. Geología de la Hoja Ovalle, Provincia de Coquimbo. *Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín*, 23, 56 p.
- Uyeda, S.; Kanamori, H. 1979. Back-arc opening and the mode of subduction. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 84, p. 1049-1061.
- Vergara, M.; Charrier, R.; Munizaga, F.; Rivano, S.; Sepúlveda, P.; Thiele, R.; Drake, R. 1988. Miocene volcanism in the Central Chilean Andes (31°30'S-34°35'S). *Journal of South American Earth Sciences*, Vol. 1, No. 2, p. 199-209.
- Yáñez, G.; Parra, J.C.; Alvarez, S. 1988. Intrusivos jurásicos al sur de los 33°S en el margen occidental de la Cordillera de la Costa; evidencias geofísicas. *In Congreso Geológico Chileno, No. 5, Actas*, Vol. 2, p. F267-F286.
- Zonhenzayn, L.P. Savostin, L.A.; Sedov, A.P. 1984. Global paleogeodynamic reconstructions for the last 160 million years. *Geotectonics*, Vol. 18, No. 3, p. 181-195.