

# Peligro sísmico en el departamento Albardón y su relación con el área de fallamiento La Laja, provincia de San Juan

Laura P. PERUCCA<sup>1</sup> y Juan de D. PAREDES<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CONICET, Gabinete de Neotectónica – INGENIO – Departamento Geología, Universidad Nacional de San Juan, Av. Ignacio de La Roza y Meglioli, 5400 San Juan  
E-mail: lperucca@unsj-cuim.edu.ar; jparedes@unsj-cuim.edu.ar

**RESUMEN.** Se realiza en este trabajo un análisis del peligro y vulnerabilidad sísmicos en el departamento Albardón, ubicado a 12 km al norte de la ciudad de San Juan. La investigación se enfoca primero, en la evaluación de la distribución de los edificios singulares y líneas de vida y segundo, en la caracterización de la zona de falla de La Laja como fuente sísmogénica. Existe en Albardón un gran porcentaje de construcciones de adobe, especialmente en las proximidades de la ruptura histórica de la falla La Laja durante el terremoto de 1944, de  $M_L = 7,4$  que causara un número de aproximadamente 10.000 víctimas y grandes daños en la economía de la región. En el caso de la ocurrencia de un sismo con características similares, la magnitud de los daños en las construcciones y vías de acceso serían tan elevados como durante el terremoto de 1944.

Palabras clave: *Falla La Laja, Peligro sísmico, Vulnerabilidad, Departamento Albardón*

**ABSTRACT.** *Seismic hazard in Albardon department and its relationship with La Laja faulting area. San Juan province.* An analysis of the seismic hazard and vulnerability in the Albardon department (12 km north of San Juan city) focuses firstly on the distribution of individual buildings and communications within the urban zones, and secondly on the characterization of La Laja fault zone as a seismogenic source. There are a large number of adobe buildings in Albardon, especially in the proximity of the historic rupture of the 1944,  $M_L = 7.4$  earthquake that caused around 10.000 deaths and inflicted significant damage on the economy of the region. \* If a future earthquake, with similar characteristics to the 1944 event, were to take place, the magnitude of damage to buildings and access paths would be equally serious to that which resulted from the 1944 earthquake.

Key words: *La Laja fault, Seismic hazard, Vulnerability, Albardon department*

## Introducción

La provincia de San Juan se localiza en la región con mayor actividad sísmica del país. El terremoto del 15 de enero de 1944 fue una verdadera catástrofe para San Juan, con un número de víctimas cercano a 10.000 y la destrucción casi total de la zona urbana del departamento Albardón.

Uno de los objetivos del presente trabajo es evaluar la localidad de La Laja como fuente sísmogénica futura a los fines de efectuar el análisis del peligro y vulnerabilidad sísmica de las porciones más densamente pobladas del departamento.

Esto permitiría el desarrollo ulterior de estrategias de mitigación del peligro en la planificación del desarrollo de la región.

Los escasos estudios referidos a esta temática en la región impiden un adecuado manejo por parte de los organismos que planifican el desarrollo urbano, agrícola e industrial de la provincia.

La expansión urbana y agrícola del departamento

Albardón, limitado al sur por el río San Juan, y por el oeste por el cordón montañoso de la sierra de Villicum, ha debido realizarse hacia el norte. Por ello, hay una migración en la construcción de nuevos barrios y emprendimientos agrícolas cada vez más cerca de los tramos de falla que evidencian ruptura histórica comprobada.

En caso de producirse un sismo con las características del ocurrido en el año 1944, los efectos en la región serían nuevamente devastadores.

## Ubicación y antecedentes

El departamento Albardón se ubica en la provincia de San Juan, al norte del río homónimo, en el denominado valle del Tulum y posee una superficie de 868 km<sup>2</sup> (Fig. 1). La cabecera departamental es Villa General San Martín, situada en la porción sur del departamento, siendo la calle La Laja y Las Lomitas otras

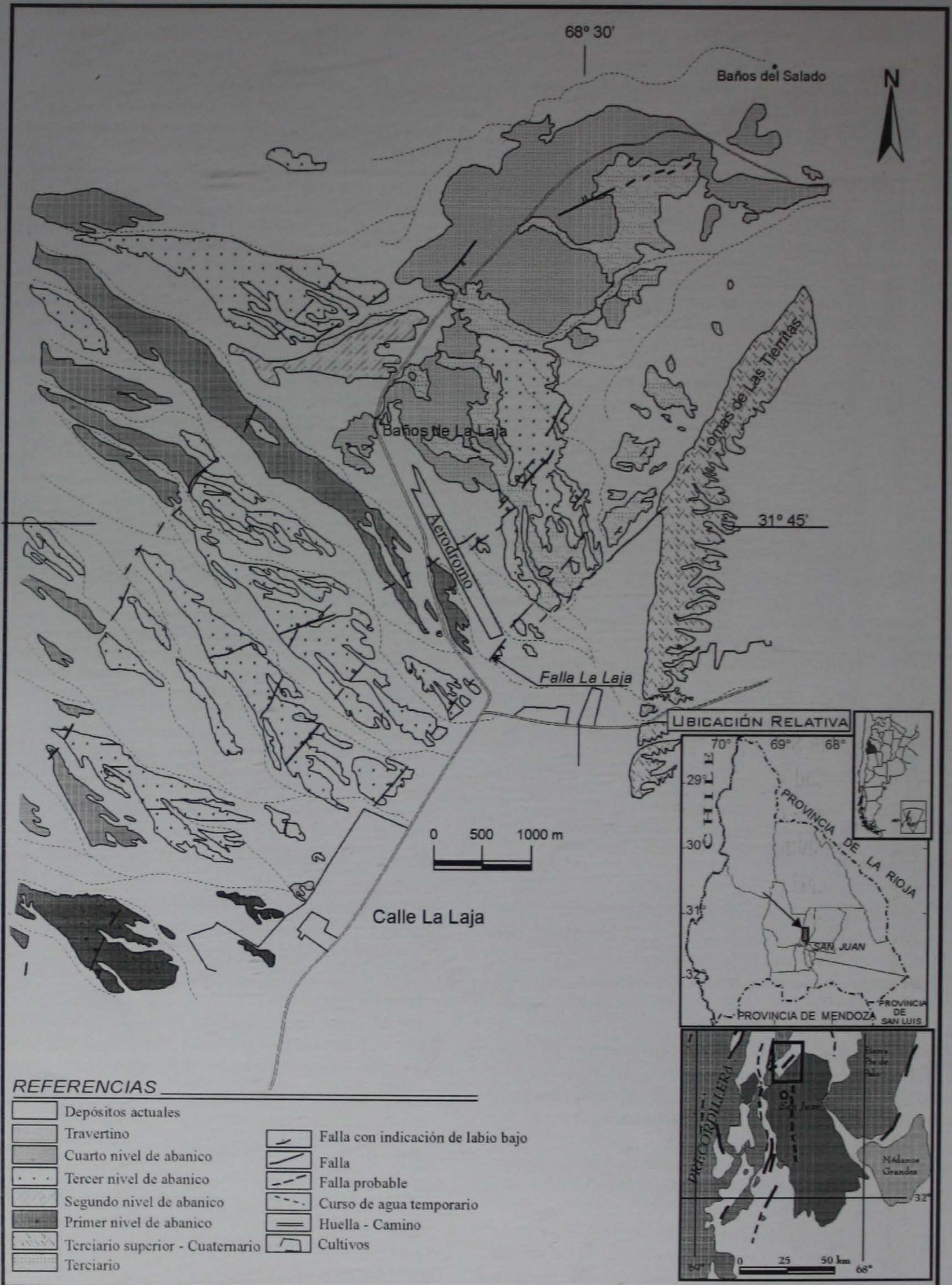


Figura 1: Mapa de la zona de fallamiento activo La Laja entre lomas de Las Tierritas y Baños de La Laja.

localidades de importancia (Fig. 2). La zona urbanizada del departamento se ubica sólo en la porción sur del mismo, el resto de la superficie tiene características rurales y existen numerosas explotaciones mineras al oeste.

La localidad de La Laja, en donde se encuentran las

fallas con actividad histórica, se ubica a 25 km al norte de la ciudad de San Juan a una altura de 680 ms.n.m., a 31° latitud sur y 68° longitud oeste, en el noroeste del departamento Albardón.

Existen en la zona diversos estudios de carácter general y orientados hacia la explotación minera, de

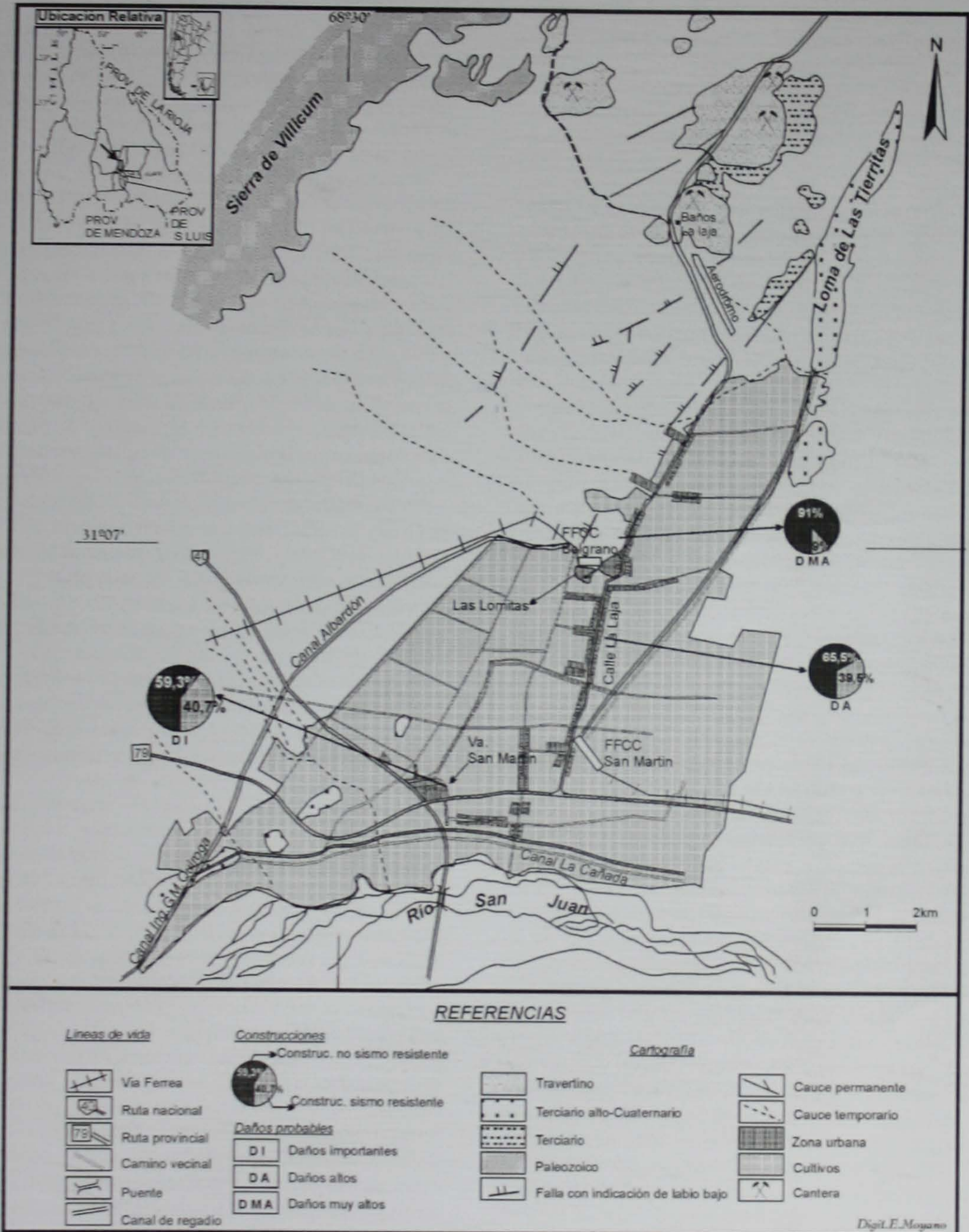


Figura 2: Mapa de distribución de edificios singulares en Villa General San Martín, calle La Laja y Las Lomitas del departamento Albardón.

aguas subterráneas y termales, estudios sismológicos y escasos trabajos referidos a neotectónica.

Castellanos (1945) efectuó un análisis de los efectos producidos por el terremoto del 15 de enero de 1944, al igual que Harrington (1944) quien además determinó un pequeño desplazamiento horizontal para la falla de La Laja.

Groeber (1944) describió una ruptura ocurrida después del terremoto de 1944 en las cercanías a los baños de La Laja.

### Marco geológico

La subprovincia geológica de Precordillera Oriental, caracterizada por cordones montañosos elongados de rumbo meridional a submeridional, se ubica entre los 31° y 32° 30' de latitud sur y 68° 30' de longitud oeste. Está constituida por rocas calcáreas y clásticas marinas del Paleozoico inferior, sedimentitas continentales del Carbonífero y Terciario y depósitos modernos.

La estructura de la Precordillera Oriental está representada por corrimientos con vergencia oriental. Bastias (1986) agrupó bajo el nombre de sistema de fallamiento inverso de Precordillera Oriental a los fenómenos de fallamiento cuaternario que afectan ambos flancos de los cordones montañosos de la región.

Bastias *et al.* (1984), definieron al sistema de fallamiento de Precordillera Oriental como compresivo, que a veces se manifiesta como un sobrecorrimiento de unidades modernas sobre más antiguas. Los bajos ángulos de las fallas generaron un sistema de fracturas complejas que frente al empuje, descomponen al movimiento principal en rechazos pequeños, representados por las escarpas paralelas.

La zona de fracturación de La Laja pertenece al sistema de fallamiento de la Precordillera Oriental, caracterizado por la existencia de fallas inversas de bajo ángulo en superficie, de rumbo meridional a submeridional y que inclinan al este (Fig. 1).

En el piedemonte oriental de la sierra de Villicum se sobreponen sedimentitas terciarias sobre depósitos aluviales del Cuaternario. En las proximidades de la calle La Laja, se destacan cuatro fallas cuyas escarpas se disponen en forma subparalela con rumbo noreste-suroeste y con la cara libre que mira al oeste (Fig. 1).

Perucca y Paredes (2000) comprobaron que las relaciones empíricas de cálculo de magnitud máxima del sismo probable en función de la longitud de rotura y desplazamiento máximo determinados por diversos autores para una sola falla, resultaba en un valor inferior a  $M_L = 7$ , menor a la registrada en 1944. Observaron que la caracterización del riesgo sísmico para el departamento Albardón considerando una sola traza de falla resultaría en valores erróneos. Al efectuar la

sumatoria de los cuatro trazos de falla paralelos ubicados en la zona, al menos dos de ellos con evidencias de ruptura histórica comprobada, se llegó a la magnitud  $M_L = 7.4$ , idéntica a la ocurrida en el año 1944.

### El terremoto de 1944

El 15 de enero de 1944, a las 20 horas 49 minutos, se produjo un sismo que duró 15 o 20 segundos que destruyó la ciudad de San Juan casi completamente. Alcanzó una magnitud de 7,4 en la escala de Richter y una intensidad IX en la escala Mercalli.

La zona de máxima intensidad fue comparativamente reducida y abarcó unos 200 km cuadrados. El epicentro fue ubicado a 20 km al norte de la ciudad, en la localidad de La Laja y el sismo fue percibido en las ciudades de Córdoba y Buenos Aires.

En comparación con los otros grandes sismos ocurridos en la provincia de San Juan (27 de octubre de 1894 y 23 de noviembre de 1977), este sismo fue de relativamente corta duración y de menor área total de percepción del fenómeno. El área de mayor destrucción durante el terremoto se localizó en la ciudad de San Juan, especialmente en el norte y en el departamento Albardón y aledaños.

Aproximadamente el 80% de los edificios construidos mayoritariamente con barro y paja mediante el empleo de adobes, materiales que se usaban desde la colonia, fueron destruidos. Murieron entre 6.000 y 10.000 personas y hubo un número elevadísimo de heridos, sumándose una marcada recesión económico-social.

En la falla La Laja, Harrington (1944) midió luego del sismo, un desplazamiento vertical máximo de 22 cm y uno horizontal de 25 centímetros. La zona oriental de la fractura se movió hacia arriba respecto de la occidental.

Castellanos (1945), observó un movimiento de 0,30 m luego del sismo, que «creció» a 0,60 m en los meses subsiguientes. Notó además, que el sismo había sido más violento en Albardón que en la capital de San Juan, ya que se destruyeron incluso algunas casas construidas con ladrillos, como la Biblioteca San Martín, y las veredas y calles quedaron onduladas. Los postes de telégrafo fueron inclinados y derribados.

Durante el terremoto de 1944 se registraron numerosos fenómenos de licuefacción, con la surgencia de aguas y la formación de volcanes de arena, no sólo en el departamento Albardón sino también en localidades vecinas.

El puente de Albardón, que atraviesa el río San Juan y une el departamento Albardón con la ciudad de San Juan, sufrió daños en el estribo norte, con grietas que lo dislocaron. También hubo agrietamiento de la ruta, a ambos lados de la losa de hormigón y en el terraplén de la ruta 40.

En la localidad de Las Lomitas, entre La Laja y Villa General San Martín la mayoría de las casas fueron destruidas. En los Baños de La Laja las fuentes termales sufrieron una modificación pasajera en su caudal y las piletas se agrietaron, algunas de ellas con rechazo.

En las canteras de travertino ubicadas unos 5 km al norte de los baños, el sismo fue de gran intensidad y los efectos de considerable importancia, las casas construidas con bloques de travertino orientadas de norte a sur se cayeron y de las salas de máquinas cortadoras saltaron numerosas piezas. Se originaron grietas de las que surgió un agua sulfurosa y termal.

### Características del departamento Albardón

Albardón posee según el censo de 1991, más de 16.000 habitantes y un número de viviendas que supera las 4.000. También cuenta con 15 establecimientos educativos primarios y secundarios, servicio de luz, gas, agua potable y cloacas aunque estas últimas sólo abarcan un porcentaje de la población. Tiene además sucursal bancaria y seccional de policía. En cuanto a comunicaciones, cuenta con servicio de correo y teléfonos.

Con respecto a la salud pública, existe una posta sanitaria en la calle La Laja, un centro de salud en Villa General San Martín y otro en la localidad de Las Lomitas (Fig. 3).

La actividad industrial en el departamento se ha visto incrementada desde 1944, con explotaciones mineras en las proximidades de la zona de falla (canteras de travertino y caliza) que representan el 38% de la producción total de rocas de aplicación en la provincia y una creciente actividad vitivinícola con la instalación de bodegas. El número de establecimientos industriales alcanza la veintena, principalmente en productos alimenticios y bebidas, productos minerales y maquinarias y equipos.

Los negocios mayoristas se dedican fundamentalmente a la comercialización de productos agropecuarios y mineros. Otros corresponden al rubro alimentos y bebidas.

La zona cuenta con más de 150 comercios minoristas, principalmente en el área alimentos y bebidas, seguido por indumentaria, farmacias, venta de artículos del hogar y otros.

La superficie cultivada también ha crecido considerablemente en los últimos años, con más de 3.500 ha, principalmente cultivos de vid, hortalizas, olivos, frutales, forrajes y cereales.

Con respecto a las vías de comunicación, el departamento es atravesado por la ruta nacional 40, pavimentada, por la ruta provincial 79, y por la ruta provincial 102 que lleva a los baños del Salado y se encuentra consolidada.

El cruce del río San Juan se realiza por intermedio

del puente de Albardón, en regular estado, el cual es permanentemente atravesado por un intenso tránsito vehicular y de camiones cargados de material provenientes de los establecimientos mineros ubicados en noroeste del departamento. También se encuentran los ferrocarriles General Belgrano y General San Martín, el primero actualmente fuera de servicio.

En cuanto a los recursos hídricos, el departamento posee 337 pozos de agua de particulares. El canal principal, proveniente de el Partidor San Emiliano (obra de distribución del agua del dique de Ullum, sobre el río San Juan) se denomina Ingeniero Manuel Quiroga, a partir del cual se distribuye la red de regadío que atraviesa el departamento.

### Métodos

En general, se habla de fuente sismogénica potencial como aquella área, línea o volumen en el interior o en la superficie terrestre, con características propias de sismicidad. Esta sismicidad se puede manifestar a través de la ocurrencia de sismos de diferentes magnitudes, registrables en la actualidad o en tiempos históricos y prehistóricos.

Los criterios empleados para definir de un área como fuente sismogénica potencial consisten en identificar y analizar todas las fallas potencialmente activas, principalmente en los siguientes aspectos (Slemmons 1977) :

*Orientación de las fallas:* Esta zona se caracteriza por la existencia de fallas inversas de bajo ángulo en superficie, de rumbo en general N45° E que inclinan al este.

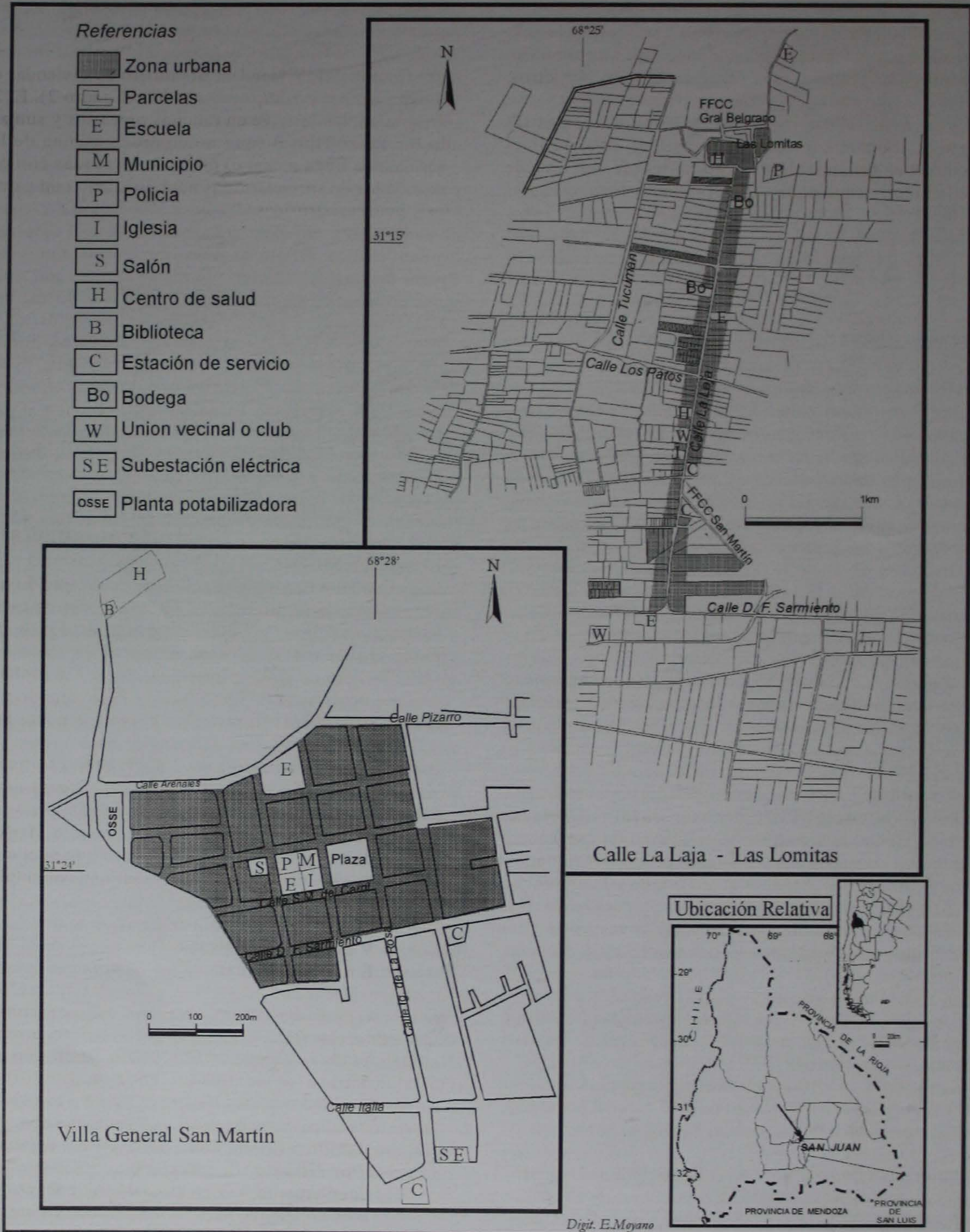
Las escarpas de falla se disponen en forma subparalela en el piedemonte oriental de la sierra de Villicum, poseen alturas variables desde pocos cm hasta 25 m y se ubican generalmente a contrapendiente, con la cara libre de la escarpa hacia el oeste.

*Longitud de las fallas:* Los distintos tramos de las fallas no superan individualmente los 10 km de longitud.

*Dirección probable del movimiento:* La dirección predominante en las fallas estudiadas es la vertical, aunque Harrington (1944), Bastías *et al.* (1984) y Smalley *et al.* (1993) describen un movimiento horizontal.

*Tipos de fallas:* Se trata de falla inversas, subparalelas, que inclinan entre 25° y 45° al este, que sobrepone sedimentitas de edad terciaria sobre depósitos aluviales del Cuaternario y en general son coincidentes con la estratificación de las sedimentitas terciarias.

*Desplazamiento máximo:* El desplazamiento vertical medido por Castellanos (1945) durante el terremoto



**Figura 3:** Mapa de las zonas urbanas del departamento Albardón, Villa General San Martín, calle La Laja y Las Lomitas y su relación con el área de fallamiento activo. Estimación de daños probables y caracterización de las construcciones.

de 1944 fue de 0,30 m y aumentó a 0,60 m en el mes siguiente. El desplazamiento vertical mínimo para el Cuaternario de la falla La Laja es de 4 m y el desplazamiento total sobre el plano de falla es de 8,20 metros.

*Relación con diseños de falla regionales:* Bastias (1986) ubica la zona de fallamiento de La Laja en el sistema de fallamiento Precordillera Oriental, área de fallamiento Rinconada – Las Tapias, segmento Tapias – La Laja.

### Análisis

El departamento Albardón se encuentra dentro del área con mayor peligrosidad sísmica del país.

La exposición de la población del departamento Albardón ante un sismo con similares características al ocurrido en 1944, se refiere a la extensión, cantidad y cualidad de los diversos elementos antrópicos que componen la realidad territorial (población, edificios, sistema de infraestructura) cuyas condiciones y funcionamiento pueden ser dañados, alterados o destruidos por un evento sísmico.

Las variables consideradas para analizar la exposición de la población son:

1.- En la superestructura:

a) Viviendas por radio (metros): Análisis de sus condiciones de sismicidad, con el propósito de poner en evidencia la calidad de la construcción. Clasificadas según el porcentaje de viviendas sismo-resistentes (SR) y no sismo-resistentes (No SR) (Cuadro 1). En general, las construcciones consideradas sismo-resistentes son aquellas que cumplen con las normas de construcción vigentes (hormigón armado), mientras que las no sismo-resistentes son en su mayoría, de adobe. Se seleccionaron por manzana, las tres localidades del departamento más densamente pobladas: Villa General San Martín, calle La Laja y Las Lomitas.

b) Población: Con respecto a la población total, la franja de la población más numerosa responde a las edades entre 0 y 14 años, ocupando el 35 % del total,

**Cuadro 1:** Características de las viviendas en el departamento Albardón. Cuadro indicador de porcentajes de viviendas sismorresistentes y no sismorresistentes en las áreas más densamente pobladas del departamento.

Localidad	Casas adobe %	Casas de mampostería %	
		Sismorresistentes	No sismorresistentes
Villa General San Martín	40,2	50,3	0,5
Calle La Laja	63,1	34,5	0,4
Las Lomitas	88,4	9	1,3

mientras que entre los 20 y 60 años (población económicamente activa) el porcentaje es del 45% (INDEC 1993).

c) Cantidad de viviendas: El número de viviendas en el departamento es superior a 4.000 (Cuadro 2). El 23 % de la población vive en ranchos precarios y sumando las casas Tipo B (que no cumplen alguna de las normas) se llega a casi el 60 % de viviendas con posibilidades de ser destruidas ante un sismo con características catastróficas.

d) Edificios singulares: Son aquellas obras cuya destrucción o daño provocaría la interrupción de un servicio imprescindible para la comunidad. Ellos son, entre otros: Escuelas, Centros de salud, Clubes deportivos, Estaciones de servicio de combustible, Depósitos de agua, Uniones Vecinales, Iglesias, Policía, Medios de comunicación y Subestaciones eléctricas (Fig. 3)

2.- En la infraestructura, llamadas también «líneas de vida»: Son aquellas de importancia fundamental para el normal funcionamiento de la ciudad tales como la red vial, puentes, agua potable, electricidad, gas y cloacas.

### Riesgo, peligrosidad y vulnerabilidad sísmicas

Cuando se habla de riesgo sísmico en sentido amplio, es necesario diferenciar entre el hecho de que el fenómeno realmente se produzca y los daños que pueda provocar (Peligrosidad y Riesgo).

El concepto de *peligrosidad* se refiere a la probabilidad de ocurrencia en un momento determinado y en un área específica de un sismo potencialmente destructivo.

El *riesgo* tiene en cuenta el posible efecto que el sismo tendría sobre la población y/o los bienes materiales.

Ayala Carcedo (1990), define al riesgo sísmico como todo proceso, situación o suceso que puede generar daños económicos o sociales en una comunidad.

$$R = p \times V \times E$$

Donde **p** es la probabilidad de ocurrencia

**V** es la vulnerabilidad

**E** exposición

Al considerar que **p** es una función del intervalo de recurrencia de un terremoto similar al ocurrido en 1944, es necesario conocer tal intervalo de recurrencia a los fines de calcular el Riesgo sísmico del departamento. Para ello se deben efectuar estudios de paleosismicidad que permitan realizar este cálculo. El análisis de la paleosismicidad de la región se ve dificultado debido a las características de los depósitos cuaternarios fallados.

Consecuentemente, la determinación de **R**, en función de **p** es incierta y podría variar desde valores altos a muy bajos.

En el departamento Albardón, la densidad de viviendas es escasa. Las mismas se concentran en Villa

Cuadro 2: Cantidad de personas por viviendas y hogares en el departamento Albardón

Dpto. Albardón	Total	Cantidad de personas										Promed. personas
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 y más	
Viviendas	3,427	192	388	513	563	604	459	270	178	91	169	4,86
Hogares	3,669	243	462	594	625	645	489	269	154	81	107	4,54
Población	16645	243	924	1,782	2,5	3,225	2,934	1,883	1,232	729	1193	

General San Martín, a lo largo de la calle La Laja y en la localidad de Las Lomitas. El resto de la región corresponde a áreas cultivadas o canteras de rocas de aplicación, en donde la vivienda es aislada.

Si se consideran las condiciones sismotectónicas de Albardón, la resistencia prácticamente nula de las construcciones de adobe a los efectos de un sismo intenso y la configuración espacial de los asentamientos, el riesgo estaría determinado especialmente por el grado de vulnerabilidad de las construcciones.

Se entiende por *vulnerabilidad* la propensión de personas, bienes y también de las actividades que se realizan, a sufrir daños o modificaciones, en caso de ocurrencia de sismos con intensidad considerable.

- Coeficientes de vulnerabilidad directa: indican el posible comportamiento físico de los elementos que analizan.

- Coeficientes de vulnerabilidad funcional: expresan el comportamiento funcional de los elementos que se analizan.

- Coeficientes de vulnerabilidad total: su valor contempla la suma de los otros dos.

Los resultados obtenidos se han clasificado de acuerdo a sus valores en vulnerabilidad total: baja, media, alta y muy alta (Fig. 2).

### Estimación de los daños probables a ocurrir en el departamento Albardón, en caso de un terremoto con características destructivas

Una vez ubicadas las fuentes potenciales generadoras de sismos, tal como es en este caso la zona de fallamiento de La Laja y determinada la distribución del tipo y número de viviendas y construcciones en el departamento Albardón, es posible estimar los daños probables a producirse en el caso de un terremoto con características destructivas.

Las condiciones locales del suelo en los efectos sísmicos sobre las estructuras tienen ejercen una gran influencia. Durante el terremoto de 1944 se produjeron numerosos fenómenos de licuefacción que afectaron edificaciones, cultivos, canales de regadío y caminos. Es necesario establecer las características generales de subsuelo del departamento, para determinar

en diferentes zonas, cuales son las que mayores posibilidades tienen de sufrir fenómenos de amplificación frente a un sismo. Esto reviste gran importancia ya que permitiría cuantificar las probables pérdidas monetarias y por otro lado, realizar una planificación para un caso de emergencia, estimando la distribución de las áreas vulnerables y el número de probables colapsos durante el sismo.

Al efectuar una relación entre las intensidades máximas y nivel de daños para las construcciones sismorresistentes y no sismorresistentes, Castano (1993), establece un índice de daño, especialmente para las construcciones no sismorresistentes que involucra el nivel máximo de movimiento del suelo con el daño esperado, medido en colapso parcial o total de la construcción.

- Daños Bajos (DB): 0 al 5 % de las construcciones colapsarán parcial o totalmente

- Daños Moderados (DM): 5 al 25% de las construcciones sufrirán colapso parcial o total

- Daños Importantes (DI): 25 al 50% de las construcciones sufrirán colapso parcial o total

- Daños Altos (DA): 50 al 75 % de las construcciones sufrirán colapso parcial o total

- Daños Muy Altos (DMA): 75 al 100 % de las construcciones sufrirán colapso parcial o total.

### Discusión

A pesar de las décadas transcurridas desde el terremoto de enero de 1944, la cantidad de construcciones no sismorresistentes sigue siendo muy elevada. Las viviendas precarias, generalmente están habitadas por personas de bajos recursos económicos, con un núcleo familiar numeroso, tal como se observa en el cuadro 2 en donde casi el 50% de los hogares están integrados por más de 5 personas (el promedio de personas por vivienda en todo el departamento es de 4,86). En el caso de ocurrir un sismo destructivo, el número de víctimas sería muy elevado. La franja más numerosa es la de la población económicamente activa, entre los 20 y 60 años, con más del 50 % del total de la población. En caso de haber pérdidas de vida, la economía de la región se vería enormemente perjudicada.



Al analizar las características de las construcciones del departamento Albardón, considerando las tres áreas más pobladas, la cabecera departamental, Villa General San Martín, calle La Laja y Las Lomitas, es posible concluir lo siguiente:

El departamento Albardón está expuesto a un elevado nivel de peligro sísmico, con una alta probabilidad de experimentar elevadas pérdidas humanas y económicas ante un terremoto con características destructivas.

Los mayores daños en las construcciones (DMA), con la consiguiente pérdida de vidas y perjuicios económicos se producirían en la localidad de Las Lomitas, en donde el 91 % de las viviendas son no sismorresistentes (Fig. 2).

En la calle La Laja, los daños serían altos (DA), ya que más del 60% de las construcciones son no sismorresistentes (Fig. 2).

En la cabecera departamental, Villa General San Martín, los daños serían de importancia (DI), aunque menores que en los casos anteriores, con un 40 % de las viviendas no sismorresistentes (Fig. 2).

En cuanto a las industrias presentes en la zona, además de las numerosas empresas mineras, existen establecimientos vitivinícolas, muchos de ellos no sismorresistentes, los que sufrirían importantes daños ante un sismo.

El principal acceso al departamento se efectúa por intermedio del puente que atraviesa el río San Juan, construido con anterioridad al terremoto de 1944 y que sufrió considerables lesiones durante el mismo, siendo luego reparado. Es probable que dicho puente no resista un nuevo sismo destructivo debido a que el mismo tiene una continua circulación de camiones cargados de material provenientes de las canteras ubicadas en la zona, por lo cual está sumamente deteriorado. Otro acceso al departamento también se realiza a través de un puente que atraviesa el río y se encuentra en regular estado.

En el caso de la ocurrencia de un sismo con características destructivas, resulta de fundamental importancia el mantenimiento de los servicios básicos, medios de comunicación (teléfono, radio, televisión); transmisión de energía (electricidad, gas natural y combustibles); distribución del agua (agua corriente y canales de riego); vías de transporte (rutas, puentes, aeródromo); actividades de emergencia (centros de salud, defensa civil, policía). Todos estos serían sumamente vulnerables ante la ocurrencia de un sismo y ruptura del terreno.

En el departamento Albardón, la población se ha incrementado en los últimos años y existe una clara tendencia a la ocupación de áreas hacia el norte de la actualmente habitada, sobre todo a lo largo de la calle La Laja, acercándose cada vez más a la zona del trazo de la falla La Laja. En el año 1998 se construyó un nuevo barrio al pie de la escarpa de falla de la Laja, en donde se produjo la ruptura histórica (Fig. 4). Tam-



**Figura 4:** Barrio Pedro Elizalde, ubicado a escasos metros de la escarpa de la falla La Laja, la que sufrió ruptura durante el sismo de 1944.

bién se encuentran en las proximidades de la misma dos escuelas y existen numerosas viviendas precarias a pocos metros del trazo de la falla.

Las líneas de alta tensión han sido ubicadas a lo largo del trazo de la falla, sobre el labio elevado de la misma. (Fig. 5). De producirse un sismo, se vería alterado el suministro de energía de la zona.

Sobre los depósitos afectados por los distintos tramos de falla funcionan pequeños emprendimientos industriales como secaderos de pasas, que en función de la época del año podrían verse afectados por el sismo.

En el aeródromo departamental, la pista de aterrizaje es atravesada por un tramo activo de la falla, con claras evidencias de ruptura histórica. En el caso de un nuevo evento sísmico el aeródromo quedaría fuera de servicio.

Los canales de regadío que surgen en el departamento podrían sufrir roturas que impedirían el suministro de agua para riego de las zonas cultivadas, con los consiguientes perjuicios en la actividad agrícola.

En sismos anteriores se registraron en la zona numerosos fenómenos de licuefacción de suelos que se repetirán en lo futuro, con los consiguientes perjuicios para la población, cultivos y actividades industriales.

## Conclusiones y recomendaciones

Los antecedentes históricos de terremotos destructivos en la región hacen aconsejable la aplicación de medidas de prevención o planificación previa con recomendaciones sobre las tipologías de las construcciones, siguiendo normas antisísmicas y un adecuado ordenamiento urbano (evitando las construcciones de viviendas y líneas de vida en las proximidades de la escarpa) y uso del suelo. Con respecto a las vías de comunicación es vital asegurar el mantenimiento de los accesos y la evacuación hacia lugares amplios y cerra-



**Figura 5:** Línea de alta tensión que se dirige hacia el norte sobre el labio elevado de la falla La Laja.

dos, tales como galpones o escuelas cuyo número y distribución en todo el área del casco urbano es suficientemente homogénea.

El estudio de las características del subsuelo permitirá ubicar aquellas áreas del departamento propensas a sufrir fenómenos de licuefacción.

Para realizar una correcta evaluación del riesgo sísmico del departamento Albardón es necesario efectuar estudios de paleosismicidad que permitan calcular el intervalo de recurrencia para terremotos con características similares al ocurrido en 1944. También se deben realizar estudios que permitan conocer la estructura profunda de la región.

La urbanización futura del departamento no debe efectuarse a lo largo de la calle La Laja, paralela a la zona de falla, sino que se deben evaluar zonas alternativas donde el impacto frente a un sismo con características destructivas sea menor. También es necesaria una paulatina erradicación de las viviendas de adobe, reemplazándolas por construcciones sismo-resistentes.

El conocimiento de los efectos derivados de los terremotos destructivos que afectarían la región requiere una estrecha coordinación entre las autoridades gubernamentales, la comunidad científica y la población en la corrección y/o solución de los problemas detectados para una adecuada planificación urbana, educación y capacitación de especialistas en defensa civil.

### Agradecimientos

Los autores desean expresar su gratitud al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas y al INGENIO de la Universidad Nacional de San Juan. Se agradece al doctor Hugo Bastías, por sus valiosos comentarios y a los árbitros de este trabajo, por las oportunas sugerencias que contribuyeron a mejorar la calidad del mismo.

### TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Ayala Carcedo, F., 1990. Análisis de los conceptos fundamentales de riesgos y aplicación a la definición de tipos de mapas y riesgos geológicos. *Boletín Geológico de España*, 101 (3): 456 – 467.
- Bastías, H., 1986. Fallamiento cuaternario en el área sismotectónica de Precordillera. Tesis Doctoral Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de San Juan, 160 p. (inédito).
- Bastías, H., Weidmann, N. y Pérez, A., 1984. Dos zonas de fallamiento pliocuaternario en la Precordillera de San Juan. *Actas 9º Congreso Geológico Argentino*, 2: 329 – 341.
- Castano, J., 1993. La verdadera dimensión del problema sísmico en la provincia de San Juan. INPRES, Publicación Técnica N° 18, 46 p., San Juan.
- Castellanos, A., 1945. Cuatro Lecciones sobre terremotos. Parte B: El terremoto de San Juan. Asociación Cultural de Conferencias de Rosario. Publicación N° 6:77-243.
- Groeber, P., 1944. Movimientos tectónicos contemporáneos y un nuevo tipo de dislocaciones. *Notas del Museo de La Plata*, Tomo 9, Geología, N°33: 365-375.
- Harrington, H., 1944. Volcanes y Terremotos. Editorial Pleamar, 251 p., Buenos Aires.
- INDEC, 1993. Censo Nacional de Población y Vivienda 1991. Resultados definitivos. Características seleccionadas. San Juan. Serie B N° 18, 346p., Buenos Aires
- Perucca, L. y Paredes, J., 2000. Fallamiento activo y su relación con la magnitud máxima del sismo probable en la zona de La Laja. Departamento Albardón. San Juan. República Argentina. *Actas 9º Congreso Geológico Chileno*, 1. 815 – 818. Puerto Varas.
- Slemmons, D., 1977. Faults and earthquake magnitude, Report 6 of State of the Art for Assessing Earthquake Hazards in the United States: U.S. Corps of Engineers Miscellaneous Paper S - 77 - 1, 129 p. Washington D.C.
- Smalley, R., Pujol, J., Regnier, M., Chiu, J., Chatelain, J., Isacks, B., Araujo, M. y Puebla, N., 1993. Basement seismicity beneath the Andean Precordillera thin-skinned thrust belt and implications for crustal and lithospheric behavior. *Tectonics*, 12: 63 -76.

**Recibido:** 4 de septiembre, 2000

**Aceptado:** 10 de octubre, 2001

# Geología del área del cerro Los Guanacos, departamento Calamuchita, provincia de Córdoba

Sebastián GONZÁLEZ CHIOZZA

Cátedra de Geología Económica, Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. Pabellón 2, Ciudad Universitaria – C1428EHA Ciudad de Buenos Aires, Argentina. sebas@tango.gl.fcen.uba.ar

**RESUMEN.** El área del cerro Los Guanacos pertenece al basamento de las Sierras de Córdoba y su geología está definida por una secuencia proterozoica superior-eopaleozoica, integrada por serpentinitas, anfibolitas, gneises, esquistos, mármoles y metacuarcitas, cuyas asociaciones mineralógicas evidencian condiciones metamórficas de grado medio (facies de anfibolita) correlacionables con el metamorfismo regional. En base a trabajos petrológicos, geoquímicos y estructurales se estableció la secuencia y se determinaron los protolitos de las rocas que la integran. Ocupa la base de la secuencia el cuerpo ultrabásico Los Guanacos, fragmento ofiolítico serpentinizado, constituido originalmente por peridotitas con diques básicos asociados. Sobre este cuerpo se apoyan metamorfitas generadas a partir de sedimentos pelíticos marinos entre los que se intercalan bancos tabulares de caliza, basaltos y mantos silíceos. La correlación entre los contenidos de elementos traza correspondientes a los tres términos ígneos de la secuencia (peridotitas, basitas de diques y basaltos) sugiere una relación comagmática. Estructuralmente el área está dominada por un pliegue anticlinal sinformal en cuyo núcleo se aloja el cuerpo ultrabásico Los Guanacos portador de cromita. Asimismo, se destaca la presencia, en la base del cuerpo ultrabásico, de una suela metamórfica anfibolítica, asociada a una zona de cizalla que define un contacto tectónico entre las ultrabásitas y gneises migmáticos.

**Palabras clave:** *Los Guanacos, Córdoba, Sierras Pampeanas, Cuerpo ultrabásico, Suela metamórfica*

**ABSTRACT.** *Geology of cerro Los Guanacos area, Calamuchita department, Córdoba province.* Geologically, the area of cerro Los Guanacos belongs to the Sierras de Córdoba basement and consists of an upper Proterozoic-Eopaleozoic sequence of serpentinites, amphibolites, gneises, schists, marbles and metaquartzites, with mineralogical assemblages that indicate medium-grade metamorphism (amphibolite facies), equivalent to that observed regionally. Petrological, geochemical and structural studies were used to define the protoliths of the sequence. The base of the sequence is marked by the Los Guanacos ultrabasic body, a serpentinitized ophiolitic fragment originally composed of mantle-crust transitional peridotites with associated basic sills. These rocks are overlain by metamorphites generated from marine pelitic sediments with intercalations of tabular bodies of limestone, basalt and silicic layers. Similarities in the rare earth element content of the three igneous lithotypes of the sequence (peridotites, basites from sills and basalts), suggest a comagmatic relationship between them. Structurally, the area is dominated by a synformal anticlinal fold, which hosts the Los Guanacos chromite-bearing ultrabasic body in its core. Also remarkable is the presence, in the base of the ultrabasic body, of an amphibolitic metamorphic sole that is associated with a shear zone, and defines a tectonic contact between the ultrabasites and migmatitic gneises.

**Key words:** *Los Guanacos, Córdoba, Sierras Pampeanas, Ultrabasic body, Metamorphic sole*

## Introducción

El basamento metamórfico de las Sierras de Córdoba, comprendido en la unidad morfoestructural de las Sierras Pampeanas Orientales, está constituido fundamentalmente por gneises, esquistos micáceos y migmatitas que alternan con anfibolitas y calizas cristalinas, e incluye una notable cantidad de cuerpos ultrabásicos y básicos, ampliamente distribuidos, con variada composición geoquímica y diversas implicancias paleoambientales (Villar 1985; Mutti 1992, 1995, 1997; Escayola *et al.* 1996; Di Marco y Mutti 1998). Se presenta aquí un estudio del cerro Los Guanacos, que corresponde a uno de estos

cuerpos ultrabásicos ubicado en el faldeo oriental de la sierra de Comechingones, en el departamento Calamuchita.

Entre los trabajos específicos sobre el área se encuentra el estudio geológico minero de los yacimientos de cromita efectuado por Pagés y Re (1953) y el relevamiento magnetométrico llevado a cabo por Ramón (1965), destacándose también, los aportes de Mutti y Di Marco (1993), González Chiozza (1998), González Chiozza y Mutti (1999), Geuna *et al.* (2000), Mutti y González Chiozza (2000) y Mutti *et al.* (2000).

La presente contribución fue realizada a partir de un relevamiento geológico general del área del ce-

ro Los Guanacos de aproximadamente 7 km<sup>2</sup> (fig. 1), complementado con un estudio de detalle efectuado en el sector centro-oeste del cuerpo ultrabásico cubriendo una superficie de 125.000 m<sup>2</sup> (Fig 2). En base a estudios petrológicos, geoquímicos, mineralógicos y estructurales, se proporciona una ampliación

y actualización del conocimiento geológico del área, que incluye la estratigrafía de la secuencia ígneo-metamórfica, la redefinición de la estructura de plegamiento que domina la comarca y la caracterización de la suela metamórfica ubicada en la base del cuerpo ultrabásico. Asimismo, se ofrece una propuesta

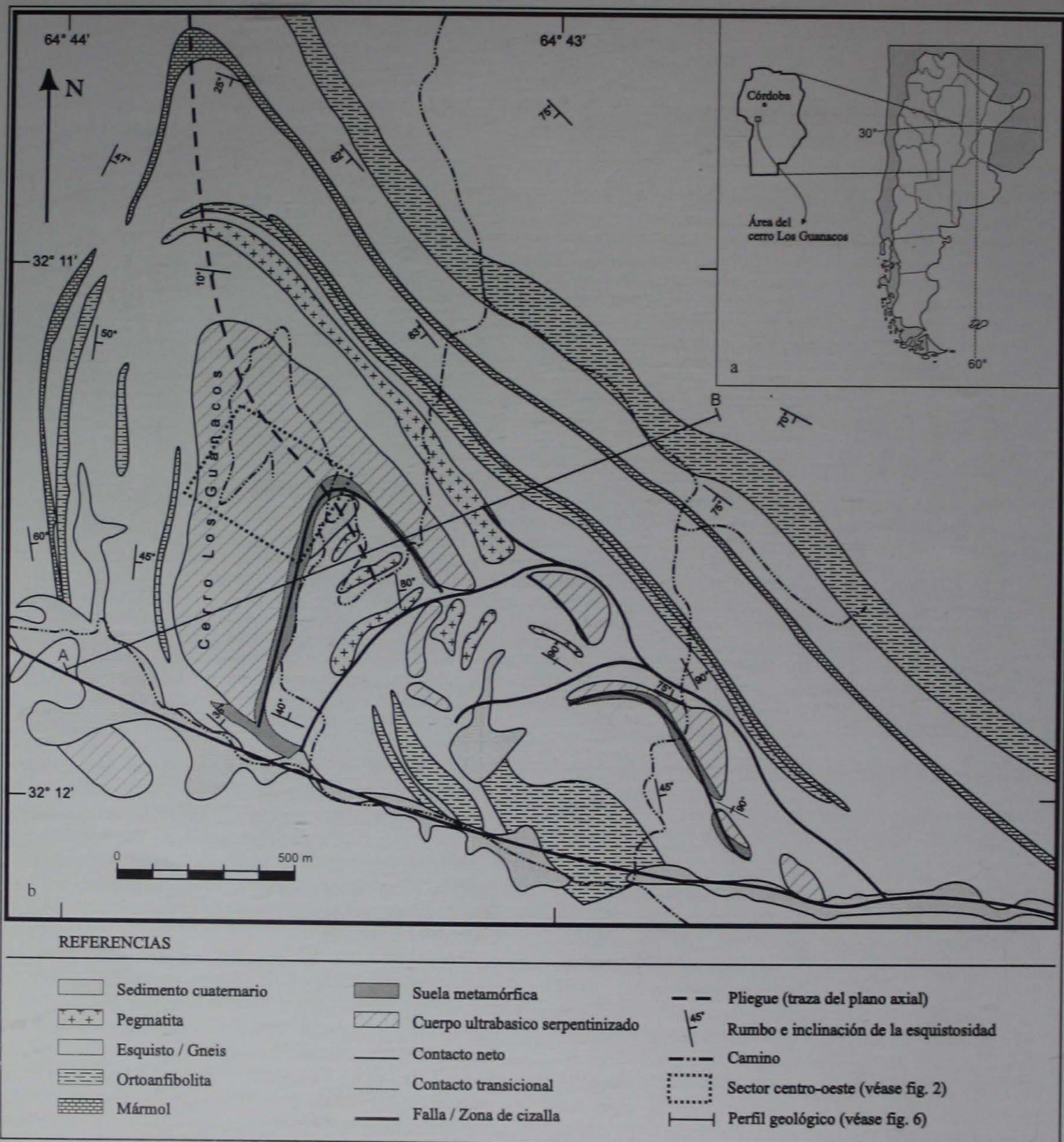


Figura 1: a, Esquema de ubicación geográfica y b, mapa geológico del área del cerro Los Guanacos. Modificado de Fernández Gianotti (1977).

evolutiva para el área basada en la integración de la información geológica.

### Metodología de trabajo

Fueron seleccionadas por su representatividad, 10 muestras de roca, que luego de ser sometidas a procesos de trituración, molienda, tamizado y cuarteo, fueron enviadas a Activation Laboratories Ltd. (Ontario, Canadá), para la determinación cuantitativa de 6 elementos mayoritarios y 42 elementos traza, mediante las técnicas de activación neutrónica (INAA - Instrumental Neutron Activation Analysis) y espectrometría de emisión en plasma excitado (ICP - Inductively Coupled Plasma Emission Spectrometry). Asimismo, 6 de las muestras fueron analizadas por vía húmeda en el laboratorio de química del Departamento de Ciencias Geológicas de la Universidad de Buenos Aires, para precisar contenidos de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , LOI y  $\text{H}_2\text{O}$ , complementando los análisis anteriores.

Con vistas a los estudios petrográficos y mineralógicos se confeccionaron 21 secciones delgadas y las porciones diamagnéticas de 5 muestras, previamente fraccionadas con un separador Franz, se analizaron por difracción de rayos X mediante un difractómetro Philips con registrador automático, en el Centro de Investigación y Desarrollo en Química y Petroquímica (CEQUIPE) del Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI).

### Marco geológico regional

El basamento metamórfico de Córdoba se desarrolló a partir de protolitos esencialmente grauváquicos y pelíticos subordinados, cuyo metamorfismo alcanzó un grado medio a alto con desarrollo principal de facies de anfibolita (Gordillo y Lencinas 1979) a facies de granulitas con migmatización asociada (Gordillo 1984). Las condiciones imperantes durante el pico metamórfico fueron estimadas por Otamendi *et al.* (1999) en 7–8 kbar de presión y un rango de temperatura comprendido entre 650 y 950° centígrados. Las mismas habrían sido alcanzadas entre el Proterozoico superior y el Cámbrico inferior, de acuerdo a las siguientes determinaciones radiométricas: 640 Ma (Cingolani y Varela 1975), 580 Ma (Linares y González 1990), 520 Ma (Rapela *et al.* 1995) y 531 Ma (Stuart Smith *et al.* 1996). No obstante, recientes estudios geocronológicos (Rapela *et al.* 1998) restringen la edad del metamorfismo más intenso a un período comprendido entre 540 y 519 Ma. Asimismo, existen dataciones que indican rocas con una antigüedad de entre 1.400 y 700 Ma (Cingolani y Varela 1975), que probablemente correspondan a

terrenos precámbricos amalgamados tectónicamente. Se identifican al menos tres episodios deformacionales, interpretados como episodios discretos de eventos mayores (Martino *et al.* 1995). Los dos primeros (fases D1 y D2), caracterizados por un metamorfismo de grado medio a alto y una deformación predominantemente dúctil, son previos a coetáneos con respecto al pico metamórfico y corresponden al ciclo Pampeano (~570-519 Ma); mientras que el restante (D3), de naturaleza cataclástica, tiene lugar durante el ciclo Famatiniano (~500-360 Ma) y antecede a la intrusión de batolitos peraluminosos devónicos (Rapela *et al.* 1998). Al igual que el resto de las Sierras Pampeanas, las Sierras de Córdoba poseen una estructura en bloques, cuya elevación y basculamiento estuvieron controlados por esfuerzos compresivos de orientación E-O, durante el ciclo Ándico. Esta tectónica actuó durante los últimos 10 Ma (Jordan y Allmendinger 1986) y generó el actual sistema de cordones controlados por fallas inversas con orientación N-S caracterizados por presentar la ladera occidental escarpada y la oriental tendida.

Entre los trabajos geológicos de alcance regional referidos al basamento de las Sierras Pampeanas de Córdoba, se pueden mencionar las caracterizaciones de Gordillo y Lencinas (1979) y Bonalumi *et al.* (1999) y el estudio estructural realizado por Dalla Salda (1984). Cabe también destacar los aportes acerca de las implicancias geotectónicas de esta región, efectuados por Kraemer *et al.* (1995, 1996), Escayola *et al.* (1996), Di Marco y Mutti (1998) y Rapela *et al.* (1998).

### Geología local

El área del cerro Los Guanacos se localiza a escasos kilómetros al este de las rocas cataclásticas que tienen continuidad con la faja de cizalla de Guacha Corral caracterizada por Martino *et al.* (1994), y al sur-suroeste del macizo migmatítico de Athos Pampa-Cerro Pelado (Gordillo 1984; Bonalumi y Gigena 1987). A diferencia de estas zonas, la región estudiada muestra un metamorfismo de grado medio con desarrollo de paragénesis atribuibles a la facies de anfibolita, y está integrada por ultrabasitas y basitas serpentinizadas y/o anfibolitizadas, ortoanfibolitas, gneises, esquistos, mármoles y metacuarcitas. Las ultrabasitas y basitas metamorfizadas constituyen el cuerpo ultrabásico Los Guanacos, fragmento ofiolítico atribuible a la zona de transición manto-corteza (Mutti 1995 y 1997), en cuya zona basal tiene lugar una suela metamórfica anfibolítica (Mutti y Gonzalez Chiozza 2000). Por su parte, los gneises, esquistos, mármoles, metacuarcitas y ortoanfibolitas corresponden a una secuencia sedimentaria marina con inter-

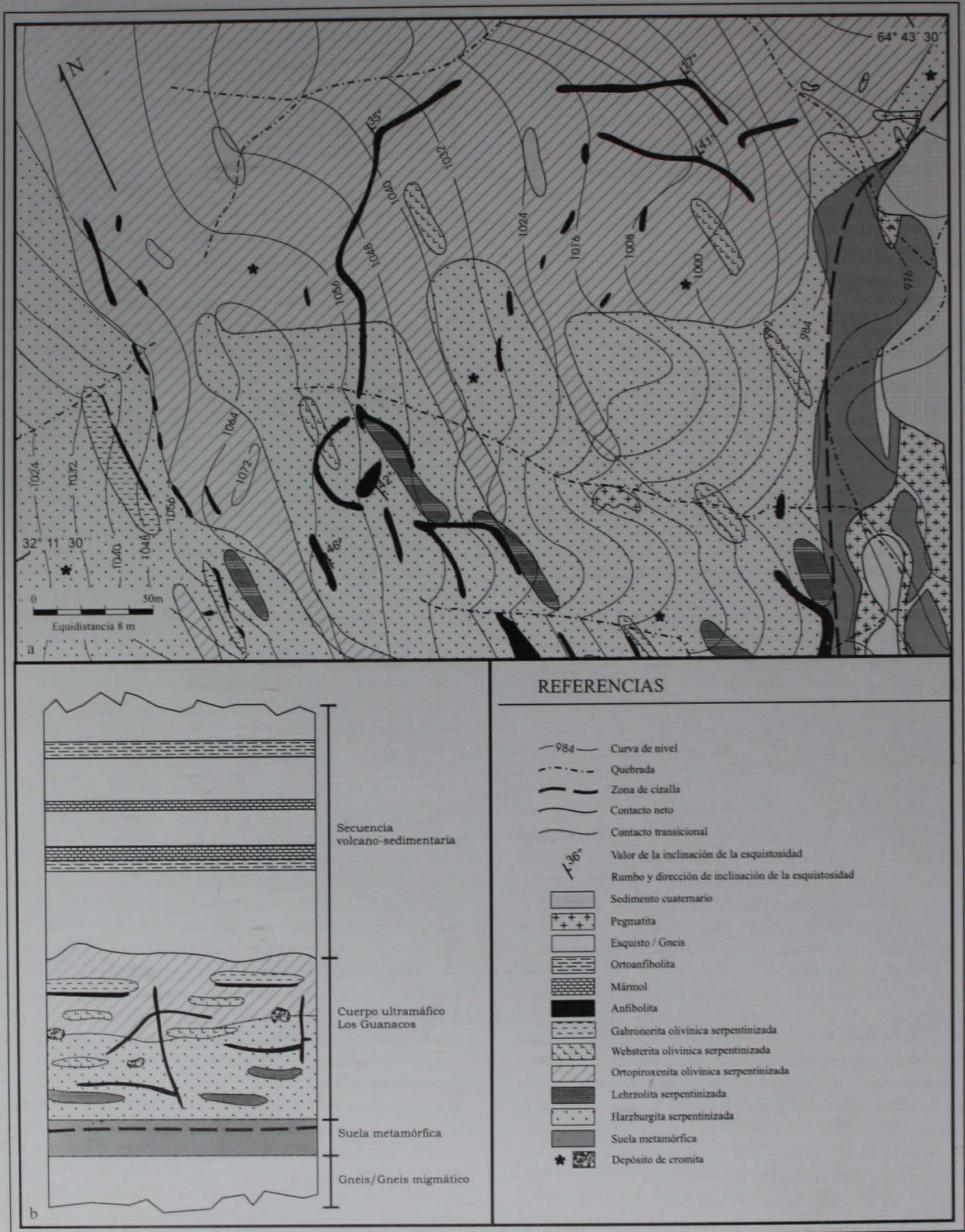


Figura 2: a, Mapa geológico topográfico del sector centro-oeste del cerro Los Guanacos y b, perfil geológico esquemático de la secuencia litológica del área del cerro Los Guanacos.

calaciones basálticas denominada Formación Río de los Sauces por Fernández Gianotti (1977) (Figs. 1b y 2b). Es de señalar que la geoquímica de elementos traza correspondiente a las metaultrabasitas y metabasitas del cuerpo ultrabásico y a la ortoanfibolita de la Formación Río de los Sauces indica que las mismas se encuentran emparentadas.

El conjunto litológico del área fue afectado por un episodio deformacional predominantemente dúctil que ocasionó la formación de un pliegue anticlinal sinformal con su eje orientado al NO y buzante al SE. Asimismo, se destacan numerosas fracturas cuyo origen se remite tanto a fenómenos coetáneos con el plegamiento principal, como a episodios posteriores de deformación en estado rígido.

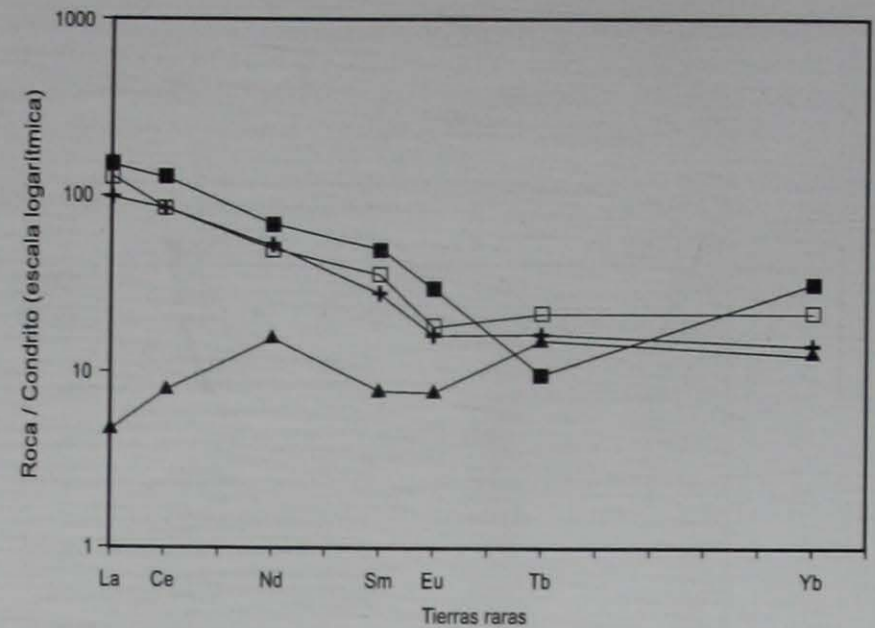
### Formación Río de los Sauces

La Formación Río de los Sauces definida por Fernández Gianotti (1977) e incluida en la Formación Cerro Pelado – San Carlos (Caminos *et al.* 1995) posee un rumbo regional N a NNO y manifiesta una inclinación media de 45° al este, aunque muestra variaciones supeditadas a la presencia de estructuras de plegamiento de carácter local. Se trata de una secuencia litológica, integrada por gneises, esquistos, ortoanfibolitas, calizas y metacuarcitas, que se habría gestado en un ambiente marino a partir de sedimentos pelíticos y carbonáticos con intercalaciones de volcanitas básicas y mantos silíceos. Este conjunto fue metamorfozido hasta alcanzar el grado medio del metamorfismo regional, proceso atribuido por Fernández Gianotti (1977) al Eopaleozoico ( $519 \pm 15$  Ma).

**Gneises:** Conforman una de las variedades litológicas dominantes en torno a las ultramafitas y mafitas del cerro Los Guanacos y afloran en el sector central correspondiente al núcleo de la estructura de plegamiento que domina el área (Figs. 1 y 2a). El contacto con el cuerpo ultrabásico es transicional y se resuelve a través de una suela metamórfica de composición anfibolítica y carácter metasomático.

Se trata de gneises biotítico-granatíferos de color gris oscuro con textura porfiroblástica determinada por cristales euhedrales de granate de hasta 5 mm de sección que componen entre el 5 y el 25 % de la roca y se distribuyen regularmente. Estas rocas presentan marcada esquistosidad y se caracterizan por la alternancia de bandas claras y oscuras de espesores comprendidos entre el milímetro y el centímetro.

Las bandas leucocráticas tienen textura granoblástica mediana y están integradas predominantemente por individuos anhedrales de cuarzo con extinción ondulosa, feldespato potásico, oligoclasa-andesina y sericita. Las bandas melanocráticas están caracteri-



**Figura 3:** Diagrama de contenidos de elementos del grupo de las tierras raras normalizados a valores de condrito (Thompson, 1984) para las rocas de la Formación Río de los Sauces: esquisto (•), gneis (n) y ortoanfibolita (s). Se presenta además la curva correspondiente a los sedimentos NASC (+) caracterizados por Haskin *et al.* (1968).

zadas por una textura lepidoblástica mediana y se componen mayormente de biotita, junto a circón, apatita y magnetita subordinada.

Del quimismo de los gneises (cuadro 1, muestra 1) se destaca en particular que los elementos del grupo de las tierras raras (Fig. 3) reflejan una composición química afín a los sedimentos NASC (lutitas de plataforma) estudiados por Haskin *et al.* (1968).

Cabe observar que en algunos sectores, estas rocas, son portadoras de corindón y poseen rasgos migmáticos con desarrollo de estructuras etromatíticas y ptigmáticas, de acuerdo con la clasificación de Menhert (1968).

**Esquistos:** Constituyen el tipo litológico más ampliamente difundido en el área y se localizan preferentemente hacia el nordeste y noroeste del cuerpo ultramáfico-máfico Los Guanacos (Fig. 1). Se trata de esquistos biotíticos de color gris pardusco que desarrollan contactos netos con las ortoanfibolitas, mármoles y metaultrabasitas, poseen una esquistosidad bien definida e insinúan un débil bandeamiento en algunos sectores. Se encuentran constituidos mayormente por biotita, cuarzo, oligoclasa-andesina y almandino, junto a porcentajes menores de circón, apatita, y minerales opacos. La disposición del agregado mineral determina una textura lepidoblástica a granoblástica fina con un tamaño de grano dominante que oscila entre 0,2 y 0,5 mm, a excepción de los cristales de almandino cuyo tamaño es de alrededor de 1 milímetro.

De manera similar a lo que ocurre con los gneises, el quimismo de los esquistos (cuadro 1, muestra M45) manifiesta contenidos en elementos del grupo de las tierras raras que los correlacionan con sedimentos pelíticos marinos (Fig. 3).

**Cuadro 1:** Composiciones químicas y normativas correspondientes a muestras representativas de los litotipos reconocidos en el área del cerro Los Guanacos: Gneis (Gn), Esquisto (Esq), Basalto anfibolitizado (B Anf), Gabronorita olivínica anfibolitizada (Gbn Anf), Harzburgita serpentinizada (Hz), Lehzolita serpentinizada (Lhz), Ortopiroxenita olivínica serpentinizada (Opx), Websterita olivínica serpentinizada (Wb), Gabronorita olivínica serpentinizada (Gbn) y Anfibolita de la suela (S Anf). Muestras M45 y M300: datos no publicados de Diana Mutti.

	Litología	Gn	Esq	B Anf	Gbn Anf	Hz	Lhz	Opx	Wb	Gbn	S Anf
	Muestra	1	M45	M300	81	24	21	58	53	401	74
Elementos mayoritarios (%)	SiO <sub>2</sub>	56,3	-	-	37,56	35,2	38,51	40,52	38,89	-	-
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,57	12,96	14,94	16,64	1,12	0,47	0,49	1,13	9,99	15,64
	FeOt	-	5,79	9,52	-	-	-	-	-	14,4	6,75
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,62	-	-	3,98	15,21	8,12	10,63	7,53	-	-
	FeO	6,3	-	-	0,51	1,11	0,08	0,07	0,16	-	-
	MgO	4,92	2,72	8,16	10,56	33,33	30,44	33,76	31,73	26,43	14,19
	CaO	2,78	1,85	15,61	19,04	0,15	5,4	0,06	1,92	1,68	14,17
	Na <sub>2</sub> O	2,4	2,18	1,36	0,45	0,07	0,11	0,07	0,03	0,12	1,47
	K <sub>2</sub> O	2,88	2,76	0,45	0,1	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,41
	TiO <sub>2</sub>	1,1	0,82	0,68	0,07	0,02	0,02	0,02	0,02	1,13	0,1
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,14	0,12	0,06	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	MnO	0,24	0,07	0,21	0,11	0,12	0,12	0,1	0,12	0,16	0,12
	H <sub>2</sub> O	0,22	-	-	0,11	1,07	0,57	2,17	2,42	-	-
	LOI	0,49	-	-	3,37	12,87	12,83	12,82	12,2	-	-
	TOTAL	98,94	-	-	92,51	100,3	96,7	100,74	96,18	-	-
Elementos traza (ppm)	Zn	152	69	73	12	67	35	47	45	48	41
	Ni	62	25	169	120	2856	2011	2844	1995	202	376
	V	197	80	309	107	87	24	57	44	215	124
	Co	28	16	46	33	160	110	120	110	86	59
	Cr	140	90	420	490	7700	5600	5500	4100	150	310
	Sr	149	178	42	217	2	8	2	6	6	236
	La	49	42	1,6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,7
	Ce	110	73	7	3	3	3	3	3	4	3
	Nd	43	31	10	5	5	5	5	5	5	5
	Sm	10	7,2	1,6	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,4
	Eu	2,3	1,4	0,6	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
	Tb	0,5	1,1	0,8	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
	Yb	6,9	4,7	2,8	0,6	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,8
	Minerales normativos (%)	cuarzo	15,4	-	-	-	-	-	-	-	-
ortosa		17,33	-	-	-	0,08	0,09	0,08	0,09	-	-
albita		20,66	-	-	-	0,66	1,1	0,66	0,28	-	-
anortita		13,13	-	-	48,28	0,75	0,92	0,2	3,6	-	-
leucita		-	-	-	0,5	-	-	-	-	-	-
nefelina		-	-	-	2,28	-	-	-	-	-	-
corindón		5,88	-	-	-	0,87	-	0,36	-	-	-
diópsido		-	-	-	19,03	-	24,23	-	6,18	-	-
enstatita		19,81	-	-	-	37,32	25,75	57,86	47,81	-	-
forsterita		-	-	-	14,45	41,21	37,89	28,17	32,41	-	-
monticelita		-	-	-	10,19	-	-	-	-	-	-
magnetita		5,34	-	-	2,04	4,55	0,76	0,6	1,06	-	-
hematita		-	-	-	3,05	14,48	9,22	11,99	8,5	-	-
ilmenita		2,13	-	-	0,14	0,04	-	0,04	0,04	-	-
apatita		0,34	-	-	0,04	0,05	0,05	0,04	0,05	-	-

*Ortoanfibilitas:* Las ortoanfibilitas de la Formación Río de los Sauces afloran principalmente en el flanco oriental de la estructura de plegamiento, en extensos cuerpos tabulares de 20 a 60 m de potencia; en tanto que en la porción central del sur del área estudiada, se hallan intercaladas en concordancia con el gneis migmatítico y alcanzan 150 m de espesor aparente (Fig. 1). Son rocas de color gris verdoso oscuro, tenaces y esquistas, que en ocasiones insinúan un bandeamiento tenue. Su textura es granoblástica a nematoblástica mediana a fina y se encuen-

tra definida por individuos con un tamaño variable entre 0,2 y 2 milímetros. Están constituidas principalmente por hornblenda con pleocroísmo de verde a pardo amarillento y labradorita-bytownita. En proporciones menores contienen cuarzo y clinopiroxeno (diópsido o augita diopsídica), junto a circón, minerales del grupo del epidoto, apatita, carbonato y minerales opacos subordinados.

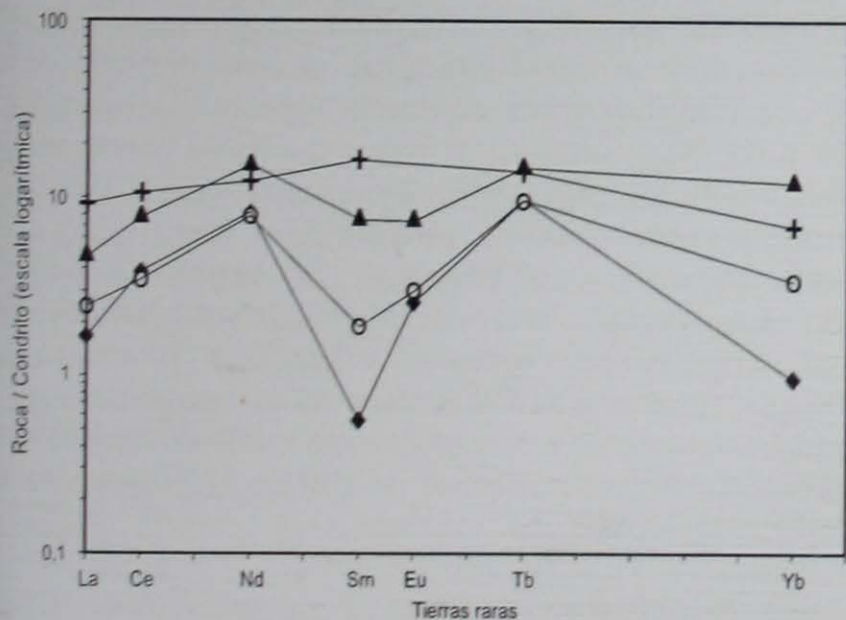
La geoquímica de las ortoanfibilitas de la Formación Río de los Sauces (Cuadro 1, muestra M300) posee contenidos en elementos del grupo de las tie-



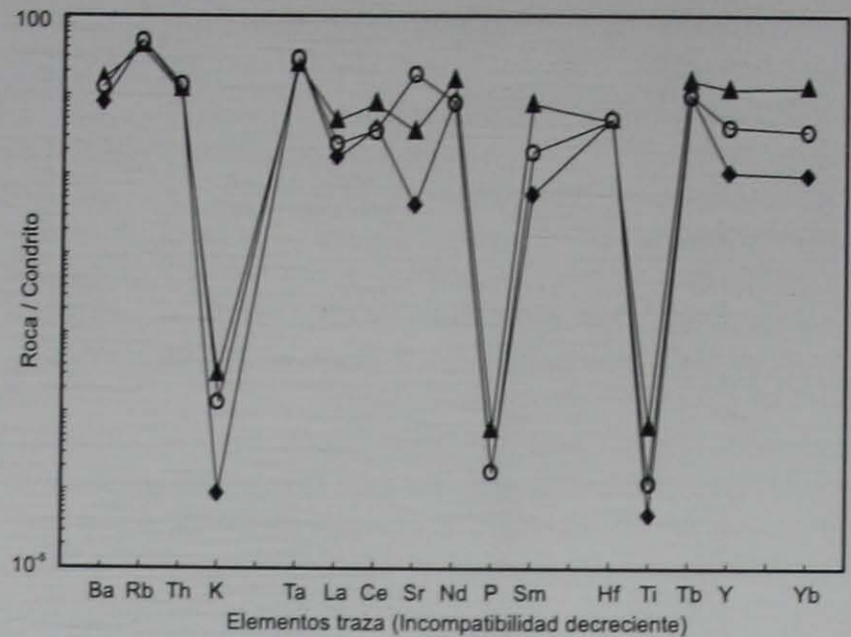
rras raras (Fig. 4) que avalan su afinidad con basaltos toleíticos de dorsal centro oceánica (MORB: Middle Ocean Ridge Basalt). Asimismo, es de destacar que estas rocas se asocian, además, con las ultramafitas y restantes mafitas del cerro Los Guanacos, presentando los tres litotipos una similitud notable en el diseño de las curvas de contenido de elementos del grupo de las tierras raras y elementos traza (Figs. 4 y 5). En esta asociación, las ortoanfibolitas manifiestan los valores más elevados.

**Mármoles:** Estas rocas se ubican en bancos de 0,5 a 15 m de potencia, en contacto neto o transicional con esquistos y anfibolitas, y su participación domina en el flanco oriental de la secuencia metamórfica plegada (Fig. 3). Aparecen en afloramientos de color gris oscuro que en fractura fresca muestran color blanco, blanco verdoso, gris o rosado. Poseen textura granoblástica mediana a gruesa y están compuestas, fundamentalmente, por calcita y, en menor proporción, dolomita. Fernández Gianotti (1977) menciona para estas rocas contenidos de hasta un 50% de forsterita alterada a serpentina, y además señala la participación de tremolita, granate, hornblenda magnesiada, cuarzo, plagioclasa, biotita, flogopita, moscovita, titanita y diópsido en proporciones variables.

**Metacuarcitas:** Al norte y al este del cerro Los Guanacos, en concordancia con la secuencia metamórfica plegada, afloran algunos bancos tabulares de escasos metros de potencia y hasta de 250 m de corrida que están constituidos por un agregado cuarzoso a cuarzofeldespático de textura granosa fina a aplítica. Estas rocas, cuya existencia fue señalada



**Figura 4:** Diagrama de contenidos de elementos del grupo de las tierras raras normalizados a valores de condrito (Thompson 1984) para la ortoanfibolita (s), serpentinita promedio (u) y anfibolita del cuerpo ultrabásico Los Guanacos (O). Se representa además la composición del N-MORB promedio (+) según valores de Saunders y Tarney (1984).



**Figura 5:** Diagrama multielemental de elementos traza normalizados a valores de condrito (Thompson 1984) para la ortoanfibolita (s), serpentinita promedio (u) y anfibolita del cuerpo ultrabásico Los Guanacos (O).

por Pagés y Re (1953), son de color gris azulado a rojo claro y se caracterizan por su extrema dureza. Las relaciones de campo y texturales sugieren para las metacuarcitas un origen a partir de mantos silíceos pertenecientes a la secuencia volcano-sedimentaria.

#### *Asociación ultramáfica-máfica del cerro Los Guanacos*

El cerro Los Guanacos está constituido por una asociación de rocas ultramáficas y máficas que ocupa el núcleo de la estructura de plegamiento que domina el área y define un cuerpo en forma de «V». Este cuerpo, que representa la principal elevación de la comarca, cubre una superficie aproximada de 1,5 km<sup>2</sup> y posee un espesor máximo aparente de 600 metros (Fig. 1b). Los afloramientos de rocas ultramáficas de la región se extienden hacia el sudeste conformando numerosos cuerpos menores como los de Ume Pay, El Rodeo y Árbol Seco, que están separados entre sí por pequeñas fajas de cizalla de rumbo N 45° E e integran, en conjunto, una faja discontinua de rumbo NNO. El cuerpo ultramáfico Los Guanacos se integra en un 20 % por anfibolitas y en un 80 % por serpentinitas que representan el producto de un intenso metamorfismo hidratante a partir de un protolito ígneo ultrabásico a básico. El contacto entre el cuerpo ultramáfico y el esquistos que lo rodea en la zona externa del pliegue, es neto; no sucede lo mismo hacia el sector central de la comarca, donde el contacto con el gneis muestra rasgos claramente transicionales marcados por la presencia de una suela metamórfica. Esta última se encuentra constituida por una anfibolita

lita metasomática y se vincula a una faja de cizalla que coincide con la zona de contacto (Mutti y González Chiozza 2000).

Las anfibolitas se disponen en diques discordantes y subconcordantes que, en promedio, poseen un rumbo N y una inclinación de 38° hacia el este (fig. 2a y b). Estos cuerpos presentan espesores comprendidos entre 0,5 y 10 metros y se acuñan e interdigitan con las ultrabasitas serpentinizadas, con relaciones de contacto tanto netas como transicionales. Las anfibolitas son rocas de color verde oscuro, compactas y muy tenaces, por lo que desarrollan formas positivas en el terreno; muestran esquistosidad moderada en la dirección N y en algunos casos poseen un bandeamiento pobremente desarrollado. Su textura es granoblástica a nematoblástica con tamaño de grano variable entre fino y grueso. Están constituidas por andesina-labradorita (hasta 40 %), hornblenda con pleocroísmo de verde claro a pardo (35 %), espinelo verde en individuos euhedrales (10 %) y proporciones menores de carbonatos, tremolita-actinolita, epidoto, brucita y hematita. La fracción relíctica es escasa y está compuesta por augita (5%), junto a la participación subordinada de olivina, rutilo, magnetita e ilmenita. Las paragénesis halladas, típicas de rocas básicas, permiten asignar a estas rocas un grado de metamorfismo medio correspondiente a la facies de anfibolita (Miyashiro 1994), mientras que su mineralogía normativa corrobora las observaciones petrográficas indicando una composición gabronorítica (cuadro 1, muestra 81).

Las serpentinitas se originaron a partir de ultramafitas de composición peridotítica que sufrieron procesos de serpentización que obliteraron entre el 80 y el 100 % de los caracteres primarios. Los afloramientos tienen aspecto terroso y son de color gris verdoso, gris amarillento ó gris rojizo. En fractura fresca las serpentinitas son rocas densas y compactas, de color gris verdoso oscuro a castaño rojizo con variedades más claras, dependiendo del grado de alteración meteórica. Su textura es granoblástica fina a afanítica y por lo general se destacan agregados de bastita de color verde claro a rosado, con forma irregular y tamaño variable entre 1 y 30 milímetros. Estas rocas son portadoras de cromoespinelos, que se manifiestan en individuos subhedrales de 1 a 4 mm, ya sea como disseminaciones que alcanzan hasta el 20 % del volumen de roca total, o en depósitos podiformes con un contenido variable del mineral de mena entre el 40 y el 100 %. El proceso de serpentización ha dado lugar a la formación de minerales del grupo de la serpentina; fue determinado, mediante difracción de rayos X, el predominio de antigorita 6M junto a lizardita, antigorita alumínica 6O y crisotilo subordinado (González Chiozza, 1998). Están también presentes talco, brucita, tremolita-actinolita, antofilita, carbonatos y magnetita. Las

texturas generadas por el proceso de serpentización, de acuerdo con la clasificación de Wicks y Whittaker (1977) son: en malla, en bastita, interpenetrativa, entrecerrada y en venillas; correspondiendo las dos primeras a variedades pseudomorfas, mientras que las restantes no involucran pseudomorfismo. El análisis textural complementado con la información geoquímica, permitió determinar que la mineralogía original de las serpentinitas del sector centro-oeste estuvo constituida por olivina, ortopiroxeno, clinopiroxeno, plagioclasa y minerales del grupo de los espinelos; se identificaron, en particular, relictos de forsterita, enstatita y clinopiroxeno. En base a las proporciones mineralógicas modales y normativas, las relaciones texturales y las observaciones de campo, se establece una subdivisión en 5 litotipos cuyos protolitos, de acuerdo con la clasificación de la IUGS (Teruggi 1980), son los siguientes: harzburgita, lehrzolita, ortopiroxenita olivínica, websterita olivínica y gabronorita olivínica. Las variedades litológicas detalladas se interstratifican definiendo un pseudo-bandeamiento y en ocasiones desarrollan impregnaciones siguiendo una manifiesta relación de concordancia con las estructuras penetrativas locales (fig. 2a y b). A continuación se describen los principales litotipos identificados a partir de las serpentinitas del sector centro-oeste del cerro Los Guanacos; las composiciones correspondientes a muestras representativas de cada variedad, se exponen en el cuadro 1 (muestras 24, 21, 58, 53 y 401).

*Harzburgita serpentizada:* Es una roca de color pardo amarillento a verde oscuro o negro, dependiendo del grado de alteración meteórica. Constituye el litotipo más abundante y corresponde a la variedad S2 definida por Mutti y Di Marco (1993). Dentro del área de estudio aflora mayormente en el centro-sur y se interdigita hacia el oeste y el noreste con ortopiroxenitas olivínicas serpentinizadas (Fig. 2a y b). Su composición original estuvo representada por olivina (40-80 %), ortopiroxenos (10-50 %), clinopiroxenos (< 5 %), plagioclasa anortítica (< 6 %) y minerales del grupo de los espinelos (< 60 %). La fracción serpentizada está compuesta mayormente por antigorita junto a lizardita y crisotilo subordinados y se presenta con un marcado predominio de texturas en malla y en bastita con escaso desarrollo de texturas entrecerrada e interpenetrativa.

*Ortopiroxenita olivínica serpentizada:* Este litotipo se encuentra altamente difundido en la zona, posee un color gris amarillento a verdoso y es equivalente a la variedad S1 definida por Mutti y Di Marco (1993). Es dominante en el norte, aunque también aparece en afloramientos elongados con orientación meridiana que se interdigitan con la varie-

dad harzburgítica y predominan en el sector sudoeste de la zona de estudio (Fig. 2a y b). Su mineralogía original estuvo representada por ortopiroxenos (40-80 %), olivina (15-35 %), clinopiroxenos (< 5 %), plagioclasa anortítica (< 5 %) y minerales del grupo de los espinelos (< 30 %). Los principales productos del proceso de serpentización son antigorita y lizardita, que se presentan predominantemente con textura en bastita y en menor proporción en malla, mientras que las texturas entrecerrada e interpenetrativa se encuentran pobremente desarrolladas.

*Websterita olivínica serpentizada:* Se caracteriza por su color gris verdoso a castaño rojizo. Aflora en lentes aislados de hasta 60 m de longitud y unos pocos metros de espesor, que se orientan en dirección norte y se encuentran mayormente en el este y el norte del área de estudio (Fig. 2a y b). Están asociadas tanto a las harzburgitas como a las ortopiroxenas olivínicas serpentizadas y su abundancia es escasa. Sus componentes originales fueron orto y clinopiroxenos (45-65 %), olivina (25-40 %), plagioclasa (< 3 %) y minerales del grupo de los espinelos (< 5 %). En la fracción serpentizada predomina marcadamente la antigorita y se observan texturas en bastita y en malla.

*Lehrzolita serpentizada:* Es una roca de color verde a gris oscuro y poco abundante que aflora en el sector sur de la zona de estudio. Se presenta en cuerpos alargados de orientación meridiana con espesores cercanos a los 10 m y longitudes que alcanzan los 50 m, siempre intercalados en harzburgitas con contactos transicionales (Fig. 2a y b). Su mineralogía original estuvo constituida por olivina (30-60 %), orto y clinopiroxenos (25-50 %), plagioclasa (< 3 %) y minerales del grupo de los espinelos (< 5 %). Al microscopio, se observa el predominio de antigorita sobre lizardita.

*Gabronorita olivínica serpentizada:* Esta variedad se localiza en escasos afloramientos compactos de color rojizo, que sobresalen levemente en el terreno debido a su mayor resistencia frente a la meteorización. Se los ubica en el extremo oeste de la zona estudiada, en contacto o muy próximos a cuerpos de anfibolita (Fig. 2a y b). La roca posee un color gris oscuro en fractura fresca y su composición original está representada por olivina (10-50 %), ortopiroxenos (25-75 %), plagioclasas (10-20 %) y minerales del grupo de los espinelos (< 10 %). Las gabronoritas olivínicas constituyen uno de los términos más evolucionados dentro de la serie de rocas ultrabásicas estudiadas y manifiestan una alta participación de anfíboles en la asociación metamórfica dominada por minerales del grupo de la serpentina.

### Suela metamórfica del cerro Los Guanacos

En el contacto entre el cuerpo ultrabásico del cerro Los Guanacos y el gneis aflora, en la zona central de la región, un potente cuerpo concordante de anfibolita, con un espesor variable entre 5 y 40 metros (Figs. 1b y 2a y b). El mismo desarrolla un pasaje transicional tanto hacia las rocas ultrabásicas como hacia los gneises y se ubica en una zona de cizalla cuyo espesor lo excede en algunos metros.

La roca es de color verde, compacta y moderadamente esquistosa en las cercanías de las ultrabásitas; mientras que hacia el gneis muestra un color gris verdoso, acompañado por un desarrollo progresivo de la esquistosidad y por un aumento en el contenido de plagioclasa. Presenta textura granoblástica a nematoblástica gruesa a fina y posee una composición mineralógica constituida principalmente por hornblenda, andesina, cianita, feldespato potásico, cuarzo y piroxenos, acompañados por proporciones menores de granate, apatita, circón, espinelo aluminífero y óxidos de Fe y Ti. Asimismo, se señala que en numerosos sectores se reconoció la sobreimposición de paragénesis retrógradas en las que intervienen zoicita, epidoto, tremolita-actinolita, talco, brucita, clorita, albita, sericita, carbonatos y arcillas. Mutti y González Chiozza (2000) ofrecen una descripción petrográfica detallada y consignan una variación en el grado metamórfico desde facies de anfibolita, junto al gneis, hasta facies de granulita, hacia el cuerpo ultrabásico.

El quimismo de estas rocas (Cuadro 1, muestra 74) muestra valores que se encuentran comprendidos entre los correspondientes a las poblaciones ultrabásica-básica y gnéisica; esta característica se observa en componentes como MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, Cr, Ni, Co, V, La, Sm e Yb.

De lo expuesto, pueden destacarse los siguientes puntos que permiten sustentar que la anfibolita del contacto entre el cuerpo ultrabásico Los Guanacos y el gneis constituye una suela metamórfica: 1) el desarrollo del cuerpo anfibolítico a lo largo de una zona de cizalla; 2) una composición geoquímica comprendida entre las composiciones del gneis y las rocas ultrabásicas, que sugiere la intervención de procesos metasomáticos; 3) el desarrollo de una transición entre las características petrográficas del gneis y las de las rocas ultrabásicas; 4) la existencia de un gradiente metamórfico creciente hacia las rocas ofiolíticas; y 5) la presencia de hornblenda, andesina, epidoto, cianita, tremolita-actinolita y sericita, frecuentemente asociada con el metamorfismo que acompaña al emplazamiento de rocas ofiolíticas (Coleman 1977; Yardley 1989). A este respecto, estudios realizados por Williams y Smith (1973), Karamata (1980) y Dilek y Whitney (1997), entre otros, sustentan que el desarrollo de suelas metamórficas anfibolíticas, en

la base de secuencias ofiolíticas, presenta características similares a las descritas y se vincula a procesos de metamorfismo dinamotérmico con intercambio químico, asociados al emplazamiento y/o la obducción de la corteza oceánica en corteza continental.

#### *Estructura anticlinal sinformal del cerro Los Guanacos*

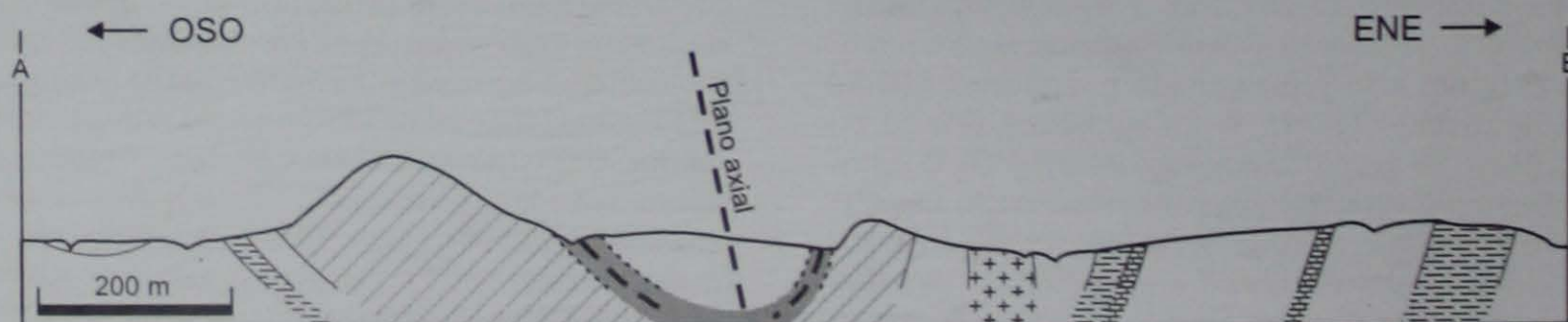
El área del cerro Los Guanacos está dominada por un pliegue mayor levemente asimétrico de tipo similar, según la clasificación de Ramsay (1967), en cuyo núcleo se encuentra el cuerpo ultrabásico Los Guanacos (Fig. 1b). Esta estructura constituye el principal control en la distribución y orientación de las variedades litológicas halladas en el área. De acuerdo con estudios estratigráficos y estructurales previos (Fernández Gianotti 1977; Mutti y Di Marco 1993), la estructura es un sinclinal buzante con una longitud de onda aproximada de 2 kilómetros. A partir de mediciones sistemáticas, estos autores definen para el pliegue, un plano axial subvertical de rumbo N 30° a 40° O e inclinación de 78° a 80° NE y un eje que buza unos 20° en dirección S 38° E. Las observaciones de campo y petrológicas, realizadas en este trabajo, aportan evidencias que establecen como base para la secuencia estratigráfica local a las rocas aflorantes en la zona central del área estudiada coincidente con el núcleo del pliegue (Figs. 1b, 2 y 6). La primera evidencia consiste en que esta zona basal está caracterizada por la presencia de la suela metamórfica que indefectiblemente se ubica en la base del cuerpo ultrabásico, y por la participación del gneis migmatítico con signos de fusión, que reflejan condiciones de mayor temperatura que las que controlaron el metamorfismo de las rocas suprayacentes (Mutti y González Chiozza 2000). También sustenta esta hipótesis, el hecho de que las rocas del cuerpo ultrabásico son sucedidas, en relación de concordancia, por la Formación Río de los Sauces, que aloja los niveles básicos más diferenciados de la asociación magmática involucrada en la secuencia. Esta relación estratigráfica, establecida para la secuencia

ígneo-sedimentaria metamorfizada del cerro Los Guanacos (Fig. 2b), es inversa a la considerada en estudios anteriores y deriva forzosamente en la reclasificación de la estructura plegada que domina el área, como un anticlinal sinformal asimétrico (Fig. 6), siguiendo la nomenclatura empleada por Twiss y Moores (1992). Asimismo, cabe señalar que asociados a la estructura anticlinal sinformal se han formado numerosos pliegues intrafoliares, con longitud de onda variable entre escasos centímetros y decenas de metros, que evidencian la intensidad y complejidad alcanzadas en la zona por la deformación, observándose, además, la notable participación de estructuras de *boudinage* controladas por diferencias de competencia relativas entre las litologías involucradas. Tanto la orientación del anticlinal sinformal como las características reológicas de la deformación, permiten correlacionarlo con la fase de deformación D2; no obstante esta relación debería ser sustentada con información geocronológica no disponible aún.

La deformación frágil se manifiesta en la comarca en distintas escalas a través de fallas, zonas de cizalla y diaclasas, que en conjunto ejercen un marcado control en el diseño de la red de drenaje. Fernández Gianotti (1977) atribuyó los sistemas de fracturas con rumbos principales N-S, E-O y asociados N40°E y N40°O a la tectónica andica, mientras que Mutti y Di Marco (1993) señalan que las direcciones N60°E, N30 a 60°O y N20°E responden a la tectónica compresiva D2. Para un conocimiento más acabado de la deformación frágil, aconsejamos remitirse a los trabajos citados, no obstante se considera que un estudio estructural detallado del área es necesario para clarificar tanto las relaciones mencionadas, como las inherentes a la presencia de la suela metamórfica.

#### **Implicancias geoquímicas de la asociación ultrabásica-máficas**

Existe una notable afinidad entre las rocas ultrabásicas del cerro Los Guanacos, las basitas del mismo cerro y las ortoanfibolitas de la Formación Río de



**Figura 6:** Perfil geológico transversal a la estructura anticlinal sinformal del cerro Los Guanacos. Referencias y localización (sección A-B) en la figura 1b.

los Sauces. Esta afinidad se observa particularmente en la similitud que presentan entre sí las curvas de elementos traza y tierras raras correspondientes a cada tipo petrológico y permite establecer, entre ellos, una relación comagmática en la que la ortoanfibolita de la Formación Río de los Sauces es el término más diferenciado (Figs. 4 y 5). En los diagramas de elementos traza y del grupo de las tierras raras se destaca, para los tres litotipos, el desarrollo de curvas con una pendiente neutra a negativa caracterizadas, además, por pronunciadas anomalías negativas en K, P y Ti que son atribuidas a removilizaciones tardías (Figs. 4 y 5). La tendencia negativa de la pendiente y el contenido relativamente bajo en elementos traza sugieren que se trata de rocas de manto poco evolucionadas, pero enriquecidas en elementos livianos del grupo de las tierras raras (LREE: Light Rare Earth Elements) y elementos de bajo potencial iónico (LFSE: Low Field Strength Elements). Probablemente, este enriquecimiento esté vinculado con procesos de fusión parcial del manto y/o heterogeneidades de la fuente, cuyo residuo sólido ha retenido al grupo de elementos menos incompatibles compuesto por los elementos pesados del grupo de las tierras raras (HREE: Heavy Rare Earth Elements) y los elementos de elevado potencial iónico (HFSE: High Field Strength Elements), de acuerdo con las propuestas de Henderson (1984) y Wilson (1989), entre otros.

Es importante destacar una anomalía negativa en Sm, que junto con los bajos tenores en Eu e Yb observados, sugiere para la asociación ultrabásica-básica del cerro Los Guanacos - Formación Río de los Sauces, una evolución a partir de una fuente con participación de anfíboles y/o granates (Fig 4).

La condición de rocas poco evolucionadas derivadas del manto es coherente con los elevados contenidos de Cr, Ni y Co de las peridotitas (Cuadro 1); no obstante, en comparación con las rocas ultrabásicas basales de secuencias ofiolíticas generadas en zonas de dorsal centro oceánica sensu stricto, las rocas de Los Guanacos evidencian un contenido total elevado en los elementos del grupo de las tierras raras, que permite suscribirlas a una fracción más evolucionada.

### Discusión - Propuesta evolutiva para el área del cerro Los Guanacos

Es aceptado que las ofiolitas son representantes de antiguas porciones de litósfera oceánica formada primariamente en dos tipos de ambiente geotectónico: centros mayores de expansión oceánica y cuencas de retroarco en todos sus estados de evolución (Miyashiro 1975; Beccaluva *et al.* 1983; Pearce *et*

*al.* 1984). Los rasgos litológicos, geoquímicos y estructurales expuestos en este trabajo permiten correlacionar a las ultrabásitas del cerro Los Guanacos con peridotitas metamórficas representativas de la zona de transición manto-corteza de complejos ofiolíticos y, asimismo, vincularlas con procesos de fusión parcial y fraccionamiento de anfíboles o granates a partir de una fuente mantélica impura. La presencia de cromoespinelos refuerza la mencionada correlación, a partir de la cual se establece una relación con las rocas de la antigua secuencia ofiolítica desmembrada de Córdoba de edad precámbrica (Escayola 1994; Escayola *et al.* 1996; Mutti 1995 y 1997). Por otra parte se destaca que los litotipos básicos a ultrabásicos de la serie estudiada insinúan una asignatura de tipo MORB con sobreimposición de caracteres de arco inmaduro. Este conjunto de apreciaciones sirven de sustento para proponer que el origen de estas rocas tuvo lugar en un ambiente de dorsal generadora de corteza oceánica. Con posterioridad, durante el ciclo Pampeano, se produjo la obducción o emplazamiento del bloque conformado por el fragmento ofiolítico junto a la secuencia de sedimentos marinos y volcanitas básicas suprayacentes (Formación Río de los Sauces), en corteza continental en un ámbito circunscripto a una zona de subducción. Se considera que durante el proceso de emplazamiento dinamometamórfico se podría haber formado la suela metamórfica ubicada en la base de la secuencia ígneo-sedimentaria; sin embargo, no puede descartarse la alternativa de un origen de la suela previo al emplazamiento en corteza continental, de manera similar a lo propuesto por Spray y Roddick (1980). La clarificación de este punto queda sujeta a nuevos estudios geocronológicos y estructurales que alumbren las relaciones existentes entre la anfibolita de la suela y las unidades que ésta separa. Durante el emplazamiento del bloque, o inmediatamente luego, habría tenido lugar el evento de deformación, correlacionable con la fase D2 (530-520 Ma, Rapela *et al.* 1998), que promovió el metamorfismo más difundido en área (facies de anfibolita). Este evento afectó integralmente al bloque del cerro Los Guanacos y produjo estructuras de deformación predominantemente dúctil, tanto megascópicas como microscópicas.

Con posterioridad, el área del cerro Los Guanacos fue modificada por procesos de metamorfismo hidrotermal, con un grado equivalente al límite entre las facies de esquistos verdes y anfibolita, los cuales generaron, en las serpentinitas, texturas interpenetrativas, venillas con participación de lizardita, antigorita, crisotilo y carbonatos y en los cromoespinelos una zonación química caracterizada por la presencia de una corona de ferricromita (González Chiozza 1998).

Finalmente la comarca fue afectada por la deformación frágil correspondiente al ciclo Ándico, cu-

yos esfuerzos compresivos de dirección E-O reactivaron viejas estructuras, originarias del Proterozoico superior-Eopaleozoico, y generaron nuevas fracturas de gran magnitud, propias de este ciclo, dando lugar a actual configuración estructural del terreno.

## Conclusiones

Las metamorfitas de grado medio (serpentinitas, anfibolitas, gneises, esquistos, mármoles y metacuarcitas), aflorantes en la comarca del cerro Los Guanacos, definen una secuencia a partir de protolitos ígneos y sedimentarios y constituyen, en conjunto, un bloque único. La base de la secuencia metamórfica corresponde al cuerpo ultramáfico Los Guanacos, originalmente compuesto por harzburgitas y ortopiroxenitas olivínicas con participación subordinada de lehrzolitas, websteritas olivínicas y gabronoritas olivínicas. El cuerpo alberga abundantes diques gabronoríticos olivínicos (anfibolitas) y contiene mineralización cromoespinelífera, tanto diseminada como en depósitos podiformes. En contacto neto sobre las ultrabasitas, se apoyan los esquistos, mármoles, ortoanfibolitas y metacuarcitas, generados a partir de una sucesión sedimentaria-volcánica de ambiente marino dominada por sedimentos pelíticos, con intercalaciones de calizas, basaltos y mantos silíceos.

Existe una relación comagmática entre los tres litotipos ígneos de la secuencia que manifiesta, además, una diferenciación progresiva desde los términos ultrabásicos hasta los basaltos de la secuencia marina.

El bloque del cerro Los Guanacos presenta un contacto basal tectónico, resuelto a través de una suela metamórfica anfibolítica con caracteres litogeoquímicos transicionales entre los de las ultrabasitas y el gneis migmático infrayacente.

El conjunto de rocas aflorantes en la comarca se encuentra afectado por una estructura anticlinal sinformal asimétrica, en cuyo núcleo se aloja el cuerpo ultramáfico Los Guanacos. La estructura, que posee una longitud de onda del orden de los 2 km y presenta su plano axial orientado al NNO, es correlacionable con las estructuras de la fase D2, generadas durante el ciclo Pampeano.

## Agradecimientos

El presente trabajo fue desarrollado en el marco del proyecto UBACyT EX002 de la Universidad de Buenos Aires. Deseo expresar mi agradecimiento a Diana Mutti por su tiempo, su valiosa ayuda y sus

consejos; a Pablo Leal por la lectura crítica del manuscrito; y a los árbitros de la RAGA, por sus atentas y significativas sugerencias que contribuyeron a mejorar el trabajo.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Beccaluva, L., Girolamo, P. D., Macciotta, G., and Morra, V., 1983. Magma affinities and fractionation trends in ophiolites. *Ofioliti*, 8: 307 - 324.
- Bonalumi, A. A. y Gigena, A. A., 1987. Relación entre las metamorfitas de alto grado y las rocas básicas y ultrabásicas en el Depto. Calamuchita, Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 42 (1-2): 73 - 81. Buenos Aires.
- Bonalumi, A. A., Escayola, M., Kraemer, P. E., Baldo, E. G. y Martino, R. D., 1999. Precámbrico - Paleozoico inferior de las Sierras de Córdoba. En *Geología Argentina*, Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. *Anales* 29 (6): 136-140.
- Caminos, R., Miró, R., Lucero Michaut, N. H., Gamkosián, A., Zamora, E., Jarsún, B. y Sigismondi, M., 1995. Mapa geológico de la Provincia de Córdoba, República Argentina. Secretaría de Minería, Dirección Nacional del Servicio Geológico.
- Cingolani, C. A. y Varela, R., 1975. Geocronología rubidio - estroncio de rocas ígneas y metamórficas de la sierra Chica y Grande de Córdoba. *Actas 2º Congreso Iberoamericano de Geología Económica*, 1: 9 - 35. Buenos Aires.
- Coleman, R. G., 1977. *Ophiolites*. Springer - Verlag, 229 p. Berlín - Heidelberg. Alemania.
- Dalla Salda, L. H., 1984. La estructura íntima de las Sierras de Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 39 (1-2): 38 - 52. Buenos Aires.
- Dilek, Y. and Whitney, D.L., 1997. Counterclockwise P - T - t trajectory from the metamorphic sole of a Neo - Tethyan ophiolite (Turkey). *Tectonophysics*, 280: 295 - 310. Elsevier. Amsterdam.
- Di Marco, A. y Mutti, D. I., 1998. Discriminación litogeoquímica entre ambientes de Arco y de retroarco en el centro y el sur de las Sierras de Córdoba, Argentina. *Actas 10º Congreso Latinoamericano de Geología y 6º Congreso Nacional de Geología Económica*, 2: 238-244. Buenos Aires.
- Escayola, M., Ramé y Kraemer G. A., P. E., 1996. Caracterización y significado geotectónico de las fajas ultramáficas de las Sierras Pampeanas de Córdoba, Argentina. *Actas 13º Congreso Geológico Argentino y 3º Congreso de Exploración de Hidrocarburos*, 2: 239-248. Buenos Aires.
- Fernández Gianotti, J. R., 1977. Geología de la faja de rocas ultrabásicas de la ladera oriental de la Sierra de los Comechingones, provincia de Córdoba. Tesis de doctorado. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, 284 p. Buenos Aires (inédito).
- Geuna, S., Mutti, D., Di Marco, A. y González Chiozza, S., 2000. La remanencia magnética y su importancia en la interpretación de anomalías: El yacimiento de cromita del cerro Los Guanacos, provincia de Córdoba. *Actas 20º Reunión Científica de Geofísica y Geodesia*: 137-141. Mendoza.
- González Chiozza, S., 1998. Metalogénesis y prospección geoquímica del Cerro Los Guanacos, Departamento de Calamuchita, provincia de Córdoba. Trabajo Final de Licenciatura, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universi-

- dad de Buenos Aires, 104p. (inédito).
- González Chiozza, S. y Mutti, D., 1999. Aplicación de un modelo de exploración de minerales metalíferos en rocas ultramáficas. *Actas 14° Congreso Geológico Argentino*, 2: 290-293. Salta.
- Gordillo, C., 1984. Migmatitas cordieríticas de la sierra de Córdoba. *Condiciones físicas de migmatización*. Academia Nacional de Ciencias, 68. Córdoba.
- Gordillo, C. y Lencinas, A., 1979. Sierras Pampeanas de Córdoba y San Luis. 2° Simposio de Geología Regional Argentina, Academia Nacional de Ciencias, 2: 578 - 638. Córdoba.
- Haskin, L. A., Haskin, M. A., Frey, F. A. and Wilderman, T. R., 1968. Relative and absolute abundances of the rare earths. In: *Origin and distribution of the elements*. Arens, L. H. (Ed.): Pergamon, p.889 - 912 London.
- Henderson, P., 1984. *Rare Earth Element Geochemistry*. Elsevier, 510 p. Amsterdam.
- Jordan, T. E. and Allmendinger, R. W., 1986. The Sierras Pampeanas of Argentina: a modern analogue of Rocky Mountain foreland deformation. *American Journal of Science*, 286: 737-764.
- Karamata S., 1980. Metamorphism beneath obducted ophiolite slabs. *Proceedings International Ophiolite Symposium*: 219 - 227. Chipre.
- Kraemer, P., Escayola, M., y Martino, R. D., 1995. Hipótesis sobre la evolución tectónica neoproterozoica de las Sierras Pampeanas de Córdoba (30° 40' - 32° 40' L.S.), Argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 50 (1-4): 49 - 57. Buenos Aires.
- Kraemer, P., Escayola, M. P., y Sfragulla, J., 1996. Dominios tectónicos y mineralización en el basamento de las Sierras Pampeanas de Córdoba. *Actas 13° Congreso Geológico Argentino y 3° Congreso de Exploración de Hidrocarburos*, 2: 239 - 248. Buenos Aires.
- Linares, E. y González, R. R., 1990. Catálogo de edades radiométricas de la República Argentina 1957 - 1987. *Publicación especial de la Asociación Geológica Argentina, serie B, Didáctica y Complementaria*, 19, 628 p., Buenos Aires.
- Martino, R. D., Munn, V. A., Kraemer, P. E., Escayola, M. P. and Gureschi, A., 1994. Thermobarometry at 32° 00' S in the Pampean Ranges near Córdoba, Argentina. *Annual Meeting Geological Society of America. Abstracts with programs*. Seattle, Washington.
- Martino, R., Kraemer, P., Escayola, M., Giambastiani, M. y Arnosio, M., 1995. Transecta de las Sierras Pampeanas de Córdoba a los 32° S. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 50: 60-77. Buenos Aires.
- Menhert, K. R., 1968. *Migmatites and the origin of granitic rocks*. Elsevier. 393 p., Amsterdam.
- Miyashiro, A., 1975. Classification, characteristics and origin of ophiolites. *Journal of Geology*, 83: 249 - 281.
- Miyashiro, A., 1994. *Metamorphic Petrology*. Oxford University Press, 404 p. New York.
- Mutti, D. I., 1992. Las rocas ultrabásicas - básicas de la provincia de Córdoba: interpretaciones geoquímicas e implicancias geotectónicas. *Actas 1° Reunión de Mineralogía y Metalogénesis y Jornada de Mineralogía, Petrografía y Metalogénesis de rocas ultrabásicas*: 411-432. La Plata.
- Mutti, D. I., 1995. Ultramafitas de Córdoba, Argentina: una sección ofiolítica basal desmembrada. 6° Simposio Sul-Brasileiro de Geología/1° Encuentro de Geología do Cono Sur. *Boletim*: 158-161. Porto Alegre.
- Mutti, D. I., 1997. La secuencia ofiolítica basal desmembrada de las sierras de Córdoba. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 52 (3): 275-285. Buenos Aires.
- Mutti, D. I. y Di Marco, A., 1993. Yacimientos cromoespinelíferos de Los Guanacos, provincia de Córdoba. *Controles geológicos de formación y aspectos evolutivos*. *Actas 4° Congreso Nacional y 1° Congreso Latinoamericano de Geología Económica*: 104-115. Córdoba.
- Mutti, D. y González Chiozza, S., 2000. Las rocas de la suela metamórfica de Córdoba: un nuevo aporte acerca del emplazamiento de las tectonitas cromoespinelíferas del manto. *Actas 5° Congreso de Mineralogía y Metalogénesis*: 336-342. La Plata.
- Mutti, D., González Chiozza, S., Geuna, S., y Di Marco, A., 2000. Influencia de la mineralogía y del metamorfismo en las propiedades magnéticas de los depósitos alpinos cromoespinelíferos: El Complejo Los Guanacos, Pcia. de Córdoba. *Actas 5° Congreso de Mineralogía y Metalogénesis*: 343-350. La Plata.
- Otamendi, J. E., Patiño Douce, A. E. and Demichelis, A. H., 1999. Amphibolite to granulite transition in aluminous greywakes from the Sierra de Comechingones, Córdoba, Argentina. *Journal of Metamorphic Geology*, 17: 415-434.
- Pagés, C. y Re, N. O., 1953. Estudio geológico minero de las minas de cromita Los Guanacos, El Rodeo, Ume Pay y Arbol Seco, Dpto. de Calamuchita, Córdoba. *Dirección General de Fabricaciones Militares, Informe 156*. Buenos Aires.
- Pearce, J. A., Lippard, S. J., y Roberts, S., 1984. Characteristics and tectonic significance of suprasubduction ophiolites. In: *Kokelaar, B. P., Howells, M. S. (Eds.): Marginal Basin Geology*. Geological Society of London, Special Publication 16: 77-94.
- Ramón, F., 1965. *Prospección magnetométrica de la mina «Los Guanacos»*, Depto. de Calamuchita, provincia de Córdoba. Instituto Nacional de Geología y Minería. Expediente N° 303.158/65.
- Ramsay, J. G., 1967. *Folding and fracturing of rocks*. McGraw-Hill. 568 p. New York.
- Rapela, C. W., Pankhurst, R. J., Baldo, E. A. G. and Saavedra, J., 1995. Cordierites in S-type granites: restites following low pressure, high degree partial melting of metapelites. In: *Brown, M. and Piccoli, P. M. (Eds.): 3° Hutton Symposium on the Origin of Granites and Related Rocks*. US Geological Survey Circular, 1129: 120-121.
- Rapela, C. W., Pankhurst, R. J., Casquet, C., Baldo, E., Saavedra, J., Galindo, C. and Fanning, C. M., 1998. The Pampean Orogeny of the southern proto-Andes: Cambrian continental collision in the Sierras de Córdoba. In: *Pankhurst, R. J. and Rapela, C. W. (Eds.): The Proto- Andean Margin of Gondwana*. Geological Society, London, Special Publications, 142: 181-217. London.
- Saunders, A. D. and Tarney, J., 1984. Geochemical characteristics of basaltic volcanism within back - arc basins. In: *Kokelaar B. P. and Howells, M. F. (Eds.): Marginal basin geology*. Geological Society of London, Special Publications, 16: 59-76. London.
- Spray, J. G. and Roddick, J. C., 1980. Petrology and <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar geochronology of some Hellenic sub-ophiolite metamorphic rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 72: 73-55.
- Stuart Smith, P. G., Miro, R., Pieters, P. E., Lions, P., Sims, J. P. and Camacho, A., 1996. Tectonic framework of the southern Sierras Pampeanas, Argentina. *Actas 13° Congreso Geológico Argentino y 3° Congreso de Exploración de Hidrocarburos*, 2: 147. Buenos Aires.
- Teruggi, M. E., 1980. La clasificación de las rocas ígneas según la Unión Internacional de Ciencias Geológicas (IUGS). *Ediciones Científicas Argentinas Librart (Colección Ciencias de la Tierra)*, 34 p. Buenos Aires.
- Thompson, R. N., 1984. Dispatches from the basalt front. 1. *Experiments*. *Proc. Geol. Ass.*, 95: 249-262.
- Twiss, R. J. and Moores, E. M., 1992. *Structural Geology*. W. H.

- Freeman, 532 p. New York.
- Villar, M. L., 1985. Las fajas ultrabásicas argentinas, tipos de ultramáficas. *Metagenia. Actas 4° Congreso Geológico Chileno*, 4: 610-633. Chile.
- Wicks, F. J. and Whittaker, E. J. W., 1977. Serpentine textures and serpentinization. *Canadian Mineralogist*, 15: 459-488.
- Williams, H. and Smith, W. R., 1973. Metamorphic aureoles beneath ophiolite suites and alpine peridotites: tectonic implications with west Newfoundland examples. *American Journal of Science*, 273: 594-621.
- Wilson, M., 1989. *Igneous Petrogenesis*. Unwin Hyman, 466 p. London.
- Yardley, B. W. D., 1989. *An introduction to metamorphic petrology*. Longman, 248 p. London.

**Recibido:** 10 de octubre, 2000

**Aceptado:** 10 de octubre, 2001



# Caracterización geoquímica de los gases volcánicos de la isla Decepción (Shetland del Sur, Antártida)

Alberto T. CASELLI<sup>1</sup>, María DOS SANTOS AFONSO<sup>2</sup>, Corina RISSO<sup>1</sup>, Alicia GARCÍA<sup>3</sup> y Ramón ORTIZ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Dpto. Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. UBA, Ciudad Universitaria, Pab.2, C.P. C1428EHA Buenos Aires, Argentina.

<sup>2</sup> INQUIMAE y Dpto. Química Inorgánica, Analítica y Química Física, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. UBA, Ciudad Universitaria, Pab.2, C1428EHA Buenos Aires, Argentina.

<sup>3</sup> Dpto. Volcanología, Museo Nacional Ciencias Naturales, CSIC. C/ José G. Abascal, 2. 28006. Madrid. España

**RESUMEN.** En este trabajo se dan a conocer datos cuantitativos de la composición química de las emanaciones fumarólicas de la isla Decepción en la Antártida, analizándose las variaciones que sufrieron durante los veranos australes desde 1993 hasta 1998. Los cambios geoquímicos sugieren que las fumarolas, localizadas en el área anómala de Bahía Fumarolas, tienen un fuerte carácter hidrotermal. Para explicar las variaciones químicas observadas se sugieren dos procesos hidrológicos de distinta magnitud. Por otro lado, los cambios geoquímicos presentan una relación lineal en los períodos de actividad sísmica alta que se traducen en un incremento preferencial de algunos componentes como por ejemplo  $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ , etc. Los resultados obtenidos con un alto número de eventos sísmicos muestran una buena correspondencia del  $H_2S$  con el  $CO_2$ . En oposición a esto, durante los períodos de baja actividad sísmica se encontró una alta dispersión de la composición química. La relación lineal puede ser asignada a efectos magmáticos mientras que la dispersión puede ser atribuida a un predominio de los efectos hidrológicos sobre los magmáticos. En una primera aproximación la dependencia lineal del  $H_2S$  con  $CO_2$  y del  $H_2O$  con  $H_2S$  podría ser utilizada como parámetro indicador de incrementos en las emisiones magmáticas. Estas características geoquímicas de los fluidos emitidos por las fumarolas pueden ser usados como posibles indicadores de un estado pre-eruptivo y a través de esta evidencia la evolución del sistema hacia una actividad eruptiva.

Palabras clave: Antártida, Isla Decepción, Fumarola, Geoquímica, Monitoreo

**ABSTRACT.** *Geochemical Characterization of the Volcanic Gases at Deception Island (South Shetland Islands, Antarctica).* Intense and periodical monitoring of fumaroles discharges of the Deception Island at Antarctica was made from 1993 until 1998, for every austral summer survey. The geochemical changes suggested that the fumaroles, at the anomaly area of Fumaroles Bay, have a strong hydrothermal character. Two different hydrological processes, with different magnitude, were used to explain the observed chemical variations. The gas fluid chemical compositions also have a correlation with the seismic activity. Some of the gas components, such as  $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ , etc, increase their gas concentration while the seismic activity is increasing. The results obtained with a high number of seismic events show a good correlation between the  $H_2S$  and  $CO_2$  composition of fluids. In opposition, the results obtained during a low seismic events season show a high dispersion on the data composition. The linear correlation should be assigned to a predominant magmatic effect while the dispersion should be related to a predominant hydrological effect. In a first approximation the linear relation of  $H_2S$  with  $CO_2$  and  $H_2O$  with  $H_2S$  should be used as an indicator parameter of the increasing magmatic flux. These geochemical characteristics of the gas fluids should be used for monitoring and testing the eruptive activity.

Key words: Antarctica, Deception Island, Fumarole, Geochemistry, Monitoring

## Introducción

La isla Decepción es un gran volcán con un diámetro basal sumergido de aproximadamente 30 km situado al sudoeste del archipiélago de las Shetland del Sur, Antártida ( $62^{\circ}57'LS$ ;  $60^{\circ}38'LO$ ; Fig. 1). Un proceso de colapso después de un importante episodio eruptivo explosivo generó una depresión en su parte central, que conforma lo que hoy se denomina como Puerto Foster. La historia estructural posterior, tanto regional

como local, es la que controló la localización de los focos volcánicos dando lugar a depósitos de caída estrombolianos y coladas a partir de fisuras ubicadas en la cresta de la caldera, o depósitos freatomagmáticos que formaron numerosos conos de ceniza y maares alrededor de su parte interna (Smellie 1988).

Actualmente constituye el foco volcánico más activo del área. Su historia eruptiva más reciente se remonta a 1967, 1969 y 1970 (González Ferrán *et al.* 1971) y buenas referencias a sus eventos anteriores se

encuentran en Wilkes (1845) y Smellie (1988).

En los últimos años se ha registrado una considerable actividad sísmica en la isla, alcanzado su máximo durante el verano austral 1991/92. Esta actividad anómala fue interpretada por Ortiz *et al.* (1993) y Vila *et al.* (1992) como intrusiones magmáticas (posiblemente diques) cercanas a la superficie (entre 200 y 500 m de profundidad).

Dispuestas alrededor de Puerto Foster se desarrollan una serie de zonas geotérmicamente anómalas de diferentes temperaturas, con emisiones gaseosas de variada composición química (Fig. 1). Las manifestaciones gaseosas de Bahía Fumarolas es el principal campo de fumarolas de la isla, con emisiones ricas en sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono.

Las distintas especies gaseosas disueltas en el magma tienen solubilidades y reacciones diferentes dependiendo de su composición, de la presión y de la temperatura. Al ascender el magma se producen cambios en las condiciones físico-químicas que serán reflejados como cambios en la tasa de emisión y composición química de los gases emergentes en la superficie. Es por ello que el seguimiento de la composición química de los fluidos fumarólicos es de importancia en la vigilancia volcánica ya que permitiría detectar el ascenso del magma hacia la superficie.

El primer antecedente geoquímico post-eruptivo de las manifestaciones fumarólicas asociadas a las

erupciones volcánicas más recientes fueron dados a conocer por Ortiz *et al.* (1987) y Martini y Giannini (1988). Estos son los únicos datos químicos cuantitativos que se disponen de las emanaciones gaseosas de la isla Decepción y corresponden a muestreos puntuales del verano austral de 1988. Tras la crisis sísmica registrada en la campaña 1991/92 se llevó a cabo un muestreo y análisis de gases con el fin de contrastar el estado de actividad volcánica de la isla.

El principal objetivo de este trabajo es entonces caracterizar la composición química de los fluidos emitidos en las fumarolas para su posterior utilización como posibles indicadores de un estado pre-eruptivo. Especialmente se analiza la importancia relativa de las manifestaciones superficiales que puedan revelar una "contaminación" magmática y a través de esta evidencia la evolución del sistema hacia una actividad eruptiva.

### Antecedentes

Como se mencionó anteriormente los primeros antecedentes geoquímicos post-eruptivos de los gases fumarólicos de la isla Decepción fueron dados a conocer por Ortiz *et al.* (1987) y Martini y Giannini (1988). Estos resultados indicaron la presencia de una

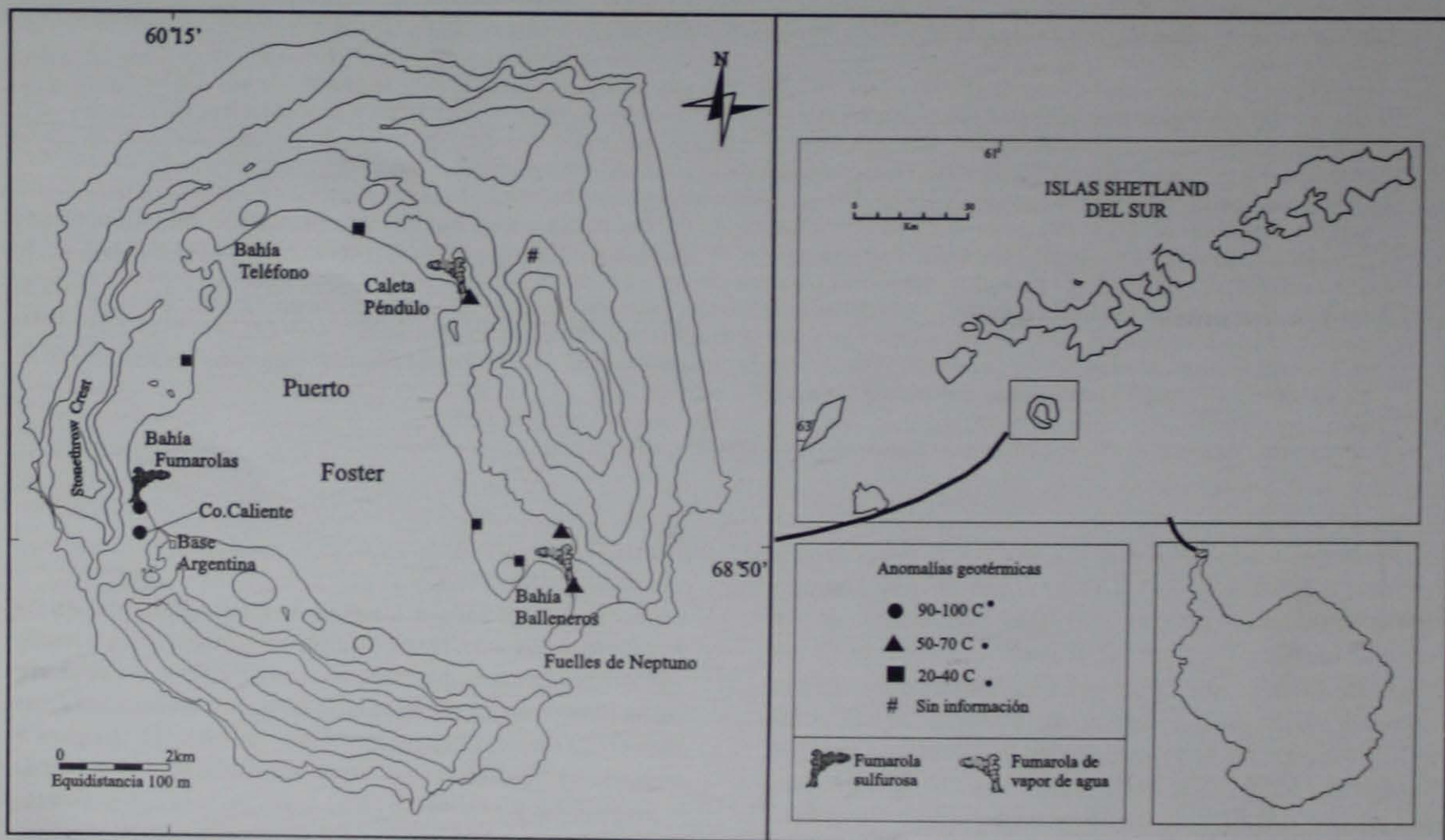


Figura 1: Mapa topográfico y de ubicación de la isla Decepción. Se indican las zonas geotérmicamente anómalas con sus temperaturas y la localización de los principales campos de fumarolas de la isla.

débil influencia volcánica en los gases emergentes.

A partir del año 1993 se llevó a cabo un muestreo y análisis de dichos gases con el fin de contrastar el estado de actividad volcánica de la isla tras la crisis sísmica registrada en la campaña 1991/92. Villegas y Caselli (1993) sugirieron que la variación composicional de los gases durante el verano austral es debida a la existencia de una obstrucción de los conductos, por un acuífero situado bajo la fumarola, que actúa como amortiguador de los cambios térmicos y geoquímicos.

Posteriormente Caselli *et al.* (1994a) indican que la evolución geoquímica de los gases fumarólicos de la isla Decepción durante la campaña 1993/94, muestra la conjunción de dos efectos distintos. Por un lado el factor estacional, producto de su ubicación latitudinal, que incrementaría la cantidad de agua en el acuífero y por ende generaría la leve disminución de la relación  $H_2S/CO_2$  en las emisiones debido a la disolución de  $H_2S$  en el acuífero. Por otro lado la creación de nuevas fracturas provocaría un posible aumento del flujo calórico y un consiguiente incremento de dicha relación.

Villegas *et al.* (1997 a y b) al contrastar los datos sísmicos con la composición de los gases ácidos emitidos en la fumarola a lo largo de dos veranos australes, sugieren una posible relación del cociente  $H_2S/CO_2$  con la sismicidad. Los autores mencionan que cada verano se dan dos efectos bien diferenciados. Un efecto sísmico de corta duración debido a la ocurrencia de sismos locales que provocarían la creación de nuevas microfracturas en profundidad y un efecto hidrológico de larga duración como resultado de la fusión estacional de las capas superficiales de hielo. Según los autores ambos efectos provocarían un aumento de la relación  $H_2S/CO_2$  en las muestras.

### Metodología de muestreo y análisis

En las principales emanaciones fumarólicas de la isla, se realizaron dos tipos de muestreo: gases ácidos ( $CO_2$ ,  $H_2S$ ) e incondensables ( $H_2$ ,  $O_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ , Ar,  $N_2$ ). Los gases ácidos (en adelante TGA (Tubos de Gases Ácidos)) se recogieron en un tubo colector conteniendo solución de KOH y  $Cd(ClO_4)_2$  (Piccardi y Cellini-Legittimo, 1983). Los análisis se han llevado a cabo utilizando técnicas analíticas convencionales y potenciométricas con un laboratorio portátil de gases en el Observatorio Volcanológico Decepción (Villegas *et al.* 1993; Caselli *et al.* 1994b). La determinación de  $CO_2$  se efectuó mediante una titulación potenciométrica utilizándose un electrodo combinado de vidrio para pH, conectado directamente a un conversor analógico digital controlado por una computadora. El sulfuro de hidrógeno se valoró a través de una yodometría con  $Na_2S_2O_3$ . La cantidad de agua en

las muestras se ha calculado por diferencias de masa antes y después del muestreo.

Los gases incondensables (en adelante AGI (Ampollas de Gases Incondensables)) se obtuvieron por medio de ampollas colectoras al vacío conteniendo solución de NaOH (Giggenbach 1975). Los análisis se realizaron mediante cromatografía gaseosa en una columna de tamices moleculares (13 Å) con un cromatógrafo gaseoso marca Shimadzu. En la fase condensada de las AGI se determinó  $H_2S$  y  $CO_2$  usando la misma técnica analítica que para los TGA. Los resultados obtenidos en ambos muestreos son comparables.

### Descripción del sistema fumarólico y resultados geoquímicos

El sistema fumarólico de la isla Decepción está constituido principalmente por tres zonas anómalas dispuestas alrededor de Puerto Foster (Fig. 1). De todos los campos de fumarolas de la isla, el de Bahía Fumarolas es el que presenta una actividad más intensa (con emanaciones sulfurosas) mientras que los de Bahía Balleneros y Caleta Péndulo son principalmente de vapor de agua. El sistema de Bahía Fumarolas está compuesto por tres fumarolas bien diferenciadas (F1, F2 y F3) y un conjunto de emisiones sumergidas en el mar que provocan un fuerte burbujeo hasta unos 30 m de la orilla. Si bien las tres fumarolas mencionadas se encuentran alineadas con un rumbo de  $330^\circ$ , si tomamos en cuenta las surgencias submarinas podríamos agruparlas a cada una de ellas en tres sistemas paralelos diferentes de rumbo  $295^\circ$ . Esta disposición es coincidente con la dirección de las emanaciones del cerro Caliente, estando así posiblemente asociadas a estructuras en *echelon*. La fumarola F1 sólo queda expuesta durante las mareas bajas extraordinarias, la F2 en mareas medias a bajas normales y la F3 permanece siempre fuera del agua. Algunos años esta última fumarola, suele ser atravesada por el chorrillo proveniente del deshielo del glaciar situado en la cumbre de Stonethrow Crest.

Durante todo el período de vigilancia no se han detectado variaciones apreciables en la temperatura, manteniéndose en la boca de salida un valor promedio de  $98^\circ C$ ,  $99^\circ C$  y  $98,4^\circ C$  respectivamente y con una fuerte atenuación al alejarse de ellas.

Una característica a tener en cuenta es la presencia de numerosos acuíferos superficiales y capas saturadas de agua. La evidencia de su existencia se encuentra en el carácter hidrotermal de las emisiones fumarólicas, dominadas por el vapor de agua. La alimentación de estos acuíferos ocurre por el ingreso de agua marina y por la fusión de hielo y nieve y consecuente percolación de agua fresca a través de los depósitos piroclásticos, estando este último efecto fuertemente influenciado por las condiciones meteoroló-

gicas (López Martínez *et al.* 1993). En particular, para la región de Bahía Fumarolas, Inbar (1992) concluyó, al estudiar el régimen hidrológico de las aguas superficiales, que existe una fuerte dependencia de la tasa de fusión del glaciar de Stonethrow Crest con la temperatura registrada y especialmente por la fuerte influencia de la radiación solar.

La composición química de los gases ácidos ( $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$ ) y el vapor de agua de las emanaciones gaseosas de Bahía Fumarolas se detallan en el cuadro 1. Estos valores fueron obtenidos durante las sucesivas campañas de verano desde 1993 hasta 1998. Además se incluyen los resultados de los análisis efectuados a las muestras que fueron tomadas en junio de 1995, es decir, durante el invierno austral.

La composición química de los gases incondensables ( $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{C}_2\text{H}_6$ , Ar,  $\text{N}_2$ ) de las emanaciones gaseosas de Bahía Fumarolas para las campañas de verano 1996/97 y 1997/98, se presentan en el cuadro 2. En la figura 2 se muestran para cada uno de estos componentes las variaciones ocurridas durante el tiempo de muestreo.

De los cuadros 1 y 2 se desprende que después del

vapor de agua el dióxido de carbono es el constituyente más importante con concentraciones menores de sulfuro de hidrógeno, nitrógeno, hidrógeno, oxígeno, argón y metano además de pequeñas cantidades de etano en algunas muestras.

### Actividad sísmica

La actividad sísmica en la isla Decepción se viene controlando desde 1986 por el Departamento de Volcanología del Museo Nacional de Ciencias Naturales-CSIC y últimamente por el Instituto Andaluz de Geofísica. Durante todos estos años se ha registrado una considerable actividad sísmica en la isla, alcanzando un máximo durante la campaña 1991/92 donde la mayoría de los eventos se trataron de terremotos y tremors volcánicos las que se interpretaron como debido a inyección de magma hacia capas poco profundas (Ortiz *et al.* 1993; Vila *et al.* 1992).

Con posterioridad a la crisis sísmica antes mencionada, la actividad en la isla Decepción decrece en for-

**Cuadro 1:** Composición química de los gases ácidos ( $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$ ) y el vapor de agua de las emanaciones gaseosas de Bahía Fumarolas correspondiente a las campañas de verano desde 1993 hasta 1998. Se indica fecha y lugar de muestreo. Los resultados están expresados en % en peso.

Muestra	Lugar	% $\text{CO}_2$	% $\text{H}_2\text{S}$	% $\text{H}_2\text{O}$
16/12/1993	F2	4,95	0,11	94,94
24/12/1993	F2	4,92	0,3	94,78
26/12/1993	F2	7,39	0,73	91,88
29/12/1993	F3	29,88	1,97	68,15
13/01/1994	F2	3,06	0,043	96,897
23/01/1994	F2	1,32	0,056	98,624
27/01/1994	F2	10,97	0,28	88,75
03/02/1994	F2	19,37	0,54	80,09
08/01/1994	F2	30,94	0,39	68,67
08/12/1994	F2	3,642	0,295	96,063
13/12/1994	F3	50	3,833	46,167
16/12/1994	F2	4,518	0,265	95,217
20/12/1994	F2	3,419	0,296	96,285
29/12/1994	F2	5,263	0,502	94,234
03/01/1995	F2	3,861	0,34	95,799
06/01/1995	F2	10,185	0,87	88,944
09/01/1995	F2	6,111	0,55	93,339
13/01/1995	F2	2,924	0,342	96,734
18/01/1995	F2	4,259	0,478	95,263
25/01/1995	F2	6,944	0,667	92,389
30/01/1995	F2	3,59	0,513	95,897
01/06/1995	F3	33,236	0,17	66,594
01/06/1995	F3	37,01	0,159	62,83
24/12/1995	F3	17,658	0,044	82,299
31/12/1995	F3	18,5	0,082	81,418
06/01/1996	F3	6,309	0,017	93,674
12/01/1996	F3	6,58	0,026	93,394
21/01/1996	F3	7,614	0,008	92,378
28/01/1996	F3	19,478	0,059	80,463
04/02/1996	F2	8,198	0,081	91,721
09/02/1996	F3	9,124	0,04	90,836

Muestra	Lugar	% $\text{CO}_2$	% $\text{H}_2\text{S}$	% $\text{H}_2\text{O}$
02/01/1997	F3	47,638	0,375	51,987
07/01/1997	F2	39,471	4,157	56,372
09/01/1997	F2	9,81	0,799	89,392
09/01/1997	F1	88,896	6,849	4,255
13/01/1997	F2	16,158	0,561	83,28
19/01/1997	F2	11,507	0,321	88,171
19/01/1997	F3	32,483	0,538	66,979
25/01/1997	F3	35,047	2,665	62,288
25/01/1997	F2	9,857	0,851	89,292
28/01/1997	F2	11,914	1,132	86,954
28/01/1997	F3	45,192	3,212	51,596
02/02/1997	F2	19,6	1,966	78,434
05/02/1997	F1	90,097	0,58	9,322
09/02/1997	F2	15,367	0,089	84,544
15/02/1997	F2	7,957	0,042	92,001
20/02/1997	F2	19,446	0,095	80,458
25/02/1997	F2	5,107	0,384	94,509
25/02/1997	F3	32,492	1,742	65,766
19/12/1997	F3	3,145	0,021	96,82
23/12/1997	F3	4,919	0,032	95,044
28/12/1997	F3	10,214	0,031	89,749
29/12/1997	F3	8,564	0,036	91,367
31/12/1997	F3	6,472	0,016	93,503
02/01/1998	F3	9,16	0,044	90,779
08/01/1998	F3	7,502	0,037	92,454
12/01/1998	F3	18,993	0,094	80,901
16/01/1998	F3	11,831	0,052	88,108
24/01/1998	F3	12,965	0,045	86,979
28/01/1998	F3	7,196	0,034	92,76
31/01/1998	F3	7,569	0,043	92,38
08/02/1998	F3	18,766	0,11	81,109
12/02/1998	F3	12,956	0,101	86,921
24/02/1998	F3	18,983	0,137	80,859

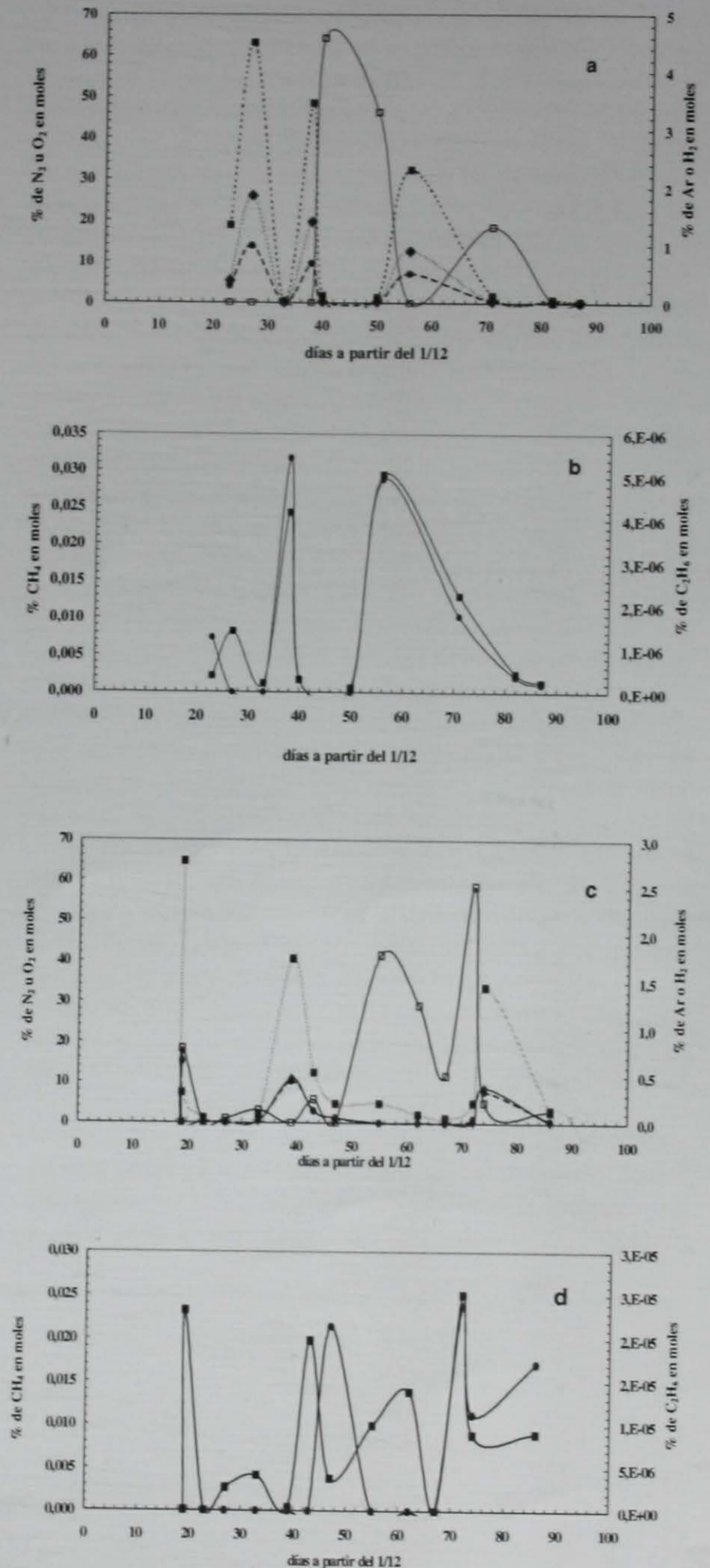
**Cuadro 2:** Composición química de los gases incondensables ( $H_2$ ,  $O_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ , Ar,  $N_2$ , relación  $H_2/CO_2$ ) de las emanaciones gaseosas de Bahía Fumarolas para las campañas de verano 1996/97 y 1997/98. Se indica fecha y lugar de muestreo. (LD: límite de detección). La relación  $H_2/CO_2$  se obtuvo a partir de los datos experimentales de  $H_2$  y  $CO_2$  medidos en las fase gaseosa y condensada de las ampollas respectivamente. Los resultados están expresados en % moles en moles totales. La diferencia hasta el 100% corresponden mayoritariamente a  $CO_2$ ,  $H_2S$  y  $H_2O$ .

MUESTRA	Lugar	% O2	% N2	% H2	% Ar	% CH4	% C2H6	H2/CO2
23/12/1996	F2	5,469	18,814	<LD	0,296	0,00218	1,26E-06	<LD
27/12/1996	F2	25,947	63,086	<LD	0,99	0,00823	<LD	<LD
02/01/1997	F3	0,167	0,412	<LD	0,006	0,00121	<LD	<LD
07/01/1997	F2	19,619	48,474	<LD	0,681	0,02438	5,44E-06	<LD
09/01/1997	F2	0,295	1,776	4,589	0,029	0,00171	3,20E-07	0,151
19/01/1997	F2	0,297	1,387	3,308	0,022	0,00066	<LD	0,065
25/01/1997	F2	12,577	32,293	<LD	0,507	0,02952	4,95E-06	<LD
09/02/1997	F2	0,427	1,904	1,317	0,029	0,01302	1,77E-06	0,052
20/02/1997	F2	0,355	0,865	<LD	0,014	0,00258	3,64E-07	<LD
25/02/1997	F2	0,153	0,397	<LD	0,006	0,0014	1,93E-07	<LD
19/12/1997	F3	0,125	7,474	0,789	<LD	0,02324	<LD	<LD
23/12/1997	F3	0,333	1,193	<LD	0,013	0,00002	<LD	<LD
27/12/1997	F3	0,002	0,362	0,043	0,003	0,00272	<LD	<LD
02/01/1998	F3	0,37	2,092	0,138	0,021	0,00415	<LD	<LD
08/01/1998	F3	10,998	40,646	<LD	0,444	0,00043	<LD	<LD
12/01/1998	F3	2,945	12,499	0,251	0,13	0,01977	<LD	<LD
16/01/1998	F3	1,316	4,839	<LD	0,051	0,00378	2,13E-05	<LD
24/01/1998	F3	0,094	4,886	1,783	<LD	0,00994	<LD	<LD
31/01/1998	F3	0,043	2,185	1,248	<LD	0,01386	<LD	<LD
05/02/1998	F3	0,027	1,269	0,503	<LD	<LD	<LD	<LD
10/02/1998	F3	0,219	5,016	2,514	0,044	0,02511	2,38E-05	<LD
12/02/1998	F3	8,879	33,713	0,221	0,335	0,00886	1,12E-05	<LD
24/02/1998	F3	0,216	3,288	0,122	0,027	0,00896	1,71E-05	<LD

ma notable. Así, durante la campaña 1992/93 y 1993/94 decreció la actividad a menos de 200 eventos. Luego, en el verano de 1994/95 se registraron 833 eventos de los cuales 763 se consideraron típicos de naturaleza volcánica mientras que el resto se clasificaron como eventos regionales y profundos (García e Ibañez 1995). Al año siguiente, en la campaña 1995/96 el número de eventos es comparable, 600, siendo la mayor parte de largo período, híbridos y tremors (Ibañez *et al.* 1996). En contraposición, en el verano 1996/97 disminuye la actividad donde de los 237 eventos detectados 184 fueron de naturaleza volcánica (baja frecuencia, híbridos, tremors) y 53 eventos regionales (terremotos) (García *et al.* 1997). Durante la campaña 1997/98 se observó un nuevo aumento en la sismicidad obteniéndose un total de 619 eventos (García *et al.* 1998).

**Discusión**

Las fumarolas de la isla Decepción y en concreto las que constituyen el área anómala de Bahía Fumarolas tienen un fuerte carácter hidrotermal, es decir, son sistemas a bajas presiones y con contenidos mayoritarios



**Figura 2:** Variación del contenido de gases incondensables expresado en % moles por moles totales con el avance de la campaña de verano de los períodos 1996/97 y 1997/98. a, Variación del porcentaje de  $\diamond$ :  $O_2$ ,  $\blacksquare$ :  $N_2$ ,  $\circ$ :  $H_2$  y  $\bullet$ : Ar para la campaña 1996/97. b, Variación del porcentaje de  $\blacksquare$ :  $CH_4$  y  $\bullet$ :  $C_2H_6$  para la campaña 1996/97. c, Variación del porcentaje de  $\diamond$ :  $O_2$ ,  $\blacksquare$ :  $N_2$ ,  $\circ$ :  $H_2$  y  $\bullet$ : Ar para la campaña 1997/98. d, Variación del porcentaje de  $\blacksquare$ :  $CH_4$  y  $\bullet$ :  $C_2H_6$  para la campaña 1997/98.

de vapor de agua (Casadevall y Greenland, 1981). Por lo tanto, puede considerarse que la temperatura que se registra en la boca de salida es en realidad la temperatura de ebullición de una disolución acuosa a nivel del mar.

El vapor de agua que se recoge en las fumarolas es mayoritariamente proveniente de aguas meteóricas filtradas a través del material piroclástico tal como lo muestran las relaciones isotópicas de oxígeno ( $\delta^{18}\text{O}$ ) y deuterio ( $\delta\text{D}$ ) de este vapor (Párica *et al.* 1990). A medida que avanza la estación estival el contenido de vapor de agua en las fumarolas decrece (Villegas *et al.* 1997a y b). Este efecto fue atribuido a que la filtración de aguas de baja temperatura provocaría un fenómeno de enfriamiento súbito en el sistema fumarólico que se vería materializado con un descenso en la cantidad de vapor de agua (Villegas *et al.* 1997 a y b). En nuestra opinión, la causa se debe a un efecto de "concentración relativa de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$  respecto del  $\text{H}_2\text{O}$ ", porque al disminuir la temperatura ambiental decrece el aporte de agua en los acuíferos por menor deshielo. El mayor aporte de aguas de deshielo al acuífero ocurre en los meses de noviembre-diciembre, extendiéndose hasta el mes de enero en algunos años, donde se produce la fusión de la nieve invernal sumado al deshielo glaciario y del permafrost y a partir de ese momento disminuye el flujo durante el resto de la campaña estival y hasta el nuevo período de deshielo. Esa disminución de volumen de agua en las napas atravesadas por los gases fumarólicos se traduce en una saturación del nivel freático con menores proporciones de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$  en solución (Fig. 3). Como consecuencia de esto aumenta la cantidad relativa de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2\text{S}$  en la fase vapor y por ende aparece una disminución relativa del vapor de  $\text{H}_2\text{O}$  en la fumarola.

Este comportamiento hidrológico de gran escala puede observarse, en menor escala, a lo largo del verano austral al analizar la variación de la concentración de  $\text{H}_2\text{S}$  con el contenido de agua. En la figura 4a se

muestran los cambios de concentración para las campañas 1994/95, 1995/96 y 1997/98 mientras que en la figura 4b los correspondientes a las campañas 1993/94 y 1996/97 para las fumarolas F2 y F3. En todos los casos se ha advertido que a medida que disminuye el contenido de vapor de agua en las fumarolas aumenta el contenido de  $\text{H}_2\text{S}$ . La relación  $\text{H}_2\text{S}/\text{CO}_2$  (S/C) es comúnmente utilizada como parámetro normalizador de los resultados permitiendo independizarse de las variables propias que afectan al tipo y tiempo de muestreo. Sin embargo, en nuestro caso, analizando las interrelaciones entre las variables se ha notado que dicho parámetro no presenta una correlación significativa por lo que no se lo ha empleado en el análisis de los datos. La variación de S/C con el agua, para las fumarolas del Momotombo (Nicaragua), fue atribuida a procesos de concentración-dilución por acuíferos someros (Martini *et al.* 1991). El incremento de la relación S/C es debido a que las especies sulfuradas son más solubles que las especies que contienen carbono (Giggenbach, 1980), por lo tanto, en el seno del acuífero se producirán variaciones importantes de las concentraciones relativas de ambos gases.

De este modo, en nuestro caso, al aumentar el contenido de agua del acuífero aumentará la cantidad de especies sulfuradas en solución y disminuirá la composición de este gas en la fase vapor y viceversa. De esta forma, la concentración de  $\text{H}_2\text{S}$  en la fase vapor emergente disminuirá/aumentará con el aumento/disminución del agua en el acuífero (Fig. 3 y 4a y b). Así, de la figura 4a se puede observar que los valores se agrupan en dos conjuntos, uno para la campaña 1994/95 y otro para las campañas 1995/96 y 1997/98 que son coincidentes con los muestreos de las fumarolas F2 y F3 respectivamente. Para ambas fumarolas los datos geoquímicos de las campañas presentan una relación lineal. Para la fumarola F2 las muestras tienen una concentración de  $\text{H}_2\text{S}$  mayor que

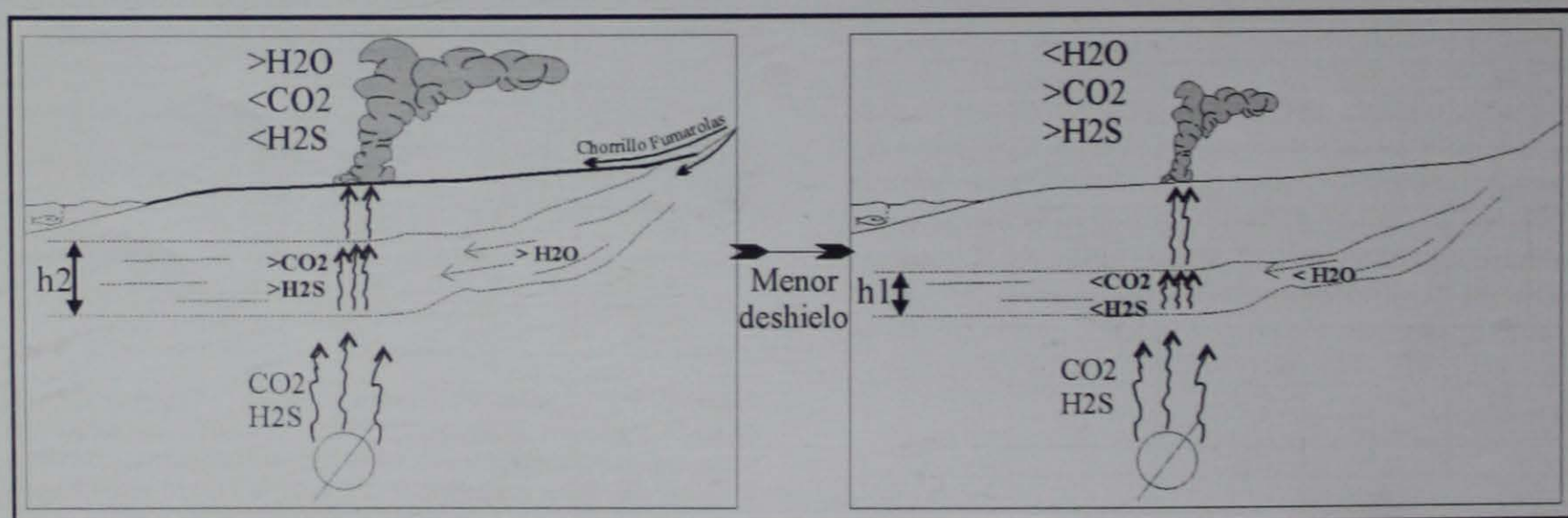
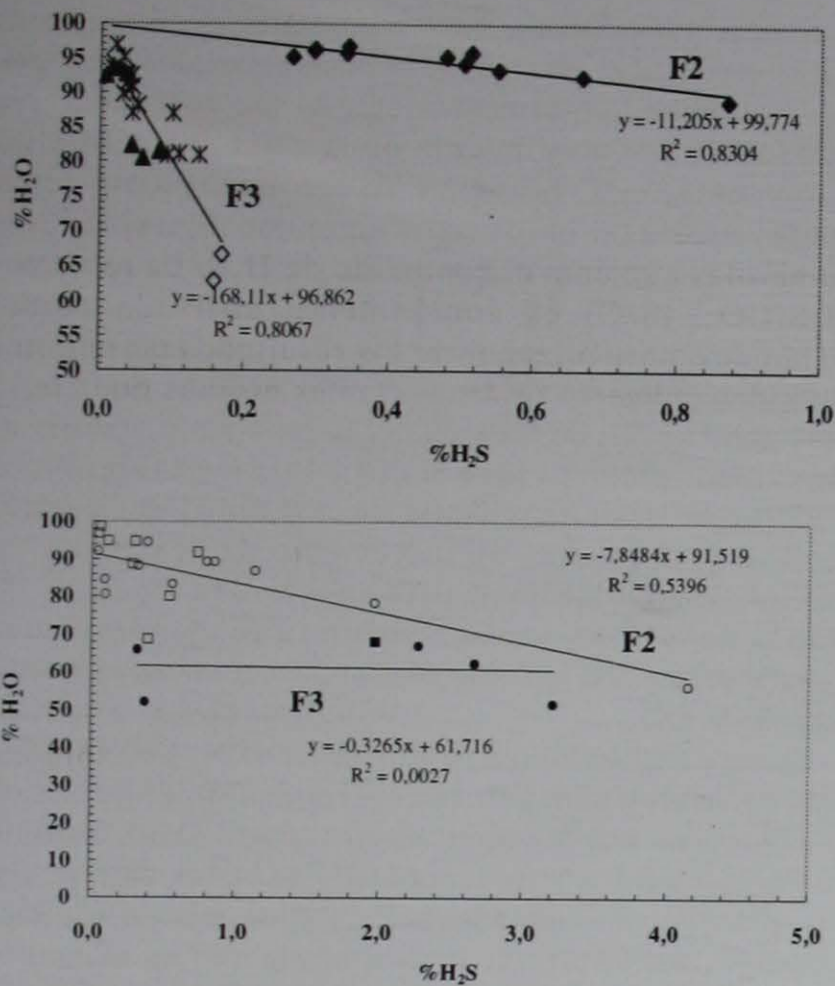


Figura 3: Diagrama esquemático de la influencia hidrológica sobre la composición de los gases emitidos por las fumarolas. El esquema a corresponde a períodos de mayor afluencia de aguas, mientras que el esquema b corresponde a los de menor afluencia. Los símbolos mayor y menor indican una composición relativa del esquema a respecto del esquema b y  $h_1$  y  $h_2$  son los espesores relativos del acuífero.



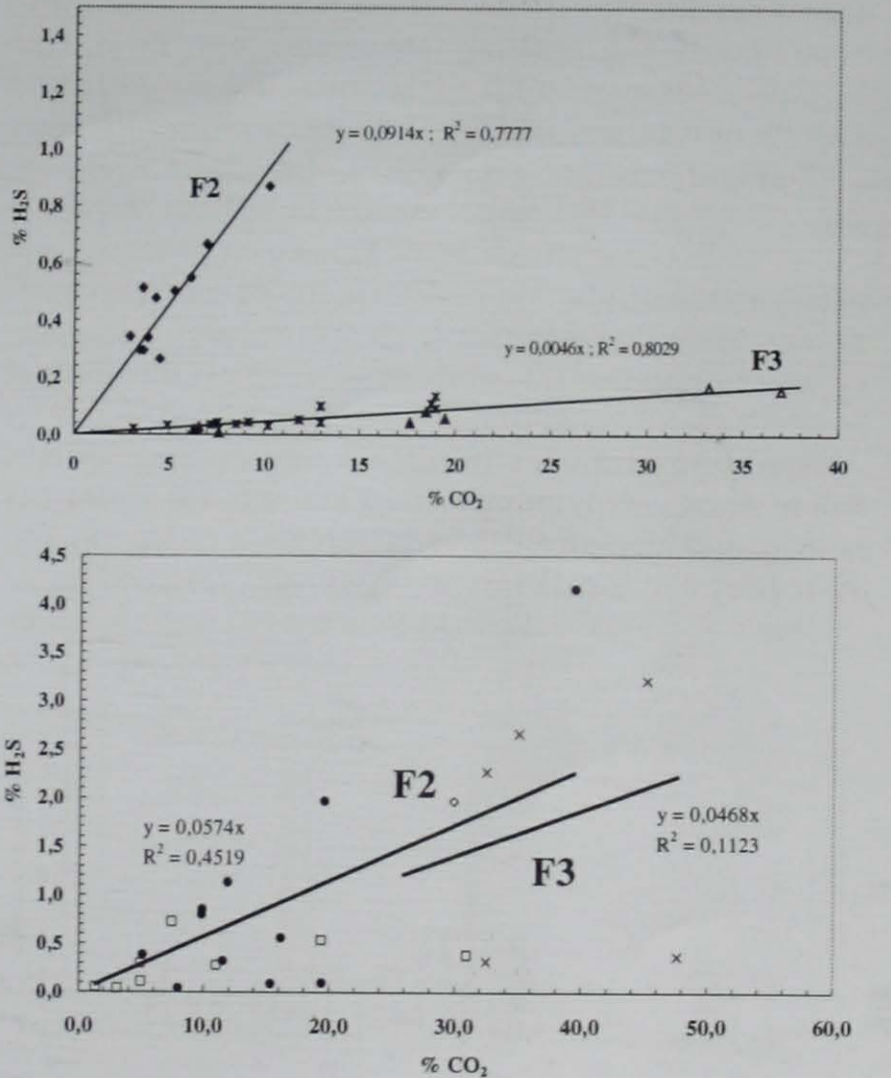
**Figura 4:** Variación del contenido de agua con H<sub>2</sub>S expresados en % en peso para las campañas de verano a 1994/95, 1995/96 y 1997/98 y b) 1993/94 y 1996/97. En esta figura se incluyen las muestras tomadas durante el invierno de 1995. ■: 1993-1994 F3; •: 1993-1994 F2; ♦: 1994-1995; ◇: invierno de 1995; ○: 1995-1996; ●: 1996-1997 F2; l: 1996-1997 F3; \*: 1997-1998.

las de F3 y se ordenan sobre una línea de pendiente menor con coeficientes de determinación similares (~0,8) en ambos casos (Fig. 4a). Este descenso relativo de la cantidad de agua en la fase vapor es debido a un mayor contenido de agua en el acuífero (Fig 3). Asimismo esta diferenciación composicional entre F2 y F3 sugeriría la existencia de acuíferos con propiedades distintas, tales como tipo y velocidad de recarga, lo que apoyaría la hipótesis antes mencionada sobre la existencia de sistemas fumarólicos paralelos y no uno único, como se presuponía hasta el momento.

Los resultados de las campañas 1993/94 y 1996/97 muestran para ambas fumarolas una dispersión (con un coeficiente de determinación R<sup>2</sup> 0,003 y 0,54 para F3 y F2 respectivamente), tendiendo a valores intermedios entre las rectas de la figura 4a (Fig. 4b), lo que indicaría un cambio composicional de esas campañas respecto a las otras. Los datos volcados en la figura 4a corresponden a los muestreos realizados en años con mayor actividad sísmica mientras que los datos de la figura 4b a los de los años de menor actividad sísmica. El cambio de comportamiento de las fumarolas al comparar los resultados de los años de mayor y menor actividad sísmica puede ser atribuido, como se verá más adelante, a un menor o mayor "efecto hidrológico" respectivamente.

Al relacionar el contenido de H<sub>2</sub>S con el de CO<sub>2</sub>, durante todos los años de muestreo, se puede observar que si bien indican una relación directa, los resultados tienen un comportamiento diferente para los años de mayor y menor actividad sísmica (Fig. 5a y b). Para los años de mayor actividad sísmica (1994/95, 1995/96 y 1997/98) el contenido de H<sub>2</sub>S varía con el de CO<sub>2</sub> y al igual que en el caso anterior se obtiene una relación lineal para cada fumarola con un coeficiente de determinación R<sup>2</sup> de 0,78 y 0,80 para las fumarolas F2 y F3 respectivamente. La correspondiente a gases de la fumarola F3 tiene una menor pendiente que la de la fumarola F2 lo que es equivalente a una mayor proporción de CO<sub>2</sub> (Fig. 5a). También aquí para los años de menor actividad sísmica (1993/94 y 1996/97) las muestras de ambas fumarolas presentan dispersión en la composición con un R<sup>2</sup> de 0,45 y 0,11 para las fumarolas F2 y F3 respectivamente (Fig. 5b). Como se verá más adelante este cambio de composición relativa de las muestras también puede ser atribuido a un mayor o menor efecto hidrológico.

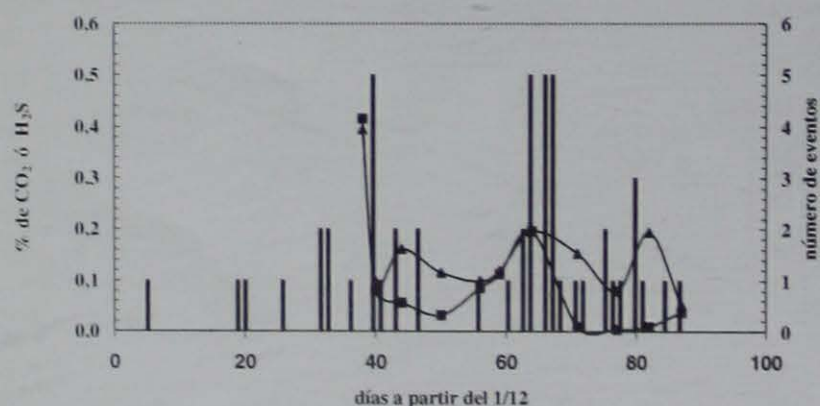
Villegas *et al.* (1997a y b) al analizar la relación de la composición de los gases ácidos con la ocurrencia



**Figura 5:** Variación del contenido de H<sub>2</sub>S con el de CO<sub>2</sub> expresados en % en peso para las fumarolas F2 y F3 en las campañas de verano a 1994/95, 1995/96 y 1997/98 y b) 1993/94 y 1996/97. En esta figura se incluyen las muestras tomadas durante el invierno de 1995. En todos los casos la nomenclatura utilizada es: ◇: 1993-1994 F3; •: 1993-1994 F2; ♦: 1994-1995; Δ: invierno de 1995; ○: 1995-1996; ●: 1996-1997 F2; x: 1996-1997 F3; \*: 1997-1998.

de terremotos locales de la isla Decepción concluyen que la creación de nuevas microfracturas favorecería que las aguas frías de fusión del glaciar alcancen el acuífero más fácilmente disminuyendo su intensidad de ebullición y en consecuencia el parámetro S/C. Si bien la falta de variaciones en la temperatura de la fumarola llevó a desechar la idea de un nuevo aporte de gases magmáticos como posible explicación de la variación de los resultados, del análisis de los TGA y AGI en conjunto se puede arribar a conclusiones interesantes. Al graficar el contenido de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  con el número de eventos sísmicos para la campaña 1996/97 se observa que el  $\text{CO}_2$  tiene una buena correspondencia con la sucesión de eventos sísmicos tipo híbridos, mientras que el  $\text{H}_2\text{S}$  no siguen dicho patrón (Fig. 6). Estos eventos tipo híbridos han sido asociados a fracturas seguidas de liberación de gas. De esta manera los cambios producidos en el sistema de microfracturas relacionados con la fumarola, debidos a eventos sísmicos, provocarían un incremento de  $\text{CO}_2$ . En los sistemas volcánicos, como el de la isla Decepción, al  $\text{CO}_2$  se lo puede considerar como un componente conservativo que nos da información directa de la desgasificación del magma dado que no hay otras fuentes ni sumideros para este gas. De la figura 6 se puede concluir que el contenido de  $\text{H}_2\text{S}$  no siempre acompaña a las variaciones del contenido de  $\text{CO}_2$  lo que conduciría a una dispar concordancia de dicho parámetro con los eventos sísmicos. La proporción relativa de  $\text{H}_2\text{S}$  respecto del  $\text{CO}_2$  refleja mayoritariamente la presencia de otros factores o procesos que afectan específicamente al primero de estos componentes. Esto probablemente podría deberse a los procesos secundarios de solubilidad al atravesar el nivel freático como ya se discutió anteriormente.

Otro compuesto que puede brindar información sobre el aporte magmático es el hidrógeno. Entre los constituyentes de los gases fumarólicos el  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ , Ar y  $\text{CH}_4$  son los menos solubles. Así sus concentraciones absolutas en la fase gaseosa no se verán mo-



**Figura 6:** Variación del contenido de  $\text{CO}_2$  y de  $\text{H}_2\text{S}$ , expresados en % en peso, en las fumarolas con los eventos sísmicos tipo híbridos para el avance de la campaña de verano de 1996/97 (los datos sísmicos fueron suministrados por Ibáñez, J.M. en comunicación personal). En este gráfico el porcentaje de  $\text{CO}_2$  se ha dividido por 100 y el de  $\text{H}_2\text{S}$  por 10. ○: eventos sísmicos; s %  $\text{CO}_2/100$ ; ■%  $\text{H}_2\text{S}/10$ .

dificadas por el flujo a través del cuerpo de agua. Entre estas especies el  $\text{N}_2$  y el  $\text{O}_2$  pueden estar afectadas por la contaminación atmosférica y el metano puede ser producido por decaimiento de materia orgánica y no representar así a los verdaderos constituyentes magmáticos. De todos estos componentes, el  $\text{H}_2$  está relacionado principalmente a los procesos de alta temperatura y puede ser considerado como un constituyente representativo de los gases que escapan del cuerpo magmático (Martini *et al.* 1984). Al graficar la relación  $\text{H}_2/\text{CO}_2$  en función del tiempo junto al número de eventos sísmicos para el mismo período (Fig. 7), se observa un gran incremento de esta relación en aquellos días en que hay un incremento de la sismicidad (eventos tipo híbridos). Esto apoyaría la hipótesis de que la sismicidad genera la apertura de microfracturas relacionadas con la fumarola, provocando un aumento del  $\text{H}_2$  y  $\text{CO}_2$ .

Como se mencionó anteriormente el  $\text{N}_2$  y el  $\text{O}_2$  pueden estar afectados por la contaminación atmosférica y el metano puede ser producido por decaimiento de materia orgánica y no representar así a los verdaderos constituyentes magmáticos. Para el caso de la isla Decepción, del cuadro 2, se desprende que en la mayoría de las muestras la relación  $\text{N}_2/\text{O}_2$  tiene un valor que se aleja de la relación promedio para el contenido atmosférico (3,74), pudiendo así suponerse que el fenómeno de contaminación de éstas por ingreso del aire ambiental es relativamente pequeño. Comparando las curvas de la figura 2 a y c se puede observar que el  $\text{O}_2$ , Ar y el  $\text{N}_2$  siguen un mismo patrón, estando sus concentraciones relativas asociadas. Por otro lado, el  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , y  $\text{C}_2\text{H}_6$  presentan comportamientos diferenciados respecto de los componentes anteriores. Para el caso del metano y el etano se advierte que para la campaña 1996/97 (Fig. 2 b) siguen un mismo patrón indicando un mismo origen para ambos gases. En cambio, para la campaña 1997/98 (Fig. 2d) los perfiles de las curvas son diferentes, sugiriendo orígenes distintos para cada uno de estos gases. Si se comparan las curvas de  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$  e  $\text{H}_2$  con las de  $\text{CH}_4$  y  $\text{C}_2\text{H}_6$  de la misma campaña se encuentra que en condiciones de anoxia (baja proporción de  $\text{O}_2$ ) y altas concentraciones de  $\text{H}_2$  se produce metano; mientras que se forma etano en aquellas en las cuales la condición de anoxia se encuentra asociada a bajas concentraciones de  $\text{H}_2$ . Esto sugeriría que la formación de estos gases ocurre en forma paralela a partir de la reacción de  $\text{CO}_2$  con  $\text{H}_2$ :



Los datos termodinámicos indican que la reacción química para la formación de metano a partir de  $\text{CO}_2$  es espontánea a temperaturas inferiores a  $680^\circ\text{C}$ . Esto sugeriría que estos gases podrían originarse durante el ascenso a la superficie, descartándose, dadas las ca-



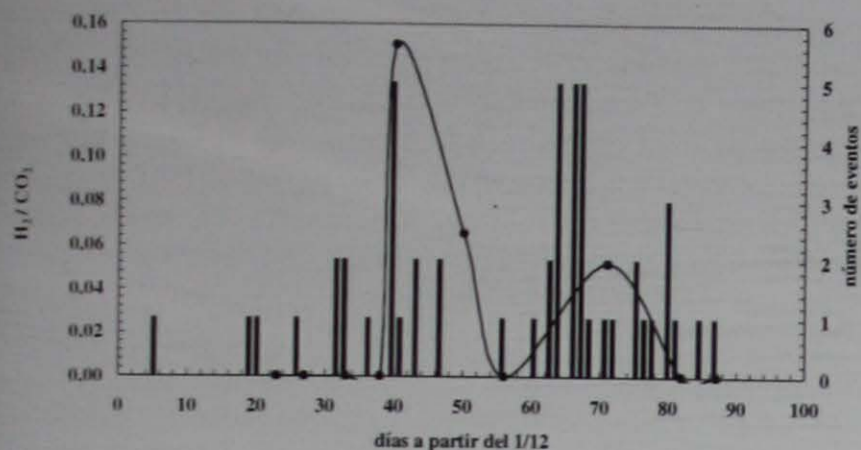


Figura 7: Variación de la relación  $H_2/CO_2$  y de los eventos sísmicos tipo híbridos para el avance de la campaña de verano de 1996/97 (Ibáñez, J.M. comunicación personal). y ○: eventos sísmicos; ●:  $H_2/CO_2$ .

racterísticas geológicas de la isla, su origen por degradación de materia orgánica.

Teniendo en cuenta lo discutido en párrafos anteriores, es evidente que existe un aporte de gases magmáticos asociado a la actividad sísmica. Esto también se podría ver reflejado al analizar detalladamente la variación del  $H_2S$  en función del  $CO_2$  con la sismicidad. Como se describió anteriormente, después de la crisis sísmica de la campaña 1991/92 (766 eventos) decreció la actividad, registrándose menos de 200 eventos durante los veranos 1992/93 y 1993/94. En los dos períodos estivales siguientes se produce un nuevo pico de la actividad alcanzando los 763 y 600 eventos (campañas 1994/95 y 1995/96 respectivamente). Con posterioridad, nuevamente decae la sismicidad en el verano de 1996/97 (184 eventos) para incrementarse notablemente en la campaña 1997/98 (619 eventos). Al analizar el gráfico de  $H_2S$  en función del  $CO_2$  (Fig. 5) y el de  $H_2O$  en función del  $H_2S$  (Fig. 4), tanto para la fumarola F2 como F3, se observa que en los años de mayor actividad sísmica (1994/95, 1995/96 y 1997/98) las muestras presentan un ordenamiento lineal, mientras que en aquellos con escasa actividad (1993/94 y 1996/97) tienen una gran dispersión. Esa diferencia de comportamiento se podría explicar considerando la dispar actividad sísmica durante las diferentes campañas. Aquellas con un gran número de eventos presentan la relación lineal, mientras que las de baja actividad sísmica tienen dispersión en la composición. Si se analiza el gráfico de  $H_2O$  en función del  $H_2S$  (Fig. 4b) y el de  $H_2S$  en función del  $CO_2$  (Fig. 5b), correspondientes a años de baja actividad sísmica, se puede notar que para la fumarola F2 aparecen tres puntos alineados que corresponden a altas concentraciones de sulfuro de hidrógeno. Estos valores corresponden a muestras tomadas en días de actividad sísmica (Figs. 6 y 7). Si estos datos se incorporan a los gráficos de años de alta sismicidad (Figs. 4a y 5a) se advierte que se alinean sobre la misma recta (Fig. 8a y 9a) mientras que en los correspondientes a los años de baja sismicidad aparece una mayor dispersión (Fig. 8b y 9b). Como consecuencia la relación

lineal puede ser atribuida a un efecto de desgasificación predominantemente magmática mientras que la dispersión puede ser debida seguramente al efecto hidrológico que en ese caso predominaría sobre el magmático.

### Conclusiones

En este trabajo se dan a conocer datos cuantitativos de la composición química de las emanaciones fumarólicas de la isla Decepción y se analizan las variaciones que sufrieron durante los veranos australes entre 1993 y 1998.

Se halló una diferencia composicional de las emisiones gaseosas de Bahía Fumarolas que podría corresponder a por lo menos tres sistemas fumarólicos paralelos y no uno solo como se suponía hasta el momento.

La evolución geoquímica de estos gases durante el período estival mostraría la conjunción de dos efectos hidrológicos distintos. Un comportamiento hidrológico de gran escala, producto de la ubicación latitudinal de la isla que incrementaría la cantidad de agua en el acuífero generando un aumento de la cantidad relati-

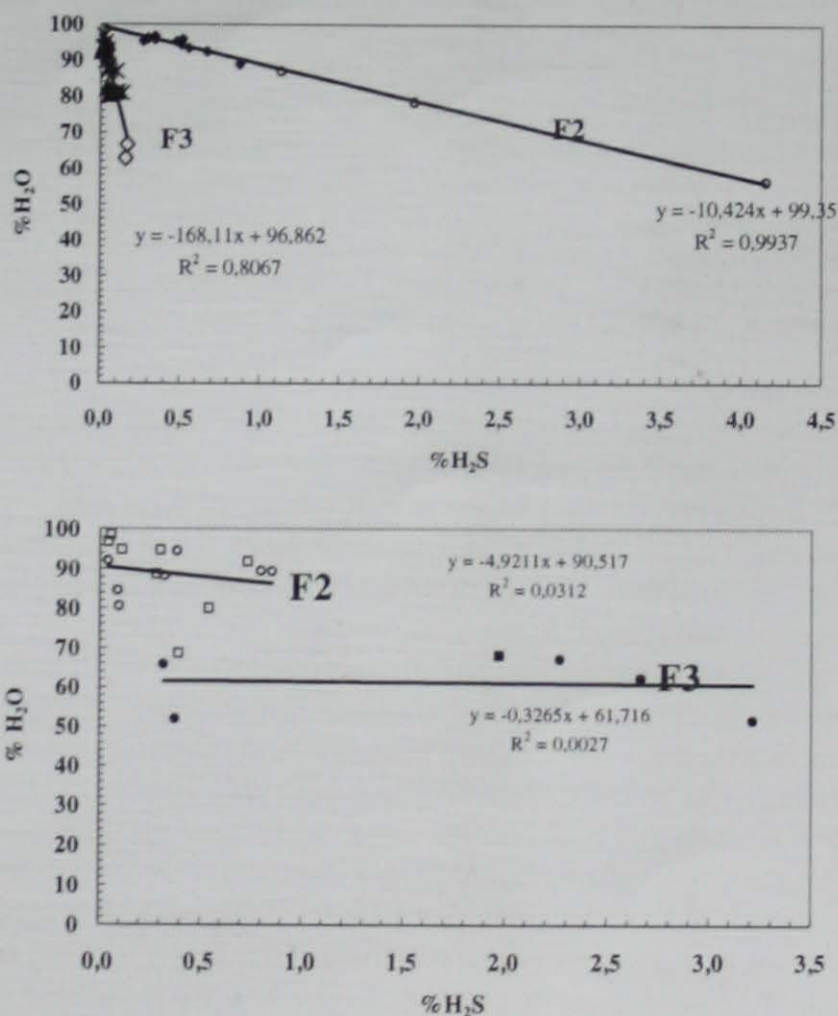
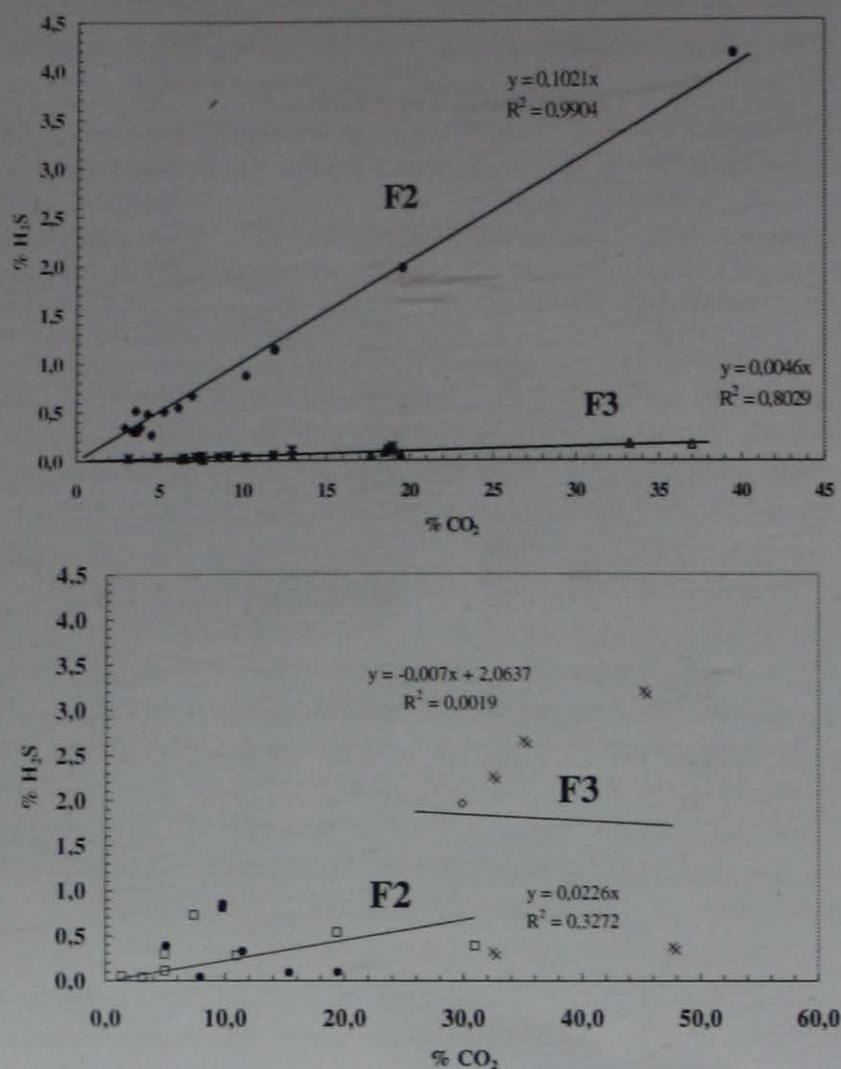


Figura 8: Variación del contenido de vapor de agua con  $H_2S$ , expresados en % en peso, para las campañas de verano a) 1994/95, 1995/96 y 1997/98 y b) 1993/94 y 1996/97. En esta figura se modificaron las rectas de la figura 4 teniendo en cuenta la sismicidad (ver texto). ■ : 1993-1994 F3; ● : 1993-1994 F2; ◆ : 1994-1995; ◇ : invierno de 1995; ○ : 1995-1996; ○ : 1996-1997 F2; ● : 1996-1997 F3; \* : 1997-1998.



**Figura 9:** Variación del contenido de  $H_2S$  con el de  $CO_2$ , expresados en % en peso, para las campañas de verano a 1994/95, 1995/96 y 1997/98 y b 1993/94 y 1996/97. En esta figura se modificaron las rectas de la Figura 5 teniendo en cuenta la sismicidad (ver texto). En todos los casos la nomenclatura utilizada es:  $\diamond$ : 1993-1994 F3;  $\bullet$ : 1993-1994 F2;  $\blacklozenge$ : 1994-1995;  $\circ$ : 1995-1996;  $\Delta$ : invierno de 1995;  $\bullet$ : 1996-1997 F2;  $\times$ : 1996-1997 F3;  $*$ : 1997-1998.

va de  $CO_2$  y  $H_2S$  en la fase vapor y por ende una disminución relativa del  $H_2O$ . Un comportamiento hidrológico de menor escala donde a medida que disminuye el contenido de vapor de agua de la fumarola se incrementa la concentración de las especies hidrolizables ( $H_2S$  y  $CO_2$ ).

Las variaciones geoquímicas también presentan una relación con la actividad sísmica. La sismicidad genera la apertura de microfracturas relacionadas con la fumarola, provocando un aumento del flujo gaseoso a través de los conductos. Esto se traduce en un incremento preferencial de algunos componentes de origen magmático como por ejemplo  $H_2$ ,  $CO_2$ , etc. En cambio el  $H_2S$  muestra una relación lineal con el  $CO_2$  en los períodos de alta actividad sísmica y está afectado por los procesos secundarios de solubilidad al atravesar el nivel freático durante los períodos de baja actividad sísmica. En una primera aproximación se podría correlacionar la relación lineal entre el  $H_2S$  y el  $CO_2$  y la del  $H_2O$  con  $H_2S$  con un estado de alta sismicidad y así utilizar a estos parámetros como indicadores de "contaminación" magmática.

Estas características geoquímicas de los fluidos emitidos por las fumarolas pueden ser utilizadas como posibles indicadores de un estado pre-eruptivo y a través de esta evidencia la evolución del sistema hacia una actividad eruptiva.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Antártico Argentino y al Programa Antártico Español por el apoyo brindado para acceder a la zona de estudio y llevar a cabo las investigaciones así como a los arbitros por los importantes comentarios realizados al presente trabajo.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Casadevall, T.J. and Greenland, P.L., 1981. The chemistry of gases emanating from Mount St. Helens, May-September 1980. In: P.W. Lipman and D.R. Mullineaux (Eds.), *The 1980 Eruptions of Mount St. Helens*, Washington, U.S. Geol. Surv., Prof. Pap., 1250: 221-226.
- Caselli, A., Cohen, M. y Villegas, M.T., 1994a. Geoquímica de gases fumarólicos de la isla Decepción. Su evolución e implicancias volcanológicas. Terceras Jornadas de Comunicaciones sobre Investigaciones Científicas Antárticas. Buenos Aires. Acta, 171-174.
- Caselli, A., Risso, C. y Cohen, M., 1994b. Análisis químicos de gases fumarólicos. Metodología empleada en el Observatorio Volcanológico Decepción. Terceras Jornadas de Comunicaciones sobre Investigaciones Científicas Antárticas. Buenos Aires. Actas, 167-170.
- García, A., Astiz, M., Villegas, M.T., Ibañez, J., Morales, J., Carmona, E., Caselli, A., Badi, G. and Baraldo, A., 1997. Deception Island (Antarctica) Seismicity lower than previously recorded" Bulletin of the Global Volcanism Network (Smithsonian Institution), Vol. 22 (4): 10.
- García, A. e Ibañez, J., 1995. Informe sobre las actividades científicas de España en la Antártida durante la campaña 1994-95. Plan Nacional de I+D. Com. Interministerial Ciencia y Tecnología (Inédito).
- García, A., Abella, A., Peña J., Velez, E. and Navarro, F., 1998. Deception Island (Antarctica) "Stable conditions, 35 hours of tremors". Bulletin of the Global Volcanism Network (Smithsonian Institution), Vol. 23 (5): 8.
- Giggenbach, W.F. 1975. A simple method for the collection and analysis of volcanic gas samples. Bulletin of Volcanology 39: 132-145.
- Giggenbach, W.F. 1980. Geothermal gas equilibria. Geochimica et Cosmochimica Acta, 44, 2021-2032.
- González-Ferrán, O., Munizaga, F. y Moreno, H., 1971. Síntesis de la evolución volcánica de isla Decepción y la erupción de 1970. Instituto Antártico Chileno. Serie Científica, 2, 1-14.
- Ibañez, J.M., Almendros, J., Alguacil, G., del Pezzo, y E., Morales, J., 1996. Eventos sísmicos de largo período en isla Decepción: evidencias de una zona volcánica activa. Resúmenes VI Simposio Español de Estudios Antárticos, 45.
- Inbar, M., 1992. Hydrology and hydraulic geometry in volcanic lithology and antarctic climate. Morphological quantitative study at Deception Island, South Shetland Islands. In: López-Martínez J. (Ed.), Simposio de Geología de la Antártida Occidental. Comité Interministerial de Ciencia y Tecnología, 337-

- 346.
- López Martínez, J., Ramos, M., Criado, C., Serrano, E. y Nicolás P., 1993. Anomalías geotérmicas y permafrost en la isla Decepción, Antártida. In: C.I.C.Y.T. (Ed.) Investigación Española en la Antártida. V Simposio Español de Estudios Antárticos. Barcelona. (I): 25-32.
- Martini, M. and Giannini, L., 1988. Deception Island (South Shetland): an area of active volcanism in Antarctica. Memoria de la Sociedad Geológica Italiana, 43: 117-122.
- Martini, M., Cellini Legittimo, P., Piccardi, G. and Giannini, L., 1984. Composition of hydrothermal fluids during the bradyseismic crisis which commenced at Phlegrean Fields in 1982. Bulletin of Volcanology, 47 (2): 267-273.
- Martini, M., Giannini, L. and Capaccioni, B., 1991. The influence of water on chemical changes of fumarolic gases: different characters and their implications in forecasting volcanic activity. Acta Vulcanologica, 1: 13-16.
- Ortiz, R., García, A., Risso, C. y Viramonte, J.G., 1993. Actividad volcánica en Decepción: la crisis de 1991-92. In: C.I.C.Y.T. (Ed.) V Simposio Estudios Antárticos.
- Ortiz, R., Valentín, A. y Grimalt, J., 1987. Actividad fumaroliana en Decepción. Estudio preliminar. II Simposio Español de Estudios Antárticos, Madrid, Acta, 229-237.
- Párica, C.A., Remesal, M.B. y Salani, F.M., 1990. Estudio isotópico preliminar de la isla Decepción, Antártida. XI Congreso Geológico Argentino, San Juan, Actas II: 255-258.
- Piccardi, G. and Cellini-Legittimo, P., 1983. A sampling and chemical analysis procedure for fumarolic gases. Mikrochimica Acta, II: 159-167.
- Smellie, J.L., 1988. Recent observations on the volcanic history of Deception Island, South Shetland Islands. British Antarctic Survey Bulletin, 81: 83-85.
- Vila, J., Martí, J., Ortiz, R., García, A. and Correig A.M., 1992. Volcanic tremors at Deception Island (South Shetland Islands, Antarctica). Journal of Volcanological and Geothermal Research., 53: 89-102.
- Villegas, M.T. y A.T. Caselli, 1993. Fumarolas de Decepción: evolución a lo largo del verano austral. Modelo de despresurización del acuífero. V° Simposio de Estudios Antárticos, Barcelona, España. Actas 1-15.
- Villegas, M.T., Caselli, A.T. y García, A., 1997a. Nuevas aportaciones en el estudio de las variaciones estacionales de los gases volcánicos de la Isla Decepción (Islas Shetland del Sur, Antártida). Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural. Madrid, España. Tomo 93, N° 1-4: 145-153.
- Villegas, M.T., Olmedillas, J.C. y R. Ortiz, 1993. Laboratorio portátil de gases volcánicos. V° Simposio de Estudios Antárticos, Barcelona, España. Actas 15-28.
- Villegas, M.T., R.Ortiz, A.Caselli and M.Cohen, 1997b. Chemical variations of fumarolic gases in Deception Island, South Shetland I., Antarctica. In The Antarctic Region: Geological Evolution and Processes. C.A. Ricci (Ed.) Terra Antarctica Publication pp.1077-1082, Italy.
- Wilkes, C., 1845. Narrative of the United States Exploring Expedition, during the years 1838, 1839, 1840, 1841, 1842, vols. I-V, Atlas, Philadelphia, Lea & Blanchard.

**Recibido:** 4 de octubre, 2000

**Aceptado:** 10 de octubre, 2001

# Edad, afinidades geoquímicas y tectónicas del pórfido riolítico de La Lidia, Sierra Norte de Córdoba

Armando MASSABIE, Diana MUTTI y Osvaldo NESTIERO

*Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires. Ciudad Universitaria Pabellón 2, 1428 Buenos Aires. E-mail: armando@gl.fcen.uba.ar*

**RESUMEN.** Se ha realizado un análisis de rocas riolíticas que afloran al norte de Deán Funes en la Sierra Norte de Córdoba. Se incluyen exposiciones que se hallan en Lomas del Durazno, ubicadas sobre el borde oriental de la depresión de las Salinas Grandes, y la estancia La Lidia localizada en el faldeo occidental de la sierra de Sauce Puncu. Estas rocas se asocian comúnmente en los afloramientos con sedimentitas y metasedimentitas eopaleozoicas poco deformadas, las cuales son a su vez consideradas como relictos saltuarios de depocentros mayores como la cuenca Chacoparanaense, Cordillera Frontal y Sierra de Famatina. Los estudios geoquímicos y petrográficos de las riolitas de Lomas del Durazno y La Lidia, muestran una buena vinculación entre ellas y proporcionan bases para su correlación con los pórfidos graníticos y los granitos calcoalcalinos eopaleozoicos de la Sierra Norte de Córdoba. La datación K-Ar sobre riolitas de La Lidia de  $526,9 \pm 21$  Ma se halla en acuerdo con la correlación estructural y geoquímica, la cual permite su vinculación con el ciclo tectomagmático Brasileño (Pampeano), el plutonismo Cámbrico pre-Famatiniense de las sierras de Córdoba, y el metamorfismo de contacto de la Formación La Clemira en la sierra de Ambargasta.

**Palabras clave:** *Geoquímica, Geocronología, Magmatismo, Tectónica, Sierra Norte, Córdoba*

**ABSTRACT.** Age, geochemical and tectonical affinities of La Lidia rhyolites, Sierra Norte de Córdoba. An analysis of rhyolitic rocks cropping out north of Deán Funes in Sierra Norte de Córdoba was undertaken at exposures in Lomas del Durazno, along the eastern border of Salinas Grandes basin, and at estancia La Lidia on the west flank of Sierra Sauce Puncu. These rocks are commonly associated in the area with weakly deformed Lower Palaeozoic sedimentites and metasedimentites considered to be isolated remains of larger depocentres like Chacoparanaense Basin, Cordillera Oriental and Sierra de Famatina. Geochemical and petrographical studies of both Lomas del Durazno and La Lidia rhyolites show close affinities with each other and provide the basis for correlation with Eopaleozoic granitic porphyries and calc-alkaline granites of Sierra Norte de Córdoba. A K-Ar age of  $526.9 \pm 21$  Ma from La Lidia rhyolites is in agreement with the structural and geochemical correlation which supports its association with the Brazilian tectomagmatic Cycle (Pampeano), the Cambrian Pre-Famatiniense plutonism of Sierras de Córdoba, and contact metamorphism in La Clemira Formation of Ambargasta Hill.

**Key words:** *Geochemistry, Geochronology, Magmatism, Tectonics, Sierra Norte, Córdoba*

## Introducción

En la Sierra Norte de Córdoba y su continuación hacia el norte en las sierras de Santiago del Estero, se localizan extensos afloramientos de pórfidos cuaríferos, de composición variable entre riolítica y dacítica, los cuales se hallan ausentes al sur de la megafactura Deán Funes (Massabie 1987; Massabie *et al.* 1997). Estos afloramientos de rocas hipabisales se asocian con frecuencia a exposiciones saltuarias de metasedimentitas y sedimentitas con variable grado de deformación dúctil, que son atribuidas al Paleozoico inferior (Quartino *et al.* 1978; Castellote 1982; Quartino y Quartino 1996; Massabie *et al.* 1997), y abren la posibilidad de su interpretación como relictos de

depocentros eopaleozoicos más ampliamente desarrollados en regiones vecinas circundantes hacia el norte y noroeste, como en la cuenca Chacoparanaense, Cordillera Oriental y sierra de Famatina (Mon y Dinkel 1974; Quartino y Quartino 1996; Massabie *et al.* 1997).

Estas relaciones geográficas de afloramientos individualizados en términos de su probable asociación causal, constituyen un marco de referencia de importancia sustantiva para avanzar en el conocimiento de la evolución tectónica del fallamiento fanerozoico eopaleozoico en las Sierras Pampeanas, motivo por el cual se presentan aquí algunos datos de edad y vinculaciones geoquímicas, que se orientan a contribuir con el análisis estructural regional de esta comarca de las

Sierras Pampeanas Orientales. Como parte de investigaciones más amplias sobre el fallamiento en porciones próximas a la localidad de Deán Funes, Córdoba, se efectuaron muestreos de rocas hipabisales ácidas en afloramientos localizados en la parte sur de la Sierra Norte, en su faldeo occidental, en la sierra de Sauce Puncu incluidas en la Hoja 18i, Deán Funes (Methol 1958) y en las estribaciones poco destacadas hacia el oeste aledañas a la depresión de las Salinas Grandes-Ambargasta, correspondientes a Lomas del Durazno, ubicadas dentro del área abarcada por la Hoja 17h, Chuña Huasi (Lucero 1969). Las muestras obtenidas fueron analizadas petrográficamente y geoquímicamente con la finalidad de establecer correlaciones más allá de sus afinidades litológicas identificables en afloramientos. Con aquellas muestras correspondientes a la sierra Sauce Puncu, ubicadas al oeste de la estancia La Lidia (Fig. 1), se efectuó además una

datación radimétrica. De este tipo de análisis se excluyeron los pórfidos de Lomas del Durazno, selección que se realizó debido al marcado desarrollo de brechamiento y microbrechamiento, en los afloramientos reconocidos.

### Geocronología

Se realizó la datación radimétrica sobre muestras de pórfidos cuarcíferos de afloramientos correspondientes a la porción occidental de la sierra de Sauce Puncu, al oeste de la estancia La Lidia (Methol 1958) que no muestran evidencias de deformación en los afloramientos. Son pórfidos riolíticos con fenocristales de oligoclasa, anortoclasa y cuarzo corroídos por la pasta microgranosa.

La anortoclasa, feldespatos alcalinos ricos en sodio, constituye individuos euhedrales a subeuhedrales aislados o bien en asociación con oligoclasa y forma la tercera parte del total de los fenocristales presentes. Su identificación se ha basado en características ópticas distintivas (Deer *et al.* 1966) que se han podido verificar en el estudio de secciones delgadas como son: baja birrefringencia y relieve con índices de refracción inferiores al bálsamo de Canadá, la presencia de maclado polisintético en dos direcciones, similar al del microclino pero más fino y tenue, a veces imperceptible, y la figura de interferencia biáxica negativa de ángulo 2V intermedio.

Los minerales máficos, escasos, han sido reemplazados por minerales opacos ferruginosos. Existen algunas texturas de microdeformaciones dadas por fracturas, flexuras y acuñamiento de maclado polisintético en plagioclasa, microfracturas en la pasta y una fina trama isorientada de recristalización sericítica.

La datación K-Ar fue realizada sobre roca total por Actlabs, Canadá, cuyo informe proporcionó los resultados analíticos que se reproducen a continuación:

<sup>40</sup> Ar rad, nl/g	% K	<sup>40</sup> Ar rad / <sup>40</sup> Ar total	Edad, Ma
85,4	3,66	0,98	526,9 ± 21

Esta edad cámbrica se suma a otras comunicadas con anterioridad. En la comarca de la Sierra Norte, Castellote (1985) señaló edades de 499 ± 20 Ma y 523 ± 15 Ma en Las Piedritas, para dacitas del «basamento macizo» bien expuestas en su porción occidental, a las que vinculó a una secuencia magmática de edad promediada 500 ± 20 Ma, y en la cual incluyó afloramientos de la sierra de Ambargasta. También Rapela *et al.* (1991) obtuvieron una edad para el pórfido granítico de Oncán de 494 ± 11 Ma, que confirma la importancia y extensión regional en la Sierra Norte de Córdoba del evento tectotérmico entre 490 Ma y 510 Ma.

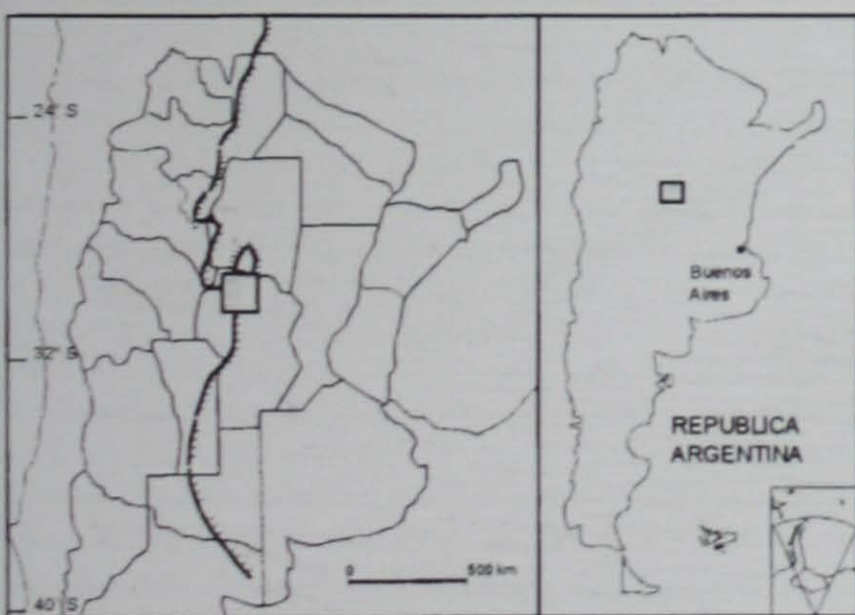
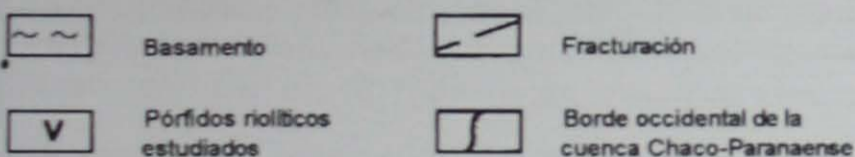
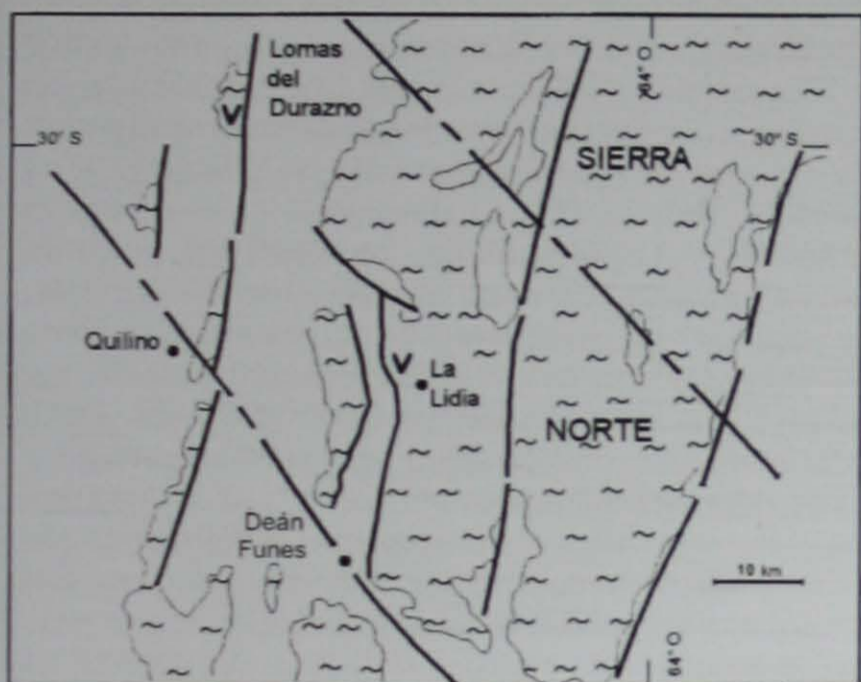


Figura 1: Ubicación de los afloramientos estudiados y su posición con respecto al borde occidental de la cuenca Chaco - Paranaense.

**Cuadro 1:** Composición química de los pórfidos La Lidia (ZC3) y Lomas del Durazno (ZM32).

%	ZC3(1)	ZC3(2)	ZM32(1)	ZM32(4)
SiO <sub>2</sub>	74,62	75,92	76,47	77,25
TiO <sub>2</sub>	0,26	0,24	0,10	0,09
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,52	12,11	11,22	11,28
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,20	2,26	1,33	1,22
MnO	0,04	0,06	0,04	0,03
MgO	0,47	0,43	0,31	0,23
CaO	0,58	0,56	0,80	0,41
Na <sub>2</sub> O	2,53	2,69	2,71	2,48
K <sub>2</sub> O	4,57	3,96	4,28	4,74
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,10	0,10	0,03	0,08
LOI	2,10	1,67	1,29	0,94
Total	99,99	100,01	98,58	98,75

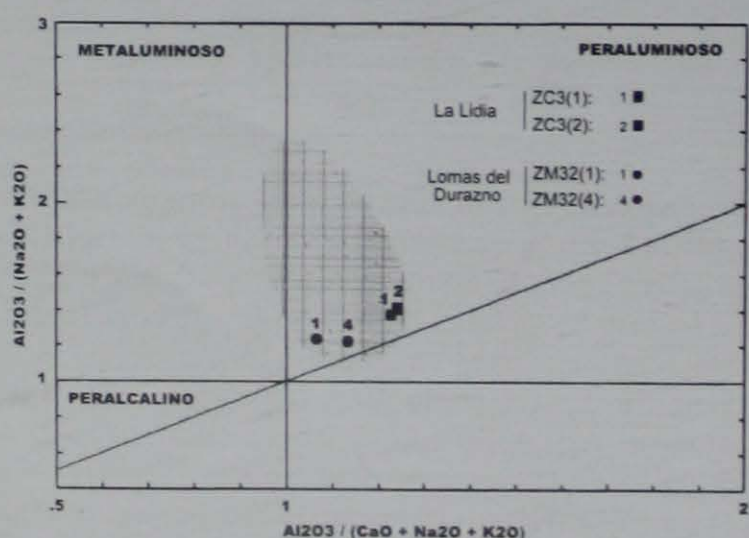
ppm	ZC3(1)	ZC3(2)	ZM32(1)	ZM32(4)
Ba	594	622	853	840
Sr	95	85	79	67
Y	38	34	31	41
Zr	142	136	117	123
Rb	182	186	140	199
Ta	<1	2	<1	<1
Hf	4,5	4,6	4,1	4,2
Th	16,2	16,2	14,0	14,8
La	31,6	29,1	30,5	44,5
Ce	57,0	53,0	62,0	66,0
Nd	24,0	21,0	25,0	31,0
Sm	6,2	5,6	5,5	7,2
Eu	0,9	0,9	0,8	0,9
Tb	<0,5	<0,5	<0,5	1,2
Yb	4,1	4,1	3,4	4,3
Lu	0,58	0,59	0,52	0,64

### Características y vinculaciones geoquímicas de los afloramientos La Lidia y Lomas del Durazno

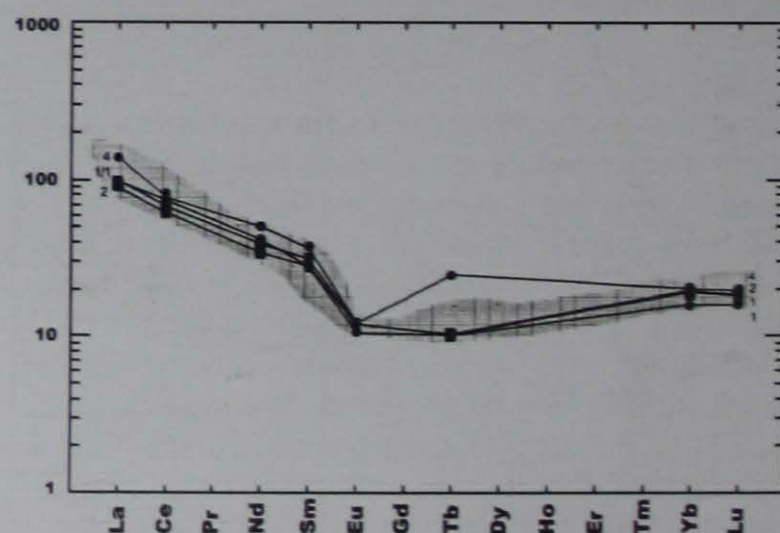
Los análisis químicos (Cuadro 1) fueron efectuados a partir de cuatro muestras de roca (dos Lidia y dos de Lomas del Durazno), procesadas en el laboratorio de análisis Actlabs de Canadá, sobre cuya base se adelantan aquí las valoraciones geoquímicas efectuadas.

Ambos afloramientos corresponden a rocas eruptivas peraluminosas de acuerdo con las relaciones mo-

lares establecidas mediante el índice de Shand (1927). La presencia de moscovita y sericita modales, junto a los valores normativos obtenidos en corindón conciben con los valores establecidos para la relación Mol. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / CaO + Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O siempre mayores que la unidad y hasta de 1,3; mientras que los de Mol. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O están comprendidos entre 1,2 y 1,6. Asimismo, son rocas de mediano a alto potasio que se ubican en el campo de los diagramas de las rocas de series calcoalcalinas y que de acuerdo con las relaciones postuladas por Middlemost (1985) se clasifican como riolitas, con contenidos en SiO<sub>2</sub> variable entre 74,62% (afloramiento La Lidia) y 77,25% (afloramiento Lomas del Durazno). Si bien son muy escasos los datos obtenidos por los autores del presente trabajo, con el incremento general de la acidez disminuyen el Mg, Fe, Al y Ti, en tanto que se incrementa la relación Rb/Sr desde 1,91 hasta 2,80. Las rocas porfídicas estudiadas poseen un contenido medio en elementos de tierras raras (ETR) de 130,9 ppm, y un diseño para sus valores normalizados a condrito que se homologa al determinado por Taylor y Mc Lennan (1985) para rocas provenientes de la corteza superior. No obstante, la relación promedio en K/Rb de 208 se ubica por debajo de los valores corticales normales (entre 260 y 320 de acuerdo con Wedepohl 1995). Si se comparan los extremos composicionales se observa además, que el aumento de acidez se incrementa con el contenido total de ETR, especialmente las pesadas, y con la anomalía negativa de Eu (Eu/Eu\*), definiendo una relación (La/Yb)<sub>N</sub> variable entre 5,1 y 6,9 junto a una magnitud de (Eu/Eu\*) < 1. A este respecto las anomalías detectadas en Eu indican un variable grado de fraccionamiento de la plagioclasa. Las curvas de normalización además evidencian una pendiente pronunciada en los ETRL (Fig. 3), que refleja un enriquecimiento de los componentes compatibles en estas rocas; mientras que la pendiente de los ETRP es baja y posee un diseño medio tendiente a la



**Figura 2:** Diagrama de saturación de alúmina de Shand de los riolitoides de los afloramientos La Lidia (ZC3-1 y ZC3-2) y Lomas del Durazno (ZM32-1 y ZM32-4). Se indica además el campo de riolitoides presentado por Lira *et al.* (1997).



**Figura 3:** Diagramas de tierras raras normalizadas respecto de condrito de las rocas de los afloramientos La Lidia (ZC3-1 y ZC3-2) y Lomas del Durazno (ZM32-1 y ZM32-4). Se indica además el campo de los riolitoides presentado por Lira *et al.* (1997).

planaridad para el conjunto. A este respecto se destaca para las dos muestras del afloramiento Lomas del Durazno, un leve incremento en los contenidos de los ETR, desde el Tb hasta el Lu.

Con respecto a los restantes elementos traza, se observa un relativamente alto contenido en Ba (variable entre 500 y 846 ppm) y en Rb (variable entre 140 y 189 ppm), mientras que los contenidos en Zr (comprendidos entre 117 y 142 ppm) son moderados, en tanto que los de Sr (variables entre 67 y 95 ppm) son bajos.

De acuerdo con diversos diagramas discriminitorios de ambiente geotectónico, por ejemplo, aquellos basados en contenidos de Rb vs. Yb + Nb (Pearce *et al.* 1984) y de Rb/10 vs. Hf vs. Ta x 3 (Harris *et al.* 1986), entre otros (Fig. 4a y c), los materiales procesados se ubican en el campo de los riolitoides provenientes de una tectónica colisional, más precisamente en el campo de granitoides de arco volcánico, aunque en transición al campo de intraplaca.

Cabe además señalar que en el diagrama de Bachelor y Bowden (1985) el material muestreado se ubica dentro del campo 1 ó de granitoides fraccionados a partir del manto, y también próximos al campo 2 ó de granitoides postcolisionales (Fig. 4b).

Los pórfidos riolíticos de los afloramientos La Lidia y Lomas del Durazno son homologables desde el punto de vista de su comportamiento geoquímico a los pórfidos graníticos de la Sierra Norte de Córdoba estudiados por Bonalumi (1988) y Rapela *et al.* (1991) para la región de Oncán, aunque a diferencia de ellos poseen signos de rocas menos evolucionadas y contenidos mayores de Fe, Mg, Ca y Ti. Asimismo, estas rocas se asemejan en sus tenores de elementos traza a los riolitoides calcoalcalinos de arco magmático caracterizados para la Sierra Norte-Ambargasta por Lira *et al.* (1997), aunque se interpreta que corresponden a términos menos evolucionados (Figs. 2, 3, 4a y b).

### Alcance de los resultados obtenidos

Sobre la base de la correlación de los afloramientos de pórfidos riolíticos de La Lidia y Lomas del Durazno, la edad obtenida de  $526,9 \pm 21$  Ma y atendiendo también a la correlación geoquímica de estas rocas con otros granitoides similares de las Sierras Pampeanas, y en particular de la Sierra Norte de Córdoba-Ambargasta, se suman evidencias acerca de su vínculo tectomagmático con el ciclo Brasiliano (Pampeano), en acuerdo con lo postulado por Lira *et al.* (1996) para la Sierra Norte-Ambargasta. Corresponde también apuntar a asociar esta eruptividad con el plutonismo cámbrico preFamatiniense de las Sierras de Córdoba (Rapela y Pankhurst 1996) y con la intrusividad causante del metamorfismo térmico en la Formación La Clemira (Castellote 1982), sierra de Ambargasta, como fuera señalado por Massabie *et al.* (1997).

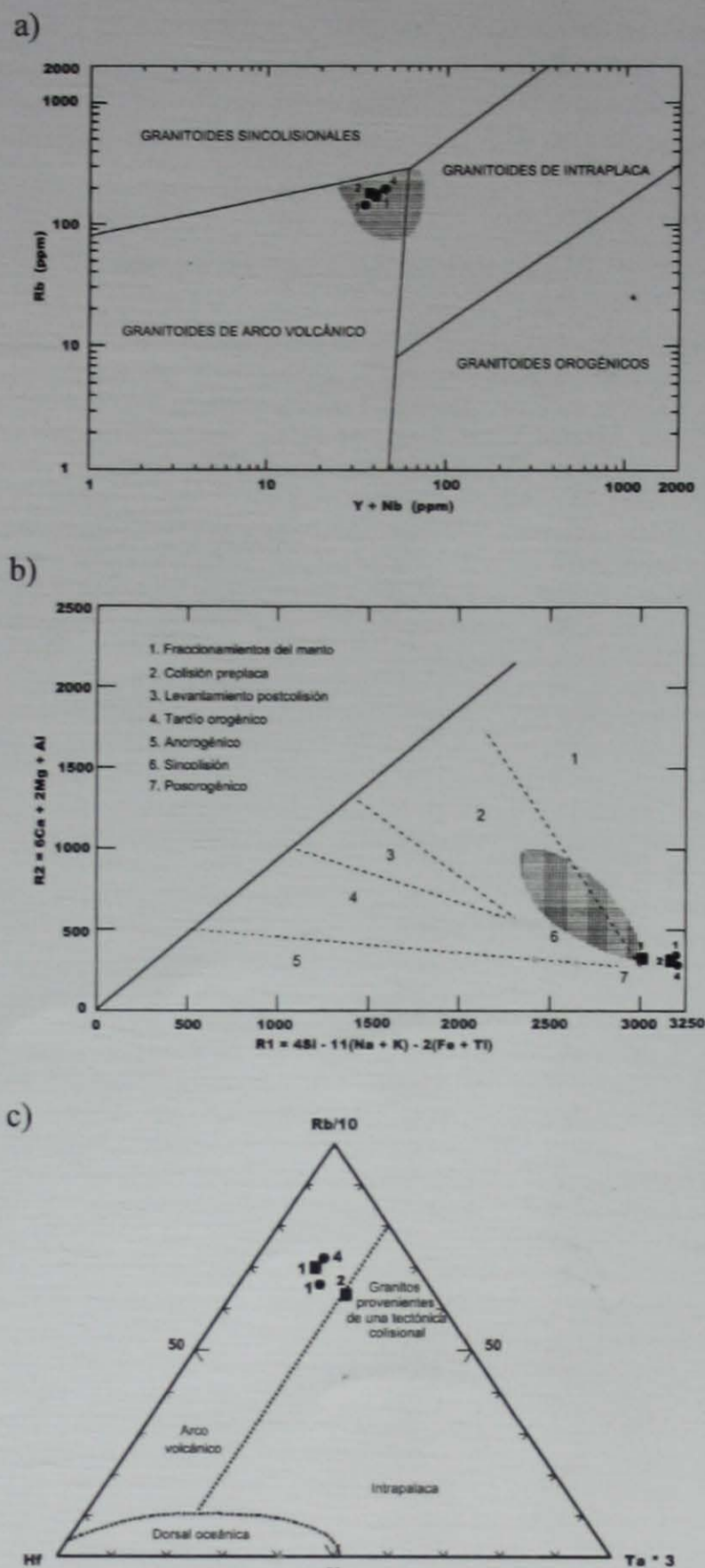


Figura 4: a, Diagrama discriminatorio de ambientes tectónicos según Pearce *et al.* (1984). Símbolos como en la figura 2. El sombreado indica la correspondencia con Lira *et al.* (1997). b, Diagrama tecto magmático de Bachelor y Bowden (1985), empleando los parámetros R1R2 de De La Roche *et al.* (1980). Símbolos como en la figura 2. El sombreado indica la correspondencia con Lira *et al.* (1997). c, Diagrama discriminatorio tectónico propuesto por Harris *et al.* (1986). Símbolos como en la figura 2.

### Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado en el marco del proyecto UBACYT TW20 y X048 Fallamiento fanerozoico en basamento, por lo que se agradece a la

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y la Universidad de Buenos Aires los fondos proporcionados para su desarrollo. Se agradecen también las adecuaciones y sugerencias efectuadas al trabajo por los árbitros.

#### TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Bonalumi, A., 1988. Características petrológicas y geoquímicas de los granitoides asociados a la mineralización de manganeso en el norte de la provincia de Córdoba y sur de Santiago del Estero, República Argentina. *Actas 5° Congreso Geológico Chileno*, 2: E47-E61. Chile.
- Castellote, P., 1982. La Formación La Clemira y edad de su metamorfismo (Sierra de Ambargasta, provincia de Santiago del Estero). *Acta Geológica Lilloana*, 16 (1): 71-76.
- Castellote, P., 1985. Algunas observaciones geológicas en las sierras de Ambargasta y Sumampa (Provincia de Santiago del Estero). *Acta Geológica Lilloana*, 16 (2): 259-269.
- De La Roche, H., Leterrier, J., Grandclaude, P., and Marchal, M., 1980. A classification of volcanic and plutonic rocks using RIR2-diagram and major elements analysis. Its relationships with current nomenclature. *Chemical Geology*, 29: 183-210.
- Deer, W., Howie, R. and Zussman, J., 1966. *An Introduction to the Rock Forming Minerals*. Longmans, Green and Co. Ltd., 528 p., London.
- Harris, N., Pearce, J., and Tindle, A., 1986. Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. In: Coward, M. P. and Reis, A.C. (eds), *Collision tectonics*. Special Publication Geological Society, 19: 67-81.
- Lira, R., Millone, H., Kirschbaum, A. y Moreno R., 1996. Granitoides calcoalcalinos de arco magmático en la Sierra Norte de Córdoba. *Actas 13° Congreso Geológico Argentino y 3° Congreso de exploración de Hidrocarburos*, 3: 497. Buenos Aires.
- Lira, R., Millone, H., Kirschbaum, A. and Moreno R., 1997. Calc-Alkaline Arc Granitoid Activity in the Sierra Norte - Ambargasta Ranges, Central Argentina. *Journal of South American Earth Sciences*, 10 (2): 157-177.
- Llambías, H., Quenardelle, S., Ortiz Suarez, A., y Prozzi, C., 1996. Granitoides Sincinemáticos de la Sierra Central de San Luis. *Actas 13° Congreso Geológico Argentino y 3° Congreso de exploración de Hidrocarburos*, 3: 487-496. Buenos Aires.
- Lucero, H., 1969. Descripción geológica de las Hojas 16h, Pozo Grande y 17h, Chuña Huasi, Provincias de Córdoba y Santiago del Estero. Dirección Nacional de Geología y Minería, Boletín 107, 39 p. Buenos Aires.
- Massabie, A., 1987. Neotectónica y sismicidad en la región de las Sierras Pampeanas Orientales, Sierras de Córdoba, Argentina. *Actas 10° Congreso Geológico Argentino*, 1: 271-274.
- Massabie, A., Mutti, D., Sanguinetti, A., Cegarra, M. y Mozetic, M., 1997. Fases de deformación dúctil en formaciones eopaleozoicas de la sierra de Ambargasta, Santiago del Estero, y su significado estratigráfico. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 52 (2): 209-218. Buenos Aires.
- Methol, E., 1958. Descripción geológica de la Hoja 18i, (Deán Funes) Córdoba. Dirección Nacional de Geología y Minería, Boletín 124, 71 p. Buenos Aires.
- Middlemost, E., 1994. Nming materials in the nehma/igneous rock system. *Earth Science Reviews*, 37: 215-224.
- Mon, R. y Dinkel, J., 1974. Geología de la comarca del cerro Remate (Provincias de Salta, Tucumán y Santiago del Estero) y nuevos datos sobre la distribución del Paleozoico inferior en el noroeste argentino. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 29 (1): 61-71. Buenos Aires.
- Pearce, J., Harris, N., y Tindle, A., 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25 (4): 956-983.
- Quartino, B. y Quartino, G., 1996. Las Sierras Australes de Santiago del Estero. Características diferenciales e interpretación. *Actas 13° Congreso Geológico Argentino y 3° Congreso de Exploración de Hidrocarburos*, 1: 543-574. Buenos Aires.
- Quartino, B., Massabie, A. y Morelli, J., 1978. Formaciones eopaleozoicas en el norte de Córdoba y sur de Santiago del Estero, su magmatismo y significado geológico. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 33 (1): 90-92. Buenos Aires.
- Rapela, C. and R. Pankhurst, 1996. The Cambrian Plutonism of the Sierras de Cordoba Pre-Famatinian subduction? and crustal melting. *Actas 13° Congreso Geológico Argentino y 3° Congreso de Exploración de Hidrocarburos*, 5: 491. Buenos Aires.
- Rapela, C., Pankhurst, R. y Bonalumi, A., 1991. Edad y Geoquímica del pórfido granítico de Oncán, Sierra norte de Córdoba, Sierras pampeanas, Argentina. *6° Congreso Geológico Chileno, Resúmenes ampliados*: 19-22. Chile.
- Shand, S. J., 1927. *Eruptive Rocks*. Van Nostrand Company, 360 pp., New York.
- Taylor, S. and Mc Lennan, S., 1989. The composition and evolution of continental crust: rare earth element evidence from sedimentary rocks. *Philosophical Transaction Royal Society*, A301: 381-399.
- Wedepohl, K., 1995. The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59 (7): 1217-1232.

**Recibido:** 12 de octubre, 2000

**Aceptado:** 10 de octubre, 2001



# Relevamiento magnetométrico terrestre de la zona de Pan de Azúcar, Puna jujeña (22°30' S- 66°00' O)

Claudia B. PREZZI

*Instituto de Geofísica D. Valencio, Dpto. de Cs. Geológicas, FCEyN, Universidad de Buenos Aires, Ciudad Universitaria, Pabellón 2, 1428, Buenos Aires.  
.FAX: 4788-3439, e-mail: prezzi@gl.fcen.uba.ar*

**RESUMEN.** En el borde sur de la cuenca de Laguna Pozuelos (Puna jujeña) aflora el Complejo Volcánico Pan de Azúcar. Está integrado por varios centros volcánicos dómicos de aproximadamente 12 Ma, formados por intrusivos menores, lavas y rocas piroclásticas de composición dacítica. El complejo volcánico aloja a la mina Pan de Azúcar, que constituye uno de los yacimientos polimetálicos más conocidos de la Puna Norte. Interpretaciones previas de líneas sísmicas ubicadas inmediatamente al norte de los afloramientos de Pan de Azúcar, han sugerido la presencia de un grupo de cuerpos no aflorantes, probablemente relacionados con dicho complejo volcánico. Por esta razón, con el objetivo de confirmar la existencia de estos intrusivos enterrados, y de estimar sus tamaños y profundidades, se realizó un relevamiento magnetométrico terrestre detallado del área de Laguna Pozuelos ubicada inmediatamente al norte de los afloramientos de Pan de Azúcar. A partir del modelado de las anomalías magnéticas detectadas, se determinó la existencia de un cuerpo de alrededor de 500 m de diámetro, enterrado aproximadamente a unos 200 m de profundidad. Considerando que el Complejo Volcánico Pan de Azúcar está vinculado con mineralizaciones de importancia económica, los resultados obtenidos en este estudio proveen un conjunto de datos valiosos para ser tenidos en cuenta en futuras exploraciones mineras del área.

**Palabras clave:** *relevamiento magnetométrico terrestre, Complejo Volcánico Pan de Azúcar, Puna jujeña, intrusivo no aflorante*

**ABSTRACT.** *Ground magnetic survey of Pan de Azúcar zone, Puna Jujeña (22°30' S-66°00' W).* The Pan de Azúcar Volcanic Complex crops out on the southern border of the Laguna Pozuelos basin (Puna Jujeña). It consists of several volcanic-dome centres of approximately 12 Ma age, formed by minor intrusives, lavas and pyroclastic rocks of dacitic composition. The volcanic complex hosts the Pan de Azúcar mine, which is one of the best known polymetallic ore deposits of the northern Puna. The interpretation of seismic lines located immediately to the north of Pan de Azúcar outcrops previously suggested the presence of a group of buried bodies, probably related to that volcanic complex. In order to confirm the existence of these buried intrusives, and to estimate their depths and sizes, a detailed ground magnetic survey was carried out in the Laguna de Pozuelos's area, immediately to the north of Pan de Azúcar. Modelling of the detected magnetic anomalies, suggests the existence of a body nearly 500 m in diameter, buried at a depth of approximately 200 m. Considering that the Pan de Azúcar Volcanic Complex is linked to economic ore mineralization, the results obtained in this study provide a set of valuable data to be taken into account for further mining exploration in the area.

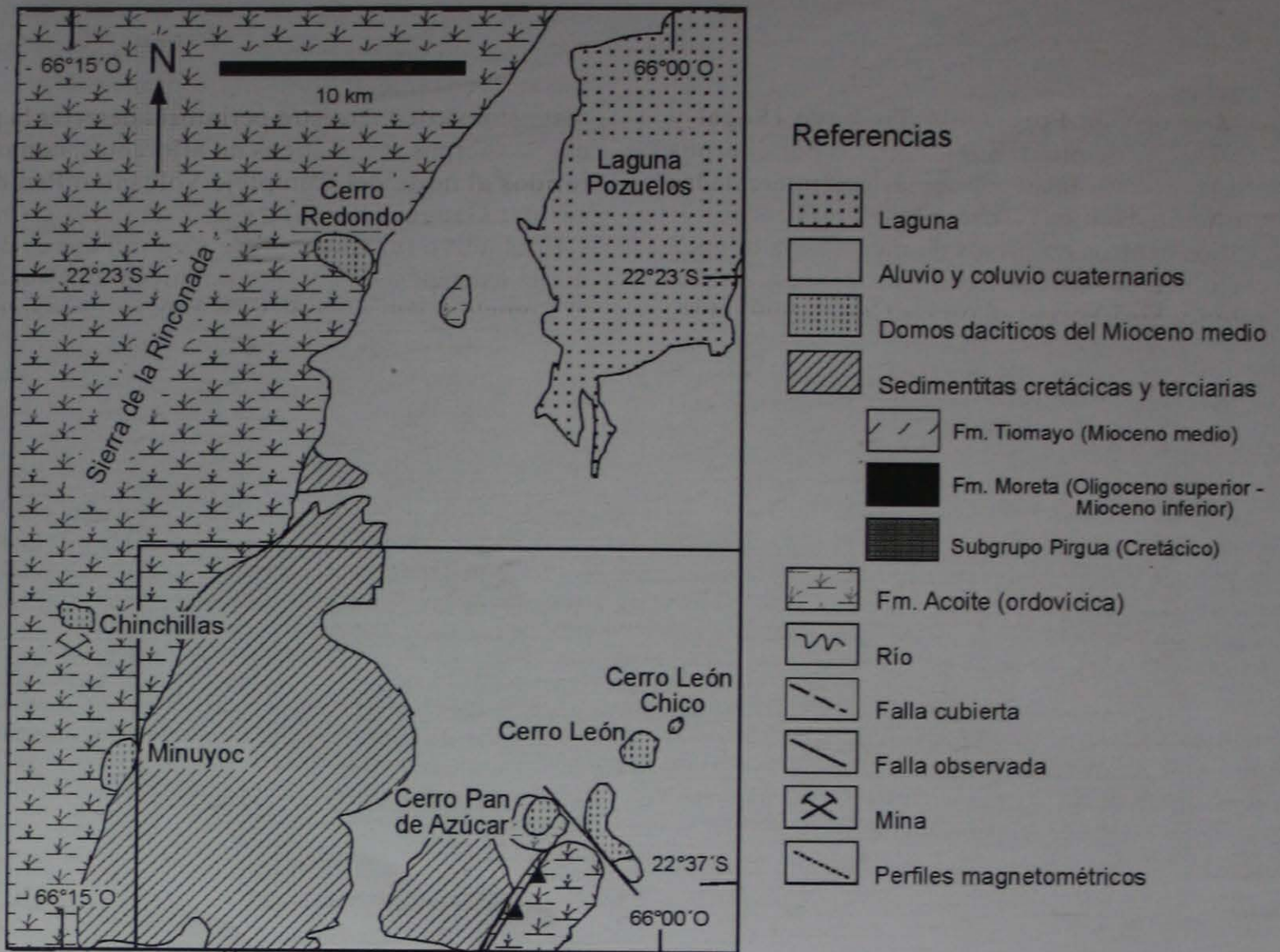
**Key words:** *ground magnetometric survey, Pan de Azúcar Volcanic Complex, Puna Jujeña, buried intrusive*

## Introducción

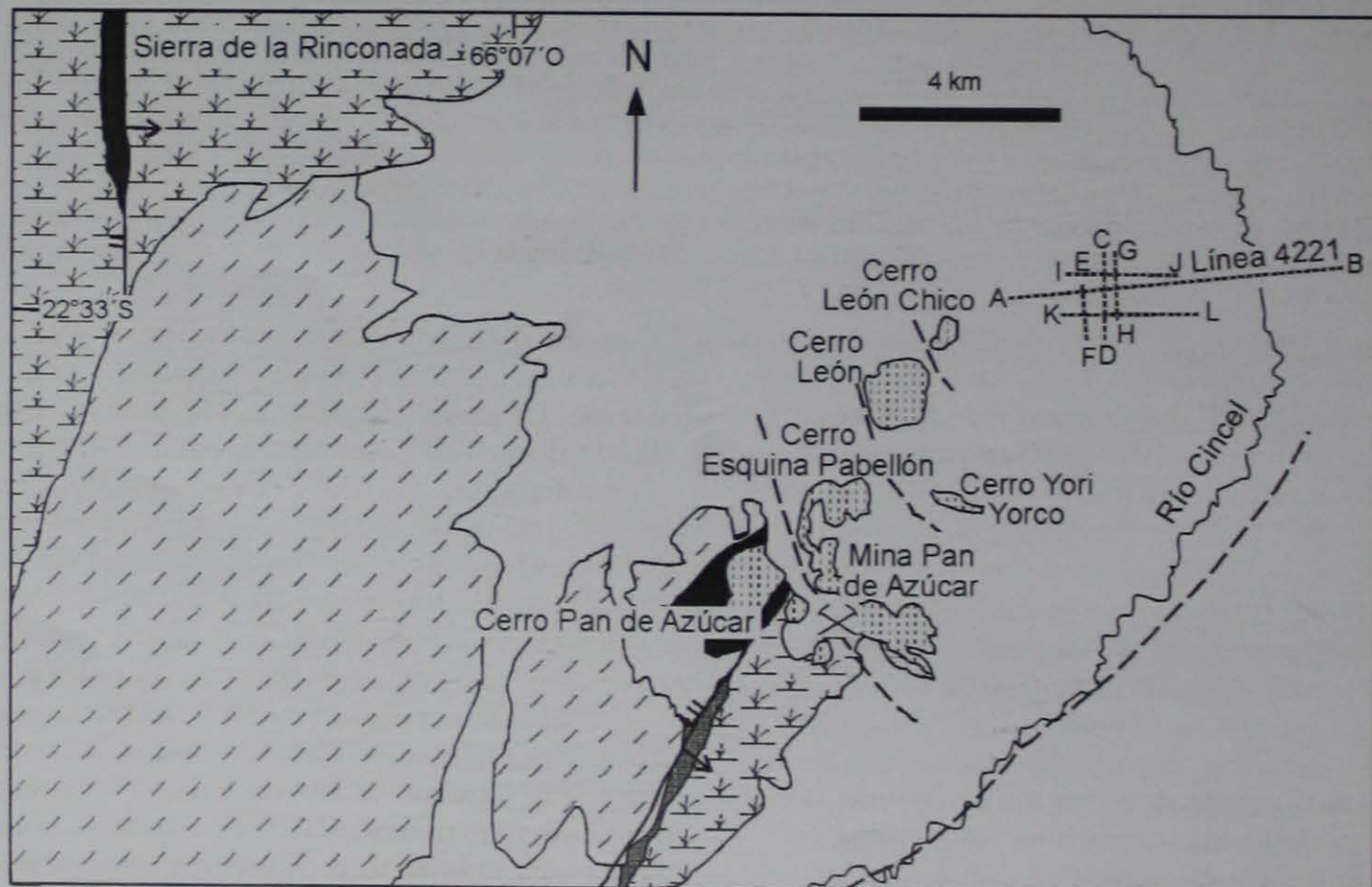
La zona de Laguna Pozuelos constituye una depresión de rumbo N - S situada en la Puna Norte (Fig. 1a), con una altitud media de 3.400 m sobre el nivel del mar. Corresponde a una cuenca endorreica ubicada en una posición de retroarco, al este del arco volcánico mioceno-reciente (Igarzábal 1978; Gangui 1998a). Está marginada por dos fallas de rumbo submeridiano, que actuaron fundamentalmente como planos de corrimiento, sobre los que se elevaron los bloques de la sierra de Rinconada al oeste (Fig. 1a) y de la sierra de Cochino-Escaya al este (Coira *et al.* 1996).

El basamento de la cuenca de la Laguna Pozuelos

está dado por la Formación Acoite (consistente de sedimentos marinos ordovícicos tempranos) y por el Complejo volcano-sedimentario ordovícico Cochino-Escaya. La Formación Acoite aflora al oeste de la cuenca en la sierra de Rinconada (Fig. 1a), mientras que el Complejo volcano-sedimentario Cochino-Escaya aflora al este, en la sierra de Cochino (Coira *et al.* 1999; Coira *et al.* en prensa). Sedimentos cretácicos inferiores pertenecientes al Subgrupo Pírgua, se identifican aisladamente al sur y sudoeste de la cuenca (Coira 1979) (Fig. 1b). Secuencias terciarias continentales correspondientes a la Formación Moreta y a la Formación Tiomayo se observan en las zonas este y sur del área de Pozuelos (Fig. 1b).



a)



b)

Figura 1: a. Mapa geológico esquemático de la zona de Laguna Pozuelos (modificado de Caffè 1999). El área dentro del recuadro corresponde al área mapeada en la figura b. b. Mapa geológico esquemático de la zona de Pan de Azúcar (modificado de Caffè 1999).

En el extremo sur de Laguna Pozuelos aflora el Complejo Volcánico Pan de Azúcar (Figs. 1a y b). Éste se apoya sobre el basamento ordovícico, la Formación Moreta y la Formación Tiomayo (Segal y Caffè 1999). El complejo está integrado por cuerpos intrusivos menores y lavas y piroclastitas intercaladas de composición dacítica (Caffè 1998) y está constituido por varios centros eruptivos de morfología cómica (p. ej. cerro Pan de Azúcar, León Chico, León, Esquina Pabellón y Yori Yorco) (Coira y Caffè 1999) (Fig. 1b). Estos cuerpos poseen una edad mínima K/Ar de  $12 \pm 2$  y  $13 \pm 1$  Ma (Coira 1979). Las áreas de emisión de estos centros dacíticos estuvieron controladas por una fracturación de rumbo aproximadamente ONO - ESE, configurando un sistema en echelón (Coira 1979) (Fig. 1b).

La mina Pan de Azúcar ( $22^{\circ} 36' S - 66^{\circ} 03' O$ ) es uno de los yacimientos polimetálicos más conocidos de la Puna Norte por su elevado contenido de Pb, Zn y Ag (Coira 1979; Caffè 1998) (Fig. 1b). Pertenece a la provincia minera cenozoica de la Puna jujeña, formando parte de un grupo de depósitos minerales muy conspicuos, asociados a domos volcánicos dacíticos eruptados durante el Mioceno medio tanto en la Puna como en el Altiplano Boliviano (Cinturón Estañífero Boliviano) (Coira 1994; Caffè y Coira 1999). La mena de Pan de Azúcar se dispone en forma de vetas, rellenando fisuras o en stockwork, donde la mineralogía de la mena (Segal de Svetliza 1980) está integrada principalmente por blenda, galena, marcasita y pirita. El yacimiento fue explotado en siete niveles, hasta 250 m por debajo de la superficie. Las reservas en el momento de cierre de la mina (1990) alcanzaban 59.000 t de mena entre los 130-330 m de profundidad (Caffè 1998).

Ganguí (1998a) a partir de líneas sísmicas realizadas por YPF entre 1981 y 1985, infirió la existencia de cuerpos intrusivos enterrados al norte del Complejo Volcánico Pan de Azúcar. La zona sur de la cuenca de Pozuelos está cubierta por seis líneas sísmicas de reflexión de dirección aproximada E-O y dos líneas perpendiculares a las anteriores de rumbo N-S (Ganguí y Götze 1996; Ganguí 1998a; Ganguí 1998b). Ganguí (1998a) interpretó que el extremo este de la línea 4221 (E-O) (Fig. 1b) mostraba la presencia de cuerpos no aflorantes relacionados con el Complejo Volcánico Pan de Azúcar. Dichos cuerpos se encontrarían intruyendo al basamento ordovícico sedimentario y a secuencias terciarias continentales y estarían cubiertos por relleno cuaternario (Ganguí 1998a).

Por otra parte, es importante mencionar que un relevamiento aeromagnético regional (Rankin y Triggs 1997) permitió identificar una importante correspondencia entre afloramientos de domos dacíticos y fuertes anomalías magnéticas locales en la región. La región de la Puna presenta varios ejemplos conspicuos de anomalías magnéticas y/o radiométricas asociadas con mineralizaciones conocidas (p.ej. minas Chinch-

illas, Pirquitas, Abra de la Mina y Pan de Azúcar) (Chernicoff *et al.* 1996; Rankin y Triggs 1997). Estas últimas características indicaron que el método magnetométrico terrestre permitiría detectar la presencia de cuerpos magmáticos no aflorantes, como los inferidos al norte del Complejo Volcánico Pan de Azúcar por Ganguí (1998a) a partir de datos sísmicos.

El objetivo fundamental de este trabajo es determinar la existencia de cuerpos dacíticos no aflorantes en el Complejo Volcánico Pan de Azúcar, mediante la realización de un relevamiento magnetométrico terrestre detallado del área de Laguna Pozuelos ubicada inmediatamente al norte de dicho Complejo. Las anomalías magnéticas detectadas por métodos geofísicos aéreos o terrestres, se originan a partir de la existencia de una componente de magnetización inducida (generada por la interacción del campo magnético terrestre con la susceptibilidad magnética del depósito o cuerpo prospectado) y de una componente de magnetización remanente (debida a la intensidad y dirección de la remanencia paleomagnética del depósito o cuerpo prospectado) (Taylor 2000). Por lo tanto, al contarse con datos de magnetismo remanente y de susceptibilidad magnética obtenidos previamente en el área (Prezzi 1999, Prezzi *et al.* 2000; Prezzi *et al.* 2001) los datos de magnetometría terrestre pueden ser modelados de manera mucho más acotada y restringida. Además, considerando que existen mineralizaciones de importancia económica asociadas al Complejo Volcánico Pan de Azúcar (minas Pan de Azúcar, España y Potosí) (Segal de Svetliza 1980), la estimación de tamaño y profundidad de cuerpo/s dacítico/s no aflorante/s en el sector podría brindar un valioso dato para la futura exploración minera de esta zona.

## Metodología

Con un magnetómetro protónico ENVI MAG de Scintrex se midió el campo magnético total en cada estación. La ubicación de cada estación (Latitud, Longitud y altitud) se determinó mediante el uso de GPS. La equidistancia utilizada entre estaciones fue de 25 m, habiéndose medido el campo magnético total en 637 estaciones distribuidas en tres perfiles de rumbo aproximado E-O y en tres perfiles de rumbo aproximado N-S (Fig. 1b). El primer perfil que se llevó a cabo fue el AB de 6.700 m de longitud (Fig. 1b). Dicho perfil fue realizado a lo largo del extremo este de la traza de la línea sísmica 4221 con la finalidad de tratar de determinar la existencia y ubicación de posibles anomalías magnéticas asociadas con la presencia de cuerpos magmáticos no aflorantes inferidos por Ganguí (1998a y b). Los perfiles restantes tienen una extensión de entre 1200 y 2775 metros, fueron efectuados de manera aproximadamente paralela y perpendicular a una zona del perfil AB a lo largo de la

cual se detectaron valores anómalos del campo magnético terrestre. La susceptibilidad magnética de las distintas formaciones geológicas es conocida a través de los estudios de Rankin y Triggs (1997), Prezzi (1999), Prezzi *et al.* (2000) y Prezzi *et al.* (2001).

Los valores medidos se corrigieron teniendo en cuenta la variación diurna del campo magnético terrestre, para lo cual durante el relevamiento se repitieron periódicamente (p.ej. cada hora) mediciones en una misma estación utilizada como base. El valor de la variación diurna osciló alrededor de los 50 nT. Para calcular las anomalías, a los datos corregidos se les restaron los valores del International Geomagnetic Reference Field (IGRF) correspondientes al mes de Mayo de 2000. A partir de las anomalías calculadas,

se confeccionaron perfiles y un mapa (Figs. 2 y 3). Luego, dichas anomalías fueron interpretadas cuali y cuantitativamente y modeladas (Fig. 4) mediante el programa de computación GEOMODEL 2.01 para Windows 95/98 (Cooper 2000) teniendo en cuenta la información geológica disponible.

### Resultados obtenidos

En la figura 2 se presentan las anomalías magnéticas detectadas a lo largo de cada uno de los perfiles llevados a cabo. Puede verse que mientras dos de los perfiles de dirección E-O (perfiles AB e IJ) muestran

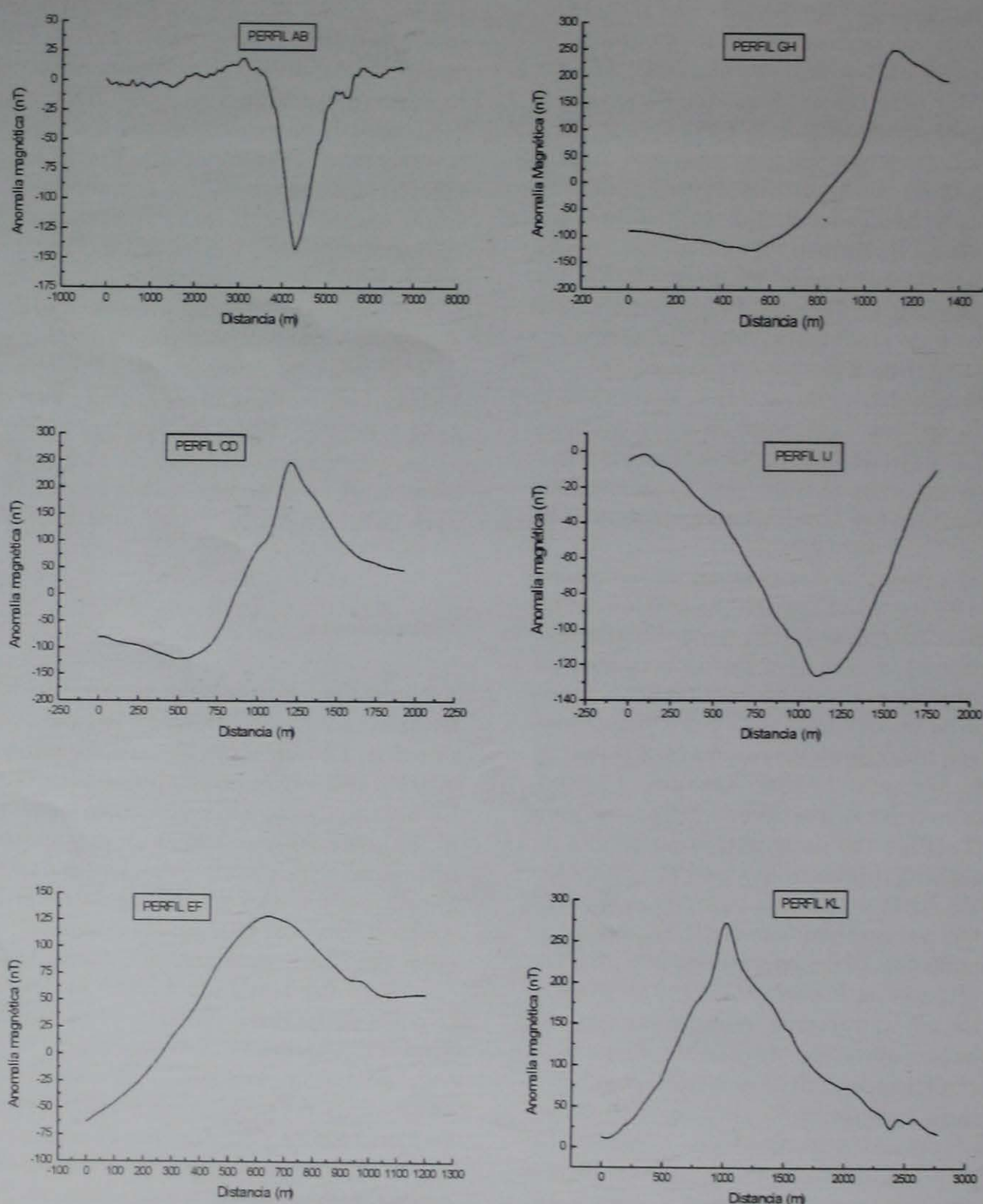
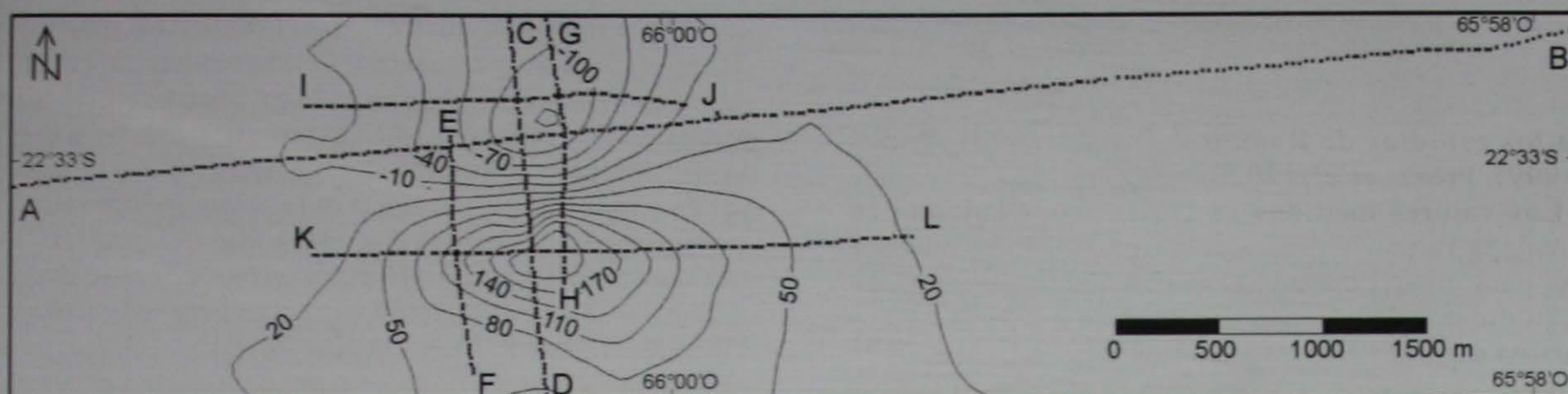


Figura 2: Anomalías magnéticas detectadas a lo largo de los distintos perfiles realizados. La ubicación de los mismos se muestra en la Fig. 1b.



**Figura 3:** Mapa de anomalías magnéticas terrestres de la zona en estudio. Los valores de anomalía magnética están expresados en nT. Los intervalos entre líneas de contorno son de 30 nT. Las líneas de puntos indican los perfiles relevados (cada punto indica una estación de medición). AB, CD y EF: perfiles modelados en la figura 4.

anomalías negativas, la anomalía calculada para el tercer perfil E-O (perfil KL) es positiva. Por otro lado, a lo largo de los perfiles de dirección N-S (perfiles CD, EF y GH) las anomalías registradas toman valores positivos y negativos. A partir del mapa confeccionado (Fig. 3) se observó la existencia de una anomalía dipolar reversa, presentando un mínimo (-150 nT) en el sector norte y un máximo (250 nT) en el sector sur de la zona de trabajo. Si dicha anomalía fuese generada por una componente de magnetización inducida únicamente, debería registrarse un máximo en el norte y un mínimo en el sur.

Se realizó un modelado 2.5 D de los tres perfiles de dirección N-S (perfiles GH, CD y EF) (Fig. 4) teniendo en cuenta la presencia de una componente de magnetización remanente reversa utilizando los valores obtenidos a partir del estudio paleomagnético llevado a cabo con anterioridad (Prezzi 1999; Prezzi *et al.* 2000; Prezzi *et al.* 2001). En dicho estudio, se determinó una dirección media de magnetización remanente natural para el cerro León Chico dada por una declinación de  $178^\circ$ , una inclinación de  $38^\circ$  y una intensidad de 340 nT.

Considerando que la susceptibilidad media de los cuerpos dacíticos es de  $300 \times 10^{-6}$  CGS (Prezzi 1999, Prezzi *et al.* 2000), se calculó el correspondiente valor del coeficiente de Koenigsberger (Q). El coeficiente Q es un parámetro conveniente para expresar la importancia relativa de la magnetización remanente ( $J_r$ ) vs. la magnetización inducida ( $J_i$ ) ( $Q = J_r/J_i$ ). Para los cuerpos magmáticos en estudio se obtuvo un valor de 48 para Q. Esto indica que la anomalía detectada está casi completamente dominada por la componente de magnetización remanente. El modelado se realizó suponiendo la existencia de un cuerpo simple (Fig. 4), uniformemente magnetizado, con una extensión de 500 m en la dirección perpendicular al rumbo de los perfiles. Dicho cuerpo se encontraría intruyendo rocas sedimentarias que poseen una susceptibilidad media de  $5 \times 10^{-7}$  CGS (Prezzi 1999, Prezzi *et al.* 2000).

Los perfiles de dirección E-O (perfiles AB, IJ y KL) no fueron modelados debido a que atraviesan sólo una

parte de la anomalía (ver mapa Fig. 3). Mientras que los perfiles AB e IJ registran sólo un mínimo, el perfil KL presenta sólo un máximo; por lo tanto no constituyen perfiles representativos de la anomalía dipolar detectada y carece de sentido geológico y geofísico realizar un modelado de los mismos.

El modelado de los perfiles CD, EF y GH (Fig. 4) tiende a confirmar la hipótesis de la existencia de un cuerpo simple, de alrededor de 500 m de diámetro, cuya profundidad mínima se encontraría entre los 140 y los 310 metros. Al respecto es importante recordar la conocida propiedad de los campos potenciales por la cual fuentes con geometrías y distribuciones diferentes pueden dar origen a respuestas idénticas. El ejemplo más ilustrativo de esta indeterminación es la equivalencia entre las anomalías magnéticas producidas por una esfera uniformemente magnetizada y por un dipolo puntual ubicado en el centro de la esfera. Otro caso importante, es el de la correspondencia entre las señales generadas por una fuente compacta profunda y por una fuente somera más extensa. Sin embargo, esta ambigüedad del modelado puede ser resuelta si se cuenta con información adicional (datos de magnetismo remanente y susceptibilidad, líneas sísmicas, etc.).

## Discusión y conclusiones

Es importante destacar que en este trabajo quedó de manifiesto la importancia que tiene el conocimiento de la dirección e intensidad del magnetismo remanente de los centros volcánicos en estudio para poder arribar a una correcta interpretación de las anomalías magnetométricas detectadas. Resultó imposible llevar a cabo el modelado únicamente sobre la base de la componente de magnetización inducida, fue necesario considerar una importante componente de magnetización remanente reversa para lograr una buena aproximación de las anomalías calculadas con las anomalías observadas. Este hecho debe ser tenido en

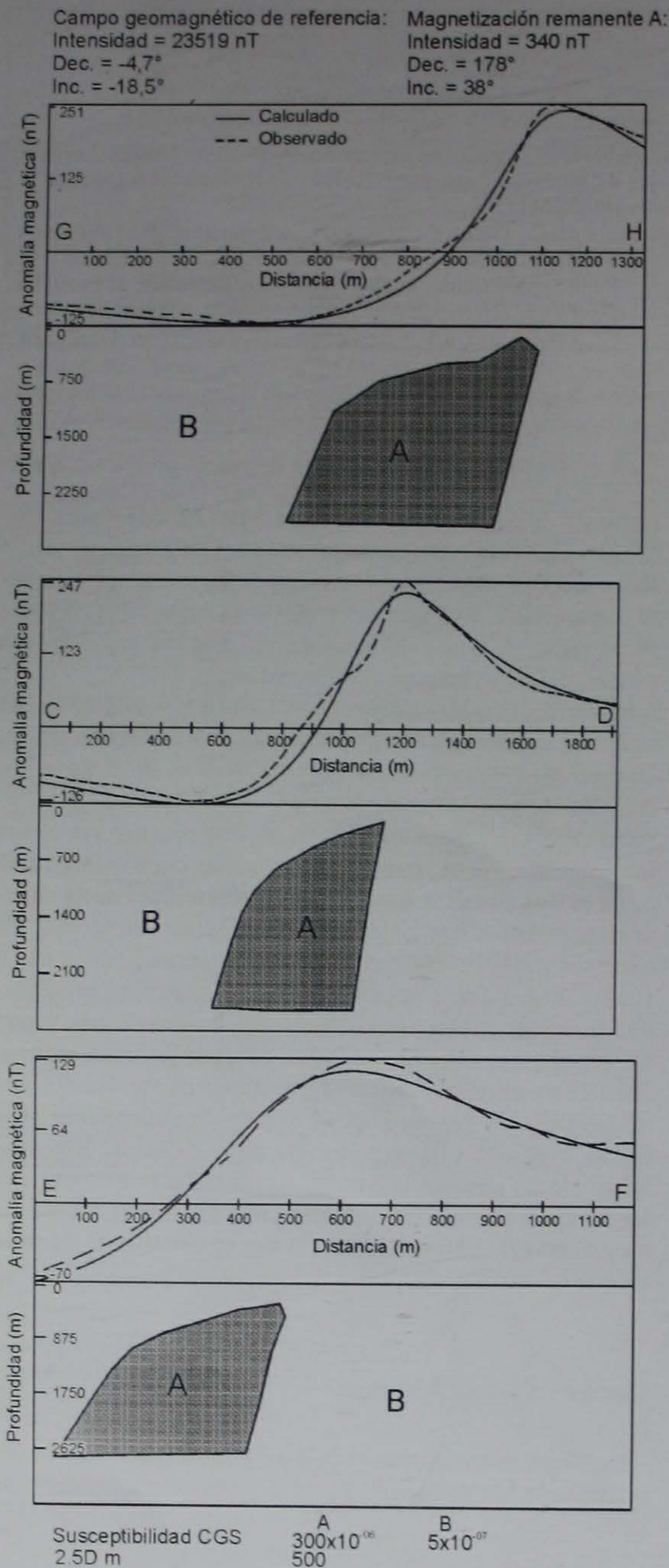


Figura 4: Modelado magnético 2.5 D para los perfiles AB, CD y EF, comparando los valores observados y calculados.

cuenta al realizar interpretaciones de relevamientos magnetométricos tanto aéreos como terrestres de la región de la Puna, donde existe una importante correspondencia entre afloramientos de domos dacíticos y

fuertes anomalías magnéticas locales (Rankin y Triggs 1997). Muy raramente la magnetización remanente es conocida y considerada en el análisis de los relevamientos magnetométricos, en parte debido a que la contribución de la componente remanente en general es pequeña comparada con la componente inducida y en parte debido a que el estudio del magnetismo remanente requiere la aplicación de técnicas de muestreo y de laboratorio específicas y laboriosas (Taylor y Grocott 1999; Taylor 2000).

El modelado de las anomalías detectadas en este relevamiento magnetométrico terrestre indica la existencia de un cuerpo dacítico no aflorante (previamente inferido por Gangui 1998b) cubierto por relleno cuaternario, inmediatamente al norte de los afloramientos del Complejo Volcánico Pan de Azúcar. La estimación del tamaño y la profundidad de dicho cuerpo no aflorante resulta valiosa para la futura exploración minera del sector, ya que el Complejo Volcánico Pan de Azúcar aloja un yacimiento que fue explotado económicamente alcanzando profundidades de 250 metros.

Por otra parte, distintos autores (Coira 1979; Chernicoff *et al.* 1996; Coira *et al.* 1996; Coira y Caffé 1999) han propuesto la existencia de una caldera antigua (miocena) de grandes dimensiones ahogada bajo la cubierta sedimentaria que rellena la depresión de Pozuelos. Coira *et al.* (1996) sugirieron que los complejos dómicos de la zona de Pozuelos (Cerro Redondo, Chinchillas, Pan de Azúcar) (Fig. 1a) representarían las fases magmáticas finales de dicho sistema magmático caldérico. Las evidencias más significativas que avalan la mencionada hipótesis son la observación de fracturas anulares de gran escala como la marcada por el río Cincel (Fig. 1b); la existencia de secuencias piroclásticas (post 20 Ma - pre 12 Ma) en el interior y bordes de dichas fracturas, y las anomalías aeromagnéticas detectadas en la zona por Chernicoff *et al.* (1996) (Coira y Caffé 1999). El cuerpo enterrado determinado en este trabajo se encuentra ubicado al nordeste del cerro León Chico (Fig. 1b), reforzando la hipótesis de que los complejos dómicos de Pozuelos se disponen siguiendo la traza de la fractura anular asociada al río Cincel, que marcaría el borde de la caldera oculta. A partir de esta interpretación se abrirían nuevas expectativas asociadas a otros sectores, donde pudiesen existir otros cuerpos periféricos no aflorantes como el detectado en este trabajo, otorgando mayor potencial económico a esta región.

Considerando los resultados obtenidos, se propone continuar con el relevamiento magnetométrico terrestre de esta zona, con la finalidad de confirmar la existencia del mencionado sistema magmático caldérico oculto, determinando con mayor precisión sus bordes y su extensión y de detectar la presencia de otros cuerpos dacíticos no aflorantes que pudiesen tener interés económico.

## Agradecimientos

El Instituto de Geología y Minería de la Universidad Nacional de Jujuy y la Dra. Beatriz Coira brindaron un importantísimo apoyo logístico que posibilitó la realización de este trabajo. Se desea agradecer especialmente a la familia Justí por su hospitalidad y a Roberto Rojas y Hernán Justí por su invaluable colaboración durante las tareas de campo. El Dr. G.R.J. Cooper (Geophysics Department, University of the Witwatersrand, Johannesburg, Sudáfrica) generosamente permitió el libre acceso al programa de computación GEOMODEL 2.01 para Windows 95/98. La Universidad de Buenos Aires financió esta investigación a través del subsidio UBACyT JW08. El Instituto de Geofísica D. Valencio proveyó todo el equipamiento necesario. Las cuidadosas revisiones realizadas por los Drs. C. Chernicoff, A. Introcaso y P. Caffè contribuyeron enormemente a mejorar este trabajo.

## TRABAJOS CITADOS EN EL TEXTO

- Caffè, P., 1998. Origen y Evolución de fluidos hidrotermales en el sistema epitermal Pan de Azúcar, Puna Norte, Argentina. *Actas 10° Congreso Latinoamericano de Geología y 6° Congreso Nacional de Geología Económica*, 3: 208-213. Buenos Aires, Argentina.
- Caffè, P., 1999. Complejos volcánicos dómicos del Terciario superior de Puna norte: sus implicancias magmatotectónicas y metalogenéticas. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Universidad Nacional de Córdoba, 421 p. (Inédito).
- Caffè, P. y Coira, B., 1999. Complejos de domos volcánicos del Mioceno medio de Puna Norte. Un modelo geológico y metalogenético para yacimientos epitermales de metales de base ricos en Ag (Sn). En: Zappettini, E. (Ed.): *Recursos minerales de la República Argentina*, Anales 35: 1569-1578. Instituto de Recursos Minerales, SEGEMAR, Buenos Aires, Argentina.
- Coira, B., 1979. Descripción geológica de la Hoja 3c, Abra Pampa, Provincia de Jujuy. Servicio Geológico Nacional, Boletín 170, 90p., Buenos Aires.
- Coira, B., 1994. Metallogenic events in the framework of magmatic-tectonic evolution of the Northern Puna of Argentina during the late Cenozoic. *Comunicaciones*, 45: 67-76.
- Coira, B. y Caffè, P., 1999. Volcanismo Cenozoico de Puna Norte. En: González Bonorino G., Omarini, R. y Viramonte, J. (Eds.): *Geología del Noroeste Argentino*, 1: 371-386. Relatorio 14° Congreso Geológico Argentino, Salta.
- Coira, B., Caffè, P. y Soler, M., 1996. Interpretación geológica del relevamiento aeromagnético de la Puna Septentrional, Jujuy y Salta. Área depresión de Pozuelos, Geología y Minería. Dirección Nacional del Servicio Geológico, Serie Contribuciones Técnicas-Geofísica, 1: 11-13. Buenos Aires.
- Coira, B., Kay, S., Perez, B., Woll, B., Hanning, M. and Flores, P., 1999. Magmatic sources and tectonic setting of Gondwana margin Ordovician magmas, northern Puna of Argentina and Chile. En: Ramos, V. and Keppie, D. (Eds.): *Laurentian-Gondwanan connections before Pangea*. GSA Special Paper, 336: 1-26.
- Coira, B., Caffè, P., Ramirez, A., Chayle, W., Diaz, A., Rosas, S., Perez, A., Perez, E., Orosco, O. y Martinez, M., 1998. *Hola Geológica 2366-I Mina Pirquitas (escala 1:250.000)*. Dirección Nacional del Servicio Geológico. Secretaría de Minería de la Nación. En prensa.
- Cooper, G. R., 2000. Geomodel 2.01 for Windows 95/98. Software de modelado gravimétrico y magnetométrico. License N° 0005GM11UK.
- Chernicoff, C., Garea, G., Rankin, L. y Zappettini, E., 1996. Interpretación geológica del relevamiento aeromagnético de la Puna Septentrional, Jujuy y Salta. Área depresión de Pozuelos, Geofísica. Dirección Nacional del Servicio Geológico, Serie Contribuciones Técnicas-Geofísica, 1: 14-17. Buenos Aires.
- Ganguí, A., 1998a. A combined structural interpretation based on seismic data and 3-D gravity modeling in the Northern Puna/Eastern Cordillera, Argentina. *Berliner Geowissenschaftliche Abhandlungen (B)27*, 176p. Berlin, Alemania.
- Ganguí, A., 1998b. Seismic stratigraphy of the Pozuelos basin, Northern Puna, Argentina. *Actas 10° Congreso Latinoamericano de Geología y 6° Congreso Nacional de Geología Económica*, 1: 12-17. Buenos Aires, Argentina.
- Ganguí, A. and Götze, J-H., 1996. The deep structure of the Northern Puna, Argentina - Constraints from 2D seismic data and 3D gravity modeling. *Actas 13° Congreso Geológico Argentino y 3° Congreso de Exploración de Hidrocarburos*, 2: 545-565. Buenos Aires, Argentina.
- Igarzabal, S., 1978. La Laguna de Pozuelos y su ambiente salino (Dpto. de Rinconada, Prov. de Jujuy). *Acta Geológica Lilloana*, 15 (1):79-104.
- Prezzi, C., 1999. Evolución Geodinámica de la Puna sobre la base de estudios paleomagnéticos. Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires, 320 p. (Inédito).
- Prezzi, C., Somoza, R., Caffè, P. and Coira, B., 2000. Vertical axis rotations along the Central Andes: New data from Northern Argentine Puna. *Actas 31° International Geological Congress*, Río de Janeiro, Brasil.
- Prezzi, C., Somoza, R., Caffè, P. y Coira, B., 2001. Estudio paleomagnético de la zona de Laguna Pozuelos (Puna Jujeña), Argentina: ausencia de rotaciones según ejes verticales. *Actas XI Congreso Latinoamericano de Geología*, Montevideo, Uruguay.
- Rankin, L. y Triggs, D., 1997. Área de la Puna Argentina. Interpretación geológica de datos de geofísica aérea y Landsat TM. SEGEMAR, Subsecretaría de Minería, República Argentina, 41 p. Buenos Aires.
- Segal de Svetliza, S., 1980. Estudio mineralógico y consideraciones genéticas del distrito minero Pan de Azúcar, Departamento de Rinconada, Provincia de Jujuy. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 45: 375-400.
- Segal, S. y Caffè, P., 1999. El Grupo Minero Pan de Azúcar, Jujuy. En: Zappettini, E. (Ed.): *Recursos minerales de la República Argentina*, Anales 35: 1579-1591. Instituto de Recursos Minerales, SEGEMAR, Buenos Aires, Argentina.
- Taylor, G. K., 2000. Paleomagnetism applied to magnetic anomaly interpretation: a new twist to the search for mineralisation in northern Chile. *Mineralium Deposita*, 35: 377-384.
- Taylor, G. K. and Grocott, J., 1999. A new twist to the search for mineralisation in Northern Chile. *Actas Fourth ISAG*, 741-744, Goettingen, Alemania.

Recibido: 4 de septiembre, 2000

Aceptado: 10 de octubre, 2001

## DISCUSIÓN

### Definición litoestratigráfica de la Formación Ciénaga de Huaco (Cretácico superior), Precordillera Central, San Juan, Argentina

#### Comentario

Es agradable ver que finalmente se ha realizado una descripción adecuada del material paleontológico proveniente de una unidad cuya edad ha sido muchas veces discutida. Sin embargo, no resulta tan agradable ver que no se haga una cita íntegra de los aportes geológicos más recientes en la región, ignorándose datos ya vertidos por otros autores, a veces por ellos mismos. De esta forma, se ha efectuado una atribución errónea de la información evaluada, y en algunos casos se ha ocultado parte de la misma, posiblemente para no mostrar equivocaciones anteriores.

La primera crítica se refiere al comentario vertido por los autores sobre que no existían esquemas litoestratigráficos detallados y cito a Limarino *et al.* (2000): «Dentro de tal complejidad, no se contaba hasta el presente con un esquema litoestratigráfico para el área, ni con mapas que permitiesen establecer la existencia, relaciones estratigráficas y extensión de los tres conjuntos arriba mencionados» (refiriéndose a una parte basal de edad pérmica, una intermedia cretácica y otra superior cenozoica). Los autores han ignorado completamente mi contribución publicada en la misma revista (Milana 1993). Allí, no sólo se brinda un mapa, sino una correlación de columnas estratigráficas a lo largo de la corrida estructural Huaco-Cerro, Cumillango-Río Francia. También, noto que fue en mi contribución donde se justifica el porqué las Formaciones Vallecito y Cerro Morado son terciarias, ya que Jordan y otros (1993) no efectuaron el trabajo de correlación lateral de unidades hacia el sur y norte del perfil de El Fiscal donde extrajeron la muestra datada.

Destaco además, que la unidad descripta no es nueva en la literatura, simplemente se ha elevado su categoría anterior de miembro a formación. Ya Braccacini (1946: p.87-88) hablaba de la sección de «arcillas rosadas», y justamente Limarino y Sessarego (1986, 1987) describen a estos depósitos como una sub unidad de la Fm. Patquía. Por otra parte, en el trabajo de Milana (1993) se recalco la existencia de un miembro superior, con conglomerados en su base y exactamente los mismos límites estratigráficos que los de la unidad definida por Limarino *et al.*, (2000). Creo que es inexacto entonces atribuirse el mérito de definir una unidad nueva, siendo lo correcto indicar una redefinición de la misma.

Uno de los puntos más críticos de este artículo es que los autores no discuten la existencia de otros indicios palinológicos aparentemente colectados de la misma unidad. Particularmente llama la atención la presencia de un nivel fértil en palinomorfos asignado a la Zona

de Striatites (Limarino y Césari 1987), cerca del techo de la que hoy denominan Fm. Patquía, siendo los depósitos lacustres yesíferos de la Formación Ciénaga de Huaco los únicos con posibilidades de brindar restos palinomorfos y microcoquinas de ostrácodos en ese sector de la sección estratigráfica. Léase sino la descripción de Limarino *et al.* (1993): «... in Huaco (Ojo de Agua Member) are examples of this type of lake system. The sequence studied in Huaco is 84 m thick, composed of red siltstones, mudstones and marls, black and grey mudstones and shale, very fine green sandstones, gypsum and calcite. Rhythmites formed by alternating dark and light-colored laminae are frequent in these deposits. Light laminae begin with a very thin (1-3 mm) of microcoquina (ostracodes cemented by gypsum and calcite) which is followed by stratified gypsum (2-4 mm thick). The dark term is totally formed by black or grey laminated mudstones (4-6 mm thick) and palynomorphs have been found (Limarino and Césari, 1987)». Posteriormente, los autores efectúan en esta contribución, una enumeración de la composición de esta asociación de palinomorfos hallada.

Según mi conocimiento de la sección, no hay otra secuencia litológica en el área de Huaco que sea comparable a la descripción transcripta en el párrafo anterior de Limarino *et al.* (1993). Y recalco que los aportes anteriores, fueron los argumentos que utilicé en mi contribución (Milana 1993) para asignar la edad pérmica a estos depósitos lacustres ricos en yeso y con coquinas de ostrácodos. Por ello, quisiera saber ¿Quién se equivocó en el muestreo de palinomorfos? o bien, ¿porqué se ha ocultado esta información a los lectores, obviando así una discusión sumamente necesaria? Las evidencias indican que alguien ha trabajado mal, y todo apunta al autor que figura en ambas publicaciones.

Otros errores menores son el hecho que se indique que la Formación Ciénaga de Huaco continúa hacia el norte, ignorando la literatura existente al respecto. Tanto en el texto, como en el mapa y la correlación de columnas estratigráficas de Milana (1995) se puede apreciar que la unidad lacustre con evaporitas es biselada erosivamente por la Fm. Cerro Morado, desapareciendo sus dos tercios superiores a unos 7 km al norte del curso del río Huaco. Por otra parte, en el mapa (Fig. 2) en donde se marca la Formación Ciénaga de Huaco en el ala este del anticlinal de Huaco, el contacto entre el Terciario indiferenciado (= Fm. Cerro Morado, Vallecito o «Estratos Rojos») es virtualmente imposible, dado que las unidades antes citadas presentan casi la misma actitud estructural. Probablemente se haya incluido Fm. El Corral, lo que indica que el mapa es erróneo.

Principalmente, considero necesaria una aclaración por este medio del problema referido a las diferentes edades asignadas a los microfósiles, ya que puede causar nuevas equivocaciones en ordenamientos



estratigráficos ulteriores, tal como ya ha sucedido. El autor principal debe conocer muy bien las características de esta unidad estratigráfica, dado el importante caudal de publicaciones relacionadas a este perfil (cf. Limarino y Sessarego, 1986, 1987, Limarino y Césari, 1987, Limarino *et al.*, 1986, 1987, 1993, 2000, entre otros), por lo que la falta de una discusión adecuada de las edades en juego, me parece inaceptable profesionalmente. Creo que las explicaciones requeridas, permitirán evaluar con mayor certeza esta sección geológica tan importante.

- Bracaccini, O., 1946. Contribución al conocimiento de la Precordillera sanjuanino-mendocina (primera parte). Boletín de Informaciones Petroleras, 23: 81-105.
- Jordan, T.E., Drake, R.E. y Naeser, Ch. W., 1993. Estratigrafía del cenozoico Medio en la Precordillera a la latitud del Río Jáchal, San Juan, Argentina. XII Congreso Geológico Argentino y II Congreso de Exploración de Hidrocarburos, Mendoza, Actas 2: 132-141.
- Limarino, C. O. y Césari, S., 1987. Consideraciones sobre la edad de la sección superior del Grupo Paganzo (Paleozoico superior), Rep. Argentina. 4° Congreso Latinoamericano de Paleontología, Sta. Cruz de la Sierra, Bolivia, Acta 1: 315-330.
- Limarino, C. O. y Sessarego, H., 1986. Depósitos lacustres en las formaciones Ojo de Agua y De la Cuesta Pérmico) Prov. de San Juan y La Rioja. I Reunión Argentina Sedimentología, La Plata, Actas 1: 145-148.
- Limarino, C. O. y Sessarego, H., 1987. Algunos depósitos lacustres de las Formaciones Ojo de Agua y De la Cuesta (Pérmico). Un ejemplo de sedimentación para regiones áridas y semiáridas. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 43 (3-4): 267-279.
- Limarino, C., Sessarego, H. L., Césari, S. y López Gamundi, O., 1986. El perfil de la Cuesta de Huaco, estratotipo de referencia (hipoestratotipo) del Grupo Paganzo en la Precordillera Central. Boletín de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 38: 81-109.
- Limarino, C. O., Sessarego, H. L., López Gamundi, O. R., Gutierrez, P. R. y Césari, S. N., 1987. Las Formaciones Ojo de Agua y Vallecito en el área de La Ciénaga, oeste de Huaco, Provincia de San Juan: Estratigrafía y paleomambientes sedimentarios. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 42 (1-2): 153-167.
- Limarino, O. and Spalletti, L. A. and Siano, C., 1993. A Permian arid paleoclimatic phase in west and northwest Argentina. Comptes Rendus XII ICC-P, v. 2: 453-468.
- Limarino, C., Laura Net, L. Gutiérrez, P., Barreda, V., Caselli, A. y Ballent, S., 2000. Definición litoestratigráfica de la Formación Ciénaga de Huaco (Cretácico Superior), Precordillera Central, San Juan, Argentina. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 55 (1-2): 83-99.
- Milana, J. P., 1993. Estratigrafía de unidades eólicas antiguas en la zona de Jáchal-Huaco, Precordillera Central de San Juan. Revista de la Asociación Geológica Argentina., 48 (3-4): 147-153.

Juan P. Milana  
UNSJ y CONICET, Av. I. de la Roza y Meglioli,  
5401 Rivadavia, San Juan

E-mail: jpmilana@cuim.unsj-cuim.edu.ar

Recibido: 12 de noviembre, 2001

Aceptado: 4 de marzo, 2002

## Réplica

En el artículo precedente el Dr. Milana ha efectuado una serie de consideraciones sobre el trabajo "Definición litoestratigráfica de la Formación Ciénaga del Río Huaco (Cretácico Superior), Precordillera Central, San Juan, Argentina" que necesitan ser clarificadas por los autores de la mencionada publicación. En su primer párrafo el Dr. Milana señala que no se ha hecho "una cita íntegra de los aportes geológicos más recientes en la región" agregando más adelante "Los autores han ignorado completamente mi contribución publicada en la misma revista (Milana 1995). Allí, no sólo se brinda un mapa, sino una correlación de columnas estratigráficas ....". Es sorprendente esta afirmación pues en el mapa citado por Milana (Fig. 1) no sólo no fueron discriminados los afloramientos cretácicos por nosotros incluidos en la Formación Ciénaga del Río Huaco, sino que ni siquiera figura en las referencias una unidad geológica de esta edad, ni un conjunto estratigráfico equivalente. Más desconcertantes son aún los cortes geológicos de las figuras 2 y 3 donde se señala un "Hiatus Pérmico med.-Oligoceno" (sic. Milana 1995: Fig. 3) y por lo tanto obviamente no se marca ninguna unidad de edad cretácica. No obstante lo dicho, la existencia de Cretácico en el área se conoce desde los trabajos de Chaía (1990), Pérez *et al.* (1990) y Jordan *et al.* (1993), todos ellos citados en nuestra contribución, y que parece ignorar Milana en su trabajo publicado en 1995.

De acuerdo a lo expresado los autores no citaron el trabajo de Milana (1995) por dos razones: 1) su mapa y cortes tienen omisiones que no contribuyen en nada al estudio del Cretácico (su objetivo eran las eolianitas pérmicas-terciarias) y 2) no es costumbre de los autores destacar estérilmente los errores cometidos por investigadores previos.

Al final del segundo párrafo el Dr. Milana indica "También, noto que fue en mi contribución donde se justifica el porqué Formaciones Vallecito y Cerro Morado son terciarias, ya que Jordan y otros (1993) no efectuaron el trabajo de correlación lateral de unidades hacia el sur y norte del perfil de El Fiscal donde extrajeron las muestras datadas".

Nuevamente Milana se equivoca en el propósito de nuestra contribución por dos razones: 1) el objetivo del trabajo por nosotros presentado fue el estudio del Cretácico y no de las Formaciones Vallecito y Cerro Morado (ambas unidades de edad Terciaria), por lo que no es nuestra materia determinar a quien corresponde el mérito de la correcta ubicación de las secuencias neógenas, 2) más allá de lo dicho, y al tratar las relaciones estratigráficas de la Formación Ciénaga del Río Huaco se citan las edades radimétricas de  $32,7 \pm 2,6$  Ma y  $21,6 \pm 8$  Ma, obtenidas por Jordan *et al.* (1993) para tobos que suprayacen a la Formación Ciénaga del Río Huaco. De la misma manera nos referimos a los trabajos de Chaía (1990) y Pérez *et al.*,

(1990) con precisiones paleontológicas. No hemos encontrado en el trabajo de Milana (1995) ninguna datación radimétrica, ni dato paleontológico por él obtenido en la secuencia terciaria, es por ello que nos es imposible citarlo.

En el tercer párrafo el Dr. Milana señala que "la unidad descrita no es nueva en la literatura, simplemente se ha elevado su categoría anterior de miembro, a formación. Ya Braccaccini (1946: p87-88) hablaba de la sección de arcillas rosadas". Este punto debe ser claramente definido para no introducir confusiones en la estratigrafía. Tal cual se cita en la página 88 y siguientes de nuestro trabajo, la Formación Ciénaga del Río Huaco incluye a varios de los niveles estratigráficos definidos por Braccaccini (secciones de "conglomerado silíceo", "areniscas rojo herrumbe" y al intervalo de "arcillas rosadas"), por lo que no debe pensarse que la unidad cretácica corresponde únicamente a las "arcillas rosadas" de Braccaccini, como erróneamente señala Milana. Es más, la base de la unidad cretácica, y la discordancia por nosotros señalada y mapeada en el trabajo, se ubica más de 100 metros por debajo del nivel de arcillas rosadas.

Al tratar la edad de la unidad, y en particular las correlaciones regionales y el material paleontológico que llevaron a suponerla en anteriores trabajos como de edad pérmica, el Dr. Milana señala que quisiera saber «porqué se ha ocultado esta información a los lectores, obviando así una discusión sumamente necesaria?» y más adelante agrega "las evidencias indican que evidentemente alguien ha trabajado mal, y todo apunta al autor que figura en ambas publicaciones". En este sentido, uno de los autores de esta réplica (C.O.L.) es efectivamente el responsable de haber asignado al Pérmico originalmente a la secuencia (como también lo hicieron la mayor parte de los investigadores anteriores), pero como las evidencias de la edad eran discordantes con las presentadas por Chaía (1990) continué buscando mayor certidumbre sobre su antigüedad, obteniendo nuevas muestras palinológicas y recolectando ostrácodos. Todo este material fue estudiado en la contribución de referencia por distintos especialistas y permitió confirmar la edad cretácica del conjunto. Si esta actitud es "trabajar mal" así lo he hecho, pero no conozco otra manera de avanzar en la reconstrucción de la historia geológica de una región.

Lo que a todos los autores de esta réplica les resulta agravante es el decir que se ha ocultado información a los lectores. En el trabajo, en la página 83 señalé que los estratos rojos en cuestión fueron anteriormente incluidos en el Pérmico citando entre otros el trabajo de Limarino *et al.* (1987), 20 renglones debajo de la primera cita vuelvo a destacar este hecho. Además en la página 84 se señala "En anteriores trabajos (Furque, 1979 y Limarino *et al.*, 1987) la secuencia cretácica aquí estudiada fue incluida en los bancos rojos de la Formación Patquía". Y finalmente, para que no que-

de lugar a dudas en la Tabla 1 (página 86) al sintetizar la nomenclatura estratigráfica del área se señala a Limarino *et al.* (1987) refiriendo a las rocas en cuestión al Pérmico. Finalmente deseo aclarar que el listado de la microflora a la que alude Milana se encuentra en la contribución citada en último término (Limarino *et al.* 1987) y por lo tanto obviamente no fue ocultada.

En este sentido es grave que el Dr. Milana confunda los afloramientos, unidades estratigráficas y autores que estudiaron las microfloras por él citadas en su comentario y erróneamente las atribuya al trabajo de Limarino y Césari (1987). Efectivamente se dice en su comentario "particularmente llama la atención la presencia de un nivel fértil en palinomorfo asignado a la Zona de Striatites por Limarino y Césari (1987)" y agrega más adelante "Léase sino la descripción de Limarino *et al.* (1993)". Cabe destacar que Limarino y Césari (1987) en su trabajo sobre la edad de la sección superior del Grupo Paganzo, no asignaron ninguna microflora a la Zona de Striatites, por el contrario destacaron que la mayoría de las especies halladas en la cuesta de Huaco eran nuevas o de rango estratigráfico amplio. Por otro lado, como bien señalaran Limarino *et al.* (1993), efectivamente existe una microflora referida a la Biozona de Striatites, pero no en la Formación Patquía como indicara Milana, sino en la Formación De La Cuesta (Sistema del Famatina, provincia de Catamarca), hallada a más de 200 km del área de Huaco y que no fue descrita por Limarino y Césari (1987) sino por Aceñolaza y Vergel (1987). Es de destacar que la microflora de Huaco no fue comparada ni equiparada con la proveniente de la Formación de la Cuesta. Es entonces evidente que el Dr. Milana equivocó la cita paleontológica y nos asignó erróneamente el haberla indicado en la Zona de Striatites de edad pérmica. Creo que en este punto la pregunta efectuada por el Dr. Milana «¿Quién se equivocó en el muestreo de palinomorfos?» comienza a tener respuesta.

La queja del Dr. Milana en el sentido de que "los aportes anteriores, fueron los argumentos que utilicé en mi contribución (Milana 1993) para asignar la edad pérmica a estos depósitos", en lo futuro encontrará remedio si utiliza sus propias observaciones y datos cuando pretenda solucionar problemas estratigráficos y de correlación regional, o al menos efectúe una valoración precisa de la información previa y deje claramente explicitado cuales fueron las fuentes.

En lo que respecta a la distribución regional de la unidad, dice Milana que "Otros errores menores son el hecho que se indique que la Formación Ciénaga de Huaco continua hacia el norte, ignorado la literatura existente al respecto" y aclara que reduce su espesor a un tercio "a unos 7 km al norte del curso del Río Huaco". La frase reproducida por Milana lo ha sido sólo en forma parcial, lo que en realidad se dice en el trabajo (pags. 92 y 93) es "los estratos rojos de la For-

mación Ciénaga del Río Huaco se prolongan hacia el norte, a lo largo de la vertiente oriental de la Precordillera, formando una faja discontinua que los presentes autores han podido seguir hasta el área de la quebrada de La Flecha en la Precordillera riojana". Es obvio entonces que no cabe la cita del trabajo de Milana, porque no reconoció el Cretácico y sus observaciones se circunscriben sólo al área de Huaco (extendiéndose hacia el norte a 7 km del río homónimo), cuando estamos haciendo una correlación regional de mayor envergadura.

Lamentamos que el comentario a nuestro trabajo no haya estado orientado a discutir aspectos específicos de la contribución, como la estratigrafía del Cretácico en la zona, su extensión regional o composición litológica, lo que nos hubiera enriquecido a todos y resultado sin dudas de más provecho para los lectores y para nosotros. Finalmente deseamos destacar que en su comentario el Dr. Milana alude repetidamente a la "Formación Ciénaga de Huaco" cuando el nombre correcto es "Formación Ciénaga del Río Huaco" y que la cita proporcionada por el autor como Milana (1993, 48: 147-153) está equivocada y es en realidad Milana (1995, 48: 283-298, según consta en páginas 333 y 336 de la Revista).

Aceñolaza, F.G. y Vergel, M. E. 1987. Hallazgo del Pérmico superior fosilífero en el Sistema del Famatina. X Congreso Geológico Argentino,

Actas 2:125-129.

Bracaccini, O., 1946. Contribución al conocimiento geológico de la Precordillera sanjuanino-mendocina. Boletín de Informaciones Petroleras, 258.

Chaía, T., 1990. Registro del Senoniano lacustre en la provincia de San Juan. Primer Congreso Uruguayo de Geología. Resúmenes ampliados: 33-36. Montevideo.

Furque, G. 1979. Descripción geológica de la Hoja 18c «Jachal» (provincia de San Juan). Servicio Geológico Nacional, Boletín 164, 79 p.

Jordan, T.E., Drake, R.E. y Naeser, Ch. W., 1993. Estratigrafía del Cenozoico medio en la Precordillera a la latitud del río Jachal, San Juan, Argentina. Actas 12 Congreso Geológico Argentino y 2º Congreso de Exploración de Hidrocarburos, 2: 132-141. Mendoza.

Limarino, C. y Césari, S. 1987. Consideraciones sobre la edad de la sección superior del Grupo Paganzo (Paleozoico superior). República Argentina. IV Congreso Latinoamericano de Paleontología y Bioestratigrafía, Memorias I: 315-330. Bolivia.

Limarino, C. O., Sessarego, H., López Gamundí, O., Gutiérrez, P. y Césari, S., 1987. Las Formaciones Ojo de Agua y Vallecito en el área de La Ciénaga, oeste de Huaco, provincia de San Juan: estratigrafía y paleoambientes sedimentarios. Revista de la Asociación Geológica Argentina 42: 153-167.

Limarino, C.; Spalletti, L. and Siano, C. 1993. An arid Permian paleoclimatic phase in west and northwest Argentina. Comptes Rendus Douzième Congrès International de la Stratigraphie et Géologie du Carbonifère et Permien, 2: 453-468.

Limarino, C.O., Net, L.I., Gutiérrez, P.R., Barreda, V., Caselli, A. y Ballent, S., 2000. Definición litoestratigráfica de la Formación Ciénaga del Río Huaco (Cretácico Superior), Precordillera central, San Juan, Argentina. Revista de la Asociación Geológica Argentina 55: 83-99.

Milana, J.P., 1995. Estratigrafía de eolianitas en la zona de Jachal-Huaco, Precordillera de San Juan. Revista de la Asociación Geológica Argentina 48: 283-298

Pérez, M.A., Fernández Sevesso, F., Alvarez, L.A. y Brisson, I.E., 1990. Análisis ambiental y estratigráfico del Paleozoico superior en el área del anticlinal de Huaco, San Juan, Argentina. 10º Congreso Internacional de la Stratigraphie et géologie du Carbonifère et Permien. Resúmenes, 111.

Carlos Limarino

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales,  
Universidad de Buenos Aires, Ciudad Universitaria,  
Pabellón 2, 1428, Buenos Aires.

**Recibido:** 18 de diciembre, 2001

**Aceptado:** 4 de marzo, 2002

## COMENTARIO DE ACTUALIDAD

### PROYECTO IGCP 464 "Continental Shelves during the Last Glacial Cycle: Knowledge and Applications"

El Programa Internacional de Correlación Geológica (IGCP, UNESCO-IUGS) tiene por objetivos: 1) Comprender los factores naturales que influyen el medio ambiente para lograr un manejo adecuado del habitat terrestre y mejorar las condiciones de vida. 2) Desarrollar las maneras más efectivas de investigar y evaluar los recursos energéticos y minerales. 3) Incrementar el conocimiento de los procesos geológicos mediante estudios llevados a cabo en diferentes lugares del planeta y su posterior correlación. 4) Mejorar los métodos y técnicas de estudio e investigación. Con ese fin facilita la cooperación científica entre investigadores de las ciencias de la tierra a través de la ejecución de proyectos específicos en áreas temáticas muy concretas de interés mundial.

La Argentina tiene una larga trayectoria de participación en esos proyectos en distintas disciplinas geológicas. En lo que respecta a la geología litoral y marina, muchos investigadores han estado en mayor o menor grado involucrados en todos los proyectos relacionados con esos temas que vienen sucediéndose desde hace más de 20 años (IGCP's 61, 200, 274, 367, 396 y 437).

En febrero de 2001 se aprobó el Proyecto IGCP 464 "Continental Shelves during the Last Glacial Cycle: Knowledge and Applications", que representa una continuidad de los anteriores y particularmente del 396, con el cual comparte como meta principal el estudio de las plataformas submarinas.

No escapa a la comunidad geológica nacional la creciente importancia que a nivel mundial adquiere el estudio de los mares y las costas, por cuanto no solamente la búsqueda de recursos se está orientando hacia esas regiones sino que también las cuestiones geopolíticas le están dando al mar una importancia relevante. Nuestro país, con su extenso litoral y los 2.000.000 km<sup>2</sup> de superficie de su margen continental, no debe desaprovechar esta privilegiada condición ante la perspectiva que se abre en cuanto a las posibilidades de avanzar en el conocimiento científico de las regiones marinas. Es entonces imprescindible multiplicar los esfuerzos para desarrollar tareas de investigación geológica submarina tendientes a conocer esos ámbitos.

El Proyecto IGCP 464 está orientado a resolver algunos puntos claves relacionados con la evolución reciente de las plataformas continentales y en consecuencia ofrece un marco adecuado en el cual pueden insertarse buena parte de las actividades de investigación en esos temas que el país lleva adelante y que

puede llegar a encarar en el futuro. Esa inserción permitirá una amplia difusión a nivel mundial y un mayor y mejor conocimiento de la actividad geológica marina nacional, con los beneficios que ello puede traer en cuanto a la posibilidad de participación en futuros programas científicos internacionales.

El objetivo del Proyecto, cuya duración será de cinco años (2001-2005), es estudiar la evolución paleoambiental de las plataformas continentales a partir del último máximo glacial y los procesos que condujeron a imprimirle sus características estratigráficas, sedimentológicas y morfológicas actuales. Entre los temas de interés para discutir e intentar resolver durante el desarrollo del Proyecto están:

- Importancia del último evento glacial dentro del contexto de los cambios climáticos globales ocurridos durante el Cenozoico superior.

- Determinación del mínimo nivel del mar alcanzado durante la última glaciación.

- El proceso de ascenso postglacial del nivel del mar.

- Evidencias de eventos de alta frecuencia como el Younger Dryas en la plataforma continental.

- Aplicación de diferentes métodos de datación e isotópicos al estudio del Pleistoceno superior-Holoceno marino y costero.

- Paleogeografía, paleomorfología y evolución de la plataforma continental y regiones costeras.

- Paleoclimas, paleo-oceanografía y paleo-hidrología.

- Estratigrafía (con especial énfasis en sismo-estratigrafía e interpretación de secuencias deposicionales y cortejos sedimentarios).

- Características y significado de los sedimentos relictos que cubren la plataforma continental.

- Rasgos paleoambientales, morfológicos, sedimentológicos, mineralógicos, químicos, isotópicos, paleomagnéticos, estructurales y evidencias de paleosuelos en la paleosuperficie pre-transgresiva.

- Evidencias de la acción de procesos marinos, fluviales y glaciales recientes y antiguos sobre las plataformas continentales.

- Neotectónica y reajuste isostático.

- Paleoarqueología submarina y evidencias de puentes intercontinentales.

- Paleobiología marina relacionada con los cambios climáticos ocurridos a partir de la última glaciación.

- Estudios comparativos entre plataformas continentales o sectores de plataformas con diferentes características (glaciadas/no glaciadas, de márgenes pasivos/activos, de mayor/menor extensión, con mayor/menor aporte de sedimentos, carbonáticas/clásticas, de altas/bajas latitudes, de climas cálidos/fríos, de alta/baja energía, macro/micromareales, etc.).

- Aplicación de los resultados del Proyecto a aspectos globales como cambios climáticos y variabilidad del ciclo del carbono, así como a la evaluación de los recursos naturales submarinos y el manejo sustentable de las plataformas continentales.

El Proyecto no da dinero para investigación, sino

que facilita la interacción entre científicos a través de la organización de reuniones de trabajo anuales donde cada país presenta resultados parciales de sus investigaciones y se crean las condiciones para organizar grupos de trabajo que posteriormente pueden desarrollar sus propios proyectos independientes. Asimismo se realizarán esfuerzos para organizar cursos de postgrado, entrenamiento y capacitación con especial interés en la participación de investigadores de las ciencias del mar provenientes de países en desarrollo. Bajo estas premisas se propone a nivel nacional el acercamiento e interacción entre los investigadores vinculados a la temática geológica en plataforma para que evalúen la conveniencia de sumar esfuerzos en beneficio del desarrollo de sus respectivos pro-

yectos y eventualmente de la organización de otros nuevos que incluyan los objetivos del IGCP 464.

Los interesados en obtener información detallada y en participar pueden consultar la página Web del Proyecto: <http://tetide.geo.uniroma1.it/igcp464/> y contactarse con el representante nacional para ser incorporados a la base de datos para futuros envíos de información. El Representante Argentino es: Dr. Roberto A. Violante, Servicio de Hidrografía Naval, División Geología y Geofísica Marina, Av. Montes de Oca 2124 (C1270ABV) Buenos Aires, Tel: 4301-3091, e-mail: [violante@hidro.gov.ar](mailto:violante@hidro.gov.ar).

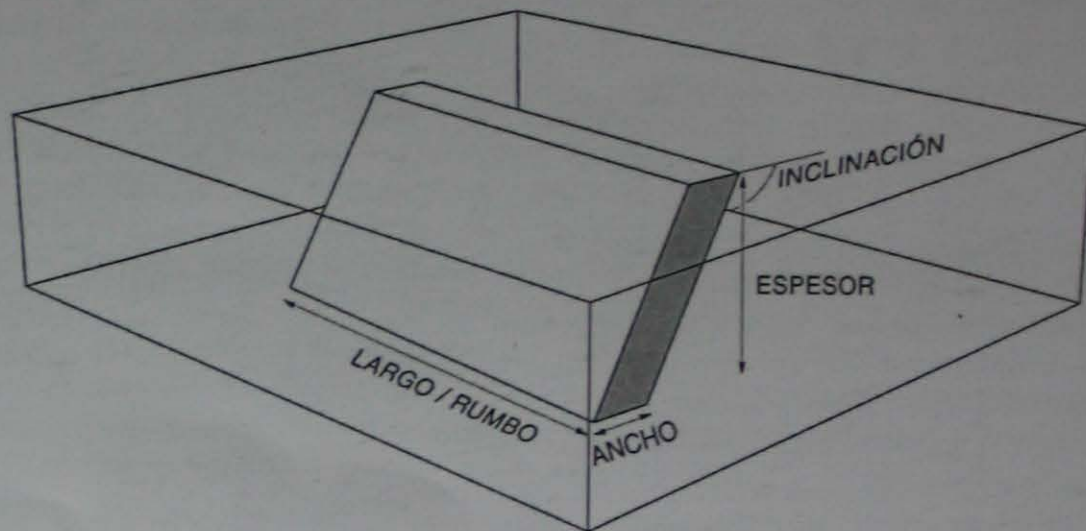
*Dr. Roberto A. Violante*

## FE DE ERRATA

Trabajo publicado en el Vol. 56 (4) de la Revista de la Asociación: «Evidencias geofísicas de la continuidad del volcanismo dacítico mioceno en el subsuelo de la depresión de Pozuelos, provincia de Jujuy, y su potencialidad minera».

C.J. Chernicoff

En la figura 8 debe aparecer éste gráfico y no el que se encuentra publicado



**Figura 8:** Definición de los parámetros geométricos de los cuerpos modelizados. (Profundidad: medida al techo del los cuerpos).

# INSTRUCCIONES PARA LOS AUTORES

Se publicarán únicamente artículos originales que versen sobre temas geológicos, especialmente los relacionados con Argentina y América del Sur. El texto debe ser conciso. Se tendrá especial cuidado en que las ideas estén expresadas con claridad y que el trabajo sea coherente a lo largo de todo su desarrollo. Todos los trabajos recibidos serán sometidos a arbitraje. Si los trabajos enviados a los autores para revisión son devueltos después de cuatro meses, serán tratados como artículos nuevos. Por lo menos la mitad de los autores deberán ser socios de la AGA.

## Presentación del manuscrito

Se recibirán trabajos en castellano o en inglés, impresos en una cara en tamaño A4, a uno y medio espacio, con letra tamaño 12 y con márgenes de 2,5 cm de cada lado. No se admitirán notas de pie de página. Los artículos que no cumplan las normas serán devueltos sin arbitrar. La versión corregida del trabajo (luego de arbitrado) debe ser enviada por los autores en papel y en disquette bien identificado con extensión .txt, .doc o .rtf, en procesador de texto de uso corriente (ej. MSWord).

La presentación de un nuevo trabajo debe ser precedida por una carta al director de la Revista de la Asociación Geológica Argentina en la cual debe constar el título del trabajo y los autores, junto con una oración expresando que el mismo es original, que no ha sido enviado ni se enviará a ninguna otra revista durante el trámite editorial en la Revista de la AGA.

La primera página deberá incluir, en el siguiente orden: título del trabajo, nombre de los autores, institución a la que pertenecen, dirección postal y e-mail. En el caso de artículos escritos por varios autores se indicará claramente a cuál de ellos dirigir la correspondencia, adjuntando dirección postal, fax y e-mail. Indicar al pie número total de páginas, figuras y tablas. La segunda página incluirá un Resumen y un Abstract con un máximo de 250 palabras cada uno. Para los trabajos en inglés, después del Resumen irá el título en castellano. Luego deberán figurar Keywords y Palabras clave (no más de 5 en cada caso). El texto del trabajo comenzará en la tercera página y conviene adoptar el siguiente orden: introducción, geología regional y local, métodos utilizados (si cabe), resultados, conclusiones, agradecimientos y lista de trabajos citados en el texto. Los nombres de unidades estratigráficas deben seguir las normas del Código Argentino de Estratigrafía (AGA Serie B, N° 20).

El material gráfico se presentará como figuras (incluye dibujos y fotografías) y tablas. Numerar las figuras correlativamente con números arábigos y referirse a ellas en el texto como fig. (y el número). El mismo procedimiento debe seguirse para las tablas. Colocar el número, título y autores en el margen de cada figura. Se recomienda que las figuras sean reproducibles al ancho de la caja (18 cm) o el de una columna de texto (8,5 cm). Evitar las figuras en forma apaisada. Las páginas deberán numerarse en forma corrida, incluyendo el texto, la lista de trabajos citados en el texto, y las leyendas de las figuras. Colocar las figuras al final en páginas sin numerar. Las figuras deberán ser enviadas en CorelDraw y las tablas en MS Word o Excel, junto con la versión corregida del trabajo.

Se permite sin cargo la superficie equivalente a una página de figuras por cada 6 páginas de texto impreso. El costo de las ilustraciones en color correrá por cuenta de los autores. Se aconseja el uso de rastras con trama, no de grisados. Use líneas negras, continuas, limpias y no menores de 0,1 milímetro. Las fotografías deben ser de buena calidad, y de ser posible llevarán escala gráfica.

Enviar 3 copias del manuscrito a: Subcomisión de Publicaciones, Asociación Geológica Argentina, Maipú 645 1er piso, C1006ACC Buenos Aires.

Los autores que deseen incluir en sus artículos reproducciones de figuras ya publicadas y amparadas por derecho de autor, son responsables de obtener el permiso escrito de quien corresponda, salvo que sean modificados sustancialmente, en cuyo caso deberán indicar, p. ej. «Geología en base a Caminos 1978», o «Adaptado de...».

Los derechos de autor que surjan de la publicación de la Revista de la Asociación Geológica Argentina serán propiedad de la Asociación. Las solicitudes de permiso para reproducir total o parcialmen-

te artículos publicados en la Revista deben ser dirigidas a la misma. La Comisión Directiva en general permitirá a los autores la reproducción ulterior de partes de sus propios artículos y, para otorgar permisos a terceros, se requerirá del consentimiento de los autores.

## Trabajos citados en el texto

Esta lista comenzará en una nueva página. Debe estar completa y existir exacta correspondencia entre los artículos citados y los listados. Prestar especial atención al formato, orden y puntuación, de acuerdo con los ejemplos siguientes. Para citas de dos autores ordenar la lista alfabéticamente por el primer autor y luego por el segundo. Para citas de tres o más autores ordenar cronológicamente por el año de publicación. Todos los nombres de publicaciones periódicas deben escribirse sin abreviaturas. No usar números romanos. Deben figurar la primera y última página de cada artículo (aún de los trabajos inéditos). Para los libros debe agregarse la editorial y lugar (ciudad) de edición. Las referencias se escribirán siempre en idioma original. Limitar la cita de trabajos inéditos. En la lista bibliográfica se podrá incluir «trabajos en prensa» cuando estos estén formalmente aceptados para su publicación, indicando la revista. Los trabajos en preparación podrán ser citados como «comunicación personal» (com. pers.) y no figurarán en la bibliografía.

Angelelli, V. y Fernández Lima, J. C., 1972. Ciclos metogenéticos de la Argentina. En: Leanza, A. F. (Ed.): Geología Regional Argentina, p. 797-813. Academia Nacional de Ciencias, Córdoba.

Angelelli, V. y Rinaldi, C., 1965. Reseña de la estructura, mineralización y aprovechamiento de nuestras pegmatitas portadoras de minerales de Litio. Actas 2° Jornadas Geológicas Argentinas [=Acta Geológica Lilloana, 5]: 1-18. Tucumán.

Comité Argentino de Estratigrafía, 1992. Código Argentino de Estratigrafía. Asociación Geológica Argentina, Serie B, Didáctica y Complementaria, 20: 1-64. Buenos Aires.

Criado, Roque P., 1944. Estudio estratigráfico y tectónico de la región al norte del arroyo Chacay-Melehue, entre el sur de la cordillera del Viento y el curso medio del río Curi-Leuvú en el Neuquén septentrional. Tesis Doctoral Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata, 57, 134 p. (Inédito).

Groeber, P., 1947a. Observaciones geológicas a lo largo del meridiano 70. 2. Hojas Sosneao y Maipo. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 2(2): 147-176.

Groeber, P., 1947b. Observaciones geológicas a lo largo del meridiano 70. 3. Hojas Domuyo, Mari Mahuida, Huarhuar Co y parte de Epu Lauken. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 2(4): 347-408.

Harland, W. B., Armstrong, R. L., Cox, A. V., Craig, L. E., Smith, A. G. y Smith, D. G., 1990. A geologic time scale 1989. Cambridge University Press, 263 p., Cambridge.

## Separados y costos a pagar por el autor

No se entregarán separados sin cargo. Los autores podrán encarar separados en el momento de corregir las pruebas de imprenta. Los costos por exceso de páginas o ilustraciones, por correcciones presentadas *a posteriori* de la prueba de galera o por separados deberán ser abonados por el autor antes de la publicación del artículo.

## Clasificación de los Artículos

a) Artículos normales: la extensión del texto, incluida la lista de trabajos citados en el texto, no será mayor de 30 páginas (15 páginas en formato de impresión). Se publicarán en lo posible por orden de aceptación. El período entre la entrega y la publicación dependerá de la cantidad de trabajos en la lista de espera.

b) Comunicaciones: artículos cortos de hasta 12 páginas (6 en formato de impresión), incluidos Resumen y Abstract y con una página de figuras como máximo.

c) Notas breves: deben presentar novedades de trascendencia. La extensión no debe superar 8 páginas (4 en formato de impresión) incluyendo una figura. Recibirán un tratamiento editorial especial, publicándose prioritariamente.

**La impresión del presente número fue posible gracias al apoyo económico de los siguientes benefactores:**

Augusto P. Calmels  
Chevron San Jorge S.A.  
Cerro Vanguardia S.A.  
Pecom Energía  
Río Tinto Mining and Exploration Ltd.  
YPF S.A.

**y los aportes de:**

R. Andreis	S. Kay
S. Archangelsky	P. Lesta
H. Bassi	E. Linares
J. L. Bianchi	E. Llambías
J. Bonaparte	R. L. Moreno
J. Bossi	H. J. Péndola
M. K. de Brodtkord	J. C. Porto
H. H. Camacho	E. O. Rolleri
A. Cuerda	J. Saavedra Alonso
H. Gay	E. R. D. Saccone
A. R. Gramajo	P. N. Stipanivic
A. Introcaso	F. Vervoorst
J. P. Jones	C. R. Vilela

Y de todos los Socios Activos y Adherentes de la Asociación Geológica Argentina



# INSTRUCTIONS FOR AUTHORS

Revista de la Asociación Geológica Argentina publishes original articles on geological themes, especially those related to Argentina and South America. The text must be concise, special care should be taken to ensure that ideas are expressed with clarity, and that the paper is consistent throughout. All papers received will be subject to review. Any paper sent back to authors for revision and not resubmitted within four months, will be treated as a new article. At least half the authors must be members of AGA.

## Preparation of manuscripts

Contributions will be accepted in Spanish or English; they should be printed on A4 paper, at one and a half line spacing, using 12-point typeface, and with 2.5 cm margins at each side. Footnotes are not acceptable. Any paper which does not comply with these rules will be returned without review. Following review, the corrected version of the paper should be submitted both as hard copy, and on diskette clearly identified with the extension .txt, .doc, or .rtf, and using a current word-processing package, such as MS Word.

Submission of a new paper should be accompanied by a letter to the director of Revista de la Asociación Geológica Argentina, stating the title of the paper and the names of the authors, together with a declaration that the work is original and that it has not been sent nor will be sent to another journal whilst it is being handled by Revista de la AGA.

The first page should include, in order, the following information: title of the paper, name(s) of the author(s), the postal address of the institute(s), and e-mail address(es). In the case of a paper with several authors, the handling author must be clearly identified with his/her postal address, fax and e-mail address. At the bottom of the page, indicate the total number of typed pages, figures and tables. The second page should include a *Resumen* and an Abstract of not more than 250 words. Papers in English should carry the title in Spanish after the *Resumen*. Finally include no more than five Keywords in English and Spanish. The text of the paper should begin on page three and should be organised in the following way: introduction, geological setting, methods used (if appropriate), results, conclusions, acknowledgements, and list of works cited in the text. Names of stratigraphical units should comply with the rules set out in *Código Argentino de Estratigrafía* (AGA Serie B, N° 20).

Illustrative material should be designated as figures (both drawings and photographs) and tables. Number the figures consecutively with arabic numerals and refer to them in the text as 'Fig.' (and the number). [1] Use a similar procedure for tables ('Tabla'). Indicate the number, together with title and authors of the paper at the foot of each figure. Figures should be designed for reproduction at full page width (18 cm) or single column (8.5 cm). Avoid figures requiring full-page reproduction in landscape format. Pages should be numbered continuously, including the text, references, and figure captions. Include the figures together at the end on un-numbered pages. Figures may be submitted electronically in CorelDraw, and tables in MS Word or Excel together with the final corrected version of the text. Authors are allowed, without charge, the equivalent of one page of figures to every 6 printed pages of text. The cost of coloured illustrations will be charged to authors. The use of patterned ornament rather than screen fills is recommended. Use clear black lines, no less than 0.1 mm wide. [2] Photographs must be of high quality and where possible carry a graphic scale.

Submit 3 copies of the manuscript to: Subcomisión de Publicaciones, Asociación Geológica Argentina, Maipú 645 1er piso, C1006ACG Buenos Aires.

Authors who wish to include in their papers copies of figures already published are responsible for obtaining written permission from the copyright holder, except in those cases where they have been substantially modified, as indicated by, e.g. "Geology after Caminos 1978" or "Modified from....."

Copyright to all papers published in Revista de la Asociación Geológica

Argentina remains with the Asociación, from whom permission must be sought to reproduce all or any part of articles published in the Revista. As a rule, the Comisión Directiva will allow authors to reproduce parts of their own articles, and will seek the consent of authors for reproduction by a third party.

## References

The list of works cited in the text should commence on a new page. Make sure there is complete correspondence between the list and the references cited in the text and figure captions [3]. Pay particular attention to style, order and punctuation as illustrated in the examples below. For references with two authors, list alphabetically by first author and then alphabetically by the second author. For references with three or more authors, order chronologically by the date of publication. Titles of all periodicals should be given in full. Do not use Roman numerals. Give the first and last page of each article (except for unpublished articles). For books, give the name of the publishing house and place (city) of publication. References should be written in their original language. [4] Citations to unpublished works should be kept to a minimum. Works "in press" may be included when they have been accepted formally for publication. Work in preparation should be cited as "personal communication" (pers.com.) and not included in the list of references.

- Angelelli, V. y Fernández Lima, J. C., 1972. Ciclos metogenéticos de la Argentina. En: Leanza, A. F. (Ed.): *Geología Regional Argentina*, p. 797-813. Academia Nacional de Ciencias, Córdoba.
- Angelelli, V. y Rinaldi, C., 1965. Reseña de la estructura, mineralización y aprovechamiento de nuestras pegmatitas portadoras de minerales de Litio. *Actas 2° Jornadas Geológicas Argentinas [=Acta Geológica Lilloana, 5]: 1-18. Tucumán.*
- Comité Argentino de Estratigrafía, 1992. *Código Argentino de Estratigrafía*. Asociación Geológica Argentina, Serie B, Didáctica y Complementaria, 20: 1-64. Buenos Aires.
- Criado, Roque P., 1944. Estudio estratigráfico y tectónico de la región al norte del arroyo Chacay-Melehue, entre el sur de la cordillera del Viento y el curso medio del río Curi-Leuvú en el Neuquén septentrional. Tesis Doctoral Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata, 57, 134 p. (Inédito).
- Groeber, P., 1947a. Observaciones geológicas a lo largo del meridiano 70. 2. Hojas Sosneao y Maipo. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 2(2): 147-176.
- Groeber, P., 1947b. Observaciones geológicas a lo largo del meridiano 70. 3. Hojas Domuyo, Mari Mahuida, Huarhuar Co y parte de Epu Lauken. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 2(4): 347-408.
- Harland, W. B., Armstrong, R. L., Cox, A. V., Craig, L. E., Smith, A. G. y Smith, D. G., 1990. *A geologic time scale 1989*. Cambridge University Press, 263 p., Cambridge.

## Offprints and page costs

No free offprints are provided. Authors may order offprints at the stage of correcting their galley proofs. Costs for excess pages or illustrations, for corrections made after galley proof, or for offprints must be paid by authors before publication of their article.

## Types of Articles

- Normal articles: No more than 30 pages (15 printed pages), inclusive of references. They will be published, as far as possible in order of acceptance. The period between submission and publication will depend on the number of contributions in the waiting list.
- Communications: short articles of about 12 pages (6 printed pages) inclusive of *Resumen* and Abstract and with a maximum of one page of illustrations.
- Short notes: should present important new information. They may be no more than 8 pages in length (4 printed pages), including one figure. They will receive special editorial treatment, and given publication priority.

**REVISTA DE LA  
ASOCIACION GEOLOGICA ARGENTINA**

Volumen 57 - Número 1 - Págs. 1-100  
Buenos Aires - Marzo 2002

2073 C1 D9  
IRIGOYEN, MARIA VERONICA  
YATAY 57, 6TO "43"  
1184 BUENOS AIRES  
ARGENTINA

ISSN: 0004-4822



Registro de la Propiedad  
Intelectual 184286

**ASOCIACION GEOLOGICA ARGENTINA**

Maipú 645, piso 1, C1006ACG Buenos Aires, Argentina  
Fax 54-11-43253104