CIENCIAS DE LA TIERRA Y RECURSOS MINEROS Y ENERGETICOS EN EL ALTIPLANO CHILENO

REYNALDO CHARRIER

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA, FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS,
UNIVERSIDAD DE CHILE, CASILLA 13518, CORREO 21, SANTIAGO, CHILE.

RESUMEN

El Altiplano-Puna es un elemento orográfico de la Cordillera de los Andes ubicado en el sector arqueado de esta cadena (Codo de Arica o de Santa Cruz). Es, con el Tibet, una de las mayores mesetas elevadas de la Tierra. Alcanza en promedio los 3.700 metros sobre el nivel del mar y tiene cerca de 300 km de ancho y 1.500 km de largo. Se extiende entre los 15º y 27º de latitud S, desde la región de Ayacucho, Perú, hasta Copiapó, Chile. La historia geológica de la región altiplánica chilena cubre un rango de unos 1.000 millones de años (Ma). Es una historia larga y compleja, típica de un borde continental activo. Las rocas más antiguas, entre hace 1.000 Ma (Precámbrico) y unos 230 Ma (Triásico Superior), tienen escasa representación y la historia de ese periodo está poco conocida. La historia posterior (Mesozoico y Cenozoico) se caracteriza por el desarrollo de sucesivos cordones volcánicos que se desplazaron sucesivamente hacia el Este y cuencas sedimentarias en su borde oriental, en algunas de las cuales se generaron hidrocarburos. La historia del Altiplano como bloque elevado se remonta a los últimos 25 millones de años de esta historia. En ese momento fuertes presiones de la placa oceánica de Nazca habrían forzado al bloque altiplánico a elevarse cabalgando hacia el Este y el Oeste las rocas adyacentes mediante dos sistemas divergentes de fallas inversas. Una actividad volcánica explosiva generó una extensa y gruesa cubierta de cenizas (Fm. Oxaya) sobre la cual se desarrollaron los numerosos volcanes que confieren al Altiplano su característico paisaje. Los recursos mineros del Altiplano chileno son de tipo metálico (yacimientos epitermales de Cu, Au, Ag, asociados a la actividad volcánica) y no-metálicos (Azufre, también asociado al volcanismo) y sales (boratos, sal gema, yeso) y elementos químicos Litio, Boro, Tierras Raras), concentrados en los salares. Los recursos energéticos son: Energía geotérmica, en las surgencias de aguas termales, y petróleo, localizado bajo el Altiplano. La existencia de yacimientos de Cobre Porfírico como Chuquicamata no se excluye; sin embargo, estos se encontrarían debajo de la gruesa cubierta de cenizas de Fm. Oxaya, lo cual hace casi imposible su reconocimiento. El cabal conocimiento de la historia geológica del Altiplano, de las implicaciones que tiene para el clima y la vida, el desarrollo y la presencia de un bloque montañoso de la magnitud del Altiplano, y los diferentes tipos de recursos explotables que contiene y los efectos ecológicos que su explotación puede acarrear, requieren de una intensa investigación interdisciplinaria. Esta, por la repartición política del territorio altiplánico, tendrá sentido solamente si logra adquirir un caracter internacional.

ABSTRACT

The Altiplano-Puna is an orographic unit located in the arcuated central part of the Andean range. It is with the Tibet one of the highest plateaus on Earth. Its average altitude is near 3,700 m and is approximately 300 km wide and 1,500 km long. It extends between 15º and 27º South latitude, that is, between Ayacucho, in Perú, and Copiapó, in Chile. The geological evolution of this region covers a time span of more than 1,000 million years (Ma). It is a long and complex history characteristic for an active continental margin. The oldest rocks, with ages between 1,000 (pre-Cambrian) and 230 Ma (Late Triassic), are scarcely exposed and the evolution of this time span is difficult to reconstruct. The younger Mesozoic and Cenozoic history is characterized by the development of succesive volcanic arcs that gradually shifted eastward and of backarc basins located to the East of the arcs. The Altiplano began to develope during the last 25 Ma of this evolution. At this moment strong stresses associated to the subduction of the Nazca Plate below the continental margin caused the gradual uplift of the Altiplano block. This process was facilitated by the upthrusting of the Altiplano over the adjacent rocks along systems of faults located at its sides. An explosive acidic volcanic activity formed a thick and extended ash cover (Oxaya Fm.), that built the flat Altiplano surface. On this surface developed the characteristic volcanoes of the Altiplano landscape. The mining resources of the Altiplano are metallic ores (Cu, Au, Ag epithermal ore deposits associated to the volcanic activity) and non-metallic resources like Sulphur (also associated to the volcanic activity) and different kinds of salts (borates, gypsum, common salt) and chemical elements (Borum, Lithium, and Rare Earth Elements) concentrated in the salars. The known energetic resources are Geothermal Energy, associated to hot spring activity, and Petroleum, deep below the Altiplano surface. The existence of big porphyry copper deposits like Chuquicamata are not excluded in this area. However, if present, they should be found at rather deep levels below the thick ash cover of the Oxaya Fm. The accurate knowledge of the geological evolution of the Altiplano, of the implications of the existence of the Altiplano on the climate and on the development of life, of the different exploitable resources, and of the environmental effects that this exploitation might cause, is only possible if an intensive interdisciplinary and international research activity is developed.

INTRODUCCION

El Altiplano, motivo central de este simposio, es un elemento orográfico, cuyo origen debe buscarse en complejos fenómenos geológicos ocurridos en esta región durante los últimos 25 millones de años. Todos los temas que se analizan en este volumen, se trate de los aspectos físicos del Altiplano o de los aspectos antropológicos, pasando por el clima, la fauna, la flora y los recursos naturales, deberán tomar en cuenta el hecho esencial que nos encontramos en una planicie que se elevó gradualmente hasta cerca de los 4.000 m sobre el nivel del mar.

El objetivo de este artículo es, por lo tanto, no sólo presentar los aspectos relacionados con el área de las Ciencias de la Tierra, sino también servir de introducción general a las demás áreas temáticas de este volumen, o sea, definir el entorno geográfico y geológico de la región altiplánica. Deseo, además, exponer los aspectos esenciales de la geología del Altiplano y su formación, así como referirme a los posibles recursos mineros y energéticos de la región y destacar los posibles nexos que existen entre las Ciencias de la Tierra y las demás disciplinas que participarán en este simposio.

MARCO GEOGRAFICO Y GEOLOGICO

En la superficie terrestre existen regiones donde se produce una ruptura y separación de bloques de corteza o placas y regiones donde los bloques de corteza se acercan o convergen y chocan o colisionan (Fig. 1). Las primeras corresponden a las dorsales oceánicas, mientras que las cadenas de montañas se forman en las regiones de convergencia. En estas regiones de

convergencia pueden chocar dos bloques o placas de corteza continental, como en el caso de los Himalayas, o bien chocar una placa de corteza oceánica con una de corteza continental. Esto último es lo que ocurre en el borde occidental de América del Sur y que da origen a la Cordillera de los Andes. Esta región, además de los fuertes relieves, se caracteriza por intensas actividades sismica y volcánica.

En el borde occidental de América del Sur convergen la Placa Sudamericana, más gruesa y más liviana, y la Placa Oceánica de Nazca, más delgada, pero más densa o pesada, que se hunde bajo la otra. Esta situación determina, por una parte, la existencia de profundas depresiones como la fosa oceánica, de Atacama o de Perú-Chile, de casi 7.000 m de profundidad, y, a pocos kilómetros, el desarrollo de notables relieves, que alcanzan frecuentemente a más de 6.000 m sobre el nivel del mar, y, por otra parte, genera una intensa actividad sísmica y volcánica (magmática), asociada a la cual se originaron importantes cuerpos mineralizados.

El Altiplano se ubica en el borde occidental del continente Sudamericano y forma parte de la Cordillera de los Andes. Se encuentra en el sector de la cadena denominado Andes Centrales y precisamente en el sector arqueado de esta cadena, que se denomina Codo de Arica o de Santa Cruz (Fig. 2).

El Altiplano es uno de los rasgos orográficos más destacados del cordón andino. Este elemento de la cadena, que compartimos Argentina, Bolivia, Chile y Perú, al igual que la Cordillera de la Costa, en las zonas norte y central de Chile, o las Cordilleras Occidental, Central u Oriental, en Colombia, es desde el punto de vista geológico una Unidad Morfoestructural. Esto significa que sí trata de una unidad de morfología o relieve u orográfica, diferenciable de otras unidades contiguas, separadas entre si por estructuras geológicas mayores, generalmente grandes fracturas o fallas, y que es de origen estructural o deformacional.

Existen en los Andes Centrales, como en el resto de la cadena andina, numerosas unidades morfoestructurales (Fig. 2). Una sección a través de los Andes Centrales permitiría reconocer de Oeste a Este: La Cordillera de la Costa, la Depresión Central, el Altiplano con el cordón volcánico en su borde occidental o Cordillera Occidental, la Cordillera Oriental y las Sierras Subandinas.

El origen del Altiplano por su ubicación en la cadena andina está estrechamente relacionado con el origen de esta cordillera. Aquí ocurrieron una serie de complejos fenómenos, muchos de ellos aun poco comprendidos, que dieron origen a los Andes. La existencia, en esta región de los Andes Centrales, de este imponente elemento geográfico pone en evidencia que estos fenómenos han tenido aquí mayor intensidad que en otros sectores, o bien, que aquí han tenido lugar fenómenos que no han ocurrido en el resto de la cadena andina.

El Altiplano, incluyendo la Puna, es con el Himalaya una de las mayores mesetas o plateaus de la Tierra. Es una inmensa altiplanicie o llanura elevada, que se encuentra a un promedio de 3.700 metros sobre el nivel del mar. Tiene cerca de 300 km de ancho y unos 1.500 km de largo. Se extiende desde los 15º hasta los 27º de latitud sur, o sea, desde la región de Ayacucho, en Perú, hasta cerca de Copiapó, en Chile (Fig. 2).

En la superficie del Altiplano se encuentran extensas depresiones: Salares o cuencas endorreicas hacia el Sur, formados bajo condiciones climáticas áridas con gruesas acumulaciones evaporíticas, salinas, como los salares de Arizaro, Uyuni, Coipasa y Surire, y enormes lagos hacia el Norte, como el Poopo y el Titicaca.

La Cordillera Occidental corresponde al cordón volcánico andino. Tiene unos 100 km de ancho y está formada por volcanes activos y volcanes extinguidos subrecientes, algunos de los cuales alcanzan alturas de más de 6.500 m, edificados sobre la superficie plana de la parte oeste del Altiplano. Los volcanes más jóvenes y activos se ubican principalmente a lo largo del límite internacional (Fig. 2).

Para comprender las magnitudes de esta masa cordillerana señalaremos que una sección o perfil de la Cordillera de los Andes en la región central de Chile, entre Valparaiso y Mendoza, tiene un área de 500 km cuadrados, en cambio una sección de la cordillera entre Arica y Santa Cruz tiene 1.800 km cuadrados.

ORIGEN DEL ALTIPLANO

La formación de una cadena de montañas como los Andes es un proceso muy complejo y su comprensión cabal es prácticamente imposible. Explicar, además, en algún sector de ella la existencia de una masa elevada de la magnitud del Altiplano es aún más difícil. Significa comprender una serie de situaciones presentes y pasadas. Por un lado, es necesario conocer una serie de acontecimientos ocurridos en el transcurso de las últimas decenas de millones de años y, por otra parte, conocer la masa del Altiplano, o sea, las variaciones de densidad en la horizontal y en la vertical, el espesor de la corteza en la región, las variaciones de gravedad, temperaturas, el régimen de fuerzas que está actuando, velocidad del acercamiento entre la placa de Nazca y América del Sur, ángulo con que se hunde la Placa de Nazca bajo el continente (ángulo de subducción).

HISTORIA GEOLOGICA DE LA REGION ALTIPLANICA CHILENA

A continuación se presenta una resumida y simplificada relación de la evolución geológica de la región en que hoy en día se

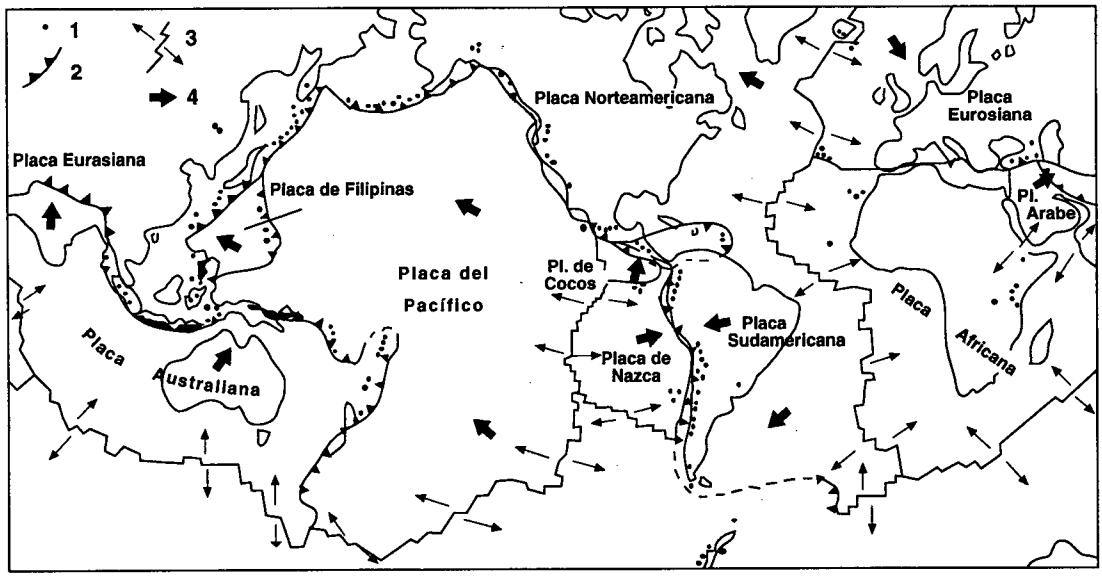

Fig. 1. Distribución de las principales placas de la corteza terrestre, de las dorsales oceánicas y de las regiones de convergencia o colisión de placas. En las zonas de convergencia entre placas oceánicas y placas continentales se indica la actividad volcánica asociada. 1. Volcanes activos, 2. Zona de convergencia de placas, 3. Dorsales oceánicas con indicación del sentido de la expansión, 4. Movimiento relativo del las placas.

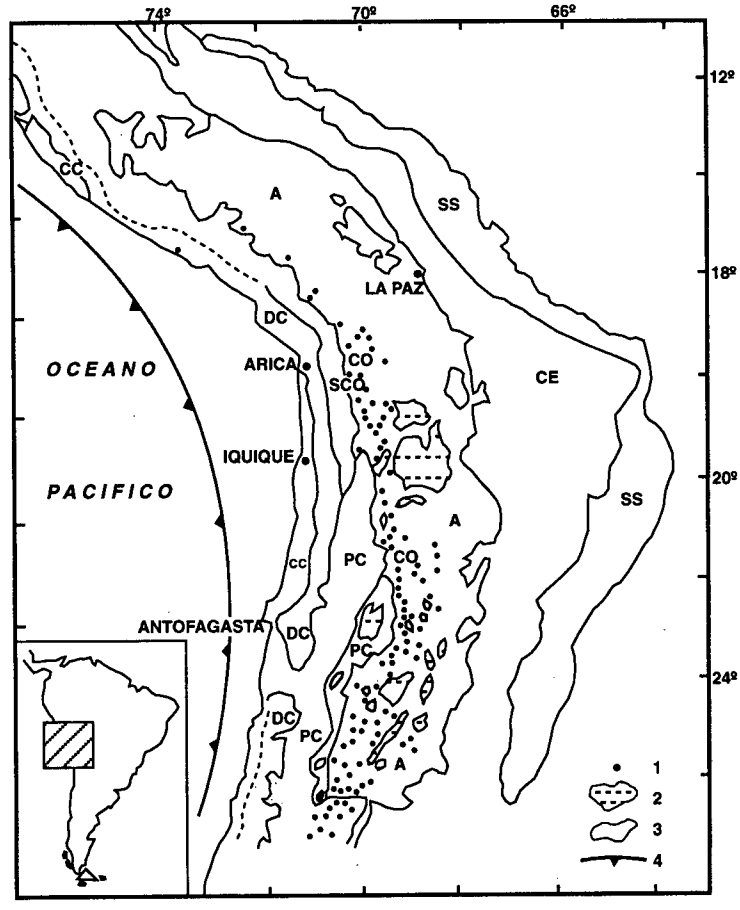

Fig. 2. Mapa de ubicación del Altiplano en América del Sur y distribución de las unidades orográficas o morfoestructurales del sector arqueado de los Andes. CC. Cordillera de la Costa, DC. Depresión Central, PC. Precordillera, PD. Depresión Preandina, A. Altiplano, CO. Cordillera Occidental volcánica, CE. Cordillera Oriental, SS. Sierras Subandinas. 1. Volcanes, 2. Salares, 3. Lagos, 4. Zona de subducción. En el recuadro se indica el área de América del Sur representada en detalle.

encuentra el Altiplano chileno, basada principalmente en los estudios regionales de MONTECINOS (1963), SALAS *et al.* (1966) y MUÑOZ (en prep.), haciendo énfasis en los acontecimientos más recientes que, desde nuestro punto de vista, pueden ser relevantes para explicar su origen.

Las rocas que constituyen la corteza terrestre son para los geólogos los testigos de lo que aconteció en el pasado en nuestro planeta. Las rocas conforman, por lo tanto, una suerte de registro de los acontecimientos pretéritos, de tal modo que mientras más ámplio y completo sea el registro geológico de una región, mejor podremos interpretar los acontecimientos sucedidos y conocer las vicisitudes de la evolución geológica.

En la región altiplánica se conocen rocas que cubren un rango de edad de 1.000 millones de años (PACCI *et al.*, 1980), lo cual casi triplica el rango cubierto por las rocas presentes en otros sectores de los Andes Centrales. Lamentablemente el registro geológico en este caso, si bien es amplio, no es muy completo para los periodos más antiguos de la historia.

Las rocas más antiguas de esta región corresponden a esquistos y gneisses, o sea, a rocas metamórficas. Son éstas, rocas que originalmente fueron sedimentos o rocas volcánicas y que posteriormente han sufrido intensos procesos de deformación asociados a fuertes calentamientos, que las transformaron completamente. La edad obtenida en Chile para estas rocas, agrupadas bajo el nombre de Esquistos o Complejo Metamórfico de Belén, es de 1.000 millones de años (MONTECINOS, 1963; PACCI *et al.*, 1980).

La presencia de estas rocas en la región presenta un gran problema. No se ha podido precisar aún si pertenecen al borde del núcleo antiguo del continente Sudamericano o si forman parte de un bloque alóctono de corteza, ajeno al continente, que colisionó en un pasado muy lejano con América del Sur.

No existen en esta región rocas de edades intermedias entre 1.000 millones de años, o lo que los geólogos denominamos el Precámbrico, y rocas paleozoicas, o sea, de menos de 600 millones de años.

Las rocas paleozoicas conocidas en la región permiten deducir la existencia de una ámplia cuenca sedimentaria marina, pero no es posible aún afirmar cuáles fueron sus relaciones con el continente americano y con las rocas precámbricas. Esto es precisamente lo que impide determinar si las rocas precámbricas forman un bloque alóctono o son una parte del borde del núcleo continental.

Las rocas mesozoicas, correspondientes a la Era inmediatamente posterior al Paleozoico, se desarrollaron en un típico ambiente de margen continental convergente, o sea, como explicaba anteriormente, en una región donde se encuentran y chocan una placa de corteza oceánica con una de corteza continental.

Durante todo el Jurásico, e incluso desde fines del Triásico, hasta la mitad del Cretácico, es decir, durante un periodo de tiempo de unos 140 millones de años, se desarrolló paralelamente al borde de América del Sur en la región aquí considerada un extenso cordón magmático, con una importante actividad volcánica superficial, y una ámplia cuenca de sedimentación hacia el Este del cordón (HARAMBOUR, 1990; MUÑOZ *et al.*, 1988).

La actividad magmática mencionada produjo fuertes alteraciones en las rocas preexistentes causando la formación de una serie de yacimientos minerales, conocidos a lo largo de la actual región costera.

En la cuenca de sedimentación se acumularon varios miles de metros de sedimentos (HARAMBOUR, 1990; MUÑOZ *et al.*, 1988), los que registraron las variaciones del nivel relativo del mar y el continente. Se conocen en ella depósitos que en un comienzo fueron sedimentados en un ambiente continental y posteriormente en un ambiente marino, para terminar nuevamente en un ambiente continental. Estas fluctuaciones reflejan, en un comienzo, tendencias de descenso o hundimiento del continente acompañado con un ingreso del mar hacia esta cuenca y posteriormente tendencias de ascenso o alzamiento del continente con retiro gradual del mar. El grano de los sedimentos allí acumulados presenta diferente grosor, desde materiales finísimos hasta materiales muy gruesos. Esto nos permite deducir la energía de los agentes que los transportaron y concluir como evolucionó la topografía o relieve de esa época. Las estructuras conservadas en esos sedimentos permiten conocer si el ambiente era frío o cálido, continental o marino, y en este último caso si era profundo o somero, de aguas cálidas o frías e incluso limpias o turbias, es decir, las características paleogeográficas de la cuenca.

Las condiciones ambientales de esta cuenca permitieron un desarrollo importante de actividad orgánica, la cual, bajo condiciones apropiadas de presión y temperatura durante el enterramiento o recubrimiento de los sedimentos de la cuenca a medida que proseguía la sedimentación, permitió la generación de hidrocarburos. Estos, al ir desarrollándose o madurando, migraron hasta los reservorios definitivos a través de las rocas más permeables.

El término de esta cuenca y de la actividad del cordón volcánico se debió a un fuerte aumento en la velocidad de separación en las dorsales oceánicas que produjo un aumento en la velocidad de convergencia entre la placa oceánica y el continente. Esta mayor velocidad de convergencia habría generado una enorme compresión del borde continental causando la deformación de las rocas del cordón volcánico y de los depósitos acumulados en la cuenca adyacente. Estos últimos se doblaron o plegaron y

se fracturaron o fallaron, permitiendo un fuerte acortamiento de todo el dominio afectado. Las rocas permeables plegadas y falladas pasaron a constituir cuerpos susceptibles de almacenar los hidrocarburos generados en la cuenca, o sea, trampas de petróleo.

Después de este evento compresivo no volverá a ingresar el mar en la región donde se desarrolló la cuenca del Jurásico-Cretácico Inferior.

En el Cretácico Medio a Superior se desarrolló un nuevo cordón volcánico en una ubicación más al este que el anterior sobre las rocas sedimentarias deformadas de la cuenca del Jurásico y del Cretácico Inferior. Esta actividad volcánica pudo provocar una sobremaduración de los hidrocarburos contenidos en las rocas cercanas al cordón volcánico.

En el sector altiplánico mismo las rocas de este nuevo cordón magmático (volcánico) no están expuestas. Se las conoce en los contrafuertes cordilleranos al pié occidental del Altiplano en la quebrada Tarapacá, al interior de Iquique (HARAMBOUR, 1990) y más al Sur en el sector entre Antofagasta y Calama (MUÑOZ *et al.*, 1989).

En el Terciario, posiblemente Inferior, se desarrolló aparentemente un nuevo sistema de arco volcánico con una cuenca de sedimentación a su lado oriental. Este par paleogeográfico de arco y cuenca de trasarco se desarrolló en una posición aún más al Este que los anteriores, mostrando una migración de los cordones volcánicos y de las cuencas asociadas, similar a la que se conoce para otros sectores andinos.

Los depósitos de este periodo, descritos por (SALAS *et al.*, 1966; MUÑOZ, 1991), alcanzan espesores de más de 1.000 m y corresponden a cuencas subsidentes de carácter esencialmente fluvio-lacustre (Formación Chucal) en las que hubo un fuerte desarrollo de actividad orgánica. En ellos se han encontrado restos fósiles de vertebrados (CHARRIER *et al.*, 1994). Contemporáneamente con estos depósitos se inició una actividad volcánica ácida y explosiva en la región altiplánica. Estos depósitos fueron probablemente deformados por un nuevo episodio compresivo hace aproximadamente 24 millones de años y que parece corresponder al inicio del alzamiento del Altiplano.

En efecto, con aproximadamente la misma edad, se conoce para el borde oriental del Altiplano en Bolivia el inicio de un largo y casi continuo proceso de deformación que hace cabalgar la masa altiplánica sobre rocas sedimentarias ubicadas a su lado oriental (HERAIL *et al.*, 1990; SEMPERE *et al.*, 1990).

Gigantescas explosiones volcánicas dieron origen a un grueso y extenso manto de cenizas volcánicas que recubrieron a todos los depósitos anteriores (Formación Oxaya, MONTECINOS, 1963; SALAS *et al.*, 1966; Formación Altos de Pica, GALLI, 1957, 1968; GALLI y DINGMAN, 1962), cuyas edades están comprendidas entre 23 y 15 millones de años (GALLI, 1957, 1968; GALLI y DINGMAN, 1962; LAHSEN, 1982; MUÑOZ, en preparación). Depósitos similares y de la misma edad se conocen en el Sur del Perú.

Sobre estos depósitos volcánicos se desarrollaron, ahora en el Terciario Superior (Mioceno), nuevos depósitos sedimentarios continentales de carácter esencialmente fluvial (Formación Lupica).

En el sector chileno se continuó el proceso de deformación con el desarrollo de fallas inversas que afectaron a los depósitos volcánicos y fluviales suprayacentes y que permitieron el montamiento del bloque altiplánico hacia el Oeste sobre las rocas adyacentes (MUÑOZ y SEPULVEDA, 1992; MUÑOZ y CHARRIER, 1996; CHARRIER y MUÑOZ, este volumen). La existencia de dos sistemas de fallas inversas con inclinaciones que convergen bajo el Altiplano ubicados en ambos bordes del bloque altiplánico, pone en evidencia que este elemento orográfico es una estructura compresiva, es decir, un bloque de corteza elevado por fuerzas compresivas a lo largo de fracturas de cizalle o fallas (Fig. 3).

Los volcanes antiguos, erosionados e inactivos, y los volcanes recientes, con escasa o sin erosión y activos, algunos con abundantes manifestaciones fumarólicas como el volcán Guallatire, que forman la denominada Cordillera Occidental, se desarrollaron en la superficie del Altiplano por encima de la cubierta de cenizas mencionada.

Sobre esa cubierta se desarrolló también la cuenca que alojó a los 300 m de sedimentos de la Formación Lauca y las cuencas endorreicas denominadas salares, donde se acumularon gruesos espesores de depósitos evaporíticos.

RECURSOS MINEROS Y ENERGÉTICOS EN EL ALTIPLANO CHILENO

Uno de los objetivos esenciales de este simposio es conocer y analizar, por una parte, los diferentes tipos de recursos con que se cuenta en la región altiplánica, que puedan favorecer su desarrollo, y, por otra parte, los aspectos asociados a ese desarrollo que puedan comportar efectos negativos a la conservación de su ambiente.

A continuación se presenta un breve recuento de los aspectos mineros y energéticos de la región y se exponen algunas consideraciones pertinentes a estos recursos en el Altiplano, dejando el análisis detallado a los expositores especializados en el tema.

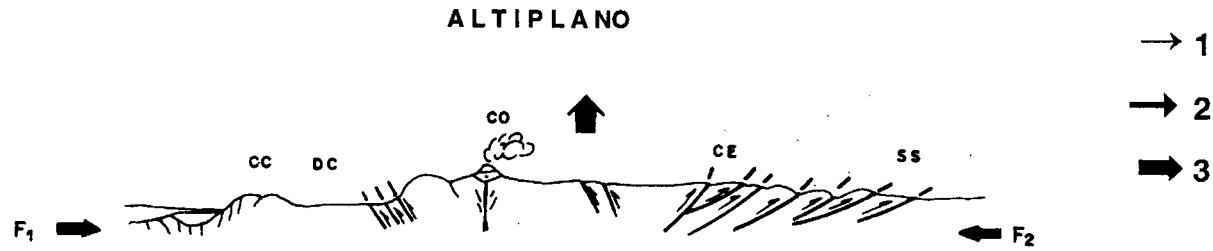

Fig. 3. Esquema ilustrando el mecanismo propuesto para el alzamiento del Altiplano con sistemas de facturas de cizalle a ambos lados. Abreviaturas como en Fig. 3. F1. Fuerza compresiva debido al empuje de la Placa de Nazca, F2. Fuerza de reacción ejercida por el continente en sentido contrario a F1. 1. Desplazamiento a lo largo de los sistemas de fallas que limitan el Altiplano por ambos lados, 2. Sentido de aplicación de F1 y F2, 3. Movimiento de alzamiento del Altiplano como respuesta a F1 y F2.

La explotación de estos recursos en esta región no tiene el mismo desarrollo que en otras regiones del pais, pero pueden alcanzar con una adecuada investigación dimensiones interesantes.

Los recursos mineros se pueden subdividir en Metálicos y No-Metálicos, y los recursos energéticos, en Geotermia y Petróleo.

1. Recursos mineros metálicos

Los yacimientos conocidos en la región corresponden a depósitos epitermales asociados al volcanismo más reciente, que se desarrolló sobre la cubierta de cenizas volcánicas de la Formación Oxaya (Fig. 4). En ellos la actividad volcánica, o sea, los líquidos y gases sobrecalentados que se desprenden del magma, han producido intensas alteraciones en las rocas prexistentes extrayendo de ellas ciertos minerales y concentrando otros, que pueden ser de valor comercial. Estos yacimientos tienen generalmente altos contenidos de cobre, oro y plata, en distintas proporciones. Sus edades están comprendidas entre 17 y 1,2 Ma (ERICKSEN y CUNNINGHAM, 1993).

El ejemplo más destacado en esta región de Chile es el yacimiento de Choquelimpie, cuya explotación se interrumpió recientemente, que se ubica en el interior del antiguo volcán homónimo profundamente erosionado en el que están expuestas las zonas de alteración mineralizadas (AGUIRRE, 1990). Otro yacimiento en el sector chileno es el de Quebrada Blanca-Collahuasi, al interior de Iquique. Ejemplos de yacimientos en los países limítrofes son: Orcocampa, Caylloma, Sucuitambo y Santa Bárbara, en Perú, La Española, Berenguela, Carangas y Salinas de García Mendoza, en Bolivia, y, Pirquitas y Salle, en Argentina (ERICKSEN y CUNNINGHAM, 1993) (ver Fig. 4).

Estos yacimientos son, generalmente, de tamaño pequeño. No alcanzan las dimensiones gigantescas de los yacimientos denominados de Cobre Porfírico, como Chuquicamata, La Escondida o El Salvador. Estos últimos, si bien tienen también un origen magmático, están asociados a un arco volcánico más antiguo y, por lo tanto, tienen una ubicación al Oeste del cordón volcánico actualmente activo.

Yacimientos de Cobre Porfírico no se han encontrado en el Altiplano. Este hecho no significa que ellos y las grandes fallas a las que se encuentran asociados no existan en esta región. De haberse desarrollado, se los debería encontrar bajo la gruesa y extensa cubierta de la Formación Oxaya: Una tarea obviamente muy difícil.

2. Recursos mineros no-metálicos

Estos recursos se denominan también de rocas y minerales industriales (ver CHONG, este volumen), aun cuando también pueden incluirse elementos en estado nativo como el Azufre. Los recursos de agua, si bien son uno de los aspectos de la Geología Aplicada, son tratados en otra sección de este volumen y por ello no se los considera aquí.

También asociados a la actividad volcánica más reciente, se conocen en esta región importantes depósitos de Azufre, generalmente ubicados en las cumbres de los volcanes y, por lo tanto, de difícil acceso. Estos depósitos se formaron por la actividad solfatárica, o sea, producto de emanaciones de gases que se desprenden desde las cámaras magmáticas.

Una fuente importante de recursos mineros no-metálicos en la región son los salares, que concentran distintos tipos de sales, como boratos en el Salar de Surire, sal gema, etc y elementos químicos disueltos en las salmueras, como el Boro, el Litio, Tierras Raras, de gran interés en procesos de tecnología de punta.

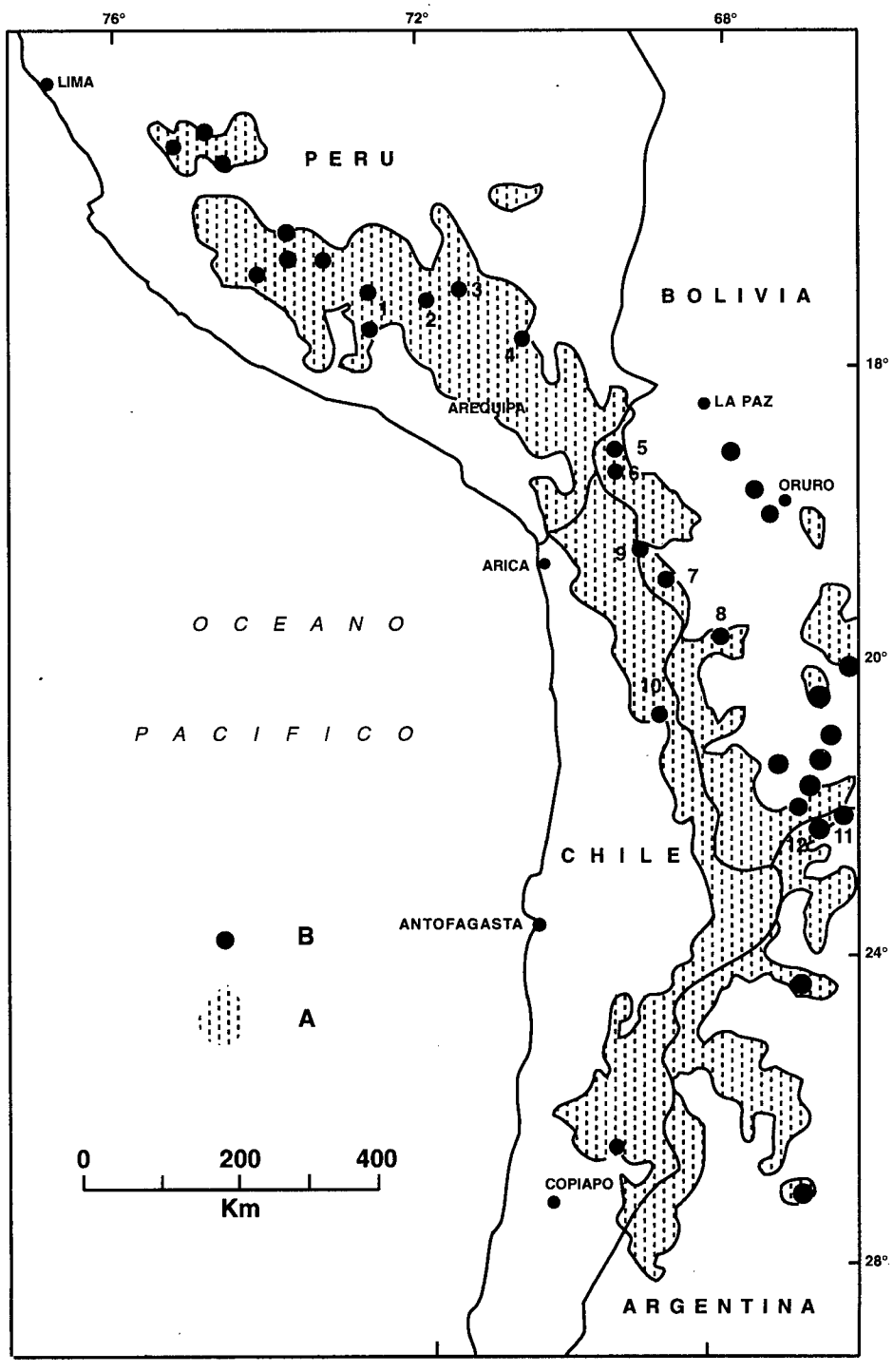

Fig. 4. Distribución de yacimientos epitermales en el sector altiplánico, mostrando su relación con el volcanismo; basado en ERICKSEN y CUNNINGHAM (1993). A. Distribución del volcanismo reciente, B. Yacimientos (se señala la ubicación de algunos yacimientos importantes): 1. Orcocampa, 2. Caylloma, 3. Sucuitambo, 4. Santa Bárbara, 5. La Española, 6. Berenguela, 7.Carangas, 8. Salinas de García Mendoza, 9. Choquelimpie, 10. Ouebrada Blanca-Collahuasi, 11. Pirquitas, 12. Salle.

RECURSOS ENERGÉTICOS

Los recursos energéticos a los cuales se hará referencia son: La energía geotérmica y el petróleo.

1. Energía geotérmica

La energía geotérmica es también el resultado de la actividad volcánica. Es su manifestación hidrotermal externa, o sea,

que corresponde al escape del vapor de agua. Vapores de este tipo, junto con otras sustancias desprendidas de las cámaras magmáticas de los volcanes, producen las alteraciones ya mencionadas en las cuales se pueden encontrar yacimientos minerales de tipo hidrotermal y epitermal. Esto permite deducir que bajo un campo geotermal o de geyseres se puede estar formando un yacimiento mineral.

La energía calórica que se desprende de estos campos como agua caliente y vapor, frecuentemente sobre calentado, ofrece la posibilidad de transformarla en energía eléctrica.

En la región altiplánica chilena se conocen numerosos campos geotérmicos: Jurase, Surire, Puchuldiza, El Tatio, etc. De éstos los más importantes (Surire, Puchuldiza y El Tatio) han sido estudiados detalladamente con el objeto de evaluar su potencial energético (LAHSEN, 1976). De acuerdo con el autor mencionado el potencial energético de los tres campos geotérmicos alcanza a, por lo menos, 50 Megawatts, de los cuales 17 Mw han sido comprobados por perforaciones efectuadas en El Tatio.

Las aguas termales que emanan de estos campos ofrecen, además del natural interés turístico, la posibilidad de extrear minerales y elementos de valor económico y de ser dessalinizada para uso agropecuario, recurso de gran valor en una región esencialmente árida.

2. Petróleo

Los análisis paleogeográficos realizados hasta la fecha en los depósitos de la cuenca Jurásico-Cretácica de trasarco sugieren que las zonas más apropiadas para la formación y acumulación de petróleo se encuentren en el sector altiplánico, aproximadamente en la región limítrofe con Bolivia (MUÑOZ y CHARRIER, 1993). Esta es una conclusión que parece estar respaldada por la existencia de surgencias de petróleo en el sector de Charaña, en Bolivia, lo cual indujo a la perforación de un pozo de exploración, por parte de la empresa boliviana de petróleo (YPFB).

ASPECTOS INTERDISCIPLINARIOS DE LA INVESTIGACION EN CIENCIAS DE LA TIERRA

Con una historia geológica tan larga y compleja como la esbozada, con las implicaciones de diversa índole que tiene el desarrollo y la presencia de un bloque montañoso de la dimensión del Altiplano y los diferentes tipos de recursos explotables que contiene, son muchos los aspectos que requieren ser analizados y estudiados, y muy diferentes los métodos que se requiere aplicar para su mejor conocimiento y comprensión.

Sólo en el ámbito de la Geología, la Geofísica, y los Recursos Mineros y Energéticos, son numerosos los puntos que requieren de mayor investigación integrada: la estratigrafia, la tectónica, el volcanismo, la paleogeografía, el riesgo sísmico y volcánico, la evaluación de los recursos mineros y energéticos, y las propiedades geofísicas de la corteza, por nombrar a algunos solamente (para mayores precisiones respecto de estos temas ver los otros artículos del área Ciencias de la Tierra).

Investigaciones de carácter esencialmente interdisciplinario son los estudios sobre el impacto ambiental que pueden tener las actividades productivas mineras y de recursos energéticos, y el desarrollo de tecnologías metalúrgicas no contaminantes (LIENQUEO *et al.*, 1992). Especialmente delicada es la toma de decisiones respecto a la conveniencia de explotar o no un recurso en desmedro o en beneficio, respectivamente, de ciertas condiciones ambientales, en una región donde, además, es urgente definir planes de desarrollo.

El Altiplano tuvo un lento proceso de alzamiento, que se inició hace cerca de 25 millones de años. Este proceso produjo necesariamente un aislamiento de la fauna y flora que allí existía. Estos organismos tuvieron que adaptarse gradualmente a las nuevas condiciones climáticas y de altura o bien tuvieron que desaparecer. Este punto me parece interesante por cuanto entre los grupos que actualmente pueblan el Altiplano podrían existir representantes de algunas lineas filogenéticas, que se iniciaron antes del alzamiento, y otras inmigrantes. El registro paleontológico, tanto de la flora como de la fauna, es aun relativamente escaso como para poder diferenciar estos grupos y para conocer el momento de su aparición en la región altiplánica. Los primeros hallazgos de vertebrados fósiles en el Altiplano chileno se realizaron recién en los últimos años. Tampoco existen estudios de palinología, disciplina que estudia los remanentes fósiles de polen y esporas en los depósitos geológicos. Estos estudios, además de proporcionar información sobre la evolución y cronología del poblamiento florístico de la región, podría ser de gran utilidad para conocer la evolución de su clima y a partir de ello conocer el momento en que la región alcanzó alturas que modificaron las condiciones climáticas (ver PALMA-HELDT, este volumen).

Es importante señalar que, entre todas las especies que pueblan el Altiplano, el Hombre es una de las especies que hizo su aparición después que el Altiplano alcanzó alturas similares a las que ostenta actualmente y que, por lo tanto, es un organismo colonizador de la región.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo es el producto de actividades desarrolladas en el marco del Proyecto de Investigación FONDECYT 1224-91

"Tectónica compresiva versus acreción magmática en la génesis del Altiplano chileno", financiado por la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica de Chile (CONICYT).

REFERENCIAS

Aguirre, E.,1990. Geología del Complejo Volcánico Choquelimpie-Ajoya, Altiplano de Arica, 1ª Región. Memoria, Departamento de Geología Universidad de Chile. Santiago, 136 p.

Charrier y Muñoz, N., Geología y Tectónica del Altiplano Chileno. Este volumen.

Charrier, R., Muñoz, N., Wyss, A.R., Flynn, J.J. y Hérail, G., 1994. Hallazgo de un húmero de Toxodonte (Mammalia) en la Formación Chucal en el Altiplano Chileno. Actas 7º Congreso Geológico Chileno, Concepción, Chile, Vol. 1, p. 434-437.

Ericksen, G. y Cunningham, C.G., 1993. Precious-metal deposits in the Neogene-Quaternary volcanic complex of the Central Andes, in: Investigación de metales preciosos en los Andes Centrales, Proyecto BID/TC-88-02-32-5, p. 3-16.

Galli, C., 1957. Las formaciones geológicas en el borde occidental de la Puna de Atacama, Sector de Pica, Tarapacá. Revista Minerales, Año 12, Nº 56, p. 14-26, Santiago.

Galli, C., 1968. Cuadrángulo Juan de Morales, Provincia de Tarapacá. Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago, Carta Geológica Nº 18, 53 p.

Galli, C. y Dingman, R., 1962. Cuadrángulos Pica, Alca Matilla y Chacarilla. Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago, Carta Geológica, Vol. 3, Nº 2-5, 125 p.

Harambour, S., 1990. Geología pre-cenozoica de la Cordillera de los Andes entre las quebradas Aroma y Juan de Morales, I Región, Chile. Memoria Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago, 228 p.

Hérail, G., Baby, P., López, M., Oller, J., López, O., Salinas, R., Sempere, T., Beccar, G. y Toledo, H., 1990. Structure and kinematic evolution of subandean thrust system of Bolivia. Premier Symposium Intemational de Géodynamique Andine (ISAG 90), Grenoble, May 1990, Editions ORSTOM, Paris, p. 172-182.

Lahsen, A., 1976. Geothermal exploration in Northern Chile: A summary. Circum-Pacific energy and Mineral Resources, Memoir N° 25, p. 169-175.

Lahsen, A., 1982. Upper Cenozoic volcanism and tectonism in the Andes of Northern Chile. Earth-science Reviews, Vol. 18, p. 285-302.

Lienqueo, M.E., Casas, J., Escobar, B., Hernández, J. y Herrera, L.,1992. Generación y remoción de sulfato en la minería del cobre. Anales Primer Taller de Biotecnología Ambiental, Concepción, Octubre 1992, Universidad de Concepción, p. 191-199.

Montecinos, F., 1963. Observaciones de geología en el Cuadrángulo de Campanani, Departamento de Arica, Provincia de Tarapacá. Memoria Departamento de Geología Universidad de Chile, Santiago, 109 p.

Muñoz, N., 1991. Marco Geológico y estratigráfia de un sistema fluvio-lacustre Paleogeno, Altiplano de Arica, Norte de Chile. Actas 6º Congreso Geológico Chileno, Viña del Mar, p. 201-204.

Muñoz, N., en prep. Estratigrafía, estructura y evolución del Altiplano chileno entre 18° 30' y 20° de latitud Sur. Tesis, Departamento de Geología Universidad de Chile, Santiago.

Muñoz, N. y Sepúlveda, P., 1992. Estructuras compresivas con vergencia al Oeste en el borde oriental de la Depresión Central (19º 15' lat. Sur). Revista Geológica de Chile, vol. 19, Nº 2, p. 241-247, Santiago.

Muñoz, N. y Charrier, R.,1993. Jurassic-early Cretaceous facies distribution in the Western Altiplano (18°-21° 30' S.L.). Implications for hydrocarbon exploration. Second Symposium International de Geodynamique Andine (ISAG 93), Oxford, Septembre 1993, Editions ORSTOM, Paris, p. 307-310.

Muñoz, N. y Charrier, R., 1996. A west vergent fault system at the westem border of the Altiplano in Northern Chile: implications for the uplift of the Altiplano-Puna plateau. Jour. of South American Earth Sciences, Vol. 9, p. 171-181.

Muñoz, N., Elgueta, S. y Harambour, S., 1988. El Sistema Jurásico en el curso superior de la quebrada Azapa, I Región: Implicancias paleogeográficas. Actas 5º Congreso Geológico Chileno, V. 1, p. A 403- A 405.

Muñoz, N., Charrier, R. y Pichowiak, S., 1989. Cretácico Superior volcánico-sedimentario (Formación Quebrada Mala) en la Región de Antofagasta, Chile, y su significado geotectónico; in: Contribución a los Simposios sobre el Cretácico de América Latina, Parte A: Eventos y Registro Sedimentario, Spalletti, L., Editor, Buenos Aires, p. 133-148.

Pacci, D., Herve, F., Munizaga, F., Kawashita, K. y Cordani, U., 1980. Acerca de la edad Rb/Sr precámbrica de rocas de la Formación Esquistos de Belén, Departamento de Parinacota, Chile. Revista Geológica de Chile, 11, p. 43-50.

Salas, R., Kast, R., Montecinos, F. y Salas, R., 1966. Geología y recursos minerales del Departamento de Arica, Provincia de Tarapacá. Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín 21, 114 p., Santiago.

Sempere, T., Heral, G., Oller, J. y Bonhomme. M.G., 1990. Late Oligocene-early Miocene major tectonic crisis and related basins in Bolivia. Geology, Vol. 18, p 946-949.