

Luis Aguirre (Coordinador), René Garreaud, Francisco Hervé, Edgar Kausel, Patricio Moreno, María Victoria Soto, Irene Tapia y Gonzalo Yáñez

Resumen- Se analiza el tema Ciencias de la Tierra (CT) centrado en tres sub-disciplinas: Geología, Geofísica y Geografía. En Geofísica se cubren las áreas de Tierra Sólida y Ciencias Atmosféricas y, en Geografía, la Geografía Física. El análisis comprende el período de 5 años entre 2000 y 2004.

Según las condiciones establecidas por el Comité (esencialmente 2 publicaciones ISI en el período) se registran 155 investigadores activos. De éstos 22% corresponde a mujeres y 78% a hombres; el promedio de edad es de 46 años. El 80% de esos investigadores posee el grado de doctor. Las universidades concentran el 75% de estos científicos mientras que 25% labora en empresas estatales. La Geología, con un 52% de ellos, es la disciplina mayoritaria.

Un total de 680 publicaciones en el período indica una productividad de *ca.* 1,0 publicación/investigador/año. Las CT han recibido fondos provenientes de FONDECYT Regular por un total de \$ 2.700 millones y se han adjudicado 7 proyectos FONDEF por \$ 1.409 millones en el período. En el ámbito internacional se mantiene una sólida colaboración con universidades y centros de investigación, particularmente con países de Europa, Norte y Sud América y Asia.

El Capítulo analiza detalladamente las sub-disciplinas en lo referente a sus principales líneas de trabajo, los grupos de investigación existentes y la infraestructura disponible.

Existen programas acreditados de Doctorado en Ciencias, mención Geología, en la Universidad de Chile y en la Universidad Católica del Norte, Antofagasta. El total de estudiantes en estos programas es actualmente de 32 habiéndose graduado 8 en el período. Existen además programas de Magíster en varias universidades.

El diagnóstico global de las CT señala fortalezas y debilidades destacando entre las primeras el carácter de “laboratorio natural” de nuestro territorio, el impacto de la disciplina en la prospección de recursos minerales y la existencia de investigadores de nivel internacional y, entre las segundas, el escaso reconocimiento de las CT por parte de la comunidad nacional, la baja masa crítica de investigadores y la falta de recursos para investigaciones de punta. Pese a lo anterior, se destacan ejemplos de investigaciones con gran potencial social y económico realizadas en el marco del descubrimiento de reservas minerales y del riesgo sísmico.

El Capítulo concluye con proposiciones específicas acerca de políticas y acciones a realizar a nivel nacional destacando aquellas referentes a la formación e incorporación de jóvenes investigadores a las labores académicas; a la interacción de centros de investigación universitarios con empresas nacionales; al incremento de presupuestos para proyectos concursables, en especial FONDECYT y al fortalecimiento de instituciones técnicas, *e.g.* Servicio Geológico Nacional, Servicio Sismológico.

Introducción

El capítulo analiza el tema Ciencias de la Tierra centrado en tres sub-disciplinas mayores: la Geología, la Geofísica y la Geografía. El tratamiento de la Geofísica ha considerado la división entre las áreas de Tierra Sólida y de Ciencias Atmosféricas. En el caso de la Geografía el estudio contempla sólo los aspectos relacionados con la Geografía Física. Esta estructura del tema Ciencias

de la Tierra difiere de la adoptada en el estudio *Análisis y Proyecciones de la Ciencia Chilena* (Academia Chilena de Ciencias, 1993) donde las especialidades de Geoquímica, Geología Aplicada a la Ingeniería, Hidrogeología y Geología/Geofísica Marina fueron tratadas en forma separada.

1. Historia Reciente de las Ciencias de la Tierra en Chile

Chile se ubica a lo largo del contacto convergente de las placas de Nazca, Antártica y Sudamérica. La interacción de ellas formó la Cordillera de los Andes, el segundo orógeno de la Tierra en altura y extensión después de los Himalayas, y el único obstáculo al flujo atmosférico en el Hemisferio Sur. Esta circunstancia determina muchas de las características geológicas, geofísicas y geográficas esenciales del territorio tales como la sismicidad, el volcanismo, el clima, y la abundancia y variedad de sus depósitos minerales entre otras. Por la misma razón, el territorio de Chile es un “laboratorio natural”, altamente reputado internacionalmente para el estudio de los fenómenos geológicos y geofísicos que tienen lugar en zonas de subducción a lo largo de márgenes continentales activos y de los fenómenos oceanográficos y meteorológicos relacionados con la ubicación de Chile dentro de los sistemas anticiclónicos-ciclónicos del Pacífico y con los efectos atmosféricos de la Cordillera de los Andes.

El desarrollo de la Geología en Chile se inició durante la primera mitad del siglo 19 con la llegada de naturalistas como Claudio Gay, Ignacio Domeyko, Amado Pissis y otros. Los trabajos de Charles Darwin durante la expedición del Beagle constituyeron un hito mayor en este desarrollo. A comienzos del siglo 20 la Geología y la Geofísica progresaron gracias a la valiosa contribución del Dr. Juan Brügger en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile y de Fernando Montessus de Ballore en el Servicio Sismológico de Chile. Posteriormente, los profesores de la Universidad de Chile Humberto Fuenzalida Villegas y Jorge Muñoz Cristi promovieron el desarrollo de la Paleontología y Petrología respectivamente. Un hito trascendente fue la creación del Servicio Sismológico de Chile con el cual se sientan las bases para el desarrollo de la Geofísica en el país. En 1957 se crearon la Escuela de Geología de la Universidad de Chile y el Instituto de Investigaciones Geológicas, encargado del levantamiento de la Carta Geológica básica y temática del país. Esas instituciones se transformaron posteriormente en el Departamento de Geología de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile (1965) y el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) (1981), respectivamente. La enseñanza de la geología se amplió más tarde con la creación de los Departamentos de Geociencias de las universidades Católica del Norte de Antofagasta (1971) y de Concepción (1972), que confieren el título profesional de geólogo, y con el desarrollo de actividades geológicas en las universidades de Atacama, La Serena, Santiago y Valdivia. La enseñanza de posgrado en Geología se inicia en 1968 en la Universidad de Chile con la creación del Programa de Doctorado en Ciencias, mención Geología y se amplía en 1975 con el establecimiento de un Magister en Ciencias con mención en Geología. Paralelamente, en el Instituto de Geofísica de la Universidad de Chile, aproximadamente a partir de 1956, se impulsan las actividades de investigación consolidándose el grupo de Sismología. La fundación de la Sociedad Geológica de Chile en 1962, institución dedicada al cultivo y a la promoción del conocimiento de las Ciencias de la Tierra, constituye otro hito en el desarrollo de la geología en el país. El Colegio de Geólogos de Chile, creado por Ley N°17628, data de 1972.

En 1993, con ocasión del Congreso Internacional de ICSU efectuado en Chile, la Academia de Ciencias del Instituto de Chile trabajó en la preparación de un estudio acerca del estado de las ciencias en el país el cual se publicó en forma de un libro titulado “*Análisis y Proyecciones de la Ciencia Chilena*”. Uno de sus capítulos se refiere a las Ciencias de la Tierra y contiene un detallado bosquejo histórico. Desde esa fecha hasta el presente el desarrollo de la Geología ha experimentado notorios avances que se resumen a continuación.

En lo referente a la infraestructura analítica, el Departamento de Geología de la Universidad de Chile ha incorporado, con la cooperación del Institut pour la Recherche et le Développement (IRD), un Laboratorio de Paleomagnetismo y uno de Modelamiento Analógico. Por otra parte, se ha incorporado a ese departamento una microsonda electrónica CAMECA Semprob a la que se sumará un microscopio electrónico de transmisión (TEM) recientemente adquirido por la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas para constituir un Laboratorio de Microscopía Electrónica y Microsonda. Recientemente se instaló un Laboratorio Analógico de Procesos Geoquímicos Supérgenos en el Departamento de Geología. La Universidad Católica del Norte, Antofagasta, ha recibido un fuerte apoyo en equipamiento a través de los programas MECESUP. El SERNAGEOMIN cuenta además, desde 2000, con un Laboratorio de análisis geocronológico por el método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ que ha venido a completar las facilidades del método K-Ar que ya existían en ese Servicio. A ello se suma la adquisición reciente de un moderno equipo de difracción de rayos X (XRD). También en lo referente a infraestructura debe mencionarse la gran expansión de las facilidades informáticas y su aprovechamiento específico en los temas relativos a las Ciencias de Tierra tanto en las universidades como en las empresas. La publicación por parte del SERNAGEOMIN en 2002 del nuevo mapa geológico de Chile 1 : 1.000.000 en versión digital que reemplaza a la versión de 1982, es una valiosa contribución al conocimiento del territorio.

En el campo de la docencia cabe destacar el auge alcanzado en los últimos años por los programas de posgrado en Ciencias con mención en Geología de la Universidad de Chile. Luego de un largo período de sequía, el doctorado, acreditado sucesivamente en 2000 y 2002, cuenta en la actualidad (2005) con 25 estudiantes activos en tanto que 8 estudiantes se han graduado desde 2000 al presente. De ellos, tres han efectuado un doctorado en co-tutela entre la Universidad de Chile y las universidades de Toulouse y Rennes en Francia. A ellos hay que agregar un número importante de estudiantes nacionales que han obtenido su grado en diversas universidades del extranjero. El Programa de Magister en Ciencias, mención Geología, ha experimentado también un fuerte crecimiento con un total de 27 estudiantes graduados durante el período 2000-2004 y una matrícula actual (2005) de 24 alumnos. Un Programa de Doctorado en Geología fue creado en la Universidad Católica del Norte de Antofagasta en 2000 y cuenta en la actualidad con la acreditación de la CONAP y 9 estudiantes inscritos. En esa misma universidad se estableció en 1996 un Programa de Magister en Geología Económica, mención Exploración.

El interés por los estudios andinos se ha visto reflejado en el éxito creciente de los Congresos Geológicos Chilenos que congregan gran número de científicos y profesionales nacionales y extranjeros. Con posterioridad a 1993 se han efectuado cuatro de estos congresos con una asistencia media cercana a las 800 personas. A ello se suma, en el plano internacional, la celebración trienal del Simposio Internacional de Geodinámica Andina (ISAG) y del Simposio Sudamericano de Geología Isotópica que se han constituido en foros de alto nivel científico. Las investigaciones antárticas se han ampliado en los últimos años hacia regiones interiores del continente.

Desde 1993, nuevas orientaciones y líneas de investigación han aparecido en Ciencias de la Tierra a nivel mundial. La Unión Internacional de Ciencias Geológicas (IUGS) ha señalado recientemente las siguientes orientaciones prioritarias a desarrollar en este campo:

Entender y mantener intacto para futuras generaciones el registro de la historia de nuestro planeta, el conocimiento de su estructura y funcionamiento y del equilibrio de sus sistemas dinámicos.

Hacer un uso sustentable de la riqueza y diversidad de la Tierra para el beneficio y prosperidad de la humanidad.

Para ello, según la IUGS, se debería focalizar la investigación en ocho temas principales:

- El agua subterránea, un reservorio para un planeta sediento
- Peligros geológicos; cómo minimizar el riesgo y maximizar el conocimiento público
- La Tierra y la Salud, creando un ambiente más sano
- El Clima y su registro geológico
- Los recursos naturales no renovables, su uso inteligente y la búsqueda de maneras más limpias de recuperarlos
- Megaciudades, construcciones más seguras edificando en profundidad
- La Tierra profunda, del núcleo a la corteza
- Los océanos: su uso en beneficio de la humanidad y la prevención de interrupciones en los márgenes continentales

En Chile esas orientaciones aparecen fuertemente ligadas a líneas de investigación relacionadas con los problemas ambientales y de riesgos, lo que les confiere un marcado carácter transversal vinculado a disciplinas como las Ciencias Atmosféricas, la Biomedicina, la Ingeniería Civil, la Hidráulica y otras. Esas líneas de investigación comienzan a desarrollarse en el país por parte de los geólogos y geofísicos. Se constata, sin embargo, la existencia de áreas netamente deficitarias tales como la Hidrogeología, la Paleontología y la Volcanología Física.

En el campo de la cooperación internacional destaca el importante aporte a la investigación y docencia representado por el convenio entre el Departamento de Geología de la Universidad de Chile y el IRD iniciado en 1992 y que ha continuado renovándose cada cuatro años.

El desarrollo de la *Geofísica de la Tierra Sólida* tiene larga data en Chile, especialmente en lo relacionado con geofísica de prospección minera y sismología. Ya en 1822, María Graham, con ocasión de su visita a Valparaíso, describió con extraordinario detalle los efectos del terremoto de Valparaíso de 1822 y sus réplicas, información que ha permitido estimar las características y la magnitud de dicho evento. En forma similar Charles Darwin realizó interesantísimas observaciones del terremoto de 1835 de Valdivia y detalló los sollevamientos costeros ocurridos a raíz del gran terremoto de Concepción de 1830. Desde el descubrimiento de Chile por Almagro y Valdivia se cuenta con descripciones de los grandes terremotos del período de la Colonia, realizadas por autoridades civiles y religiosas.

Desde la fundación de la Universidad de Chile en 1842, la preocupación por las Ciencias de la Tierra se acrecentó con motivo de la creación de la carrera de Ingeniería de Minas. Cursos de Mineralogía y Prospección Minera fueron incorporados a los planes de estudio. Un papel predominante en aquella época lo marcó la llegada al país de don Ignacio Domeyko. A mediados del siglo 19, don Luis Troncoso, corresponsal de la Universidad de Chile en La Serena, construyó un sismógrafo muy ingenioso, el que junto al equipo traído desde EE.UU. por el Lugarteniente Gillis en 1850, constituyen los primeros equipos capaces de registrar sismos de envergadura en nuestro país. En la misma época Paulino del Barrio, primer Ingeniero de Minas egresado de la Universidad de Chile, se dedicó con entusiasmo y rigurosidad a reunir información científica sobre la sismicidad del territorio, constituyendo su trabajo la base de la historia sísmica de Chile.

A raíz del gran terremoto de Valparaíso de 1906, el gobierno decidió crear en 1908 el Servicio Sismológico Nacional con el sismólogo francés Montessus de Ballore como su primer Director. El Servicio pasó a ser el Instituto de Sismología y posteriormente el actual Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, desarrollando docencia e investigación en esta disciplina.

Allí se ha acumulado cuantiosa información sobre los sismos históricos chilenos lo que ha permitido realizar investigaciones en forma sistemática para explicar las causas y efectos de estos fenómenos. Actualmente este Departamento es el único en el país que ofrece un Magíster en Geofísica de la Tierra Sólida, con un número de estudiantes del orden de 5 por año. Otras instituciones como el SERNAGEOMIN, la Universidad de Concepción y la Universidad de Tarapacá, mantienen pequeños grupos de investigación, dedicados principalmente a la prospección geofísica, peligros naturales y a la sismología. El grupo de Tierra Sólida del Departamento de Geofísica está constituido por 6 académicos de jornada completa y tres de jornada parcial, todos con un grado de doctor obtenido en prestigiosas universidades de EE.UU, Europa y México. Si bien la investigación en geofísica del interior de la Tierra se concentra principalmente en ésta y algunas otras universidades, es importante destacar que hay organismos estatales como el Servicio Nacional de Geología y Minería, la Empresa Nacional del Petróleo y la Corporación del Cobre de Chile, y aún empresas privadas del ámbito minero, que contribuyen generando conocimientos en esta área. Un número importante de profesionales egresados del Magíster del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile trabaja precisamente en estas instituciones y empresas nacionales.

El establecimiento, desde la década del 60, de programas de colaboración con centros de investigación extranjeros, principalmente de Estados Unidos, Alemania, Francia, Inglaterra, Japón y Canadá, ha significado no sólo el trabajo conjunto de geólogos y geofísicos nacionales con extranjeros de alto nivel, sino también y muy importantemente, la venida de investigadores en distintas disciplinas que además colaboran intensamente en la docencia.

Durante el último decenio la evidente relación de la sismología con la ingeniería sismorresistente ha producido un fuerte acercamiento de sismólogos e ingenieros. En el pasado se estimaba que los sismos de subducción eran los que marcaban las características principales que debían ser consideradas en las normas sismorresistentes. Acelerogramas registrados principalmente con ocasión del terremoto de Valparaíso de 1985, son ampliamente utilizados por los especialistas para estimar las solicitaciones sísmicas esperadas en un sitio dado. En años recientes se ha llegado a establecer que los sismos intraplaca de profundidad intermedia, deben ser considerados con especial cuidado, pues su poder destructivo a igual magnitud y distancia parece ser mayor que los sismos clásicos de subducción. Su origen aún no es claro y la causa de la aparente mayor destructividad es un tema abierto. Hay planteamientos e ideas al respecto, pero la situación es aún confusa y para nada concluyente. Sismólogos e ingenieros con la colaboración de un elevado número de estudiantes de los departamentos de Ingeniería Civil y de Geofísica de la Universidad de Chile han abordado temas de Tesis relacionados con este problema, lo que permitirá en el futuro cercano resolver estas incógnitas que preocupan a geofísicos e ingenieros. ACHISINA (Asociación Chilena de Sismología e Ingeniería Antisísmica), está especialmente preocupada de este tema. Completados estos trabajos, es probable que se propongan modificaciones a la norma chilena vigente. Esos y otros estudios interdisciplinarios promueven la incorporación de académicos de variadas disciplinas, enriqueciendo y estimulando la investigación en Ciencias de la Tierra.

En los últimos cinco años, con la incorporación de geofísicos franceses, se han abierto nuevas líneas de investigación en el campo de la geodinámica, lo que permitirá ligar procesos de distintas escalas temporales.

El interés por las *Ciencias Atmosféricas* en el país data de mediados del siglo 19 cuando se instalan las primeras estaciones de observación y se crea el Observatorio Nacional ubicado en el Cerro Santa Lucía y las primeras estaciones de observación en La Serena, Valdivia y Punta Arenas. Estas observaciones permitieron visualizar los rasgos más sobresalientes en el comportamiento atmosférico en lugares específicos. Dentro de ese período destaca la publicación, en 1861, de la *Meteorología de Chile*, de don Ignacio Domeyko.

En una segunda etapa, que se desarrolla entre comienzos de siglo y la década del 30, hubo un significativo mejoramiento en la red nacional. Siguió un par de decenios en que hay pocas evidencias escritas de importancia, salvo la *Barografía de Chile*, de Miguel Wittaker, en 1942. Los trabajos climatológicos del Profesor Elías Almeyda Arroyo y la publicación, en 1950, del capítulo "*Clima*" en la Geografía Económica de Chile de la Corporación de Fomento de la Producción por el Prof. Humberto Fuenzalida Villegas, marcaron una nueva etapa en estas materias. En ese período la actividad se concentró en estudios climatológicos descriptivos que entregaron las primeras versiones regionalmente integradas del clima de Chile y que fueron desarrolladas principalmente por geógrafos y agrónomos.

La creación de un Grupo de Investigación en Meteorología en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile en 1961 dio origen al actual Grupo de Meteorología del Departamento de Geofísica de esa misma Facultad.

Hacia fines de los años sesenta la Universidad de Concepción envió a dos ingenieros jóvenes a Francia con el objeto de proseguir estudios de postgrado en Meteorología. A su regreso ellos dieron origen a un segundo grupo de investigación en el área en el Instituto de Física de esa Universidad.

Con el desarrollo de la aviación comercial, después de la Segunda Guerra Mundial, la Oficina Meteorológica de Chile, convertida actualmente en la Dirección Meteorológica, pasó a depender de la Fuerza Aérea a través de la Dirección General de Aeronáutica Civil. Su esfuerzo se concentró en el servicio operacional a la aviación, no desarrollándose la investigación.

En el campo de las Ciencias Atmosféricas se han realizado avances notorios en relación a 1993. Desde entonces se han consolidado los grupos de investigación tradicionales tales como el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile y el Departamento de Física de la Atmósfera y Océano de la Universidad de Concepción y han surgido además seis núcleos nuevos (Universidad de La Serena, Universidad Católica del Norte, Dirección Meteorológica de Chile, Centro de Modelamiento Matemático-Atmósfera de la Universidad de Chile, Universidad de Magallanes, Universidad Austral de Chile y Pontificia Universidad Católica, geografía-agronomía).

Otro cambio registrado en relación a 1993 es la creación de una Licenciatura y carrera profesional en meteorología que se imparte desde 1997 en la Facultad de Ciencias de la Universidad de Valparaíso. Los egresados de esa carrera, alrededor de cinco por año, se desempeñan generalmente en empresas mineras y ambientales donde la información meteorológica es relevante, o en la Dirección Meteorológica de Chile.

La enseñanza de la *Geografía* en la Universidad de Chile fue organizada por el geógrafo alemán Hans Steffen entre 1889 y 1890, quien formó las primeras generaciones de profesores que realizaron investigaciones en la disciplina. Entre los discípulos de Steffen, el Profesor Luis Puga, en la década de 1930 del siglo recién pasado, tuvo el mérito de dar independencia a los estudios de Geografía y de formar la principal biblioteca geográfica del país. El alemán Dr. Juan Brügger modernizó la enseñanza de la Geografía Física en Chile. Su discípulo, el Profesor Humberto Fuenzalida, introdujo los conceptos y metodologías de la escuela francesa, pero manteniendo las raíces germanas. Además, institucionalizó los trabajos prácticos y de terreno, transformándose en el hito principal de la historia de la geografía chilena.

H. Steffen y J. Brügger dieron inicio y continuación a la tradición alemana en el ámbito universitario chileno con la creación del Instituto Pedagógico. La creación del Instituto de Geografía, en la Facultad de Filosofía y Educación de la Universidad de Chile, data de diciembre de

1942. En la década de 1950, los profesores Humberto Fuenzalida V. y Jean Borde desarrollaron un movimiento de renovación de la geografía nacional que fructificó en la formación y acción de la brillante generación de geógrafos de los años sesenta.

En el Instituto de Geografía y en el Departamento de Geografía del Instituto Pedagógico de la Universidad de Chile se desarrolló posteriormente un vigoroso movimiento de formación, investigación y difusión geográfica que condujo a la creación de centros de docencia e investigación en provincias, a la presencia renovadora del enfoque geográfico en los organismos públicos y de organización territorial, y a la renovación de los contenidos geográficos en la enseñanza básica y media. Desde el comienzo de los años setenta, la enseñanza e investigación son armonizadas con modernos métodos, incorporándose laboratorios, técnicas de teledetección y sistemas computacionales en forma progresiva. Durante los primeros años de la década de 1980, la unidad académica de Geografía perteneció a la Facultad de Filosofía y Humanidades. Debido a una reestructuración interna nacional de la Universidad, pasó en 1985 a formar parte de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo, sede donde se ha establecido continuando con su desarrollo disciplinario y académico.

La enseñanza de la Geografía en la Pontificia Universidad Católica de Chile se inició en 1943 con la creación de la Escuela de Pedagogía, dependiente de la Facultad de Filosofía, Castellano e Historia y Geografía, para la formación y titulación de profesores para la Enseñanza Media del país. Durante sus primeros años de trabajo, estos departamentos quedaron bajo la tuición de la recién creada Facultad de Ciencias de la Educación. Durante los 27 años que median entre 1943 y 1970, momento en que se crea el Instituto de Geografía, el Departamento de Historia y Geografía aportó un gran número de profesionales al país como profesores de Historia y Geografía y Educación Cívica. En abril de 1970 se funda el Instituto de Geografía en la Pontificia Universidad Católica de Chile, separándose del Departamento de Historia y Geografía dependiente de la Facultad de Filosofía y Ciencias de la Educación, para dar origen a dos institutos independientes. Actualmente ambos institutos, juntos al de Ciencia Política, conforman la Facultad de Historia, Geografía y Ciencia Política de esta universidad.

En la Universidad de La Serena la enseñanza de la Geografía comenzó en los primeros años de la década de 1990, aunque las actividades de nivel académico datan aproximadamente de 1970. La Geografía constituye allí una unidad del Departamento de Ciencias Sociales, dependiente de la Facultad de Ciencias Sociales y Económicas.

2. Análisis global de las Ciencias de la Tierra en Chile

2.1. Metodología

Una lista general de personas que trabajan en Ciencias de la Tierra (sólo nombres y en algunos casos afiliaciones) se preparó en primera instancia sobre la base de los antecedentes aportados por los miembros de este Capítulo Temático, el Directorio de Investigadores en “*Análisis y Proyecciones de la Ciencia Chilena*” (Academia de Ciencias, 1993), y los directorios de académicos y profesionales de diversas instituciones. Esta lista general incluye 210 nombres.

Para cada una de las personas de la lista general, se obtuvo enseguida su número de publicaciones en revistas ISI entre 2000 y 2004 (ambos inclusive) a través de una búsqueda en la página ISI Web of Science, de la información recibida del Observatorio de Ayuda para el Directorio de Investigadores de CONICYT, y de las páginas web de diversas instituciones y personales. Como criterio de búsqueda se empleó el primer apellido, la inicial del primer nombre de las personas y su nacionalidad, lo cual podría, en algunos casos, producir una sub-estimación del número de

publicaciones obtenidas en este proceso en relación al número real de publicaciones. Adicionalmente, se envió por correo electrónico una encuesta preparada por los integrantes del Capítulo a las personas registradas en la lista general.

El criterio de selección de “Investigadores Activos” en Ciencias de la Tierra se estableció sobre la base de al menos 2 publicaciones ISI en los últimos 5 años (2000-2004) o, alternativamente, una publicación ISI en ese período acompañada por uno o más de los siguientes requisitos: (a) autoría de capítulos de libros científicos de la especialidad, nacionales o internacionales, con Comité Editorial; (b) autoría o edición de un libro científico de la especialidad; (c) obtención de un proyecto concursable de investigación, nacional o internacional, en calidad de Director, Investigador Responsable o Co-Investigador Reeemplazante; (d) publicaciones ISI aparecidas o en prensa durante el año 2005. Al aplicar este filtro a la lista general, se obtuvo la lista de investigadores, compuesta por 155 personas que constituye la base para el Directorio de Investigadores en Ciencias de la Tierra.

De los 155 investigadores en Ciencias de la Tierra, se ha logrado obtener información para 110. Esta sub-muestra (72%) es la base utilizada para los análisis estadísticos que se presentan en esta sección.

2.2. Número y características de los investigadores

De acuerdo al criterio de selección adoptado existirían en la actualidad cerca de 155 investigadores activos en Ciencias de la Tierra en Chile. Lamentablemente, este número NO puede ser comparado con estudios anteriores *e.g.* “Análisis y proyecciones de la Ciencia Chilena” (1993), “Directorio 1996-1997, Investigadores de Ciencias en Chile” (Academia de Ciencias, 1998) pues los criterios de inclusión empleados en ellos no son equivalentes. En particular, el análisis de 1993 da cuenta de 115 investigadores, pero el criterio de selección en ese caso no contempla número de publicaciones ni especifica la naturaleza de éstas. Por otra parte, las sub-disciplinas incluidas no son las mismas (en 1993 se incluyeron Ingeniería Antisísmica e Hidrología, no consideradas en el presente análisis, el que sí contempla Paleoclimatología). Las figuras 16.1, 16.2 y 16.3 muestran la distribución a nivel global, *i.e.* independiente de la sub-disciplina, de investigadores según género, formación académica y edad.

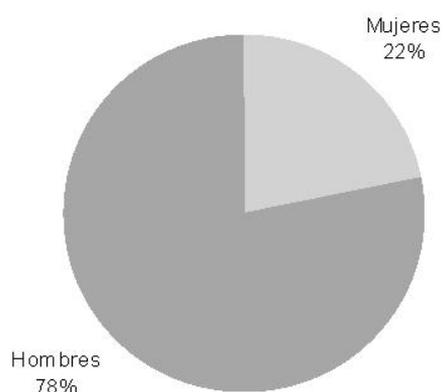


Figura 16.1. Distribución según género

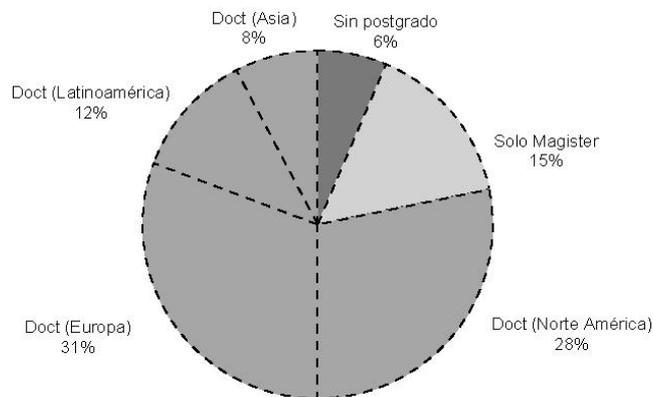


Figura 16.2. Distribución según formación académica

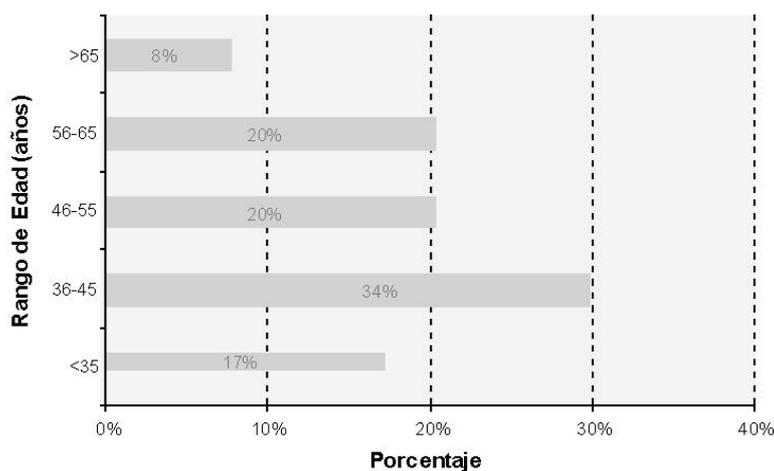


Figura 16.3. Distribución según edad

De los gráficos se destaca la baja proporción de investigadores mujeres, el alto porcentaje de investigadores con grado de doctor (78%), y una favorable distribución por edades (el rango de edad bajo los 35 años está posiblemente subrepresentado debido al criterio de selección). La edad promedio de los investigadores en Ciencias de la Tierra es 46 años. Es también destacable el porcentaje similar de grados doctorales obtenidos en Norteamérica (EEUU y Canadá) y Europa.

Un aspecto que también se incluye en la lista de investigadores es su institución primaria (algunos pueden trabajar en más de una institución) y su tipo de afiliación. Sobre el 90% de los investigadores declara un cargo permanente, con un escaso número de posdoctorandos. Sin embargo, algunos investigadores podrían haber declarado “cargo permanente” guiados más bien por la continuidad en el tiempo de su trabajo en una determinada institución, independiente de su jornada (parcial *versus* completa) o su relación contractual (honorarios *versus* planta).

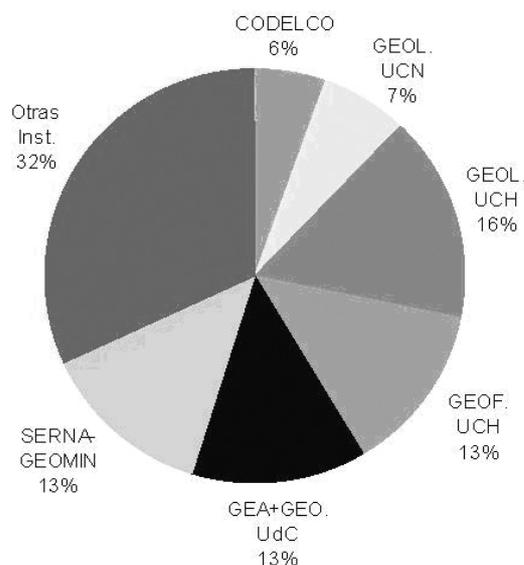


Figura 16.4: Distribución por Institución (primaria)

La Figura 16.4 muestra la distribución de investigadores según institución primaria. En total, se identificaron 14 instituciones en las cuales existen investigadores en Ciencias de la Tierra; aquellas con menos de 3 individuos se agruparon en “Otras Instituciones”. Aún en esos casos, es probable que los investigadores interactúen y sean apoyados por equipos más numerosos de técnicos. En términos globales, 75% de los investigadores desarrolla su trabajo en universidades, mayormente concentrados en la Universidad de Chile (34% del total), Universidad de Concepción (20%) y Universidad Católica del Norte, Antofagasta (9%). El restante 25% de los investigadores realiza su trabajo en empresas (CODELCO, ENAP/SIPETROL, CIMM), el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), y centros de investigación independientes (como el CEC en Valdivia).

Reconociendo que la definición de investigadores no es homologable entre el presente estudio y el de 1993, es interesante verificar una relativa similitud en la distribución de afiliaciones. Por ejemplo, en ambos casos, la Universidad de Chile alberga a cerca de un tercio de los investigadores, seguida por la Universidad Católica del Norte, Antofagasta y la Universidad de Concepción. El número de investigadores en empresas y SERNAGEOMIN se ha reducido entre 1993 y el 2005 (de 35% a 20%), posiblemente debido al criterio más estricto de clasificación de investigadores en el estudio actual.

En cuanto a la distribución de investigadores en áreas específicas dentro de Ciencias de la Tierra, se han considerado las sub-disciplinas reconocidas por FONDECYT para sus proyectos regulares: Geología y Mineralogía, Geofísica, Ciencias Atmosféricas y Meteorología, Geoquímica y otras disciplinas (*e.g.*, Paleoclimatología). FONDECYT también incorpora Oceanografía dentro de Ciencias de la Tierra, pero en este Capítulo Temático NO hemos considerado investigadores en esa disciplina.

La Figura 16.5 muestra la distribución de investigadores por sub-disciplina. Al igual que el año 1993, algo más de la mitad de los investigadores en Ciencias de la Tierra trabaja en algún área de Geología (estratigrafía, petrología, etc.). Particularmente notable es el crecimiento en Ciencias Atmosféricas y Meteorología, de un 7% el año 1993 a 20% el 2005, mientras que Geofísica (tierra sólida) y Geoquímica reducen su participación.

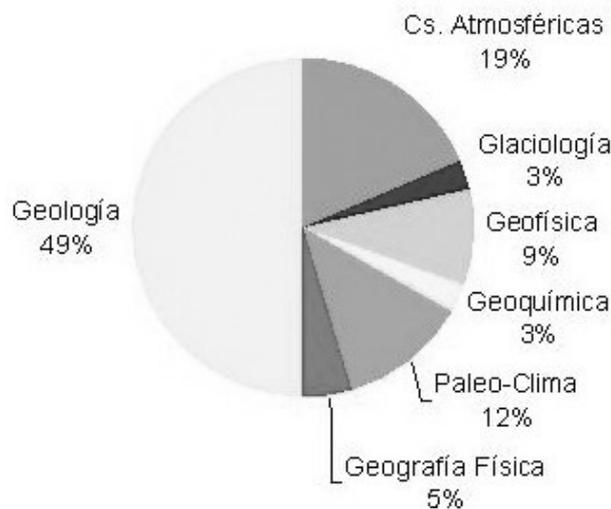


Figura 16.5. Distribución por sub-disciplina

2.3. Productividad Científica

La suma de publicaciones ISI entre 2000 y 2004 de cada uno de los *circa* 155 investigadores en Ciencias de la Tierra es 680, lo que se traduce en una productividad individual promedio muy cercana a 1 publicación/año. La Figura 16.6 muestra el histograma del número de publicaciones ISI en los últimos 5 años (expresadas como publicaciones/año), donde se observa un sesgo hacia valores bajo el promedio global. Así, el 50% de los investigadores en Ciencias de la Tierra tienen una productividad inferior a una publicación/año, mientras que solo un 10% alcanza a 2 publicaciones/año.

Existen diferencias menores entre la productividad individual en cada sub-disciplina. Por ejemplo, el promedio en Geofísica alcanza a 0,77 publicaciones/año frente a 1,11 publicaciones/año en Paleoclima. Sin embargo, el tamaño de las submuestras es pequeño como para poder determinar el significado de las diferencias.

Una complicación adicional es que las publicaciones suelen tener más de un autor, muchas veces en la misma institución. Sería conveniente entonces conocer la producción promedio del grupo (por departamento o sub-disciplina), y luego calcular un promedio del grupo *per capita*. Debido a las dificultades de acceso a la información, el cálculo sólo se hizo para casos particulares. Así, por ejemplo, en el caso de Ciencias de la Atmósfera, las 84 publicaciones (2000-2004) que se obtienen al sumar las publicaciones de cada uno de los 21 investigadores del área, se reducen a 53 publicaciones en la sub-disciplina. De este modo, el promedio individual es de 0,8 publicaciones/año, pero el promedio del grupo *per capita* es de solo 0,5 publicaciones/año. En el caso del Departamento de Geología de la Universidad de Chile, las 118 publicaciones obtenidas al sumar la producción de sus 19 investigadores (2000-2004) se reducen a 87 al considerar la autoría compartida. De este modo, el promedio individual de 1,24 publicaciones por investigador/año baja a 0,92 publicaciones por investigador/año para el promedio del grupo. En la Tabla 16.1 se presentan los datos relativos al número de publicaciones y productividad (publicaciones/investigador/año) de los investigadores en Geología y Geofísica de las universidades de Chile, Católica del Norte Antofagasta y Concepción. Se hace una comparación de estas cifras con las correspondientes a las de una institución de excelencia del primer mundo, el Department of Geological & Environmental Sciences de la Universidad de Stanford, USA, donde la productividad *per capita* supera en más de 3

veces la mejor cifra de la Tabla 16.1. Este mismo ejercicio comparativo debería hacerse con respecto a un país de desarrollo semejante al nuestro.

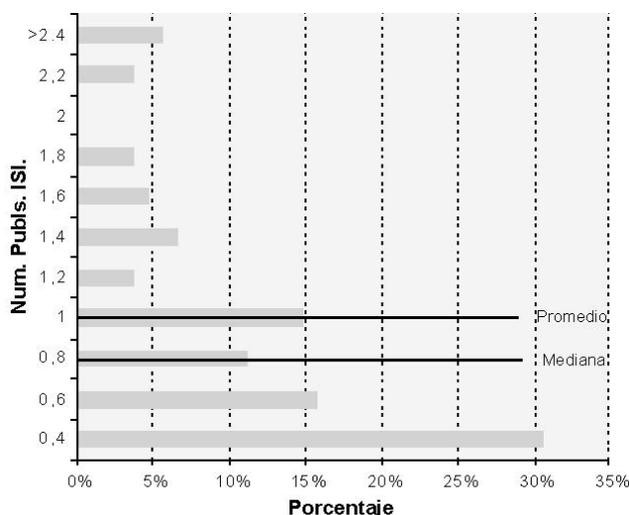


Figura 16.6. Histograma de productividad

Tabla 16.1. Producción Geología y Geofísica, Departamentos Universitarios			
PERÍODO 2000 - 2004	Número Investigadores	Producción Global Individual	Promedio publicaciones investigador/año
Dept. Geología Univ. de Chile	19	118	1,24
Dept. Geofísica Univ.de Chile	14	74	1.06
Dept. Ciencias Geológicas UCNorte Antof.	20	48	0.48
Dept. Ciencias de la Tierra +GEA	25	50	0.40
Univ. de Concepción			
Stanford University. Department of Geological & Environmental Sciences	25	505	4,04

Es valioso destacar el nivel de las revistas en que los investigadores chilenos publican sus trabajos, el cual puede ser cuantificado preliminarmente mediante el factor de impacto que ISI asigna a cada una de las revistas especializadas. En los casos en que se cuenta con información detallada como en Ciencias Atmosféricas/Meteorología y Geología, Universidad de Chile, se ha podido establecer el índice de impacto promedio de las publicaciones. En Ciencias Atmosféricas/Meteorología las 53 publicaciones producidas por esos científicos dan un índice de impacto de 2,2, casi un punto por encima del índice de impacto promedio de las revistas ISI en esta sub-disciplina. En el caso del Departamento de Geología, U. de Chile (2000-2004), sus investigadores publicaron en 36 revistas ISI diferentes con índice de impacto (valores 2003) variable entre 3,528 y 0,175. El índice de impacto promedio para las publicaciones del Departamento de Geología fue de 1,46. Las cifras anteriores indican que nuestra producción científica se orienta a las revistas de mayor impacto y circulación dentro de estas sub-disciplinas.

2.4. *Financiamiento y colaboración internacional*

Financiamiento recibido en el área de fondos nacionales competitivos

Entre 2000 y 2004, Fondecyt ha financiado proyectos regulares en CT por \$ 2.700 millones. Cerca de un tercio de esos recursos fueron a Oceanografía que no aparece en la Figura 16.7.

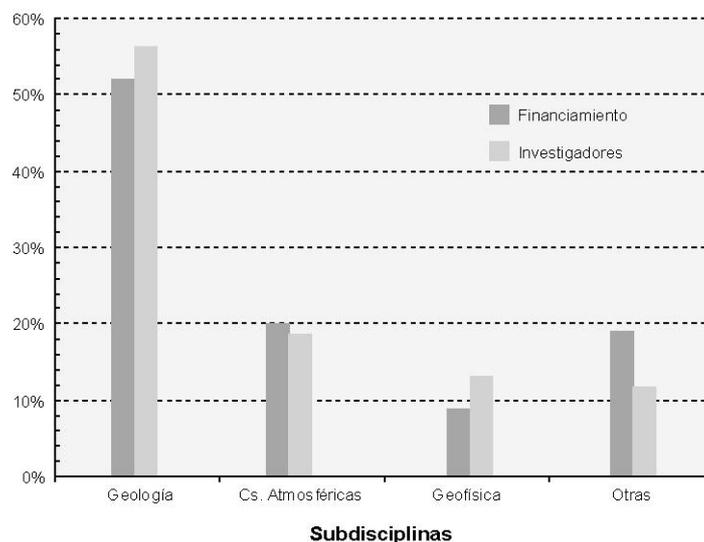


Fig. 16.7. Distribución de financiamiento de proyectos Fondecyt Regular según sub-disciplina.

En el mismo período 2000-2004 los investigadores en las sub-disciplinas Geología y Mineralogía, Geoquímica y Geofísica se adjudicaron un total de 7 proyectos FONDEF por un total de 1.409 millones de pesos y promedio de duración de 31 meses.

Colaboración internacional

Las características geodinámicas del sistema andino hacen que un gran número de instituciones e investigadores extranjeros trabaje en la actualidad en Ciencias de la Tierra en Chile. Se originan así numerosas publicaciones conjuntas. Entre las instituciones extranjeras con las que colaboran los científicos nacionales se cuentan:

Francia: Instituto de Investigación y Desarrollo (IRD, ex-ORSTOM); Centro Nacional de la Investigación Científica (CNRS)

Alemania: Servicio Alemán de Intercambio Académico (DAAD); Comunidad Alemana de Investigaciones Científicas (DFG); Servicio Geológico Alemán (BGR); Centro de Geociencias de Postdam (GFZ)

Japón: Agencia de Cooperación Internacional Japonesa (JICA); Instituto de Bajas Temperaturas de Hokkaido

USA: Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS); Centro de Información de Terremotos (NEIC) Universidad de California

Además, trabaja en colaboración con científicos chilenos un número importante de investigadores pertenecientes a universidades e instituciones estatales de Europa, Norte y Sudamérica.

2.5. Instituciones científicas que agrupan a los investigadores en Ciencias de la Tierra.

Sociedad Geológica de Chile, fundada en 1962, agrupa principalmente a geólogos y geofísicos.

Sociedad Chilena de Ciencias Geográficas, constituida en 1988, cuenta en la actualidad con 70 socios nacionales y 10 extranjeros. La Sociedad organiza cada año el Congreso Nacional e Internacional de Geografía.

Revista Geológica de Chile. Fundada en 1974. Es editada por el SERNAGEOMIN con la colaboración científica de la Sociedad Geológica de Chile. Desde 1993 está indexada en ISI y anunciada en *Current Contents*.

Congreso Geológico Chileno. Iniciados en 1976. Son patrocinados por la Sociedad Geológica y organizados rotativamente por las universidades de Chile, Católica del Norte de Antofagasta y Concepción y el SERNAGEOMIN. Se celebra cada tres años y cuenta con asistencia de un elevado número de científicos de la Tierra nacionales y extranjeros.

3. Sub-Disciplinas (3.1. Geología; 3.2. Geofísica: Tierra Sólida y Ciencias Atmosféricas; 3.3. Geografía Física)

3.1. Geología

Principales líneas de investigación en el área

Las áreas prioritarias de investigación en Geología en Chile corresponden a las Petrologías Ignea y Metamórfica, a la Tectónica y a la Metalogénesis. **Áreas fuertemente emergentes** en la última década son la Geología Ambiental, los Riesgos Naturales, la Geotecnia y la Hidrogeología. Esta última tendencia es el reflejo de una orientación a nivel internacional respecto a estos temas.

Las líneas desarrolladas en el Departamento de Geología de la Universidad de Chile durante el período 2000-2004 pueden ser agrupadas como sigue. Los investigadores del Departamento participan en más de una línea de investigación:

Línea 1. Evolución Tectono-Magmática

Sub-líneas:

Petrología y geoquímica del magmatismo en márgenes convergentes (6 investigadores)

Metamorfismo de muy bajo y mediano grado (5 investigadores)

Tectónica andina (6 investigadores)

Línea 2. Recursos Naturales

Sub-líneas:

Metalogénesis y modelos de yacimientos (4 investigadores)

Geoquímica y geocronología aplicadas a la exploración minera (2 investigadores)

Sedimentología aplicada a la exploración minera (1 investigador)

Línea 3. Sedimentología, proveniencia de sedimentos, modelamiento (2 investigadores)

Línea 4. Medio ambiente, paleoclimatología, geotecnia, oceanografía geológica
(8 investigadores)

Línea 5. Riesgos naturales

Sismotectónica y peligro sísmico (4 investigadores)

Remociones en masa (3 investigadores)

Línea 6. Volcanismo y geotermia (1 investigador)

Infraestructura de investigación

Esta se concentra en las universidades y en el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). El Departamento de Geología de la Universidad de Chile cuenta en su equipamiento principal con:

Laboratorio Microsonda Electrónica/Microscopía Electrónica

Laboratorio de Paleomagnetismo

Laboratorio de Modelamiento Analógico

Laboratorio Analógico de Procesos Geoquímicos Supérgenos

Laboratorio de Química, equipado con Plasma Masa Optico (AES)

Laboratorio de Inclusiones Fluidas

Laboratorio de Microscopía Electrónica de Transmisión (TEM)

Laboratorio de Preparación de secciones transparentes de rocas

Laboratorio Sedimentológico

Laboratorios menores

La Universidad Católica del Norte Antofagasta dispone también de infraestructura analítica la que se ha visto incrementada últimamente a través de fondos MECESUP y otros.

La Universidad de Concepción dispone de equipamiento analítico obtenido con anterioridad a 1993 a través del programa de Geología Económica Aplicada (GEA) que mantuvo con la Japan International Cooperation Agency (JICA).

El SERNAGEOMIN cuenta con buena infraestructura analítica, destacando su Laboratorio de Geocronología por métodos K-Ar y $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, su equipo de análisis químico ICP-MS (plasma masa) y su moderno equipo de difracción de rayos-X (XRD).

La infraestructura analítica disponible si bien es adecuada, en varios aspectos, para el desarrollo de la investigación corriente en las especialidades del área, no lo es para efectuar investigación de punta a nivel internacional.

Áreas deficitarias

En la actualidad aparecen como deficitarias en el campo de la Geología en Chile las áreas de Hidrogeología, Paleontología, Geología Marina, Riesgos Geológicos, Volcanología Física y Mineralogía/Cristaloquímica. En el área clave de Hidrogeología existe un escaso número de investigadores (máximo 5) de acuerdo a los parámetros establecidos para el Directorio de Investigadores en Ciencias de la Tierra. Sin embargo, en los últimos diez años se observa un

incremento notable en el número de estudiantes que han realizado memorias y tesis relacionadas con temas hidrogeológicos. Esto puede interpretarse como el efecto de una sensibilidad creciente a escala planetaria respecto a los temas de protección del ambiente y del uso sustentable de la riqueza y diversidad de la Tierra para beneficio y prosperidad de la humanidad.

Núcleos de excelencia

Los grupos de investigación en Petrología y Metalogénesis de la Universidad de Chile, junto con el de Tectónica de la Universidad del Norte, pueden ser destacados a nivel internacional.

3.2. Geofísica

Geofísica-Tierra Sólida

La Geofísica es una sub-disciplina de las Ciencias de la Tierra que utiliza herramientas indirectas para entender la composición del interior de la tierra y los procesos geológicos asociados. El entendimiento de esos fenómenos tiene implicancias directas en cada una de las temáticas mayores en las cuales se agrupa el quehacer científico en Ciencias de la Tierra.

En *Evolución Tectonomagmática* la geofísica, en conjunto con la geología, ha avanzado en dirección a la comprensión de los procesos geológicos que condicionan la evolución de márgenes activos, integrando en modelos coherentes la información de superficie y subsuperficie, como así también el desarrollo de modelos teóricos consistentes con los datos de campo.

En *Tierra Profunda* el aporte de la geofísica ha sido tradicionalmente fundamental para la comprensión de la estructura interna de la Tierra, especialmente desde el punto de vista sísmológico; en los últimos años, sin embargo, otras técnicas indirectas como la magnetotelúrica y el flujo calórico han permitido reconocer variables complementarias que inciden en la geodinámica interna de la Tierra.

En *Riesgos Naturales*, la sismología juega un papel central en el monitoreo de la actividad sísmica asociada a terremotos de subducción y erupciones volcánicas, como así también en estudios tendientes a comprender las variables del ciclo sísmico y el desarrollo incipiente de herramientas de tipo predictivo.

En *Recursos Naturales* la geofísica como herramienta de exploración en zonas cubiertas o submarinas se aplica en forma cada vez más intensiva para la búsqueda y cuantificación de recursos minerales, hídricos, hidrocarburos, geotérmicos, y recientemente también en fuentes alternativas de energía como los hidratos de gas.

En *Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial*, al ser una línea de investigación de desarrollo reciente, las aplicaciones geofísicas son limitadas, pero siguiendo la tendencia mundial tienen gran potencialidad en el monitoreo de contaminantes, calidad de agua, suelos de fundación, evaluación de obras civiles y arqueología.

En *Variabilidad Climática*, si bien no es una línea de investigación donde las herramientas geofísicas tengan un aporte central, se ha producido una interacción incipiente con estudios glaciológicos orientados a cuantificar algunos parámetros asociados al cambio climático.

Grupos/núcleos de Investigación

Se identifican en Chile 9 grupos/núcleos de investigación en geofísica, orientados al menos a uno de los temas de investigación mayor descritos en la sección anterior (ver Tabla 16.2). De estos grupos o núcleos solamente el de Tierra Sólida del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile (DGF) se puede considerar un grupo consolidado con varias líneas de investigación en curso y con desarrollo permanente en los últimos 10 años. Se incluye en la Tabla 16.2 a las empresas del estado ENAP y CODELCO, que si bien se orientan al tema productivo en recursos naturales, realizan o participan de investigaciones aplicadas en las etapas de exploración básica.

Tabla 16.2. Grupos de Investigación en Geofísica – Período 1995-2005								
Grupo/ Núcleo	Institución	Número de Investigadores	Evolución Tectono- magnética	Tierra Profunda	Recursos Naturales	Riesgos Naturales	M. Ambiente y Ordenamiento Territorial	Variabilidad Climática
DGF- T. Sólida	Universidad de Chile	8	x	x	x	x		
Dpto. Geofísica	SERNAGEOMIN	2	x			x	x	
?	U. de Concepción	1	x			x		
?	U. de Iquique	1				x		
?	U. Temuco	1				x		
?	U.C.V	2			x			
CECS		1						x
	ENAP	2			x			
GCEX	CODELCO	3	x		x			
TOTAL INVESTIGADORES		21						

x = áreas cubiertas

Investigación Geofísica Temática. Estado del conocimiento

Dado que existen interacciones entre los distintos grupos que participan de la investigación geofísica en Chile, se ha optado por efectuar una descripción del estado del conocimiento científico en función de las líneas de investigación principales.

Evolución Tectonomagnética

La evolución geológica del margen andino ha sido estudiada en forma consistente desde el punto de vista geofísico por el DGF, Universidad de Chile, SERNAGEOMIN, y U. de Concepción, como contraparte de proyectos financiados por entidades europeas (IRD, Francia; Universidad de Berlin-Postdam, Alemania; Universidad de Kiel-BGR, Alemania), y estadounidenses (Universidad de California). El trabajo liderado por el grupo Berlin-Postdam es probablemente el estudio de mayor envergadura y extensión en el tiempo, el cual ha permitido alcanzar un conocimiento integrado de la estructura cortical y litosférica del margen andino en la zona norte del país (I a III Región), y centro sur (VIII y IX Región). Estos estudios integrados consideran la medición de transectas sísmicas, sismológicas, gravedad, y magnetotélúricas. En forma complementaria a estos estudios del segmento continental se ha producido un importante avance en el conocimiento del segmento submarino del margen andino, plataforma y talud continental, y piso oceánico. Estos estudios han sido liderados por la Universidad de Kiel y el BGR de Alemania, y en forma más puntual por grupos de investigación franceses (Punto Triple de Taitao), italianos (Tierra del Fuego), y norteamericanos (Taitao, Isla de Pascua). A estos proyectos mayores de orden continental se debe agregar esfuerzos individuales de investigadores del DGF en conjunto con investigadores de otras

entidades (UCN, Codelco, UCV, Geología Universidad de Chile, IRD), con aportes del FONDECYT, principalmente orientados a entender la morfología de la zona de subducción, su interacción y acoplamiento con la placa continental, y la tectónica cortical.

El conjunto de estudios del margen andino ha permitido avanzar en forma significativa en una serie de interrogantes asociadas a los procesos que condicionan la evolución tectonomagmática del margen andino. Entre estos cabe mencionar los procesos de erosión/acreción del margen continental, la caracterización de zonas de subducción horizontal y su relación causal con la colisión de dorsales asísmicas y sus efectos en la génesis de los magmas, acoplamiento interplacas y deformación continental, composición y reología del margen continental.

Tierra Profunda

El estudio de la Tierra Profunda, se traslapa en parte con la Evolución Tectonomagmática, y los Riesgos Naturales, por cuanto está íntimamente relacionado con el desarrollo de estudios sismológicos llevados a cabo por investigadores del DGF, Universidad de Chile, en colaboración con instituciones francesas (IRD, IGP, IGP), y estadounidenses (*e.g.* Universidad de California, Universidad de Florida). Estos estudios han permitido mejorar sustantivamente el conocimiento de la morfología de la zona de subducción, como así también avanzar en la comprensión de los mecanismos de la fuente sísmica, periodos de recurrencia y brechas sísmicas. En forma complementaria, estudios de flujo calórico liderados por el DGF, Universidad de Chile, han permitido una primera aproximación a la comprensión de las fuentes de calor que operan en el margen activo de Sudamérica. Se han realizado numerosos trabajos de terreno que han incluido redes sismológicas terrestres y submarinas, a través de proyectos conjuntos de investigadores nacionales y extranjeros, con el fuerte apoyo de FONDECYT. Dichos estudios han permitido mejorar el conocimiento tanto de la litósfera oceánica en subducción, como de la corteza continental y de la cuña astenosférica a través de la caracterización de la zona de Wadati-Benioff, de la distribución de los esfuerzos (utilizando la determinación de los mecanismos focales) y de la estructura de velocidades mediante tomografías basadas tanto en velocidades de ondas P y S, como de atenuación de ondas sísmicas.

Riesgos Naturales

Desde el punto de vista geofísico, esta temática ha estado tradicionalmente circunscrita al monitoreo de la actividad sísmica asociada a terremotos de subducción y volcanes activos de la zona volcánica del sur. Sin embargo, en años recientes se ha incorporado una visión multidisciplinaria que incluye estudios geológicos, sensores remotos y caracterización de suelos de fundación. Los terremotos asociados al proceso de subducción están siendo monitoreados por redes sismológicas que en su conjunto presentan una cobertura nacional limitada al extremo norte del país y fundamentalmente a la zona central. Estas redes sismológicas han sido y están siendo operadas por el DGF, Universidad de Chile y la Universidad de Tarapacá. La actividad sísmica asociada a volcanes activos de la cadena volcánica del sur está siendo monitoreada en forma permanente por grupos de investigación de la Universidad de Concepción, la Universidad de La Frontera (UFRO) de Temuco, en coordinación con el observatorio OVDAS del SERNAGEOMIN. Los estudios multidisciplinarios se restringen a la fecha al esfuerzo liderado por el Núcleo Milenio del DGF y el Departamento de Geología de la Universidad de Chile, que han centrado sus investigaciones en la Región Metropolitana. Los resultados de este estudio no sólo permitirán mitigar los efectos directos asociados a los movimientos sísmicos producto de terremotos de subducción sino que además a la actividad sísmica cortical somera en la zona de precordillera y potenciales remociones en masa asociadas. Por otra parte CODELCO Chile, División El Teniente, ha desarrollado un programa de monitoreo de la actividad sísmica asociada a la operación minera. Este estudio de investigación

aplicada ha permitido mitigar en forma sustantiva los daños humanos y materiales asociados a la sismicidad inducida en la mina.

Recursos Naturales

La investigación en Recursos Naturales ha tenido una amplia diversificación institucional y temática, es así como se pueden destacar esfuerzos para la exploración de recursos mineros en zonas cubiertas (CODELCO), energía geotérmica (ENAP), e hidratos de gas submarinos (DGF, Universidad de Chile en colaboración con la Universidad Católica de Valparaíso).

Desde el punto de vista de la exploración minera en zonas cubiertas, CODELCO ha desarrollado diversos esfuerzos tendientes a desarrollar e implementar tecnologías de exploración, entre estas IP pasivo (en colaboración con la Universidad de California, Berkeley), sísmica de reflexión, sistemas UAV autónomos para métodos de potencial, resistividad somera para la detección de sistemas electrolíticos asociados a pórfidos (en colaboración con FONDEF-Geología), y recientemente sismología cortical somera en colaboración con el DGF, Universidad de Chile.

La exploración por recursos geotermales, como potencial fuente alternativa de energía, ha motivado la conformación de un grupo de investigación aplicada al interior de ENAP, que hasta ahora ha desarrollado investigación aplicada en sus concesiones de Chillán, Calabozo, Apacheta, La Torta y El Tatio. Se espera una actividad creciente en esta área para los próximos años por parte de la sociedad recientemente establecida entre ENAP y ENEL de Italia para el desarrollo de la geotermia en Chile. También dentro de ENAP, y como resultado de su experiencia internacional adquirida a través de Sipetrol, ha habido una incorporación de tecnología y conocimientos de última generación principalmente orientada a la exploración por gas en Magallanes.

La exploración de recursos hidrogeológicos ha sido desarrollada principalmente por el SERNAGEOMIN, si bien empresas como CODELCO también desarrollan proyectos de esta naturaleza para satisfacer sus demandas propias. Los estudios del SERNAGEOMIN se han desarrollado en cuencas del altiplano de la III Región (Maricunga, Laguna del Negro Francisco, Piedra Pómez) y también en la X Región (Valdivia), utilizando técnicas geofísicas como gravedad y métodos eléctricos. La información resultante se incluye en las series de mapas hidrogeológicos o de potencial hidrogeológico publicado por la institución.

Desde el punto de vista de los hidratos de gas, el DGF Universidad de Chile, en colaboración con el Dpto. de Oceanografía de la UCV y el SHOA ha desarrollado el primer estudio de geofísica marina del margen con recursos provenientes del proyecto FONDEF 1104. Este estudio ha permitido identificar en forma indirecta un volumen de recursos de gas metano muy importante en la zona centro sur de Chile. Si bien el reconocimiento del recurso es un avance importante, los estudios a desarrollar en los próximos años estarán orientados a la implementación de nuevas tecnologías para su extracción y producción.

Medio Ambiente y Ordenamiento Territorial

El trabajo geofísico relacionado con la temática ambiental y el desarrollo urbano se circunscribe al apoyo de los mapas temáticos desarrollados por el SERNAGEOMIN. Esto incluye estudios geoeléctricos, gravimétricos, orientados a detectar plumas de contaminación de aguas subterráneas o a focalizar la presencia de suelos contaminados en vertederos, humedales y residuos mineros de la Región Metropolitana.

Variabilidad Climática. Estudios Glaciológicos

El grupo de glaciología del Centro de Estudios Científicos CEC tiene en desarrollo el estudio de los espesores de hielo en los campos de hielo de la Patagonia y la Antártida. Para ello se utilizan técnicas geofísicas como el radar terrestre (GPR), gravimetría, y magnetometría. Estos estudios han permitido reconocer el estado actual de las masas de hielo como una línea de base que permitirá estudiar su evolución en el tiempo y su relación de causa y efecto con el cambio climático.

Geofísica - Ciencias Atmosféricas

Las Ciencias Atmosféricas (CA) son un conjunto de disciplinas cuyo objeto de estudio central es la envoltura gaseosa del planeta Tierra y que comparten ciertas métodos como la modelación matemática y el uso de principios físicos como base de sus observaciones.

Considerando el desarrollo histórico y la distribución de la investigación en CA, el centro de gravedad de estas disciplinas reside en Meteorología y Climatología que estudian los sistemas de circulación atmosférica de escala regional (algunas decenas de kilómetros) a global responsables de las variaciones del tiempo y el clima. Las restantes disciplinas dentro de las CA se focalizan en la interacción de la atmósfera con otros subsistemas terrestres (hidrosfera, litósfera, biósfera), escalas de tiempo muy largas (paleo-climatología) y aspectos químicos de la atmósfera.

Naturalmente no existe una frontera precisa que separe a las CA de otras ciencias (de la Tierra, Ambientales, Física, Química, etc.). Por ejemplo, no es simple decidir si una investigación sobre radiación UV pertenece al campo de la Física o de las Ciencias Atmosféricas, o a ambas. Se podría considerar si la investigación se focaliza en la radiación UV en sí, independiente del medio, o focalizada en el efecto de la radiación UV en la atmósfera terrestre. En este trabajo hemos clasificado una investigación en CA si sus resultados se publican en revistas de corriente principal (ISI) considerada dentro de esa área (Tabla 16.3).

Tabla 16.3. Grupos de Investigación en Ciencias Atmosféricas – Período 2000-2005					
Grupo	Universidad	Num. Invest. ¹	Prod. Global ²	Prod. Individual ³	Proyectos CONICYT ⁴
GLOBAL		24	56	83	8
DGF-met	Universidad de Chile	8	31	45	5
CMM-atmos	Universidad de Chile	2	5	8	2
DEFAO-Atmos	U. de Concepción	5	11	12	1
CEAZA-met	U. Serena / UC Norte	2	2	2	0
DMC	Dir. Met. de Chile	2	3	4	0
UMAG-UV	U. de Magallanes	2	3	4	1
UACH-UV	U. Austral de Chile	1	1	1	0
PUC-Geo+Agro	U. Católica de Chile	2	6	6	0

1: Número de investigadores (al menos 1 pub. ISI en últimos 5 años)

2: Número total de publicaciones generadas por el grupo

3: Suma del número de publicaciones por cada investigador dentro del grupo

4: Número de proyectos concursables CONICYT en el cual el Investigador Responsable pertenece al grupo

Grupos de Investigación

En Chile actualmente existen 8 grupos de investigación en CA. La Tabla 16.3 presenta los datos más relevantes que permiten su caracterización. La Figura 16.8 es una descripción cualitativa (y simplificada) de la posición de los grupos en el “universo” de las CA. Los 8 grupos reúnen a un total de 24 científicos variando entre 1 y 8 en número. Aunque nos referimos en forma genérica a *grupos* de investigación, aquellos con 1 o 2 investigadores son mejor descritos como *núcleos*.

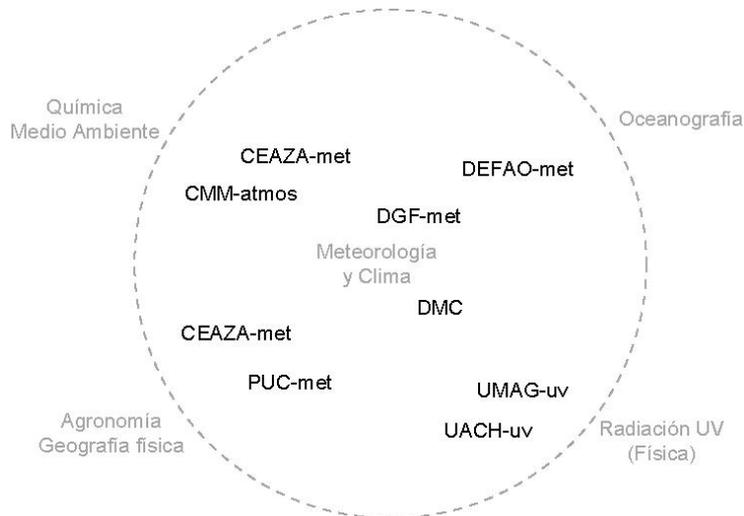


Figura 16.8. Representación esquemática de las líneas de investigación de los grupos en CA en Chile.

La productividad global en CA en el período 2000-2005 alcanza a 56 publicaciones ISI; cerca de la mitad de esas publicaciones involucran al menos a 2 investigadores (co-autores) nacionales. La productividad individual alcanza a 3,6 publicaciones ISI en igual período.

Comparando este panorama con el que existía en 1993, es evidente el incremento en todos los parámetros considerados. En este período se han consolidado los grupos tradicionales (DGF, DEFAO) y han surgido 6 núcleos nuevos (CEAZA-met, DMC, CMM-atmos, UMAG-UV, UACH-UV, PUC-G/A), lo que explica la triplicación en el número de investigadores (8→24). Tanto la productividad (revistas ISI) global como individual han aumentado considerablemente en el período (2000-2005) respecto a la situación en 1993. El informe de ese año reporta 11 publicaciones ISI en el período de 6 años previos.

El mayor grupo en CA (en relación al informe 1993) sigue siendo el Grupo de Meteorología del Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile. Este grupo reúne al mayor número de investigadores (8) y presenta la mayor productividad global e individual. Desde fines de la década pasada los recursos humanos del grupo han aumentado por la inserción de 3 nuevos doctores (uno de ellos aún en USA) y la participación de 3 investigadores asociados (becas post-doctorales o equivalente). Esto ha fortalecido las líneas de investigación tradicionales del grupo (climatología, meteorología sinóptica) y abierto nuevas líneas (capa límite atmosférica, química atmosférica). El grupo continúa liderando la adjudicación de fondos concursables (CONICYT) en Meteorología y Clima, y mantiene actividades de extensión como proyectos de meteorología aplicada. Lo anterior ha permitido una importante expansión de la infraestructura computacional (computadores multiproceso) del grupo permitiendo un avance en el pronóstico numérico del tiempo (operacional desde 2002) y modelación numérica de la dispersión de contaminantes en la atmósfera. Las capacidades de observación del grupo permanecen restringidas a instrumentos de superficie.

El grupo de atmósfera dentro del Departamento Física de la Atmósfera y Océano (DEFAO), actualmente DGEO, de la Universidad de Concepción también ha integrado a 2 nuevos doctores en esta área (CA). El incremento de productividad es menos marcado, y su participación en fondos concursables de CONICYT permanece bajo. Este grupo ha desarrollado una notable integración con el área de oceanografía física al interior de la misma Universidad de Concepción, lo que ha permitido el aumento de recursos humanos y sistemas de observación. Se ha potenciado así la investigación en interacción océano-atmósfera a distintas escalas, como también las líneas tradicionales de este grupo: meteorología sinóptica y climatología dinámica.

En relación a los 4 núcleos nuevos, en todos ellos se trata de uno o dos investigadores en CA, generalmente con grado de doctor y de alta productividad, insertos en grupos mayores o departamentos de carácter multidisciplinario (excepto el caso de la Dirección Meteorológica de Chile, DMC). Un aspecto positivo es que estos investigadores tienen acceso al personal técnico e infraestructura del grupo mayor en el cual están insertos.

El núcleo al interior del Centro de Modelamiento Matemático de la Universidad de Chile se focaliza en el modelamiento numérico de la química atmosférica. Creado el año 2000, este núcleo está bien consolidado, con varias publicaciones, adjudicación de fondos CONICYT, formación de recursos humanos, y excelentes contactos internacionales. Este último aspecto puede ser crucial en posibilitar mediciones de terreno, lo que permitiría extender las actividades del núcleo.

El Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA) es un consorcio de investigación formado por la Universidad de La Serena, la Universidad Católica del Norte y el Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Posee un grupo de Agricultura y Clima (un investigador en CA) que interactúa también con los grupos de Modelamiento y Oceanografía. Su investigación se focaliza en agro-meteorología de zonas áridas y química atmosférica. Es un grupo incipiente (creado en 2002) que aún no presenta publicaciones ni ha obtenido fondos CONICYT, pero posee el potencial humano y el equipamiento básico de observación que garantizan su crecimiento.

El núcleo en la Universidad de Magallanes (2 investigadores más ayudantes), está inserto en el Departamento de Física. La investigación se orienta al estudio de la climatología del ozono y radiación UV-B en la Zona Austral. También se trata de un grupo consolidado, en cuanto exhibe publicaciones ISI, ha obtenido financiamiento de fondos concursables de CONICYT y fuentes extranjeras lo que permite mantener un radiómetro multicanal. Algo similar ocurre en el Departamento de Física de la Universidad Austral de Chile, donde un investigador (más ayudantes) ha sostenido un trabajo en radiación ultravioleta y se cuenta con un radiómetro multicanal.

La Dirección Meteorológica de Chile (DMC) es una institución con orientación eminentemente profesional y operativa, de manera que las actividades de investigación en su seno son de carácter marginal. Aun así, dos investigadores y varios técnicos han conformado un núcleo orientado a meteorología y climatología, el que puede potenciarse debido al acceso directo a los sistemas de observación de la DMC y su infraestructura computacional.

El núcleo al interior de la Pontificia Universidad Católica está constituido por 2 investigadores, uno de ellos en el Departamento de Geografía y el otro en Agronomía. El primero se orienta al estudio de las neblinas en la costa árida de Chile y su potencial aprovechamiento como recurso hídrico, lo cual se vincula con Geografía Física. El segundo investigador recientemente se ha reinsertado en Chile luego de finalizar su doctorado en Estados Unidos donde se especializó en el uso de la información climática en la agricultura.

Docencia

Otro cambio observado en relación al informe de 1993 es la creación de una licenciatura y carrera profesional en meteorología, impartida desde 1997 por la Universidad de Valparaíso. Los egresados de esta carrera (alrededor de 5 por año) se desempeñan generalmente en empresas mineras y ambientales donde la información meteorológica es relevante, o en la Dirección Meteorológica de Chile (previamente, la DMC formaba a sus propios meteorólogos en la Escuela Técnica Aeronáutica).

A nivel de posgrado, el único programa en CA es el Magíster en Ciencias, mención Geofísica, impartido por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile. El magíster cubre aspectos fundamentales y aplicados en Meteorología y Climatología. En los últimos 5 años se han graduado 6 alumnos de este programa, 3 de los cuales han continuado sus estudios de doctorado en universidades extranjeras. Desde 2005 el magíster ha adquirido una orientación más profesional.

Una posibilidad interesante pero incipiente es el Doctorado en Fluido Dinámica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Varios investigadores del Departamento de Geofísica pertenecen al claustro académico de este programa, permitiendo que algunos alumnos realicen su tesis en un tema de Meteorología o Clima; actualmente un estudiante está siguiendo este camino.

3.3. Geografía Física

La Unidad Académica de Geografía de la Universidad de Chile, contiene el mayor y más antiguo patrimonio cultural para el resguardo y desarrollo de esta ciencia en el país, y constituye el núcleo académico principal en la generación y actualización del conocimiento geográfico de su territorio. Tiene como objetivo contribuir a formar recursos humanos altamente calificados, que posean capacidades científicas, analíticas y sintéticas, para generar, coordinar o formar parte de los equipos interdisciplinarios destinados a evaluar las potencialidades y limitaciones del territorio nacional, para enfrentar el proceso de desarrollo.

Para dicho objetivo, la Unidad mantiene programas docentes de pregrado a través de la Escuela de Geografía, conducentes a la Licenciatura en Geografía y al Título Profesional de Geógrafo y un programa de Postgrado bajo la tutela de la Escuela de Posgrado de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo, conducentes a la obtención del Magister en Geografía.

Con el fin de generar y mantener actualizados el conocimiento y fundamentar la enseñanza, el Departamento de Geografía fomenta y estimula la realización de proyectos de investigación y de prestación de servicios, los cuales se vinculan activamente con las demandas provenientes de la comunidad nacional e internacional. La investigación en Geografía Física se concentra en el laboratorio de Geomorfología y Riesgos Naturales donde se desarrollan los siguientes temas de investigación: Fiordos Patagónicos Chilenos; Geomorfología y Dinámica Costera; Islas Oceánicas; Dinámica Glaciar; Riesgos Naturales; Suelos.

Como entidad perteneciente a la Universidad de Chile, estatal y nacional, su acción privilegia la integridad y totalidad del territorio y actúa como vínculo con sociedades, instituciones y universidades extranjeras interesadas en el estudio del país. La Unidad pretende, además, contribuir a la formación de una conciencia geográfica nacional, para lo cual estimula la extensión y difusión del conocimiento a través de cursos, publicaciones y participación de sus académicos en seminarios, congresos y sociedades científicas.

La Unidad hace suyo el concepto de Desarrollo Sustentable, entendiéndolo como la planificación, uso y manejo del territorio, de forma tal que asegure su crecimiento y perdurabilidad en el tiempo, la equidad social y la participación de las comunidades locales y la protección del medio ambiente, asegurando que las futuras generaciones dispongan de los suficientes grados de libertad para adoptar sus propias decisiones.

En la Pontificia Universidad Católica de Chile el Instituto de Geografía centra esencialmente su trabajo en la formación de Geógrafos Profesionales. La enseñanza de la Geografía se materializa en el pregrado mediante una Licenciatura en Geografía con énfasis en lo académico, con una duración de ocho semestres, que culmina con un seminario de grado para la formación de un profesional geógrafo, con dos semestres adicionales a la licenciatura, que finalizan con la realización de una práctica profesional. A partir de 2000, el Instituto agregó un programa de postítulo en la disciplina con énfasis en su aplicación para profesionales ligados a las ciencias de la tierra, generando primeramente uno en Geografía Aplicada y Medio Ambiente el año 2000 y luego el de Geomática en 2004.

La investigación se orienta tanto hacia el desarrollo de la ciencia básica, mediante la ejecución de proyectos de investigación concursables tanto internos como externos a la universidad, así como también en la vertiente aplicada de la disciplina geográfica, esto último por medio de su unidad de venta de servicios “Geografía UC Proyectos”, unidad a través de la cual el Instituto se vincula con la empresa pública y privada. Con todo, las líneas de investigación preferente que se desarrollan en el Instituto se enmarcan en la ordenación del territorio en sus diferentes ámbitos, planificación urbana, evaluación y estudios de impacto ambiental, catastro y evaluación de recursos naturales y aplicaciones de la geomática.

La difusión se materializa a través de la publicación bianual de la *Revista de Geografía Norte Grande*, con 31 años de circulación ininterrumpida, complementada recientemente con la *Serie Geolibros*, esta última orientada a editar textos de apoyo a la docencia, investigaciones y obras de geografía en general.

Actualmente el Instituto cuenta con una planta de 20 jornadas completas equivalentes, distribuidas en 14 docentes con el grado académico de doctor, 3 con el grado de magíster y 12 con títulos profesionales.

En la Universidad de La Serena el Área de Ciencias Geográficas se ha dedicado hasta el presente a tres funciones primordiales:

1. Docencia: Impartiendo enseñanza de pregrado con cursos en geografía, además de enseñanza de posgrado.
2. Investigación: Desarrollando estudios en Geografía Física Aplicada, Geografía Económica y Social, y Educación Geográfica.
3. Extensión: Practicando asistencia a la comunidad mediante conferencias y guías de desarrollo, cursos de actualización, además de estudios de investigación aplicados, tipo consultoría, a organismos del Estado y empresas particulares.

En los últimos cinco años, se ha incorporado un Programa en Educación Geográfica. Al mismo tiempo, el Programa de Uso de Suelo Urbano y Regional ha tenido una etapa de escaso desarrollo. Actualmente los Programas de mayor fuerza son: Geografía Física Aplicada y Geografía Económica y Social. Se espera que el Programa de Educación Geográfica obtenga un nivel similar para el año 2007.

El programa de Geografía Física Aplicada tiene como objetivo propender a la generación de conocimientos que permitan fundamentar el uso del ambiente semiárido mediante la búsqueda permanente de compatibilidades entre los intereses socioeconómicos y las dinámicas del ecosistema natural. Sus líneas de investigación básicas son: climatología, hidrología, geomorfología y suelos en tanto que las líneas de investigación aplicada consisten en: análisis de cambio climático, evaluación y manejo de recursos naturales, manejo de cuencas, manejo de sistemas litorales, manejo de espacios áridos, evaluación de impacto ambiental, evaluación y manejo de riesgos naturales, aplicaciones de sistemas de información geográfica y sensores remotos.

En el marco del Programa de Geografía Física Aplicada se han desarrollado sobre 40 proyectos de investigación que han permitido la publicación de 2 libros especializados, 15 capítulos de libros y más de 30 artículos, desde 1990 a la fecha.

La disciplina geográfica se imparte además en la Universidad Católica de Valparaíso; en la Universidad de Santiago de Chile, como Ingeniería Geográfica, y recientemente en la Universidad de Concepción.

4. Formación de Posgrado, especialmente Doctoral

4.1. Programas de Doctorado

Existen programas acreditados de Doctorado en Ciencias, mención Geología en las Universidades de Chile (Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas) y Católica del Norte de Antofagasta (Tabla 16.4)

El Doctorado de la Universidad de Chile fue creado en 1968 y está acreditado por CONAP, CONICYT y Fundación Andes. En la actualidad (2005) cuenta con una matrícula de 25 estudiantes, la mayor parte de ellos becarios CONICYT. Durante el período 2000-2004 ocho estudiantes han obtenido el grado de Doctor en Ciencias, mención Geología de la Universidad de Chile, tres de ellos en co-tutela con las universidades francesas de Toulouse y Rennes. El Programa cuenta en su matrícula con estudiantes extranjeros (Francia, España).

El Programa de Doctorado de la Universidad Católica del Norte, Antofagasta, se creó en 2000 y ha sido acreditado por CONAP. Cuenta actualmente con 9 estudiantes. El primer graduado data de Julio 2005.

4.2. Programas de Magíster

En la Universidad de Chile, el Programa de Magíster en Ciencias, mención Geología, se creó en 1975 y está debidamente acreditado. En la actualidad (2005) cuenta con una matrícula de 24 alumnos. En el período 2000-2004 se graduaron 27 estudiantes y desde su creación a la fecha registra un total de 55 graduados. El Magíster en Geofísica de la Universidad de Chile contó con 15 estudiantes inscritos en 2004 y 15 alumnos se han graduado en el período 2000-2004 (Tabla 16.4).

En la Universidad Católica del Norte, Antofagasta, funciona un Magíster en Geología Económica, mención Exploración, creado en 1996 del cual no se obtuvo información.

El Programa de Magíster en Geografía y Plan de Estudios, con Menciones, de la Universidad de Chile fue creado en 1984 y fue acreditado por 4 años en enero de 2005. Durante el período 2000-2004 registró una matrícula promedio de 8 estudiantes y un número de 7 graduados.

Tabla 16.4. Situación del posgrado en Ciencias de la Tierra.											
Programa	Estudiantes Inscritos					Estudiantes Graduados					Total Grad.
	2000	2001	2002	2003	2004	2000	2001	2002	2003	2004	
Doctorado Geología, UCH	10	15	25	20	23	0	0	3	4	1	8
Doctorado Geología, UCN			6	6	9			0	0	0	0
Magíster Geología, UCH	13	17	21	21	20	4	3	4	10	6	27
Magíster Geofísica, UCH	13	10	13	12	15	1	4	4	4	2	15
Magíster Geografía UCH	16	7	4	11	3	0	1	2	2	2	7

5. Relación con Empresas

Las Ciencias de la Tierra poseen un vasto campo de aplicabilidad en el desarrollo nacional lo que involucra particularmente a geólogos, geofísicos e ingenieros civiles. Se podría concluir que la actividad empresarial industrial debiera tener una sólida interacción con la investigación, en especial con aquella de carácter aplicado. Sin embargo, esta relación no es fluida a nivel institucional y se manifiesta preferentemente a través de iniciativas individuales. La interacción industria-universidades tiene su mejor expresión en los Proyectos FONDEF en los cuales han tenido una destacada participación los departamentos de Geología y Geofísica de la Universidad de Chile. El Departamento de Geología, Universidad de Chile, tiene un positivo historial en proyectos FONDEF adjudicándose su primer proyecto en 1993, año de inicio de este concurso de financiamiento, y desde esa fecha se ha adjudicado 4 proyectos. Actualmente en ese departamento están vigentes dos proyectos FONDEF, uno en asociación con la industria minera, y otro en asociación con empresas de seguros, con fondos de aporte FONDEF superior a los 400 millones de pesos, y con contrapartes de las empresas y de la Universidad que suman sobre los 600 millones de pesos. El Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, en colaboración con el Dpto. de Oceanografía de la UCV y el SHOA ha desarrollado el primer estudio de geofísica marina dirigido a la prospección de hidratos de gas en el margen con recursos provenientes del proyecto FONDEF 1104. Este estudio ha permitido identificar en forma indirecta un volumen muy importante de recursos en gas metano en la zona centro sur de Chile.

A diferencia de otros países *e.g.* Estados Unidos, Canadá, Australia, Brasil, las empresas nacionales no aportan sustancialmente al financiamiento de actividades de investigación y docencia en las áreas de Ciencias de la Tierra. Sólo en forma esporádica se han logrado donaciones de equipos o fondos, o ambos, para distintos efectos, pero no existe, por ejemplo, un Fondo de Becas

de estudio financiado por aportes múltiples de empresas, práctica común en otros países. Empresas estatales como CODELCO y ENAP realizan o participan en algunos casos con las universidades en investigaciones aplicadas. Es el caso de CODELCO División El Teniente, que llevó a cabo un programa de monitoreo de la actividad sísmica asociada a la operación minera. El trabajo geofísico relacionado con la temática ambiental y el desarrollo urbano se circunscribe al apoyo de los mapas temáticos desarrollados por el SERNAGEOMIN. El Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas (CEAZA), un consorcio de investigación formado por la Universidad de La Serena, la Universidad Católica del Norte y el Instituto de Investigaciones Agropecuarias, posee un grupo de Agricultura y Clima que interactúa también con los grupos de Modelamiento y Oceanografía. Su investigación se focaliza en agro-meteorología de zonas áridas y química atmosférica.

En resumen, las actividades de investigación en Ciencias de la Tierra (geología, geofísica específicamente) cuentan en una medida muy reducida con el apoyo de las empresas, principalmente a través de gestiones de carácter personal por parte de los investigadores, quedando en evidencia una ausencia de políticas institucionales al respecto. Esta situación merece ser analizada para encontrar sus causas.

6. Relación con la Sociedad

La investigación en Ciencias de la Tierra aporta a la comunidad las bases insustituibles para la prospección y localización de recursos minerales, la exploración de recursos hídricos y energéticos, la protección del medio ambiente atmosférico, la prevención de desastres naturales y la ejecución de obras de ingeniería necesarias para el desarrollo económico y social del país.

Sin embargo, existe un desconocimiento generalizado acerca de las actividades propias de las Ciencias de la Tierra y un escaso reconocimiento de esta área de las ciencias por parte de la comunidad nacional en casi todos los niveles socio-culturales. Mucho de esto tiene relación con el hecho que las Ciencias de la Tierra no estén consideradas en los programas de la enseñanza nacional en ninguno de sus niveles.

Se constata, por otra parte, una dificultad para que profesionales geólogos y geofísicos puedan acceder a posiciones directivas o claves en instituciones públicas. Esto por el hecho de existir cargos reservados para ingenieros los que, sin embargo, dadas sus características, deberían ser ocupados por científicos de la Tierra.

En los casos de Geología y Geofísica los estudiantes, al término de su carrera, cuentan con oportunidades de inserción laboral en el medio extrauniversitario, particularmente en la minería, donde se desempeñan exitosamente. Por otra parte, los jóvenes doctores comienzan a incorporarse a las tareas de investigación académica o en empresas del Estado como es el caso de CODELCO.

7. Diagnóstico de la disciplina: Fortalezas y Debilidades

7.1. Fortalezas

El territorio chileno suscita el interés científico mundial por constituir un ejemplo de una zona de subducción en margen continental activo con sus procesos asociados. En este sentido constituye un “laboratorio natural” para la investigación en Ciencias de la Tierra.

Las investigaciones geológicas y geofísicas son la base insustituible para la prospección de nuevos recursos minerales, la exploración de los recursos hídricos, la protección del medio ambiente, el estudio de fenómenos atmosféricos y climáticos, la prevención de desastres y la ejecución de obras de ingeniería necesarias para el desarrollo económico y social del país.

Se cuenta con investigadores de experiencia y reputación internacional en las áreas tradicionales de la geología como la petrología, la tectónica y la metalogénesis y de la geofísica tales como geofísica marina, sismología y ciencias atmosféricas. En los últimos 10 años ha habido un importante incremento en investigadores que han llevado a cabo estudios de postgrado en centros de excelencia a nivel mundial.

El presente estudio deja en evidencia un sustantivo aumento de la masa crítica de los investigadores en Ciencias de la Tierra en los últimos diez años. Al mismo tiempo se constata el alto porcentaje de graduados que alcanza al 94% de los integrantes del Directorio de Investigadores del área, 80% de los cuales posee el grado de doctor. Se observa además una favorable distribución de edades de esos investigadores con un promedio de 46 años y con 35% de ellos en el tramo comprendido entre los 36 y 45 años.

La comunidad nacional de geociencias contribuye positivamente a las actividades de las organizaciones científicas y gremiales a nivel internacional.

Existe una larga historia de cooperación científica internacional en diversas disciplinas de las Ciencias de la Tierra. A ese nivel, la contribución de Chile en temas como geología económica, sismología, magma génesis, tectónica y meteorología es reconocida y respetada.

La *Revista Geológica de Chile* está indexada en el ISI desde 1993 y posee prestigio internacional en el área de la geología andina.

Debilidades

Desconocimiento de la importancia de las Ciencias de la Tierra por parte de la comunidad nacional en casi todos los niveles socio-culturales y políticos. Esta situación se expresa en diversas formas negativas para su desarrollo, como las siguientes:

- La ausencia de un Servicio Geológico Nacional estructurado de acuerdo a las normas y estándares que rigen internacionalmente a estas instituciones.
- La exigua representación de las Ciencias de la Tierra en los programas de enseñanza a nivel de la educación básica y media.
- Las dificultades administrativas de geólogos y geofísicos para acceder a posiciones directivas en instituciones públicas debido, en muchos casos, a la existencia de cargos reservados a otros profesionales y que, por sus características, deberían ser llenados por especialistas en Ciencias de la Tierra.

Infraestructura analítica que, con algunas excepciones, es insuficiente para los requerimientos de la investigación de punta y la docencia de posgrado en el área. Esto impide el desarrollo de líneas de investigación modernas de gran incidencia e impacto *e.g.* geología isotópica, geología y geofísica marina, investigación geofísica integrada con la investigación geológica, geofísica aplicada, estudios de capa límite atmosférica mediante técnicas remotas. En la actualidad se depende en muchos casos de servicios analíticos adquiridos a un alto costo en el extranjero donde los investigadores no participan en el proceso de obtención de los datos. Especialmente lamentable a este respecto es el caso de jóvenes doctorandos que están así excluidos de la posibilidad de familiarizarse con procedimientos analíticos sofisticados y de tener una visión crítica de los resultados y datos analíticos obtenidos. Algunas carencias en este sentido suelen solucionarse por la vía de trabajos en colaboración con investigadores y laboratorios extranjeros pero ello ocurre sólo

en los casos en que existen vínculos establecidos a través de una investigación cooperativa sostenida en el tiempo.

Escasa colaboración inter-institucional en la utilización de la infraestructura de laboratorios. Esta situación debe ser remediada estableciéndose redes nacionales para que el acceso a las facilidades analíticas disponibles por la comunidad científica sea más expedito y el uso más eficiente permitiendo el flujo de ideas y enriqueciendo los intercambios.

Bajo número de académicos activos en la investigación y docencia (alrededor de 155 en el país) pese al aumento de la masa crítica de investigadores en el área anteriormente señalado. Algunas disciplinas, como paleontología, vulcanología física, geofísica aplicada y ambiental, exploración minera, interacción océano-atmósfera y otras, no están siendo cubiertas debido a la carencia de puestos permanentes de trabajo en los centros de investigación y enseñanza superior. Si bien en los últimos años ha habido un fuerte incremento del número de becas de doctorado, no existe una política clara en cuanto a cómo insertar a estos graduados a la academia, centros de investigación aplicada, o la industria.

Falta de recursos para la realización de investigaciones de punta que compitan con las de países más desarrollados. Esto limita, entre otras cosas: (a) las posibilidades de desarrollar proyectos interdisciplinarios de escala continental; (b) el ser contrapartes realmente efectivas de proyectos multinacionales; (c) los estudios de geología y geofísica marina; (d) los estudios de interacción océano-atmósfera en el Pacífico Sur Oriental como contribución al Programa Internacional de Investigaciones del Clima; (e) la realización de programas de investigación antártica; (f) la participación en Proyectos Internacionales de Correlación Geológica (PICG).

Ausencia de una entidad reguladora de los convenios internacionales y de su funcionamiento. Como consecuencia de ello, algunos programas de colaboración con instituciones e investigadores extranjeros carecen de una adecuada contraparte científica nacional impidiendo la obtención de los beneficios que se esperan de una investigación cooperativa.

Acceso limitado de estudiantes extranjeros, particularmente latinoamericanos, a nuestras carreras profesionales y programas de posgrado en Ciencias de la Tierra. Ello es atribuible a una falta de difusión adecuada y a la escasez de becas para extranjeros, tanto a nivel nacional como internacional.

7.2. Proyección a futuro

La investigación en Ciencias de la Tierra en Chile en los años venideros debería orientarse tomando en cuenta por una parte las ventajas comparativas naturales que ofrece la estructura geológica del territorio nacional y por otra las líneas relacionadas con el resguardo del medio ambiente y las proyecciones sociales que de ello se derivan.

Entre las primeras cabe destacar el carácter de margen continental Pacífico activo de nuestro territorio caracterizado por los fenómenos de convergencia y subducción de placas con las consecuencias geodinámicas singulares que ello implica, como también por los fenómenos climáticos de impacto regional y global asociados al borde oriental del anticiclón del Pacífico suroriental. Este panorama compele a un tipo de investigación orientada a profundizar en la comprensión de los fenómenos petrológicos, tectónicos, metalogénicos y climáticos relacionados con la construcción, a lo largo del tiempo, del orógeno andino en los distintos segmentos del territorio. En particular, la génesis y características de los yacimientos metalíferos expuestos en el territorio chileno, en especial los depósitos andinos de cobre porfírico, constituye un tema de

investigación susceptible de representar un aporte científico original y al mismo tiempo producir un fuerte impacto para la economía nacional. Igualmente relevante a nivel mundial es la investigación de la génesis y los recursos representados por los grandes salares del norte del país.

Los estudios del medio ambiente relacionados con las Ciencias de la Tierra merecen atención preferente en la planificación a futuro. Existe, a todo nivel, una demanda creciente de respuestas concernientes a la disponibilidad de recursos hidrogeológicos, a la planificación urbana, la ubicación de vertederos, la contaminación de aguas, problemas en que los investigadores del área tienen ingerencia directa. Por otra parte, los altos riesgos geológicos inherentes a la geodinámica andina tales como la ocurrencia de episodios volcánicos de carácter devastador, terremotos, tsunamis, avalanchas, remoción en masa, sequías e inundaciones, episodios de contaminación atmosférica y otros, otorgan un alto grado de prioridad social a los estudios relacionados con estas materias.

7.3. Ejemplos de investigaciones con gran potencial social y económico realizadas en el área de Ciencias de la Tierra.

Relativas al descubrimiento de reservas mineras.

Como producto de un programa de levantamiento geológico-geofísico regional de la Cordillera de Domeyko, impulsado por CODELCO y llevado a cabo por el Servicio Nacional de Geología y Minería durante la década del 90 y los primeros años del siglo 21, ha sido posible mejorar sustantivamente la base de conocimiento geológico del territorio nacional en este importante distrito minero. Este programa de investigación aplicada en geociencias ha aportado decisivamente a la materialización de una serie de descubrimientos efectuados por CODELCO en la década 1995-2005. En esta década han sido descubiertos, o están en fase de exploración avanzada, los siguientes yacimientos/prospectos: Gaby, Opache, Genoveva, Toki, Viky Exótico, Quetena y Puntilla Galenosa. Una estimación conservadora de las reservas aportadas por estos descubrimientos se aproxima a un valor de 10 millones de toneladas de cobre fino, la producción aproximada de CODELCO por un período de 5 años, que equivale a 1,000 millones de dólares de cobre *in situ*. Es interesante destacar que si bien este importante aporte económico para el país es la resultante de muchos factores y estrategias de exploración de la Corporación del Cobre, el contar con un conocimiento geocientífico de primer nivel en el área de estudio, ha permitido una gran efectividad en los esfuerzos exploratorios, con resultados que son más de dos veces superiores a los de las empresas competidoras en la misma década. Al disponer el país de una institución de investigación aplicada en Ciencias de la Tierra permitió el fortalecimiento de una alianza estratégica Industria-Investigación (CODELCO-SERNAGEOMIN, o centros de investigación que utilizan instrumentos de financiamiento tipo FONDEF, Anillo, etc.), que debería fortalecerse a futuro. Sin embargo, las actuales potencialidades del SERNAGEOMIN, o las universidades, o ambos, o centros de investigación, como contraparte científica para llevar a cabo programas de investigación aplicada, muestran serias carencias que deberían ser radicalmente corregidas para así contribuir mejor al desarrollo del país en el ámbito minero.

Relativas al riesgo sísmico

El cultivo de la Sismología como disciplina en Chile se realiza esencialmente en la Universidad de Chile desde hace más de cien años. En sus inicios ésta se concentró en la caracterización sísmica y su distribución geográfica, la que permitió sentar las bases para una zonificación sísmica nacional. Un resultado relevante para la sociedad fue el mapa de Zonificación Sísmica de Chile incorporado a la Norma Sísmica Nacional a fines de los 80. Esta zonificación permite al ingeniero estructural establecer los niveles de aceleración efectiva utilizada en la definición de los espectros de diseño de las estructuras. Recientemente se ha logrado distinguir

distintos tipos de sismos en Chile que evidencian características diferentes en su grado de duración, contenido de frecuencia predominante y aceleraciones máximas. Esta nueva taxonomía de los sismos en Chile según su zona sismogénica es una línea de investigación actual que permitirá afinar las normas sismorresistentes en el país. De igual manera esta nueva mirada de la sismicidad en Chile permite distinguir sismos con mayor o menor grado de potencialidad de producir tsunamis, antecedente que es de gran importancia para el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) para establecer modelos de inundación y para su sistema de alerta temprana de maremotos. Otra reciente contribución relevante para el país es el estudio de sismos superficiales de origen cortical relacionados con los procesos de deformación frágil en la zona continental. Estudios recientes de los terremotos de Las Melosas (1958), Chusmiza (2001) y Curicó (2004), han permitido poner en evidencia una actividad sísmica relevante en la región cordillerana, que pese a no tener magnitudes importantes puede, por su corta distancia hipocentral, generar daños en zonas pobladas cercanas. La relación entre geofísicos, geólogos, geotécnicos e ingenieros estructurales se hace con ésto más evidente y es una preocupación que se ha ido acentuando los últimos años con el objeto de caracterizar de mejor manera este tipo de amenaza.

8. Propositiones específicas sobre políticas y acciones a nivel nacional

Promover una toma de conciencia a nivel nacional acerca de la gravitación que las Ciencias de la Tierra poseen en relación con los aspectos científicos, sociales y económicos del desarrollo de nuestro país.

Incorporar adecuadamente la enseñanza de las Ciencias de la Tierra en los programas de estudio de la educación básica y media.

Implementar políticas para el desarrollo, ampliación, perfeccionamiento y fortalecimiento de los programas de posgrado (doctorado y magíster) existentes en el área con el propósito de constituirlos en un referente latinoamericano. Facilitar el acceso a ellos de los estudiantes a través de una amplia disponibilidad de becas. Propender a la creación y acreditación de un Programa de Doctorado en Ciencias de la Tierra, nacional y multidisciplinario.

Llevar a cabo una política nacional de incorporación anual de jóvenes investigadores en Ciencias de la Tierra, altamente calificados en sus estudios de doctorado, a las instituciones de educación superior.

Incentivar la contratación de jóvenes profesionales, con doctorados calificados en Ciencias de la Tierra, por parte de las empresas públicas y privadas del país, *e.g.* CODELCO, ENAP, CONAMA, Ministerios, empresas mineras nacionales y transnacionales, para que realicen investigación aplicada y constituyan contrapartes activas en los planes de desarrollo conjunto industria-academia.

Promover la interacción de los centros universitarios que investigan e imparten docencia en Ciencias de la Tierra con empresas nacionales con el objeto de llevar a cabo investigaciones conjuntas y seleccionar temas para la realización de memorias y tesis. Desarrollar células de investigación aplicada con financiamiento mixto entre el Estado y las empresas.

Establecer la infraestructura analítica necesaria para la realización de investigaciones acordes con el grado de desarrollo alcanzado por las Ciencias de la Tierra en el mundo y con las exigencias de programas de postgrado del más alto nivel. Al respecto se propone la creación de una red de recursos a nivel nacional, cuyo uso, mantención, reemplazo y nuevas adquisiciones, sean compartidos por todas las instituciones involucradas en Ciencias de la Tierra. Para tal efecto se

sugiere la creación de fondos sectoriales de mayor envergadura en CONYCYT destinados a compras de equipos analíticos, buque oceanográfico, equipamiento geofísico de última generación y otros.

Incrementar significativamente el presupuesto de CONICYT para posibilitar un aumento del número de proyectos concursables, particularmente los FONDECYT.

Reforzar y ampliar las redes internet en Ciencias de la Tierra que informan sobre las actividades de los distintos centros donde estas se cultivan. Ello contribuirá, entre otros aspectos, a guiar y motivar a potenciales estudiantes para su ingreso a las carreras del área.

Fomentar políticas de investigación sistemática del territorio nacional lo que implica crear o fortalecer las instituciones técnicas que el país necesita, *e.g.* Servicio Geológico Nacional, Servicio Sismológico, estructurados de acuerdo a las normas y estándares que rigen internacionalmente a las instituciones que realizan investigación aplicada en Ciencias de la Tierra.

Incentivar y fortalecer el desarrollo de grupos de investigación aplicada multidisciplinaria en Ciencias de la Tierra en entidades nacionales como el SERNAGEOMIN, CODELCO, ENAP.

Establecer entidades reguladoras que elaboren normas básicas para una mejor interacción entre científicos nacionales y extranjeros en proyectos de investigación cooperativa que se realizan en el territorio nacional. Con este objeto se propone la creación de un comité consultivo de pares científicos, bajo el alero de CONICYT, que regule la firma y alcance de convenios de investigación multinacionales, cautelando los intereses nacionales y la concurrencia de contrapartes idóneas.

Solidarizar activamente con países de menor desarrollo científico que el nuestro, en particular del ámbito latinoamericano, en materias relativas a las Ciencias de la Tierra.