

CONDICIONAMIENTOS A LA SISMICIDAD EN BOLIVIA

CONDITIONS FOR SEISMICITY IN BOLIVIA

EDGAR LIBORIO RICARDI YARVI

Instituto de Investigaciones Físicas, Carrera de Física
Universidad Mayor de San Andrés
c. 27 Cota-Cota, Campus Universitario, Casilla de Correos 8635
La Paz - Bolivia

RESUMEN

Una revisión de la literatura relacionada con la sismicidad en la región de los Andes centrales (principalmente) nos permite concluir que los movimientos telúricos denominados "terremotos" son de mayor magnitud en el lado occidental del arco volcánico actual (en la cordillera occidental del territorio boliviano). En el lado oriental de este arco volcánico, y en general a lo largo de toda la cordillera de los Andes, los terremotos son de menor magnitud.

La sismicidad en territorio boliviano se reduce a un promedio de 3.5 grados de magnitud. Eventualmente se alcanza magnitudes mayores a los 5 grados (de foco superficial) y en casos excepcionales los terremotos son de gran intensidad (por ejemplo el de Aiquile en 1998), los que ocurren por acomodamiento de bloques (con foco de profundidad intermedia) o bien por deslizamiento de masas rocosas, como el terremoto de Consata–Mapiri en 1947. Un caso excepcional de terremoto de gran magnitud fue el que ocurrió entre las provincias Iturrealde–Ballivián (Beni) en 1994 y alcanzó 8.6 grados de magnitud; éste fue reconocido mundialmente como de foco de gran profundidad (630 Km), lo que resultó en una baja intensidad en superficie.

Bolivia está bien definida como un territorio de sismicidad intermedia, que está confirmada por las estimaciones de las observaciones geológico–estructurales, e inclusive por las estimaciones realizadas a partir de mediciones con redes de GPS.

Descriptor: Sismicidad — Regiones geográficas: Sudamérica — Terremotos

Código(s) PACS: 91.30.Dk — 93.30.Jg — 91.30.P-

ABSTRACT

A review of the literature about the seismicity in the central Andes region (mainly) allows us to conclude that the telluric movements known as earthquakes have greater magnitudes in the western side of the volcanic arc (western cordillera in Bolivian territory) while in the eastern side of this volcanic arc, and in general along the whole Andes cordillera, the earthquakes have lesser magnitudes.

Seismicity in the Bolivian territory has an average magnitude of 3.5 degrees, eventually reaching magnitudes greater than 5 degrees (with superficial focus); high intensity earthquakes are exceptional (as the one in Aiquile, 1998) and occur by accommodation of blocks (deep focus) or by the slipping of rock masses, as the Consata–Mapiri earthquake in 1947. An exceptional earthquake with a magnitude of 8.6 degrees occurred in 1994 in the Iturrealde–Ballivián province (Beni) with deep focus (630 km) resulting in a low surface intensity.

Bolivian territory is well defined as having an intermediate seismicity which is confirmed by geological and structural observations, as well as by estimations drawn from GPS networks measurements.

Subject headings: Seismicity — Geographical regions: South America — Earthquakes.

1. GENERALIDADES

La fuente de los terremotos son los focos o hipocentros, que son zonas de la corteza terrestre donde sistemáticamente se va ejerciendo grandes esfuerzos que son resistidos por las masas rocosas, deformándolas y acumulando energía de naturaleza elástica. Cuando el material ya no puede resistir

estos esfuerzos entonces se produce la fractura del mismo, con la aparición de superficies de deslizamiento entre las partes (fallas geológicas), generalmente visibles en la superficie de la Tierra. Así, se libera una parte de la energía acumulada en forma de ondas sísmicas que pueden viajar a grandes distancias del foco. Las dimensiones de las superficies de ruptura (fallas) y la distancia del desliza-

miento entre éstas definen la magnitud del evento telúrico. La magnitud, caracterizada según la escala de Richter, es una medida intrínseca del foco y se la determina con base a ciertas características de los registros sísmicos de observatorios localizados a diferentes distancias. Una de las formas usuales de calcular esta magnitud es $M_W = 2/3 \log M_0 - 1.07$, donde: $M_0 = \mu SD$ es el momento sísmico (que representa la energía liberada por el terremoto), S es el área de ruptura, D es el deslizamiento entre los bloques y μ es el módulo de cizalla entre las rocas. Cuando se observa las ondas superficiales, la magnitud del terremoto se calcula como $M_S = \log(A/T) + 1.66 \log D + 3.3$, donde: D es la distancia foco-estación, A es la amplitud del movimiento del suelo y T es el periodo de la onda.

Otro parámetro que se utiliza para caracterizar los efectos de un terremoto es la intensidad. Esta cantidad se mide por el efecto que provoca la energía sísmica en cada lugar por el que pasa sobre la superficie de la Tierra. La intensidad es alta cerca del foco del terremoto y disminuye a medida que aumenta la distancia del foco. Aunque la intensidad es una cantidad física, su estimación numérica (escala de Mercalli) es relativamente subjetiva pues depende de las características de las rocas sobre las cuales se realiza la evaluación. En este caso lo que interesa es la medida del daño ocasionado por el terremoto, dependiendo de cuánto se haya modificado la geología de la zona, las construcciones civiles y las pérdidas humanas y económicas.

Acerca de los focos (o hipocentros) de los terremotos diremos que éstos, dependiendo de su profundidad, se clasifican en: superficiales, intermedios y profundos. Los focos de los terremotos vinculados a fallas geológicas (planas y con distintas inclinaciones) que no se extienden a grandes profundidades, en el mejor de los casos alcanzan distancias comparables al espesor de la corteza terrestre (aproximadamente 30 km). En el caso de los terremotos con focos superficiales, el límite máximo de profundidad es de 60 km. Los terremotos con focos de profundidad intermedia, generalmente están vinculados a superficies de contacto entre capas que se encuentran a profundidades iguales al espesor de la corteza, donde una de ellas se sumerge por debajo de la otra, o bien la corteza está en contacto con material del manto. Estos focos se localizan hasta los 300 km de profundidad. Por otra parte, los terremotos de foco profundo se producen en los bordes de la lámina en sumersión que está en contacto con el material del manto a grandes profundidades (cientos de km); allí este borde se desmorona adentro del manto liberando energía sísmica en forma de ondas.

2. CONTEXTO DEL ESTUDIO DE SISMICIDAD EN LOS ANDES CENTRALES

Para obtener una idea del contexto en el que se estudia la sismicidad en territorio boliviano, revisemos primero los datos de sismicidad en los países vecinos de interés.

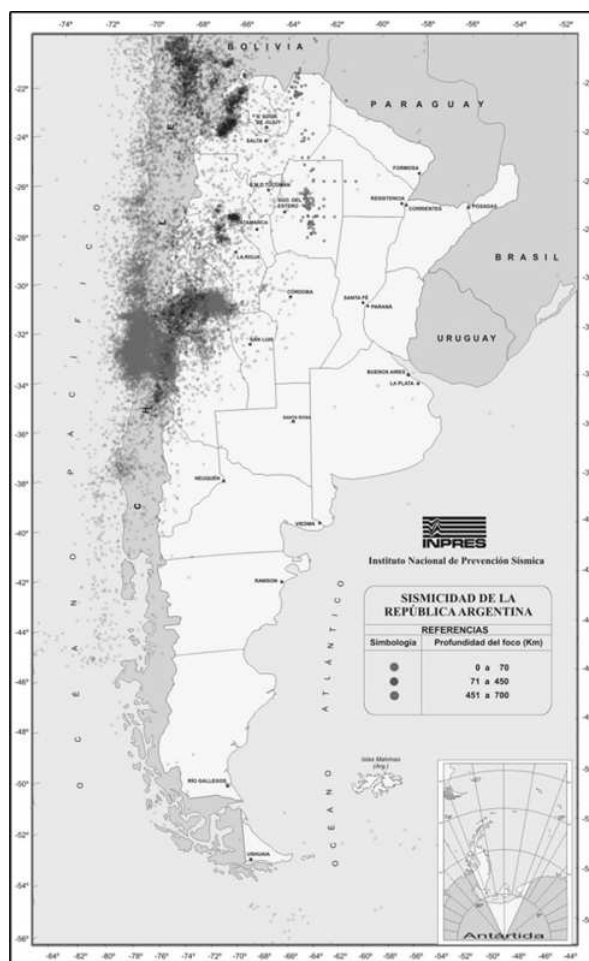


FIG. 1.— Mapa histórico de sismicidad en Argentina.

2.1. Sismicidad en Argentina

Nos referiremos a dos fuentes de datos: Historia de los Terremotos en la República Argentina (Tabla 1) y el Mapa de Sismicidad de la República Argentina (Fig. 1) acompañado por Corte transversal del macizo andino a la altura de la latitud de Salta (Fig. 2).

Un análisis de la información que proporciona la Tabla 1 conduce a las siguientes anotaciones:

1. No se reporta la profundidad del foco de los terremotos; consideramos entonces los de mayor potencia como superficiales y los demás con focos en profundidades intermedias.
2. Las zonas más activas ocurren en el siguiente orden: (a) San Juan, Mendoza, La Rioja, (b) Tucumán, Salta, Jujuy, (c) Catamarca, Santiago del Estero, Córdoba.
3. Los órdenes de magnitud de los terremotos por provincias son:
 - (a) San Juan, $5.8 < M < 8.0$;
 - (b) Mendoza, $5.4 < M < 7.0$;
 - (c) Catamarca, $5.0 < M < 6.4$;
 - (d) Salta oeste, $6.0 < M < 7.0$;

TABLA 1
HISTORIA DE LOS TERREMOTOS EN ARGENTINA

Lugar	Fecha	Magnitud	Profundidad Foco
Salta, oeste	13-09-1692	7	
Mendoza	22-04-1780	7	
Santiago del Estero	04-07-1817	7	
Salta, oeste	18-10-1844	6.5	
Mendoza	20-03-1861	7	
Jujuy	14-01-1863	6.4	
Salta, Oran, este	09-10-1871	6.4	
Tierra del Fuego	01-02-1889	7.3	
Mendoza, Cahueta	19-08-1880	5.5	
Salta, oeste	23-09-1887		
Buenos Aires	05-06-1888	5.5	
Catamarca	21-03-1892	6.0	
San Juan	27-10-1894		8.0
Catamarca	05-02-1898	6.4	
Yacuiba, Salta, Bolivia	23-03-1899	6.4	
La Rioja	12-04-1899	6.4	
Mendoza	12-08-1903	6.0	
Tucumán	17-10-1906	6.0	
Tucumán	11-08-1097	5.5	
Tierra del Fuego	19-10-1907		
Salta, este	05-02-1908	6.0	
Córdoba	22-09-1908	6.5	
Salta, este	01-02-1909		
Tucumán	06-10-1913	5.5	
Mendoza	27-07-1917	6.5	
Mendoza	17-12-1920	6.0	
Salta, Oran, este	14-10-1925		
Mendoza	14-04-1927		7.1
Mendoza	23-05-1929	5.7	
Mendoza	30-05-1929		6.8
Salta, oeste	23-09-1930	6.5	
Salta, oeste	24-12-1930	6.0	
Tucumán	03-04-1931	6.3	
Tucumán	12-02-1933	5.5	
Córdoba	11-06-1934	6.0	
San Luis	22-05-1936	6.0	
Mendoza	22-11-1936	6.0	
San Juan	03-07-1941	6.2	
Mendoza	05-06-1942		
San Juan	15-01-1944		7.4
Mendoza	19-01-1944	5.5	
Córdoba	16-01-1947	5.7	
Corrientes, este	21-01-1948	5.5	
Salta, oeste	25-08-1948		7.0
Tierra del Fuego	17-12-1949		7.8
Estrecho de Magallanes	30-01-1950		7.0
San Juan	11-06-1952		7.2
Córdoba	22-05-1955		6.9
La Rioja	24-10-1957	6.0	
Salta, este	12-05-1959	5.0	
Catamarca	21-10-1966	5.0	
Salta, Tartagal, este	30-10-1966	4.8	
San Juan	10-11-1966	5.9	
Mendoza	25-04-1967	5.4	

Chaco	25-04-1968	5.0	
Salta, oeste	11-06-1970		6.8
Jujuy	08-06-1972	5.4	
San Juan	26-09-1972		5.8
Salta, Jujuy	19-11-1973		5.9
Jujuy	01-07-1974	5.0	
Salta, Oran, este	17-08-1974	5.0	
La Rioja	07-06-1977	5.1	
San Juan	23-11-1977		7.4
San Juan	06-12-1977		5.9
San Juan	17-01-1978		5.8
Tucumán	09-05-1981	5.0	
Mendoza	26-01-1985		6.0
Catamarca	24-06-1989	5.4	
Tucumán	29-02-1992	5.2	
San Juan	08-06-1993		6.5
San Juan	30-10-1993		5.9
Jujuy	16-12-1993	5.0	
Santiago del Estero	17-06-1997	5.5	
La Rioja	28-05-2002		6.0
Islas Orcadas	04-08-2003		7.3
Catamarca	07-09-2004		6.4
Mendoza	05-08-2006		5.7

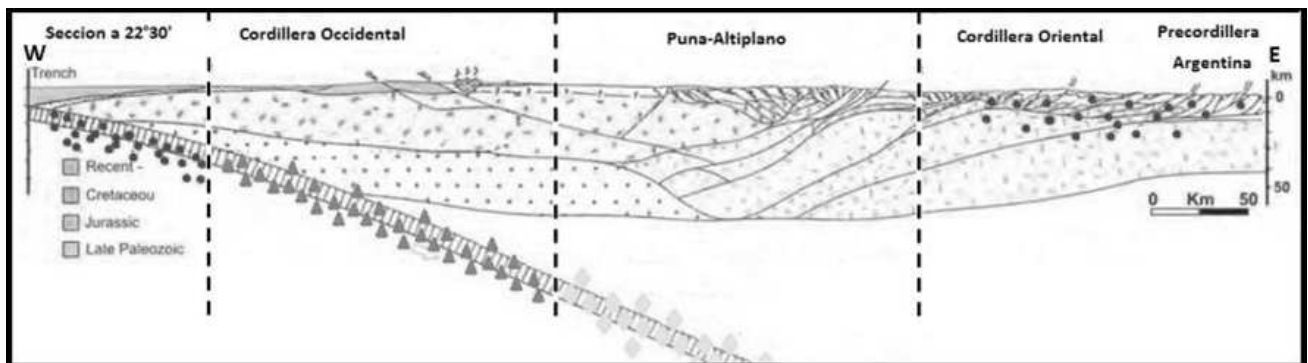


FIG. 2.— Corte transversal del macizo de los Andes a la altura de la latitud de Salta ($22^{\circ}30' S$). Se ilustra la actividad sísmica en el lado oriental del Macizo Andino, de carácter superficial y de pequeña a mediana magnitud debido al tipo de tectonismo que se produce en ella (solapamiento de estructuras).

(e) Salta este, $4.0 < M < 6.5$ (vecino al subandino boliviano).

4. Los terremotos en la República Argentina jamás superaron los 8 grados de magnitud.
5. Las fallas vinculadas a terremotos son: (a) Salta (1692, 1844, 1948), (b) San Juan (1894, 1944, 1977), (c) Mendoza (1792, 1861, 1985).
6. Se observa una única cordillera en La Rioja (30° Sur).
7. Los terremotos de foco profundo se dan en las provincias de Salta y Santiago del Estero; éstos son escasos y de baja intensidad en la superficie.

2.2. Sismicidad en Chile

Nos referiremos a dos fuentes de datos: Historia de la sismicidad en la República de Chile (Tabla 2) y el Mapa de Sismicidad de la República Argentina (Fig. 3).

Un análisis de la información que proporciona la Tabla 2 conduce a las siguientes anotaciones:

1. Los sismos (y temblores) en Chile son aquellos movimientos telúricos que causan daños menores y escasas víctimas pues tienen magnitud e intensidad pequeñas. Posiblemente se trate de terremotos superficiales o bien terremotos de profundidad intermedia con mayor magnitud.
2. La mayoría de los sismos que se reportan en la Tabla 2 no han sido medidos por instrumentos confiables, ya sea porque aún no existían o, como ocurrió muchas veces, porque los sismógrafos colapsaron con el movimiento, por lo que se recurrió a estimaciones según las crónicas (que suelen exagerar los hechos) o a registros realizados en lugares alejados de los epicentros. En muchísimos casos la magnitud del evento fue asignada por servicios sismológicos extranjeros (generalmente de EE.UU.).
3. Son más numerosos los registros de sismos ocurridos en la parte centro-norte del país, especialmente en Copiapó.
4. Arica ha sufrido terremotos con maremotos considerables durante todos los siglos, pero recientemente disminuyó la frecuencia de estos eventos.
5. En Punta Arenas sólo se registró dos eventos, de los cuales uno fue importante (año 1949, tres víctimas).
6. La mayoría de los terremotos en Chile superó los 8 grados en la escala Richter; algunos se consideran los más grandes jamás registrados en el mundo como el de Valdivia (año 1960, 9.5 grados de magnitud), Concepción (1965), Maule (2010) e Iquique (2014).

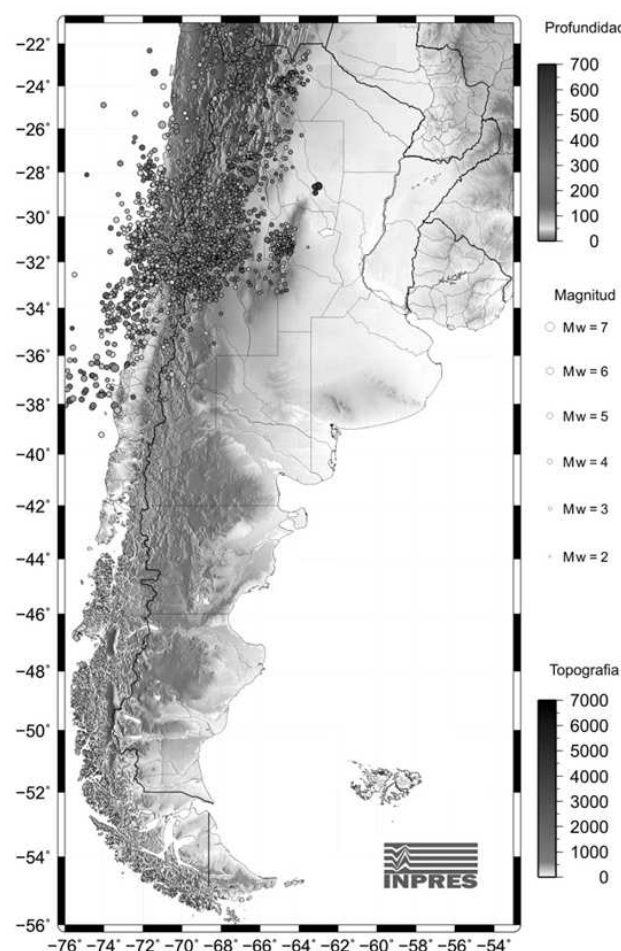


FIG. 3.— Mapa actualizado de Sismicidad en la República Argentina (INPRES). Este mapa incluye información de la sismicidad en la República de Chile, que fundamentalmente se concentra en su zona central (32° S).

7. Estadísticamente parece haber más sismos en los meses de mayo y diciembre (14 en cada mes) y menos sismos en los meses de julio, agosto y septiembre (5 en cada mes).

3. SISMICIDAD EN BOLIVIA

La información tomada de la prensa escrita (Tabla 3) contiene un registro histórico de la sismicidad en Bolivia mientras que en la Tabla 4 se tiene el registro de la sismicidad reciente cuya fuente es el Observatorio Sismológico de San Calixto. En la Fig. 4 se muestra un mapa de la sismicidad en la región centro-norte de la Cordillera de los Andes sudamericana. En la Fig. 5 se muestra la distribución de estaciones sismológicas estrenada recientemente en Bolivia (2012).

Un análisis de la información que proporcionan las Tablas 3 y 4 conduce a las siguientes anotaciones:

1. La mayoría de los sismos reportados en las Tabla 3 no han sido determinados científicamente por instrumentos confiables, ya sea porque aún no existían o porque no se disponía de una adecuada disposición de

TABLA 2
SISMOS Y TERREMOTOS EN CHILE

SIGLO XVI	Terremoto de Concepción, Terremoto de Valdivia,	8 de Febrero de 1570 (Tsunami Mayor) 16 de Diciembre de 1575 (Tsunami Mayor)
SIGLO XVII	Terremoto de La Serena, Terremoto de Arica, Terremoto de Arica, Terremoto de Coquimbo, Temblor de Santiago, Terremoto del Terremoto de Arica, Terremoto de Concepción, Terremoto de Arica, Terremoto de Santiago,	17 de Junio de 1604 24 de Noviembre de 1604 (Tsunami Mayor) 16 de Diciembre de 1615 (Tsunami) 1639 6 de Septiembre de 1643 13 de Mayo de 1647 31 de Marzo de 1650 15 de Marzo de 1657 (Tsunami Mayor) 10 de Marzo de 1681 Julio de 1690 (temblor)
SIGLO XVIII	Sismo del Terremoto del Terremoto de Valdivia, Terremoto del Temblor de Temblor de Terremoto de Copiapó,	24 de Mayo de 1722 8 de Julio de 1730 (Tsunami Mayor) 24 de Diciembre de 1737 (Tsunami) 23 de Mayo de 1751 (Tsunami) Octubre de 1786 11 de Febrero de 1787 30 de Marzo de 1796
SIGLO XIX	Sismo en La Serena, Terremoto de Copiapó, Terremoto de Copiapó, Terremoto del Temblor en Valparaíso, Sismo en Isla Lemu, Temblor en Arica, Temblor en Huasco, Temblor en Arica, Terremoto del Terremoto de Valdivia, Sismo en La Serena, Sismo en Copiapó, Sismo en La Ligua y Petorca, Sismo en la Serena, Terremoto de Terremoto en Santiago, Terremoto del Terremoto de Terremoto de Copiapó, Sismo de Copiapó, Terremoto del Temblor en Calama, Terremoto del Sismo del Terremoto del Terremoto de Illapel, Terremoto del Sismo en Tarapacá, Sismo en Punta Arenas, Terremoto en Illapel, Sismo en Copiapó, Sismo en Concepción,	1 de Enero de 1801 3, 4 y 11 de Abril de 1819 (Tsunami Mayor) 5 de Noviembre de 1822 (Tsunami) 19 de Noviembre de 1822 26 de Septiembre de 1829 1829 9 de Noviembre de 1831 25 de Abril de 1833 18 de Septiembre de 1833 20 de Febrero de 1835 (Tsunami Mayor) 7 de Noviembre de 1837 (Tsunami) 17 de Diciembre de 1843 19 de Enero de 1847 8 de Marzo de 1847 8 de Octubre de 1847 18 de Noviembre de 1849 (Tsunami) 6 de Diciembre de 1850 2 de Abril de 1851 26 de Mayo de 1851 5 de Octubre de 1859 (Tsunami) 12 de Enero de 1864 13 de Agosto de 1868 (Tsunami Mayor) 22 de Abril de 1870 25 de Mayo de 1871 (Tsunami) 5 de Octubre de 1871 7 de Julio de 1873 11 de Noviembre de 1876 9 de Mayo de 1877 (Tsunami Mayor) 23 de Enero de 1878 2 de Febrero de 1879 15 de Agosto de 1880 19 de Septiembre de 1890 23 de Junio de 1898

SIGLO XX

Sismo en el Norte Chico,	19 de Marzo de 1904
Sismo en Rancagua,	26 de Octubre de 1905
Terremoto del	16 de Agosto de 1906 (Tsunami)
Sismo en el Norte,	24 de Diciembre de 1906
Sismo en Valdivia,	13 de Noviembre de 1907
Sismo en Santiago,	28 de Abril de 1909
Sismo en Copiapó,	7 de Junio de 1909
Sismo en Iquique,	15 de Septiembre de 1911
Sismo en Taltal,	27 de Mayo de 1913
Sismo en Talca y Curicó,	29 de Enero de 1914
Sismo en Tarapacá,	7 de Junio de 1915
Sismo en Antofagasta,	25 de Agosto de 1916
Sismo en el Norte,	21 de Mayo de 1918
Terremoto del	4 de Diciembre de 1918 (Tsunami)
Sismo en Chiloé,	8 de Marzo de 1919
Sismo en Talca y Curicó,	5 de Junio de 1919
Sismo del	26 de Julio de 1920
Sismo del	20 de Agosto de 1920
Sismo del	28 de Octubre de 1920
Sismo en Concepción,	29 de Octubre de 1922
Terremoto del	10 de Noviembre de 1922
Sismo en Copiapó,	4 de Mayo de 1923
Sismo en Copiapó,	28 de Enero de 1924
Sismo en el Norte,	15 de Mayo de 1925
Sismo en la Zona Central,	14 de Abril de 1927
Terremoto del	1 de Diciembre de 1928 (Tsunami)
Sismo en el Norte,	19 de Octubre de 1929
Sismo en Quillota,	29 de Agosto de 1930
Sismo en Quillota,	17 de Octubre de 1930
Sismo en Iquique,	22 de Febrero de 1933
Sismo del	4 de Diciembre de 1934
Sismo en Taltal,	13 de Julio de 1936
Terremoto de	24 de Enero de 1939
Sismo en Copiapó,	Abril de 1939
Sismo del	29 de Junio de 1942
Sismo de	6 de Abril de 1943 (Tsunami)
Sismo en Santiago,	13 de Septiembre de 1945
Maremoto,	1 de Abril de 1946
Sismo en Copiapó,	2 de Agosto de 1946
Sismo en Arica,	10 de Mayo de 1948
Sismo en Angol,	19 de Abril de 1949
Sismo en Punta Arenas,	12 de Diciembre de 1949
Sismo en Antofagasta,	9 de Diciembre de 1950
Maremoto,	4 de Noviembre de 1952
Sismo en Chillán y Con-	6 de Mayo de 1953
cepción,	
Sismo en La Ligua,	4 de Septiembre de 1953
Sismo en Calama,	6 de Diciembre de 1953
Sismo en el Norte Chico,	19 de Abril de 1955
Terremoto de Las Melosas,	4 de Septiembre de 1958
Sismo en el Norte,	13 de Junio de 1959
Terremotos del	21 y 22 de Mayo de 1960 en Valdivia y en otras ciu- dades del sur de Chile (Tsunami Mayor)
Sismo en Concepción,	18 de Octubre de 1961
Terremoto del	28 de Marzo de 1965
Sismo en Taltal,	28 de Diciembre de 1966
Sismo en el Norte Chico,	26 de Septiembre de 1967
Sismo en Tocopilla,	20 de Diciembre de 1967
Sismo en el Norte,	28 de Noviembre de 1970
Sismo en Taltal,	17 de Junio de 1971
Terremoto del	8 de Julio de 1971 (Tsunami)
Sismo en el Norte Chico,	13 de Marzo de 1975
Sismo en las provincias de	10 de Mayo de 1975
Arauco, Malleco y Cautín,	

	Sismo en Pozo Almonte,	29 de Noviembre de 1976
	Sismo en Copiapó,	3 de Agosto de 1978
	Sismo en las II y III regiones,	4 de Octubre de 1983
	Terremoto del	3 de Marzo de 1985
	Sismo en Bajo Lago Rapel,	8 de Abril de 1985 (Tsunami)
	Sismo en la I región,	8 de Agosto de 1987 (Tsunami)
	Sismo en el Norte,	Febrero de 1988
	Sismo en Antofagasta,	30 de Julio de 1995 (Tsunami)
SIGLO XXI		
	Sismo en el Norte,	13 de Junio de 2005
	Sismo en Aisén,	21 de Abril de 2007 (Tsunamis)

TABLA 3
SISMOS Y TERREMOTOS EN BOLIVIA

Lugar	Fecha	Magnitud	Profundidad Foco
Potosí	1581		
	1661		
	1851		
Sucre	10–1650	La Catedral fue destruida	
Santa Cruz	1845		
Villa Tunari	1871		
Yacuiba	1887		
	1899		
	23–03–1899	6.3	profundo
Sipe Sipe, Cbba.	23–07–1909		
Aiquile, Cbba.	25–10–1925		
	01–09–1958		
	22–02–1976		
Cochabamba	25–12–1942		
	18–02–1943		
	19–10–1959		
	12–05–1972		
Ivirgatzama, Cbba.	23–07–1981		
	09–05–1986		
Sucre	27–03–1948	La ciudad fue destruida	
Consata, Mapiri	24–02–1947	6.4	superficial
Postrer Valle, SC.	26–06–1997		
Iturrealde, Ballivián	09–06–1994	8.6	630 Km.
Comujo, Oruro	06–10–1995	5.3	
Aiquile, Cbba.	22–05–1998	6.5	15 Km.
Coipasa, Oruro	04–04–2001	4.6	
Registros de los últimos sismos y terremotos en Bolivia.			
Sud Chichas, Potosí	2012	5.1	
Chaco, Tarija	09–02–2012	4.0	
Quijarro, Potosí	13–03–2012	4.6	
NorLipez, Potosí	01–04–2012	4.9	
Quijarro, Potosí	27–04–2012	4.8	
Punata, Cbba.	2012	3.8	
Capinota, Cbba.	13–05–2012	3.8	
Sur Lipez, Potosí	16–05–2012	3.5	
Provincia Cordillera	01–04–2013		
Cotoca, Santa Cruz	15–11–2013		
Santa Cruz, 113 Km sur	09–04–2014	5.2	40 Km.

instrumentos y de la tecnología apropiada para el procesamiento de datos para sismógrafos localizados en medio del macizo de los Andes centrales; asimismo no se tenía un modelo aceptable del terreno sobre el cual están asentados los observatorios, por lo que se recurrió a estimaciones según las crónicas (que suelen exagerar los hechos) o a registros realizados en lugares alejados de los epicentros. En la mayoría de los casos la magnitud de los terremotos fue asignada por servicios sismológicos extranjeros (generalmente de EE.UU.).

- Según los últimos registros, la mayoría de los movimientos telúricos que se produjeron en territorio boliviano no superan los 4 grados de magnitud en la escala de Richter (con un promedio de 3.5 grados); éstos son temblores que no son percibidas por las personas.
- Los únicos movimientos telúricos de gran magnitud registrados en Bolivia que pueden ser considerados como verdaderos terremotos son: (a) el de Consata–Mapiri (1947) del tipo superficial, (b) el de Iturralde–Ballivián (1994) que fue el mayor magnitud con una marca de 8.6 grados en la escala de Richter, con foco profundo y baja intensidad, (c) el de Aiquile (1998) del tipo superficial y de intensidad alta.
- Bolivia se considera como un país de actividad sísmica moderada.
- Las zonas más activas en Bolivia son Cochabamba y Potosí.
- Los movimientos telúricos estarían vinculados a las siguientes fallas tectónicas principales: (a) Falla de Cochabamba con convergencia al noreste (del tipo de caída gravitacional de gran magnitud). (b) Falla Potosí–Oruro–La Paz y falla Uyuni–Khenayani con convergencia hacia el oeste (del tipo de plegamiento con ruptura); falla de San Vicente con convergencia al este (del tipo de plegamiento con ruptura). (c) Falla de Potosí–Chuquisaca–Cochabamba; falla Aiquile–Tupiza con convergencia hacia el este (del tipo plegamiento con caída gravitacional); falla Camargo–Tojo con convergencia hacia el oeste (del tipo de caída gravitacional de gran magnitud). (c) Fallas del Subandino: falla de San Simón con convergencia hacia el oeste (del tipo solapamiento) y falla Mandeyapeuca con convergencia hacia el oeste (del tipo corrimiento con solapamiento).

De manera general se puede concluir que el mayor número de terremotos se producen en: (a) Arica, Iquique y Antofagasta en el norte de Chile; (b) Copiapó, Concepción y Valdivia en la zona central de Chile; (c) Punta Arenas en el extremo austral de Chile. Sucede aproximadamente lo mismo en el lado

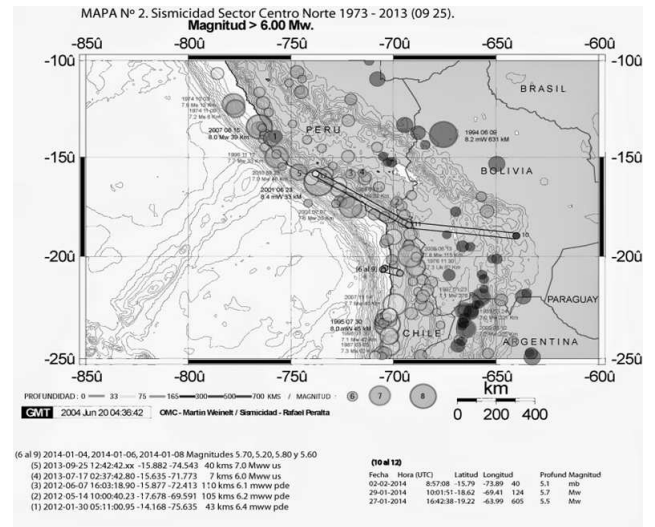


FIG. 4.— Mapa de sismicidad en la región centro–norte de la Cordillera de los Andes sudamericanos. En esta se ilustra parte de la sismicidad en Bolivia, escaso número de terremotos de foco de profundidad intermedia, casi nulo número de terremotos de gran profundidad, gran magnitud, baja intensidad en superficie. No están reflejados los terremotos de foco superficial. También se puede observar la presencia de terremotos de gran magnitud y gran intensidad, de focos superficiales vinculados a la costa occidental del continente.

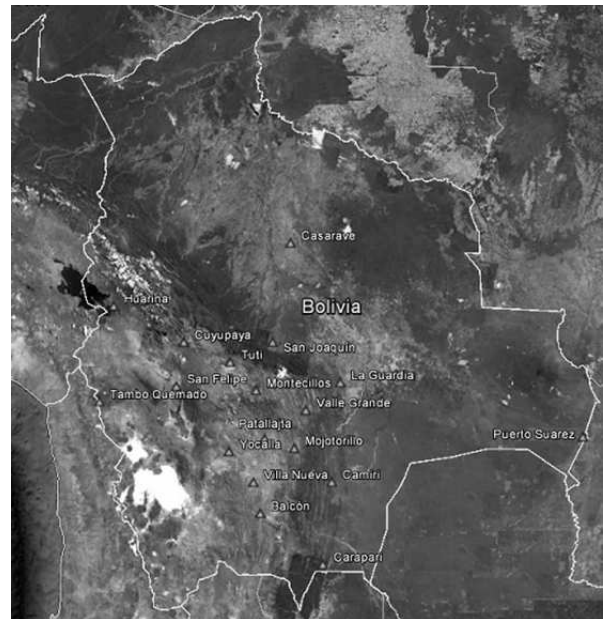


FIG. 5.— Distribución de estaciones sismológicas instaladas por el Observatorio San Calixto (2012).

oriental del arco volcánico andino, en la cordillera de los Andes y en la cordillera occidental en Bolivia. Las estadísticas indican que la época de mayor número de terremotos es el verano austral.

4. ACTIVIDAD SÍSMICA EN BOLIVIA

En Bolivia ocurren principalmente solo dos tipos de terremotos: los de foco superficial y los de foco profundo (como lo confirman los registros obtenidos hasta ahora), lo que se debe su ubicación relativamente alejada del sitio donde se genera la actividad

TABLA 4
SISMOS Y TERREMOTOS RECIENTES EN BOLIVIA

Fecha	Hora Local	Profundidad	Magnitud	Departamento	Consultar
14/05/2014	03:38	Intermedia	3.7	Prov. Sud Lípez, Potosí.	Ver
11/05/2014	19:54	Intermedio	4.4	Prov. Poopó, Oruro.	Ver
05/05/2014	09:38	Intermedia	4.8	Prov. Daniel Campos, Potosí.	Ver
30/04/2014	07:04	Intermedio	3.6	Prov. Juan Manuel Pando, La Paz.	Ver
29/04/2014	19:26	Intermedio	3.7	Prov. NorLípez, Potosí	Ver
27/04/2014	01:14	Intermedia	3.8	Prov. Enrique Baldivieso, Potosí.	Ver
18/04/2014	23:47	Superficial	4.4	Prov. Cordillera, Santa Cruz.	Ver
01/04/2014	19:46	Superficial	8.2	Costa Iquique, Chile.	Ver
22/03/2014	08:58	Superficial	6.2	Costa de Iquique Chile	Ver
16/03/2014	17:16	Superficial	6.7	Costa de Iquique, Chile.	Ver
04/03/2014	00:54	Intermedio	3.9	Prov. Quijarro, Potosí.	Ver
02/03/2014	15:48	Intermedio	3.6	Prov. NorLípez, Potosí.	Ver
02/03/2014	12:28	Intermedio	4.5	Prov. Sud Carangas, Oruro.	Ver
17/02/2014	22:23	Intermedio	3.9	Prov. Sud Lípez, Potosí.	Ver
15/02/2014	06:12	Intermedio	3.7	Prov. Ladislao Cabrera, Oruro.	Ver
10/02/2014	22:23	Intermedio	3.8	Prov. NorLípez, Potosí.	Ver
08/02/2014	00:38	Superficial	3.2	Prov. Tapacari, Cochabamba.	Ver
27/01/2014	12:42	Profundo	5,4 (NEIC)	Prov. Tomina, Chuquisaca.	Ver
15/01/2014	14:12	Intermedio	3.8	Prov. Sud Carangas, Oruro.	Ver
16/12/2013	13:25	Intermedia	3.5	Prov. Quijarro, Potosí.	Ver
07/12/2013	19:14	Intermedia	4.5	Prov. NorLípez, Potosí.	Ver
03/12/2013	04:19	Intermedio	3.7	Prov. Ladislao Cabrera, Oruro.	Ver
02/12/2013	17:41	Intermedia	3.8	Prov. Sud Lípez, Potosí.	Ver
25/11/2013	11:56	Intermedio	3.7	Prov. Baldivieso, Potosí.	Ver
24/11/2013	23:04	Intermedio	3.5	Prov. Sud Lípez, Potosí.	Ver
09/11/2013	13:20	Superficial	4.5	Prov. Capinota, Cochabamba.	Ver
05/11/2013	06:06	Intermedio	4.6	Prov. Sajama, Oruro.	Ver
21/10/2013	15:54	Superficial	4.7	Prov. Cordillera , Santa Cruz.	Ver
15/10/2013	17:59	Superficial	4.0	Prov. Cordillera , Santa Cruz.	Ver
15/10/2013	16:15	Superficial	5.0	Prov. Cordillera , Santa Cruz.	Ver
15/10/2013	16:12	Superficial	5.0	Prov. Cordillera, Santa Cruz.	Ver
12/10/2013	21:06	Intermedia	4.7	Prov. Quijarro, Potosí.	Ver
09/10/2013	23:32	Intermedio	5.1	Prov. NorLípez, Potosí.	Ver
09/10/2013	16:57	Intermedio	4.3	Prov. Sud Lípez, Potosí	Ver
09/10/2013	13:03	Intermedio	5.3	Prov. Sud Lípez, Potosí.	Ver

sísmica en el borde continental; aquí colisionan la masa andina (considerada como parte de la continental) con la corteza oceánica que se sumerge por debajo de la continental, a más de 250 km del arco volcánico o cordillera occidental.

Los sismos superficiales se desarrollan en las partes someras y medias de la corteza, por acomodamiento de partes, por fenómenos volcánicos o por plegamientos y grandes deslizamientos. Los sismos de foco profundo se producen debido a procesos de desprendimiento de los extremos de la placa oceánica subduciente a más de 400 km de profundidad. El primer tipo de sismos (superficiales) se caracterizan por magnitudes de 3.5 grados, que corresponden a casos de plegamientos con reacomodamientos; los sismos de foco de profundidad intermedia no superan los 6.4 grados. Hasta ahora no se ha registrado en territorio boliviano algún terremoto que supere los 6.5 grados de magnitud de características superficiales.

Es posible que se generen terremotos de más de 8 grados de magnitud en territorio boliviano (como ya ocurrió) pero serán de foco profundo, aproximadamente a 500 km, debido a cambios de fase de minerales de olivino a espinela en zonas relativamente

frías y viejas de la zona de subducción, pero por su gran profundidad no ocasionarán daños en la superficie, donde la intensidad sería relativamente baja.

5. GEODINÁMICA

Los Andes centrales generalmente se describen por sus zonas fisiográficas (cordillera occidental, altiplano, cordillera oriental, zona interandina, subandino y llanura oriental). En nuestro caso consideraremos dominios tectónicos y magmáticos (tomando en cuenta los conocimientos hasta ahora adquiridos). A partir de la fosa oceánica (trench) observamos: la cuña occidental (CUOC), constituida por la cordillera de la costa (CC); el valle longitudinal (VL) y el pre-andino (PA); el bloque andino (BA) constituido por: la cordillera occidental (COC, arco volcánico), la cuña altiplánica vertical (CAV), la faja de Huarina (FHU) y la cordillera oriental (COR); la cuña oriental (CUOR) constituida por: la zona interandina (ZIA) el subandino (SUA) y la llanura oriental (LLAOR). El conjunto puede ser denominado macizo andino (MAN) (Wigger 1994) y se puede concebir como conformado por: la CUOC, un cuerpo longitudinal de sección triangular con una cara haciendo un ángulo de 20° con la horizontal

(extensión de la superficie del mar por debajo de la superficie continental) con una segunda cara paralela a la superficie que separa la masa continental de la lamina subducente de Nazca, y una cara basal (vertical), lo que corresponde a un área de 1500 km^2 . El BA, un cuerpo prismático de 600 km de longitud y de sección rectangular de 10500 km^2 . Seguidos por la CUOR, un cuerpo de forma aproximadamente triangular, una línea base horizontal de 230 km y una altura en occidente de 14 km que se desvanece en el oriente, de 1600 km^2 de sección y más de 400 km de longitud. Cada una de estas componentes tiene propiedades físicas particulares. Por el oeste se observa la convergencia de la placa oceánica basáltica de Nazca que colisiona con la CUOC considerada como parte de la masa continental. Al otro lado del MAN se presenta la interacción de esta enorme masa, particularmente de la CUOR, con la placa continental suramericana (el Escudo Brasileño). En el borde continental occidental toma lugar una interacción de masas con subducción de una de ellas por debajo de la otra con características de una verdadera máquina de molienda. La energía impresa a la masa continental genera que el borde acumule energía mecánica elástica acompañada con movimientos verticales para luego liberarse en forma de terremotos produciendo expansión de masas, caídas gravitacionales y la erosión del borde, produciendo fallas principalmente normales, algunas inversas y de corrimiento (Reutter 1994). Los terremotos generados de esta manera son superficiales de gran magnitud, caracterizados con valores mayores a 8 grados, de efectos superficiales catastróficos, de gran intensidad como los que se registraron en el norte, Iquique (2014) y en la zona central, Copiapó, Concepción (2013), Maule (2010) y Valdivia de 9.5 grados (1960) en Chile. En (Moscoso 2011) se estudia en detalle las características estructurales de la CUOC del terremoto con tsunamis de la región del Maule, 2010, con una magnitud de 8.8 grados. Podemos definir zonas asísmicas y sísmicas en las que se observa interacción de rocas de altos valores de V_p ($6-7 \text{ km/s}^2$).

El terremoto se produce en el contacto de la Placa de Nazca con el tope continental, que hace un gran ángulo de subducción a 20 km de profundidad debajo de la costa. Las condiciones mecánicas en los Andes centrales se asemejan a este caso con algunas diferencias, particularmente el ancho de la cuña, con estructura más compleja que incluye la cordillera de la costa (COCO), el valle longitudinal (VALO) y la precordillera (PRCO). En el lado oriental del MAN central, más propiamente donde la CUOR, interactúa con el escudo brasileño, se observa un mecanismo de interacción con características diferentes a la del lado occidental. Sobre la capa infra yacente, el escudo brasileño, las masas andinas sufren un proceso de plegamiento con cabalgamiento y corrimiento. Este mecanismo tectónico no genera movimiento de masa tipo caídas gravitacionales (horsts, grabens), con movimientos bruscos. Estas deformaciones se producen suavemente (Jacobshagen & Giese 1996),

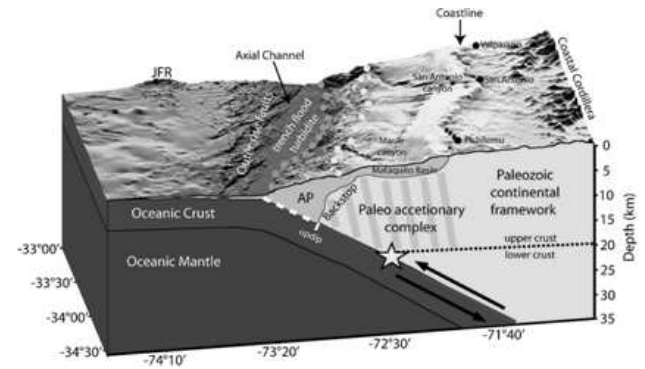


FIG. 6.— Interpretación sísmica y batimétrica del área de estudio, AP significa prisma de acreción. Línea roja gruesa es la zona sísmica estimada, la línea blanca segmentada es la zona asísmica. La estrella denota el hipocentro estimado del terremoto del Maule con magnitud 8.8 grados proyectado sobre el perfil de estudio. Los puntos anaranjados sobre la batimetría indican el frente de deformación y los puntos amarillos la proyección del frente del tope trasero.

aunque con velocidades diferenciadas.

En la faja subandina se reconocen dos niveles de despegue de movimiento de las masas de bajo ángulo de inclinación ($2-3^\circ$). También se reconocen tres niveles estructurales: el inferior de Cinco Picachos y la Pava, el intermedio del Aguarague y el superior de la cuenca de Tarija, y el terciario subandino. Las fallas principales son de elevada inclinación, cortan la sección desde el nivel de despegue hacia arriba con una convergencia hacia el este y una inclinación hacia el oeste. El nivel estructural intermedio tiene un comportamiento plástico que en realidad está constituido por pequeñas y numerosas fallas y zonas de 2° cizalla. Los posibles planos de movimiento se dan entre materiales: (A) de baja y alta velocidad, los sedimentos del subandino y el material del escudo brasileño ($2-6 \text{ km/s}^2$), respectivamente, en el caso de los corrimientos y (B) entre sedimentos de baja velocidad ($2-4 \text{ km/s}^2$), en el caso de las fallas, dentro de los 10 a 0 km de espesor de la capa superior. Los procesos tectónicos de formación del subandino se traducen en un acortamiento de masa que generan serranías acompañados de movimientos telúricos de menor magnitud, consecuentemente de menor intensidad. Hasta ahora no se ha informado que los mismos superen los 6 grados de magnitud. La velocidad de movimiento de la placa oceánica de Nazca se caracteriza por vectores de convergencia (Klotz 2006); dicha velocidad está diferenciada por franjas: la de mayor valor se extiende entre Arica y Antofagasta con 65 mm/a ; otra que se extiende entre Copiapó y Valparaíso caracterizada por un valor mucho mayor a 70 mm/a ; luego se tiene la franja entre Valparaíso y Concepción con 30 mm/a ; otra franja notable es la que pasa por Valdivia con 20 mm/a y va reduciéndose hacia el sur donde se registra valores iguales y menores a 18 mm/a . En los puntos de colisión de las placas se registran velocidades que van de 9 a 12 mm/a en dirección horizontal hacia el este, tomando la placa continental como inmóvil. En el lado oriental del MAN en Bolivia se

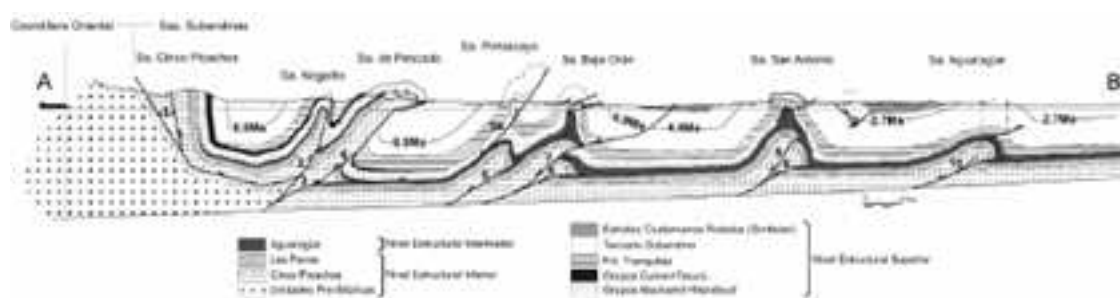


FIG. 7.— Sección estructural balanceada de la faja plegada y corrida subandina. 1. Cabalgamiento trasero "Backthrust" de Cinco Picos. 2. Corrimiento Nogalito: en secuencia, con reactivación fuera de secuencia. 3. Corrimiento del Pescado: en secuencia. 4. Corrimiento del Pescado: fuera de secuencia. 5. Corrimiento Pintascayo: en secuencia con reactivación fuera de secuencia. 6. Corrimiento de la Sierra Baja de Orán: en secuencia. 7. Corrimiento² de la Sierra Baja de Orán: fuera de secuencia. 8. Corrimiento de San Antonio: en secuencia. 9. Corrimiento San Antonio: fuera de secuencia. 10. Corrimiento Aguaraque: en secuencia (con escasa reactivación fuera de secuencia). Las líneas de tiempo mostradas dentro de los sedimentos terciarios están basadas en estratigrafía de polaridad magnética y dataciones absolutas de niveles de tobas, y representan los límites locales entre las secuencias pre- y de crecimiento. No posee exageración vertical.

registrar velocidades sismo-geológicas que van de 1.5 a 4 mm/a (B. Brooks 2011), aproximadamente. Valores calculados en base a datos tomados con sistemas GPS diferenciales acusarían un movimiento 9-13 mm/a de la CUOR. Se estima un valor promedio de acortamiento de largo periodo, para 25 Ma. de 8-14 mm/a. Suponiendo un acortamiento entre 7-10 mm/a, nos acercaríamos a los valores calculados en base a criterios de la geología estructural. Se verifica una reducción de la velocidad del MAN de 10 a 2 mm/a en distancias entre 25 a 100 km representado una fuerte variación de la energía total inicial. Es interesante preguntar a dónde va a parar esta energía? En (Brooks 2011) se propone un modelo de mecanismo focal considerando una base de despegue hipotético situada a 10 km de profundidad en posición casi horizontal, basado en una isoterma de 300° C que sería suficiente para producir resquebrajamiento de las rocas en ese lugar, de 100 km de ancho en la parte oriental del subandino, limitada por la falla de Mandeyapeca, la que estaría permaneciendo en silencio sísmico. Sugiriendo que la ruptura de toda esta superficie, con un deslizamiento de tan solo 10 m entre ellas, podría producir un terremoto de magnitud 8.7-8.9 grados, de consecuencias realmente catastróficas (con características semejantes a las que ocurren en el occidente), calculándose un tiempo de acumulación de energía entre 150 a 1000 años. No se informa sobre la sismicidad del suelo subandino, ni se hace mención al rol que actualmente estarían cumpliendo las fallas reconocidas, al comportamiento casi plástico de gran parte del material que compone este bloque y otros detalles, que de alguna manera vienen reportados en los trabajos de otros autores. El valor de 9 a 13 mm/a de velocidad de movimiento de la CUOR hacia el este, reportado en (Brooks 2011), con una velocidad de acortamiento menor desconocido puede corresponder a la época de mayor velocidad de plegamiento y corrimiento del bloque subandino que ocurrió a finales del Mioceno.

6. LA ENERGÍA PROPORCIONADA POR LA PLACA DE NAZCA SE DIVIDE

La información hasta ahora obtenida indica que la energía que supone la presión ejercida por la placa oceánica de Nazca sobre la placa continental no se traslada en su totalidad hacia la zona de interacción del macizo andino con el escudo brasileño. Esta energía se divide y se disipa en el camino provocando diversos tipos de fenómenos geológicos, como ser: (a) acortamiento horizontal y elevación de masas por plegamiento, cabalgamiento (es decir, engrosamiento de masa andina por levantamiento), reacomodamiento de bloques, fundición de rocas, producción de cámaras magmáticas crustales (F. Schilling 2006); (b) corrimiento de todas estas masas hacia el este, en trabamamiento y compresión elástica de bloques y su relajamiento en forma de terremotos in situ y vulcanismo, deslizamientos y otros. En (E. Klosko et al. 2002) se indica que gran parte (70%) de la velocidad de movimiento de la placa de Nazca es retenida en la CUOC liberándose en forma de terremotos, el resto se reparte entre el BA y la CUOR (asignando, aproximadamente a 15% a cada uno), que se libera provocando deslizamiento sísmico y asísmico en el BA y la CUOR, respectivamente. En latitudes de la parte central de Chile, el macizo andino (MAN) se reduce a una única cordillera, concebida de idéntica manera a la anterior con la diferencia de la presencia de un paralelepípedo central de menores dimensiones. Entonces podemos observar una cuña occidental (CUOC), con actividad sísmica intensa, un bloque andino (BA), paralelepípedo de varios cientos de km de longitud en dirección norte-sur por 150 km de ancho en dirección este-oeste, como base por 10 km de altura, 1500 km² de sección transversal, a la que en su parte oriental le acompaña una cuña oriental (CUOR) que es una serie de serranías que terminan a longitudes del oeste de la provincia de Córdoba, cuyas dimensiones comparada con la que se observa en el norte, a latitudes de Bolivia, son bastante menores. En esta región del lado occidental (CUOC) los terremotos tienen gran magnitud (por encima de 8 grados), mientras que en el lado oriental (CUOR) las magnitudes de los terremotos están siempre por debajo de este valor referencial,

pero que de todas maneras tienen características de catastróficas en intensidad. Por el hecho de que el territorio de la República de Chile ocupa precisamente el borde continental activo, donde la placa oceánica de Nazca se sumerge debajo de la masa continental sudamericana, se observa que en ella se desarrollan terremotos de foco superficial a intermedio y nunca terremotos de foco profundo de acuerdo a los conocimientos hasta ahora acumulados. Los observatorios sismológicos instalados en este territorio sólo registraran terremotos locales superficiales de baja magnitud y de foco intermedio de mediana magnitud, las de profundidad intermedia y superficial de gran magnitud los colapsan, a menos que estén situadas a grandes distancias de los epicentros de los mismos. En territorio argentino por estar situada al otro lado del arco volcánico y alejado de la fuente principal de los terremotos, se producen con preferencia terremotos de foco superficial a intermedio, se registran terremotos de foco profundo muy raras veces en su parte norte-central, de los cuales hasta ahora se ha informado muy poco. Los observatorios sismológicos localizados en territorio continental argentino están en buenas condiciones para registrar y contribuir al estudio de los terremotos que se pro-

duzcan en el borde continental activo sudamericano.

7. CONCLUSIONES

El análisis de la información disponible hasta ahora nos conduce a las siguientes conclusiones: La energía se disipa con la distancia a la fuente, en este caso la fuente es la fosa oceánica en el pacífico donde se produce la colisión de dos placas, de las cuales una ejerce mayor presión sobre la otra; las fuerzas actúan lateralmente (horizontalmente) y con mayor valor absoluto hacia el este. Las presiones ya no obedecen al simple principio de Pascal de los fluidos, sino más bien están involucrados principios de la conservación de la energía general (energía mecánica que se transforma en otro tipo de energías) disminuyendo las fuerzas mecánicas del continuo con movimiento de masas por canales con presencia de fuerzas gravitacionales, fuerzas de rozamiento y cambios de forma de energía. Por estas razones no es posible esperar terremotos de gran magnitud al otro lado del macizo andino en la región de contacto con el escudo brasileño, siendo éste el caso de la sismicidad en territorio de Bolivia.

REFERENCIAS

- Brooks B. (2011), *Nature geoscience letters* **4**, 380
 Klosko E. et al. (2002), *American Geophysical Union* **30**, 123
 Schilling F. (2006), *Partial melting in the Central Andean Crust: A review of Geophysical, Petrophysical and Petrologic Evidence* (Springer-Verlag, Berlin)
 Jacobshagen V. & Giese P. (1996), *Int. Geol. Cong.* **1**, 310
 Klotz J. (2006), *Long term signals in the present-day deformation field of the central Andes and constraints on the viscosity of the Earth's upper mantle* (Springer-Verlag, Berlin)
 Reutter K. (1994), *Tectonic of the Southern Central Andes: Structure an evolution of an active continental margin* (Springer-Verlag, Berlin)
 Wigger P. (1994), *Variation in the crustal structure of the Southern Central Andes deduced from Seismic Refraction investigations, Tectonic of the Southern Central Andes* (Springer-Verlag, Berlin)