

ANATOMÍA DE LOS ANDES CENTRALES: DISTINGUIENDO ENTRE ANDES OCCIDENTALES, MAGMÁTICOS, Y ANDES ORIENTALES, TECTÓNICOS

Thierry SEMPERE¹ & Javier JACAY²

¹ LMTG, Université de Toulouse, CNRS, IRD, OMP, 14 avenue Edouard Belin, F-31400 Toulouse, Francia
(sempere@lmtg.obs-mip.fr)

² EAP Ingeniería Geológica, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú (j_jacay@yahoo.com)

INTRODUCCIÓN: LOS ANDES BAJO EL PESO DE UN PARADIGMA

La actividad científica se desarrolla bajo la influencia de paradigmas (Kuhn, 1962) y las geociencias no hacen excepción. La tectónica de placas es el paradigma que presentemente gobierna a gran escala nuestra comprensión de la Tierra. Pero los paradigmas orientan la investigación científica a todas las escalas, y los geocientíficos no somos siempre conscientes de eso. En el caso de los Andes Centrales, la mayoría de los estudios llevados a cabo desde más de 20 años han admitido, explícitamente o no, que el engrosamiento cortical resulta ante todo del acortamiento tectónico del margen sudamericano, y entonces que las adiciones magmáticas a la corteza han representado sólo una contribución menor al engrosamiento cortical. Porque esta idea fue particularmente bien expuesta en el trabajo hito de Isacks (1988), este paradigma puede referirse como “el paradigma isacksiano”. Desde entonces, muchos investigadores en los Andes Centrales han privilegiado estudios e interpretaciones favoreciendo el acortamiento tectónico; sin embargo, el espesor de la corteza no puede explicarse por las estimaciones disponibles del acortamiento, especialmente en el arco y antearco (e.g., Schmitz, 1994; James & Sacks, 1999; Sempere et al., 2008, y referencias incluidas).

Cabe recordar que, aparte de la interacción tectónica, es decir mecánica, de las placas convergentes, la otra primera característica de las zonas de subducción es la producción de un abundante magmatismo de arco. La simple lógica implica que los procesos tectónicos y magmáticos tendrían entonces que considerarse como dos aspectos relacionados de un mismo sistema. La idea que orógenos de arco se forman por acreción magmática impuesta por la subducción es ampliamente aceptada en arcos insulares (e.g., Tatsumi and Stern, 2006) o en arcos continentales (e.g., Lee et al., 2007), pero ha recibido poca atención en el caso de los Andes Centrales — aunque con notables excepciones (e.g., James, 1971b; Thorpe et al., 1981; Kono et al., 1989; James & Sacks, 1999; Haschke and Günther, 2003) —, una situación en gran parte debida al predominio del paradigma isacksiano en los Andes.

La creencia que los Andes Centrales se originaron principalmente por acortamiento ha frecuentemente sesgado la cartografía geológica, imponiendo por ejemplo que fallas de alto ángulo o mal expuestas se mapeen sistemáticamente como fallas inversas y cabalgamientos. Por estas razones, ciertas áreas fueron mapeadas en formas profundamente diferentes por geólogos que favorecían modelos distintos (casos en Sempere [2000] y Wörner & Seyfried [2001]), y estructuras extensionales fueron a menudo pasadas por alto. Además, observaciones y modelos basados en varios contextos indudablemente extensionales en Europa y Africa ahora enseñan que geometrias estructurales que anteriormente se creían típicas de deformaciones compresionales, como en los Andes Centrales, en realidad también ocurren en contextos extensionales, en particular donde fallas normales se iniciaron como fallas ciegas formando flexuras (e.g., Finch et al., 2004).

Hemos entonces emprendido la revisión de la estructura geológica del sur y centro del Perú con la meta de entender mejor cual es la anatomía detallada de este segmento de los Andes Centrales.

“ANDES OCCIDENTALES” Y “ANDES ORIENTALES” EN EL SUR DEL PERÚ

El sur del Perú proporciona un observatorio conveniente para estudiar detalladamente la anatomía del Oroclino Centro-Andino (OCA). La identificación y corrección de sesgos de mapeo (Fig. 1) conduce a mayores revisiones : aparece que el antearco, arco (= Cordillera Occidental [WC]), y Altiplano SW (en adelante “Andes Occidentales”) han sido dominados por transcurrencia (incluyendo deformación

transpresional) y extensión desde ~30 Ma (Sempere & Jacay, 2006, 2007), en contraste con el Altiplano NE, Cordillera Oriental (EC), y faja subandina (en adelante “Andes Orientales”), donde el acortamiento sí ha sido efectivamente importante. Separando estos dos dominios orogénicos, la tomografía sísmica ha detectado una frontera subvertical de escala litosférica en el Altiplano Norte de Bolivia (Dorbath et al., 1993) y en su prolongación, es decir a lo largo del borde SW de la Cordillera Oriental del sur del Perú, la distribución de las rocas magmáticas (Sempere et al., 2004) y la geoquímica isotópica de rocas provenientes del manto (Carlier et al., 2005) también mapean un límite litosférico subvertical, que en superficie coincide con el SFUACC, un sistema mayor de fallas (Fig. 2).

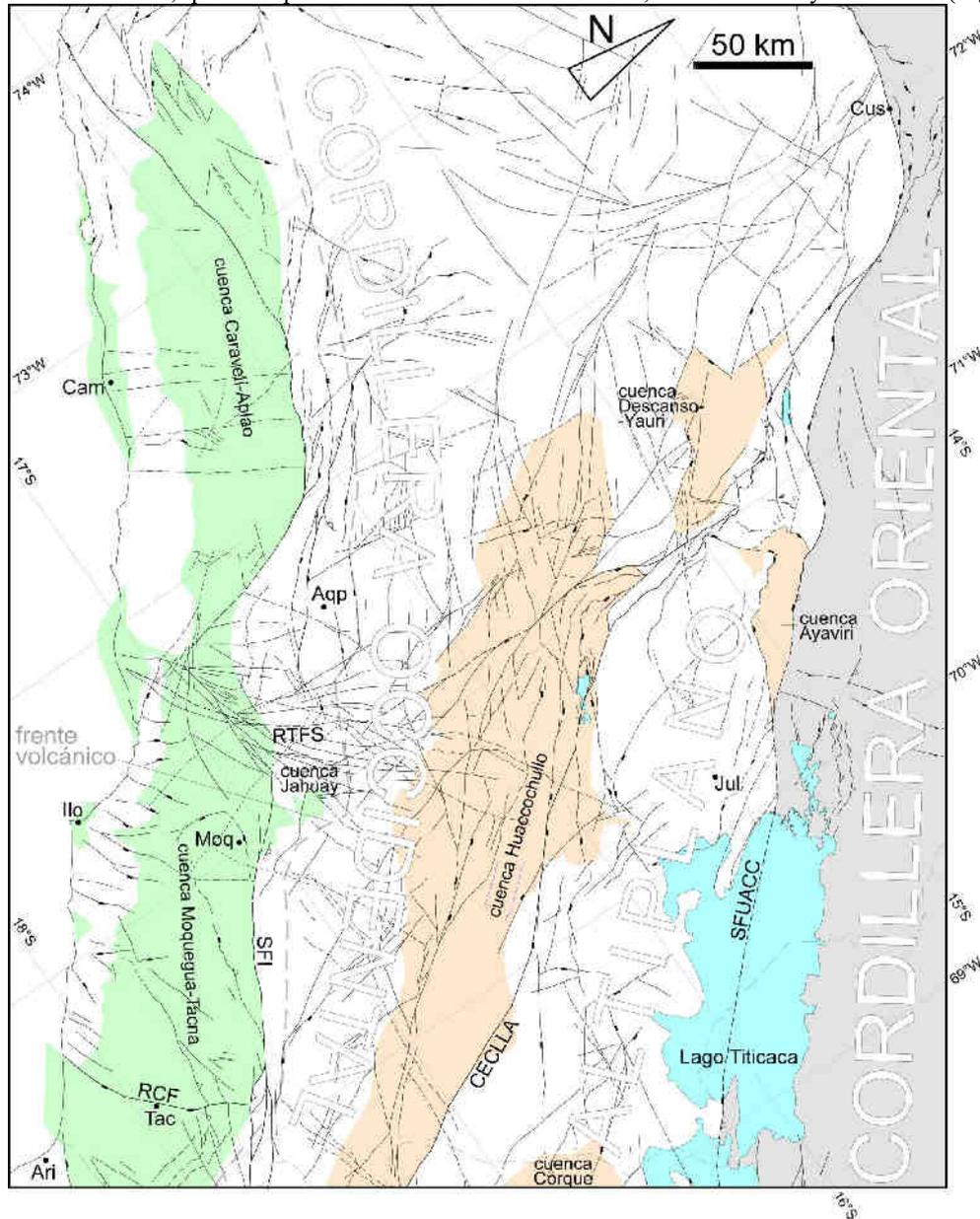


Figura 1. Mapa tectónico preliminar del sur del Perú, incluyendo lineamientos visibles sobre imágenes topográficas SRTM (resolución de 90 m) y nuevas interpretaciones de fallas (Sempere & Jacay, 2006).

Áreas verdes: cuencas de antearco; áreas rosadas: principales cuencas altiplánicas; áreas celestes: principales conjuntos lacustres actuales; área gris (al noreste del SFUACC): región con acortamiento tectónico significativo. CECLLA = corredor estructural Cusco-Lagunillas-Laraqueri-Abaroa (falla principal); RCF = falla del Río Caplina; RTFS = sistema de fallas del Río Tambo; SFI = sistema de fallas Incapuquio; SFUACC = sistema de fallas Urcos-Ayaviri-Copacabana-Coniri. Aqp = Arequipa,

Ari = Arica, Cam = Camaná, Cus = Cusco, Jul = Juliaca, Moq = Moquegua, Tac = Tacna.

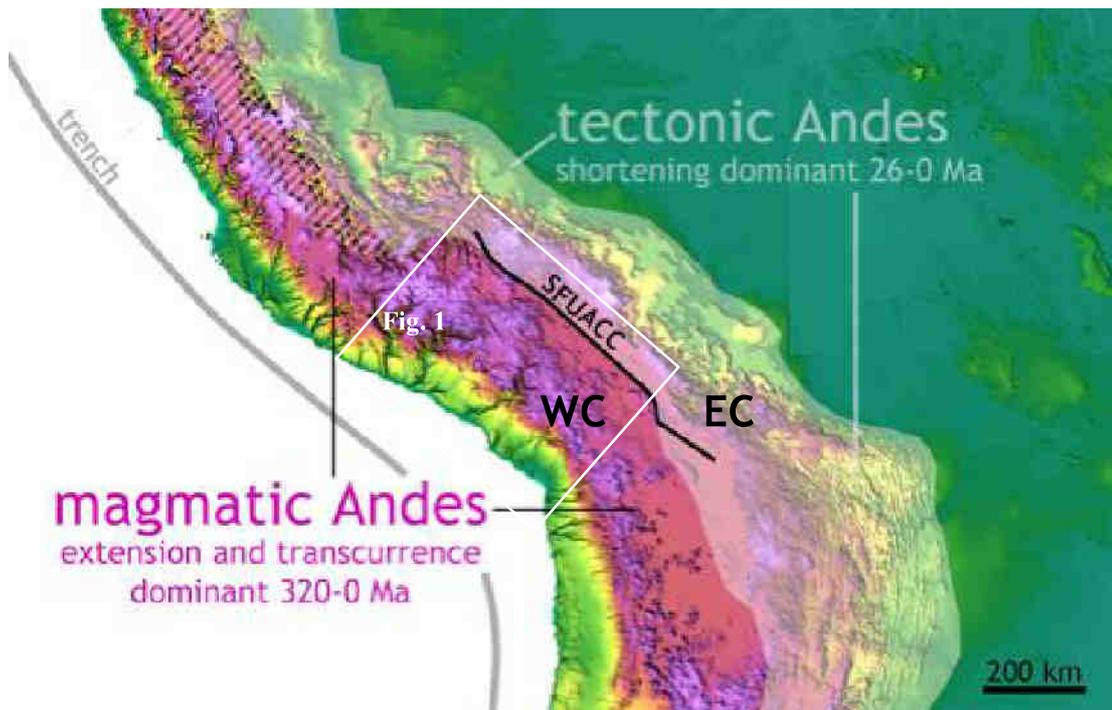


Figura 2. Partición aproximativa entre Andes Occidentales (magnéticos) y Andes Orientales (tectónicos) en el Oroclino Centro-Andino. Los Andes Occidentales (antearco, arco o Cordillera Occidental [WC], Altiplano SW) se caracterizan por un acortamiento tectónico insignificante o ausente y una corteza que alcanza sus mayores espesores bajo el arco (Fig. 3), mientras que el acortamiento es evidente y sustancial en los Andes Orientales (Altiplano NE, Cordillera Oriental [EC], faja subandina). Este contraste implica que el engrosamiento cortical fue alcanzado por acreción magmática en los Andes Occidentales, y por acortamiento tectónico en los Andes Orientales. En el sur del Perú y oeste de Bolivia, el límite entre Andes magnéticos y Andes tectónicos es marcado por el sistema de fallas Urcos-Ayaviri-Copacabana-Coniri fault system (SFUACC), que es de escala litosférica, pero podría ser transicionales en otras regiones. El patrón rayado indica aproximadamente las áreas afectadas por un acortamiento cenozoico anterior a ~25 Ma.

En los Andes Occidentales, es decir al suroeste del SFUACC, las cuencas sinorogénicas se formaron en extensión o a lo largo de fallas transcurrentes. Por lo menos un *detachment* extensional de bajo ángulo, que pone conglomerados miocenos subverticales encima de una unidad cretácea, existe al oeste del Lago Titicaca (Sempere & Jacay, 2006). En ambos dominios del sur del Perú, fallamientos transcurrentes importantes, incluyendo deformación transpresional, se desarrollaron a lo largo de estructuras específicas. Sin embargo, estructuras transpresionales en el antearco y arco, tal como en la Cordillera de Domeyko (Norte de Chile), pueden sólo explicar una parte relativamente menor del acortamiento y engrosamiento cortical. En la ladera pacífica se observan fallas inversas con vergencia hacia el océano, que sugieren un colapso gravitacional incipiente de la Cordillera Occidental (Wörner & Seyfried, 2001; Wörner et al., 2002; Sempere & Jacay, 2006) y no un verdadero acortamiento regional.

UN ORIGEN MAGMÁTICO PARA LOS ANDES OCCIDENTALES

La ausencia de evidencias de superficie para un acortamiento significativo en los Andes Occidentales fue acomodada en algunas construcciones gráficas gracias a la suposición de duplexes corticales ciegos o la inserción, en la base de la corteza, de paneles corticales desplazados tectónicamente desde el margen occidental; sin embargo semejantes fenómenos no se han comprobado

hasta la fecha, son hipotéticos, y hasta son difícilmente posibles. El hecho que la orogenia fue acompañada por deformaciones extensionales y transcurrentes en los Andes Occidentales, y que deformaciones transpresionales no pueden generar un engrosamiento cortical de la amplitud observada (puesto que producen sólo un acortamiento localizado), implica que el paradigma isacksiano, es decir la suposición que la construcción orogénica de los Andes Centrales se hizo esencialmente por acortamiento tectónico, se tiene que poner en tela de juicio en el caso de los Andes Occidentales.

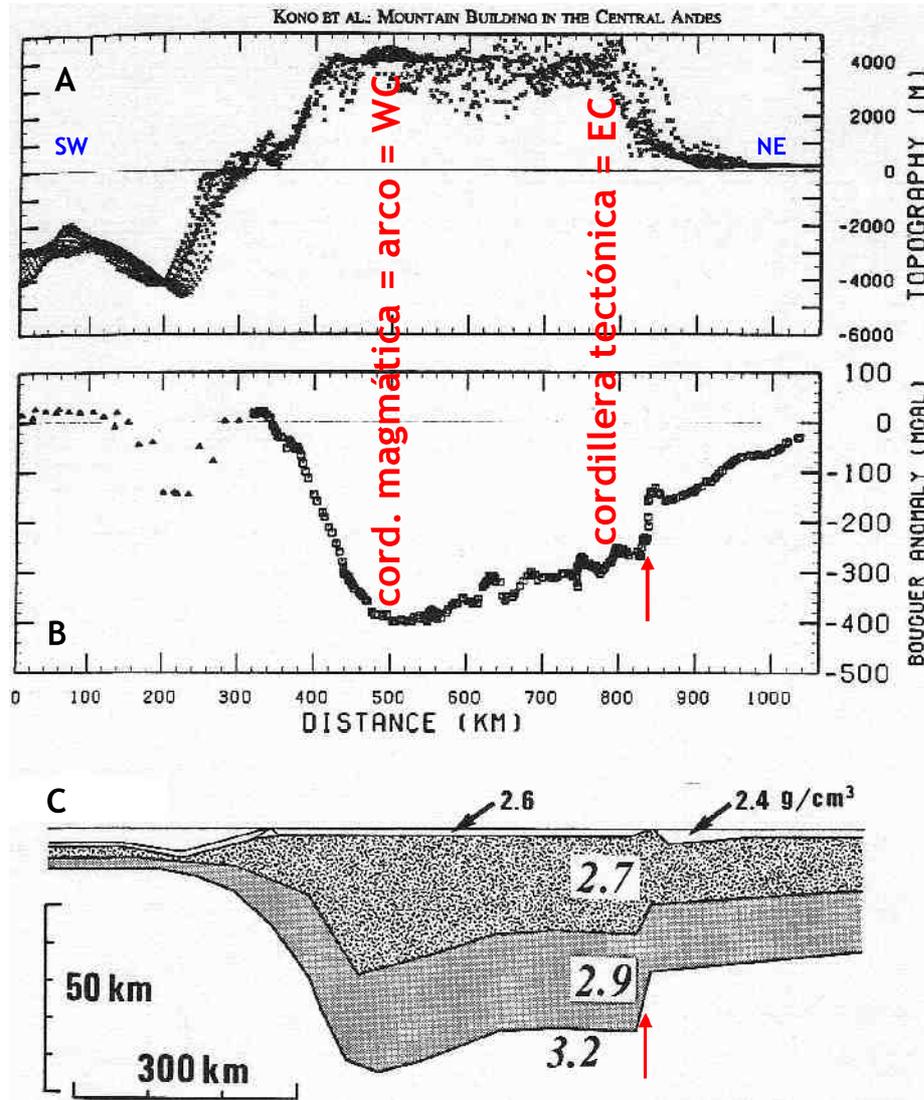


Figura 3. Topografía (A), anomalía de Bouguer (B), y distribución de densidades y espesores corticales (C) en el sur de Perú, según Kono et al. (1989). El espesor cortical alcanza su máximo bajo la cordillera magmática (el arco volcánico, es decir la Cordillera Occidental [WC]) y decrece hacia la Cordillera Oriental (EC) a través del Altiplano. El borde NE de la Cordillera Oriental, la cual es indiscutiblemente de origen tectónico, corresponde a una marcada “graba” subvertical en la estructura cortical (flechas rojas), evidenciando la existencia de un límite litosférico subvertical.

La clave de esta cuestión parece proveída por el hecho que en el sur del Perú la corteza es la más espesa bajo el arco (Fig. 3), como lo han demostrado estudios sísmicos y gravimétricos (James, 1971a; Kono et al., 1989). La ubicación del espesor cortical máximo en la región del arco apunta simplemente hacia el magmatismo como la causa del engrosamiento de la corteza en los Andes Occidentales, corroborando anteriores interpretaciones similares (e.g., James, 1971b; Thorpe et al.,

1981; Kono et al., 1989; Schmitz, 1994; James & Sacks, 1999), las cuales desafortunadamente se han descuidado.

La idea que la corteza del arco ha sido engrosada principalmente por transferencia magmática de materia desde el manto (en varias etapas, por supuesto) es reforzada por el hecho que las características isotópicas de la mayoría de los magmas andinos indican que éstos consisten esencialmente de materia extraída del manto (e.g., Pitcher et al., 1985). Además, se entiende ahora que el magmatismo de tipo I, un rasgo típico de los batolitos del arco andino (Pitcher et al., 1985), resulta del retrabajo de materiales corticales por magmas procedentes del manto, y hasta se considera que controla el crecimiento y la diferenciación conjunta de la corteza continental (Kemp et al., 2007). Se sabe ahora que las tasas de crecimiento cortical en los arcos de subducción son por lo menos de 40 a 95 km³/km.Myr (e.g., Tatsumi & Stern, 2006), es decir al menos dos veces las tasas estimadas por Reymer & Schubert (1984), quienes sin embargo ya mencionaban algunos casos de tasas de crecimiento cortical tan elevadas como ~300 km³/km.Myr. Los volúmenes de rocas volcánicas derramadas en la superficie fueron invocados para descartar que adiciones magmáticas habían sido una causa significativa del engrosamiento cortical, pero estimaciones actualizadas están mucho por encima y ahora autorizan esta hipótesis (de Silva & Gosnold, 2007); además, no existen datos seguros en cuanto a la proporción de los volúmenes volcánicos relativamente a los volúmenes magmáticos totales, y esta proporción podría bien ser muy baja en el caso de cortezas espesas.

CONCLUSIÓN

La revisión de la estructura geológica del sur del Perú está confirmando que el acortamiento tectónico ha sido insignificante al suroeste del sistema de fallas SFUACC, y por cierto no puede explicar el extraordinario engrosamiento cortical evidente en los Andes Occidentales. Los Andes Occidentales, que incluyen la región del arco, deben entonces haberse formado por acreción magmática, como ya lo sugería la abundante base de datos geoquímicos. En contraste con los Andes Orientales, que sí se originaron por acortamiento tectónico, los Andes Occidentales han sido construidos por procesos magmáticos, lo que confirma conclusiones anteriores lastimosamente descuidadas (e.g., James, 1971a,b; Kono et al., 1989; Schmitz, 1994; James and Sacks, 1999). Después de todo, en muchas partes del mundo, las zonas de subducción se describen como “fábricas de corteza continental” (e.g., Tatsumi & Stern, 2006). Dado que el magmatismo de subducción clásicamente se considera como la causa del crecimiento cortical continental y de la construcción orogénica en arcos tanto insulares como continentales (e.g., Tatsumi and Stern, 2006; Lee et al., 2007), no se vislumbra por qué los Andes tendrían que hacer excepción.

REFERENCIAS

- Carrier, G., Lorand, J.P., Liégeois, J.P., Fornari, M., Soler, P., Carlotto, V. & Cárdenas, J., 2005. Potassic-ultrapotassic mafic rocks delineate two lithospheric mantle blocks beneath the southern Peruvian Altiplano. *Geology*, vol. 33, p. 601-604.
- de Silva, S.L. & Gosnold, W.D., 2007. Episodic construction of batholiths: Insights from the spatiotemporal development of an ignimbrite flare-up. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 167, p. 320-335.
- Dorbath, C., Granet, M., Poupinet, G. & Martínez, C., 1993. A teleseismic study of the Altiplano and the Eastern Cordillera in northern Bolivia: New constraints on a lithospheric model. *Journal of Geophysical Research*, vol. 98, p. 9825-9844.
- Finch, E., Hardy, S. & Gawthorpe, R., 2004. Discrete-element modelling of extensional fault propagation folding above rigid basement fault blocks. *Basin Research*, vol. 16, p. 489-506.
- Haschke, M. & Günther, A., 2003. Balancing crustal thickening in arcs by tectonic vs. magmatic means. *Geology*, vol. 31, p. 933-936.
- Isacks, B.L., 1988. Uplift of the central Andean plateau and bending of the Bolivian orocline. *Journal of Geophysical Research*, vol. 93, p. 3211-3231.
- James, D.E. 1971a. Andean crust and upper mantle structure. *Journal of Geophysical Research*, vol. 76, p. 3246-3271.
- James, D.E. 1971b. Plate tectonic model for the evolution of the Central Andes. *Geological Society of America Bulletin*, vol. 82, p. 3325-3346.

- James, D.E. & Sacks, I. S. 1999. Cenozoic formation of the Central Andes: A geophysical perspective. In *Geology and Ore Deposits of the Central Andes* (ed. Skinner, B. J.), Society of Economic Geologists, Special Publication, vol. 7, p. 1-25.
- Kemp, A.I.S., Hawkesworth, C.J., Foster, G.L., Paterson, B.A., Woodhead, J.D., Hergt, J.M., Gray, C.M., Whitehouse, M.J., 2007. Magmatic and crustal differentiation history of granitic rocks from Hf-O isotopes in zircon. *Science*, vol. 315, p. 980-983.
- Kono, M., Fukao, Y., & Yamamoto, A. 1989. Mountain building in the Central Andes. *Journal of Geophysical Research*, vol. 94, p. 3891-3905.
- Kuhn, T.S., 1962. *The Structure of Scientific Revolutions*. The University of Chicago Press, p. 172.
- Lee, C.-T.A., Morton, D.M., Kistler, R.W., Baird, A.K., 2007. Petrology and tectonics of Phanerozoic continent formation: From island arcs to accretion and continental arc magmatism. *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 263, p. 370-387.
- Pitcher, W.S., Atherton, M.P., Cobbing, E.J., Beckinsale, R.D. (Eds), 1985. *Magmatism at a Plate Edge: The Peruvian Andes*. Glasgow: Blackie / New York: Halsted Press, p. 323.
- Reymer, A., Schubert, G., 1984. Phanerozoic addition rates to the continental crust and crustal growth. *Tectonics*, vol. 3, p. 63-77.
- Schmitz, M., 1994. A balanced model of the southern Central Andes. *Tectonics*, vol. 13, p. 484-492.
- Sempere, T., 2000. Discussion of "Sediment accumulation on top of the Andean orogenic wedge: Oligocene to late Miocene basins of the eastern Cordillera, southern Bolivia" (Horton, 1998). *Geol. Society of America Bulletin*, vol. 112, p. 1752-1755.
- Sempere, T., & Jacay, J. 2006. Estructura tectónica del sur del Perú (antearco, arco, y Altiplano suroccidental). Extended abstract, XIII Congreso Peruano de Geología, Lima, p. 324-327.
- Sempere, T., & Jacay, J. 2007. Synorogenic extensional tectonics in the forearc, arc and southwest Altiplano of southern Peru. *Eos Trans. AGU*, vol. 88, n° 23, Joint Assembly Suppl., Abstract U51B-04.
- Sempere, T., Jacay, J., Carlotto, V., Martínez, W., Bedoya, C., Fornari, M., Roperch, P., Acosta, H., Acosta, J., Cerpa, L., Flores, A., Ibarra, I., Latorre, O., Mamani, M., Meza, P., Odonne, F., Orós, Y., Pino, A., Rodríguez R., 2004. Sistemas transcurrentes de escala litosférica en el sur del Perú. In: J. Jacay, T. Sempere (Eds.), *Nuevas contribuciones del IRD y sus contrapartes al conocimiento geológico del sur del Perú*. Sociedad Geológica del Perú, *Publicación Especial*, vol. 5, p. 105-110.
- Sempere, T., Folguera, A., & Gerbault, M. (eds.). 2008. *New insights into the Andean evolution: An introduction to contributions from the 6th ISAG symposium (Barcelona, 2005)*. *Tectonophysics*, en prensa.
- Tatsumi, Y., Stern, R.J., 2006. Manufacturing continental crust in the subduction factory. *Oceanography*, vol. 19, p. 104-112.
- Thorpe, R.S., Francis, P.W., & Harmon, R.S. 1981. Andean andesites and crustal growth. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A*, vol. 301, p. 305-320.
- Wörner, G., Seyfried, H., 2001. Reply to the comment by M. García and G. Hérail on "Geochronology (Ar-Ar, K-Ar and He-exposure ages) of Cenozoic magmatic rocks from northern Chile (18-22°S): Implications for magmatism and tectonic evolution of the central Andes" by Wörner et al. 2000. *Revista Geológica de Chile*, vol. 28, p. 131-137.
- Wörner, G., Uhlig, D., Kohler, I. & Seyfried, H., 2002. Evolution of the west Andean scarpment at 18°S (N. Chile) during the last 25 Ma: Uplift, erosion and collapse through time. *Tectonophysics*, vol. 345, p. 183-198.