

# Contribuciones recientes al conocimiento del Cuaternario marino del centro y del norte de Chile

ROLAND PASKOFF

Departamento de Geografía, Universidad Lumiere, Lyon, Francia

## RESUMEN

*El artículo tiene como meta hacer un balance de los conocimientos actuales sobre el Cuaternario marino del centro y el norte de Chile donde existen notables secuencias de terrazas litorales escalonadas. En la determinación de las edades de estas plataformas se usaron métodos radiométricos y biogeoquímicos (U/Th, ESR, aminoácidos), los que a menudo no han resultados coherentes. Por lo tanto, es todavía difícil cuantificar con precisión la amplitud y la velocidad de los movimientos verticales que han desnivelado las antiguas orillas del mar durante el Cuaternario.*

## ABSTRACT

*The aim of the paper is to evaluate our present knowledge on the marine Quaternary of north-central Chile where striking sequences of emerged terraces are found. In order to establish ages of wave-cut platforms, radiometric and biogeochemical methods, such as U/Th, ESR, and amino-acids, have been used, which often did not yield coherent results. Therefore, it is still difficult to precisely quantify values and rates of uplift which have affected Quaternary shorelines.*

## INTRODUCCION

En la década de los años sesenta, el Cuaternario marino de Chile centro-norte fue el objeto de investigaciones detalladas tanto desde un punto de vista paleontológico (Herm, 1969) como morfoestratigráfico (Paskoff, 1970). Dos hechos explican la reanudación de los estudios sobre el tema en los diez últimos años: la aparición de nuevos métodos geocronológicos como también el interés sobre las deformaciones tectónicas recientes, registradas por las terrazas litorales emergidas que se localizan en las zonas de subducción de placas. En este contexto, la finalidad de este artículo es revisar los progresos que se han conseguido en la materia.

## LA DIVISION CLASICA DEL CUATERNARIO MARINO

Una división del Cuaternario marino de Chile centro-norte fue propuesta en 1967 por Herm y Paskoff. Ella se apoyó sobre una investigación detallada - geomorfológica, estratigráfica, sedimentológica y paleontológica- del conjunto de terrazas litorales escalonadas que rodean la bahía de Coquimbo (29°50'S) y la pequeña bahía de La Herradura que se encuentra inmediatamente al sur (Paskoff, 1972). Esta cronoestratigrafía fue gene-

ralizada y aplicada a toda la costa del Norte Chico y del Norte Grande (figura 1).

Hasta entonces la explicación de la existencia de las terrazas marinas emergidas era exclusivamente tectónica. Darwin (1846), impresionado por la extensión, la regularidad y la riqueza fosilífera de las plataformas escalonadas de los alrededores de la ciudad de La Serena, en la bahía de Coquimbo, atribuyó su presencia a la erosión marina durante períodos de detención del solevantamiento del continente. Una idea semejante fue expresada por Domeyko (1848), autor de un estudio geológico del lugar. Hasta la mitad de este siglo prevaleció la opinión de Brüggén (1929; 1950) que pensaba que las terrazas marinas del centro y del norte de Chile eran el producto de una alternancia de solevantamientos y de hundimientos del borde continental durante el Cuaternario, con un predominio de los primeros sobre los segundos.

Herm y Paskoff (1967) introdujeron por primera vez el concepto de glacio-eustatismo en la génesis de las terrazas litorales. Se les atribuyó fundamentalmente a la acción abrasiva de las sucesivas transgresiones que se habían producido durante el Cuaternario en fase con las épocas interglaciales. Este enfoque nuevo permitió una clasificación cronológica de las formas y de los depósitos marinos atribuidos a aquella época. De esta manera, el Pleistoceno fue dividido en cuatro

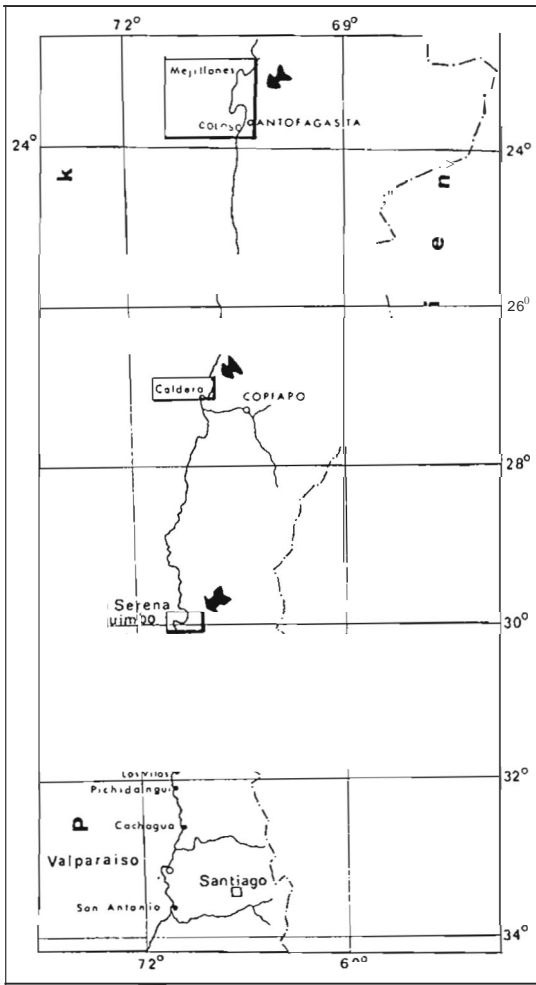


Figura 1: Mapa de localización de las terrazas litorales emergidas que han sido estudiadas en detalle en la costa del centro y del norte de Chile.

estadios: Herradura II, Herradura I, Serena II y Serena I, desde el más reciente al más antiguo. Se correlacionó el Herradura II con el último interglacial (Sangamon de la terminología norteamericana o Eemiano de la terminología europea), el Herradura I con el Pleistoceno medio, los Serena II y I con el Pleistoceno antiguo. A partir de evidencias arqueológicas confirmadas por dataciones absolutas arrojadas por el método del  $^{14}\text{C}$ , la terraza más baja, llamada nivel de la Vega, fue atribuida al Holoceno. Sin embargo, argumentos geomorfológicos hicieron pensar que la transgresión postglacial solamente reocupó una terraza que había sido labrada durante un episodio previo -llamado estadio de Cachagua- correspondiente a una transgresión inierestadial, acaecida durante la última época glacial, alrededor de 30.000 años antes del presente, la que se acercó del actual nivel del mar sin alcanzarlo (foto 1).

Conviene recordar cuál era la coyuntura propia de las ciencias de la Tierra cuando se elaboró esta clasificación en los años sesenta. La teoría de las placas que ha revolucionado nuestros conocimientos sobre la tectónica recién estaba emergiendo. Se consideraba en aquel entonces que solamente se habían producido cuatro a cinco grandes glaciaciones desde los fines del Plioceno. Todavía imperaba la idea de que durante el Cuaternario el nivel planetario del mar había bajado unos 100 m, de tal modo que las diferentes alturas "eustáticas" alcanzadas por cada transgresión se situaban hasta varias decenas de metros por encima de su posición actual. Se disponía en ese entonces de sólo un método radiocronológico, el  $^{14}\text{C}$ , que no entregaba resultados confiables por sobre los 25 ó 30.000 años.

#### NUEVOS ADELANTOS EN EL CONOCIMIENTO DEL CUATERNARIO MARINO

La datación de las terrazas litorales que acompañan la costa del centro y del norte de Chile y, por consiguiente, la elaboración de un marco cronoestratigráfico seguro para el Cuaternario marino de la región tiene como objetivo facilitar una correlación lateral entre los distintos remanentes de estas terrazas. Este tipo de investigación se justifica por la importancia de determinar la amplitud y la velocidad de los movimientos verticales que han desnivelado las antiguas orillas del mar en tiempos geológicos recientes, permitiendo el progreso de nuestros conocimientos sobre la geodinámica del borde continental de Chile.

El método cronológico tradicional de la geología basado en la paleontología no sirve para la datación relativa de las terrazas marinas en Chile. En efecto, el contenido faunístico de los depósitos correlativos a su formación no se diferencia de manera significativa de las asociaciones de moluscos que viven actualmente en la costa. Aparentemente, no hay cambios marcados en las condiciones térmicas de las aguas litorales entre un período interglacial y el otro. Sin embargo, recientemente, en la península de Mejillones (Ortlieb *et al.*, 1996b) y en las vecindades de Caldera (Marquardt, 1999) se identificaron, en un nivel de terraza, moluscos afines a aguas cálidas, como *Donax peruvianus* o *Trachycardium procerum*. Este tipo de fauna pertenece a la llamada provincia panameña cuyo límite meridional, en la costa pacífica de América del Sur, se encuentra hoy



*Fotografía 1:* Los Quinquelles (32°15'S), al sur de Pichidanguí. Vista de las más baja terraza marina y del acantilado muerto que la separa de la terraza correspondiente al último período interglacial (interestadio isotópico Se, hace 125 000 años). La terraza fue ocupada durante la culminación de la transgresión holocénica, hace 5 o 6.000 años. Sin embargo, fue probablemente labrada por una transgresión previa correspondiente al interestadio isotópico Sa (80 000 años) durante el cual el nivel del mar se acercó de su nivel actual sin alcanzarlo.

2.500 km más al norte. Se abre así una posibilidad de correlación para una de las terrazas marinas de la costa del centro y del norte de Chile.

Cabe recordar que el estudio del Cuaternario marino ha progresado ampliamente en las últimas décadas, merced a cambios conceptuales y a nuevos métodos geocronológicos, radiométricos y biogeoquímicos. Es así como se han identificado los llamados estadios isotópicos del oxígeno que caracterizan a las épocas glaciales e interglaciales acaecidas durante el Cuaternario, con un período de recurrencia de unos 10.000 años. Se admite que el nivel del mar nunca subió de manera significativa encima de su nivel actual durante las épocas interglaciales. La única excepción se relaciona con la transgresión que culminó hace alrededor de 125.000 años y que alcanzó probablemente una altura de unos 6 m por sobre su posición actual (figura 2). Tal situación en aquel entonces se explica tanto por una temperatura más alta del aire y de las aguas oceánicas superficiales como también por una menor extensión que la actual del casquete de hielo de la Antártica.

Para establecer la edad absoluta de los depósitos marinos asociados a las terrazas pleistocénicas existen hoy métodos como el UzTh, la resonancia electromagnética (ESR), la racemización de los aminoácidos y la termoluminiscencia. Excepto la última, estas técnicas han sido usadas para tratar de datar las terrazas de los alrededores de la bahía de Coquimbo, de Caldera y de Antofagasta. Todas ellas tienen limitaciones, de tal modo que los resultados conseguidos dejan un margen de incertidumbre y plantean interrogantes (Ortlieb *et al.*, 1996c).

La ausencia de corales en los depósitos de playa correlativos de la abrasión de las terrazas implica que las dataciones por el método urrh tienen que hacerse con conchas de moluscos. Muchos especialistas consideran este tipo de material como poco adecuado, pues arroja resultados que carecen de fiabilidad. De una manera general, los métodos radiométricos (U/Th, ESR) son limitados por las migraciones de los radionucleoides en las conchas de los moluscos durante la diagénesis. La racemización o la epimerización de aminoácidos constituye una técnica de data-

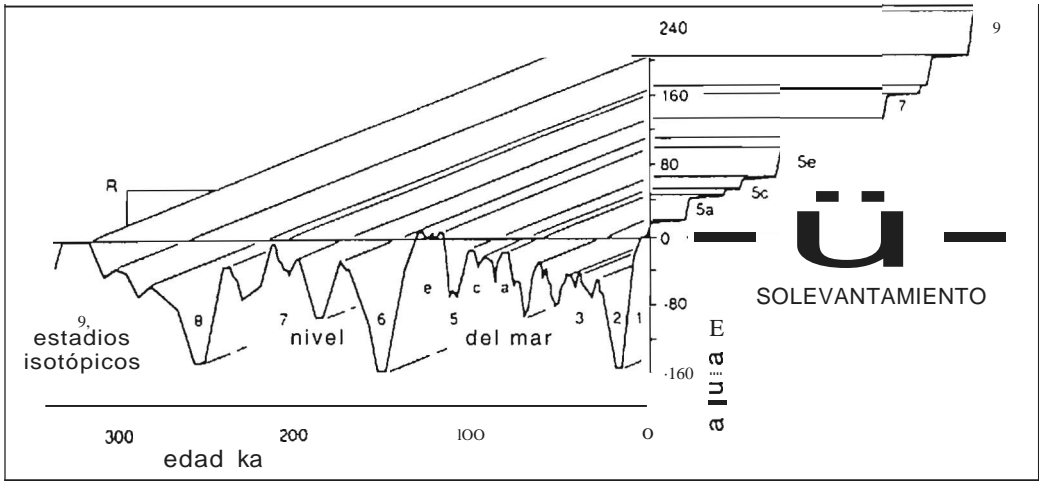


Figura 2: Relación entre las variaciones glacio-eustáticas del nivel del mar y la altura de las terrazas emergidas en una costa que se levanta. La pendiente ( $R$ ) de línea trazada entre el punto más alto alcanzado por una transgresión y la altura máxima de la terraza correspondiente expresa la velocidad de solevamiento. El diagrama supone una velocidad constante del solevamiento de la costa en el curso del tiempo, lo que es una visión teórica que no se verifica en los hechos (según Lajoie, 1986).

ción relativa que debe ser calibrada por un método cronológico independiente, propio a cada región del mundo. En Chile se ha usado un marco aminoestratigráfico, basado en un modelo cinético establecido en California, que a veces ha dado resultados incongruentes con los datos morfoestratigráficos (Hsu *et al.*, 1989). Todavía queda pendiente elaborar un modelo adaptado al país.

#### FECHAMIENTO DE LAS TERRAZAS LITORALES DE LA BAHIA DE COQUIMBO (29°50'S)

Las edades numéricas disponibles para las plataformas marinas de los alrededores de La Serena y de Coquimbo no son del todo claras (Radtke, 1989). Así lo muestran los resultados conseguidos con el uso de los métodos  $U^{Th}$  y ESR para el caso de las terrazas Herradura II y Herradura I en el margen de la bahía eponímica (figura 3). Las cifras obtenidas por un mismo método muestran una dispersión notable y no son coherentes con las obtenidas con el otro. Esta incongruencia puede explicarse por la imprecisión de las técnicas usadas y/o la contaminación del material datado. Se puede también sospechar que una misma terraza puede haber sido labrada por una transgresión y reocupada por la siguiente que se limitó a retocarla. Así, parece lógico pensar que la terraza Herradura II ha sido ocupada por la transgresión máxima de la última época interglacial (subestadio

isotópico 5e, hace 125.000 años), como ya se había supuesto antes. Sin embargo, la existencia de un material faunístico aparentemente más antiguo en los depósitos que cubren esta terraza hace pensar que haya sido labrada previamente por la transgresión correspondiente al estadio isotópico 7, o sea alrededor de 220.000 años. Del mismo modo, la terraza Herradura I que podría ser atribuida a la transgresión vinculada al estadio isotópico 9, de hace 330.000 años, y durante la cual se produjo un megatsunami que dejó enormes balones esparcidos en la superficie de la plataforma (Paskoff, 1991), bien hubiera podido ser labrada antes por la transgresión ligada al estadio isotópico 11, o sea 400.000 años. Si el fechamiento de la terraza Herradura II, atribuida al último período interglacial, es correcto, la velocidad de solevamiento del borde continental en los alrededores de la bahía de Coquimbo ha sido menor de 0,2 mil.000 años. Es una velocidad lenta que explica la reocupación recurrente de terrazas por transgresiones glaciales sucesivas, reocupación igualmente sugerida por las mediciones de aminoácidos (Leonard y Wehmiller, 1992). De este modo, la transgresión ligada al subestadio isotópico 5e subió lo suficiente como para rebasar y reocupar cualquier terraza vinculada con la transgresión anterior correspondiente al estadio isotópico 7.

En el mismo lugar, investigaciones recientes (Ota y Paskoff, 1993) han confirmado la ocupación de la terraza más baja (nivel de la Vega) por









Fotografía 2 : Caleta Coloso (23°45'5). Los depósitos de playa fosilíferos que afloran a 6 m por encima del nivel marino actual y que corresponden a la última época interglacial (interestadio isotópico 5e, 125 000 años) fueron cubiertos por materiales continentales, de unos diez metros de espesor, durante una fase de regresión del mar. Esta formación detrítica forma un cono de deyección que evidencia la ocurrencia de un período menos árido que el actual y que podría corresponder al estadio isotópico 2.

## CONSIDERACIONES FINALES

Algunas conclusiones de carácter general se desprenden de los datos actualmente disponibles acerca del Cuaternario marino del centro y del norte de Chile.

1. Las variaciones glacio-eustáticas del nivel del mar han sido el factor dominante en la génesis de las terrazas. Los movimientos de solevamiento han tenido solamente como efecto separar las terrazas formadas durante cada época interglacial.
2. A lo largo de la franja costera se individualizan segmentos independientes, cada uno caracterizado por su propia tendencia al solevamiento. Tal división refleja probablemente discontinuidades y diferentes modalidades (velocidad, pendiente) en la subducción de la placa de Nazca debajo de la placa de América del Sur (Paskoff, 1977).
3. En las costas del océano Pacífico occidental, donde también se producen fenómenos de subducción, arrecifes coralinos fueron alzados después del Plioceno hasta varias centenas de metros encima del nivel marino actual. No es el caso a lo largo de la costa del centro y del norte de Chile donde los solevamientos durante el Cuaternario han sido más moderados, con velocidades solamente del orden de 0,1 a 0,3 mll .000 años. Más aún, existen compartimentos que han sido poco solevados y hasta hundidos, como en el caso del segmento entre Iquique y Arica donde el gran acantilado costero cae directamente al mar y continúa retrocediendo bajo el efecto de la erosión marina.
4. Las velocidades de solevamiento han sido temporal y espacialmente variables, también irregulares tanto en amplitud como en frecuencia. Por lo tanto, estimar la edad de las terrazas altas basándose en la altura y la edad supuesta de la más baja y asumiendo una velocidad de solevamiento uniforme en el tiempo es erróneo.
5. Las velocidades reducidas de solevamiento explican los casos de reocupación de las terrazas ya que el solevamiento del borde costero entre las sucesivas transgresiones glacio-eustáticas ha sido insuficiente para poner a salvo una terraza formada durante una transgresión de la erosión desatada por la transgresión siguiente.
6. La existencia de fallas activas hasta el Holoceno es excepcional a lo largo de la costa de Chile del centro y del norte (Ota *et al.*, 1995).
7. Los movimientos de solevamiento son esencialmente asísmicos y graduales. Los casos de solevamientos o de hundimientos bruscos de gran amplitud, asociados con terremotos fuertes, no se conocen en esta parte de la costa de Chile, a diferencia de lo que se sabe para el sur del país, por ejemplo en la isla Mocha (38°22'S) donde, en 1835 y 1960, se registraron alzamientos hasta 0,6 m y 1,8 m respectivamente (Nelson y Manley, 1992).
8. Las dataciones absolutas de las terrazas marinas siguen en tela de juicio ya que los instrumentos geocronológicos aplicados a moluscos entregan resultados discutibles. Por lo tanto, el fechamiento de las plataformas anteriores al último período interglacial está aún dentro del campo de la especulación. Se pueden considerar solamente como establecidas la sumersión de la terraza más baja cuando el término de la

transgresión postglacial, hace 5 ó 6.000 años, y la ocupación por el mar de la terraza inmediatamente más alta durante la culminación de la transgresión correspondiente a la última época interglacial (interestadio isotópico 5e, de 125.000 años).

9. Los estudios morfoestratigráficos, basados sobre observaciones de terreno, interpretación de fotografías aéreas y levantamientos cartográficos, todavía siguen entregando los datos más sólidos para el establecimiento de correlaciones laterales entre remanentes de terrazas marinas escalonadas. Ellos constituyen la base más segura para proponer una división temporal de los eventos cuaternarios a lo largo de la costa de Chile del centro y del norte.

## AGRADECIMIENTOS

El autor desea manifestar su agradecimiento a su colega y amigo don Belisario Andrade J. que tuvo la gentileza de revisar la forma del artículo.

## BIBLIOGRAFIA

- BRÜGGEN, I. (1929): *Texto de geología*, El Globo, Santiago.
- BRÜGGEN, J. (1950): *Fundamentos de la geología de Chile*, Instituto Geográfico Militar, Santiago.
- DARWIN, CH. (1846): *Geological observations on South Am érica*, Smith, Elder and Co, Londres.
- DOMEYKO, I. (1848): Mémoire sur le terrain tertiaire et les lignes d'ancien niveau de l'Océan du sud, aux environs de Coquimbo (Chili), *Anuales des Mines*, 14, 153-162.
- HERM, D. (1969): Marines Pliozan und Pleistozan in Nord- und Mittel-Chile unter besonderer Berücksichtigung der Entwicklung der Mollusken-Faunen, *Ziti eliana*, 2, 1-159.
- HERM, D. Y.R. PASKOFF (1967): Vorschlag zur Gliederung des marinen Quartars in Nord- und Miel-Chile, *N. Ib. Min. Geol. Paliont. Mh.*, 10, 577-588.
- HSU, J.T., E.M. LEONARD y J.F. WEHMILLER (1989): Am inostratigraphy of Peruvian and Chilean Quaternary marine terraces, *Quaternary Science Review*, 8, 255-262.
- LAJOIE, K.R. (1986): Coastal tectonics, *Active tectonics*, R.E. Wallace edit., National Academy Press, Washington, 95-124.
- LEONARD, E.M. y J.F. WEHMILLER (1992): Low uplift rates and terrace reoccupation inferred from mollusk arninostratigraphy, Coquimbo Bay area, Chile, *Quaternary Research*, 38, 246-259.
- MARQUARDT, C. (1999): *Neotect álca de la franja costera y aportes a la geología regional entre Caldera y caleta Pajonales (27°00'-27°45')*, III Regi ón de Atacama, Chile, tesis de magistrado, Departamento de Geología, Universidad de Chile, Santiago.
- NELSON, A.R. y W.F. MANLEY (1992): Holocene coseismic and aseismic uplift of Isla Mocha, south-central Chile, *Quaternary International*, 15/16, 61-76.
- ORTLIEB, L., CON LA COLABORACION DE J.L. GOY, C. ZAZO, CL. HILLAIRE-MARCEL y G. VARGAS (1995): *Late Quaternary coastal change in northern Chile*. IGCP Project 367, ORSTOM, Santiago.
- ORTLIEB, L., S. BARRIENTOS y N. GUZMAN (1996a): Coseismic coastal uplift and coralline algae record in northern Chile: the 1995 Antofagasta earthquake case, *Quaternary Science Reviews*, 15, 949-960.
- ORTLIEB, L., A. DIAZ y N. GUZMAN (1996b): A warm interglacial episode during oxygen isotope stage II in northern Chile, *Quaternary Science Reviews*, 15, 857-871.
- ORTLIEB, L., C. ZAZO, J.L. GOY, C. HILLAIRE-MARCEL, B. GHALEB Y L. COURNOYER (1996c): Coastal deformation and sea-level changes in the northern Chile subduction area (23° S) during the last 330 ky, *Quaternary Science Reviews*, 15, 819-831.
- OTA, Y. Y R. PASKOFF (1993): Holocene deposits on the coast of north-central Chile: radiocarbon ages and implications for coastal changes. *Revista Geológica de Chile*, 20, 25-32.
- OTA, Y., T. MIYAUCHI, R. PASKOFF y M. KOBAYASHI (1995): Plio-Quaternary marine terraces and their deformation along the Altos de Talinay, north-central Chile, *Revista Geológica de Chile*, 22.
- PASKOFF, R. (1970): *Le Chili semi-aride, recherches géomorphologiques*, Biscaye, Bordeaux.
- PASKOFF, R. (1972): Morphogenese quaternaire aux alentours de l'embouchure du rio Elqui (province de Coquimbo, Chili): *Photo-interpretation*, 4, 1-7.
- PASKOFF, R. (1973): Radiocarbon dating of marine shells taken from the north and central coast of Chile, *Abstracts IX INOVA International Congress*, New Zealand, 281-282.
- PASKOFF R. (1977): The Quaternary of Chile: the state of research, *Quaternary Research*, 8, 2-31.
- PASKOFF, R. (1991): Likely occurrence of a megatsunami in the middle Pleistocene, near Coquimbo, Chile, *Revista Geológica de Chile*, 18, 87-91.
- PASKOFF, R., CON LA COLABORACION DE E.M. LEONARD, L.E. NOVOA, L. ORTLIEB, U. RADTKE y I.F. WEHMILLER (1995): *Field meeting in the La Serena-Coquimbo Bay area*, IGCP Project 367, ORSTOM, Santiago.
- RADTKE, U. (1989): Marine Terrassen und Korallenriffe. Das Problem der quartären Meeresspiegelschwankungen erläutert an Fallstudien aus Chile, Argentinien und Barbados. *Düsseldorfer Geographische Schriften*, 27, 1-246.