

Sedimentary and tectonic evolution of the Cenozoic Chaco foreland basin, southern Bolivia

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades
im Fachbereich Geowissenschaften
an der
Freien Universität Berlin

vorgelegt von:
Carola Hulka

Erstgutachter:
Prof. Dr. Christoph Heubeck

Zweitgutachter:
PD Dr. Ekkehard Scheuber

Tag der Disputation:
11.11.2005

Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die anderen Werken wörtlich und inhaltlich entnommen sind, wurden durch entsprechende Angaben der Quellen kenntlich gemacht.

Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Berlin, 11.11.2005

Abstract

The development of the Andes reflects the interaction of several processes, which in turn were triggered by the subduction of the oceanic Nazca plate along the South American plate margin. The principal processes include magmatism on the South American continent, thickening of the crust by shortening, and climate change. Shortening along the eastern flank of the Central Andes led to the development of a fold-thrust belt and a related retroarc foreland basin. In southern Bolivia, the fold-thrust belt consists of an internal zone (the Eastern Cordillera), an external zone (the Subandean Belt), and a transition zone (the Interandean). Eastward of this fold-thrust belt adjoins the flat plain of the Chaco, which forms the recent retroarc foreland basin of the Central Andes.

The Chaco Basin forms an ideal natural laboratory to study the effects of orogenic processes relating to foreland basin development. The study area encompasses the Subandean Belt and the Chaco Basin in southern Bolivia between 18°-22° S.

The Cenozoic sediments of the Subandean fold-thrust belt and the Chaco foreland basin reach up to 7500 m in thickness and are composed of five distinct formations:

1. The basal Petaca Formation is composed (from the base to the top) of calcretes, reworked pedogenic clasts, and fluvial sandstones interbedded with mudstones. The sandstones of the Petaca Fm are quartz-rich and show east-to-west-directed paleocurrents, suggesting extensive recycling or highly abrasive processes acting on rocks of continental provenance. The upper part of the Petaca Formation was deposited along the western flank of the forebulge whereas its lower part represents depozones located on the forebulge.
2. The Yecua Formation overlies the Petaca Formation. In the northern part of the Chaco Basin, the Yecua Formation consists of vary-colored mudstones, thin-bedded coarse-grained sandstones, marl with shell hash and ooids, and thinly interbedded mudstone-sandstone couplets. The lithologies denote a coastal environment with humid to semi-arid floodplains, shorelines, tidal areas and restricted shallow-marine environments. Sandstones are very quartz-rich and reflect north-to-south paleocurrents, indicating cratonic source rocks. In the southern part of the foreland basin, the Yecua Formation consists of mudstones interbedded with thin sandstone beds, suggesting a floodplain and overbank depositional environment. The lithologies of the Yecua Formation represent a wetland environment, probably located in a very distal foredeep.
3. The Tariquia Formation overlies the Yecua Formation and contains sandstones and mudstones, in which the thickness of the sandstone increases stratigraphically upwards at the expense of the mudstone. Sandstones show decreasing quartz content with respect to the underlying strata, indicating a provenance change from cratonic and continental provenance to a quartzose recycled orogen provenance, with paleocurrents directed west-to-east. The depozone of the Tariquia Formation corresponds to a central foredeep.

4. The Guandacay Formation overlies the Tariquia Formation and consists of thick sandstone and subordinate mudstone. The sandstone includes a significant amount of granules and cobbles. The sandstones of the Guandacay Formation carry a considerable amount of lithic fragments and feldspar, reflecting a quartzose recycled-orogen provenance. West-to-east directed paleocurrents confirm an orogen provenance. The Guandacay Formation corresponds to a proximal foredeep depozone.
5. The youngest unit of the foreland basin fill, the Emborozú Formation is composed of thick, well-rounded cobble- to boulder conglomerates and thick-bedded sandstone. Sandstone petrography shows a high content of lithic fragments and feldspar, representing a quartzose to lithic recycled orogen provenance. West-to-east directed paleocurrents confirm a very proximal orogen provenance. The Emborozú Formation was deposited in a wedge-top depozone.

A biostratigraphic study of ostracodes and foraminifera, which occur in the Yecua Formation in the northern Chaco Basin, yield a shallow-marine depositional environment. However, isotope ratios (strontium, oxygen, and carbon) of these microfossils suggest a water system that mainly consisted of cratonic water runoff and subordinate Andean water runoff. The isotopic compositions within the shells of marine species indicate a very short-lived shallow-marine incursion into a lacustrine environment or wetland located between the backarc of the central Andes and the Brazilian Shield.

Radiometric age dates, biostratigraphy, and lithostratigraphy of the Cenozoic foreland basin formations indicate a strongly diachronous age of the aforementioned, largely lithostratigraphically defined formations. The age of deposition for each formation decreases to the east and south. The eastward-decreasing age of the Cenozoic formations is a function of the eastward propagation of the deformation front since the Oligocene. The southward-decreasing age of each formation depends on the distinct and oblique eastward propagation of the deformation front between 17° and 23° S. The deformation front propagated in the north earlier into the Interandean and Subandean region than in the south, which resulted in significantly older depositional ages for identical lithofacies in the north.

Zusammenfassung

Die Entwicklung der Anden wurde durch verschiedene Prozesse beeinflusst, die wiederum ausgelöst wurden durch die Subduktion der ozeanischen Nazca Platte entlang des südamerikanischen Kontinentalrandes. Als wichtigste Faktoren gelten der Magmatismus innerhalb des südamerikanischen Kontinents, Verdickung der Kruste durch Verkürzungsprozesse und klimatische Bedingungen. Verkürzungsprozesse entlang der Ostflanke der Zentralen Anden führten zur Bildung von Falten- und Überschiebungsgürteln sowie einem Vorlandbecken-System. In Südbolivien umfasst der Falten- und Überschiebungsgürtel einen internen Teil (die östliche Ostkordillere), einen externen Teil (das Subandin) und eine Übergangzone zwischen Ostkordillere und Subandin (das Interandin). Östlich des Überschiebungsgürtels schließt sich in Südbolivien das Tiefland des Chaco-Beckens an, welches das rezente Vorlandbecken der zentralen Anden bildet.

Die Bildung des Vorlandbeckens steht im direkten Zusammenhang mit geologischen Prozessen, die zur Bildung des Falten- und Überschiebungsgürtel der Anden geführt haben. Damit bietet das Tiefland des Chaco ein ideales natürliches Labor, um die Einfluss dieser Prozesse auf das Vorland zu studieren. Das Untersuchungsgebiet beinhaltet das Subandin und den Chaco in Südbolivien zwischen 18°-22° S.

Die känozoischen Sedimente des Chaco Vorlandbeckens sind bis zu 7500 m mächtig und beinhalten Lithologien, die in fünf Formationen unterteilt werden:

1. Die Petaca Formation ist aufgebaut von der Basis bis zum Top aus Konkretionen in einer sandigen Matrix, konglomeratisch aufgearbeiteten Konkretionen und mächtigen Sandsteinen mit zwischengeschalteten Tonsteinen. Die Sandsteine der Petaca Formation sind quarzreich, weisen Ost-nach-West gerichtete Fließrichtung auf und zeigen einen hohen Grad an Aufbereitungs- und Abtragungsprozessen. Die sedimentpetrologischen Untersuchungen des oberen Teils der Petaca Formation deuten auf einen Ablagerungsraum an der westlichen Flanke des *forebulge*, wohingegen der untere Teil der Petaca Formation vermutlich auf dem *forebulge* abgelagert wurde.
2. Überlagert wird die Petaca Formation von der Yecua Formation. Sie besteht im nördlichen Teil des Chaco Vorlandbeckens aus bunten Tonstein, wechselgelagert mit dünnbankigem, grobkörnigem Sandstein; Skelettfragment- und Ooid-führendem Mergel und dünnbankigen Ton-Sandstein-Schichten. Diese Lithologien und Strukturen deuten auf eine küstennahe Umgebung hin, einschließlich Überschwemmungs-, Strand-, Tiden-, und flachmariner Fazies. Die Sandsteine der Yecua Formation sind sehr quarzreich und weisen eine Nord-nach-Süd gerichtete Transportrichtung aus einem kratonischem Liefergebiet auf. Im Süden des Subandin und des Chaco besteht die Yecua Formation aus mächtigen Tonsteinen und zwischengeschalteten Sandsteinen. Die Lithologien der Yecua Formation im Süden entsprechen einer Überschwemmungsfazies ohne Hinweis auf küstennahe Umgebung. Die Fazien im Norden und Süden deuten auf ein Ablagerungsmilieu in einem Feuchtgebiet hin, wahrscheinlich im distalen *foredeep* des Chaco Vorlandbeckens.

3. Die Tariquia Formation, welche die Yecua Formation überlagert, besteht aus Sandsteinen und Tonsteinen, wobei der Anteil des Sandsteins deutlich überwiegt und ins stratigraphisch jüngere weiter zunimmt. Petrologische Untersuchungen der Sandsteine zeigen im Vergleich zur Petaca und Yecua Formation abnehmenden Quarzanteil auf, mit West-nach-Ost gerichteter Transportrichtung. Dadurch wird eine Veränderung des Liefergebietes von Kontinent- hin zu quarzreichem Orogen-Liefergebiet angedeutet. Die Ablagerung fand in der zentralen *foredeep* Zone statt.
4. Die Guandacay Formation überlagert die Tariquia Formation und besteht vorwiegend aus mächtigen Sandsteinbänken und zwischengelagerten Tonsteinen. Die Sandsteinbänke enthalten einen signifikanten Anteil von Mittel- und Grobkies und zeigen eine deutliche, West-nach-Ost gerichtete Transportrichtung auf. Sedimentpetrologische Messungen weisen darauf hin, dass es sich um quarzreiche Sandsteine mit hohem Anteil an Gesteinsfragmenten und Feldspäten handelt. Das Liefergebiet der Guandacay Formation entspricht einem quarzreichem Orogen im proximal Teil des *foredeep*.
5. Die jüngste Formation, die Emborozú Formation, ist aus mächtigen Konglomeratbänken (Grobkies bis Blöcke) und mächtigen Sandsteinbänken mit ostwärts gerichteter Transportrichtung aufgebaut. Petrologische Untersuchungen der Sandsteine deuten auf ein quarzarmes Gestein mit hohem Anteil von Feldspat und Gesteinsfragment. Als Liefergebiet gilt ein quarzreiches bis gesteinsfragment-reiches Orogen, dass in der *wedge-top* Zone abgelagert wurde.

Biostratigraphische Untersuchungen an Ostrakoden und Foraminiferen, welche im Norden des Untersuchungsgebietes in Tonsteinen und Mergeln der Yecua Formation abgelagert wurden, deuten ein flach-marines Milieu des mittleren bis spätem Miozän (14-7 Ma) an. Untersuchungen stabiler Isotope (Sauerstoff und Kohlenstoff) und Strontium-Isotope deuten allerdings an, dass die Schalen dieser Mikrofossilien von Frischwasser umgeben waren, welches aus kratonischem und andinen Flusssystemen gespeist wurde. Diese beiden widersprüchlichen Ergebnisse deuten einen Austausch von stabilen Isotopen der marinen Schalentiere an, das wiederum nur denkbar ist, wenn die marine Transgression sehr Kurzeit statt gefunden hat.

Radiometrische und biostratigraphische Altersbestimmungen der känozoischen Sedimente aus dem Subandin und dem Chaco deuten eine diachrone Ablagerung der fünf hauptsächlich lithostratigraphisch definierten und oben beschriebenen Formationen an. Ihr Ablagerungsalter verjüngt sich nach Osten und Südosten. Das ostwärts gerichtete Fortschreiten der Deformationsfront und somit die nach Osten fortschreitende Bildung des Falten- und Überschiebungsgürtel seit dem Oligozän spiegelt sich in den nach Osten jünger werdenden Formationen des Subandin und des Chacos wieder. Da die Bildung des internen Falten- und Überschiebungsgürtel im Norden (20° S) wesentlich früher einsetzte als im Süden (22° S), sind die Ablagerungsalter der fünf känozoischen Formationen im Subandin und im Chaco bei 22° S jünger als bei 20° S.

Resumen

Con 7500 km de longitud, la Cordillera de los Andes constituye la localidad tipo para una cadena montañosa desarrollada por la subducción de una placa oceánica bajo una placa continental. El desarrollo del orógeno ha estado condicionado por la subducción de la Placa de Nazca bajo el margen occidental de Sudamérica, el desarrollo de magmatismo en la Placa Sudamericana sobre esta zona de subducción, el engrosamiento cortical por acortamiento y el clima. El acortamiento a lo largo del margen oriental de los Andes Centrales condujo al desarrollo de un cinturón de plegamiento y cabalgamiento con vergencia hacia el oriente, así como al desarrollo de una cuenca de antepaís asociada. En el sur de Bolivia, este cinturón de plegamiento y cabalgamiento comprende una zona interna (la Cordillera Oriental), una zona externa (Cinturón Subandino) y una zona intermedia de transición (la Interandina). Hacia el oriente de este cinturón plegado yace el área plana poco deformada del Chaco, la cual forma la actual cuenca de antepaís en el retroarco de los Andes Centrales en el sur de Bolivia.

La Cuenca del Chaco constituye así un laboratorio natural ideal para estudiar los procesos orogénicos relacionados con desarrollo de la cuenca de antepaís de los Andes Centrales. El área del presente estudio comprende las zonas Subandina y el Chaco, en el sur de Bolivia, entre 18°-22° S.

El registro sedimentario del cinturón Subandino y la cuenca de antepaís del Chaco abarca alrededor de 7500 m y comprende cinco unidades litoestratigráficas:

1. La Formación Petaca está constituida por *calcretes*, clastos pedogénicos redepositados y intercalaciones de estratos de arenitas y lodolitas. Las arenitas de la Formación Petaca son cuarzosas, lo cual sugiere intenso reciclamiento o procesos de intensa abrasión desarrollados sobre rocas de proveniencia cratónica. De acuerdo con sus características sedimentológicas, el depósito de la parte inferior Formación Petaca ocurrió sobre el *forebulge*, mientras que la sedimentación de la parte superior de la unidad a lo largo su margen occidental.
2. Suprayace a la Formación Petaca la Formación Yecua hacia la parte norte de la Cuenca del Chaco. Consiste principalmente de lodolitas multicoloreadas, interpuestas con algunas capas delgadas de arenitas de grano grueso redondeado, niveles de capas delgadas interestratificadas de lodolitas y arenitas, y capas delgadas de lodolitas calcáreas fosilíferas con fragmentos de conchas y oóides. Las características sedimentológicas son indicativas de sedimentación bajo condiciones costeras y marinas someras, en llanuras de inundación húmedas a semi-áridas, playas y llanuras mareales. Las arenitas están compuestas principalmente de cuarzo y presentan proveniencia cratónica con dirección de paleoflujo hacia el sur. Hacia la parte sur de la cuenca, en cambio, la Formación Yecua presenta mayor proporción de facies lodolíticas, indicando predominio de sedimentación en llanuras de inundación. Tanto al norte como al sur del área de estudio, la Formación Yecua sugiere condiciones de sedimentación bajo climas húmedos, probablemente desarrollada en la zona deposicional *distal foredeep*.

3. La Formación Tariquía yace por encima de la Formación Yecua y está constituida por niveles interestratificados de arenitas y lodolitas, siendo la proporción de arenitas mayor a medida que se asciende estratigráficamente. La composición de las arenitas muestra decrecimiento en la contribución de cuarzo con respecto a fragmentos líticos y feldespatos, lo que se interpreta como producto de un continuo cambio de un área fuente cratónica a una orogénica. La Formación Tariquía se depositó en la zona deposicional *central foredeep*.
4. La Formación Guandacay suprayace a la Formación Tariquía y consiste principalmente de capas espesas de arenitas con menores intercalaciones lodolíticas. Las arenitas presentan una importante proporción de guijos y cantos. La composición cuarzosa de las arenitas, con una fracción considerable de fragmentos líticos y feldespatos, y los indicadores de paleocorriente con dirección de transporte hacia el oriente indican que los sedimentos fueron transportados desde un área fuente orogénica situada al occidente, hacia una zona deposicional de *proximal foredeep* dentro de la cuenca de antepaís.
5. La Formación Emborozú es la unidad más reciente dentro del registro sedimentario de la cuenca y está constituida por espesos niveles de conglomerados de cantos y bloques muy redondeados, y espesos bancos de arenitas. La petrografía de las arenitas muestra un alto contenido de fragmentos líticos y feldespatos, correspondiente a sedimentos provenientes de un área fuente orogénica, interpretación que es confirmada por los indicadores de paleocorriente que sugieren una fuente al occidente. La sedimentación de la Formación Emborozú ocurrió dentro de la zona deposicional *wedge-top*.

Estudios bioestratigráficos a partir de foraminíferos y ostrácodos presentes en la Formación Yecua en la parte norte del área de estudio indican un ambiente de depósito marino somero. Por otro lado, estudios de isótopos (estrónicio, oxígeno y carbono) en estos microfósiles sugieren que la sedimentación ocurrió en un sistema deposicional cuyas aguas eran aportadas por escorrentía principalmente desde un área cratónica, con menor contribución de áreas andinas. La composición isotópica de las conchas de organismos marinos indica igualmente la ocurrencia de una incursión marina muy esporádica dentro de un ámbito ante todo lacustre entre el retroarco de los Andes Centrales y el Escudo Brasileño.

Dataciones radiométricas, estudios de biostratigrafía y litostratigrafía de las unidades cenozoicas de la cuenca de antepaís andina sugieren diacronismo para las unidades descritas, definidas ante todo litostratigráficamente. Así, la edad de cada formación decrece cuanto más hacia el oriente y hacia el sur. En dirección oriental, una edad más joven para las unidades litoestratigráficas equivalentes se relaciona con la propagación hacia el oriente del frente de deformación andino desde el Oligoceno. Por otro lado, el decrecimiento de dichas edades hacia el sur es reflejo de la diferente temporalidad de la propagación en dirección oblicua del frente de deformación entre 17°-23° S: al norte, esta deformación se propagó antes que en el sur hacia la zona Interandina y Subandina, resultando en edades deposicionales mayores al norte para las unidades litoestratigráficas equivalentes.

Contents

PREAMBLE.....	1
1. INTRODUCTION	3
1.1 General geological setting	4
1.2 Objectives of this study.....	6
1.3 Database.....	7
2. SANDSTONE PETROLOGY AND PROVENANCE OF THE CHACO BASIN: RECORD OF FORELAND BASIN EVOLUTION AND ANDEAN UPLIFT	9
Abstract.....	9
2.1 Introduction.....	9
2.2 Cenozoic Chaco Basin stratigraphy	13
2.3 Potential provenance.....	15
2.4 Results.....	18
2.5 Discussion.....	23
2.6 Conclusions.....	29
Acknowledgments	29
3. DEPOSITIONAL SETTING OF THE MIDDLE TO LATE MIOCENE YECUA FORMATION OF THE CHACO FORELAND BASIN, SOUTHERN BOLIVIA.....	30
Abstract.....	30
3.1 Introduction.....	30
3.2 Regional Geology	31
3.3 Stratigraphy of the Cenozoic sediments within the Chaco Basin.....	33
3.4 Stratigraphy of the Yecua Formation.....	34
3.5 Lithofacies interpretation.....	41
3.6 Stratigraphic correlation	44
3.7 Discussion.....	45
3.8 Conclusions.....	50
Acknowledgements	50

4. AQUEOUS FINGERPRINTING OF THE MIDDLE TO LATE MIOCENE YECUA WETLAND ENVIRONMENT	51
Abstract	51
4.1 Introduction	51
4.2 Data and methods	51
4.3 Results	54
4.4 Discussion	55
4.5 Conclusions	59
Acknowledgements	60
5. AGE OF THE CENOZOIC CHACO FORELAND BASIN FILL BASED ON RADIOMETRIC DATING OF TUFFS	61
5.1 Introduction	61
5.2 Sample description	64
5.3 Methods	66
5.4 Results	68
5.5 Summary of the results	77
5.6 Discussion of the Cenozoic basin fill development	78
5.7 Conclusions	82
Acknowledgements	84
6. SUMMARY	85
6.1 Results	85
6.2 Open questions	88
REFERENCES	89
ACKNOWLEDGEMENTS	100
CURRICULUM VITAE	101

APPENDIX.....	1
Appendix A: Measured sections of the northern Chaco basin.....	1
Appendix B: Outcrop photographs	42
Appendix C: Sandstone point count data.....	54
Appendix D: Palynology sample location	62
Appendix E: Isotopic age data	63
Appendix F: Industry well data	69
Appendix G: Industry 2D-seismic data	76

