

Doctoral Thesis ETH No. 17023

**EVOLUTION OF THE WESTERN CORDILLERA
IN THE ANDES OF ECUADOR (LATE
CRETACEOUS-PALEOGENE)**

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZÜRICH
for the degree of
Doctor of Natural Sciences

presented by

CRISTIAN VALLEJO CRUZ

Ingeniero Geólogo, Escuela Politécnica Nacional, Quito

born on 01.02.1972

citizen of
Quito, Ecuador

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Wilfried Winkler	ETH Zürich	examiner
Dr. Richard Spikings	University of Geneva	co-examiner
Dr. John Aspden	British Geological Survey	co-examiner
Prof. Dr. Arturo Egüez	EPN Quito	co-examiner
Prof. Dr. Jean Pierre Burg	ETH Zürich	co-examiner

2007

ABSTRACT

The subduction of ocean floor at a convergent plate boundary can be regarded as approximating a steady-state process. Interruption or cessation of that process commonly follows the arrival of a buoyant object. Arcs and continents are the familiar kinds of buoyant objects involved in collisions. I here provide a detailed analysis of a less familiar kind of collision, that of an oceanic plateau.

The determination of accurate and precise ages for the timing of collision between oceanic plateaus and continental crust provides an understanding of how the indenting and buttressing plates respond to the collisional event. The volcanic basement of the Ecuadorian Western Cordillera (Pallatanga Formation and San Juan Unit) is made up of mafic and ultramafic rocks with oceanic plateau geochemical affinities. A SHRIMP crystallization age (zircon) of 87.1 ± 1.66 Ma (2σ) and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (hornblende) age of 84.69 ± 2.22 Ma (2σ) from an accreted fragment of the plateau, overlap with an $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age of 88 ± 1.6 Ma age obtained for oceanic plateau basement rocks of the Piñon Formation in coastal Ecuador (Luzieux et al., 2006), and a suite of ~ 92 – 88 Ma ages reported for oceanic plateau sequences in Colombia and the Caribbean region. These results are consistent with the idea that the oceanic plateau rocks of the Western Cordillera and coastal Ecuador are derived from the Late Cretaceous Caribbean Colombia Oceanic Plateau (CCOP).

Intraoceanic island arc sequences (Pujilí Granite, Rio Cala Group, Naranjal Unit) overlie the plateau and yield crystallization ages that range between ~ 85 – 72 Ma. The geochemistry and radiometric ages of lavas associated with the Rio Cala Arc, combined with the age range and geochemistry of their turbiditic, volcanoclastic products indicate that the arc initiated by westward subduction beneath the Caribbean Plateau, and are coeval with island arc rocks of coastal Ecuador (Las Orquideas, San Lorenzo and Cayo formations). These island arc units may be related to the Late Cretaceous Great Arc of the Caribbean.

Paleomagnetic analyses of volcanic rocks, of the Piñon and San Lorenzo formations of the southern external forearc (Luzieux, 2006), indicate their pre-collisional extrusion at equatorial or shallow southern latitudes. Furthermore, paleomagnetic declination data from basement and sedimentary cover rocks in the coastal region (Luzieux, 2007) indicate 20 – 50° of clockwise rotation during the Campanian, which was probably synchronous with the collision of the oceanic plateau and arc sequence with South America.

The initial collision between the South American Plate and the Caribbean Plateau was synchronous with accelerated surface uplift and exhumation (>1 km/my) within the buttressing continental margin during the Late Cretaceous (c. 75 – 65 Ma), in an area extending as far inland as the Eastern Cordillera. The rapid exhumation coincides with the deposition of continental siliciclastic material in both the fore- and backarc environments (Yunguilla and Tena formations respectively).

Collectively, this evidence shows that the initial collision between the Caribbean Plateau and the Ecuadorian margin occurred during the late Campanian–Maastrichtian (73–70 Ma), and resulted in plugging of the subduction zone, the termination of island arc magmatism, and deformation of the continental margin.

Magmatism associated with the Campanian–early Maastrichtian Rio Cala Arc, which erupted through the Pallatanga Formation, ceased during the Maastrichtian and was followed by the initiation of east-dipping subduction beneath the accreted oceanic plateau. The new active margin gave rise to the latest Maastrichtian (ca 65 Ma) Silante volcanic arc, which was deposited in a terrestrial environment.

During the Palaeocene to Eocene, marine conditions were dominant in the area now occupied by the Western Cordillera, and volcanic rocks of the Macuchi Unit were deposited, possibly as a temporal continuation of the Silante volcanic arc. This submarine volcanism was coeval with the deposition of siliciclastic rocks of the Angamarca Group, and the Saguangal Formation, which were mainly derived from the emerging Eastern Cordillera.

Finally, no evidence exists to support previous hypotheses that the Macuchi Arc accreted in the Late Eocene, causing structural inversion of the Angamarca Basin. It is geometrically difficult to suggest that the Macuchi Block accreted in the Late Eocene, and inserted itself between the Piñon and Pallatanga blocks, which accreted during the Late Cretaceous. Furthermore, volcanic rocks of the Macuchi Unit are found to be conformably overlain by turbidites of the Angamarca Group.

ZUSAMMENFASSUNG

Die Subduktion von Ozeankruste an einer konvergenten Plattengrenze kann als annähernd kontinuierlichen Prozess betrachtet werden. Die Unterbrechung dieses Vorganges wird im Allgemeinen durch die Ankunft eines isostatisch aufschwimmenden, schwer zu subduzierendes Objektes verursacht. Vulkanbögen und Kontinente sind typischerweise solche Elemente, welche sich der Subduktion entziehen. In der vorliegenden Arbeit wird eine ausführliche Analyse einer weniger üblichen Kollision einer ozeanischen Hochebene (Plateau) und ihren assoziiertem intraozeanischen Inselbögen vorgestellt, d.h. die Kollision des ozeanischen Pallatanga-Blockes mit dem nordwestlichen Kontinentalrand von Südamerika.

Die Ermittlung des genauen Zeitablaufes des Zusammenstosses zwischen dem ozeanischen Plateau/Arc-Komplexes mit kontinentaler Kruste liefert ein Verständnis dafür, wie die eindruckende ozeanische und die dagegen drückende kontinentale Platte bei der Kollision reagieren.

Der vulkanische Sockel der Westkordillere (Pallatanga Formation und San Juan Einheit) besteht aus mafischen und ultramafischen Gesteinen mit geochemischen Eigenschaften von ozeanischen Plateaus. Ein daraus gewonnenes U/Pb SHRIMP (Zirkon) Kristallisationsalter von 87.1 ± 1.66 Ma (2σ) und ein $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Alter (Hornblende) von 84.69 ± 2.22 Ma (2σ) decken sich mit: (1) einem $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Hornblendealter von 88 ± 1.6 Ma in mafischen Grundgebirgsgesteinen der Piñon Formation im küstennahen Forearc von Ecuador (Luzieux et al., 2006) und (2) einer Reihe von radiometrischen Datierungen von ähnlichen Gesteinen (~ 92 - 88 Ma) in der Westkordillere von Kolumbien und in der karibischen Region. Die chronostratigraphische und geochemische Korrelation legt nahe, dass die Vorkommen im ecuadorianischen Forearc vom spätkretazischen Caribbean Colombian Oceanic Plateau (CCOP) herkommen. Bekannte ozeanische Inselbogen-Bildungen (Pujilí Granit, Rio Cala Gruppe, Naranjal Einheit) überlagern die Plateau-Formationen und lieferten Kristallisationsalter zwischen ~ 85 - 72 Ma. Die Summe der geochemischen Resultate und radiometrischen Alter von Laven und assoziierten turbiditischen Sedimenten im Rio Cala Inselbogen zeigt, dass sie durch westgerichtete Subduktion unter das kolumbisch-karibische Plateau (CCOP) gebildet wurden. Sie haben damit einen gleichen Ursprung wie die Inselbogenformationen an der Küste von Ecuador (die Las Orquideas, San Lorenzo und Cayo Formationen), und alle können gleichermaßen mit vulkanischen Formationen der späten Kreide im Inselbogen der Grossen Antillen verglichen werden.

Paläomagnetische Analysen der vulkanischen Formationen in den Piñón- und San Lorenzo-Blöcken des südlichen äusseren Forearcs (Luzieux, 2007) beweisen, dass sie vor der Kollision in einer äquatorialen oder leicht südlichen Breiten ausgeflossen sind. Ausserdem zeigen paläomagnetische Deklinationsdaten vom Küstengebiet eine rechtssinnige Rotation der Blöcke von 20 - 50° um eine vertikale Achse an (Luzieux, 2007). Die Rotation erfolgte mit grösster Wahrscheinlichkeit während der Kollision des Plateau/Inselbogen-Komplexes, die anhand

biostratigraphischer Daten zeitlich mit dem späten Campanian-frühen Maastrichtian genau festgelegt werden kann.

Publizierte thermochronologische Analysen zeigen eine durch die Kollision verursachte schnelle Exhumierung ($>1\text{km/my}$) des Kontinentalrandes während der späten Kreide ($\sim 75\text{-}65\text{ Ma}$) an, die auch zeitlich mit dem Einsetzen der siliziklastischen Sedimentation im Forearc ihren Niederschlag findet (Yunguilla Formation, spätes Campanian-Maastrichtian). Die Kollision des karibischen Plateaus mit der südamerikanischen Platte äusserte sich im Speziellen auch in einer weit in den Kontinent hinein reichende Hebung und Exhumierung metamorpher Tiefengesteine in der Ostkordillere, wie es aus dem Detritus der altersgleichen Yunguilla Formation im Forearc bzw. der Tena Formation im Retroarc Foreland-Becken abgeleitet werden kann.

Der Magmatismus des Rio Cala Arcs (Campanian-frühes Maastrichtian), der durch die Pallatanga Formation stiess, versiegte während des Maastrichtians. Gleichzeitig richtete sich unter den im Forearc akkretionierten Plateau-Teilen eine ostgerichtete Subduktionszone ein. Über diesem neuen aktiven Kontinentalrand bildete sich ab dem späten Maastrichtian (ca 65 Ma) der terrestrische Silante-Vulkanbogen aus.

Während des Paleozäns und Eozäns herrschten im Bereich der späteren Westkordillere (dem inneren Forearc) marine Verhältnisse vor, wo sich auch die Vulkanite des Macuchi Arcs ergossen, wahrscheinlich als Nachfolger des Silante Arcs. Der submarine Vulkanismus ereignete sich zeitgleich mit der proximalen siliziklastischen turbiditischen Sedimentation der Angamarca Gruppe und der Saguangal Formation, welche von der aufsteigenden Ostkordillere geschüttet wurden.

Schlussendlich können in der vorliegenden Arbeit keine positiven Beweise erbracht werden, dass der Macuchi Arc erst im späten Eozän mit dem Kontinentalrand kollidiert sein soll, womit frühere Autoren die Inversion des Angamarca-Beckens erklärt haben. Es ist räumlich und zeitlich unvereinbar, dass sich der Macuchi Arc - nach der erwiesenermassen oberkretazischen kollektiven Kollision der Plateau- und intraozeanischen Inselbogen-Blöcke (e.g. Piñon, San Lorenzo, Pallatanga, Rio Cala) mit dem nordwestlichen Rand des südamerikanischen Kontinents - zwischen diese Blöcke geschoben habe. Im Gegenteil, die autochthone Stellung des Macuchi Arcs wird auch durch seine beobachtete normalstratigraphische Überlagerung durch die Angamarca Gruppe bestärkt.

RESUMEN

La subducción de corteza oceánica en un límite convergente de placa se puede mirar como un proceso continuo. La interrupción o la finalización de este proceso comúnmente se asocian a la llegada de un objeto boyante. Los arcos volcánicos y corteza continental son las clases de objetos comúnmente implicados en colisiones. En este trabajo, se proporciona un análisis detallado de una clase menos familiar de colisión, la de un plateau oceánico.

La determinación precisa de la colisión entre plateaus oceánicos y la corteza continental proporciona una comprensión de como las placas tectónicas responden a eventos colisionales.

El basamento volcánico de la Cordillera Occidental (Formación Pallatanga y Unidad San Juan) se compone de rocas máficas y ultramáficas con afinidades geoquímicas de plateau oceánico. Una edad de cristalización SHRIMP (zircón) de 87.1 ± 1.66 Ma. (2σ) y de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (hornblenda) de 84.69 ± 2.22 Ma. (2σ) de fragmentos accrecionados del plateau, se superponen con una edad $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ (hornblenda) de 88 ± 1.6 (2σ) Ma. obtenida para las rocas oceánicas del basamento de la Formación Piñón en la costa de Ecuador (Luzieux et al., 2006), y una serie de edades de ~ 92 -88 Ma. reportadas para las secuencias de plateau oceánico en Colombia y la región del Caribe.

Estos resultados son consistentes con la idea que las rocas de plateau oceánico de la Cordillera Occidental y la Costa de Ecuador se derivan del Plateau Oceánico del Caribe y Colombia (CCOP) de edad Cretácico Tardío.

Las secuencias de arco de isla intraoceánico (Granito de Pujilí, Grupo Río Cala, Unidad Naranjal) sobreyacen a rocas del plateau y tienen edades de cristalización que se extienden entre ~ 85 -72 Ma. La geoquímica y las edades radiométricas de las lavas asociadas al arco de Río Cala, combinado con el rango de edades y la geoquímica de sus productos turbidíticos y volcanoclásticos indican que el arco se inició por subducción hacia el oeste debajo de el CCOP, y son contemporáneas con las rocas del arco de isla de la Costa de Ecuador (Formaciones Las Orquídeas, San Lorenzo y Cayo). Estas unidades del arco de isla se pueden relacionar con el Gran Arco Cretácico del Caribe.

Los análisis paleomagnéticos de rocas volcánicas, de las formaciones Piñón y San Lorenzo de la zona de antearco (Luzieux, 2007), indican su extrusión pre-colisional en latitudes ecuatoriales. Además, los datos paleomagnéticos de la declinación del basamento y de la cobertura sedimentarias de la región costera (Luzieux, 2007) indican 20 - 50° de rotación en sentido horario cerca de la época de la colisión, durante el Campaniano. La rotación fue probablemente sincrona con la colisión de la secuencia de plateau oceánico y de arco con Sudamérica.

Rápida exhumación ($>1\text{km/ma}$) a lo largo del margen continental durante el Cretácico tardío durante ~ 75 -65 Ma es consistente en tiempo con el inicio de sedimentación clástica derivado del margen continental en el Campaniano Tardío – Maastrichtiano (Formación de Yunguilla). La colisión inicial entre la Placa Sudamericana y el Plateau del Caribe fue sincrona con el levantamiento y la exhumación acelerados dentro del margen continental, en un área

que se extendía tan lejos como la Cordillera Oriental, y con la depositación de material siliciclástico derivado del continente en el antearco y trasarco (las formaciones Yunguilla y Tena respectivamente). Colectivamente, esta evidencia demuestra que la colisión inicial entre el Plateau Caribe y el margen de Ecuador ocurrió durante el Campaniano Tardío - Maastrichtian (73-70 Ma.), y dio lugar al bloqueo de la zona de subducción, a la terminación del magmatismo del arco de isla, y a la deformación del margen continental.

El magmatismo asociado al arco Río Cala (Campaniano - Maastrichtiano Temprano), que se produjo sobre la Formación Pallatanga, cesó durante el Maastrichtiano y fue seguido por la iniciación de subducción hacia el este, debajo del plateau oceánico acrecionado. El nuevo margen activo dio lugar al arco volcánico Silante del Maastrichtiano Tardío (aprox. 65 Ma.), que fue depositado en un ambiente terrestre. Durante el Palaeoceno al Eoceno, las condiciones marinas fueron dominantes en el área ahora ocupada por la Cordillera Occidental, y las rocas volcánicas de la unidad Macuchi fueron depositadas, posiblemente como continuación del arco volcánico de Silante. Este volcanismo submarino fue contemporáneo con la depositación de las rocas siliciclásticas del Grupo Angamarca, y la Formación Saguangal, que fueron derivadas principalmente de la Cordillera Oriental que emergía.

Finalmente, ninguna evidencia existe para apoyar hipótesis anteriores que sugieren que el arco volcánico Macuchi fue acrecionado en el Eocene Tardío, causando la inversión estructural de la Cuenca de Angamarca. Es geométricamente difícil sugerir que el bloque Macuchi se acrecionó en el Eoceno Tardío, e insertó entre los bloques de Piñón y Pallatanga, que fueron acrecionados durante el Cretácico Tardío. Además, turbiditas del Grupo Angamarca sobreyacen conformablemente rocas volcánicas de la Unidad Macuchi..