

Education and Planning Workshop

**RUPTURING OF THE CONTINENTAL
LITHOSPHERE IN THE GULF OF CALIFORNIA
AND THE SALTON TROUGH**

Taller de Educación y Planeación

**RUPTURA DE LA LITOSFERA CONTINENTAL
EN LA REGION DEL GOLFO DE CALIFORNIA
Y EL SALTON TROUGH**

PUERTO VALLARTA, OCT. 27-29, 2000
ABSTRACT VOLUME / LIBRO DE RESUMENES

Sponsored by / Auspiciado por

MARGINS- NSF - Unión Geofísica Mexicana

Mohamed G. Abdelsalam

The University of Texas at Dallas

Geosciences Department

P.O. Box 830688

Richardson TX 75083-0688

Phone: 972-883-2724 (Office)

972-883-2447 (Lab)

Fax: 972-883-2829

Abstract

The Afar Depression in the Horn of Africa is one of the most impressive geologic features on our planet Earth. This region has a well-developed morphologic expression of volcanic and tectonic features, which extends south from the Gulf of Zula in Eritrea to the Main Ethiopian Rift. The depression is triangular in map view, encompassing about 200,000 km². It provides a natural and unique (together with Iceland) laboratory for studying processes of seafloor spreading on land, and it is the type-example of a plume-related triple junction. It is also an outstanding place to study rifting processes, which are well developed southwest in the Main Ethiopian Rift and in the north, in the Danakil rift. Moreover, the depression is the only place where the transition from rifting to true seafloor spreading can be studied on land. Because it is a site of vigorous tectonic and volcanic activity and because it lies in an arid region with negligible vegetation or soil cover, the Afar Depression is a superb site for a wide range of geologic remote sensing studies. This work describes how Landsat Thematic Mapper (TM), RADARSAT, Shuttle Imaging Radar (SIR) C/X-band Synthetic Aperture Radar (SAR), and Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) data can be developing and implemented for understanding the tectonic evolution of the Afar Depression. Orbital imaging radar data can be useful for two specific scientific issues: (1) The spatial and chronological relationships between structural trends and their controls on volcanic activity and morphological features; and (2) The evolution of the Afar Depression as an example of rift-rift-rift triple junction. Landsat TM and RADARSAT data can be used to map lithologies and structures of the depression. Radar illumination/shadow in RADARSAT images and digital elevation models (DEM) of SRTM data are useful to estimate scarps slopes that are related to the dip of normal faults. Construction of geologic cross-sections will help in understanding the three dimensional (3D) geometry of these faults. Understanding of the tectonic evolution of the Afar Depression can be useful in the understanding of similar tectonic features such as the Gulf of California and Salton Trough.

Resumen

La Depresión de Afar, en el Cuerno de África, es uno de los rasgos geológicos más impresionantes del planeta ya que presenta una expresión morfológica bien definida de sus rasgos volcánicos y tectónicos. Se extiende desde el sur del Golfo de Zula, en Eritrea, y al norte, hasta el Rift Principal Etiope. En planta, esta depresión de forma triangular alcanza un extensión de 200,000 km² y constituye, junto con Islandia, un laboratorio natural único para el estudio en tierra de procesos de dispersión oceánica. Además, es un ejemplo de una junta triple relacionada a una pluma del manto. También constituye un lugar importante para estudiar procesos de rift, el

cual esta bien desarrollado al SW en el Rift Principal Etíope y al norte en el rift Danakil. Más aún, la depresión es el único lugar expuesto en donde puede estudiarse la transición entre ruptura continental y dispersión oceánica. Debido a que es una región de actividad tectónica y volcánica intensa, con poca vegetación y cubierta de suelo, la Depresión de Afar es un excelente sitio para estudios geológicos de amplio espectro utilizando sensores remotos. Este trabajo describe como pueden ser utilizados los datos Landsat TM, RADARSAT, SIR, SAR y SRTM para entender la evolución tectónica de la Depresión de Afar. Las imágenes de radar orbital pueden ser útiles para dos aspectos científicos específicos: (1) Relaciones cronológicas y espaciales entre patrones estructurales y su control en la actividad volcánica y de rasgos morfológicos, y (2) La evolución de la Depresión de Afar como un ejemplo de junta triple rift-rift-rift. Los datos Landsat TM y SRTM pueden ser útiles para cartografiar unidades litológicas y estructuras de la depresión. La iluminación y sombreado en imágenes de radar RADARSAT junto con modelos digitales de elevación (DEM) de datos SRTM pueden utilizarse para estimar pendientes de escarpes relacionados al echado de las fallas normales. La construcción de secciones geológicas ayudaría a entender la geometría tridimensional de estas fallas. Entender la evolución tectónica de la Depresión de Afar puede ser útil para entender rasgos tectónicos similares tales como el Golfo de California y el Salton Trough.

THE DIGITAL ACQUISITION, VISUALIZATION AND ANALYSIS OF GEOLOGY: A THREE-DIMENSIONAL VIRTUAL WORLD

Dr. Carlos L.V. Aiken
Dr. Xueming Xu
Dept. of Geosciences
University of Texas at Dallas
Richardson, TX 75083

An integrated system is developed to "capture" (digitally map) geology, and natural surfaces in general and geology in particular, accurately, geometrically, geographically and photorealistically. Off-the-shelf technologies have evolved in the mining and geotechnical industries which, when newly configured and integrated, provide a cost effective means for digitally "capturing" observations in the field. This system has four technological components: (1) Global Positioning System (GPS), which ties all of the data together globally as accurately as a centimeter; (2) reflectorless laser rangefinders and total stations, which can remotely trace geology ("laser sketch") in three dimensions in a "trigger on" or continuous mode up to centimeter to decimeter resolution and accuracy; (3) new Geographic Information Systems (GIS) based software, CyberMapping, which provides data management for data capture and real time analysis and 2D and 3D visualization on a portable field computer; and (4) oblique digital photography on the ground, which provides photorealistic capture of surfaces. Parts of this system have been applied to various geological problems and locations from regional mapping to detailed outcrops. This has been extended to capture the entire geological outcrop photorealistically in three-dimensional space with even a single oblique photograph without conventional stereo analysis. The resulting "virtual" outcrop was brought back to the office to continue to map and extract information quantitatively (such as orientation and thickness), as

well as to visualize in three-dimensions even in virtual reality systems. It is more than several orders of magnitude less expensive than existing ground based LIDAR based systems.

RESUMEN

LA ADQUISICIÓN VISUALIZACIÓN Y ANÁLISIS DIGITAL DE LA GEOLOGÍA: UN MUNDO VIRTUAL EN TRES DIMENSIONES.

Dr. Carlos L.V. Aiken
Dr. Xueming Xu
Dept. of Geosciences
University of Texas at Dallas
Richardson, TX 75083

Se desarrolló un sistema integrado para cartografiar digitalmente la información geológica, en particular, y de superficies naturales en general, que permite visualizar la geometría, la geografía y el paisaje de forma más detallada y realista. La tecnología para capturar información de campo ha evolucionado en la industria minera y geotécnica, y al integrarse y configurarse proveen una herramienta efectiva y de bajo costo para capturar digitalmente las observaciones de campo. Este sistema tiene cuatro componentes tecnológicas: (1) un sistema de posicionamiento global (GPS) que relaciona globalmente los datos con precisión centimétrica; (2) sistemas láser (“reflectorless laser rangefinders”) y estaciones totales con los que se puede trazar la geología a distancia en tres dimensiones en modo continuo y con una resolución y precisión centimétrica a decimétrica, (3) Sistemas de Información Geográficos (GIS) basados en software CyberMapping que permite el manejo y captura de datos y el análisis en tiempo real y con visualización en 2D y 3D en una computadora portátil en el campo. (4) Fotografía digital oblicua que desde el terreno provee imágenes fotorealistas de la superficie. Las partes de este sistema se han aplicado a varios problemas geológicos, de cartografía regional y de detalle. El sistema se ha ampliado para capturar afloramientos completos en tres dimensiones utilizando una sola fotografía oblicua y sin el análisis estereoscópico convencional. El afloramiento “virtual” proporciona información cuantitativa (e.g. orientación y espesor de unidades), permite visualizar en 3D y utilizar sistemas de realidad virtual. Este procedimiento es más barato, en varios órdenes de magnitud, que los sistemas LIDIAR basados en información de campo.

Jorge Jacobo Albarrán

Instituto Mexicano del Petróleo, Gerencia de Geociencias, Eje Central N° 152 Col. San Bartolo Atepehuacan, México D.F. C.P.07730

Teléfono: 53338336

Laboratorio de Petrología E.S.I.A. Ciencias de la Tierra Instituto Politécnico Nacional, Av.

Ticomán 600 Col San José Ticomán D.F

Tel 57296000 ext. 56037

e-mail: jjacobo@www.imp.mx

Justificación

Tengo gran interés en asistir a este taller con el fin de aprovechar todas las experiencias y conocimientos que se tiene en el proceso de Rift del Golfo de California para aplicarlo en el Golfo de México, a nivel regional y por Cuencas. En este último caso, a pesar de que las cuencas tienen un origen común con el proceso de Rift del Triásico - Jurásico que le dio origen, en el Golfo de México cada cuenca petrolera tiene sus diferencias, por ejemplo, la cuenca gasífera de Burgos (Edo. de Tamaulipas) su origen, evolución, preservación y destrucción del gas esta asociado al Rift de Río Grande, otra cuenca asociada a una posible reactivación del rift es la Cuenca de Veracruz donde existen evidencias geofísicas y manifestaciones volcánicas asociadas a una ruptura de la litosfera.

A nivel regional es muy importante conocer más acerca de la termicidad y la geometría, así como los límites de la corteza continental, transicional y piso oceánico del Golfo de México. Este conocimiento redundará en una mejor prospección petrolera que se realizará en aguas profundas en el Golfo de México en los próximos años.

Resumen

José Jorge Aranda-Gómez

A partir del Eoceno, los eventos geológicos más importantes en la región han sido volcanismo y fallamiento. La actividad magmática asociada a la subducción dio origen a la extensa y voluminosa Sierra Madre Occidental (SMO). Conforme cesó la subducción gradualmente, inició el magmatismo intraplaca en la región situada al este de la SMO y una combinación de volcanismo alcalino y toleítico en la región del Golfo de California.

El fallamiento normal formó el extremo meridional de la provincia tectónica de Cuencas y Sierras. Sobre parte de esta provincia se sobrepuso la extensión oblicua que generó la Provincia Extensional del Golfo.

En muchos sitios el volcanismo y fallamiento fueron simultáneos o el inicio del fallamiento siguió después de un lapso breve al del volcanismo. Ambos fenómenos sucedieron en toda la región en al menos cuatro pulsos de actividad: 32-27 Ma, 24-20 Ma, 12-10 Ma y ≤ 5 Ma. Sin embargo, la intensidad y carácter de estos pulsos variaron de manera sistemática de un lugar a otro. Así, el frente del volcanismo voluminoso asociado a subducción y el fallamiento normal intenso se desplazaron de NE a SW y fueron reemplazados hacia el interior del continente por actividad alcalina intraplaca y por extensión de menor magnitud.

Los magmas predominantemente félsicos de la SMO pudieron generarse por fusión parcial de la corteza, o por cristalización fraccionada de magmas provenientes del manto y asimilación simultánea de material cortical. Las edades isotópicas de zircones en xenolitos corticales de Chihuahua indican que del Eoceno al Oligoceno medio hubo un pulso térmico que coincidió con el volcanismo de la SMO y que a partir del Mioceno existen en la parte media y profunda de la

corteza condiciones de P-T congruentes con metamorfismo de grado alto. El origen de estas perturbaciones térmicas pudo estar asociado, respectivamente, a la actividad magmática de la SMO y al volcanismo intraplaca acompañado por extensión cortical.

Los pulsos de actividad tectonomagmática coinciden en el tiempo con etapas en que se incrementó notablemente la tasa de divergencia entre las placas Farallón y Pacífica y/o con períodos de reorganización mayor de las placas en la costa del Pacífico. Esta actividad se vio reflejada en el interior del continente. Por ejemplo, en el intervalo ~30-24 Ma hubo un incremento en la tasa de divergencia que causó volcanismo y extensión en la SMO. Por otro lado, coincidiendo con la formación del Protogolfo de California (~12 Ma), al este de la SMO, hubo extensión y volcanismo alcalino. En ese mismo período la orientación del frente volcánico de la SMO giró gradualmente de NW-SE a ~E-W, y el carácter dominante de los magmas extravasados cambió de félsico a intermedio, estableciéndose la Faja Volcánica Trans Mexicana, el cual ha conservado esa orientación desde el Mioceno medio (~12Ma), aunque el frente volcánico se ha desplazado hacia el sur.

Abstract

José Jorge Aranda-Gómez

Since the Eocene, the most important geologic events in the region were volcanism and faulting. Magmatism related to subduction generated the voluminous Sierra Madre Occidental (SMO). Coincident with the waning of subduction, intraplate-type magmatism began in the region east of the SMO, and a combination of alkaline and tholeiitic magmatism began in the Gulf of California region.

Normal faulting produced the southern extension of the Basin and Range tectonic province. Upon part of this province was superimposed the oblique extension that generated the Gulf Extensional Province.

In many places, volcanism and faulting were simultaneous, or the faulting began a short time after the initiation of volcanic activity. Available information suggests that both phenomena occurred throughout the region during at least four distinct pulses: 32-27 Ma, 24-20 Ma, 12-10 Ma, and ≤ 5 Ma. However, the character and intensity of these pulses varied in a systematic way from one site to another. For example, the front of the voluminous felsic-intermediate, subduction-related volcanism and intense normal faulting shifted from NE to SW and was replaced by intraplate-type alkalic volcanism and extension of lesser magnitude.

The dominant felsic magmas associated with the Sierra Madre Occidental (SMO) could have been generated by partial melting of the crust, or by crystal fractionation of mantle-derived melts and simultaneous assimilation of crustal materials. The isotopic ages of zircons in crustal xenoliths from Chihuahua record an Eocene to middle-Oligocene thermal pulse that appears to be related to SMO activity. These xenoliths also provide evidence for high-grade metamorphic

conditions in the middle and lower crust since the Miocene, which may reflect heating associated with extension-related intraplate magmatism.

The observed pulses of tectonomagmatic activity correspond to periods of increased divergence rate between the Farallon and Pacific plates, and/or with times of major plate reorganization. These events along the Pacific Coast had a manifestation within the continental interior. For example, there was an increase of the divergence rate during the period ~30-24 Ma that caused volcanism and extension in the SMO. Likewise, coincident with the opening of the Protogulf of California (~12 Ma), extension and intraplate-type volcanism occurred east of the SMO. About the same time the orientation of the SMO volcanic front changed from NW-SE to ~E-W, and the composition of the erupted magmas changed from dominantly felsic to intermediate, marking the start of activity in the Trans Mexican Volcanic Belt (TMVB). The orientation of the TMVB has remained constant since the middle Miocene (~12 Ma), but the volcanic front has shifted toward the south.

RIGID MICROPLATES, DEFORMING TERRAINS, AND THE SLIP BUDGETS OF THE SOUTHERN SAN ANDREAS FAULT SYSTEM AND THE GULF OF CALIFORNIA

Axen, Gary J., Dept. Earth & Space Sciences, UCLA, Los Angeles, CA 90095-1567,
gaxen@ess.ucla.edu

Map-view reconstructions of the southern San Andreas fault system, its surroundings, and the northern Gulf of California were made for 2, 4, 6.5 and 12 Ma. These incorporate most accepted constraints on slip, slip rate, and rotations from southern, central, and Baja California but methods, assumptions, and conclusions differ from previous reconstructions. Coastal western Mexico and the Baja California microplate south of the Agua Blanca fault are assumed rigid so sea-floor spreading rates determined from magnetic anomalies at the Alarcon Rise since 3.58 Ma (DeMets, 1995) can be related to deformation farther north. Extrapolating these rates to 6.5 Ma and corrected for Euler latitude yields ~265 km slip on central Gulf transforms since 6.5 Ma, in good agreement with recent estimates of cross-Gulf separation of ~6.4 Ma ignimbrites (Oskin and Stock, 1999). Apparently the continental extension rate from ~6.5 to 3.58 Ma was similar to the early seafloor spreading rate. However, ~300-325 km of transform-parallel slip is required in the central Gulf since ~12-15 Ma, so early Gulf history was probably also transtensional, not purely orthogonal, and strain must have been partitioned within the protogulf as well as between gulf and borderland faults

Conflicts among existing San Andreas reconstructions center on slip magnitude through the Big Bend and Salton Trough, where various well constrained markers are offset up to 100 km less than is required across the northern Gulf or central San Andreas. However, most slip estimates are compatible if off-fault deformation is accounted for adequately. For example, vertical-axis rotations in the Eastern Transverse Ranges caused significant northwesterly elongation that is implicitly included in high-end slip estimates but not in low estimates. This accounts for most of the discrepancy. The rest was accommodated by distributed off-fault deformation within non-

rigid terrains such as the Western Transverse Ranges, was transferred offshore via the Los Angeles basin, and/or was accommodated on faults in coastal Mexico.

MICROPLACAS RIGIDAS, TERRENOS EN DEFORMACIÓN Y EL BALANCE DE DESPLAZAMIENTO EN EL SUR DEL SISTEMA DE FALLA SAN ANDRES Y EL GOLFO DE CALIFORNIA

Axen, Gary J., Dept. Earth & Space Sciences, UCLA, Los Angeles, CA 90095-1567, gaxen@ess.ucla.edu

Se realizaron reconstrucciones del sistema de falla San Andres y sus alrededores y del norte del Golfo de California para los 2, 4, 6.5 y 12 Ma. Estas reconstrucciones incorporan las restricciones más aceptadas sobre el movimiento y tasa de deslizamiento de fallas y rotaciones en el sur y centro de California y Baja California. Sin embargo, los supuestos y conclusiones difieren de las reconstrucciones previas. La costa del Occidente de México y la microplaca de Baja California al sur de la falla de Agua Blanca se asumen rígidas, de manera que la tasa de dispersión oceánica en la cresta de Alarcón desde los 3.58 Ma (DeMets, 1995) puede ser relacionada a la deformación que ocurrió hacia el norte. Al extrapolar estas tasas a los 6.5 Ma, y corrigiendo la latitud del polo de Euler, se estimó un desplazamiento de ~265 km en la parte central del Golfo a partir de los 6.5 Ma, que está en acuerdo con estimaciones recientes utilizando ignimbritas de 6.5 Ma como puntos de control a través del Golfo. (Oskin and Stock, 1999). Al parecer, la tasa de extensión continental entre ~6.5 y 3.58 Ma fue similar a la tasa de dispersión oceánica temprana. Sin embargo, se requieren ~300-325 km de movimiento paralelo a las fallas transformes en la porción central del Golfo a partir de los ~12-15 Ma, de manera que la historia temprana del Golfo fue probablemente también transtensional, no puramente ortogonal, y la deformación debió estar repartida en el Golfo y en las fallas en el borde continental.

El conflicto entre las reconstrucciones que existen del sistema San Andrés se centra en la magnitud del deslizamiento a través del Big Bend y el Salton Trough, donde varios marcadores bien definidos están desplazados hasta 100 km menos que el desplazamiento requerido a través del Golfo o en la porción central del sistema San Andrés. No obstante, los desplazamientos estimados son compatibles si incluimos la deformación documentada fuera de las fallas principales. Por ejemplo, rotaciones de bloques sobre ejes verticales en las Sierras Transversas causaron una elongación significativa al NW, que está implícita en las estimaciones máximas pero se omite en las estimaciones mínimas. Esto reconciliaría la mayor parte de las discrepancias que existen. El resto de la deformación ha sido acomodada en las fallas principales en terrenos no rígidos, como la porción oeste de la Sierras Transversas, que fue desplazada mar adentro a través de la Cuenca de Los Angeles, o en la deformación que se acomoda en las fallas del borde continental de México

Continental rifting and seafloor spreading in the western Woodlark Basin, Papua New Guinea

Suzanne L. Baldwin, Dept of Earth Sciences, Syracuse University, Syracuse NY 13244

Brian Monteleone, Dept of Geosciences, University of Arizona, Tucson, AZ 85721

E. June Hill, Australian Crustal Research Centre, Monash University, Melbourne, Australia

Trevor R. Ireland, Research School of Earth Sciences, Australian National University, Canberra, Australia

Paul G. Fitzgerald, Dept of Earth Sciences, Syracuse University, Syracuse NY 13244

Like the Gulf of California/Salton Sea region, the western Woodlark Basin/Papuan Peninsula region occupies a plate boundary zone characterized by continental rifting and seafloor spreading. Westward propagation of the Woodlark Basin (WB) seafloor spreading center since at least 6 Ma has resulted in separation of previously thickened continental crust of the eastward extensions of the Papuan peninsula (i.e., Woodlark and Pocklington Rises). Seafloor spreading has thermally affected the adjacent extended continental crust and thermochronologic data is used to constrain the timing and rates of continental exhumation and extension associated with continental break-up. Intra-continental extension resulted in the formation of active metamorphic core complexes in the D'Entrecasteaux Islands (DI) where domes of high grade metamorphic rocks (amphibolites, eclogites, and migmatites), intruded by large 2.1 Ma granodiorite bodies, have been rapidly exhumed along kilometer scale shear zones from depths of ~35 km beginning ~ 4 m.y. ago. Similar structural relationships exist on Misima Island (MI), located southeast of the DI on the Pocklington Rise and south of the southern margin of the spreading center. Here, shallowly dipping normal faults separate low grade or unmetamorphosed "upper plate" rocks from high grade metamorphosed rocks. Thermochronologic data from MI provides evidence for crustal extension (at ~8 Ma) prior to the oldest record of sea-floor spreading in the WB (~6 Ma) and we interpret MI to represent a presently inactive metamorphic core complex pushed southwards by the westerly propagating spreading center.

Drilling on ODP Leg 180 revealed that the uppermost meters of the Moresby Seamount (MSM), a faulted crustal block just west of the spreading tip, and rocks underlying the WB, in part, comprise basalt, diabase, and gabbro with variable hydrothermal alteration and greenschist grade metamorphism. Thermochronologic data indicates the diabase crystallized at 66.0 Ma and has not been thermally affected by Miocene-Pliocene rift-related events. The MSM is interpreted to represent upper plate rocks bounded on its northern edge by a seismically active normal fault.

Thermochronologic events recorded in the lower plates of core complexes in the DI and MI temporally coincide with reorientation of the WB spreading center. For example, hydrothermal alteration on MI and shear zone movement on DI occurred as the WB spreading center stepped across the Simbo Transform at ~3.6 Ma. The spreading center steps across the Moresby transform at ~2.0 Ma at the same time granodiorite is intruded and rapid exhumation accommodated by shear zone movement occurs in the DI. Existing thermochronologic data supports models that predict latitudinal and longitudinal variations in the timing of continental crustal extension as it relates to seafloor spreading in the WB. Compared to the Gulf of

California/Salton Sea region, the western WB represents a more mature stage in the transition from continental rifting to seafloor spreading.

Ruptura continental y dispersión oceánica en el oeste de la Cuenca de Woodlark, Papua Nueva Guinea

Suzanne L. Baldwin, Dept of Earth Sciences, Syracuse University, Syracuse NY 13244

Brian Monteleone, Dept of Geosciences, University of Arizona, Tucson, AZ 85721

E. June Hill, Australian Crustal Research Centre, Monash University, Melbourne, Australia

Trevor R. Ireland, Research School of Earth Sciences, Australian National University, Canberra, Australia

Paul G. Fitzgerald, Dept of Earth Sciences, Syracuse University, Syracuse NY 13244

Al igual que la región del Golfo de California-Salton Sea, la región occidental de la Cuenca Woodlark-Península de Papua se ubica en un límite de placas definido por la ruptura continental y dispersión oceánica. La propagación al oeste de la Cuenca Woodlark (WB) y la dispersión oceánica de edad <6 Ma, originaron la separación de una corteza continental previamente engrosada en el extremo oriental de la Península de Papua (i.e., Crestas Woodlark y Pocklington). La dispersión oceánica afectó térmicamente la corteza continental adyacente y los datos termocronológicos permiten constreñir el tiempo y las tasas de exhumación y extensión asociadas con la ruptura continental. La distensión intra-continental dio lugar a la formación de núcleos de complejos metamórficos activos en las Islas D'Entrecasteaux (DI), donde domos de rocas metamórficas de alto grado (anfíbolitas, eclogitas y migmatitas) fueron intrusionados por cuerpos de granodiorita de 2.1 Ma que han sido rápidamente exhumados a lo largo de zonas de cizalla de escala kilométrica y desde profundidades de ~35 km en los últimos ~4 Ma. Relaciones estructurales similares ocurren también en la Isla Mmisima A (MI) localizada al sureste de DI en la cresta Pocklington y al sur del centro de dispersión. En esa zona, fallas normales de bajo ángulo separan rocas de la placa superior de bajo grado o sin metamorfismo, de rocas metamórficas de alto grado. Datos termocronológicos en MI proporcionan evidencias de extensión cortical (hacia ~8 Ma) anterior al registro más antiguo de dispersión oceánica en WB (~6 Ma), que interpretamos representa un núcleo metamórfico inactivo que fue empujado hacia el sur por la propagación al oeste del centro de dispersión.

Perforaciones del ODP Leg 180 revelaron que en los primeros metros del Moresby Seamount (MSM), un bloque afallado de corteza en el extremo oeste del centro de dispersión y la corteza que subyace WB contiene basalto, diabasa y gabro con alteración hidrotermal variable y metamorfismo de facies de esquistos verdes. Datos termocronológicos indican que la diabasa cristalizó hace ~66.0 Ma y no ha sido térmicamente afectada por eventos relacionados al rift del Mioceno-Plioceno. Se interpreta que MSM representa rocas de la placa superior cuyo límite al norte es una falla normal sísmicamente activa.

Los eventos termocronológicos registrados en la placa inferior de núcleos metamórficos en DI y MI coinciden temporalmente con la reorientación del centro de dispersión de WB. Por ejemplo, la alteración hidrotermal en MI y el movimiento de la zona de cizalla en DI ocurrió a medida que el centro de dispersión propagó y escalonó a través de la falla transforme de Simbo hacia los ~3.6 Ma. Hacia ~2.0 Ma, el centro de dispersión propagó escalonadamente a través de la falla transforme Moresby y al mismo tiempo, la granodiorita se emplazó seguida de un

levantamiento rápido que fue acomodado en las zonas de cizalla en DI. Los datos termocronológicos apoyan los modelos que predicen variaciones temporales y espaciales de la distensión continental y su relación con la dispersión oceánica en WB. Comparado con la región del Golfo de California/Salton Sea, la Cuenca de Woodlark representa una etapa más madura en la transición entre el proceso de ruptura continental y la dispersión oceánica.

Richard A Bennett

Harvard-Smithsonian CfA
60 Garden St, MS 42
Cambridge, MA 02138-1516
Phone:(617)495-7453
FAX:(617)495-7345
E-mail:rbennett@cfa.harvard.edu

Space Geodetic Constraints on Fault Slip Rates in Northern Baja California

R.A. Bennett, T.H. Dixon, R.E. Reilinger, J. Gonzalez, J.L. Davis, and B.P. Wernicke

We use space geodetic estimates of horizontal site velocity to investigate the kinematics of Pacific-North America plate boundary deformation in the southwestern U.S. We enlist a simple elastic block model to parameterize the distribution and sum of deformation within and across this diffusely deforming region.

The relative motions that we infer between neighboring blocks in the model provide a self consistent set of slip rate estimates for the major fault zones of the plate boundary in northern Baja and southern California. Using a local geodetic data set centered on the Agua Blanca and San Miguel-Vallecitos fault zones, we infer right-lateral slip rates of 2 ± 1 mm/yr and 2 ± 1 mm/yr for both the Agua Blanca and San Miguel-Vallacitos fault zones. Using a more regional geodetic data set, that includes stations in both Baja and southern California, we infer slip rates of 4.4 ± 0.4 mm/yr and 1.6 ± 0.4 mm/yr for these fault systems, respectively. The differences, although not significant at the 2-sigma level, may be related to assumptions about how deformation is transferred from northern Baja faults to southern California faults.

Acotaciones geodésico espaciales a las tasas de deslizamiento en el norte de Baja California.

R.A. Bennett, T.H. Dixon, R.E. Reilinger, J. Gonzalez, J.L. Davis, and B.P. Wernicke

Utilizamos estimaciones geodésicas de velocidad horizontal de sitio para investigar la cinemática de la deformación en el límite de placas Pacífico-Norteamérica en el SW de Estados Unidos. Enlistamos un modelo de bloque elástico simple para parametrizar la distribución y la suma de la deformación dentro y a través de esta región de deformación difusa.

El movimiento relativo inferido entre bloques vecinos del modelo, provee de una serie de datos consistentes de tasas de movimiento en las principales zonas de falla del límite de placas en el norte de Baja California y sur de California. Utilizando un juego de datos de las zonas de falla Agua Blanca y San Miguel-Vallecitos inferimos tasas de desplazamiento lateral de 4.4 ± 0.4 mm/año y 1.6 ± 0.4 mm/año para estos dos sistemas, respectivamente. La diferencia, no obstante no ser significativa al nivel de confianza 2 sigma, puede relacionarse a la forma en como asumimos la transferencia de la deformación entre las fallas en el norte de Baja California y las fallas del sur de California.

FAULTING AND DEFORMATION DURING AMAGMATIC AND MAGMATIC CONTINENTAL RIFTING:

W. Roger Buck and Luc L. Lavier

We present results of two-dimensional numerical models of continental extension for cases of no magmatic intrusion and for simulated dike intrusion. For no magmatic intrusion we study the conditions that control whether extension leads to a series of block faults or a single large-offset "cove complex" normal fault. For the case of magmatic rifting we note that intrusion may promote localization of extensional deformation and reduce the force needed for rifting.

These numerical experiments include the spontaneous formation and evolution of normal faults in an elastic-plastic layer (brittle layer) overlying a non-Newtonian viscous layer (ductile layer). The mechanical and thermal evolution of the model are coupled to calculate the viscous stresses using strain rate and temperature dependent creep laws. The formation of normal faults in the brittle layer is modeled by a reduction of strength as a function of strain.

The pattern of modeled faults in the brittle layer depends on several factors including the assumed rate of weakening of the faults with strain. We find that thinning of the brittle layer by thermal and mechanical necking may trigger the formation of secondary faults and eventually lead to the formation of a half-graben. To obtain large offset low-angle normal faults the thickness of the brittle layer must stay relatively constant during the initial evolution of the faults. Hydrothermal circulation in the brittle crust can smooth out layer thickness variations. The efficiency of hydrothermal circulation should decrease with depth as cracks close under pressure causing a decrease in permeability. Including this in our models we only get large offset faults for layers that are initially thin (~10 km thick), while half-grabens form for layers that are thick. After a large amount of extension the thick layer cases develop multiple fault bounded blocks while the thin layer cases develop features similar to those seen at core complex. Our magmatic rifting simulations indicate that that intrusions can cause localization of rifting into a narrow region when the rheologic conditions would lead to widely distributed rifting in the absence of magmatism. Dike intrusions can lower the tectonic force needed for rifting in two ways: by accommodating strain over part of the thickness of the lithosphere and by heating and so softening the lithosphere. Magmatic intrusion may then trigger a transition from "core complex mode" extension to "narrow rift mode" extension.

We show how faulting and diking can both occur during extension even though they imply very different stresses with depth. The key to this fault-dike co-existence is the viscoelastic response

of the lithosphere and asthenosphere. A dike is intruded on a time scale of hours and in that time stress is discharged in only a small area of lithosphere around the dike. The stress in that area is restored to the levels needed for faulting as viscoelastic relaxation smoothes the stress field.

Fallamiento y deformación durante rifting continental magmático y no-magmático

W. Roger Buck and Luc L. Lavier

Presentamos los resultados de modelos numéricos bidimensionales de extensión continental para casos de intrusiones no magmáticas y para casos de intrusión simulada de diques. En intrusión no magmática estudiamos las condiciones que definen si la distensión ocasiona una serie de bloques afallados o una gran falla normal con desplazamiento único “tipo cove complex normal fault”. Para el caso de *rifting* magmático notamos que la intrusión promueve la localización de la deformación extensional y reduce la fuerza necesaria para producir la ruptura o *rifting*.

Estos experimento numéricos incluyen la formación espontanea y evolución de fallas normales en una capa elástico plástica (capa quebradiza) que sobreyace una capa viscosa, no newtoniana (capa dúctil). La evolución térmica y mecánica del modelo se acopla para calcular los esfuerzos viscosos utilizando la tasa de deformación y las leyes de deformación continua-asísmica (fluencia o “creeping”) dependientes de la temperatura. La deformación de las fallas normales en la capa quebradiza se modela mediante una reducción del esfuerzo en función de la deformación.

El patrón de las fallas modeladas en la capa quebradiza depende de varios factores que incluyen la tasa de debilitamiento de las fallas con la deformación. Encontramos que el adelgazamiento de la capa quebradiza por estrangulamiento mecánico y térmico puede promover la formación de fallas secundarias y eventualmente, conducir a la formación de un medio graben. Para obtener fallas de bajo ángulo con grandes desplazamientos, el espesor de la capa quebradiza debe permanecer relativamente constante durante el inicio de la evolución de las fallas. La circulación hidrotermal en la capa quebradiza puede suavizar las variaciones en el espesor de la capa. La eficiencia de la circulación hidrotermal debe disminuir a profundidad a medida que las fracturas se cierran por la presión causando una disminución en la permeabilidad. Al incluir esto en nuestro modelo solo obtenemos fallas con desplazamientos grandes para capas inicialmente delgadas (~10 km de espesor), mientras que en capas más gruesas se forman medios graben. Después de una extensión considerable, los casos de capas gruesas desarrollan bloques limitados por fallas múltiples, mientras que en los casos de capas delgadas, se desarrollan rasgos similares a los observados en los núcleos de complejos metamórficos.

Nuestras simulaciones de rifting magmáticos indican que las intrusiones pueden causar la localización del *rifting* en regiones estrechas, cuando las condiciones reológicas conducirían a un *rifting* ampliamente distribuido en ausencia de magmatismo. La instrusión de diques puede disminuir de dos maneras la fuerza tectónica requerida para iniciar el rifting: 1) acomodando la deformación sobre parte del espesor de la litosfera, y 2), calentando y debilitando la litosfera. Las intrusiones magmáticas pueden entonces producir una transición entre extensión “tipo core complex” a extensión tipo “rift estrecho”.

Demostramos como el fallamiento y la intrusión de diques pueden ocurrir simultáneamente durante la distensión, aún cuando ambos implican diferentes esfuerzos con la

profundidad. La clave para la coexistencia falla-dique es la respuesta viscoelástica de la litosfera y la astenosfera. Un dique intrusiona a escalas de tiempo de horas y ese esfuerzo temporal se descarga en un área pequeña de la litosfera alrededor del dique. El esfuerzo en esa área se restablece a los niveles necesarios para producir fallamiento a medida de que el relajamiento viscoelástico suaviza el campo de esfuerzos.

APATITE FISSION TRACK METHOD APPLIED TO THE DECIPHERING OF BASIN AND RANGE EXTENSION AND OPENING OF THE GULF OF CALIFORNIA, MEXICO

CALMUS, Thierry

Instituto de Geología, ERNO, UNAM, Hermosillo, Sonora, Mexico

email: tcalmus@servidor.unam.mx

Tertiary Basin and Range extension and opening of the Gulf of California originate uplift, erosional and/or tectonic denudation in SW United States and NW Mexico. The fission-track record in apatite gives information about the thermal history of the extensional belt and allows to constrain uplift and denudation chronology. Fission track records were analyzed from one sample of Proterozoic granite in the lower plate of the Metamorphic Core Complex (MCC) of Mazatán, 11 samples of Cretaceous-Tertiary plutonic rocks (Laramide batholith) along the eastern coast of the Gulf of California and three samples of the same batholith in the graben of Hermosillo.

The Proterozoic granite below the detachment fault presents an apatite fission track age (FTA) of 18 ± 1 Ma. This age is consistent with FTA of other MCC lower plates of the Basin and Range province.

FTA in the Laramide batholith range from 36.6 Ma in Tiburon island to 5.9 Ma north of Bahia Kino, along the western coast of Sonora. That age of 5.9 Ma and FTA ages of the Hermosillo area samples of 8.12 ± 0.95 Ma and 9.19 ± 0.67 Ma suggest that the Gulf of California opening had a broad influence in Sonora, until at least 120 km from the present coast, probably reactivating Basin and Range faults.

This first fission-track thermochronologic study in Sonora leads to following conclusions:

1- Rapid cooling is associated with normal slip along detachment fault of Mazatán Metamorphic Core Complex. Fission-track ages as well as confined fission track lengths are consistent with fission-track ages and lengths of other Metamorphic Core Complexes in the Basin and Range province (California, Arizona).

2- No uplift and/or unroofing related to the Laramide orogeny are registered by apatite fission-tracks from Sonora samples. This thermotectonic evolution is different from some granite samples of Baja California (La Paz and San Pedro Martir batholiths) which registered generally

rapid cooling after crystallization. It is important to note that the Laramide uplift was registered also by granites of the Manzanillo and Acapulco trench batholiths.

- If they belonged to the same magmatic arc, these distinct thermal characteristics suggest different evolutions between outer and inner arc, related to processes of subduction.

- If they belonged to different magmatic arcs, Laramide orogeny may be related to collision between both arcs in northwestern Mexico.

3- Four youngest apatite fission-track ages (along the coast of Sonora and in the graben of Hermosillo) are probably related to the opening of the Gulf of California. This cooling may correspond to 1) vertical-component of NW35°SE strike-slip faults, along the coast of Sonora, and 2) in the graben of Hermosillo, vertical reactivation of footwall of N-S Basin and Range inherited normal faults, as continental equivalent to *en échelons* spreading centers of the Gulf of California.

4- Apatite fission-track ages may be a tool for documenting of faulted and tilted blocks structures in batholiths, when it does not exist structural control with overlying sedimentary or volcanic rocks.

To better constrain the thermotectonic history of this region, new FTA datations are in process in the lower plate of the Magdalena Metamorphic Core Complex, along a 250 km-long E-W transect from the Gulf of California to the Sierra Madre Occidental, and along the Gulf of California escarpment, Baja California, from the mouth of the Gulf (Site ODP 476. Leg 64) to the eastern flank of the Sierra San Pedro Martir.

FECHAMIENTO POR TRAZAS DE FISION SOBRE APATITAS: SU APLICACION PARA LA CRONOLOGIA DE LA EXTENSION "BASIN AND RANGE" Y LA APERTURA DEL GOLFO DE CALIFORNIA, MEXICO

CALMUS, Thierry

Instituto de Geología, ERNO, UNAM, Hermosillo, Sonora, Mexico

email: tcalmus@servidor.unam.mx

La extensión terciaria "Basin and Range" y la apertura del Golfo de California provocaron levantamiento, denudación por erosión y/o por tectónica en el SW de Estados Unidos y el NW de México; El registro de las trazas de fisión en apatitas da informaciones sobre la historia térmica de la provincia extensional y permite precisar la cronología de los levantamientos y de las denudaciones. Trazas de fisión en apatitas fueron analizadas sobre una muestra del granito Proterozoico de la placa inferior del "Metamorphic Core Complex" (MCC) de Mazatán, 11 muestras de rocas plutónicas del batolito Laramide a lo largo de la costa oriental del Golfo de California, y 3 del mismo batolito en el graben de Hermosillo

El granito Proterozoico debajo de la falla de despegue tiene una edad de trazas de fisión sobre apatita (TFA) de 18 ± 1 Ma. Esa edad es consistente con las TFA de otras placas inferiores de MCC de la provincia "Basin and Range".

TFA en el batolito Laramide se extienden de 36.6 Ma en la isla de Tiburón a 5.9 Ma al norte de Bahía Kino en la costa de Sonora. La edad de 5.9 Ma y las edades de 8.12 ± 0.95 Ma y 9.19 ± 0.67

Ma obtenidas en el area de Hermosillo sugieren que la apertura del Golfo de California tuvo una influencia importante en Sonora, por lo menos hasta 120 km de la costa actual, probablemente con la reactivación de fallas previas del sistema "Basin and Range".

Este primer estudio de termocronología por trazas de fisión en Sonora permite proponer las conclusiones siguientes:

1- Un enfriamiento rápido está relacionado con el deslizamiento normal de bajo ángulo de la falla de despegue del MCC de Mazatán. La TFA así como la longitud de las trazas de fisión confinadas son comparables con las edades y las longitudes de trazas obtenidas en otros MCC de la provincia "Basin and Range" en California y en Arizona.

2- Ni levantamiento, ni denudación relacionados con la orogenia Larámide han sido registrados por las trazas de fisión en las apatitas de las muestras de Sonora. La evolución termotectónica observada es diferente a la evolución de algunos granitos de Baja California (batolitos de La Paz y San Pedro Martir) que registraron generalmente un enfriamiento rápido después de la cristalización. Cabe mencionar que el levantamiento Larámide ha sido registrado también por unos granitos de los batolitos de Manzanillo y de la trinchera de Acapulco.

- Si pertenecen al mismo arco magmático, esas características térmicas diferentes sugieren evoluciones diferentes para el arco externo y el arco interno, en relación con los procesos de subducción.

- Si pertenecen a arcos magmáticos diferentes, la orogenia Larámide puede ser relacionada con la colisión entre ambos arcos en el noroeste de México..

3- 4 TFA más jóvenes a lo largo de la costa de Sonora y en el graben de Hermosillo) son probablemente asociados a la apertura del Golfo de California. Este enfriamiento puede corresponder a 1) una componente vertical de fallas transcurrentes de rumbo NW35°SE a lo largo de la costa de Sonora, y 2) en el graben de Hermosillo, a la reactivación vertical de bloques de piso de fallas normales del sistema "Basin and Range", como equivalentes de los centros de dispersión dispuestos *en échelons* en el Golfo de California.

4- TFA pueden representar una herramienta para documentar estructuras falladas y bloques basculados cuando no existe otro tipo de control estructural dado por rocas sedimentarias o volcánicas sobreyacentes a las rocas batolíticas.

Para precisar de mejor manera la historia termotectónica, nuevas dataciones están en proceso en la placa inferior del MCC de Magdalena, a lo largo de un transecto E-W de 250 km, desde el Golfo de California hasta la Sierra Madre Occidental, y a lo largo del escarpamiento del Golfo de California en Baja California, desde la boca del Golfo (Sitio ODP 476, Leg 64) hasta el flanco este de la Sierra San Pedro Martir.

**TECTONIC IMPLICATIONS OF THE OCURRENCE OF BASALTIC VOLCANIC
FIELDS ACROSS THE CENTRAL PART OF THE PENINSULA OF BAJA
CALIFORNIA.**

Edgardo Cañon Tapia

Departamento de Geología, CICESE

Based on a combination of photo interpretation and field work, new evidence has been gathered that shows that the lava flows that cover part of northern Baja California Sur form at least one basaltic field in the region. The identification of monogenetic fields on central Baja yields a different tectonic scenario than the one used to explain the volcanic record without the recognition of the fields, opening a completely new way for the interpretation of the tectonic evolution of these parts of the peninsula of Baja California. In particular, the doming and subsidence events required to explain a continuous tholeiitic lava cover on the region is no longer required. Rather, it is necessary to acknowledge the occurrence of a localized crustal weakness across the Peninsula to account for the ascent of magma responsible of the formation of the volcanic fields. The available ages of the first pulse of volcanism on the region (Middle to Late Miocene) suggest a probable connection of this type of volcanism with the formation of a proto-Gulf, although more knowledge of the details on both the characteristics of the volcanism and the sequence of events leading to the opening of the Gulf is required to clarify this point.

IMPLICACIONES TECTÓNICAS DE LA OCURRENCIA DE CAMPOS BASÁLTICOS EN LA PARTE CENTRAL DE LA PENINSULA DE BAJA CALIFORNIA

Edgardo Cañon Tapia

Departamento de Geología, CICESE

ecanon@cicese.mx

En base a una nueva interpretación fotogeológica y trabajo de campo realizado en la zona norte del estado de Baja California Sur, se ha documentado la existencia de al menos un campo volcánico monogenético en esta región. La identificación de campos monogenéticos en la parte central de la Península sugiere un escenario tectónico diferente al hasta ahora usado para explicar el registro volcánico de la zona, ya que en particular resulta innecesario invocar los eventos de levantamiento y subsidencia hasta ahora requeridos para explicar la cubierta toleítica de la región. Por el contrario, con el descubrimiento de los campos volcánicos es necesario reconocer que debió haber existido una zona de debilidad cortical a través de la Península que permitió el ascenso de magma originado directamente en el manto bajo la Península. Más aún, el rango de edades disponible para el primer pulso de volcanismo en la región (Mioceno medio a tardío) sugiere una posible relación entre los procesos tectónicos responsables de la formación de estos campos volcánicos y la apertura del protogolfo de California, aunque todavía quedan muchos detalles de esta relación sin resolver, por lo que se requiere realizar estudios más detallados en la zona.

Paleogeografía de la Península y del Golfo de California durante el Terciario

Ana Luisa Carreño, Instituto de Geología, Circuito Exterior, C.U.
Delegación de Coyoacán, 04510 D.F. México

A partir del estudio sistemático, taxonómico, bioestratigráfico y paleoecológico del conjunto de microfósiles calcáreos (foraminíferos, ostrácodos y nanoplanctón) recuperados en secuencias marino sedimentarias del Terciario expuestas en la Península de Baja California, ha sido posible establecer patrones paleobiogeográficos y su relación con la evolución de la península y del Golfo de California.

Se hace énfasis en el estudio de secuencias sedimentarias y/o volcanosedimentarias que están relacionadas con el proto-golfo de California tratando de establecer la edad de las primeras incursiones marinas y de las asociadas al moderno golfo de California y por otro lado, empleando como arma las afinidades paleobiogeográficas de los conjuntos, se coadyuva en la interpretación paleogeográfica de la península y del golfo. En este sentido los esfuerzos se han centrado en el estudio de algunas secuencias expuestas en las regiones de Laguna Salada, Puertecitos, San Felipe, Santa Rosalía, Bahía Asunción, El Cien-San Juan de la Costa, la región de los Cabos e islas Marías, así como algunas islas del golfo de California.

Esta información brinda un aspecto parcial de la historia y, por ello, diferentes colegas del Instituto de Geología participan en este proyecto con el estudio de las secuencias Terciarias de origen continental (paleobotánicos y palinólogos). De igual forma se colabora con colegas que investigan los diferentes aspectos geológicos, con la intención de obtener una visión más completa de los eventos asociados a la evolución de la península y del golfo así como el “momento geológico” en que pudieron ocurrir.

Por ello, es importante entender lo más claramente posible, estos procesos asociados a la evolución geológica de la margen del Golfo de California y el Salton Trough y aprovechar la experiencia de los participantes en los diferentes tópicos para enriquecer el proyecto académico que realizo.

Paleogeography of the Peninsula and the Gulf of California during Tertiary time

Ana Luisa Carreño, Instituto de Geología, Circuito Exterior, C.U., Delegación de Coyoacán, 04510 D.F. México

By means of systematic taxonomic, biostratigraphic, and paleoecological study of the association of calcareous microfossils (foraminifera, ostracods and nanoplankton) recovered in Tertiary marine sedimentary sequences exposed on the Baja California Peninsula, it has been possible to establish paleobiogeographic patterns and their relationships to the evolution of the Peninsula and the Gulf of California.

Here we emphasize the study of sedimentary or volcanosedimentary sequences that are related with the proto-Gulf of California, trying to establish the age of the first marine incursions and those associated with the modern Gulf of California. Additionally we can use as a tool the paleobiogeographic affinities of the fossil associations, to aid in the interpretation of the paleogeography of the Peninsula and the Gulf. In this sense the efforts have been concentrated in the study of some sequences exposed in the regions of Laguna Salada, Puertecitos, San Felipe, Santa Rosalía, Bahía Asunción, El Cien-San Juan de la Costa, the region of los Cabos and the Islas Marías, as well as some other islands of the Gulf of California.

This information yields a partial aspect of this history, and consequently, various colleagues of the Instituto de Geología participate in this project with the study of the Tertiary

continental sequences (paleobotany and palynology). We also collaborate with colleagues who investigate the different geological aspects, with the intention of obtaining a more complete vision of the events associated with the evolution of the peninsula and of the Gulf, as well as the “geological moment” in which these might have occurred.

Thus, it is important to understand as clearly as possible the processes associated with the geological evolution of the margins of the Gulf of California and the Salton Trough, and take advantage of the experience of participants in each of these topics in order to enrich the academic project that I am conducting.

A summary of recent seismological studies in the region of the Baja California Peninsula.

Raúl R. Castro
Department of Seismology
Earth Science Division
CICESE

Recent studies using permanent and portable seismic instrumentation in the peninsular region of Baja California have permitted to define seismicity patterns associated with active faulting. For instance, Acosta et al. (1997) studied the seismicity associated with the San Miguel fault system using a dense network of local stations installed in the valley of Ojos Negros and Frez et al. (1999) analyzed microseismicity associated with the Sierra Juarez fault. In addition, broadband seismic stations installed around the Gulf of California (Rebollar et al., 1999) are providing useful information to understand the seismotectonics of the Gulf. The data sets of these networks are also being used to study the crustal structure of the region and to infer stress orientations from observations of shear-wave anisotropy. Zuñiga et al. (1995) used digital seismograms from the seismic network RESNOM of Baja California to measure the polarization direction of S waves. For station CPX, located near the Cerro Prieto fault, they found that the preferred polarization direction (azimuth 180^0) coincides with the direction of the regional maximum compressive stress of the region. This result was also corroborated by Gonzalez (2000) using records from the strong-motion network RANM. Seismic profiles in northern Baja California have helped to constrain the crustal structure of the region. A preliminary interpretation of a seismic profile between Blythe, Arizona and Ensenada, Baja California (Nuñez-Cornu et al., 1996) gives a crustal depth of 22 km beneath the Chocolate Mountains. Another seismic profile, located along the pacific coast between Ensenada and the epicentral area of the Northridge, 1994 earthquake has been analyzed by Frez et al. (1997). More recent studies using data from a broadband seismic transect (Lewis et al., 2000) gives a crustal thickness of 33 km near the Pacific coast and 43 km beneath the western Peninsula Ranges batholith.

A summary of the most relevant results reported from different seismological studies and an overview of the seismic networks operated by the Department of Seismology of CICESE in Baja California would be presented during the workshop.

2-D INVERSION OF DC RESISTIVITY DATA FROM THE CERRO PRIETO GEOTHERMAL AREA, MEXICO

Adolfo S. Charré-Meza, Marco A. Pérez-Flores and Enrique Gómez-Treviño
Earth Sciences Division, CICESE, km 107 Carr. Tijuana-Ensenada, Ensenada, B.C., México.

The Cerro Prieto Geothermal area, one of several geothermal areas in Mexico, was the first to be developed and, at the present, it is the largest in the country (620 MW). Because of its importance, many geophysical, geochemical and geohydrological techniques have been applied in order to have a better understanding of the spatial distribution of the reservoir. From the geophysical point of view, DC resistivity and Magnetotelluric methods have demonstrated to be very successful in resolving the spatial distribution of conductivity in the subsurface. With this purpose, several field works have been conducted to collect DC resistivity data. In this way, the Mexican Commission of Electricity (CFE) collected in 1977-79 more than 411 deep Schlumberger soundings (maximum $AB/2= 5 \text{ km}$), arranged in lines. These gave us the opportunity to attempt a two-dimensional inversion of such lines. We obtained a number of images of the spatial distribution of the resistivity in the Mexicali Valley. This area is particularly interesting not only by the economical importance of the geothermal reservoir, but also by the presence of the main faults that controls the tectonics of the place. From the resistivity images we can see very coherent alignments. These are very close to the Cerro Prieto and Imperial Faults postulated by seismicity. Because of the size of the faults (cutting the crust), a very important signature is drawn in the resistivity images at any depth.

INVERSION BIDIMENSIONAL DE DATOS DE RESISTIVIDAD EN EL AREA GEOTERMICA DE CERRO PRIETO, MEXICO.

Adolfo S. Charré-Meza, Marco A. Pérez-Flores y Enrique Gómez-Treviño
División Ciencias de la Tierra, CICESE, km 107 Carr. Tijuana-Ensenada, Ensenada, B.C., México.

El área geotérmica de Cerro Prieto, una de varias áreas geotérmicas en México, fue la primera en desarrollarse y hasta hoy es la más grande del país (620 MW). Debido a su importancia, muchas técnicas geofísicas, geoquímicas y geohidrológicas se han aplicado, con el fin de tener un mejor entendimiento de la distribución espacial del reservorio. Desde el punto de vista geofísico, los métodos de resistividad de corriente directa (C.D.) y Magnetotelúrico, han demostrado ser muy exitosos para obtener la distribución espacial de conductividad bajo la superficie. Con este propósito, se llevaron a cabo varios trabajos de campo para recolectar datos de resistividad. La Comisión Federal de Electricidad (CFE) realizó en 1977-79 más de 411 sondeos Schlumberger profundos (máxima $AB/A= 5 \text{ km.}$), dispuestos en líneas. Esto nos dio la oportunidad de intentar inversión bidimensional de tales líneas. Obtuvimos varias imágenes de la distribución espacial de la resistividad en el área del Valle de Mexicali. Esta área es singularmente importante no solo por la importancia económica del reservorio geotérmico, sino también por la presencia de las principales fallas que controlan la tectónica del lugar. De las imágenes de resistividad podemos ver lineamientos muy coherentes. Estos están muy cerca de las Fallas Cerro Prieto e Imperial,

postuladas por la sismicidad. Debido al tamaño de las fallas (cortan la corteza) se puede observar una respuesta muy fuerte en la imagen de resistividad a cualquier profundidad.

Strain partitioning along non-volcanic rifted margins during the rift-drift transition

Peter Clift

Department of Geology and Geophysics

MS#22, Woods Hole Oceanographic Institution Woods Hole, MA 02543, USA

In contrast to intra-cratonic sedimentary basins, subsidence along rifted passive margins is typically much higher than might be predicted from the degree of faulting imaged by seismic reflection techniques. Even when a maximum of ~40% of additional extension that can be missed by such imaging techniques is accounted for, forward models of basins along continental margins do not closely resemble the observed sections. I believe that this discrepancy is real and that it reflects processes intrinsic to the break-up and the onset of seafloor spreading. It is noteworthy that forward models are successful in reproducing intra-continental basins, without the need to create large amounts of additional extension beyond that seen in seismic profiles. Several examples now exist to show this mismatch between predicted and observed subsidence increases towards the continent-ocean boundary (COB). I have examined rift basins located immediately ahead of propagating oceanic spreading centers that show this pattern precedes the rift-to-drift transition, at least in non-cratonic rift settings. In both the fossil Nan Con Som Basin of Vietnam and the active Woodlark Rift subsidence patterns require preferential thinning of the lower crust, exceeding that of the upper crust and lithospheric mantle. The same pattern is noticed on both conjugate passive margins in the South China Sea (i.e., South China margin and the Dangerous Grounds). The similar behavior of the conjugate margins means that application of asymmetric simple shear models to explain subsidence mis-matches on individual margin transects cannot be used to account for the regional subsidence in the South China Sea. The data from Woodlark and Nan Con Som indicate that during break-up the lower crust flows along the strike of the basin from a zone >100 km wide adjacent to the COB. Flow is possible because of the thermally juvenile, weak state of the arc-type crust in both these examples. This material must then be incorporated into the ocean crust, since there is no evidence to indicate asymmetric behavior of passive margins in these settings, i.e., the material missing from under one margin is not present its conjugate. Similarly landward flow of material is rejected due to buoyancy considerations. Whether the same mode of strain accommodation is valid in cratonic rift settings is questionable, since these may not have the weak lower crust whose mobility is the key to explaining the faulting and subsidence patterns in the arc crust basins.

Partición de la deformación a lo largo de márgenes no volcánicas de rift durante la transición rift-deriva.

Peter Clift

Department of Geology and Geophysics
MS#22, Woods Hole Oceanographic Institution Woods Hole, MA 02543, USA

En contraste con las cuencas intracratónicas, la subsidencia en la margen pasiva de un rift es típicamente mucho mayor a la subsidencia que predicen los modelos basados en el grado de fallamiento observado en imágenes de reflexión sísmica. Aún cuando un 40% de la extensión puede perderse con estas técnicas de visualización, los modelos de cuencas a lo largo de las márgenes continentales difieren de las secciones sísmicas observadas. Considero que esta discrepancia es real y que refleja procesos intrínsecos del rompimiento cortical y la dispersión oceánica. Es de notarse que los modelos reproducen con éxito cuencas intracontinentales sin necesidad de crear extensión adicional más allá de la observada en los perfiles sísmicos.

Existen ahora varios ejemplos que permiten observar esta discrepancia entre la subsidencia que predicen los modelos y la observada, la cual se incrementa hacia los límites continente-oceano (COB). He examinado cuencas de rift localizadas junto a centros de dispersión propagantes que muestran que este patrón precede la transición entre ruptura y deriva, al menos en ambientes de cuencas de rifts no cratónicos. Tanto en el rift fósil de la cuenca Nan Con Som, Vietnam, como en el rift activo de la Cuenca de Woodlark, los patrones de subsidencia requieren un adelgazamiento preferencial de la corteza inferior que excede el adelgazamiento de la corteza superior y del manto litosférico. Se ha notado el mismo patrón en ambas márgenes conjugadas en el sur del Mar de China (i.e. Mar del Sur de China y Dangerous Grounds). El comportamiento similar de las márgenes conjugadas significa que la aplicación de modelos de cizalla simple asimétrica para explicar las discrepancias en la subsidencia no pueden ser usados para explicar la subsidencia regional en el Mar del Sur de China. Los datos de la Cuenca de Woodlark y de Nan Con Som indican que durante la ruptura la corteza inferior fluyó a rumbo de la cuenca desde una zona >100 km de ancho adyacente al COB. El flujo es posible debido a las características de una corteza tipo arco, térmicamente joven y débil en ambos ejemplos. Este material debe ser incorporado en la corteza oceánica, ya que no hay evidencias que indiquen un comportamiento asimétrico de márgenes pasivas en estos ambientes; por ejemplo, el material faltante bajo una margen no está presente en el margen opuesto. De forma similar, el flujo de material hacia el continente es imposibilitado debido a consideraciones de flotación. Es cuestionable si el mismo modo de acomodamiento del esfuerzo es válido en rifts cratónicos, ya que éstos pueden no tener una corteza inferior débil cuya movilidad es la clave para explicar los patrones de fallamiento y subsidencia en cuencas con corteza engrosada por la actividad de un arco magmático.

Evolution of Stratigraphic Sequences in Multisegmented Continental Rift Basins

Juan Contreras¹ and Christopher H. Scholz²

¹ Departamento de Geología, CICESE

² Lamont-Doherty Earth Observatory of Columbia University Palisades, NY

This paper presents a series of numerical simulations of the stratigraphic evolution of continental rift basins. Here, we model the geomorphic and tectonic processes acting in this depositional environment. This contrast with the traditional approach of modeling the settling of sediments, especially in marine clastic basins. What is new in this model is that it can simulate the formation of basins with linked half-grabens, which is a fundamental feature of rift systems.

The attributes of the numerical simulations such as the overall morphology, basin architecture, drainage systems, and stratigraphy are in good agreement with digital elevation models and reflection seismic lines of the basins of the East African rift system, specifically Tanganyika and Malawi rifts.

Evolución de secuencias estratigráficas en cuencas multisegmentadas en rift continentales

Juan Contreras

Departamento de Geología, CICESE, km 107 Carretera Tijuana-Ensenada, Ensenada BC, 22860, México.

En este trabajo presentamos simulaciones numéricas de la evolución estratigráfica de cuencas de rift y modelamos los procesos geomórficos y tectónicos que actúan en los ambientes de depósito. Esta aproximación contrasta con los métodos tradicionales para modelar el depósito de sedimentos, especialmente en cuencas marinas clásticas. Lo novedoso de nuestro modelo es que puede modelar la formación de las cuencas con medios graben relacionados y unidos, lo cual es un rasgo fundamental de los sistemas de rift.

Los atributos de las simulaciones numéricas tal como la morfología general, la arquitectura de la cuenca, sistemas de drenaje y estratigrafía están en acuerdo con los modelos digitales de elevación y líneas de reflexión sísmica de las cuencas del sistema de rift africano, específicamente de los rift Tangañica y Malawi.

Crustal Thickness of the Peninsular Ranges and Gulf Extensional Province in the Californias

Steven Day, Harold Magistrale, and Jennifer Lewis

Department of Geological Sciences

San Diego State University

San Diego, California USA 92182-1020

day@moho.sdsu.edu, harold@hal.sdsu.edu

During the past six years, we have collaborated with UCSD and CICESE researchers to investigate the crustal thickness of the Peninsular Ranges of southern California and northern Baja California between $\sim 31^{\circ}\text{N}$ and $\sim 33^{\circ}45'\text{N}$, adjacent to the Salton trough and Gulf of California (Ichinose et al., 1996; Lewis et al., 2000a; 2000b). Here, we summarize these investigations. The data are teleseismic earthquakes recorded by three east-west linear arrays of temporary and permanent broadband stations. Moho Ps conversions are identified in teleseismic

receiver functions, and the timing of the converted phase is combined with tomographic crustal velocities to estimate the crustal thicknesses.

At $\sim 33^{\circ}45'N$ latitude the maximum Moho depth, ~ 37 km, occurs under the western Peninsular Ranges, shallowing (with a $\sim 10^{\circ}$ dip) under the high elevations of the eastern Peninsular Ranges to ~ 27 km at the edge of the Salton trough. At $\sim 33^{\circ}N$, Moho depths are again maximum (36-41 km) in the western Peninsular Ranges, shallowing even more steeply ($\sim 20^{\circ}$) beneath the eastern Peninsular Ranges to 25 km at the edge of the Salton trough. At $31^{\circ}N$, depth to the Moho is ~ 33 km near the Pacific coast of Baja California and increases gradually toward the east, reaching a maximum depth of ~ 43 km beneath the western part of the Peninsular Ranges batholith. The crust then thins rapidly under the topographically high eastern Peninsular Ranges and across the Main Gulf Escarpment. Crustal thickness is ~ 15 -18 km within and on the margins of the Gulf of California. The Moho shallowing beneath the eastern Peninsular Ranges represents an average apparent westward dip of $\sim 25^{\circ}$. The Moho dip beneath the eastern Peninsular Ranges increases from $\sim 10^{\circ}$ near the northern extreme of the Salton trough to $>20^{\circ}$ along the more mature portions of the rift margin.

We suggest that Moho shallowing under the eastern Peninsular Ranges reflects extensional deformation of the lower crust in response to adjacent rifting of the Gulf Extensional Province that commenced in the late Cenozoic. This deformation extends tens of kilometers west of the zone of extensional deformation observed at the surface; the western extent of lower crustal deformation may correspond to the Peninsular Ranges compositional boundary. Thinned crust underlies the topographic highs along 300 km of the eastern portion of the Peninsular Ranges, indicating that the lack of an Airy crustal root is a regional feature of the topographically high eastern ranges. A simple model demonstrates that flexural support of the topographic load can explain, within the uncertainties, the observed absolute depths and shape of the Moho. This suggests that the crust, despite being subjected to large amounts of extensional strain, maintains a significant amount of elastic strength. Support of the Peninsular Ranges topography may be achieved through a combination of flexural support and lateral density variations in the crust and/or upper mantle.

Espesor cortical de las sierras peninsulares y la Provincia Extensional del Golfo en las Californias.

Steven Day, Harold Magistrale, and Jennifer Lewis
Department of Geological Sciences
San Diego State University
San Diego, California USA 92182-1020
day@moho.sdsu.edu, harold@hal.sdsu.edu

En los últimos seis años hemos colaborado con investigadores de UCSD y CICESE para investigar los espesores de la corteza en las Sierras Peninsulares del sur de California y norte de Baja California, entre $\sim 31^{\circ}N$ y $\sim 33^{\circ}45'N$, adyacente al Salton Trough y Golfo de California (Ichinose et al., 1996; Lewis et al., 2000a; 2000b). Aquí se sintetizan esas investigaciones. Los datos son de telesismos registrados en tres arreglos lineales E-W de estaciones temporales y permanentes de banda ancha. A fin de estimar el espesor de la corteza se identificaron el Moho y las ondas Ps convertidas en las funciones de los receptores telesísmicos y el tiempo de la fase

convertida se combinó con las velocidades de la corteza estimadas con tomografía. En la latitud $\sim 33^{\circ}45'N$ la profundidad máxima al Moho (37 km) se presenta bajo la región occidental de las Sierras Peninsulares, emergiendo con un gradiente de 10° bajo las mayores elevaciones en el oriente de las Sierras Peninsulares, llegando hasta 27 km en el borde occidental del Salton Trough. En $\sim 33^{\circ}N$, las profundidades del Moho alcanzan de nuevo un máximo de 36-41 km en el oeste de las Sierras Peninsulares, emergiendo con echados aún más pronunciados ($\sim 20^{\circ}$) hacia el Este, llegando a 25 km de profundidad en el borde del Salton Trough. En los $31^{\circ}N$, la profundidad del Moho en la costa del Pacífico de Baja California es de ~ 33 km y se incrementa gradualmente hacia el este, alcanzando un máximo de 43 km bajo la parte oeste del batolito peninsular. La corteza se adelgaza hacia la parte alta de la Sierra y a través del Escarpe Principal del Golfo. El espesor de la corteza es 15-18 km en las márgenes y en el Golfo de California. Las profundidades más someras bajo la parte oriental de las Sierras Peninsulares definen una pendiente promedio de $\sim 25^{\circ}$ hacia el Oeste. El echado del Moho en el Este de las Sierras Peninsulares se incrementa de 10° cerca del extremo norte del Salton Trough a $>20^{\circ}$ a lo largo de las porciones más maduras de la margen del rift.

Sugerimos que las profundidades más someras al Moho bajo la parte Este del Batolito Peninsular refleja la deformación extensional de la corteza inferior en respuesta a la ruptura de la corteza en la Provincia Extensional del Golfo que inició en el Cenozoico Tardío. Esta deformación se extiende decenas de kilómetros al oeste de la zona de deformación extensional que se observa en la superficie; la porción occidental de la zona de extensión de la corteza inferior podría corresponder al límite composicional de las Sierras Peninsulares. Una corteza adelgazada subyace los altos topográficos a lo largo de 300 km en la porción oriental de las Sierras Peninsulares, lo que indica que la ausencia de una raíz cortical de Airy es un rasgo regional de la parte elevada de la sierra. Un modelo simple demuestra que un soporte flexural de la carga topográfica podría explicar, con alguna incertidumbre, las profundidades absolutas y la forma del Moho observadas. Esto sugiere que la corteza, a pesar de estar sujeta a una gran deformación extensional, mantiene una gran fuerza elástica. El soporte de la topografía de las Sierras Peninsulares puede alcanzarse a través de una combinación de soporte flexural y variaciones laterales de densidad en la corteza o en el manto superior.

Results From Wide Angle Airgun - Sonobuoy Profiles, UL9905

John Diebold, L-DEO Palisades, NY, 10964

48 expendable sonobuoys were deployed during the joint CICESE/US cruise UL9905. The same "GI" airgun shots that produced the high resolution multichannel seismic [MCS] reflection profiles were received by the sonobuoys, which broadcast the arrivals via FM radio. These signals were received aboard B/O ULLOA and recorded as auxiliary channels by the MCS acquisition system. Forty-two of the sonobuoys returned usable record sections, with coherent arrivals recorded at offsets as great as 10 km. Processing included low pass filtering, decimation to a sample rate of 4 milliseconds, and rasterization. 1-D interactive raytracing produces velocity-depth functions with penetration as great as 3 km. The sonobuoy-derived velocities are

much more accurate than those derived from MCS stacking velocities. Observed features include sedimentary and volcanic layering, and some underlying crustal velocities.

Resultados de Perfiles de Angulo Ancho Producidos por Cañones de Aire y Sonoboyas, UL9905

John Diebold, L-DEO Palisades, NY, 10964

48 sonoboyas desechables fueron utilizados durante el cruzero binacional (Mex-USA) *Francisco de Ulloa* 9905. Los mismos disparos de cañones de aire tipo GI (generador-inyectador), que produjeron los perfiles de sismica de reflexión multicanal (MCS) con alta resolución, se registraron por las sonoboyas, que emitieron las llegadas por radio FM. Estas señales se registraron a bordo del *B/O Ulloa* en los canales auxiliares del sistema de adquisición de datos MCS. Cuarenta y dos de las sonoboyas rindieron secciones sísmicas útiles, con llegadas coherentes registrados a hasta 10 km de distancia de la fuente. El procesado incluyó filtración, decimación de los datos a una tasa de muestrear de 4 milisegundos, y rasterización. El proceso de trazar los rayos de manera interactiva con un modelo de velocidades unidimensional produce funciones de velocidad con profundidad, con una penetración de hasta 3 km de profundidad. Las velocidades sísmicas basadas en los datos de las sonoboyas son mucho más precisas que las que se obtienen utilizando las velocidades de los “stacks” de los datos MCS. Los rasgos observados incluyen la estratificación sedimentaria y volcánica, y unas velocidades de la corteza subyacente.

GPS surveys in northern and southern Baja, implications for neotectonics

Timothy H. Dixon

University of Miami, RSMAS-MGG, 4600 Rickenbacker Cswy, Miami, FL 33149.

tdixon@rsmas.miami.edu

The Agua Blanca fault in northern Baja California, Mexico is a major right lateral strike slip fault, part of the Pacific-North America plate boundary zone; Offset Quaternary alluvial fans indicate relatively young activity on the fault, but the fault is seismically quiet at present. Seismicity is confined to the San Miguel-Vallecitos fault, a young, small offset fault to the north that is better aligned with plate motion. We conducted GPS measurements between 1993 and 1998 to better understand the relative slip rates and strain patterns around each fault. The integrated slip rate across both faults is 7 ± 1 mm/yr, and is not sensitive to the assumed rheology. Our data and models suggest that both the Agua Blanca and San Miguel-Vallecitos faults are active, however the long term slip rate estimates for the individual faults based on geodetic data are highly sensitive to the assumed rheological model. Data from transects of simultaneously occupied sites spanning the Agua Blanca fault fit simple elastic half space models of strain accumulation with rms misfits of 0.1-0.3 mm/yr. For such models, we estimate slip rates for the Agua Blanca fault between 3.2 ± 0.6 mm/yr (single fault model) and 2.3 ± 0.8 mm/yr (multiple fault model). Corresponding rates for the San Miguel-Vallecitos fault range from 4-2 mm/yr. In

contrast, when we use a model that incorporates seismic cycle effects and accounts for viscoelastic behavior beneath the brittle upper crust, we estimate a slip rate for the Agua Blanca fault of 6.2 ± 0.9 mm/yr, a factor of two higher than rates predicted by elastic half space models, with correspondingly slower rates for the San Miguel-Vallecitos fault. Incorporation of seismic cycle effects thus may be important when using geodetic data to infer long term fault slip rates. Evidence for relatively fast slip, combined with evidence that the Agua Blanca fault is in a relatively late stage in its earthquake cycle, suggests that this fault constitutes a seismic hazard. Empirical relations suggest that this fault is capable of an $M \sim 6-7$ earthquake every few hundred years.

After correction for seismic cycle effects, GPS site velocities south of the Agua Blanca fault can be compared to the overall rate of Pacific-North America motion. An accurate determination of this vector (DeMets and Dixon, 1999) indicates velocities significantly faster than the Nuvel-1A model prediction for the entire Baja California region, and seems to require slip offshore western Baja California at rates of 1-3 mm/yr on previously unidentified faults or faults thought to be inactive. These data imply that Baja California has not completed its transition to the Pacific plate. However, the offshore slip rate estimates are also sensitive to the rheological model used to account for seismic cycle effects. Assuming a purely elastic model results in relatively fast offshore slip, while assuming a viscoelastic coupling model, and assuming that the Agua Blanca fault has a long recurrence interval and is in the late stages of its earthquake cycle, results in minimal offshore slip.

Reference: DeMets, C., and T. H. Dixon, New kinematic models for Pacific-North America motion from 3 Ma to present, *Geophys. Res. Letters*, 26, 1921-1924, 1999.

Estudios de GPS en el norte y sur de Baja California, implicaciones neotectónicas

Timothy H. Dixon

University of Miami, RSMAS-MGG, 4600 Rickenbacker Cswy, Miami, FL 33149.

tdixon@rsmas.miami.edu

La falla de Agua Blanca, en el norte de Baja California, México, forma parte de la zona del límite de placas Pacífico-Norteamérica. El desplazamiento de abanicos aluviales cuaternarios indican una actividad joven en esta falla, aunque actualmente la falla es asísmica. La sismicidad está restringida a la zona de falla San Miguel-Vallecitos; una falla joven situada al norte y con una orientación al NNW más concordante con el movimiento de placas. Entre 1993 y 1998 se tomaron mediciones de GPS para entender mejor el desplazamiento relativo y el patrón de esfuerzos en cada una de estas zonas de falla. El desplazamiento integrado de ambas fallas es 7 ± 1 mm/año y no es sensible a la reología asumida en el modelo. Nuestros datos y el modelo sugieren que las fallas San Miguel y Agua Blanca son activas, sin embargo, la tasa de deslizamiento a largo plazo en cada una, según los datos geodésicos, es muy sensible al modelo reológico que se asume. Los datos de los sitios sobre la falla de Agua Blanca ocupados simultáneamente, satisfacen los modelos de un semiespacio elástico simple de acumulación de deformación, con errores "rms" de 0.1-0.3 mm/año. Estimamos tasas de movimiento de entre 3.2 ± 0.6 mm/año en la falla de Agua Blanca (modelo de una falla) y de 2.3 ± 0.8 mm/año en un modelo de falla múltiple. Los datos correspondientes a la falla San Miguel-Vallecitos varían de 4 a 2 mm/año. En contraste, cuando usamos un modelo que incorpora los efectos del ciclo

sísmico y que satisface el comportamiento viscoelástico bajo la corteza quebradiza, estimamos que la falla Agua Blanca tiene un desplazamiento de 6.2—0.9 mm/año, superior por un factor de dos al desplazamiento estimado en el modelo de simiespacio elástico, con una correspondiente disminución de las tasas de deslizamiento en la falla San Miguel. Entonces, incorporar los efectos del ciclo sísmico puede ser importante cuando se usan datos geodésicos para inferir las tasas de deslizamiento a largo plazo. Las evidencias de que la falla de Agua Blanca tiene una tasa de deslizamiento relativamente rápida, junto con las evidencias de que esta falla se encuentra en una etapa madura o tardía en su ciclo sísmico, sugiere que esta falla aún constituye un riesgo sísmico. Las relaciones empíricas sugieren que esta falla es capaz de generar un sismo M~6-7 con recurrencia de cientos de años.

Corrigiendo por efectos del ciclo sísmico, las velocidades de sitio con GPS al sur de la falla de Agua Blanca pueden compararse con la tasa de movimiento global entre Pacífico y Norteamérica. La determinación precisa de este vector de movimiento (DeMets y Dixon, 1999) indica velocidades significativamente más altas de las que predice el modelo Nuvel-1 para toda la región de Baja California. Nuestro modelo también requiere tasas de desplazamiento de 1-3 mm/año en fallas inferidas o presumiblemente inactivas a lo largo del borde continental oeste. Estos datos implican que la transferencia de la península de Baja California a la placa Pacífico no es completa. Sin embargo, la estimación de las tasas de movimiento en el mar también es sensible al modelo reológico utilizado para satisfacer los efectos del ciclo sísmico. Cuando asumimos un modelo puramente elástico se obtienen desplazamientos relativamente rápidos en las fallas del borde oeste, mientras que asumiendo un modelo viscoelástico y asumiendo intervalos de recurrencia largos en la Falla Agua Blanca y que ésta se encuentra en la etapa final de su ciclo sísmico, resulta un desplazamiento mínimo en las fallas del margen occidental de la península.

Referencia: DeMets, C., and T. H. Dixon, New kinematic models for Pacific-North America motion from 3 Ma to present, *Geophys. Res. Letters*, 26, 1921-1924, 1999.

Plio-Pleistocene Sedimentation and Tectonics in the Salton Trough: Preliminary Insights and Directions for Future Work

(Rebecca Dorsey, University of Oregon)

The Salton Trough is a large structural depression produced by oblique extension and crustal thinning within the transtensional plate-boundary zone. Since middle or late Pliocene time this basin has been translated away from the northern Gulf of California by northwestward movement on the San Andreas and related faults, becoming topographically isolated from the gulf by aggradation of deltaic deposits at the mouth of the Colorado River. The structural style of basin development is surprisingly poorly understood, but recent work suggests that the Trough evolved as a supradetachment basin above a regional east-dipping low-angle detachment fault during Pliocene and possibly into Pleistocene time (Axen and Fletcher, 1998). This has produced a large continental depocenter in the Salton Trough that filled with thousands of meters of lacustrine, deltaic, fluvial, and alluvial deposits over the past ~ 2 to 3 million years. Plio-Pleistocene stratigraphy, now exposed onland around the Salton Sea due to young deformation

and uplift, includes fine-grained deltaic deposits of the Palm Spring Formation, lacustrine strata of the Borrego and Brawley Fms, passing laterally into breccia, conglomerate, and sandstone (Canebrake and Ocotillo Fms) derived from the steep margins of the basin. I have compiled geologic maps and data from published and unpublished studies (including maps by Diblee, 1954), and have integrated sparse information about ages, lithofacies, thicknesses, and deformation styles, to help identify some of the scientific problems that need to be addressed in future studies of this region.

A large E-W trending anticline exposes the stratigraphy over an area $>400 \text{ km}^2$, from the west shore of the Salton Sea west to the Coyote Creek fault and north to the Borrego badlands. This and related smaller folds have been produced by strong N-S contraction related to the modern phase of strike-slip deformation. A major unconformity on the south limb of this anticline implies syn-depositional folding, but the timing of fold growth depends on the details of internal geometric relationships that have not been studied in adequate detail. In one good example of detailed field work that is needed, Wells (1987) documented internal unconformities on the limbs of E-W trending folds in the eastern San Felipe badlands that record folding during deposition of the Borrego Fm, $\sim 400 \text{ m}$ below its contact with the Ocotillo Fm. The Borrego-Ocotillo contact has been determined elsewhere to be $\sim 1.2 \text{ Ma}$; at a sedimentation rate of 0.5 to 1.0 mm/yr we would infer that folding was active at ~ 1.6 - 2.0 Ma , and possibly earlier. It is presently not known if these folds are driven specifically by slip on the San Jacinto zone (SJFZ), and thus, whether or not the age of earliest fold growth can be used to date initiation of the SJFZ.

Another important aspect of future work will be to analyze the stratigraphic response to temporal variations in rates of basin subsidence and sediment influx, the latter being potentially related to climate change and/or rate and geometry of uplift in source areas. Conglomerate and sandstone of the Ocotillo Fm overlie the Borrego Fm along a laterally extensive contact that records progradation of coarse detritus from basin-margin uplifts toward the regional depocenter at ~ 1.0 - 1.2 Ma . This is a unique basin-wide event that is unlikely to be the result of climate change, and may signal a change in tectonic behavior. One candidate for such a change would be initiation of the SJFZ, the timing of which is not constrained in the Salton Trough. In this scenario, Ocotillo progradation occurred because of slowing of subsidence around the margins of the Trough, which resulted from termination of slip on large normal faults and a transition to strike-slip faulting. One problem with this idea is that N-S contraction appears to have begun by ~ 1.5 - 2.0 Ma (see above). If contraction is related to strike-slip faulting, then the SJFZ was initiated long before progradation, and they would appear to be unrelated. Further complicating matters is the recent recognition that a regionally extensive nonmarine unit that contains the 0.76-Ma Bishop ash and Irvingtonian fossils (Bautista Beds) predates initiation of the SJFZ (Dorsey, 2000). Stratigraphic relationships and paleocurrent data indicate that the SJFZ was initiated about the time of or shortly after deposition of the Bishop ash. Total offset on the SJFZ is widely believed to be 25 - 30 km , which would imply an average slip rate of ~ 35 - 40 mm/yr since 0.70 Ma ; this is unreasonable and suggests a major gap in our understanding of the SJFZ. This new insight has fundamental implications for the tectonic evolution of the region, and needs to be tested and integrated with future studies.

Tectónica y sedimentación del Plio-Pleistoceno en el Salton Trough: aportaciones preliminares y orientación de investigaciones futuras

Rebecca Dorsey, University of Oregon

El Salton Trough es una gran depresión estructural producida por la extensión oblicua y el adelgazamiento de la corteza en un límite transtensivo de placas. Desde el Plioceno medio-tardío, esta cuenca ha sido trasladada tectónicamente hacia el norte del Golfo de California por el movimiento al noroeste del sistema de falla San Andrés, quedando topográficamente aislada del Golfo por la agradación de depósitos deltaicos en la desembocadura del Río Colorado. Se conoce poco del estilo estructural que controló el desarrollo de esta cuenca, pero trabajos recientes sugieren que la depresión de Salton evolucionó como una cuenca “supradetachment” sobre una falla de detachment regional con transporte al oriente durante el Plio-Pleistoceno (Axen y Fletcher, 1998). Esto produjo un gran depocentro continental en el Salton Trough que ha sido llenado con espesores kilométricos de sedimentos lacustres, deltaicos, fluviales y aluviales en los últimos 2-3 Ma. La estratigrafía del Plio-Pleistoceno, ahora expuesta alrededor del Salton por la deformación y el levantamiento recientes, incluye depósitos deltaicos de grano fino de la Fm. Palm Spring y estratos lacustres de las formaciones Borrego y Brawley que pasan lateralmente a brechas, conglomerados y areniscas de las formaciones Canebrake y Ocotillo, respectivamente, derivadas de las márgenes levantadas de la cuenca. He compilado mapas geológicos de estudios publicados y no publicados (incluyendo mapas de Diblee, 1954), y he integrado información dispersa sobre edades, litofacies, espesores y estilos de deformación con el fin de identificar los problemas científicos a resolver en futuros estudios en esa región.

Un gran pliegue anticlinal cuyo eje se orienta E-W, permite aflorar la estratigrafía en un área >400 km², desde la orilla occidental del Salton hasta la falla Coyote Creek, y al norte, hasta el malpaís de Borrego. Este y otros pliegues relacionados son producto de una fuerte contracción N-S relacionada a la fase moderna de desplazamiento lateral en las fallas. Una discordancia mayor en el flanco sur de este gran anticlinal implica plegamiento sindeposicional, aunque el tiempo en que ocurre el plegamiento podría obtenerse con un estudio detallado de las relaciones geométricas internas, lo que aun no se ha realizado. Un ejemplo del detalle del trabajo de campo necesario esta dado por un trabajo de Wells (1987) quien documentó discordancias internas en los flancos de pliegues E-W en el oriente del malpaís de San Felipe. En estos se registra el plegamiento durante el depósito de la Fm Borrego, ~400 m abajo de su contacto con la Fm Ocotillo. El contacto Borrego-Ocotillo se fechó en otros trabajos en ~1.2 Ma. Utilizando una tasa de sedimentación de 0.5-1.0 mm/año se podría inferir que el plegamiento se activó hace 1.6-2.0 Ma, o posiblemente antes. Actualmente no sabemos si los pliegues se formaron por el movimiento en la zona de Falla San Jacinto (SJFZ), y en consecuencia, desconocemos si podemos utilizar si la edad de plegamiento más joven puede utilizarse para fechar el inicio en SJFZ.

Otros aspecto importante para trabajos futuros será analizar la respuesta estratigráfica a las variaciones temporales en las tasas de subsidencia y el flujo de sedimentos a la cuenca. Esto último estaría potencialmente relacionado a cambios climáticos y/o tasas y geometría del levantamiento de las áreas de aporte. Conglomerados y areniscas de la Fm. Ocotillo sobreyacen la Fm. Borrego a lo largo de un contacto lateralmente extenso que registra la progradación de detritos de grano grueso de las márgenes levantadas de la cuenca hacia un depocentro regional hace ~1.0 –1.2 Ma. Este evento regional en la cuenca no estaría relacionado a un cambio climático, y podría indicar un cambio en el comportamiento tectónico de la cuenca. Un posible

candidato para este cambio en la sedimentación sería el inicio de la SJFZ el cual no está definido en el Salton Trough. En este escenario, la progradación de la Fm Ocotillo ocurrió debido a la disminución de la tasa de subsidencia al rededor de las márgenes del Salton Trough, lo cual debió resultar de la terminación del movimiento en las fallas normales mayores y por la transición al fallamiento transcurrente. Un problema con esta idea es que la contracción N-S parece haber iniciado hacia los 1.5-2.0 Ma, como se explicó anteriormente. Si la contracción está relacionada al fallamiento de rumbo, entonces la SJFZ inició mucho antes de la progradación y por lo tanto no estarían relacionadas. Una complicación adicional es la identificación de una unidad no marina que contiene la Toba Bishop de 0.76 Ma y fósiles del Irvingtoniano (Bautista Beds) y que antecede el inicio de SJFZ (Dorsey, 2000). Las relaciones estratigráficas y datos de paleocorrientes indican que SJFZ durante o poco después del depósito de la Toba Bishop reconocimiento. Es ampliamente aceptado que el desplazamiento total en la SJFZ es de 25-30 km, lo cual implicaría una tasa promedio de movimiento de ~35-40 mm/año en los últimos 0.7 Ma, lo cual no es razonable y sugiere un hueco importante en la comprensión de la SJFZ. Estas aportaciones e ideas tienen implicaciones fundamentales para la evolución tectónica de la región, y necesitan ser integradas y probadas con estudios futuros.

Testing the degree of correspondence between surface tectonic features and upper mantle structure and composition by study of volcanic-hosted xenoliths in the southwest U.S. Cordillera

Mihai Ducea (Univ. Arizona) and Jason Saleeby (Caltech)

Our thermobarometric, isotopic and petrogenetic data on xenoliths hosted in mid- to late Miocene volcanic centers of the central Sierra Nevada define a lower crust and mantle lithosphere keel to the Sierra Nevada batholith to a depth of at least ~125 km. These data when integrated with regional data from a natural oblique crustal section in the southern Sierra Nevada to paleodepths of ~30 km, offer a general picture of the entire Sierran batholith primary lithospheric column. Geologic and geophysical studies in the extreme southern Sierra and northern Mojave Desert indicate that the deep crust and lithospheric keel was displaced and replaced by oceanic assemblages during low-angle subduction in latest Cretaceous-Paleogene (Laramide) time. The survival of the central Sierra primary lithospheric column until Late Miocene time suggests a segmentation of the Laramide slab like that observed in the modern Andes. A number of lines of evidence suggest that the Mojave Desert region attained its unique tectonomorphic character during this Laramide slab segmentation event. We are currently testing this model by further study of deep crust-upper mantle xenoliths entrained in Miocene volcanic rocks from the southern Sierra Nevada-Mojave Desert region.

We assert that the unique geologic complexity of the southern California region in large part may be inherent from the shallow segment of the Laramide slab having been emplaced beneath the Mojave Desert region. The intact batholithic segment to the north in the greater Sierra Nevada retained its high-density keel into the modern plate tectonic regime. This keel was highly susceptible to delamination and foundering into the mantle as rifting and transform tectonics propagated into the region. In contrast the underthrust oceanic slab beneath the Mojave

province rendered the region rigid and less susceptible to transform and rift fragmentation, as compared to the eastern Sierra Nevada, and Basin and Range province to the north and the Gulf of California spreading system to the south. Seismic data suggests that there is a northwest trending corridor along the axial to eastern Sierra Nevada and westernmost Basin and Range province along which asthenospheric mantle is immediately beneath the crust at a depth of 30 to 35 km. This corridor continues southeastward into the northern Mojave Desert along the same trend as the eastern California shear zone. Our recently published thermobarometric data on upper mantle peridotite xenoliths recovered from Plio-Pleistocene volcanic rocks along the eastern Sierra segment of the corridor corroborates the seismic data by definition of an asthenospheric adiabatic PT trajectory. The eastern California shear zone is hypothesized to reflect the early phases of the breakup of this relatively rigid domain by the modern plate juncture system. We predict that active near-Moho asthenospheric mantle exists along this trend, and we further expect that future seismological studies will document the shallow asthenospheric corridor all the way to the Salton Trough-the northern tip of the Gulf of California spreading system.

Magma Plumbing and Thermal Structure Beneath Oceanic Ridges

Robert A. Dunn
Department of Geological Sciences
Box 1846 Brown University
Providence, RI 02912-1846

We review our efforts to determine the three-dimensional structure of the axial magmatic system beneath the northern East Pacific Rise (EPR) and its implications for rifting processes and crustal formation. Tomographic images of P-wave velocity structure indicate that axial magmatic systems are composed of two distinct reservoirs, one located at crustal depths and the other in the topmost mantle. Estimated melt fractions are highest in the upper reservoir. However, because of its larger cross-sectional area, the lower reservoir may contain a comparable amount of melt. Surrounding and connecting these reservoirs is a larger region of anomalous low seismic velocities indicative of elevated temperatures and a melt fraction that is lower than that in the two reservoirs. In rise-perpendicular cross-section, the magmatic system is wide in the topmost mantle (~20 km) and narrow at crustal depths (<8 km). This upward narrowing suggests that significant lateral focusing of magma toward the neovolcanic zone occurs in the crust and that this focusing is controlled by the thermal structure near the ridge. At crustal depths, thermal models derived from the seismic results are characterized by near vertical isotherms near the ridge axis and horizontal isotherms beyond, inconsistent with the predictions of a conductive geotherm. This suggests that hydrothermal cooling near the ridge axis is efficient to lower crustal depths. Along the rise, both magma reservoirs are segmented at intervals of 10-20 km, correlating with subtle changes in seafloor morphology and geology. This and other seismic studies of axial magmatic systems report a similar scale of segmentation, observations that are inconsistent with the hypothesis that tectonically defined ridge segments are supplied magma from a central location. The origin of magmatic segmentation is, as yet, unknown. It may result

from small-scale diapirs similar to those mapped in the Oman ophiolite, self-organization of vertical melt transport, or a heterogeneous mantle source. Mantle anisotropy is consistent with two-dimensional, diverging mantle flow from the ridge axis. We have not yet found any indication from mantle anisotropy for three-dimensional mantle flow beneath the ridge. Recent results from seismically undershooting the 9°03'N overlapping spreading center (OSC; a non-transform offset of the ridge axis) further underscore the disconnect between tectonic and magmatic segmentation of the EPR. We find that the low-velocity region imaged at mantle depths is continuous beneath the OSC, that the OSC does not overlie a region of reduced melt supply, and that both limbs of the overlayer share a common source of mantle-derived melt.

**GEOLOGIC SIGNIFICANCE OF REGIONAL MAGNETIC AND GRAVITY
ANOMALIES IN THE NORTHERN PART OF GULF OF CALIFORNIA
EXTENSIONAL PROVINCE, NORTHWESTERN MEXICO: PRELIMINARY
RESULTS**

Espinosa-Cardena, Juan Manuel
División de Ciencias de la Tierra, CICESE, km 107 Carrt.
Tijuana-Ensenada, B.C., 22860, México
jespinos@cicese.mx

This work presents a series of maps of Bouguer gravity and aeromagnetic anomalies. We also present a variety of filtered maps together with magnetic susceptibility and density measurements on basement-rock, as well as modeling of gravity and magnetic profiles. Our results provide significant insight in to structural architecture in the northern part of the Gulf of California Extensional Province (GCEP), which contains an active fault system product of oblique rifting between the North America and Pacific plates.

Strong gravity and magnetic anomalies trending parallel to tectonic grain of the area characterize the northern part of the GCEP. Northwest-trending magnetic and gravity gradients that cross the whole survey area, are interpreted as due to dissimilar basement magnetizations and densities across the Imperial-Cerro Prieto Strike Slip Fault System. However, positive gravity anomalies along the eastern side of this fault system, suggest gradients are probably enhanced by an edge effect. Maps of apparent magnetic susceptibility, first and second vertical derivative of gravity and magnetic field, have provide more details about the possible structural relationships of faults in this particular section of plate boundary with transform and spreading segments. The south branch of the Cerro Prieto Fault System extends toward the eastern margin of the northern Gulf of California (GC) where it splits in several parallel faults. These in turn cut a long belt of strongly magnetized volcanic rocks (?). This magnetic belt extends northwesterly reaching the southern part of Sierra El Mayor, dividing the Salton Trough of the GC. On the other hand the south branch the Imperial Fault extends southward by more than 10 km beyond its southernmost mapped trace. Positive magnetic and negative gravity anomalies along the western side of the fault may indicate episodic shifts of magma chambers, suggesting a southern prolongation of the Cerro Prieto pull-apart basin. The San Felipe Lineament (western bounding faults of original rift, ?) can be extended northward reaching eastern margin of the Laguna Salada basin, suggesting

the continuation of the Laguna Salada Fault toward the GC. The south branch of the San Hill Fault can be extended until southwestern part of the Pinacate Volcanic Field, where the Craton Margin Lineament (eastern bounding faults of original rift, ?) intercepts it. The spreading segment of Wagner basin, does not have an associate strong positive magnetic anomaly as the further north Cerro Prieto spreading center has. A bidimensional gravity/magnetic model for the upper 12-km of this area, shows the intrusion of a dike of dense (2.88 gm/cc) and strongly magnetized (0.005 cgs) basic material from upper mantle. We believe the emplacement of this mafic body is an immediate precursor to the crustal rifting process. Finally, preliminary estimations to the thickness of the magnetized crust give a 14-km value in average. This agrees with thickness crust estimations from seismic studies.

**BACKSCATTERING AND GEOPHYSICAL FEATURES OF VOLCANIC RIDGES
OFFSHORE SANTA ROSALIA, BAJA CALIFORNIA SUR, GULF OF CALIFORNIA,
MEXICO**

(1)Hubert Fabriol, (1)Luis A. Delgado-Argote, (2)Juan José Dañobeitia, (3)Diego Córdoba,
(1)Antonio González Fernandez, (1)Juan García-Abdeslem, (2)Rafael Bartolomé, (3)Beatriz
Martín-Atienza and (1)Víctor Frias-Camacho

1 División Ciencias de la Tierra, CICESE, Carr. Tijuana-Ensenada km 107, Ensenada, B.C.,
22830, México, (2) Dpto. Geofísica, Instituto Ciencias de la Tierra; Jaume Almera, CSIC, Solé i
Sabaris s/n, 08028 Barcelona, España. (3)Dpto. Geofísica, Facultad Ciencias Físicas,
Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid, España.

Volcanic ridges formed by series of volcanic edifices are identified in the central part of the Gulf of California, between Isla Tortuga and La Reforma Caldera-Santa Rosalía region. Isla Tortuga is part of the 40 km-long Tortuga Volcanic Ridge (TVR) that trends almost perpendicular to the spreading center of the Guaymas Basin. The Rosalía Volcanic Ridge (RVR), older than TVR, is characterized by volcanic structures oriented towards 310, following a fracture zone extension and the peninsular slope. It is interpreted that most of the aligned submarine volcanic edifices are developed on continental crust while Isla Tortuga lies on oceanic-like crust of the Guaymas Basin.

From a complete Bouguer anomaly map, it is observed that the alignments of gravity highs trending 310 and 290 support the volcanic and subvolcanic origin of the bathymetric highs. Volcanic curvilinear structures, lava flows and mounds were identified from backscattering images around Isla Tortuga and over a 400 m-high (Virgenes High), where the TVR and the RVR intersect. A refraction/wide-angle seismic profile crossing perpendicular to the Virgenes High, together with gravity and magnetic data indicate the presence of shallow intrusive bodies presumably of basaltic or andesitic composition. It is inferred that most volcanic edifices along the ridges have similar internal structures.

We suggest that the growth of different segments of the ridges have a volcano-tectonic origin. The older Rosalía Volcanic Ridge lies along the extension of a fracture zone and it probably is associated with Pliocene NE-SW extension.

RASGOS GEOFISICOS Y DE “BACKSCATTERING” DE CRESTAS VOLCÁNICAS EN LA REGIÓN MARINA FRENTE A SANTA ROSALÍA, BAJA CALIFORNIA SUR, GOLFO DE CALIFORNIA, MÉXICO

(1)Hubert Fabriol, (1)Luis A. Delgado-Argote, (2)Juan José Dañobeitia, (3)Diego Córdoba, (1)Antonio González, (1)Juan García-Abdeslem, (2)Rafael Bartolomé, (3)Beatriz Martín-Atienza and (1)Víctor Frías-Camacho

1 División Ciencias de la Tierra, CICESE, Carr. Tijuana-Ensenada km 107, Ensenada, B.C., 22830, México, (2) Dpto. Geofísica, Instituto Ciencias de la Tierra; Jaume Almera, CSIC, Solé i Sabaris s/n, 08028 Barcelona, España. (3)Dpto. Geofísica, Facultad Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid, España.

Se identificaron crestas formadas por edificios volcánicos en la parte central del Golfo de California, entre Isla Tortuga y la región de Caldera La Reforma-Santa Rosalía. Isla Tortuga es parte de la Cresta Volcánica Tortuga (TVR), de 40 km de largo, que se orienta casi perpendicularmente al centro de dispersión de la Cuenca Guaymas. La Cresta Volcánica de Rosalía (RVR), más antigua que TVR, se caracteriza por estructuras volcánicas orientadas 310°, siguiendo la proyección de una zona de fractura y el talud peninsular. Se interpreta que la mayoría de los edificios volcánicos submarinos alineados se desarrollaron en corteza continental, mientras que Isla Tortuga yace sobre corteza de tipo oceánico de la Cuenca Guaymas.

A partir de un mapa de anomalías de Bouger se observa que los alineamientos de los altos gravimétricos se orientan 310° y 290° lo que es consistente con el origen subvolcánico de los altos gravimétricos. En las imágenes de “backscattering” se interpretaron estructuras volcánicas curvilíneas, flujos de lava y montículos alrededor de Isla Tortuga y en el Alto Vírgenes que se eleva ~400 m sobre el fondo y que se ubica en la intersección de TVR y RVR. Un perfil sísmico de refracción-gran ángulo perpendicular al Alto Vírgenes y datos magnéticos y gravimétricos indican la presencia de intrusivos someros de composición presumiblemente basáltica o andesítica. Se infiere que la mayoría de los edificios volcánicos a lo largo de estas crestas tienen una estructura interna similar.

Sugerimos que el crecimiento de los segmentos de las crestas tienen un origen volcanotectónico. El más antiguo es la Cresta Volcánica Rosalía que se ubica en la proyección de una zona de fractura y está posiblemente asociada a la extensión pliocénica NE-SW.

TIMING OF IGNIMBRITE FLARE UP, KINEMATICS AND MECHANISM OF DEFORMATION IN THE SOUTHWESTERN SIERRA MADRE OCCIDENTAL: IMPLICATIONS FOR THE REMOVAL OF THE FARALLON SLAB AND THE OPENING OF THE SOUTHERN GULF OF CALIFORNIA

Luca Ferrari^{1*}, Margarita Lopez-Martínez², José Rosas-Elguera³

¹Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, luca@geologia.unam.mx

² Departamento de Geología, CICESE, marlopez@cicese.mx

The eastern margin of the Gulf of California represents the best place to study the long history of magmatism and extension which eventually led to the formation of this new oceanic basin. The region is mostly covered by the Sierra Madre Occidental (SMO), the largest silicic volcanic province on earth. Previous studies recognized that most of the silicic volcanism occurred in early Oligocene (32-28 Ma) throughout the province, and in early Miocene (~23 Ma) in the western part of the Durango-Mazatlán transect. They also indicate that extension initiated as early as late Oligocene both in the north and in the south. Here we present new geologic and geochronologic data which define the timing of silicic volcanism and extension as well as the tectonic setting of the poorly known southwestern SMO, allowing to fill the gap in the geologic reconnaissance of this volcanic province and to analyze the temporal pattern of ignimbrite flare up and extension at a global scale.

The northeastern corner of our study region is covered by 32 to 28 Ma ignimbrites and domes, locally covered by conglomerate, red sandstones and mafic lavas. The southwestern part is dominated by two ignimbrite successions, named Santa Lucia and Nayar, each with Ar/Ar ages undistinguishable at the 2σ level which cluster at 23 and 21 Ma respectively. Together with the El Salto ignimbrite succession, exposed over 100 km to the north in the Durango-Mazatlán transect, and other silicic rocks to the southeast in the states of Jalisco and Michoacán, the Santa Lucia succession defines a NE trending belt of ~23 Ma old ignimbrites. The Nayar ignimbrite succession covers at least ~5,000 km² and has an aggregated maximum thickness of ~1000 m. If correlated with distal facies ash flows exposed in southern Baja California it delineates a second, ~21 Ma old, belt of ignimbrites located southwest of the 23 Ma one. Large extensional structures, mostly parallel to the axis of the volcanic arc, affect the whole area and shortly postdate the peak of magmatic activity. In the 23 Ma old ignimbrite belt they consist of regularly-spaced graben structures with a NNE to N-S orientation and developed in the 23-21 Ma time span. The small amount of extension (~8%) accommodated by these fault systems together with geometric considerations suggest that they are probably produced by the arching of the crust following magmatic intrusion at depth. Large NNW trending listric normal fault systems, with up to 2.5 km of vertical displacement, and a belt of left-lateral transpressional folds affect the 21 Ma old ignimbrite belt. The spatial distribution, the orientation and the kinematics of these structures suggest that they are part of the complex deformation accompanying the initial rifting of the Gulf of California, which therefore would be as old as middle Miocene in this area. As a whole the locus of ignimbrite flare up and extension converged from NW, NE and SW toward the southwestern part of the SMO, which faces the last remnant of the Farallon plate to be subducted off Baja California (Magdalena microplate).

The remarkable synchronicity of ignimbrite flare up and extension on a scale of hundreds of km ask for a common, plate tectonics mechanism. We noted that the area affected by the 23-21 Ma episode can be roughly correlated to the upper mantle region where seismic tomography imaged two NNW trending and parallel fragments of the Farallon slab. We propose that the 23-21 episode of ignimbrite flare up may have been driven by the rupture and detachment of the innermost part of the Farallon slab. The zone of detachment was probably converging toward the southwestern part of the SMO. Here, hotter asthenospheric material would have impacted the North America lithosphere producing partial melting of the lower crust. Deprived of a large part of its subducted slab, the Farallon plate could have reduced its relative convergence velocity; the

leading edge of the slab may have start to founder, producing a trench retreat and extension in the upper plate.

EDAD DEL VOLCANISMO IGIMBRITICO, CINEMÁTICA Y MECANISMOS DE DEFORMACIÓN EN LA PARTE SUROESTE DE LA SIERRA MADRE OCCIDENTAL: IMPLICACIONES PARA LA REMOCIÓN DEL *SLAB* DE LA PLACA FARALLÓN Y LA APERTURA DE LA PARTE SUR DEL GOLFO DE CALIFORNIA

Luca Ferrari^{1*}, Margarita López-Martínez², José Rosas-Elguera³

¹Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, luca@geologia.unam.mx

² Departamento de Geología, CICESE, marlopez@cicese.mx

³Centro de Ciencias de la Tierra, Universidad de Guadalajara, jrosas@quantum.ucting.udg.mx

La margen oriental del Golfo de California representa el lugar mejor para estudiar la larga historia del magmatismo y extensión que finalmente llevó a la formación del de este nueva cuenca oceánica. Esta región está cubierta en gran parte por la Sierra Madre Occidental (SMO), la mayor provincia volcánica silícica en la Tierra. Estudios previos reconocieron que la mayoría del volcanismo silícico tuvo lugar en el Oligoceno temprano (32-28 Ma) a lo largo de toda la provincia, y en Mioceno temprano (~23 Ma) en la parte occidental del transecto Durango-Mazatlán. También se sabe que la extensión inició en Oligoceno tanto en la parte norte como en la parte sur de la SMO. Presentamos nuevos datos geológicos y geocronológicos que definen la edad del volcanismo ignimbrítico y de la extensión así como el marco tectónico de la parte suroeste de la SMO, prácticamente desconocida en la literatura. Esto nos permite de llenar el hueco en el reconocimiento geológico de esta provincia volcánica y de analizar el patrón espacio-temporal del volcanismo y la extensión a escala global.

La parte nororiental de la región estudiada está cubierta por ignimbritas y domos riolíticos de 32 a 28 Ma, localmente cubiertos por conglomerados, areniscas rojas y lavas máficas. La parte suroccidental está dominada por dos secuencias ignimbritas, que denominamos Santa Lucia y Nayar, cada una con edades Ar/Ar indistinguibles dentro del error experimental, y que se agrupan a 23 y 21 Ma respectivamente. Junto con la secuencia ignimbrítica de El Salto, expuesta mas de 100 km al norte en el transecto Durango-Mazatlán, y otras rocas silícicas mas al sueste en Jalisco y Michoacán, la secuencia de Santa Lucia define una faja de dirección NE de ignimbrita de ~23 Ma. La secuencia ignimbrítica del Nayar cubre por lo menos ~5,000 km² y tiene un espesor máximo de ~1000 m. Al correlacionarse con facies distales de ignimbritas expuestas en Baja California Sur delinearía una segunda faja de ignimbrita de ~21 Ma ubicada al suroeste de la de 23 Ma. Grandes estructuras extensionales, en su mayoría paralela al eje del arco volcánico, afectan toda el área y postdatan ligeramente el pico de la actividad magmática. En la faja de ignimbritas de 23 Ma se observan graben espaciados con regularidad y con dirección NNE a N-S desarrollados entre 23 y 21 Ma. La cantidad de extensión limitada (~8%) acomodada por estos sistemas de fallas, junto con consideraciones geométricas sugiere que estas fueron probablemente producidas por el combamiento de la corteza que siguió una intrusión magmática en profundidad. La faja de ignimbritas de 21 Ma está afectada por sistemas de fallas listricas de dirección NNO, con desplazamiento vertical de hasta 2.5 km, y por una sistema de pliegues producido por transgresión izquierda. La distribución espacial, la orientación y la cinemática de

estas estructuras sugiere que estas son partes de la compleja deformación que acompañó el inicio del *rifting* del Golfo de California, y que entonces en este área empezaría ya en el Mioceno medio. En conjunto el pico del volcanismo ignimbrítico y de la extensión parece converge desde NO, NE y SO hacia la parte suroeste de la SMO. Esta región se ubica en correspondencia del último remanente de la placa Farallón subducido afuera de Baja California (microplaca Magdalena).

La remarcable contemporaneidad del volcanismo ignimbrítico y de la extensión a escala de cientos de km requiere un mecanismo común, a nivel de tectónica de placas. El área afectada por el episodio de 23-21 Ma corresponde con la región del manto superior donde la tomografía sísmica detecta dos fragmentos paralelos de dirección NNO del *slab* de la placa Farallón. Proponemos que el volcanismo ignimbrítico de 23-21 Ma pueda haber sido controlado por la ruptura y el despegue de la parte más profunda del *slab* Farallón. La zona de despegue fue propagándose y convergiendo hacia la parte suroeste de la SMO. En esta región material más caliente de origen astenosférico habría impactado la litósfera de Norteamérica produciendo una fusión parcial de la corteza inferior. Privado de una gran parte de su *slab* la placa Farallón pudiera haber disminuido su velocidad de convergencia relativa y su parte subducida habría empezado a hundirse produciendo un retroceso de la trinchera y extensión en la placa superior.

Large-scale fluid circulation in Alarcon Basin: evidence from seafloor heat flow, pore-fluid geochemistry, and seismic data and numerical models

A T Fisher, E R Giambalvo (Earth Sciences Department, University of California, Santa Cruz, CA 95064; (831) 459-5598; afisher@es.ucsc.edu)

M Kastner and J G Sclater, (Geological Research Division, Scripps Institution of Oceanography, La Jolla, CA 92093)

New seismic, heat flow, sediment and pore-fluid geochemistry data from the east flank of Alarcon Ridge, at the mouth of the Gulf of California, provide evidence for vigorous hydrothermal circulation within young oceanic crust formed at a moderate-rate spreading center. Data and samples were collected 9 to 20 km from the ridge axis to assess the hydrologic state of 0.30 to 0.65 Ma seafloor. Conductive heat flow values are 15-55% of that input at the base of the lithosphere. Heat flow is highest near the center of a sediment-covered trough, and lowest along the trough margins, suggesting that trough-bounding faults and basement exposures may help to focus hydrothermal recharge.

Sediment and pore fluid geochemistry data indicate that conditions within the shallow sediments are dominantly diffusive and reactive in two locations, but at other sites where cores were collected, data suggest that bottom seawater recharges through the thin sediment layer with an average velocity of 0.9cm/yr. Seafloor heat flow appears to be entirely conductive; this could result from fluid recharge being difficult to detect with short heat flow probes, or from velocities being too low to perturb shallow thermal gradients. Fluid recharge through sediments requires that basement is underpressured relative to hydrostatic conditions.

The heat flow deficit along the 11-km Alarcon Basin transect averages 440 mW/m², equivalent to heat output of 5 MW per kilometer of spreading axis. This heat output is similar to the combined focused and diffusive heat output of a single basement outcrop on the east flank of Juan de Fuca Ridge, and suggests that sites of concentrated heat and fluid outflow may exist on the east flank of Alarcon Ridge.

Circulación de fluidos a gran escala en la Cuenca de Alarcón: evidencias a partir de datos de flujo de calor en piso oceánico, geoquímica de fluidos intersticiales, datos sísmicos y modelos numéricos

A T Fisher, E R Giambalvo (Earth Sciences Department, University of California, Santa Cruz, CA 95064; (831) 459-5598; afisher@es.ucsc.edu)

M Kastner and J G Sclater, (Geological Research Division, Scripps Institution of Oceanography, La Jolla, CA 92093)

Datos nuevos de sismicidad, flujo de calor, sedimentos y geoquímica de fluidos intersticiales de la margen oriental de la Dorsal de Alarcón, en la boca del Golfo de California, evidencian una circulación hidrotermal vigorosa dentro de la corteza oceánica joven formada a velocidades de dispersión moderadas. Los datos y las muestras se colectaron a una distancia de 9 a 20 km del eje de la dorsal, para evaluar el estado hidrológico del piso oceánico con una edad entre 0.30 a 0.65 Ma. Los valores del flujo de calor conductivo representan entre el 15% al 55% del flujo que entra en la base de la litósfera. El flujo de calor es mayor cerca del centro de una fosa cubierta con sedimentos y menor a lo largo de los márgenes de ésta, sugiriendo que las fallas que limitan la fosa y los afloramientos de basamento pueden ayudar a enfocar la recarga hidrotermal.

Datos geoquímicos de sedimentos y de fluidos de poro indican que las condiciones de flujo de calor dentro de los sedimentos someros, son principalmente difusivas y reactivas en dos localidades; sin embargo, en otros sitios donde se obtuvieron núcleos, los datos sugieren que la recarga del agua del fondo marino es a través de la capa delgada de sedimentos a una velocidad promedio de 0.9 cm/año. El flujo de calor del piso oceánico parece ser completamente conductivo, lo cual se puede atribuir, ya sea, a las dificultades para detectar la recarga de fluidos sobre una distancia vertical muy corta; o, a la presencia de velocidades hidráulicas tan bajas que no afectan los gradientes térmicos someros. La recarga de fluidos a través de los sedimentos requiere que la presión en el basamento sea relativamente menor a los valores hidrostáticos.

El déficit del flujo de calor a lo largo de los 11 km del transecto de la Cuenca de Alarcón tiene un promedio de 440 mW/m², el equivalente a una producción de calor de 5 MW por kilómetro de dorsal. Dicho valor de producción es similar al calor producido (por flujo enfocado y difusivo) en un afloramiento de basamento en el flanco oriental de la Dorsal de Juan de Fuca, lo que sugiere que pueden existir sitios de flujo de fluidos y de calor concentrado en el flanco oriental de la Dorsal de Alarcón.

QUATERNARY AND NEOGENE SLIP HISTORY OF THE BAJA-PACIFIC PLATE MARGIN: BAHÍA MAGDALENA AND THE SOUTHWESTERN BORDERLAND OF BAJA CALIFORNIA

¹ Fletcher, J.M., ² Eakins, B.W., ³ Sedlock, R.L., ¹ Mendoza-Borunda, R., ¹ Walter, R.C., ⁴ Edwards, R.L., ⁵ Dixon, T.H.

¹CICESE, Km107 Carr. Tij-Ens, Ensenada, Baja California, MX 22830

²Scripps Institution of Oceanography, Geological Sciences, Mail Code 0208, 9500 Gilman Drive, La Jolla, CA 92093-0208

³San Jose State University, Department of Geology, San Jose, CA 95192-0102

⁴University of Minnesota, Department of Geology and Geophysics, 310 Pillsbury Drive, S.E., Minneapolis, MN 55455

⁵University of Miami, RSMAS, Division of Marine Geology and Geophysics, 4600 Rickenbacker Causeway, Miami, FL 33149-109

The continental borderland of southern Baja California (BC) is cut by an extensive array of active faults that accommodate slip between BC and the Pacific plate. Most seismic activity is associated with the easternmost strands of the array, which are exceptionally well exposed in the Bahía Magdalena (BM) region. The islands of BM trend parallel to the Baja coast and are bounded on both sides by NW-striking Neogene faults. Faults on the SW margins strike N50°-60°W, dip moderately to steeply in both directions and accommodate normal-dextral slip. A stair-stepping array of Quaternary scarps that dip NE and strike N0°-80°W define the irregular NE margin of Isla Santa Margarita (ISM). The scarp array contains an undulating NE-dipping detachment in its footwall and is aligned with a major NE-facing bathymetric escarpment that can be traced for ~350 km. Therefore we propose that the scarps represent the latest manifestation of slip across a major Neogene structure. Faults along both margins of the islands yield subhorizontal extensional kinematic axes that trend N60°E. Marine fossils are found in unconsolidated sand and gravel deposits at some of the highest elevations (350-500 m) of both islands of BM, which suggests that the islands emerged from below sea level in Quaternary time. Significant Quaternary slip across borderland faults demonstrates that BC is a microplate moving independently of both the Pacific and North American plates. This component of modern slip would make the total Pacific-North American plate motion vector faster and more westerly than estimates based on spreading rates at the mouth of the Gulf of California (GC).

The total Neogene slip across the borderland faults is constrained by the ~200 km offset of the Magdalena fan from the Los Cabos block, which is its closest possible source terrane. Of the remaining ~400 km of post 12 Ma plate motion, only ~265 km has occurred since 6.4 Ma (Oskin and Stock 1999). This suggests that early faulting in the GC from 12 to 6 Ma accommodated over 100 km of transform-parallel shear. Therefore, these slip-budget calculations and the presence of major normal and oblique-slip faults in the borderland indicate that plate margin deformation was never regionally partitioned into strike-slip faulting in the borderland and extension in the GC as previously thought.

Historia del desplazamiento Neogeno y Cuaternario del margen Baja-Placa Pacífico: Bahía Magdalena y el borde continental de Baja California.

¹ Fletcher, J.M., ² Eakins, B.W., ³ Sedlock, R.L., ¹ Mendoza-Borunda, R., ¹ Walter, R.C., ⁴ Edwards, R.L., ⁵ Dixon, T.H.

¹CICESE, Km107 Carr. Tij-Ens, Ensenada, Baja California, MX 22830

² Scripps Institution of Oceanography, Geological Sciences, Mail Code 0208, 9500 Gilman Drive, La Jolla, CA 92093-0208

³San Jose State University, Department of Geology, San Jose, CA 95192-0102

⁴University of Minnesota, Department of Geology and Geophysics, 310 Pillsbury Drive, S.E., Minneapolis, MN 55455

⁵University of Miami, RSMAS, Division of Marine Geology and Geophysics, 4600 Rickenbacker Causeway, Miami, FL 33149-109

El borde continental de Baja California Sur (BC) está cortado por un arreglo de fallas activas que acomodan el desplazamiento entre BC y la placa Pacífico. La mayor actividad sísmica se asocia a las fallas orientales de este arreglo, las cuales están muy bien expuestas en la región de Bahía Magdalena (BM). La isla BM se alinea paralela a la costa de Baja California y está limitada en ambos lados por fallas neogénicas de rumbo NW. Las fallas en el margen SW se orientan N50°-60°W, buzando moderada a pronunciadamente en ambas direcciones y acomodan desplazamiento normal y dextral. Un arreglo escalonado de escarpes buzando al NE con rumbo N0°-80°W definen la margen irregular NE de Isla Santa Margarita (ISM). El arreglo de escarpes contiene un “detachment” buzando al NE en el bloque de piso y está alineado con un gran escarpe batimétrico con pendiente al NE el cual puede seguirse ~350 km. En consecuencia, proponemos que los escarpes representan la manifestación más reciente del desplazamiento de una estructura neogénica mayor. Las fallas en ambos márgenes de las islas proporcionan ejes cinemáticos extensionales y subhorizontales con tendencia al N60°E. Depósitos de gravas y arenas no consolidadas contienen fósiles marinos a elevaciones entre 350 y 500 m en ambas islas en BM, lo que sugiere que las islas emergieron durante el Cuaternario. El desplazamiento Cuaternario significativo a través de las fallas en el borde continental demuestran que BC es una microplaca con movimiento independiente de las placas Pacífico y Norteamérica. Esta componente moderna de movimiento haría que el vector de movimiento total Pacífico-Norteamérica sea mayor y más hacia el oeste que lo estimado basado en tasas de dispersión en la boca del Golfo de California (GC).

El desplazamiento Neógeno total a través de las fallas del borde continental está constreñido por el desplazamiento de ~200 km del abanico Magdalena con respecto al Bloque de los Cabos, que es el posible terreno fuente más cercano. De los ~400 km restantes de movimiento de placas posterior a los 12 Ma, solo ~265 km han ocurrido desde 6.4 Ma (Oskin and Stock 1999). Esto sugiere que el fallamiento temprano en el GC de 12 a 6 Ma fue acomodado en una zona de 100 km de cizalla paralela a las fallas transformes. Por lo tanto, este balance de movimiento y la presencia de fallas mayores con desplazamiento normal y oblicuo en el borde continental indican que la deformación en el margen de placas no se repartió entre fallamiento de rumbo en el borde continental y extensión en el GC, como se ha pensado hasta ahora.

Geochemistry of the Rosarito Beach Fm., northern Baja California

L. Forsythe (CICESE) and D. Pyle (COAS-Oregon State University)

The Rosarito Beach Formation crops out along the northern coast of Baja California from the city of Tijuana south to at least the city of Ensenada as a package of mafic lava flows and tuffs. K-Ar age dating suggests that volcanism in the area may have spanned at least 2 m.y. and been at least partially submarine. The age of volcanism, 14-16 Ma, lies within (toward the end of?) the transition period from subduction of the Farallon plate under the field area to welding of the Baja peninsula to the Pacific/Farallon remnants and jump of the North America/Pacific plate boundary eastward to the Gulf of California. Rosarito Beach is coeval to volcanism to the east of the Peninsular Ranges Batholith, such as the northern Sierra Juarez volcanic field, which has arc-like geochemical signatures (incompatible element enrichment and Nb anomalies) suggesting that either subduction processes or subduction-modified sources were involved in their evolution.

New trace element data is now available for representative Rosarito Beach basaltic andesite lavas which also suggest an enriched component such as subduction modified lithosphere may have been present. Extreme to moderate alteration in many of the lava units complicates understanding the source and processes involved in their formation and evolution but modeling now underway will hopefully provide a window through this alteration and allow better interpretation of the tectonic regime active during this time whether active or waning subduction, or alternatively an early extensional episode. If subduction related, then Rosarito Beach should represent a fore-arc facies of the coeval arc volcanism located in the northern Sierra Juarez.

Geoquímica de la Formación Rosarito Beach, norte de Baja California

L. Forsythe (CICESE) and D. Pyle (COAS-Oregon State University)

La Formación Rosarito Beach aflora a lo largo de la costa norte de Baja California, desde Tijuana hasta Ensenada, como un paquete de flujos de máficos de lava y tobas. El fechamiento por K-Ar sugiere que el volcanismo en esa área pudo haber ocurrido en 2 Ma y fue, al menos, parcialmente submarino. La edad del volcanismo, 14-16 Ma, se ubica hacia el final de (?) el período de transición de la subducción de la Placa Farallón bajo el área de estudio que culminó con la captura y acoplamiento de la península de Baja California a los remanentes de la placa Pacífico-Farallón y con el salto del límite Pacífico-Norteamérica hacia el Golfo de California al Este. El volcanismo de la Fm. Rosarito Beach es contemporáneo con el volcanismo al oriente del Batolito Peninsular, como el campo volcánico de Sierra Juárez, el cual tiene una firma geoquímica de arco (enriquecimiento en elementos incompatibles y anomalías de Nb) sugiriendo que en su evolución están involucrados procesos de subducción o una fuente modificada por la subducción.

Actualmente tenemos nuevos datos de elementos traza de lavas de andesita basáltica que también sugieren una fuente enriquecida posiblemente de la litosfera modificada por la subducción. La alteración severa a moderada de estas lavas complican la interpretación y la comprensión de la fuente y los procesos involucrados en su formación y evolución. No obstante, esperamos que el modelado, actualmente en curso, permitirá ver a través de la alteración y permitirá una mejor interpretación del régimen tectónico al que se asocia el volcanismo, sea subducción terminal o

alternativamente, un episodio de extensión temprana. Si está relacionada a la subducción, la Fm. Rosarito Beach representaría facie de antearco junto con el volcanismo de arco localizado en el norte de Sierra Juárez.

ESTUDIOS DE ESTRUCTURAS SÍSMICAS Y DE SISMOTECTÓNICA EN EL NORTE DE BAJA CALIFORNIA.

J. Frez, J. González-García, A. Nava, J. Acosta, H. Fabriol¹ y M. Alvarez², Depto. de Sismología, Div. Ciencias de la Tierra, CICESE, Km. 107 Carret. Tijuana-Ensenada, Ensenada, B. C., C. P. 22860, ¹BRMG-PAC, Francia,

²Centro de Instrumentación IRIS/PASSCAL, Socorro, New México, E.U.A.

Entre 1995 y 1997, realizamos estudios de refracción sísmica para el estudio de la estructura de la corteza y de los primeros kilómetros del manto superior. El perfil más importante es uno, directo y reverso, entre Ensenada, B. C. (tiro de 1,000 kg realizado en el mar) y Blythe, Arizona. Los datos consisten en sismogramas digitales, tres componentes de alrededor de 30 estaciones para cada perfil los que fueron complementados con sismogramas de las redes regionales permanentes. En esta presentación, entregamos resultados de la interpretación de estos datos. Resultados anteriores, particularmente de refracción, constriñen la interpretación debido a la indeterminación en la formación de modelos. El área de estudio cubre tres regiones: a) la Cordillera Peninsular en Baja California, b) la Cuenca Salton en ambas Californias y c) las Montañas Chocolate en el Sur de California. Existe otro perfil no reverso que une Ensenada y Puertecitos en la Costa del Golfo de California del cual se entregará sólo una descripción de la base de datos.

Entre 1997 y 2000, se han instalado redes locales de 12 a 30 estaciones (Refteks, tres componentes, periodo corto, grabación digital por disparo, 125 m/s) en diversos lugares del norte de Baja California: Zona Sísmica de Mexicali, Valle Ojos Negros, falla San Miguel, falla Sierra Juárez (cubrimiento parcial), traslape entre las fallas San Miguel y Vallecitos, costa entre Salsipuedes y sur de Ensenada. El objetivo inmediato es obtener una base de datos de buena calidad que permita determinaciones precisas y exactas de profundidades, mecanismos focales, magnitudes y otros parámetros sísmicos. En forma mediata, se trata de estudiar la sismotectónica de la región, problemas relacionados con la autosimilaridad (o el quiebre correspondiente) de las distribuciones de los parámetros señalados, estudios de estructuras sísmicas y de transmisión de ondas en medios heterogéneos. En esta presentación, entregamos un resumen de los resultados alcanzados hasta ahora. En particular, se analizan las distribuciones de profundidad, mecanismos focales sísmicos y magnitudes en las regiones estudiadas. También se discute las indicaciones de alineaciones de sismicidad que parecen existir entre los dos sistemas principales de la región: el compuesto por las fallas Cerro Prieto/Imperial y el de San Miguel.

STUDIES OF SEISMIC STRUCTURES AND SEISMOTECTONICS IN NORTHERN BAJA CALIFORNIA

J. Frez, J. González-García, A. Nava, J. Acosta, H. Fabriol¹ y M. Alvarez², Depto. de Sismología, Div. Ciencias de la Tierra, CICESE, Km. 107 Carret. Tijuana-Ensenada, Ensenada, B. C., C. P. 22860, ¹BRMG-PAC, Francia,

²Centro de Instrumentación IRIS/PASSCAL, Socorro, New México, E.U.A.

Between 1995 and 1997, we conducted seismic refraction experiments for study of the structure of the crust and the top kilometers of the upper mantle. The most important profile is a reversed line between Ensenada, B.C. and Blythe, Arizona, which used as its source a 1,000 kg marine shot. The data comprise digital 3-component seismograms from about 30 stations per profile. These were complemented with seismograms from the permanent regional seismic networks. In this presentation we show results of the interpretation of these data. Previous results, particularly those based on refraction, constrain the interpretation due to ambiguity among different models. The study areas covers three regions: a) the Peninsular Ranges of Baja California; b) the Salton Basin on both sides of the border; c) the Chocolate Mountains in southern California. There is another, non-reversed profile between Ensenada and Puertecitos on the coast of the Gulf of California, of which we will give only a description of the database.

Between 1997 and 2000 we have installed local, temporary networks of 12-30 stations (Refteks, short period, 3 components, triggered digital recording, 125 m/s) in various locations of northern Baja California: the Mexicali seismic zone, the Ojos Negros valley, the San Miguel fault, the sierra Juárez fault (partial coverage), the overlap zone between the San Miguel and Vallecitos faults, and the coast between Salsipuedes and the south of Ensenada. The immediate objective is to obtain a high-quality database that permits us to do precise and exact determinations of depth, focal mechanisms, magnitudes, and other seismic parameters. We also will use these data to study the seismotectonics of the region, problems related to the self-similarity (or corresponding break) in the distributions of the various parameters, determine the seismic structures and study wave transmission in heterogeneous media. In this presentation we present a summary of the results achieved thus far. In particular, we analyze the distribution of depths, magnitudes, and focal mechanisms of the earthquakes in the studied regions. We will also discuss the evidence for lineaments of seismicity that appear to exist between the two principal fault systems of the region: that of the Cerro Prieto/Imperial faults, and the San Miguel fault system.

A DIFFUSE PLATE BOUNDARY IN NORTHERN BAJA: IMPLICATIONS OF CRUSTAL DEFORMATION OBSERVATIONS AND GEODYNAMIC MODELING FOR STRAIN PARTITIONING IN CONTINENTAL RIFTING

FURLONG, Kevin P., Geodynamics Research Group, Geosciences, Penn State University, University Park, PA, 16802; KEVIN@GEODYN.PSU.EDU; DIXON, Tim, RSMAS, University of Miami, Miami, FL 33149; MALSERVISI, Rocco, Penn State University. DECAIX, Julien, RSMAS, University of Miami

Along western North America, the broad plate boundary zone between the Pacific and North America often shows the partitioning of strain into discrete sub-parallel shear zones. In northern Baja California ~ 39 mm/yr relative plate motion occurs on the Cerro Prieto Fault (part of the plate boundary structure through the Gulf of California) and ~ 6 mm/yr occurs across the Agua Blanca and San Miguel-Valecitos faults. The two major faults in this region have significantly different orientations, and are at different stages in the earthquake cycle. Because the fault orientations differ by approximately 25° ; there may be biases introduced into interpretations of strain partitioning by using 2-D and 2-D out-of-plane models. We have used a fully 3-D visco-elastic finite element model (FEM) to investigate the effects of fault zone geometry. In the FEM model the integrated fault motion is applied as a boundary condition, faults are specified, and earthquakes are simulated by unlocking the faults and specifying the co-seismic displacement during the appropriate time-steps in the model. The partitioning of deformation onto the two fault systems (the Agua Blanca and San Miguel-Valecitos) occurs based on model rheology, fault geometry, and stage in the earthquake cycle. Our results indicate that if the faults have similar rheologic properties approximately 75% of the motion occurs on the San Miguel system and 25% on the Agua Blanca. Although this is compatible with the recent seismicity patterns, it is less consistent with the GPS data. If the Agua Blanca is a significantly weaker fault, then (in spite of its misalignment) the deformation partitions approximately equally onto the two faults, more compatible with the GPS observations. Linking the displacements along these faults to the spreading in the Gulf of California and to the on-land extension of the rifting requires an improved determination of the kinematics of the Gulf of California - Salton Trough region.

**UN LIMITE DE PLACAS DIFUSO EN EL NORTE DE BAJA CALIFORNIA:
IMPLICACIONES DE OBSERVACION DE DEFORMACION DE LA CORTEZA Y
MODELADO GEODINÁMICO PARA LA PARTICIÓN DE DEFORMACIÓN EN LA
RUPTURA CONTINENTAL.**

FURLONG, Kevin P., Geodynamics Research Group, Geosciences, Penn State University, University Park, PA, 16802; KEVIN@GEODYN.PSU.EDU; DIXON, Tim, RSMAS, University of Miami, Miami, FL 33149; MALSERVISI, Rocco, Penn State University. DECAIX, Julien, RSMAS, University of Miami

A lo largo del oeste de Norteamérica, frecuentemente la amplia zona que ocupa el límite de placas Pacífico-Norteamérica muestra partición de esfuerzos en zonas de cizalla discretas. En la Falla Cerro Prieto, norte de Baja California, se registran ~ 39 mm/año de movimiento relativo y ~ 6 mm/año ocurren a través de las fallas Agua Blanca y San Miguel. Estas dos últimas fallas tienen orientaciones que difieren significativamente y se encuentran en diferentes etapas del ciclo sísmico. Debido a que la orientación de las fallas difiere en $\sim 25^\circ$ puede haber “biases” introducido en la interpretación sobre la partición de la deformación utilizando modelos de 2-D y 2-D fuera del plano. Hemos utilizado un modelo viscoelástico en 3-D basado en elementos finitos (FEM) para investigar los efectos inducidos por la geometría de la zona de falla. En el modelo FEM el movimiento integrado de la falla se utiliza como condición de frontera, se especifican la fallas, y se simula un sismo destrabando las fallas y especificando el desplazamiento cosísmico en pasos adecuados para el modelo. La partición de la deformación entre los dos sistemas de falla (Agua Blanca y San Miguel Vallecitos) ocurre basada en la

reología del modelo, la geometría de las fallas y la etapa del ciclo sísmico. Si las fallas tienen propiedades reológicas similares, nuestros resultados indican que, aproximadamente 75% del movimiento ocurre en el sistema San Miguel y 25% en Agua Blanca. No obstante que esto es compatible con los patrones de sismicidad reciente, es menos consistente con los datos de GPS. Si Agua Blanca es una falla significativamente más débil, entonces, y a pesar de su orientación, la partición de la deformación es aproximadamente igual en los dos sistemas de falla, lo que sería más consistente con las observaciones GPS. Relacionar el desplazamiento de estas dos fallas con la dispersión en el Golfo de California y con la distensión en tierra del rift requiere una mejor determinación de la cinemática de la región del Golfo de California y el Salton Trough.

Upper-Mantle Anisotropy beneath Rift Zones from Surface-Wave Analysis

JAMES B. GAHERTY

School of Earth and Atmospheric Sciences, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332-0340; email gaherty@ eas.gatech.edu

The Earth's upper mantle is anisotropic on scales ranging from that of xenolith samples to that of the plates. This anisotropy is likely related to strain in mantle minerals, and anisotropy thus provides unique information on the dynamics of the lithosphere and upper-most mantle. In previous studies of continental rift zones, most analyses of seismic anisotropy utilize vertical-shear-wave splitting analyses. These data generally provide vertical integrals of the structure directly beneath a given station, and they therefore provide poor resolution of variability with depth. This limitation makes it difficult to construct a complete picture of upper-mantle anisotropy.

Surface waves also provide information on upper-mantle anisotropy, either via polarization anisotropy (i.e. apparent discrepancy between Love and Rayleigh propagation speed) and/or azimuthal variations in velocity. Global studies of long-period surface-wave dispersion have successfully mapped anisotropy at large (>2000 km) length scales, but to date surface waves have not been extensively exploited in a smaller regional context. This approach is particularly amenable to regions of rifting, as competing models of rift dynamics have distinctly different anisotropic character. In this study, we present applications of surface-wave analyses to regional-scale seismometer deployments similar to those envisioned for a Gulf of CA/Salton trough experiment. In the first, we utilize recordings of nearby regional events on a temporary broadband seismic deployment on Iceland (ICEMELT) to study the anisotropic structure of the Reykjanes ridge. This mature spreading center displays strong fabric that is likely the result of mantle upwelling beneath the ridge combined with along-axis flow emanating from the Iceland plume. In the second, we demonstrate an array analysis used to delineate 1D anisotropic structure beneath a broadband deployment in Southern Africa. This is applicable to seismic sources located at large distances from the region of interest. Finally, these approaches have been combined in an ongoing study of 3D isotropic and anisotropic heterogeneity beneath California and the surrounding region. This analysis will provide a picture of mantle fabric associated with the Pacific-North America plate boundary directly north of the Gulf of California region. It utilizes the quasi-array geometry provided by the extensive broadband networks

available in California (TriNet, BDSN, USNSN, UNR, Anza). The extension of this analysis to a passive deployment across and along the Salton Trough-Gulf of California rift zone would provide a map of mantle fabric and strain along a large stretch of the Pacific/North America margin, including the evolving rift structure.

Anisotropía del manto superior bajo zonas de rift con base en el análisis de ondas de superficie.

JAMES B. GAHERTY

School of Earth and Atmospheric Sciences, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332-0340; email gaherty@ eas.gatech.edu

El manto superior de la tierra es anisotrópico a escalas variables, desde la anisotropía a escala de xenolitos hasta la de placas. Esta anisotropía estaría relacionada a la deformación de los minerales del manto, por lo que la anisotropía provee información única sobre la dinámica de la litósfera y de la cima del manto superior. En estudios previos en zonas de rift continental, la mayor parte de los análisis de la anisotropía sísmica utilizan el análisis de la separación de las ondas verticales de cizalla. Estos datos generalmente proveen integrales verticales de la estructura directamente bajo una estación dada y por lo tanto, proporcionan una variabilidad de pobre resolución con la profundidad. Esta limitación dificulta la construcción de una imagen completa de la anisotropía del manto superior.

Las ondas de superficie también proveen información de la anisotropía del manto superior, vía la anisotropía de polarización (e.g. discrepancia aparente entre las velocidades de propagación Love y Rayleigh) y/o por la vía de variaciones azimutales en la velocidad. Estudios globales de dispersión de ondas de período largo han tenido éxito en el mapeo de la anisotropía de gran escala (>2000 km), pero a la fecha, las ondas superficiales no han sido aprovechadas en estudios regionales de pequeña escala. Esta aproximación podría ser particularmente aplicable en regiones de rifting ya que los modelos que compiten para explicar la dinámica del rift tienen diferencias distintivas en el carácter anisotrópico. En este estudio, presentamos aplicaciones del análisis de ondas superficiales de redes sísmicas regionales como las que se requieren para un experimento en el Golfo de California-Salton Trough. Utilizamos los registros de eventos regionales cercanos en una red temporal de banda ancha para estudiar la anisotropía de la cresta de Reykjanes, en Islandia (ICEMELT). Este evolucionado centro de dispersión muestra una fuerte fábrica, que al parecer resulta de la surgencia del manto bajo la cresta, en combinación con el flujo que emana en el eje de la cresta de la pluma de Islandia. Sobre su aplicación al Salton Trough, presentamos un conjunto de análisis utilizados para delinear la estructura de la anisotropía en 1D bajo una red de banda ancha en el sur de Africa. Esto es aplicable a fuentes sísmicas localizadas a grandes distancias de la región de interés. Finalmente, esas aproximaciones se han combinado en un estudio en curso sobre la heterogeneidad isotrópica y anisotrópica bajo California y las regiones aledañas. Este análisis proveerá una imagen de la fábrica del manto asociada al límite Pacífico-Norteamérica, directamente al norte de la región del Golfo de California. Este análisis utiliza las redes de banda ancha disponibles en California (TriNet, BDSN, USNSN, UNR, Anza). La extensión de este análisis a un despliegue pasivo a lo largo y ancho del Salton Trough-Golfo de California proveerá de un mapa de la fábrica del manto y de la deformación a lo largo de una buena parte del margen Pacífico-Norteamérica, incluyendo la estructura del rift en evolución.

**The timing and magnitude of extension in the Sonoran Basin and Range province:
Implications for development of the Gulf of California.**

Phil Gans
Dept. of Geological Sciences
University of California
Santa Barbara, CA 93106
Fax: (805) 893-2314
Phone: (805) 893-2642
Phil gans@geol.ucsb.edu

New structural and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ data from the Santa Rosa area, southeastern Sonora constrain the magnitude and timing of extensional tectonism and magmatism. Early gently-dipping, NW-striking normal faults repeat tilted sections and document large magnitude extension oriented $\sim\text{N}50^\circ\text{E}$. Younger, widely spaced NS- to NNW- trending, high-angle normal faults cut the previously faulted and tilted sections and are associated with modest $\sim\text{E-W}$ extension. Palinspastic reconstructions indicate cumulative extension of $\sim 90\%$. Angular unconformities and growth fault relations within the Oligo-Miocene sequence bracket large-magnitude NE-SW extension between 26 and ~ 20 Ma. Subsequent 10-15% E-W extension is largely bracketed between 20 and 17 Ma. The magnitude of Neogene extension in southeastern Sonora is substantially greater and the timing is older than previously recognized. Examination of selected areas between the Sierra Madre Occidental and the coast at this latitude suggests that most extension in Sonora occurred between ~ 27 and 12 Ma, while remnants of the Farallon plate were still being subducted. Plate-tectonic models that require substantial extension in Sonora during proto-Gulf ($\sim 10 - 5$ Ma) transtensional deformation may need to be re-evaluated. An alternative model, presented here, is that Baja California began moving with close to Pacific plate motion coincident with the ~ 11 Ma termination of subduction at this latitude. Post-11 Ma northwest motion of Baja relative to mainland Mexico might total ~ 500 km and be accomplished by distributed right lateral shear and oblique rifting within the previously extended and thermally weakened Mid-Miocene magmatic arc.

Tiempo y magnitud de extensión en la provincia del Basin and Range: Implicaciones para el desarrollo del Golfo de California.

Phil Gans
Dept. of Geological Sciences
University of California
Santa Barbara, CA 93106
Phone: (805) 893-2642
Fax:(805) 893-2314
Phil gans@geol.ucsb.edu Gans

Nuevos datos estructurales y de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ de la región de Santa Rosa, SE de Sonora permiten constreñir la magnitud y el tiempo de la distensión y el magmatismo. Fallas tempranas de bajo ángulo y rumbo NW repiten secciones basculadas y documentan una gran magnitud de extensión orientada $\sim\text{N}50^\circ\text{E}$. Fallas subverticales más jóvenes, de orientación NS-NNW, cortan las secciones previamente afalladas y basculadas y están asociadas a una extensión más modesta dirigida E-W. Las reconstrucciones palinospásticas indican una extensión acumulada de $\sim 90\%$. Discordancias angulares y las relaciones de fallas de crecimiento con la secuencia Oligoceno-Mioceno acotan entre 26 y ~ 20 Ma la extensión de gran magnitud NE-SW; 10 a 15% de extensión subsecuente ocurrió entre 20 y 17 Ma. La magnitud de la extensión neogénica en el SE de Sonora es substancialmente mayor y es más antigua de lo que se ha reconocido. El examen de áreas seleccionadas entre la Sierra Madre Occidental y la costa en esta latitud sugiere que la mayor parte de la extensión en Sonora ocurrió entre ~ 27 -12 Ma, a la vez que los remanentes de la placa Farallón aún eran subducidos. Con estas evidencias deben reevaluarse Los modelos tectónicos que requieren de una extensión substancial en Sonora durante la etapa transtensiva de deformación en el proto Golfo (~ 10 -5 Ma). En este trabajo se presenta un modelo alterno en el cual Baja California inició su acoplamiento con el movimiento de la Placa Pacífico coincidentemente con la terminación del volcanismo de arco hacia los 11 Ma. El desplazamiento posterior de la península con respecto a México continental podría totalizar ~ 500 km y puede obtenerse mediante desplazamiento distribuido en zonas de cizalla lateral derecha y rifting oblicuo en una zona extendida y debilitada térmicamente por el arco magmático Miocénico.

Ewa Glowacka
CICESE
Dep. Sismologia
PO Box 434843
San Diego CA 92143-4843

During the last few years my main field of interest is seismic hazard and deformation in the Mexicali Valley. I am responsible for a small network of continuous deformation observations in the Valley. This network includes two crackmeters and two tiltmeters installed in the Cerro Prieto Geothermal Field (CPGF) and along the Imperial Fault. It has been operating since 1998. The sampling rates are 1 and 10 minutes. I also coordinate and interpret leveling survey data along short profiles crossing the Imperial Fault. (since 1994) and within the CPGF (with Javier Gonzalez, CFE and UABC). The main goal of this project is to study deformation and its space and time relations with the seismicity and tectonics of the pull-apart system and with fluid extraction in the CPGF.

During 1995-1997 I participated with Javier Gonzalez in mapping the contemporary trace and movement of the Imperial fault. The main goal of this project was to find how far the fluid extraction in the CPGF influences the movement of the fault, and make use of contemporary deformations for a fault trace study.

Since 1996, when the first continuously operating, vertical crackmeter was installed in the southern part of Imperial fault, the creep behavior of the fault was observed and the proposed mechanism was studied (with F.A.Nava).

Analysis of historic and contemporary data of seismicity, leveling and fluid extraction in the Mexicali Valley suggests that the fluid extraction influences seismicity, subsidence and behavior of the main faults, and should be taken into account when studying "Rupture of the Lithosphere" in the Mexicali Valley.

Some of the above mentioned are published in:

Glowacka and Nava, 1996, BSSA, pp. 93-105

Glowacka et al., 1999, PAGEOPH, 591-614

Nava and Glowacka, 1999, PAGEOPH, pp.615-630.

Abstract

Analysis of twenty years of fluid extraction versus seismicity and subsidence rate in the Mexicali Valley suggests that fluid extraction stimulates these phenomena in the Cerro Prieto pull-apart center. High value of subsidence rates (more than 10 cm/year), its time history and the location of its maxima below the extraction wells, suggest, that the subsidence is induced by fluid extraction. Both, the Cerro Prieto and Imperial faults are influenced by this subsidence. This is a source of noise in the tectonic picture of Mexicali Valley; however, it can be used as help in studying the trace of main faults or stratigraphy of the pull-apart basin. Some examples will be presented.

Resumen

El análisis de veinte años de extracción de fluidos contra las tasas de sismicidad y subsidencia en el Valle de Mexicali sugiere que la extracción de fluidos estimula estos fenómenos en el centro pull-a-part de Cerro Prieto. Altos valores en las tasas de subsidencia (más de 10 cm por año), su historia temporal y la localización de valores máximos bajo la zona de extracción geotérmica sugieren que la subsidencia es inducida por la extracción de fluidos. Las fallas Cerro Prieto e Imperial ambas están influenciadas por esta subsidencia y constituye una fuente de ruido en el esquema tectónico del Valle de Mexicali, sin embargo, puede ser utilizado como ayuda para estudiar la traza de de las fallas principales o la estratigrafía de las cuencas pull-a-part. Se presentarán algunos ejemplos durante el taller.

Antonio Gonzalez Fernandez
Departamento de Geología, CICESE
P.O. Box 434843
San Diego, CA 92143-4843, USA

Carretera Tijuana-Ensenada km 107
22830 Ensenada, Baja California
Mexico

Phone: (011-52-6) 1745050 Ext. 26048
Fax: (011-52-6) 1750557 and 1750559
E-mail: mindundi@cicese.mx

Last research activities:

Joint interpretation of deep seismic and gravity profiling in Delfin, Tiburon, Salsipuedes and San Pedro Martir basins and Ballenas channel. High resolution seismics in Wagner and Delfin basins. Magnetics and bathymetry in the Northern and Central Gulf of California. Shallow seismics in the Alarcon basin.

Crustal structure of the Gulf of California, Marine Geophysics, active seismics, magnetics, gravity, bathymetry.

The crustal structure of the transtensional continental margin of the northern Gulf of California has been investigated by deep multichannel reflection seismic data and densely sampled (80 m) refraction/wide angle reflection seismic information, combined with gravity modeling. These data were acquired during the CORTES-P96 experiment, using the 96 channel 3 km long streamer and the marine air gun source array of the 50 liters (3000 cu.in.) provided by the R/V Hespérides. This energy was recorded by portable seismic instruments onshore and by OBS (Ocean Bottom Seismometers) offshore. Recently, new magnetic data acquired aboard the R/V Francisco de Ulloa, provide additional constraints to the interpretation. This data set allows obtaining a detailed image of the structure of the crust and the distribution of the P-wave velocities and densities with depth.

We present the results of the interpretation of three profiles in the northern Gulf of California. The profiles are located in the Upper Delfin and Tiburón basins, along the Ballenas-Salsipuedes channel and in the South of Tiburón Island. Our results show faulting distributed over the entire area. Some of these faults are still active in the present. In the Ballenas channel and to the South of Tiburón Island a series of crustal fault zones can be identified. The seismic and gravity modeling constraints a number of thinned crustal areas, corresponding to the Upper Delfin and Salsipuedes South basins (active rift/pull apart basins) and the Tiburón basin (a probably abandoned rift basin), which are connected by transform faults. Intense magmatism is observed under the Salsipuedes basins, but only limited activity can be identified under Upper Delfin basin. A series of mid-crust reflectors observed in the Tiburón basin has been identified as a metamorphic core complex.

Estructura de la corteza en el Golfo de California, geofísica marina, sísmica activa, magnetismo, gravedad y batimetría

Antonio Gonzalez Fernandez
Departamento de Geología, CICESE

La estructura cortical del margen transtensivo del norte del Golfo de California se ha investigado mediante la interpretación conjunta de datos de sísmica de reflexión multicanal

profunda, sísmica de refracción/reflexión de gran ángulo de alta densidad de registro (80 m) y gravimetría. Estos datos fueron obtenidos en el proyecto CORTES-P96, utilizando el cable de registro de 96 canales y 3 km de longitud y el arreglo de cañones de aire comprimido de 50 litros del B/O Hespérides. La energía de estos cañones de aire se registró por estaciones sísmicas portátiles en tierra y por OBS (sismómetros de fondo oceánico) en mar. Recientemente, se obtuvieron nuevos datos magnéticos a bordo del B/O Francisco de Ulloa, que proporcionan información adicional para la interpretación. Este conjunto de datos ha permitido obtener una imagen detallada de la estructura de la corteza y de la distribución de las velocidades de las ondas P y de las densidades con la profundidad.

Presentamos los resultados de la interpretación de tres perfiles en el norte del Golfo de California. Los perfiles se localizan en las cuencas Delfín Superior y Tiburón, a lo largo de los canales Ballenas y Salsipuedes y al sur de la isla Tiburón. Nuestros resultados muestran la presencia de fallamiento distribuido en toda el área. Algunas de estas fallas aún son activas. En el canal de Ballenas y al sur de la isla Tiburón se han identificado varias zonas de falla que afectan a toda la corteza. El modelado sísmico y gravimétrico muestra varias zonas de corteza adelgazada bajo las cuencas Delfín Superior y Salsipuedes Sur (cuencas activas de rift/pull apart) y la cuenca Tiburón (una cuenca de rift probablemente abandonada), conectadas por fallas transformes. Se ha observado un intenso magmatismo bajo las cuencas Salsipuedes y de menor actividad bajo la cuenca Delfín Superior. Una serie de reflectores que se observan en la cuenca Tiburón se interpreta como un complejo metamórfico.

IS SALTON SINK STILL SINKING? FIRST ORDER LEVELING, GPS AND OTHER OBSERVATIONS

J. Javier González-García¹ and J. Alejandro González-Ortega², ¹Lab. de Geodesia y Geodinámica, Depto. de Sismología, Div. Ciencias de la Tierra, CICESE, Ensenada, B. C., México, javier@cicese.mx, ²Estudiante, Fac. de Ciencias, Universidad Autónoma de Baja California, Unidad Ensenada, Ensenada, B. C., México.

The Salton Trough is a physiographic province in the contact between the Pacific and North American plates at the international border between the USA and Mexico. It is the NW continuation of the en echelon transforms and spreading centers in the Gulf of California and includes (at least) two small segments of crustal extension (Brawley and Cerro Prieto).

In order to look for current deformation we compare leveling data obtained by Dirección de Estudios del Territorio Nacional and Comisión Federal de Electricidad (DETENAL/CFE) in Mexicali Valley during 1977-1979 with recent GPS observations obtained near the Cerro Prieto Geothermal Field (CPGF) made during 1993-1997. We also use first order leveling observations obtained by the USGS in the Imperial Valley.

The USGS reports 3.5cm/yr subsidence, measured by three first order leveling surveys over 1972-1977, for the SE part of the current Salton Sea, i.e. the SE end of the San Andreas Fault. For this region, campaign mode GPS observations (STRC), indicate horizontal strain with NW

slip accounting for 70-80% of the strain predicted by the Nuvel-1A model for the motion between the Pacific and North American plates.

Besides detecting the ground subsidence around CPGF, the three Mexicali Valley surveys record coseismic vertical motion caused by the Imperial, October 15, 1979, earthquake. A maximum vertical slip of 11.5 cm occurred in the central part of the Imperial fault, at the Mexico/USA border. There is some evidence of ~1 cm of uplift of the region between the Cerro Prieto Volcano and the SE end of the Cucapah Ranges, where we have identified a left lateral fault, here named the Puente-Cruz Fault.

Moreover the differential motions caused by the Imperial earthquake, allow speculation about the existence of a branch of the Cerro Prieto Fault, which joins with the Imperial Fault. We designate this probable feature as the Yarzalonso Fault with a N 28°E strike and 16 km length. This fault would be the counterpart of the San Adrian Fault (González-García, 1998) which joins the Imperial and the Cerro Prieto Faults with a S 27°W strike.

The GPS results for 1993-1997 show a clear subsidence zone between the Imperial and Cerro Prieto Faults. Vertical deformation rates near the Imperial and Cerro Prieto faults are 11 cm/yr and 4 cm/yr respectively. 60% of this deformation is induced by aquifer depletion and about 40% is tectonic.

Because of its similar tectonic setting, the SE end of the SAF (Salton Sink) may experience similar deformation. The tectonic horizontal (GPS) and vertical (leveling) motions are of the same order of magnitude in these zones of critical deformation within the Salton Trough Basin. Preliminary results from 3 SCIGN sites in this region confirm this hypothesis.

**González-García, J. J., Mapa Sismo y Neo-Tectónico del Valle de Mexicali. Abstract in Primera Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra, September 21-25, 1998, p. 105, Fac. de Ciencias, UNAM, México, D. F.*

SISMICIDAD EN LA REGION DE LA PAZ – LOS CABOS, BAJA CALIFORNIA SUR.

Mario González y Luis Munguía
Dpto. de Sismología, Div. Ciencias de la Tierra,
CICESE, Ensenada, B.C. México.
E-mail :mgonzale@cicese.mx (M.G.), lmunguia@cicese.mx (L.M.)

A finales de 1998 se inició la operación de una red sísmica local en el área de La Paz – Los Cabos, Baja California Sur. La red, compuesta por 13 estaciones, se proyectó para operar en varias zonas y periodos diferentes de registro durante los siguientes cuatro años. Se presenta la sismicidad registrada entre Octubre de 1998 y Mayo del 2000, la cual representa los dos primeros periodos de operación de la red. Se registraron alrededor de 800 sismos, de los cuales se localizaron 166 eventos para el primer periodo y 86 para el segundo. Las magnitudes de los eventos registrados son menores de 3, mientras que la mayoría de las profundidades focales

estimadas oscilan entre 2 y 14 km. Se han registrado también eventos regionales con magnitudes hasta de 5, con epicentros en la región del Golfo de California. La mayoría de los sismos registrados fueron localizados en una zona ubicada al Este de las Islas Espíritu Santo y La Partida. Otros eventos ocurrieron en el interior de la Bahía de La Paz y muy pocos se generaron en tierra firme. Un lineamiento de sismos con dirección NE-SW atraviesa la Cd de La Paz, con eventos cuyas profundidades oscilan entre 10 y 15 km, sin que se correlacionen con alguna falla conocida. Se presenta una mínima tendencia de eventos a lo largo de la Falla La Paz, mientras que en el resto del área estudiada no se observa actividad sísmica significativa. Para la región de San Juan de Los Planes, área donde se instaló la red en su segunda etapa, la actividad sísmica registrado fue mínima, en comparación con la región de las Islas Espíritu Santo y La Partida. Mucha de la actividad sísmica se presenta en forma de enjambres sísmicos.

SEISMICITY IN THE REGION OF LA PAZ- LOS CABOS, BAJA CALIFORNIA SUR

Mario González and Luis Munguía
Dpto. de Sismología, Div. Ciencias de la Tierra,
CICESE, Ensenada, B.C. México.
E-mail :mgonzale@cicese.mx (M.G.), lmunguia@cicese.mx (L.M.)

In late 1998 a local seismic network began operating in the area of La Paz- Los Cabos, Baja California Sur. The network, comprising 13 stations, was intended to be deployed in various zones for different lengths of recording time during the subsequent four years. We will present the seismicity recorded between October 1998 and May 2000, which represents the first two deployments of the network. About 800 earthquakes were recorded; 166 of these were located during the first deployment, and 86 in the second deployment. The recorded events have magnitudes less than 3, and the majority of the focal depths were estimated to be between 2 and 14 km. Some regional events, with magnitudes up to 5, were recorded also, with epicenters in the region of the Gulf of California. The majority of the recorded earthquakes were located in a zone located to the east of the islands Espíritu Santo and Partida. Other events occurred in the interior of the Bay of La Paz; very few were located beneath dry land. A NE-SW trending lineament of seismicity crosses the city of La Paz, with events at depths of 10-15 km, not correlated with any known fault. There is a slight tendency for events along the La Paz fault, while the rest of the study area did not show any significant seismicity. For the region of San Juan de los Planes, the area where the network was installed in its second deployment, there was minimal seismic activity recorded, in comparison with the region around the islands Espíritu Santo and Partida. Much of the seismic activity occurred as swarms.

RELATIONSHIPS BETWEEN HEAT FLOW AND THE TECTONIC PROVINCES OF MEXICO

¹ Harris, R. N., ² Fletcher, J.M., ² Suarez-Vidal, F., ² Espinosa-Cardena J.M., ² Romo-Jones, J.M. ² Mendoza-Borunda, R., ² Romero-Espejel H.

¹ University of Utah, Dept. Geology and Geophysics, 717 WBB, Salt Lake City, UT.

² CICESE, Km107 Carr. Tij-Ens, Ensenada, Baja California, MX 22830

The temperature distribution in the lithosphere greatly influences geologic processes and rock properties through its influence on strength of the lithosphere and modes of deformation, depth distribution of earthquakes, concentration and orientation of stresses, metamorphism, density, and crustal magnetism. The thermal state of the lithosphere, in turn, is a manifestation of tectonism, magmatism and sublithospheric flow. As such, thermal processes are a fundamental component to understanding the geodynamic state of the lithosphere.

While heat flow measurements in northern Mexico are relatively sparse, there are enough measurements to broadly characterize heat flow provinces [e.g., Smith et al., JGR, 1979, pg. 2371-2379; Ziagos et al., JGR, 1985, pg. 5410-5420]. These values indicate that the Baja peninsula is an area of relatively low heat flow (35-52 mW m⁻²), the Gulf Extensional Province (GEP) and the Mexican Basin and Range (MBR) have relatively high heat flow values, both with means of 82 mW m⁻² similar to those from the Southern Basin and Range of the U.S. (82 mW m⁻²) [Sass et al., JGR, 1994, pg. 22,093-22,118]. Hydrothermal circulation associated with nascent oceanic spreading centers in the GEP give rise to the largest and highest heat flow anomalies in all provinces. The Sierra Madre Occidental has a mean heat flow of 74 mW m⁻², while the Sierra Madre Oriental has a mean heat flow of 55 mW m⁻². Farther south, heat flow in the Trans-Mexican Volcanic Belt (TMVB) ranges from 72-107 mW m⁻². Low heat flow values (13-39 mW m⁻²) are found in the forearc region of the middle Americas trench. The relatively high heat flow of the GEP and MBR is consistent with geologic estimates of extension. High heat flow in the TMVB is likely related to both Neogene extension and extensive volcanism.

We are preparing to undertake a new campaign of data collection in Mexico to better define heat flow provinces and constrain geodynamic processes that contribute to the observed surface heat flow. These studies will help characterize lithospheric architecture and add insight to the time-space patterns of deformation and volcanism in Mexico.

FLUJO DE CALOR Y PROVINCIAS TECTONICAS DE MEXICO

¹ Harris, R. N., ² Fletcher, J.M., ² Suarez-Vidal, F., ² Espinosa-Cardena J.M., ² Romo-Jone J.M. ² Mendoza-Borunda, R., ² Romero-Espejel H.

¹ University of Utah, Dept. Geology and Geophysics, 717 WBB, Salt Lake City, UT.

² CICESE, Km107 Carr. Tij-Ens, Ensenada, Baja California, MX 22830

La distribución de temperaturas en la litósfera influencia en gran medida los procesos geológicos y las propiedades de rocas, al influenciar la fuerza de la litósfera, el modo de deformación, la distribución de profundidad de epicentros, la concentración y orientación de los esfuerzos, el metamorfismo, la densidad y el magnetismo corticales. El estado térmico de la litósfera, a su vez, es una manifestación del tectonismo, magmatismo y del flujo sublitosférico. Estos procesos térmicos son una componente fundamental para entender el estado geodinámico de la litósfera.

No obstante que las mediciones del flujo de calor son relativamente escasas en México, se tienen suficientes mediciones para caracterizar de forma general las provincias de flujo de calor [e.g.,

Smith et al., JGR, 1979, pg. 2371-2379; Ziagos et al., JGR, 1985, pg. 5410-5420]. Estos valores indican que la península de Baja California es un área de relativamente bajo flujo de calor ($35\text{-}52\text{ mWm}^{-2}$), la Provincia Extensional del Golfo (GEP) y el Basin and Range mexicano (MBR), presentan valores de flujo de calor relativamente altos, ambos con medias de 82 mWm^{-2} , similar a la media de la porción sur de Basin and Range en E.U. (82 mWm^{-2}) [Sass et al., JGR, 1994, pg. 22,093-22,118].

La circulación hidrotermal asociada con los centros de dispersión incipientes en GEP produce las anomalías de todas las provincias. La Sierra Madre Occidental tiene un flujo de calor de 74 mW m^{-2} , mientras que la Sierra Madre Oriental tiene un valor promedio de 55 mW m^{-2} . Hacia el sur, el flujo de calor en el Cinturón Volcánico Transmexicano (TMVB) varía de $72\text{-}107\text{ mW m}^{-2}$. En la región antearco de la trinchera mesoamericana se presentan valores bajos de flujo de calor ($13\text{-}39\text{ mW m}^{-2}$). Los valores relativamente altos de GEP y MBR son consistentes con estimaciones geológicas de extensión. Alto flujo de calor en TMVB estaría relacionado tanto a la extensión neogénica como a la actividad volcánica extensiva.

Estamos preparando una nueva campaña de colección de datos en México con el fin de mejorar la definición de las provincias de flujo de calor en México y constreñir los procesos geodinámicos que contribuyen a generar el flujo de calor observado. Estos estudios ayudarán a caracterizar la arquitectura litosférica y agregarán información sobre los patrones de deformación y volcanismo en México.

Dynamic Models of Continental Extension and Associated Magmatism: Implications for Strain Partitioning, the Source of Syn-extensional Melts, and the Transition from Rifting to Seafloor Spreading

Dennis L. Harry, The University of Alabama, Department of Geological Sciences, Box 870338, Tuscaloosa, AL, 35487-0338.

Analytic models of continental extension and associated magmatism have clearly demonstrated the importance of initial and boundary conditions in determining the tectonomagmatic style of rifting. In the past decade, numerical models have documented the equal importance of the rheologic architecture of the lithosphere. These numerical models, which are able to include complex spatial and temporal variations in lithospheric strength, lead to computer simulations that can easily be compared to geological and geophysical observations. These include (to name a few) strain indicators (ranging from those observed at outcrop scale to seismic reflectivity patterns and anisotropy), metamorphic P-T-t paths, igneous melt P-T conditions, thermobarometry data, heat flow, and gravity and magnetic data. Analytic models are able to match many similar observations in a broad sense, and their simplicity and elegance allow them to be used to identify and understand the basic principles governing geological processes. However, the complicated nature of most geological features inevitably leads to hypotheses that involve complicated space-time variations in boundary conditions and the lithosphere's material properties. This often precludes the use of analytical models to examine the geological problem

in detail. Numerical simulations can include such complexities, allowing them to be used as a practical tool for testing hypotheses that have been developed on the basis of geological and geophysical observations.

The utility of numerical modeling is demonstrated through three case studies. First, numerical models show that laterally offset zones of weakness in the crust and mantle lead to asymmetric rift formation and horizontal ductile flow in the lower crust. Models of rifting of the U.S. East Coast demonstrate that this results in differing amounts of extension in the upper and lower crust. At a broad scale, extension resembles simple shear kinematic models. Pressure gradients that drive ductile flow in the lower crust may also affect magma ascent paths, leading to horizontal offsets between the zone of melting and emplacement of magmatic rocks in the crust. This may account for asymmetric emplacement of syn-rift magmatic rocks on the Brazilian margin/Namibian margins. Second, models of rifting in the Basin and Range of North America show that early syn-extensional melts may be sourced in the lithospheric mantle rather than the asthenosphere if the lithosphere underwent a prior melt or fluid metasomatic episode. Secondary melting of the crust during the ascent of mantle-derived magmas accounts for the widespread silicic magmatism that coincided with the onset of extension in the Basin and Range. Third, modeling of the Iberia continental margin indicates that the presence or absence of major lateral variations in strength of the crust may be the key factor in determining whether rifting is accompanied by syn-extensional magmatism. If lateral strength variations are absent, lithospheric necking is well-established by the time the asthenosphere has risen to depths shallow enough to begin melting. Because necking is well developed, rifting proceeds rapidly to continental breakup. This results in a relatively short period of magmatism at the end of the rifting episode and emplacement of syn-rift magmatic rocks in a narrow zone adjacent to the oldest oceanic crust. The models simultaneously account for "non-volcanic" rifting and the production of new oceanic crust at the time of breakup without requiring unusual temporal or spatial variations in mantle temperatures. All of the case studies have in common the recognition that rheological and geochemical heterogeneity in the lithosphere plays a key role in determining the tectonomagmatic style of rifting.

Petrology of the Alarcon Ridge - MORB in all Respects

James W. Hawkins, Paterno R. Castillo, and David R. Hilton
all at Geosciences Research Division, Scripps Institution of Oceanography
La Jolla, CA 92093-0220 jhawkins@ucsd.edu

Alarcon Ridge, located between 23° 15' and 23° 38' N, is arguably the northernmost EPR segment. The 50 km long ridge trends northeasterly and rises to about 2300 m from surrounding water depths of about 2700 m. We dredged fresh pillow fragments from "near zero age" crust at

six sites on the ridge axis, from 2 seamounts lying about 25 km NW of the axis and at one site on older crust 20 km SE of the axis. The seamount samples are as fresh as those of the axial ridge. All samples have N-MORB chemistry in terms of major, trace elements, REE, Sr and Nd isotope ratios, and noble gas (He) isotope chemistry. Most samples are relatively unfractionated with $(100 \text{ mg}/(\text{mg}+\text{fe}))$ in the range 63-70 where ferric/ferrous is assumed to be 0.15. Crystallization sequence is OL - PL - CPX. HFSE abundances, and transition metals are consistent with relatively small amounts of melting of MORB-source mantle (e.g., 10 %) with minor fractionation in transit to the surface. We had expected to find compositional gradients along the ridge axis towards transform fault boundaries and possible effects of assimilation of continental crust especially toward the NE end. With a sample spacing of about 10-12 km on the axis, no gradients are seen. For example, Rb, Ba, Sr, La and $(\text{La}/\text{Sm})_{ef}$ are quite uniform and are like N-MORB (e.g., $(\text{La}/\text{Sm})_{ef}$ 0.6 - 0.8), Rb 1-2 ppm.

Tholeiitic basalts from Sal Si Puedes, Farallon and Pescadero basins do show significant differences in LILE composition which may be attributed to assimilation of "granitic" crust, e.g., Rb, Ba, Sr elevated beyond what may be due to fractionation.

We interpret the data to indicate that at the mouth of the Gulf, fertile MORB-source mantle has welled up into a crustal environment on Alarcon Ridge where there was minimal assimilation of pre-rift crust. Several explanations are possible and may include (a) former continental crust has been thinned extensively and was overwhelmed by the influx of mantle melts, (b) the Alarcon Ridge abuts crust which has been riddled with basaltic dikes and thus has little net compositional contrast with the MORB, (c) a significant part of the early history of opening, including some of the earliest Gulf crust, is masked by sedimentary material draped over the rifted margin. Alarcon Ridge may have been emplaced into what was older basaltic crust. The nature of basalts collected farther north in the Gulf suggests that the latter may be an important factor.

Petrología de la Cresta Alarcón; MORB en todos aspectos

James W. Hawkins, Paterno R. Castillo, and David R. Hilton
all at Geosciences Research Division, Scripps Institution of Oceanography
La Jolla, CA 92093-0220 jhawkins@ucsd.edu

La Cresta Alarcón, localizada entre 23° 15' y 23° 38' N, es discutiblemente el segmento más septentrional de la dorsal del Pacífico Oriental (EPR). Este segmento de 50 km se orienta al NE y alcanza una altitud de 2300 m sobre el fondo marino adyacente con 2700 m de profundidad. Se dragaron fragmentos de basaltos frescos almohadillados cerca de la zona de "edad cero" en seis sitios sobre el eje de la dorsal, así como 2 montes submarinos sitios ubicados a 25 km al NW del eje y un sitio sobre una corteza más antigua a 20 km al SE del eje de la dorsal. Las muestras en los montes submarinos y en la cresta son igualmente frescas y todas tienen composición de N-MORB en términos de elementos mayores y traza, tierras raras (REE), razones isotópicas de Sr, Nd e isótopos de gases nobles (He). La mayoría de las muestras son no fraccionadas con $\text{Mg}^\#$ en el rango 63-70 asumiendo una relación $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ de 0.15. La secuencia de cristalización es OL-PL-CPX. La abundancia de elementos HFS y de metales de transición son consistentes con cantidades relativamente pequeñas de fusión de una fuente del manto de tipo MORB (e.g. 10 %)

con una diferenciación menor durante el ascenso a la superficie. Esperábamos encontrar gradientes composicionales a lo largo de la cresta hacia los límites con las fallas transformes, así como posibles efectos de contaminación por asimilación de corteza continental, especialmente hacia el extremo NE. Con un espaciamento entre muestras de 10-12 km sobre el eje, no se observan gradientes. Por ejemplo, Rb, Ba, Sr, La y (La/Sm) son bastante uniformes y de tipo N-MORB (e.g., $(La/Sm)_{ef}$ 0.6 - 0.8, Rb 1-2 ppm.).

Los basaltos toleííticos de las cuencas Sal Si Puedes, Farallón y Pescadero muestran diferencias significativas en LILE (elementos litófilos de radio iónico grande) que pueden atribuirse a la asimilación de corteza “granítica”, e.g. Rb, Ba, Sr más altos de lo que esperaríamos por diferenciación.

Interpretamos que los datos indican que en la boca del Golfo emerge manto fértil, fuente de MORB, a niveles corticales, con mínima asimilación de corteza pre-rift en la Cresta de Alarcón. Son posibles varias explicaciones: (a) la corteza continental preexistente fue adelgazada extensivamente y fue invadida por el flujo de material fundido del manto, (b) La Cresta Alarcón termina en corteza que ha sido inyectada por diques basálticos y tiene poca variación composicional con MORB, (c) un parte significativa de la historia temprana de la abertura, incluyendo parte de la corteza más temprana del Golfo, está enmascarada por sedimentos que cubrieron las márgenes del rift. La Cresta de Alarcón fué emplazada en corteza basáltica más antigua. La naturaleza de los basaltos colectados hacia el norte del Golfo sugiere que esto último pudiera ser un factor importante.

A magnetostratigraphic and geochronologic framework for the proto-Gulf: Constraining the spatial and temporal distribution of Gulf of California rifting.

John W. Holt, Institute for Geophysics, University of Texas, 4412 Spicewood Springs Rd., Bldg. 600, Austin, TX 78759 USA, jack@ig.utexas.edu.

Xavier Quidelleur, Institut de Physique du Globe, 4 place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05, France, quidel@geol.u-psud.fr

Marine sedimentary rocks deposited during early phases of Gulf rifting have been identified in many locations immediately surrounding the Gulf of California, often associated with volcanic rocks. Paleomagnetic and geochronologic studies performed on a limited number of these sites have produced results which help constrain the onset of marine sedimentation; however, many sites remain unstudied and the potential exists to greatly expand our knowledge of the spatial and temporal distribution of the rifting process. Improved techniques in paleomagnetic sampling and geochronology should enable useful results with quantifiable errors to be obtained from sections previously thought to be unreliable.

Important elements of any such study are a thorough understanding of the sedimentary environment, careful paleomagnetic sampling and demagnetization techniques specifically tailored for sedimentary rocks, and geochronologic sampling and analyses on volcanic rocks

whose relationship to the sedimentary deposits is clear. Marine rocks of the Santa Rosalía basin, Baja California Sur, were sampled in a pilot study of this type (Holt et al., GSA Bulletin v. 112, p. 550-563, April 2000). Air-cooled drilling and high-resolution demagnetization using both alternating-field and thermal techniques produced results which clearly showed that the Boleo Formation, the earliest marine sequence overlying the basement in that area, carried a primary magnetic remanence with stratigraphically bound normal- and reversed-polarity directions. A single $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ isotopic age of 6.76 ± 0.90 Ma (2 σ) was obtained for the *cinta colorada*, a tephra deposit of reversed paleomagnetic polarity within the formation. This age was further refined by calculating isotopic age probabilities for each of the reversed-polarity intervals of the geomagnetic polarity time scale (GPTS) in the $\pm 2\sigma$ range. Using the isotopic age, preliminary magnetostratigraphy of the Boleo Formation is correlated with the GPTS in order to further constrain the onset of marine sedimentation. The most likely correlation yields an age of 6.93 - 7.09 Ma (GPTS subchron C3Bn) for the base of the Boleo Formation and 6.14 - 6.27 Ma for the top, with an average sedimentation rate of 28 ± 4 cm/kyr.

This study showed that with a single robust isotopic age and reconnaissance style sampling, GPTS correlations for marine sedimentary sections can be made with quantifiable probabilities. This method helps to determine the need for more detailed sampling, making the entire process more efficient. It also helps determine the usefulness of the results for magnetostratigraphic correlations with other sections which may lack geochronologic information.

The goal is to study multiple marine sections in the Gulf of California margin using these techniques in order to better understand the distribution of early Gulf rifting, and to produce a paleomagnetic and geochronologic framework for other geologic studies in the region. This would include a database of all results obtained in the course of this work in addition to existing results. A clearer picture of proto-Gulf formation, in conjunction with data on the current distribution of motion across the margin (from other sources), should provide a much improved understanding of the transfer of continental crust from one plate to another.

Marco geocronológico y magnetoestratigráfico para el proto Golfo: Acotaciones de la distribución espacial y temporal del *rifting* en el Golfo de California.

John W. Holt, Institute for Geophysics, University of Texas, 4412 Spicewood Springs Rd., Bldg. 600, Austin, TX 78759 USA, jack@ig.utexas.edu

Xavier Quidelleur, Institut de Physique du Globe, 4 place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05, France, quidel@geol.u-psud.fr

En varias localidades alrededor del Golfo de California se han identificado rocas sedimentarias marinas depositadas durante la fase temprana del rift, frecuentemente asociadas a rocas volcánicas. Los estudios geocronológicos y paleomagnéticos en un número limitado de estos sitios han ayudado a constreñir el inicio de la sedimentación, no obstante, muchos sitios permanecen sin estudiar y son potencialmente útiles para expandir el conocimiento sobre la distribución espacial y temporal de los procesos de *rifting*. Mejores técnicas de muestreo

paleomagnético y geocronología proporcionarán resultados útiles, con errores cuantificables, para obtener datos de secciones que se consideraban poco confiables.

Importantes factores en cualquiera de estos estudios son: un buen entendimiento de los ambientes sedimentarios, un muestreo paleomagnético cuidadoso, técnicas de magnetización específicamente diseñadas para rocas sedimentarias, y el muestreo y análisis de rocas volcánicas con una relación clara con los sedimentos. Los depósitos marinos de la Cuenca de Santa Rosalía, Baja California Sur, se muestrearon y fueron objeto de un estudio piloto de este tipo (Holt et al., GSA Bulletin v. 112, p. 550-563, April 2000). Barrenos enfriados con aire y técnicas de demagnetización térmica y por campos alternos de alta resolución permitieron obtener datos, que indican claramente, una transición estratigráfica con polaridad normal a inversa en la Formación Boleo, la cual es la primera unidad marina sobre el basamento en la Cuenca de Santa Rosalía. De la unidad Cinta Colorada se obtuvo una edad de 6.76 ± 0.90 Ma (2σ) por $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, que corresponde a una tefra con polaridad inversa dentro de la Formación Boleo. Esta única edad isotópica se refinó mediante el cálculo de las probabilidades de edad isotópica de cada uno de los intervalos con polaridad inversa de la escala de tiempo de polaridad geomagnética (GPTS) en el rango $\pm 2\sigma$. Con base en la edad isotópica la magnetoestratigrafía de la Fm. Boleo se correlacionó con la GPTS para mejor definir la edad del inicio de la sedimentación marina. La correlación más probable arroja una edad de 6.93 - 7.09 Ma (subchron C3Bn en GPTS) para la base de la Fm. Boleo y 6.14 - 6.27 Ma para la cima, con una tasa de sedimentación de 28 ± 4 cm/ka

Este estudio demostró que una sola, pero robusta edad isotópica y el muestreo a nivel de reconocimiento, las correlaciones de secciones sedimentarias marinas con la GPTS pueden realizarse con probabilidades cuantificables. Este método ayuda a determinar la necesidad de muestreos más detallados, haciendo todo el proceso del estudio más eficiente. También ayuda a determinar la utilidad de las correlaciones magnetoestratigráficas con otras secciones que carecen de información geocronológica.

James S. Jackson
4402 SE Knapp St.
Portland, OR 97206
Tel: 503-771-3887
Email: Qtzdiorite@aol.com

Abstract

Transform faults are located between sea floor spreading ridges. Movement on transform faults is known to occur between the ridges on the 'inboard segment'. Industry data show that movement also can occur on the 'outboard segment' extending beyond the ridges. The origin of transform faulting is poorly understood. It is presumed that some transform faults develop at the site of transfer faults during the transition from rifting to seafloor spreading. Basement features have been proposed as the precursors for several transform faults in the North Atlantic. Many

transform faults, however, have not been correlated to precursor basement structures. The maturity and complexity, however, of the Atlantic sea floor spreading system renders detailed, small scale studies of the origin of transform faulting problematic.

The Gulf of California/Sultan Trough is an area of recently initiated sea floor spreading where the origin of transform faulting may be examined in greater detail than elsewhere. Marine seismic data may be interpreted to describe the rift basin geometry that preceded sea floor spreading in the basin. The possible relationships between rift-related transfer faults and subsequent transform faults should be evident from a regional scale seismic data set. It may also be possible to observe if there is a relationship between the latest movements on transfer faults and the movements on nearby transform faults during sea floor spreading.

Basement structures that may control the location of transform and transfer faults should be well exposed in the onshore region bordering the Gulf of California/Sulton Trough. Tentative correlation may be made using remote sensing images and structural mapping of offshore seismic data. Field checking of the most prominent onshore features may reveal movement on the basement features that is coeval with either the rifting or sea floor spreading process.

Resumen

Las Fallas Transformes se localizan entre segmentos de dorsales oceánicas. Se sabe que el movimiento en las fallas transformes ocurre en el segmento interno. Datos de exploración muestran que el movimiento puede también ocurrir en el segmento externo el cual se extiende pasando el segmento de cresta. El origen del fallamiento transforme aun se desconoce y se presume que algunas fallas transformes se desarrollan en las zonas que ocupan las fallas de transferencia durante la transición entre el rifting y la dispersión oceánica. Se ha propuesto que rasgos en el basamento pueden también ser precursores de varias fallas en el norte del Atlántico. Sin embargo, muchas fallas transformes no han sido correlacionadas con estructuras precursoras en el basamento. La madurez y complejidad del sistema de dispersión oceánica del Océano Atlántico torna problemáticos los estudios a pequeña escala sobre el origen del fallamiento transcurrente.

El Golfo de California y el Salton Trugh son un arrea con dispersión oceánica recientemente iniciada que puede estudiarse con mayor detalle que en cualquier otra parte.. Los datos de sísmica marina pueden interpretarse parra describir la geometría de las cuencas que antecedieron la dispersión oceánica. La posible relación entre fallas de transferencia relacionadas con el rift y las fallas transformes deben ser evidentes en las imágenes sísmicas de estudios regionales. También debe ser posible observar si existe una relación entre el ultimo movimiento en la falla transforme y los movimientos en las fallas cercanas durante la dispersión del piso oceánico.

Las estructuras del basamento que pueden controlar la localización de las fallas transformes y de transferencia deben estar expuestas en la región que bordea el Golfo de California y el Salton Trough. Correlaciones tentativas puede establecerse utilizando imágenes de sensores remotos e interpretación estructural de las secciones sísmicas marinas. Verificación de campo de las

estructuras más prominentes en tierra pueden revelar algún movimiento en rasgos del basamento que pudo haber coevolucionado con los procesos de rifting o de dispersión oceánica.

Insights into continental extension from field studies in the northern and Rocky Mountain Basin and Range province

Susanne U. Janecke , Dept. of Geology,
Utah State Univ., Logan UT 84322 sjanecke@cc.usu.edu

Integrated analyses of basin-scale structure, facies and provenance data, geochronology, biostratigraphy, and geophysics have shed new light on many processes of continental extension at shallow crustal levels in the Rocky Mountain and Northern Basin and Range province. Fourteen years of geologic mapping and field studies in more than a dozen rift basins have revealed the following about extensional tectonics, basin architecture, and the relationship between magmatism and normal faulting.

Structure and tectonics:

- Stratigraphic and structural relationships within individual rift basins range from very simple to very complex. Adjacent basins, and even parts of individual large basins may differ dramatically in their degree of structural and stratigraphic complexity.
- Strain is highly three-dimensional in many rift basins. Complex rift basins exhibit extensional folds in orthogonal sets, and multiple distinct phases of rifting with highly variable extension directions over time.
- Dramatic changes in extension direction (up to 90°) may occur in short periods of time.
- Extension folds are plentiful, and exhibit a range of geometries in these rift basins. Some basins are fold prone, whereas others contain only basin-scale synclinal warps.
- The highest rates of extension and largest normal faults develop fairly early in the history of normal faulting. Moderate to low-magnitude extension may overprint these early structures.
- The largest normal faults collapse structural culminations formed during a prior history of regional shortening in the Sevier fold and thrust belt. Areas adjacent to culminations exhibit lesser extensional strains.
- Preexisting structural weaknesses exert a strong influence on the geometry of extensional deformation.
- The bulk of the extension coincides with times of little or no magmatic activity. In fact, time-space patterns may indicate an anti-correlation between extension and magmatism, as has been suggested elsewhere by Gans and Bohron (1998).

Rift basin architecture and evolution

- The stratigraphic architectures of rift basins above low-angle and listric normal faults do not differ significantly from those of basins bounded by steep to moderately dipping normal faults. The supradetachment basin model of Friedmann and Burbank (1995) does not appear to be applicable to any of the supradetachment basins in our study areas.
- The principal basin forming and sedimentation event is often followed by a separate (?) deformational event which faults, tilts, and folds the early rift deposits. Oddly, sediment is rarely preserved from this “break-up” deformational event, either due to non-deposition or subsequent erosion. Despite strong and compelling evidence for normal faulting during deposition of the early rift deposits, in the form of rock avalanche deposits, and coarse clastic material shed from the footwall, map-scale and outcrop-scale growth relationships are usually cryptic, and many basin-fills appear conformable. Younger sedimentary or volcanic deposits that locally overlie the strongly tilted units are thin or localized in their distribution.

Our results in other extensional regions confirm the importance of the goals of this workshop: namely to
1) further our understanding of the horizontal, vertical, and temporal distribution and partitioning of

continental extension and 2) understand the relationship between extension patterns and the stratigraphic evolution of rift basins.

Percepciones de la extensión continental en la provincia del Basin and Range y el norte de las Montañas Rocallosas a partir de estudios de campo.

Susanne U. Janecke , Dept. of Geology, Utah State Univ., Logan UT 84322
sjanecke@cc.usu.edu

El análisis integrado de la estructura de las cuencas, incluyendo análisis de facies y proveniencia, bioestratigrafía y geofísica ha contribuido a entender muchos procesos de extensión continental en niveles superiores de la corteza continental en la provincia del Basin and Range y el norte de las Montañas Rocallosas. En los últimos 14 años, la cartografía geológica y los estudios de campo en más de una docena de cuencas de rift han revelado los siguientes aspectos sobre tectónica extensional, arquitectura de las cuencas y la relación entre magmatismo y fallamiento normal.

Tectónica y estructura

- Las relaciones estratigráficas y estructurales internas de las cuencas de rift varían desde muy simples hasta muy complejas. Cuencas adyacentes y aún las partes de cuencas más grandes pueden variar dramáticamente en el grado de complejidad estructural y estratigráfica.
- La deformación es grandemente tridimensional en muchas de las cuencas de rift. Las cuencas de rift más complejas muestran pliegues extensionales en arreglos ortogonales y etapas múltiples de rifting con dirección de extensión variable en el tiempo.
- Pueden ocurrir cambios dramáticos en la dirección de extensión (hasta 90°) en cortos períodos de tiempo.
- Los pliegues extensionales en estas cuencas son abundantes y muestran una gran gama de geometrías. Algunas cuencas son propensas a desarrollar pliegues mientras otras solo desarrollan pliegues sinclinales de pequeña escala.
- Las mayores tasas de extensión y las fallas normales más grandes se desarrollan en la etapa temprana del fallamiento extensional. Estas estructuras tempranas pueden tener sobrepuestas otras estructuras desarrolladas por la extensión tardía.
- Las fallas normales más grandes colapsan las culminaciones estructurales formadas durante la historia previa de acortamiento en el cinturón de pliegues y cabalgaduras de Sevier. Las áreas adyacentes a estas culminaciones muestran menor deformación extensional.
- Las debilidades estructurales preexistentes ejercen una fuerte influencia en la geometría de la deformación extensional.
- El grueso de la extensión coincide con períodos de poca o nula actividad magmática. De hecho, los patrones de espacio-tiempo pueden indicar anticorrelación entre extensión y magmatismo, como han sugerido Gans y Bohrsen (1998).

Arquitectura de las cuencas de rift y evolución

- La arquitectura estratigráfica de las cuencas de rift por encima de fallas normales lítricas y de bajo ángulo no difiere significativamente de la arquitectura de las cuencas bordeadas por fallas normales subverticales o de echado moderado. El modelo de cuenca supradetachment de Friedman y Burbank (1995) no parece aplicarse a ninguna de las cuencas supradetachment en nuestras áreas de estudio.

- El principal evento formador de la cuenca y la sedimentación frecuentemente es seguido por un evento separado (?) de deformación que corta, bascula y pliega los depósitos jóvenes del rift. Desafortunadamente, el sedimento raramente es preservado durante este evento distinto de deformación, ya sea porque no hubo depósito o porque fue erosionado. A pesar de las evidencias contundentes de fallamiento normal contemporáneo con los primeros depósitos de avalancha de rocas y sedimentos gruesos derivados del bloque de piso, las relaciones de crecimiento comúnmente no se observan y los depósitos de cuenca parecen concordantes. Los depósitos sedimentarios o volcánicos jóvenes que localmente sobreyacen a unidades fuertemente basculadas son generalmente delgados y/o de distribución muy limitada. Nuestros resultados en otras regiones extensionales confirman la importancia de las metas de este taller, que son: mejorar nuestra comprensión de la distribución vertical, horizontal y temporal de la extensión continental y 2) entender las relaciones entre los patrones de extensión y la evolución estratigráfica de las cuencas de rift.

Possible Research on Genesis of Igneous Crust in the Gulf of California, Salton Trough and Baja California

Peter Kelemen, Woods Hole Oceanographic Institution

A first order question in studying magmatism along rifted continental margins is whether mantle upwelling and partial melting is "passive", driven entirely by lithospheric extension, or "active", undergoing convection at a rate faster than the lithospheric spreading rate. Study of the northern Gulf and Salton Trough can provide important constraints on this issue. Seismic refraction data can be used to estimate the thickness and velocity of new, igneous crust. This is least ambiguously done in the Gulf, where there is (?) no ancient continental crust. Along strike extension of seismic lines from the Gulf into the Salton Trough will permit estimation of how much of the Salton crust is new, igneous material and how much is older. Study of volcanic rocks in the Gulf and adjacent areas can place constraints on the mantle potential temperature and composition. Given mantle composition, mantle temperature and estimates for the rate of lithospheric extension and thinning, one can quantitatively estimate the thickness of new igneous crust which should result from passive mantle upwelling. These estimates can be compared to seismic data to determine how much "excess" igneous crust, if any, is being produced via active upwelling. Seismic velocities of igneous crust can also be used to independently constrain the average pressure and fraction of mantle melting, which can also yield estimates on the proportion of active vs passive mantle upwelling. This approach has been used to study the Atlantic margin of southeast Greenland and the US east coast. Results have been reported in, e.g.,

Korenaga, J. and P.B. Kelemen, Major element heterogeneity in the mantle source of the North Atlantic igneous province, *Earth Planet. Sci. Lett.*, submitted April, 2000.

Korenaga, J., Kelemen, P.B. and W.S. Holbrook, Mantle melting and crustal accretion processes during the formation of the Southeast Greenland margin, *J. Geophys. Res.*, submitted May, 2000.

Holbrook, W.S., et al., Mantle thermal structure and melting processes during continental breakup in the North Atlantic, *Earth Planet. Sci. Lett.*, revised July, 2000.

Korenaga, J., et al., Crustal structure of the southeast Greenland margin from joint refraction and reflection seismic tomography, *J. Geophys. Res.*, in press.

Kelemen, P.B. and W.S. Holbrook, Origin of thick, high-velocity igneous crust along the U.S. East Coast margin, *J. Geophys. Res.* 100, 10, 077-10,094, 1995.

Holbrook, W.S. and P.B. Kelemen, Large igneous province on the US Atlantic margin and implications for magmatism during continental breakup. *Nature* 364, 433-436, 1993.

Based on a literature review, it seems that though large portions of the Baja Peninsula may be underlain by juvenile continental crust, albeit slightly contaminated by older, continentally-derived clastic sediments. It would be very valuable to make a comparative study with the Sierra Nevada, in particular to see if the lower crust is as seismically slow, and "granitic", as observed in the Sierra Nevada, with a very abrupt Moho. One possibility is that dense, mafic lower crust has "delaminated" from beneath the Sierra Nevada.

A related topic is to study the origin of Recent volcanics along the Baja Peninsula which have the composition of enriched, arc andesites - very similar to bulk continental crust. The origin and implications of such high Mg# andesites are presented in, e.g.,:

Yogodzinski, G.M. and P.B. Kelemen, Slab melting and Aleutian magma genesis: Evidence from an ion probe study of clinopyroxene in primitive adakite and basalt, *Earth Planet. Sci. Lett.* 158, 53-65, 1998.

Kelemen, P.B., Genesis of high Mg# andesites and the continental crust. *Contrib. Min. Pet.* 120, 1-19, 1995.

Kelemen, P.B., N. Shimizu, and J.T. Dunn, Relative depletion of niobium in some arc magmas and the continental crust: Partitioning of K, Nb, La and Ce during melt/rock reaction in the upper mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 120, 111-133, 1993.

It is striking that in Baja such andesites are being produced even though there is currently no subduction there. It seems that the Recent andesitic magmatism must be associated with a relict subducted slab beneath the Peninsula, or perhaps with "delamination" of garnet granulites from the base of the crust. In this context, a theoretical study of lower crustal "delamination", in which dense lower crust may become gravitationally unstable and sink into the upper mantle is presented in:

Jull, M. and P.B. Kelemen, On the conditions for lower crustal convective instability, *J. Geophys. Res.*, revised July 2000,

available from the first author on request.

Dr. Graham M. Kent
9500 Gilman Drive, University of California, San Diego
Institute of Geophysics & Planetary Physics

IGPP-0225
San Diego, CA 92093

Research Interests:

General: Multichannel & OBS seismology, techniques and application thereof, including 3-D acquisition & imaging

Geo: Mid-ocean ridge structure and dynamics, rifted margins, Basin & Range tectonics, and Back-arc Basins

Current Projects: ARAD 3-D reflection and tomographic imaging of a mid-ocean ridge spreading center, MCS survey of Lau Basin Back-Arc spreading center, structure of ultra-fast (200 mm/yr) spreading crust, and seismic structure of the Lake Tahoe Basin using broad-band CHIRP

To date, I have not worked in the GoC /Baja Region, but I do have two proposals into Continental Dynamics and Ridge to study various aspects of near-by sea-floor spreading and continental rifting of the Baja peninsula, and the dynamics of plate coupling.

In both proposals, we are allied with Mexican scientists at CICESE.

Flexural Modeling of the Peninsular Range as the Salton Trough Rift Shoulder

Grant Kier and Karl Mueller, Department of Geological Sciences
University of Colorado, Boulder, CO 80309-0399

Lithospheric flexure produces uplift of the northern Peninsular Range Province in southern California and northern Baja California. Gravity profiles, seismic refraction, and tomography provide constraints for a numerical model of a free-end elastic plate. Vertical deformation of the elastic plate results from a 1.5×10^{12} kg/m buoyant force from a low density (3.1 g/cm^3) mantle anomaly and the Vening Meinesz uplift effect. A modeled profile across southern California from the Salton Trough to the offshore Borderlands shows total uplift at the rift shoulder axis of ~1800 m and uplift at the Pacific coast of ~70 m. Uplift of the model matches the topography of the Peninsular Ranges and middle Miocene stratigraphy in an offshore oilwell. Uplift along the rift shoulder, published rift age estimates, and rift propagation rates provide rough constraints on a maximum uplift rate for the rift shoulder of approximately 0.5mm/yr along the rift axis and 0.01mm/yr at the coast. Although the rift shoulder axis is segmented, the length of the rift shoulder and the overall northwestward decrease in maximum elevations along the rift axis correspond to the northward propagation of the evolving rift system. The thickness, density, and lateral extent of the mantle upwelling, and the thickness of the lithosphere define the half-wavelength and elevation of the rift shoulder model.

PLIOCENE EVOLUTION OF THE BAHIA CONCEPCION REGION, BCS, MEXICO.

Jorge Ledesma Vázquez
Facultad de Ciencias Marinas
UABC, Ensenada 22800 B.C.
ledesma@faro.ens.uabc.mx

The San Nicolás Basin was formed within the Proto-gulf extensional province during the Miocene, from 12 to 14 Ma. It was formed during the main extensional period as one of the multiple synthetic basins associated with the transfer zone coupled to the Bahía Concepción accommodation zone. The extensional process resulted in the uplift and exhumation of the regional Cretaceous granodiorite basement (99 ± 2 Ma), and the contemporaneous formation of Los Volcanes, La Ramadita and San Antonio basin limiting faults, and the tilting of volcanic blocks of Miocene age. The Los Volcanes fault is a listric fault associated with a roll-over structure that developed shortly after the main extensional event. The oldest deposited units are lithic tuffs, draped around the volcanic and plutonic blocks like an apron, with high dipping angles. The San Nicolás Formation (new Formation defined in this work) is a lithostratigraphic unit with three members. The lower Los Volcanes Member, the Lodolita Arroyo Amarillo Member, and the upper La Ballena Member. Most of the sedimentary units in the San Nicolás Formation reflect a post-extensional episode that showed great initial subsidence associated with low rates of sedimentation followed by periods of shallow water deposition dominated by storm activity. The maximum age assigned to the oldest Los Volcanes tuff is 3.3 ± 0.5 Ma.

COMPARACION DE LA ESTRATIGRAFIA PARA CUENCAS DEL PROTO-GOLFO DE CALIFORNIA, B.C.S.

Jorge Ledesma Vázquez
Facultad de Ciencias Marinas
UABC, Ensenada 22800 B.C.
ledesma@faro.ens.uabc.mx

La Cuenca San Nicolás se formó dentro de la provincia extensional del Proto-golfo durante el Mioceno, entre 12 y 14 Ma. Como resultado directo del episodio extensional principal, se formó como una cuenca asociada a una zona de transferencia de tipo sintética múltiple, relacionada con la zona de acomodamiento de Bahía Concepción. El proceso extensional exhuma al basamento regional granitoide cretácico [99 ± 2 Ma], haciéndolo aflorar en Punta San Antonio y se propone la presencia de una estructura de tipo roll-over, en un estadio postrero del proceso extensional. Las unidades sedimentarias reflejan en general un episodio post-extensional y de gran subsidencia inicial con baja sedimentación, además de un origen somero y asociado con eventos de tormenta para la mayoría de las unidades marinas. Y hacia la cima depositos por marea de hasta 18 m de espesor. La máxima edad determinada dentro de las unidades depositadas al interior de la cuenca es de $3.3. \pm 0.5$ Ma.

Al norte de Bahía Concepción y hasta Santa Rosalía, las unidades estratigráficas asignadas a la Formación Infierno, reflejan condiciones de sedimentación continua, en condiciones de calma y

con una subsidencia moderada. Para ambas regiones la posición relativa del nivel del mar fue la misma.

De lo anterior se propone que conexión entre las aguas del Proto-golfo y el actual Golfo de California no se había alcanzado hasta finales del Plioceno y la cabeza del actual Golfo de California se presentaba muy cercana al área de Cuenca San Nicolás, durante el Plioceno tardío. El límite oriental de la provincia extensional del Proto-golfo para esta región, lo constituye el Escarpe Concepción, actualmente bajo las aguas del Golfo de California y asociado a este estadio tectónico.

Micropolar Inversion for 3-Dimensional Seismogenic Strain Along the Sierran-North America Boundary in the Coso Range of California, A Kinematic Analog for the Gulf of California

LEWIS, Jonathan C., UNRUH, Jeffrey, R., TWISS, Robert J. (Lewis & Twiss at Department of Geology, University of California, Davis, CA 95616 USA, Unruh at William Lettis and Associates, 1777 Botelho Drive, Walnut Creek, CA 94596 USA.)

Using a numerical inversion of seismic focal mechanism solutions for microseismic events, we document distinct scales of strain partitioning along the "transtensional" SE margin of the Sierran microplate. We use micropolar continuum theory as a basis for inverting the focal mechanisms from which we infer the orientations and relative magnitudes of the principal strain-rates, and the independent relative vorticities. Compared with commonly employed stress-inversion methods, the micropolar approach provides an additional degree of kinematic freedom that enables us to quantify differences between the microvorticity that is related to the rotation rate of the fault blocks and the macrovorticity that is defined by the deformation of the large-scale continuum. For both scales of partitioning that we document, deformation is partitioned into strain geometries with subhorizontal E-W maximum lengthening axes (d_1) and either (1) subhorizontal or (2) subvertical minimum lengthening axes (d_3). Nominally the former is consistent with horizontal dextral shearing and the latter with normal faulting. In the area of Wildhorse Mesa the seismic events associated with these two strain geometries show a strong depth dependence whereby crustal thinning is accommodated from the surface to 5 km and horizontal dextral shearing is accommodated from 5 km to 8 km. Similar depth-dependent partitioning has been observed in analog models of "transtension". Using fault patterns and paleomagnetic data we plan to constrain the geometries and dimensions of crustal fault blocks, and thereby to elucidate the nature of the transition between near-surface normal faulting and deeper strike-slip faulting. In marked contrast, the seismic events associated with both strain geometries in the Indian Wells Valley (25 km S of Wildhorse Mesa) are extensively spatially intermixed over length scales no greater than the resolution of the events (i.e., hundreds of meters). These results highlight the potential for extraordinarily fine-scale partitioning of large-scale deformation and suggest that single faults may accommodate two strain geometries by slipping in different directions at different times. Such partitioning of large-scale deformation is essentially geologically instantaneous and this finding has implications for interpreting multiply-lineated faults in the rock record. On the basis of our results from the Coso Range we conclude:

1) focal mechanism data allow determination of 3-dimensional strain partitioning in relatively large volumes of crust; 2) large-scale oblique deformation is accommodated by partitioning into two nearly orthogonal plane strain components, crustal thinning and horizontal crustal shearing; and 3) the scale over which this partitioning occurs varies from hundreds of meters to kilometers. These results highlight the detailed understanding of active deformation afforded by the application of micropolar continuum theory to a kinematic regime that is, to a first order, similar to that of the Gulf of California.

Inversión micropolar en deformación sismogénica tridimensional a lo largo del límite Sierras-Norteamérica en Sierra Coso, California, un análogo cinemático para el Golfo de California.

LEWIS, Jonathan C., UNRUH, Jeffrey, R., TWISS, Robert J.,
(Lewis & Twiss at Department of Geology, University of California, Davis, CA 95616 USA,
Unruh at William Lettis and Associates, 1777 Botelho Drive, Walnut Creek, CA 94596 USA.)

Con base en inversión numérica de solución de mecanismos focales en eventos microsismicos, documentamos escalas distintivas de partición de la deformación a lo largo del margen transtensional SE de la microplaca Sierras. Utilizamos teoría “continuum micropolar” como base para invertir los mecanismos focales, de los que inferimos la orientación y la magnitud relativa de la tasa de deformación principal y la vorticidad relativa independiente. Comparado con los métodos de inversión de esfuerzos utilizados comúnmente, la aproximación micropolar proporciona un grado de libertad cinemática adicional que nos permite cuantificar diferencias entre la microvorticidad relacionada a la tasa de rotación de los bloques a fallados y la macrovorticidad definida por la deformación a gran escala en *continuum*. Para ambas escalas de partición que hemos documentado, la deformación esta repartida esfuerzos con geometría con ejes subhorizontal de alargamiento en dirección E-W (d1) y ejes de alargamiento mínimo (1) subhorizontal o subvertical (d3). Nominalmente, el primero es consistente con cizalla dextral horizontal y el segundo con fallamiento normal. En el área Mildhorse Mesa, los eventos sísmicos asociados a estas dos geometrías de esfuerzos muestran una fuerte dependencia con la profundidad, en la cual, el adelgazamiento de la corteza ocurre entre 0 y 5 km y la cizalla horizontal derecha se acomoda entre 5 y 8 km. Una partición similarmente dependiente de la profundidad se ha observado en modelos análogos “transtensivos”. Utilizando patrones de falla y datos paleomagnéticos pensamos constreñir la geometría y las dimensiones de los bloques corticales, y por este medio elucidar la naturaleza de la transición entre fallamiento normal somero y fallamiento de rumbo más profundo. En marcado contraste, los eventos sísmicos asociados con ambas geometrías de deformación en Indian Wells Valley (25 km al sur de Wildhorse Mesa) se presentan espacialmente mezcladas en escalas de distancias menores a la resolución de los eventos (i.e. cientos de metros). Estos resultados resaltan el potencial para definir la partición a muy pequeña escala de la deformación a gran escala, y sugiere que una falla puede acomodar dos geometrías de deformación al moverse en distintas direcciones en diferentes tiempos. Esta partición de deformación a gran escala es geológicamente instantánea y estos resultados tienen implicaciones en la interpretación de fallas múltiples alineadas en el registro geológico. Con base en nuestros resultados de la Sierra Coso concluimos que: 1) los datos de mecanismos focales permiten la determinación de la partición de la deformación tridimensional

en volúmenes relativamente grandes de la corteza, 2) la deformación oblicua de gran escala es acomodada mediante la partición en dos componentes de la deformación en planos ortogonales, el adelgazamiento de la corteza y por cizalla horizontal en la corteza, y 3) la escala en la que ocurre esta partición varía de cientos de metros a kilómetros. Estos resultados destacan el detallado nivel que puede alcanzarse para comprender la deformación activa aplicando teoría de *continuum micropolar* a un régimen cinemático que es, en principio, similar al Golfo de California.

Daniel Lizarralde

**Asst Professor of Geophysics
Georgia Tech
School of Earth and Atm Sci
221 Bobby Dodd Way
Atlanta, GA 30332-0340 USA**

**voice: 404 894-3976
fax: 404 894-5638**

Jim Gaherty and I are part of the group of PIs who have a pending CD proposal to study the presence and influence of a stalled slab beneath Baja. The lead on this proposal is Gary Axen, and the full PI list is as follows:

U.S.: Gary Axen (UCLA), Dan Lizarralde, Jim Gaherty (GA Tech), Graham Kent, Alistair Harding, Peter Lonsdale, Steve Constable (SIO), George Jiracek, Dave Kimbrough (SDSU), Mousumi Roy (UNM)

México: Antonio González, John Fletcher, Arturo Martín, Enrique Gómez (CICESE)
Raul Castro, Lance Forsythe, Cecilio Rebolgar, José Romo (CICESE)

This project aims to established the background geodynamic framework within which many of the processes attending rifting and spreading in the Gulf of California operate. A considerable history of effort lies behind this CD proposal, and this includes a significant interaction with our Mexican colleagues.

In addition to our efforts trying to get the CD project going, Jim and I have broad interests in this region and in rifting and upper mantle dynamics generally. Jim is persuing ongoing research into the upper mantle structure of the Southwestern US, and I have longstanding interest in rifted margins and upper mantle evolution through rifting.

Both Jim and I intend to submit proposals to the MARGINS Jan 15th deadline addressing questions in the Gulf of California. I know that there are already a number of plans by other workers to do similar things, and so this meeting will be particularly important for folks like us to coordinate these efforts as best as possible.

The dearth of "transitional crust" in the well exposed southern Gulf of California

Peter Lonsdale, Scripps Institution of Oceanography

"Transitional crust" in belts tens of km wide between "truly oceanic" and "truly continental" crust features in many models of rifted and sheared margins, and in many interpretations of geophysical surveys of such margins (especially ancient sediment-obscured Atlantic margins). A striking feature of both types of margins in the southern Gulf is the abrupt contact between granite/andesitic continental crust and typical oceanic crust, with normal MORB, abyssal hills, magnetic lineations and relatively fast spreading rates. This was noteworthy at the DSDP 64 transect at the southeast tip of the peninsula, but could be explained away when it was realized that the 3.5 Ma oceanic crust there was the product of a spreading axis that propagated along a pre-existing continental/oceanic boundary, rather than having accreted in the earliest phase of spreading; interpretations of the DSDP transect suggested an unsampled belt of transitional crust "with listric faulting, dike injection, " etc. existed on the east flank of the rise, forming Maria Magdalena Rise. However, subsequent geophysical surveys (multibeam, SCS, magnetics, gravity) have shown that most of MMR is a typical oceanic rise, with seafloor-spreading anomalies that reveal the earliest episode of spreading in the Gulf (5.8 - 3.5 Ma). Even more striking, a recent survey of Alarcon Basin, the southernmost semi-enclosed oceanic basin in the Gulf, reveals knife-edge contacts, along both rifted and sheared margins, between large fault scarps of continental rock and typical oceanic crust. The only likely candidate sites for transitional crust (i.e. continental rock intruded by modified MORB) are embayments at the corners between sheared and rifted margins, where the tips of initial rifts were abandoned after a staircase of axis-linking transforms developed--a process that occurred very early in the spreading history. MORB flows from the present spreading axis lap at the foot of a 1 km-high scarp in continental crust along the sheared margin; the only superficial "transitional crust" here is a ~5 km wide zone of tectonised crust affected by the shifting strike of the transform fault, though the uplifted sheared margin may have been underplated by oceanic melts. Spreading began in Alarcon Basin at 3.7 - 3.4 Ma (progressively later from south to north) i.e., 2 m.y. after it had started in the mouth of the Gulf, 1 m.y. before it started in Guaymas Basin. Right from the start, its rate has been at least 80% of the estimated Pacific-North America divergence. The marine evidence is that the Gulf has hosted a shear zone accounting for almost all Pacific-North America motion since at least 6 Ma, and probably since 8 Ma. In the past 6 m.y., oceanic spreading centers have developed progressively from south to north. They were presumably preceded by diffuse, overlapping zones of extension and intrusion that produced "transitional crust", perhaps like those in the northernmost Gulf and Salton Sea, but there is scant evidence for such zones at the continental margins of the southern Gulf's oceanic basins.

La escasez de "corteza transicional" en las márgenes expuestas del sur del Golfo de California

Peter Lonsdale, Scripps Institution of Oceanography

En muchos modelos de márgenes de rift y de márgenes cizalladas modernas y antiguas (e.g. margen Atlántica), se ha propuesto la presencia de cinturones de decenas de kilómetros de ancho de "corteza transicional" que separa "verdadera corteza" oceánica y "verdadera corteza" continental. Un rasgo sobresaliente de estas márgenes en el sur del Golfo de California es el contacto abrupto entre corteza continental granítica-andesítica y corteza oceánica típica

(MORB), con presencia de colinas abisales, anomalías magnéticas y tasas de dispersión relativamente rápidas. Esto se encontró durante el DSDP 64 en el extremo SE de la península, pero solo pudo explicarse cuando se entendió que la corteza oceánica de 3.5 Ma se produjo por la propagación del eje de dispersión a lo largo de un límite océano -continente ya existente y no por efecto de la dispersión en su etapa temprana; en ese tiempo la interpretación del DSDP fue que la margen oriental, que incluye la cresta María Magdalena (que no fue muestreada) se trataba de un cinturón de corteza transicional con “fallamiento lístrico, con diques, etc.”. Sin embargo, estudios geofísicos subsecuentes (multibeam, SCS, magnéticos y gravimétricos) han demostrado que la cresta María Magdalena es una cresta oceánica típica, con anomalías magnéticas producidas por dispersión del piso oceánico, que representa la etapa más temprana de dispersión en el Golfo (5.8 – 3.5 Ma). Aun más sorprendente es el hecho de que un reciente crucero en la Cuenca de Alarcón, la cuenca semicerrada más meridional en el Golfo, se encontró un contacto abrupto entre bloques continentales y corteza oceánica típica a lo largo de grandes escarpes de falla de ambos tipos de márgenes (“rifted” y de cizalla). Los únicos sitios candidatos para contener corteza transicional (e.g. rocas continentales intrusionadas por MORB modificado) son las esquinas entre las márgenes separadas (rifted) y las márgenes cizalladas. En esas entradas los extremos de los segmentos de rift iniciales fueron abandonados después de desarrollarse una estructura escalonada de fallas transformes uniendo los ejes de segmentos de dorsal, un proceso que ocurrió muy temprano en la historia de la dispersión. A lo largo de la margen cizallada, los flujos tipo MORB del eje de dispersión actual se superponen al pie de la corteza continental en un escarpe de falla de > 1 km; en esa zona la única “corteza transicional” superficial es una zona de ~ 5 km de ancho de corteza tectonizada por la zona de falla transforme, aunque la margen cizallada y levantada también pudo haber sido subyacida e intrusionada por magma de afinidad oceánica. En la Cuenca Alarcón la dispersión inició hace 3.7 – 3.4 Ma (progresivamente de sur a norte), esto es, 2 Ma después de iniciado en la boca del Golfo y 1 Ma antes de que iniciara en la Cuenca de Guaymas. Desde el inicio, la tasa de dispersión ha sido al menos 80% de la divergencia estimada entre Pacífico y Norteamérica.

La evidencia marina es que el Golfo contiene una zona de cizalla que da cuenta de casi todo el movimiento Pacífico-Norteamérica al menos desde hace 6 Ma, y posiblemente desde los 8 Ma. En los últimos 6 Ma, los centros de dispersión se han desarrollado progresivamente de sur a norte. Estos fueron al parecer precedidos por zonas sobrepuestas de extensión difusa e intrusión que generaron “corteza transicional”, posiblemente igual que el norte del Golfo y el Salton Sea, aunque existen pocas evidencias de estas zonas en las márgenes continentales que bordean las cuencas oceánicas del sur del Golfo.

Fernando Martinez
Associate Researcher
Hawaii Institute of Geophysics & Planetology School of Ocean & Earth Science &
Technology University of Hawaii at Manoa
POST Bldg. Rm 814-A
1680 East-West Road
Honolulu, HI 96822, USA

Abstract

Heat flow measurements of active rift systems can provide significant information on the pattern of lithospheric extension and the transition from rifting to seafloor spreading. In the Fall of 1999 R/V Maurice Ewing conducted a heat flow survey in the sedimented marine continental rifts and margins of the Woodlark Basin. 247 thermal gradient and in situ conductivity measurements were made. These data are used to study the active rift-to-spreading evolution of the basin at three stages: (1) the early rift (Goodenough Basin transect), (2) the breakup thermal signal just ahead of the initiation of seafloor spreading (Moresby Seamount transect), and (3) the conjugate margins and ocean-continent transition following oceanic seafloor accretion (Pocklington and Woodlark Rises transects). The Goodenough Basin transect crosses a small rift basin where it was proposed that extension was localized based on multichannel seismic data. Contrary to expectations, the basin interior has a flat thermal signal with typical continental values (~ 56 mW/m²). Heat flow increases abruptly, however, to ~ 300 - 400 mW/m² near the northern end of the basin within 10 km of the coast of the D'Entrecasteaux Islands, metamorphic core complexes created by the rapid exhumation of lower crust. The lack of a thermal anomaly in the basin interior may be explained by horizontal flow of ductile lower crust from beneath the basin. Vertical ductile flow and emplacement of lower crust at the D'Entrecasteaux Islands, however, forms a significant thermal anomaly. The Moresby Seamount transect shows low values (~ 30 mW/m²) in the northern margin, in agreement with ODP Leg 180 drilling results. These values remain low in the northern margin where it is primarily downflexed and shows little faulting. About 10 km from the main faults which delimit the southern edge of the hanging wall the values progressively increase peaking at >300 mW/m² in the area ahead of the main Brunhes age spreading tip—a ten fold increase displaying a clear thermal signal consistent with dramatic thinning of the lithosphere and transition to oceanic spreading. The values then decrease on the southern margin but level off at more than twice the values of the northern margin, suggesting that subduction of the Solomon Sea plate beneath the northern margin may be responsible for the low northern values typical of forearcs. This broad thermal asymmetry also correlates with the prominent structural asymmetry of the margins here. The Pocklington and Woodlark Rises transects show generally elevated values (~ 50 - 200 mW/m²) but are everywhere less than the peak breakup values, consistent with cooling following breakup. Systematic variations are noted in some of the traverses crossing from the rifted margins toward the ocean-continent transition. In several cases, higher values in the margins abruptly decrease and remain lower on crossing major faults which drop the seafloor to the level of the oceanic basin. This oceanward cooling is opposite to what is predicted from thermal conduction models but may be explained by hydrothermal loss of heat if the transitional area is overlain by permeable lava flows which provide conduits for the advection of seawater.

Resumen

Las mediciones de flujos de calor en sistemas activos de rift pueden proporcionar información sobre los patrones de extensión de la litosfera y de la transición rifting-dispersión oceánica. En el otoño de 1999, con el B/O Ewing se realizaron mediciones de flujo de calor en las márgenes continentales de la Cuenca de Woodlark. Se realizaron 247 mediciones de conductividad *in situ* y de gradiente térmico. Estos datos se utilizaron para estudiar la evolución rift-dispersión oceánica.

activa en tres etapas representativas: (1) rift temprano (trayecto Goodenough Basin), (2) la señal de la ruptura térmica que sigue al inicio de la dispersión oceánica (trayecto Moresby Seamount), y (3) las márgenes conjugadas y la transición océano-continente y el piso oceánico acresionado (trayectos Pocklington y Woodlark Rises). Los trayectos en la Cuenca Goodenough cruzan una pequeña cuenca de rift, en donde se propuso que estaba localizada la extensión según los perfiles sísmicos multicanal. Contrario a lo esperado, el interior de la cuenca tiene una señal térmica plana con valores continentales típicos (~ 56 mW/m²). El flujo de calor se incrementa abruptamente a ~ 300 - 400 mW/m² cerca del extremo norte de la cuenca, en los 10 km de las costas de las Islas D'Entrecasteaux que contienen núcleos metamórficos formados por la exhumación rápida de la corteza inferior. La ausencia de anomalía térmica en el interior de la cuenca puede explicarse mediante flujo horizontal de corteza inferior dúctil por debajo de la cuenca. Sin embargo, el flujo dúctil en sentido vertical y el emplazamiento de la corteza inferior en las Islas D'Entrecasteaux constituye una anomalía térmica significativa. El trayecto Moresby Seamount muestra valores bajos (~ 30 mW/m²) en el margen norte, en acuerdo con resultados de perforación ODP Leg 180. Estos valores se mantienen bajos en el margen norte la cual es cóncava y muestra poco fallamiento. Los valores progresivamente incrementan a ~ 10 Km de la falla maestra que delimita el borde sur del bloque de techo. Estos valores son máximos (>300 mW/m²) en el área que ocupa la edad de la anomalía Brunhes. Este incremento es diez veces mayor y es una señal térmica clara que es consistente con un dramático adelgazamiento de la litósfera y de transición a dispersión oceánica. Después, los valores disminuyen en la margen sur, pero se mantienen al doble de los valores de la margen norte. Esto que sugiere que la subducción de la placa del Mar de Salomón bajo la margen norte puede ser la causa de los bajos valores en el norte, típicos de una zona de antearco. Esta amplia asimetría térmica también se correlaciona con la prominente asimetría estructural de las márgenes. Los trayectos Pocklington y Woodlark Rises generalmente muestran valores elevados (~ 50 - 200 mW/m²), pero en todas partes son menores que los valores pico de la zona de ruptura lo que es consistente con un enfriamiento que generalmente sigue a la ruptura. Se notan variaciones sistemáticas en algunos trayectos que cruzan las márgenes continentales hacia la transición continente-océano. En varios casos los valores más altos en las márgenes decrecen y se mantienen bajos al cruzar las fallas principales, las cuales hacen caer el piso de los bloques al nivel del piso oceánico de la cuenca. Este enfriamiento hacia el océano es opuesto al que predicen los modelos de conducción térmica, pero puede explicarse por pérdida de calor por circulación hidrotermal si la zona de transición está cubierta por flujos de lava permeables, que proveen los conductos para la advección de agua de mar.

Tim Melbourne, Central Washington University

Research Focus-

I use broadband waveform data and surface deformation fields to map lateral variation in plate strength and its control of continental dynamics. Insofar as shear wave speed proxies for elastic rigidity, lithospheric thickness can be mapped through waveform and travel time modeling of shallow mantle shear phases. For instance, transverse double-S velocity records propagating north from the East Pacific Rise into California along the continental margin show

highly variable waveforms and travel time anomalies reaching 20 seconds across broad band arrays. SS is triplicated by the 410 Km discontinuity. At distances closer than 36 degrees, the first arriving branch of the triplication bottoms in the shallow mantle, and the lack or presence of a lithospheric lid strongly influences SS-S travel time and SS waveform shape via interference of the two triplication branches (Helmberger, 1985). Large synthetic SS-S travel time anomalies occur with only modest increases in lid thickness, providing a sensitive parameterization. Figure 5 above shows data with waveform fits produced by varying uppermost mantle rigidity and lid thickness, inferred to range from effectively 0 km in the Basin and Range to greater than 55 Km along coastal California. Due to a high level of regional seismicity throughout the Gulf and the northern East Pacific Rise and the dense broadband seismic stations currently under deployment to the north, the upper most mantle throughout the field area proposed is well sampled.

Project Description (Tim Melbourne)

What controls crustal deformation along active continental margins? In the non-plate dynamics of distributed continental strain, one school of thought would attribute active control to buoyancy forces intrinsic to the crust (Jones et al, 1996; England and Molnar, 1997) while another would argue the sub-crustal lithosphere generates plate boundary forces which control not only margin deformation but strain interior to continents as well (Wernicke and Snow, 1998). Field evidence would seem to support both hypotheses: regional minimization of crustal potential energy has been successful in predicting some observed regimes of distributed continental extension, while palinspastic reconstructions of the Basin and Range show clear changes in extension direction which closely track related shifts in relative Pacific lithosphere motion at 8-10 MA (Atwater and Stock, 1998). Constraining the role of sub-crustal mantle in shaping continental deformation is key to understanding a variety of tectonic processes, including not only regional plate boundary evolution but global processes such as microplate capture, boundary modulation of continental tectonics, and gravity induced subduction initiation.

To decipher the relative importance of both forces, we must relate sub-crustal lithospheric strength to surface deformation fields. In California, where dense GPS networks have recently come online, we are beginning to fully appreciate the role of the mantle in modulating transform margin deformation (Bourne et al, 1998, Melbourne and Helmberger, 2000b). Joint seismic and geodetic observations here suggest that crustal deformation is controlled by Pacific plate underplating of the continental margin. Fast uppermost mantle P and S velocities characteristic of Pacific lithosphere extend inland beneath California, and their edge underlies a pronounced region of right lateral shear localization, as measured by SCIGN and its sister GPS networks. Correlations between seismic velocities and overlying strain rates indicate that these properties are strongly related. A model of basal tractions along crustal blocks proportional to sub-crustal mantle strength explains both the GPS and seismic waveform data.

Within the mature continental rift system directly south in the Gulf of California, however, intra-rift deformation data is sparse. While there is ample regional seismic data to constrain the sub-crustal lithosphere, the surface deformation field here is a fundamental missing observable without which mantle influence cannot be understood. I am interested in applying GPS and InSar within the Gulf Extensional Province to test the degree to which mantle structure controls extension throughout the rifting province. The primary questions I seek to answer are 1) What role does the Pacific plate

lithosphere play in controlling continental margin deformation along the plate boundary? 2) Is microplate capture of the Baja Peninsula by the Pacific plate complete, and if so, is this reflected in the sub-crustal mantle structure, and 3) What is the relative importance of lateral potential energy gradients versus basal tractions of crustal blocks?

Tim Melbourne
Líneas de investigación

Utilizando datos de forma de onda de banda ancha y campos de deformación de la superficie realizo modelos para detectar variaciones laterales en la resistencia de la placa y su control en la dinámica continental. A medida que las ondas de corte aumentan su velocidad, pueden obtenerse aproximaciones de la rigidez elástica; el espesor de la litosfera puede mapearse a través del modelado de la forma de onda y el tiempo de recorrido de las fases de cizalla en el manto superior. Por ejemplo, los registros de velocidades de la doble S transversa muestran anomalías de forma de onda y tiempos de viaje de altamente variables cuando se propagan al norte, del EPR hacia California, a lo largo del margen continental. Estas ondas alcanzan 20 segundos en los arreglos de banda ancha. La onda SS se triplica por la discontinuidad de los 410 km. A distancias más cercanas de 36° , el primer arribo de la rama de los fondo triplicados en el manto superior, y la falta o presencia de un reservorio litosférico influencia fuertemente el tiempo de viaje de las SS-S y de la forma de las ondas SS vía interferencia de las dos ramificaciones de la triplicación (Helmberger, 1985). Las anomalías de los tiempos de viaje de ondas sintéticas SS-S se presentan cuando ocurre un modesto incremento de espesor de la litósfera, lo que provee una parametrización altamente sensitiva. La Figura 5 muestra los datos con el ajuste de la forma de onda producida por la variación de la rigidez del manto superior y el espesor de la tapa (lid) litosférica. Esta última se infiere en 0 km en el Basin and Range y en más de 55 km a lo largo de la costa de California. Debido al alto nivel de sismicidad en el Golfo de California y el norte de EPR y a la alta densidad de estaciones de banda ancha en el norte, se tiene un buen muestreo del manto superior en el esas área propuesta.

Proyecto de Investigación (Tim Melbourne)

Qué controla la deformación de la corteza a lo largo de las márgenes continentales activas? En la dinámica de la distribución de esfuerzos continentales, una escuela de pensamiento atribuye el control activo a las fuerzas de flotación intrínsecas de la corteza (Jones et al, 1996; England and Molnar, 1997), mientras que otra argumenta que la litósfera subcortical genera las fuerzas en el límite de placas, la cual no solamente controla la deformación en las márgenes sino también la deformación al interior de los continentes (Wernicke y Snow, 1998). Las evidencias de campo parecerían apoyar ambas hipótesis: la minimización regional de la energía potencial de la corteza ha tenido éxito al predecir algunos regímenes observados de extensión continental distribuida, mientras que las reconstrucciones palinásticas del Basin and Range muestran claramente que los cambios en la dirección de extensión coinciden con cambios en el movimiento relativo de la Placa Pacífico entre 8 y 10 Ma (Atwater and Stock, 1998). Definir el papel del manto subcortical en la deformación continental es un factor clave para entender la variedad de procesos tectónicos, incluyendo no únicamente la evolución de los límites de placas, sino también los procesos globales tales como la captura de microplacas, modulación de las fronteras de la tectónica continental y el inicio de la subducción inducida por gravedad.

Para descifrar la importancia relativa de ambas fuerzas, debemos relacionar la resistencia subcortical de la litósfera con los campos de deformación de la superficie. En California, donde existen densas redes de GPS, estamos empezando a apreciar el papel que juega el manto en la modulación de la deformación en la margen transformante (Bourne et al, 1998, Melbourne y Helmberger, 2000b). Las observaciones sísmicas y geodésicas conjuntas sugieren que la deformación es controlada por la placa Pacífico bajo el margen continental (underplating). Velocidades rápidas de las ondas P y S en el manto superior, que son características de la litósfera del Pacífico, se extienden bajo California. Su borde subyace una región con pronunciada cizalla lateral derecha, como se ha medido en redes de SCIGN y GPS. La correlación entre velocidades sísmicas y las tasas de deformación sobreyacentes indican que estas propiedades están fuertemente relacionadas. Un modelo de tracción basal a lo largo de bloques corticales, proporcional a la rigidez del manto subcortical, explica los datos de la forma de ondas sísmicas y los datos GPS.

En la zona madura del rift al sur del Golfo de California los datos de deformación intrarift son escasos. Mientras que existe una amplia gama de datos sísmicos regionales para constreñir la corteza subcortical, el campo de deformación superficial es un aspecto fundamental que aún falta, y sin éste, la influencia del manto no puede ser entendida. Estoy interesado en aplicar GPS y InSar en la Provincia Extensional del Golfo para probar cual es el control de la estructura del manto en el proceso de extensión a lo largo de la provincia de rift. Las principales cuestiones a estudiar son: (1) Cual es el papel de la litósfera oceánica (Pacífico) en la deformación de la margen continental en este límite de placas? (2) Se ha completado la captura de la microplaca de la península de Baja California por la placa Pacífico? (3) Cual es la importancia relativa de los gradientes laterales de energía potencial versus tracción basal de los bloques corticales ?

Cenozoic Faulting in the Northern Basin and Range Province, Western U.S.: Insights from Fission Track Studies

E. L. Miller, T. A. Dumitru, D. F. Stockli and B. E. Surpless

Department of Geological and Environmental Sciences, Stanford University, Stanford CA 94305

Since 1995, a major effort has been carried out at Stanford to help constrain the age of faulting leading to the formation of the N-S trending mountains and valleys of the northern Basin and Range province. This work, based mainly on fission track analyses of apatite, was augmented by detailed studies of the transition zone to the Sierra Nevada and by the (U-Th)/He dating method of apatite to further elucidate the low-T history of some of these ranges.

The data outline an important ~18-15 Ma event during which rapid, large-magnitude extension occurred across the province and slip rates on faults likely exceeded 1-2 mm/year. Many of the present basins and ranges formed at this time; post-Miocene slip on the same range-bounding faults has been relatively minor as exhumed rocks with younger apatite ages are lacking. This

Miocene event post-dates earlier and more localized extension associated with the southward sweep of Eocene-Oligocene magmatism. It is synchronous with magmatism and large-magnitude extension in the Colorado River region of the southern Basin and Range, where earlier magmatism swept northwards. The merging of the two migrating volcanic fronts near Las Vegas may represent the removal of the last portion of cooler mantle lithosphere beneath the region, a holdover from shallow-slab subduction (refrigeration) during the Laramide ("burning of the lithospheric bridge"). Higher and more even distribution of heat in the mantle and lower crust beneath the Basin and Range may have enabled large-scale flow and rapid extension at 18-15 Ma.

The fission track data support hypotheses of progressive widening of the northern Basin and Range province since the Miocene. Specifically, 10-15 Ma ages for faulting are obtained from the western edge of the northern Basin and Range (White Mountains, Singatse and Wassuk Ranges) and active faulting in the Carson Range and Lake Tahoe region began no earlier than 5 Ma.

A review of the style of faulting in light of timing data indicate that crustal-penetrating high-angle normal faults and closely-spaced rotated high angle normal faults are part of a continuum in terms of structural style but metamorphic core complexes could involve additional deformation related to vertical rise of flowing crustal material. In particular, different "styles" of extensional deformation are not restricted to specific time periods of Basin and Range history.

Constraints on the Age of Formation of Seismically Reflective Middle and Lower Crust beneath the Bering Shelf: SHRIMP Zircon Dating of Xenoliths from Saint Lawrence Island

Elizabeth L. Miller, Ireland, T., Klemperer, S. Earth Sciences, Stanford University, Stanford, CA 94305, Wirth, K.R., Geology Dept., Macalester College, St. Paul, MN55105, Akinin, V.V., NEISRI, Magadan, 685000, Russia, Brocher, T.M., U.S. Geological Survey, 345 Middlefield Rd., Menlo Park, CA 94025

Abstract

Deep seismic reflection profiling and associated seismic refraction studies across the Bering Shelf indicate a reflective middle and lower crust and a sharp, nearly flat Moho beneath a broad region of the shelf encompassing the Bering Strait and Saint Lawrence Island. The Moho, defined as the base of the observed lower crustal reflectivity, lies at about 32 km depth. Tholeiitic and alkali olivine basalt flows of the late Cenozoic Bering Sea basalt province contain

upper mantle and crustal xenoliths that sample the seismically imaged crust and mantle. Crustal xenolith suites from St. Lawrence Island include mostly undeformed mafic cumulate rocks and lesser pyroxene-bearing gneisses which equilibrated at about 4-6 kb pressure (at about 12-18 km depth or 4-6 seconds, seismic two-way travel time). Four gneissic xenoliths from two sites on Saint Lawrence Island were processed for zircons. Three yielded zircons that were dated by the U-Pb method with the Sensitive High Resolution Ion Microprobe or SHRIMP II at the Australian National University.

Pyroxene-bearing gneissic xenoliths derived from the mid-crust beneath Saint Lawrence Island most likely represent highly deformed intrusive rocks that have undergone granulite facies metamorphism. These xenoliths have zoned prismatic zircons that appear to be magmatic and yield preliminary Late Cretaceous U-Pb ages, which we interpret as intrusive ages between about 85 to 90 Ma. Some xenoliths have rounded, non-zoned zircons that appear to be metamorphic and these yield early Tertiary metamorphic ages indicating an approximate 64 Ma age for a deformational and recrystallization event deep in the crust beneath Saint Lawrence Island. No older ages were obtained.

At the surface, metamorphic rocks of Late Cretaceous age underlie the Seward Peninsula and mid to Late Cretaceous plutonic rocks are present on both the Seward Peninsula and Saint Lawrence Island. The ages of Paleocene volcanic rocks on Saint Lawrence Island coincide with the 64 Ma age obtained for deep crustal metamorphism. Although undated, we interpret the more abundant mafic xenoliths as derived from gabbroic bodies emplaced in the middle to lower crust, most likely during mid to Late Cretaceous magmatism and/or during Paleocene magmatism. These conclusions suggest that magmatic material added to the crust during its relatively younger Late Cretaceous to Paleocene history may constitute important rock types in the middle and lower crust beneath the Bering Shelf. A similarly young age is inferred for the development of the (seismically imaged) layered reflective crust beneath Saint Lawrence Island and (by inference) the Moho itself. Surface rock units on Saint Lawrence Island include Paleozoic-Mesozoic miogeoclinal units (and their presumed Precambrian basement rocks) but if these rock types are still volumetrically important in the deeper crust, they were most likely reconstituted and remobilized during younger thermal/magmatic events.

TIMING OF THE TRANSITION FROM SUBDUCTION TO RIFTING: WEST CENTRAL SONORA, MEXICO

Gabriela Mora-Klepeis, Fred W. McDowell

Department of Geology,
University of Vermont,
Burlington, VT 05405-011
Phone (802) 656-0246
Fax (802) 656-0045
e-mail: gmora@zoo.uvm.edu

Department of Geological Sciences #C1100
The University of Texas at Austin
Austin, TX 78712
Phone (512) 471-1672
Fax (512) 471-9425
e-mail: mcdowell@mail.utexas.edu

Neogene geologic features exposed in northwestern Mexico record the tectonic transition from convergence and arc-related magmatism to the development of the Gulf of California rift system. Miocene volcanic rocks emplaced in west-central Sonora during the subduction of the Farallon plate include medium to high-K calc-alkaline lava flows, lava domes, tuffs, and ignimbrites of intermediate to felsic compositions whose ages range between 24 and 11 Ma. Volcanic rocks extruded from 15 to 11 Ma show an increase in dacitic compositions with minor rhyolites. The distribution of K-Ar ages obtained for this arc sequence shows that magmatism was not continuous during this time interval. Moreover, Sr and Nd isotope analyses obtained show that magmatism occurred at least in two distinct periods, suggesting a heterogeneous source.

The transition to rifting began after a mid-Tertiary cessation of subduction, eventually creating the Gulf of California extensional province. The early stages of rifting in west central Sonora are represented in the volcanic record by low-K tholeiitic lava flows emplaced between 10 and 8.5 Ma. Sr and Nd isotope results of these lavas define a third distinctive magma type in the area.

We show that the age and interpretation of the calc-alkaline volcanic section is consistent with plate reconstructions and the ages of Miocene volcanic rocks along the Baja California Peninsula and northern Sonora. It appears that a coherent magmatic arc existed along the entire axis of the present-day Gulf of California from 24 to 11 Ma, with arc magmatism being emplaced between 20 and 15 Ma north of latitude 29°N and from 24 to 12 Ma to the south. The end of subduction was accompanied by the incorporation of trailing microplates from the broken Farallon plate on to the Pacific plate at about 12.5 Ma. The volcanic history of west-central Sonora suggests that the attachment of the Guadalupe and Magdalena microplates to the Pacific plate could have generated calc-alkaline magmatism that persisted until about 11 Ma. High-K calc-alkaline volcanism in central Baja California of this same age has been interpreted to represent a post-subduction event that was synchronous with rifting.

The presence of three distinct magma types that define three different pulses of magmatism, can be interpreted as the result of magmas being erupted at different stages of subduction and rifting, and represent the magmatic expression of the tectonic evolution of this part of North America.

ESTIMACIÓN DE LA EDAD DE LA TRANSICIÓN DE SUBDUCCIÓN A RIFT EN LA COSTA OCCIDENTAL DE SONORA, MEXICO

Gabriela Mora-Klepeis y Fred W. McDowell

Los rasgos geológicos y estructurales del Neógeno localizados en el noroeste de México, están asociados a la transición de volcanismo de arco a volcanismo de rift que produjo el actual Golfo de California. El volcanismo de arco de 24 a 11 Ma (Mioceno), producido durante la subducción de la placa Farallón, se caracteriza por magmas calcialcalinos con contenidos variables de K₂O compuestos por flujos de lava intermedios, tobas de flujos de ceniza, lavas, flujos y domos de composición félsica. La presencia de dacitas y riolitas hacia la parte superior de la secuencia de arco (de 15 a 11 Ma) indica un incremento en composiciones félsicas en comparación con las

unidades más antiguas. La distribución de edades isotópicas (K-Ar) obtenidas en rocas de la secuencia de arco muestra que la actividad volcánica no fue continua durante su emplazamiento. Por otra parte, los análisis isotópicos de Sr y Nd muestran que el magmatismo ocurrió por lo menos en 2 episodios bien definidos, lo que sugiere una fuente heterogénea.

El desarrollo del rift, que eventualmente dio origen a la provincia extensiva del Golfo de California, comenzó después del cese de la subducción (Terciario medio). En la costa occidental de Sonora, la etapa temprana del rift se caracteriza por lavas de composición toleítica, con bajo contenido de potasio. Análisis isotópicos de Sr y Nd obtenidos para estas lavas definen un tercer episodio magmático en esta área.

Nuestros resultados muestran que la edad interpretada para la secuencia volcánica calcialcalina es consistente con reconstrucciones de placas, así como con las edades de las rocas volcánicas del Mioceno emplazadas en la península de Baja California y al norte de Sonora. Los resultados obtenidos permiten especular la presencia de un arco magmático de 24 a 11 Ma, cuyo eje se localizó a lo largo del actual Golfo de California. El magmatismo de arco emplazado al norte de la latitud 29°N varía en edad de 20 a 15 Ma, en contraste, la actividad volcánica hacia el sur tiene un rango de edad aproximada de 24 a 12 Ma. El cese de la subducción está relacionado con el contacto entre las microplacas provenientes de la ruptura de la placa Farralón y la placa del Pacífico, hace aproximadamente 12.5 Ma. La historia volcánica de la costa occidental de Sonora sugiere que el contacto de las dorsales Guadalupe y Magdalena con la placa del Pacífico pudo haber generado volcanismo calcialcalino hasta hace 11 Ma. El volcanismo calcialcalino con alto contenido de potasio de la parte central de Baja California es de la misma edad y es interpretado como un evento posterior a la subducción, contemporáneo con extensión durante el rift.

La variación en la composición isotópica y geoquímica permite identificar tres episodios magmáticos con características definidas cuya afinidad puede interpretarse como la expresión magmática de la transición volcánica de subducción a rift, durante la evolución tectónica de esta región de Norteamérica.

**The relationship between the Rivera triple junction and the location
of the ocean-continent structural transition in the Pacific-North
America plate boundary**

Dr. Elizabeth A. NAGY
Department of Earth Sciences
Syracuse University
Syracuse, New York 13244-1070
U.S.A.

The Pacific-North America plate boundary within the Gulf of California, south of about latitude 30°N , is best described as an early stage, oceanic-type plate boundary dominated by discrete transtensional transform faults and short incipient spreading centers, which lack true oceanic crust but experience active divergence at rates comparable to the relative Pacific-North America plate motion rate. The continent-ocean structural transition, which links the Gulf

oceanic system to continental plate boundary structures in southern California and northern Mexico, begins north of about latitude 30°N, where transtensional plate deformation is diffusely distributed over a broad region that includes ENE-directed extension and dextral shear (block rotations) documented in northeastern Baja California, Mexico. This particular location for the present-day continent-ocean structural transition is supported by geophysical data from the northernmost Gulf as well as by the history of spreading center jumps between the offshore Upper and Lower Tiburón and Delfín basins. The sequence and locations of basin development may be directly related to structural accommodation zones separating the discrete oceanic system to the south from the broader zone of diffuse deformation to the north.

The history of pre-rift (Miocene) extension and subduction-related volcanism along the length of the Gulf, partly related to the migration of the Rivera triple junction, may have controlled the subsequent location of the continent-ocean plate boundary transition. In particular, lithospheric thinning leading to the development of a narrow oceanic plate boundary may have been inhibited north of latitude 30°N for several reasons. Pre-rift (pre-12 Ma) extension occurred over a broad region north of latitude 30°N, as documented in places such as Sonora and southern Arizona, whereas the central and southern Gulf did not experience significant pre-12 Ma extension. Additionally, subduction-related arc magmatism terminated earlier in the north (~ 16 m.y. ago) relative to the central and southern Gulf (~ 11 m.y. ago), exposing the northern region to a longer period of cooling prior to late Miocene extension. Crustal thinning may have thus been inhibited in the north where a cooler/stronger crust riddled with extensional structures constrained deformation to remain diffuse. In contrast, post-12 Ma extensional deformation in the south was focused within a narrower and hotter/weaker zone west of the unextended Sierra Madre Occidental, accelerating crustal thinning and lithospheric necking and facilitating the development of an oceanic system. These different extensional and magmatic histories are at least partly related to the late Oligocene/early Miocene position of the Rivera triple junction. Instead of a steady southward migration, the triple junction actually migrated north and south at the latitudes of northern Baja California and southern California from 28-16 Ma due to ridges and transform faults alternately encountering the trench. Subduction continued south of the triple junction, whereas inland extension related to the transtensional plate boundary deformation occurred to the north. The latitude of the triple junction at ~12 Ma was near ~30°N in Baja California and ~27°N in Sonora (present-day coordinates). In addition to these structural and thermal variations in the Gulf region related to the position of the Rivera triple junction, magmatic underplating may have thickened the overlying crust north of the triple junction if a slab window developed in its wake.

**La relación entre el punto triple de Rivera y la posición de
la transición estructural oceánico-continental en el límite entre
las placas Pacífico y Norteamérica**

Dr. Elizabeth A. NAGY
Department of Earth Sciences
Syracuse University
Syracuse, New York 13244-1070
U.S.A.

El límite entre las placas Pacífico y Norteamérica en el Golfo de California, al sur de aproximadamente latitud 30°N, es mejor descrito como un límite de tipo oceánico en su etapa temprana, dominado por fallas transformes individuales y centros cortos de dispersión incipiente, que carecen de corteza oceánica verdadera pero que tienen divergencia activa con tasas comparables a la tasa de movimiento relativo entre las placas Pacífico y Norteamérica. La transición estructural entre el comportamiento oceánico y el continental, que liga el sistema oceánico del Golfo a las estructuras continentales del límite entre placas en el sur de California y en el norte de México, empieza al norte de 30°N, donde la deformación transtensional se distribuye difusamente sobre una región amplia que incluye extensión dirigida al ENE y cizalla dextral (rotaciones de bloques) documentados en el NE de Baja California, México. Esta posición para la transición estructural actual entre océano y continente está apoyada por los datos geofísicos de la parte septentrional del Golfo y también por la historia de saltos de los centros de dispersión en las cuencas de Tiburón y Delfín (inferior y superior). La secuencia y la posición del desarrollo de las cuencas pueden estar directamente relacionadas con las zonas de acomodamiento estructural, separando el sistema oceánico discreto al sur, de la zona más ancha de deformación difusa al norte.

La historia de la extensión *pre-rift* (miocénica) y del volcanismo debido a la subducción a lo largo del Golfo y parcialmente relacionado con la migración del punto triple de Rivera, puede haber controlado la posición subsecuente de la transición oceánica-continental en el límite entre las placas. En particular, el adelgazamiento de la litósfera que dió lugar a un límite oceánico delgado entre las placas puede haber sido imposibilitado por diversas causas al norte de 30°N. La extensión *pre-rift* tuvo lugar en una región amplia al norte de esta latitud, como ha sido documentado en sitios como Sonora y el sur de Arizona, mientras las partes centrales y meridionales del Golfo no fueron expuestas a una extensión significativa antes de 12 Ma. Adicionalmente, el magmatismo de arco, relacionado con la subducción, terminó más temprano hacia el norte (~ 16 Ma) comparado con el Golfo central y meridional (~11 Ma), exponiendo así la región norte a un período más largo de enfriamiento antes de la extensión del Mioceno tardío. El adelgazamiento de la corteza puede haber sido inhibido en el norte donde una corteza más fría y más resistente, con estructuras extensionales, mantuvo la extensión más difusa. Por contraste, la deformación extensional a partir de 12 Ma en el sur se localizó dentro de una zona más delgada, más caliente, y más débil al oeste de la Sierra Madre Occidental (que no había sufrido distensión), acelerando el adelgazamiento cortical y litosférico y facilitando el desarrollo de un sistema oceánico. Estas historias de deformación y magmatismo distintas están por lo menos parcialmente relacionadas con la posición de la junta triple de Rivera en el Oligoceno tardío - Mioceno temprano. En vez de mostrar una migración continua hacia el sur, el punto triple se migró hacia el sur y hacia el norte en las latitudes de Baja California y sur de California entre 28 y 16 Ma conforme con la alternancia de dorsales y fallas transformes oceánicas, en su intersección con la trinchera, formando el punto triple. La subducción siguió al sur del punto triple, mientras la extensión relacionada con la deformación transtensional del límite Pacífico-Norteamérica ocurrió al norte del punto triple. La latitud del punto triple hace ~12 Ma fue cerca de 30°N en Baja California y 27°N en Sonora (coordenadas actuales). Un proceso adicional a estas variaciones estructurales y térmicas relacionadas con la posición del punto triple es la adición de magmas infrayacentes, que pudieron engrosar la corteza al norte del punto triple de haber una “ventana” o falta de material del *slab* en esta posición.

The Baja California Peninsula Borderland: Some Stratigraphic and Structural Characteristics

Enrique H. Nava-Sánchez, Donn S. Gorsline, Adolfo Molina-Cruz, Robert Douglas, Robert Bourrouilh, Raúl Miranda-Avilés, Jorge Méndez-Sánchez
enava@redipn.ipn.mx; gorsline@earth.usc.edu; amolina@mar.icmyl.unam.mx

Datos estructurales y sedimentológicos soportan la propuesta de que la margen peninsular del Golfo de California puede ser definido como un Borde Continental, tal como el Borde Continental de California (USA). Durante la apertura del Golfo, se formaron grabens y medios grabens, separados por tierras altas, islas y bancos. Algunas de las cuencas están ahora en tierra (p.e. Loreto), rellenas por rocas marinas Pliocénicas. Otras cuencas son bahías someras (Concepción con 30 m de profundidad); otras son cuencas marginales con una variedad de profundidades; Cuenca Alfonso está a 400 m y Cuenca La Paz a 700 m. La sedimentación es variada: las cuencas subaéreas (p.e. Loreto) están rellenas con rocas sedimentarias marinas someras, clásticas y evaporitas; Concepción es una cuenca hambrienta rellena de algunos terrígenos, pero principalmente sedimentos biogénicos; las cuencas modernas profundas (p.e. Alfonso) están siendo rellenas con terrígenos en su margen peninsular, biogénicos si están limitados por islas y laminados si son cuencas estancadas o sus pendientes cortan la capa mínima de oxígeno. Perfiles batimétricos y del subfondo marino muestran algunas fallas activas, que pueden tener una componente lateral, las cuales son paralelas y oblicuas con ángulo bajo a la costa peninsular y delimitan estructuras de graben y horst. Sobre la margen peninsular se observan terrazas marinas pleistocénicas en alturas anómalas (25 m.s.n.m.), como en la cuenca de Las Animas (Bahía de La Paz), lo cual es una evidencia de que la península en esa porción se está levantando.

The Baja California Peninsula Borderland: Some Stratigraphic and Structural Characteristics

Enrique H. Nava-Sánchez, Donn S. Gorsline, Adolfo Molina-Cruz, Robert Douglas, Robert Bourrouilh, Raúl Miranda-Avilés, Jorge Méndez-Sánchez
enava@redipn.ipn.mx; gorsline@earth.usc.edu; amolina@mar.icmyl.unam.mx

Structural and sedimentologic data support the proposal that the Peninsular margin of the Gulf of California can be defined as a continental borderland, like the California Continental Borderland in the USA. During the opening of the Gulf, grabens and half-grabens formed, separated by highlands, islands, and banks. Some of the basins are now subaerially exposed (e.g., Loreto), filled with Pliocene marine rocks. Other basins are shallow bays (Concepción, 30 meters water depth), and others are marginal basins with a variety of depths: Alfonso Basin is at 400 m and La Paz basin is at 700 m depth. The sedimentation is varied: the subaerial basins (e.g., Loreto) are filled with shallow marine sedimentary rocks, clastics rock, and evaporites; Concepción is a starved basin, filled with some terrigenous deposits, but principally biogenic sediments; the

modern deep basins (e.g., Alfonso) are being filled with terrigenous sediments along the Peninsular margin, biogenic sediments if they are bordered by islands, and laminated sediments if they are ponded basins or if their slopes cut through the oxygen minimum layer. Bathymetric profiles and subsurface profiles show some active faults, that can have a component of lateral displacement, with orientations parallel to, or slightly oblique to, the peninsular coast, marking horst and graben structures. Along the peninsular margin, Pleistocene marine terraces can be found at anomalous elevations (25 m. a. s. l.), such as in the Las Animas basin (Bahía de La Paz), which is evidence that this part of the peninsula is rising.

Reconnaissance Geology of Tilted Neogene Strata in the Sonora-Arizona Border Region Northwest of El Pinacate

Nourse, Jonathan A. Department of Geological Sciences, California State Polytechnic University, Pomona, CA 91768, email: janourse@csupomona.edu

Superb exposures of tilted Neogene sedimentary and volcanic strata unconformably overlie Proterozoic and Mesozoic basement in several fault blocks within the international border region 60-100 km southeast of Yuma. The Quaternary Pinacate basalt field covers these Neogene strata in the eastern part of the study area. Although these strata are not yet dated, their distribution, composition, and structural history provide important constraints on tectonic processes related to Gulf of California rifting. Also, a distinct basal conglomerate offers a new piercing point on the San Andreas transform system.

Several sections of Neogene strata have been mapped within fault-bounded, north-northwest striking basement blocks. The stratigraphy generally consists of basement-clast conglomerate or megabreccia overlain by altered andesite and/or rhyolite flows and breccias, in turn overlain by vesicular basalt flows distinguishable from the Pinacate basalts. Basal nonconformities are generally tilted 20° to 30° NE, although one section dips 45° SW. Preliminary U/Pb analyses (Nourse et al., 2000) of underlying basement indicate the presence of Paleoproterozoic augen gneisses (ca. 1690 and 1650 Ma) intruded by 1.4 Ga coarsely porphyritic granite (Anderson and Silver, 1979), 1.1 Ga (?) diabase, and Late Cretaceous quartz diorite or granite. Because no Proterozoic basement occurs to the southwest, one can infer that the Proterozoic of the study area demarcates the rifted southwest margin of the Laurentia. Two intriguing implications of this paleogeography beg further investigation: (1) Clastic sediments shed westward from this basement source during Neogene time may have been truncated and dextrally displaced along strands of the San Andreas fault system. One such conglomerate with distinct clasts of augen gneiss and 1.4 Ga granite forms a 20 km-long, west-trending channel at the edge of the study area. Perhaps a correlative channel exists beneath volcanic strata far to the northwest, (2) To what degree did structures associated with the Mesoproterozoic rifting near the study area influence later rifting of the Gulf of California? The Neogene fault blocks are generally aligned parallel to the Proterozoic rifted margin, suggesting possible structural inheritance.

Future research in the study area will focus on the age and duration of magmatism and the chronology of extension associated with tilting. It is important to resolve whether these strata record the early Miocene core complex extension documented farther northeast in Arizona, or younger events that accompanied rifting of the Gulf of California. Additional studies will try to locate an offset counterpart of the distinct basal conglomerate on the west side of the San Andreas fault.

Geochronological Constraints on the Tectonic History of the Peninsular Ranges Batholith of Alta and Baja California : Tectonic Implications for Western México

María Amabel Ortega-Rivera*

Instituto de Geología, UNICIT Campus UNAM-Juriquilla, Domicilio Conocido.

Apdo. Postal 1-742, Querétaro, Qro. C.P. 76001

amabel@geminis.unicit.unam.mx, amabel@servidor.unam.mx

The Mesozoic Peninsular Ranges batholith of Alta and Baja California has long been known for its remarkable longitudinal regularity but transverse asymmetry in age and composition. As part of an ongoing geochronological study of this active margin, new age determinations (387 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ step-heating and 18 apatite fission-track dates) on various plutons of the Peninsular Ranges batholith (between the 28°N and 34°N parallels) are presented here. The plutons were emplaced between 130 and 80 Ma and show a distinct systematic age pattern that decreases regionally (and within the individual plutons) away from the coast toward the northeast.

By a compilation of existing age data (Peninsular Ranges and western México) in combination with the new age data, new chrontours were constructed. It can be seen that the systematic eastward younging of dates is not restricted to the northern Peninsular Ranges batholith, but can be extended from southern California as far south as Jalisco, central México, toward the east, and Chiapas toward the southeast. Furthermore, restoration of the Alta and Baja California to its pre-drift position with respect to the rest of México (with the Los Cabos batholith near Puerto Vallarta), confirms that new $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and K/Ar biotite chrontours cross into mainland México, from Sonora to Jalisco without disruption. Thus, this decrease in ages across the zone, and within individual plutons, is therefore attributed to regional eastward migration of granitic intrusion foci combined with superimposed east-side-up tilting of crustal-scale sized blocks containing the plutons. This suggests that starting during Early Mesozoic along the Pacific coast, and extending at least to Eocene time in Mainland México, the locus of magmatism migrated from west to east across this part of southwestern North America. Moreover, this also indicates that a long and linear (NNW-SSE) subduction zone, analogous to the modern setting of the South American Andes, formed the basic framework of western México during this time.

As a result, geochronological constraints are provided for testing controversial paleomagnetic and geological models for the tectonic evolution of the Peninsular Ranges

Province and consequently, southwestern North America. The controversy involves different perceptions of the geologic development of western México and southernmost California derived from paleomagnetic and regional geology. Whereas the geological data and plate tectonic reconstructions seem to indicate a northward motion with respect to the rest of North America since the Cretaceous, of between 300 and 500 km, paleomagnetic data suggest much greater movement involving at least 2500 km of northward translation for the Baja peninsula during the same time period.

This interpretation supports geological arguments that the Peninsular Ranges Province has been part of the North America craton since the Early Cretaceous and has undergone only limited northward tectonic displacement, and that by simply closing the Gulf of California to its pre-Miocene opening, as indicated by the geological evidence, the Peninsula is restored to its original position.

Restricciones Geocronológicas para la Historia Tectónica del Batolito de las Sierras Peninsulares de Alta y Baja California : Implicaciones Tectónicas para el Oeste de México

María Amabel Ortega-Rivera*

Instituto de Geología, UNICIT Campus UNAM-Juriquilla, Domicilio Conocido.

Apdo. Postal 1-742, Querétaro, Qro. C.P. 76001

amabel@geminis.unicit.unam.mx, amabel@servidor.unam.mx

El Batolito Mesozoico de las Sierras Peninsulares de Alta y Baja California ha sido reconocido por su excepcional regularidad longitudinal y por su asimetría transversal en cuanto a edades y composición. Como parte de un estudio geocronológico en progreso de este margen activo, se presentan nuevos datos de edad, 387 edades $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ por calentamiento a pasos y 18 de trazas de fisión en apatita. Las muestras fueron obtenidas en plutones seleccionados dentro de los 28°N y 34°N de latitud. Los plutones se emplazaron entre los 130 y 80 Ma y presentan un patrón característico de edades que disminuye sistemáticamente en dirección noreste, desde la costa hacia el continente. Comportamiento similar que se presenta dentro de plutones individuales.

Se construyeron nuevos crontornos a partir de la compilación de datos de edad publicados (para las Sierras Peninsulares y el oeste de México) combinados con los nuevos datos. Estos datos muestran que la disminución sistemática de edades hacia el este, no está limitada al norte del batolito, sino que puede prolongarse hasta Chiapas en el sureste.

Además, al restaurar la Baja con respecto al resto de México a su posición pre-apertura del Golfo (con el Batolito de Los Cabos cerca de Puerto Vallarta), se confirma que los crontornos de $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ y K/Ar en biotita cruzan sin interrupción desde la Baja a México y de Sonora a Jalisco. Entonces, la disminución de las edades hacia el noreste, a través de la zona y dentro de los plutones, se atribuye a la migración regional del foco de intrusión hacia el Este, con un basculamiento sobrepuesto hacia el oeste, de los bloques bloques corticales conteniendo los plutones.

La compilación de edades existentes tomadas de la literatura disponible (para las Sierras Peninsulares y el Oeste de México), y nuevas edades obtenidas de varios plutones muestreados

en el Batolito de las Sierras Peninsulares (38 edades U/Pb en zircones, 387 edades Ar/³⁹Ar por pasos y 18 edades por trazas de fisión en apatitas) provee de restricciones geocronológicas para examinar modelos geológicos y paleomagnéticos controversiales propuestos para la evolución tectónica de la Provincia de las Sierras Peninsulares y por lo tanto el suroeste de Norte América.

La controversia involucra diferentes percepciones del desarrollo geológico del oeste de México y el suroeste de California obtenidos a partir de datos geológicos y paleomagnéticos regionales. Mientras que la interpretación de los datos geológicos y de reconstrucción de placas tectónicas parece indicar que desde el Cretácico ha habido un movimiento de entre 300 y 500km hacia el norte de la Baja con respecto al resto de Norte América, los datos paleomagnéticos sugieren que durante este mismo periodo de tiempo la Baja ha sufrido un movimiento mucho mayor que involucra cuando menos 2500km de translación hacia el Norte.

La migración del foco de intrusión granítico hacia el continente sugerido por el decrecimiento sistemático de las edades hacia el Este mostrado por los contornos regionales de biotita indica que empezando durante el Mesozoico, a lo largo de la costa del Pacífico, y extendiéndose cuando menos hasta el Eoceno en México, la geometría del magmatismo migró de Oeste a Este a través de esta parte del Oeste de Norte América. Esto también indica que a lo largo de una zona de subducción (NNO-SSE) larga y linear, análoga al marco tectónico moderno de los Andes Sudamericanos, formó el patrón tectónico básico del Oeste de México durante este tiempo.

Esta interpretación confirma argumentos geológicos de que la Provincia de las Sierras Peninsulares ha sido parte del cartón de Norte América desde el Cretácico Temprano, y que solamente ha tenido un limitado desplazamiento tectónico hacia el Norte, y que tan solo cerrando simplemente el Golfo de California a su posición de apertura pre-Miocénica, como lo ha indicado la evidencia geológica, la Península es restaurada a su posición original.

Tectonic Evolution of the Upper Delfín and Tiburón Basins: Implications for Continental Rupture Processes from the Northern Gulf of California

Michael Oskin, Caltech

Reconstruction of conjugate rifted margins of the upper Delfín - Tiburón basin of the northern Gulf of California indicate that continental rupture here evolved from an east-directed extensional system active from ~11 Ma, and proceeded rapidly by transform faulting and extension after ~6 Ma. The upper Delfín and Tiburón basins together form a segment of the seafloor of the Gulf of California from northwest of Isla Tiburón, Sonora, to southeast of the northern Puertecitos Volcanic Province, Baja California. Correlative volcanoclastic deposits and structural features place the northern Puertecitos Volcanic Province adjacent to Isla Tiburón from before 12.5 Ma until after 6.2 Ma. During this time, a system of north-trending normal faults accommodated east-directed extension. This fault system formed a west-tilted domain north of the Puertecitos Volcanic Province in Baja California, an east-tilted domain in Isla Tiburón and coastal Sonora, and terminated southward at the northwest-trending Matomí accommodation

zone. Dextral plate boundary motion localized in the Gulf of California during Late Miocene - Early Pliocene time and utilized pre-existing extensional structures. The Matomí accommodation zone developed into the Tiburón Fracture zone, a major plate boundary transform in the Gulf. Extension continued to accommodate plate boundary motion on marginal normal fault systems, culminating in the opening of the upper Delfín - Tiburón basin. Near-vent facies of correlative pyroclastic deposits preserved on Isla Tiburón and near Puertecitos indicate that upper continental crust must be absent from the floor of the upper Delfín - Tiburón basin. The northwest and/or southeast margin(s) of the Delfín - Tiburón basin may correspond to a breakaway zone, and lower crustal material may have been exhumed to form part of the basin floor near the margins of the Gulf.

La Evolución Tectónica de las Cuencas Delfín Superior y Tiburón: Implicaciones para los Procesos de Ruptura Continental desde el norte del Golfo de California

Mike Oskin, Caltech

La reconstrucción de las márgenes gemelas de las cuencas Delfín Superior- Tiburón, en la parte septentrional del Golfo de California, indica que la ruptura continental evolucionó de un sistema extensional dirigido hacia el oriente, activo desde ~11 Ma, seguido rápidamente por fallamiento tipo transforme y distensión, a partir de ~6 Ma. Las cuencas Delfín Superior y Tiburón en conjunto forman un segmento del piso del Golfo de California, desde el NW de la Isla del Tiburón, Sonora, hacia el SE de la provincia volcánica de Puertecitos, Baja California. Depósitos volcanoclásticos y rasgos estructurales correlativos colocan a la Provincia Volcánica de Puertecitos adyacente a la Isla del Tiburón desde antes de 12.5 Ma hasta por lo menos 6.2 Ma. Durante este intervalo de tiempo, un sistema de fallas normales con rumbos hacia el N acomodaron la distensión dirigida hacia el oriente. Este sistema de fallas formó un dominio con estratos inclinados hacia el oeste al norte de la Provincia Volcánica de Puertecitos en Baja California, y un dominio con estratos buzando hacia el este en Isla Tiburón y la costa sonorense, con su límite meridional en la zona de acomodamiento de Matomí con rumbo NW. El movimiento dextral entre las placas principales se localizó en el Golfo de California durante el Mioceno tardío- Plioceno temprano y utilizó estructuras extensionales pre-existentes. La zona de acomodamiento de Matomí evolucionó a ser la zona de fractura de Tiburón, una falla transformante principal en el límite entre las placas en el Golfo. La distensión siguió y acomodó el movimiento entre las placas, a lo largo de sistemas marginales de fallas normales, terminando en la abertura de la cuenca Delfín Superior - Tiburón. Las facies proximales a la fuente de los depósitos piroclásticos correlativos están preservados en Isla Tiburón y cerca de Puertecitos, e indican que la corteza continental inferior puede estar ausente dentro de la cuenca Delfín Superior - Tiburón. Los límites NW y/o SE de la Cuenca Delfín- Tiburón puede corresponder a una zona de “breakaway”, y material de la corteza inferior puede haber sido exhumado para formar una parte del piso de la cuenca, cerca de las márgenes del Golfo.

El volcanismo Terciario y Cuaternario en el Noroeste de México : evolución de las fuentes mantélicas en relación con los cambios geodinámicos.

Francisco A. PAZ-MORENO
UNIVERSIDAD DE SONORA
Departamento de Geología
Apartado Postal N°847
83000 HERMOSILLO, SONORA

Después de las enormes erupciones ignimbríticas ácidas, que edificaron a la Sierra Madre Occidental (SMO) durante el Oligoceno, el volcanismo Terciario y Cuaternario en el noroeste de México es más bien de tipo basáltico o bimodal (basaltos y riolitas). El estudio de la distribución y de la naturaleza de estos magmas máficos es de gran interés para seguir paso a paso los procesos de distensión y de adelgazamiento de la corteza continental que, entre 30 Ma y el Actual, condujeron a la apertura del Golfo de California. La geoquímica, particularmente los elementos trazas tales como el Nb, Ta, Th, las tierras raras y los isótopos (Sr-Nd-Pb), es la herramienta más adecuada para caracterizar las fuentes (litosférica y astenosférica) de los basaltos. En efecto, estos elementos químicos son poco afectados por procesos secundarios tales como la cristalización fraccionada, contaminación y alteración.

Los basaltos de tipo trapp, fechados en ~ 30 Ma, que se observan en la meseta de la SMO marcan el inicio de los procesos de distensión en el noroeste de México. Estos basaltos, definidos como Southern Cordilleran Basalts (SCORBA, Cameron et al., 1989), tienen características químicas de un manto litosférico modificado por los procesos de subducción (anomalías negativas en Nb y Ta, cocientes elevados en Th/Ta). Los basaltos intercalados dentro de las molasas continentales (Formación Báucarit, ~ 20 Ma) relacionadas con la tectónica de tipo Basin and Range, siguen presentando esta misma firma litosférica.

El cambio mayor en las características geoquímicas del volcanismo se manifiesta a partir del Mioceno superior en la parte occidental del Estado de Sonora, zona afectada por la apertura progresiva del Golfo de California. Un volcanismo ácido (ignimbritas) de naturaleza hiperalcalina, fechado entre 12 y 10 Ma ha sido recientemente reconocido en este sector (Paz Moreno et al., 2000, y Vidal Solano et al., 2000), mientras que basaltos alcalinos pliocénicos, con frecuentes xenolitos y xenocristales mantélicos, están presentes en la parte central del Estado (Saric, San Francisco de Batuc..., Paz Moreno, 1992). Estos basaltos, al igual que las lavas Plio-Cuaternarias del Basin and Range del SW de los Estados Unidos, presentan una anomalía positiva en Nb y un enriquecimiento en tierras raras livianas. Tales características están a favor de una fuente astenosférica de tipo OIB. Es de subrayar además que este volcanismo se ubica en la zona de extensión máxima, marcada por la presencia de los metamorphic core complexes. En la región de Guaymas-Empalme, así como en ciertas partes de la costa de Sonora que bordean al rift oceánico del Golfo, se observan basaltos toleíticos.

Por último, el volcanismo Cuaternario está volumétricamente poco representado. En Sonora los principales afloramientos son: El Pinacate, al norte del Golfo de California, y el campo volcánico de Moctezuma, en Sonora central. El Pinacate no corresponde, como lo pudiera hacer pensar su morfología, a un estrato-volcán sino a una concentración de varias centenas de volcanes monogenéticos de tipo spatter, conos escoriáceos y maares que fosilizan una paleotopografía volcánica más antigua. La asociación de lavas toleíticas, transicionales y alcalinas en estos campos se puede relacionar con una variación de la tasa de fusión parcial de la fuente mantélica. En la porción norte del Golfo de California, las islas Tortuga (Batiza, 1978) y

San Luis (Paz Moreno y Demant, 1999) representan un excelente ejemplo del volcanismo reciente de naturaleza toleítica en límite de placa, con una génesis compleja caracterizada por procesos de cristalización fraccionada-asimilación.

TERTIARY AND QUATERNARY VOLCANISM IN NW MEXICO: EVOLUTION OF MANTLE SOURCES RELATED TO GEODYNAMIC CHANGES

Francisco A. PAZ-MORENO
UNIVERSIDAD DE SONORA
Departamento de Geología
Apartado Postal N°847
83000 HERMOSILLO, SONORA

Following the enormous acidic ignimbrite eruptions that built the Sierra Madre Occidental during Oligocene time, Tertiary and Quaternary volcanism in northwestern Mexico has been mostly basaltic or bimodal (basalt-rhyolite) in composition. Study of the distribution and nature of these mafic magmas is of great interest in order to follow step by step the processes of extension and thinning of the continental crust, which, between 30 Ma and the present, led to the opening of the Gulf of California. Geochemical studies, particularly using trace elements such as Nb, Ta, Th, rare earths, and isotopes (Sr-Nd-Pb), provide the best tools for characterizing the sources (both lithospheric and asthenospheric) of the basalts. In effect, these elements are little affected by secondary processes such as fractional crystallization, contamination, or alteration.

Continental flood basalts, dated at ~30 Ma, which are observed in the plateau of the Sierra Madre Occidental, mark the start of the extensional processes in northwestern Mexico. These basalts fit the definition of Southern Cordilleran Basalts (SCORBA, Cameron et al. 1989), with geochemical characteristics of a lithospheric mantle that has been modified by subduction (negative anomalies in Nb and Ta, high Th/Ta ratios). The basalts intercalated in continental basin deposits (Baucarit Formation, ~20 Ma), related to typical Basin and Range tectonics, show this same lithospheric signature.

The greatest change in the geochemical characteristics of the volcanism is seen following the late Miocene in the western part of the state of Sonora, the zone affected by the progressive opening of the Gulf of California. Acidic volcanism (ignimbrites) of hyperalkaline affinity, dated between 12 and 10 Ma, have been recently recognized in this sector (Paz Moreno et al., 2000, and Vidal Solano et al., 2000), while Pliocene alkalic basalts, with frequent mantle xenoliths and xenocrysts, are present in the central part of the state (Saric, San Francisco de Batuc..., Paz Moreno, 1992). These basalts, just like the Plio-Quaternary lavas of the Basin and Range Province of the SW USA, have a positive Nb anomaly and are enriched in light rare earth elements. These characteristics favor an asthenospheric source of OIB type. Note that this volcanism is located in the zone of maximum extension, marked by the presence of metamorphic core complexes. In the region of Guaymas-Empalme, as well as in certain parts of the Sonoran coast adjacent to the Gulf of California rift, tholeiitic basalts are found.

Finally, the Quaternary volcanism is volumetrically minor. In Sonora the major outcrops are in the Pinacate volcanic field, north of the Gulf of California, and in the Moctezuma volcanic field, in central Sonora. Pinacate is not, as one might think from its morphology, a strato-volcano;

rather it comprises hundreds of monogenetic vents, including spatter cones, scoria cones, and maars, that cover and preserve an older volcanic topography. The association of tholeiitic, alkalic, and transitional lavas in these volcanic fields can be related to the variation in the degree of partial melting of the mantle source. In the northern Gulf of California, Isla Tortuga (Batiza, 1978) and Isla San Luis (Paz Moreno and Demant, 1999) represent excellent examples of recent tholeiitic volcanism at the plate boundary, with a complex genesis characterized by processes of fractional crystallization and assimilation.

Seismic Imaging of the Plate Boundary in the N Gulf of California

P. Persaud, J. M. Stock, M. S. Steckler, A. Martin-Barajas, J. B. Diebold, A. Gonzalez-Fernandez, G. S. Mountain

We present our interpretation of high-resolution multichannel seismic data collected in the NW Gulf of California. This grid of 2-D reflection data was collected with the Lamont HiRes MCS system in May-June 1999 and offers vertical resolution on the scale of meters to depths of 2 km below the seafloor. Velocity analyses, based on semblance coefficients, were used to stack the data. Amplitude correction for spherical divergence, and predictive deconvolution were applied, in order to boost the energy of later arrivals and diminish the return from water-bottom multiples. Stolt's algorithm was used to migrate the resulting stacks.

We focus on active deformation associated with the major basins and plate boundaries in the NW Gulf, in an effort to understand the tectonics of this region. The Wagner and Upper and Lower Delfin basins are sediment-filled, fault-bounded structures with no clear evidence for a distinct oceanic-continental crust transition. Our interpretation shows sills or shallowly buried lavas in various locations close to the Baja California coast, particularly in and on the flanks of the Lower Delfin basin cropping out ~7.5 km east of the Baja coast and extending laterally in the subsurface for at least 17.5 km. The Lower Delfin basin trends ~75 degrees clockwise of the Baja California coast, oblique to the current transform boundary. The extensional regime of the Lower Delfin basin is marked by a dense population of normal faults with dips around 55 degrees and offsets of a few meters, with opposing dips common. In contrast, the transform environment of the Ballenas Fault Zone at the southwestern end of the Lower Delfin basin, reveals only ambiguous evidence of the expected lateral offsets. The northeasterly trending Upper Delfin basin may actually be one very broad 'spreading center' or two separate and parallel basins. Which of the parallel basins is the more active alternates along strike. Numerous normal faults are observed across the axis of the Upper Delfin, with fault spacings of tens to hundreds of meters. In both the Lower and Upper Delfin basins faulted strata appear to be 'rafted' away from the axis of the basin. Closer to the mouth of the Colorado river, sediments in the northerly trending Wagner basin appear to be less faulted suggesting that sedimentation has overwhelmed the rate of deformation in this area. Plate boundaries in the N Gulf are, thus, wide complex zones of regional extension overprinted by shearing and a high sediment influx.

Imágenes Sísmicas del Límite Entre Placas en la Parte Septentrional del Golfo de California

P. Persaud, J. M. Stock, M. S. Steckler, A. Martin-Barajas, J. B. Diebold, A. Gonzalez-Fernandez, G. S. Mountain

Presentamos nuestra interpretación de datos de sísmica de multicanal con alta resolución, registrados en la parte nor-occidental del Golfo de California. Se registró una red de perfiles bidimensionales con el sistema MCS portátil de alta resolución de Lamont-Doherty Earth Observatory, en los meses de mayo y junio de 1999, y ofrece una resolución vertical de metros hasta una profundidad de 2 km dentro de la columna sedimentaria. El análisis de las velocidades sísmicas, basado en los coeficientes de similitud, se utilizó para sumar los datos. Corregimos las amplitudes para la divergencia esférica, y utilizamos la deconvolución predictiva, para amplificar la energía de las llegadas secundarias y para disminuir el efecto de los múltiples del fondo del agua. El algoritmo de Stolt se utilizó para la migración de los datos resultantes.

Este trabajo se enfoca en la deformación activa asociada con las cuencas principales y los límites entre placas en la parte NW del Golfo, para entender la tectónica de esta región. Las cuencas de Wagner, Delfín Superior, y Delfín Inferior están controladas por fallas, y muestran rellenos sedimentarios sin evidencias claras de una transición obvia entre corteza oceánica y corteza continental. Nuestra interpretación muestra silos o lavas someras sepultadas en varios sitios cerca de la costa de Baja California, particularmente en el centro y los flancos de la cuenca Delfín Inferior, ~7.5 km al este de la costa de Baja California y continuándose lateralmente bajo la superficie por lo menos unos 17.5 km. La cuenca Delfín Inferior tiene un rumbo que difiere 75° (en sentido horario) del rumbo de la línea de la costa, y es oblicua al azimut de las fallas transformes actuales. El régimen extensional de la cuenca de Delfín Inferior muestra una población concentrada de fallas normales con echados de aproximadamente 55° y desplazamientos aparentes de unos metros, con echados comunes en dirección opuesta. En contraste, el ambiente de fallas transformes de la Zona de Falla de Ballenas, al límite sur-occidental de la cuenca Delfín Inferior, muestra solamente evidencias ambiguas de los desplazamientos laterales esperados. La cuenca Delfín Superior, con su rumbo NE, puede ser un solo centro de dispersión muy ancho, o dos cuencas independientes y paralelas. Cual de las cuencas es la más activa puede variar con la distancia en dirección NE. Muchas fallas normales se observan a través del eje de la Cuenca Delfín Superior, con separaciones entre fallas adyacentes de decenas a centenas de metros. En ambas cuencas (la Inferior y la Superior), estratos fallados parecen haber sido "llevados" fuera del eje de la cuenca. Más cerca de la boca del Río Colorado, los sedimentos de la cuenca Wagner (de rumbo N) parecen menos fallados, sugiriendo que aquí la sedimentación domina sobre la tasa de deformación. Los límites entre las placas en el Golfo septentrional son, entonces, zonas anchas y complicadas de distensión regional, con influencias sobrepuestas de cizalla y de un gran aporte de sedimentos.

CONTINUOUS RECORDING OF SEISMICITY IN THE NORTHERN GULF OF CALIFORNIA

Cecilio J. Rebollar

I have deployed at different periods of time since 1995 broad band seismic stations in the northern Gulf of California in order to locate the seismic activity in the transitional extension-transform system of the Gulf of California. For example, on March 1993 a magnitude 5.3 event occurred at the Bahia de las Animas south of Isla Angel de la Guarda. This event was a normal event, with simple waveforms and generated an acceleration of 101 cm/seg^2 at a distance of 30 km. On November 26 1997, we located a $M_w=5.5$ earthquake in the lower Delfin basin at a depth of 5 km. This event was complex. Focal mechanism from first motions and body waveform modeling of P-waves and surface waves suggest, that the rupture started with dip-slip motion in the first three seconds and ended as a strike slip motion. I hypothesize that the initial slip was due to a magmatic intrusion.

I will describe the progress of this project up to date. Four stations are recording continuously since November of 1999. Those stations are located at CHXB (31.472N, 115.051W), PPXB (31.335N, 113.632W), PLIB (29.916N, 112.695W), HERB (29.018N, 110.949W) and TOPB (25.609N, 109.535W). Two more stations BAH1 (28.944N, 113.562W) and GUAB (27.897N, 110.536W) will be deployed during this year. So far we have recorded single events and earthquake swarms in the Cerro Prieto Fault and in the Guaymas basin. I will show examples of the recorded events.

Cecilio J. Rebolgar
Seismologist
CICESE
Departamento de Sismología
División Ciencias de la Tierra
P.O. BOX 434843
San Diego, CA 92 143-4843
E-mail: rebollar@cicese.mx

Preliminary results of the Vizcaíno Geophysical Transect

José M. Romo, Enrique Gómez-Treviño, Juan García Abdeslem, Carlos Flores and Francisco Esparza

Depto. Geofísica Aplicada, CICESE

To investigate the crustal mass density and electrical conductivity beneath the central region of Baja California Peninsula, a geophysical transect across the Vizcaíno desert has recently been completed. We occupied 37 magnetotelluric (MT) observation sites and 150 gravity stations along a 200-km line, from Bahía Asunción, in the Pacific coast, to San Francisquito in the Gulf of California. The collected gravity data were combined with a regional database to produce a Bouguer anomaly map covering the studied area. For the MT survey the naturally induced electromagnetic fields registered at each site were used to estimate a frequency dependent

transfer function that is connected with subsurface conductivity. The data registered in a broad frequency band (0.001 to 100 Hz) are sensitive to depths of several tens of kilometers. We present the Bouguer anomaly map as well as cross sections of the MT observed data using a representation recently proposed by the authors. A density model and a conductivity image of the crust obtained with an inversion scheme are also included. Some of the main features on these preliminary models are the relatively conductive zone at ~20 km depth, the highly resistive zones on the east side and the highly conductive basin beneath the Vizcaíno desert.

Resultados preliminares del Transecto Geofísico en Vizcaíno

José M. Romo, Enrique Gómez-Treviño, Juan García Abdeslem, Carlos Flores y Francisco Esparza

Depto. Geofísica Aplicada, CICESE

Con el propósito de investigar la densidad y la conductividad eléctrica de la corteza bajo la región central de la Península de Baja California, recientemente se ha llevado a cabo un transecto geofísico que cruza la península en la latitud del desierto de Vizcaíno. Se realizaron 37 sondeos magnetoteléuticos (MT) y 150 estaciones gravimétricas a lo largo de un perfil de ~200 km de longitud, desde Bahía Asunción, en la costa del Pacífico, hasta San Francisquito en el Golfo de California. Los datos de gravedad se combinaron con una base de datos regional para producir un mapa de anomalía de Bouguer que cubre el área de estudio. Para el perfil MT, el campo electromagnético natural que se registró en cada sitio fue usado para estimar una función de respuesta que depende de la frecuencia y que está conectada con la conductividad del subsuelo. Estos datos, registrados en una banda ancha de frecuencia (0.001 a 100 Hz), son sensibles hasta profundidades de varias decenas de kilómetros. Presentamos el mapa de anomalía de Bouguer así como secciones MT con los datos observados, usando una representación recientemente propuesta por los autores. También se incluye un modelo de densidades y una imagen de la conductividad de la corteza obtenida mediante la inversión de estos datos. En estos modelos preliminares puede observarse una zona relativamente conductora a ~20 km de profundidad, zonas muy resistivas en el lado Este y una cuenca muy conductora bajo el desierto de Vizcaíno.

Shear at plate boundaries: Implications for seismicity, fault interactions, and heat flow

Mousumi Roy

141 Northrop Hall, Dept. of Earth & Planetary Sciences, University of New Mexico,
Albuquerque, NM 87131-1116

A fundamental uncertainty in interpreting surface patterns of crustal deformation at active plate boundaries is the degree of coupling between the crust and mantle. This study explores the sensitivity of surface deformation patterns to the distribution of shear in the crust and mantle

lithosphere at a strike-slip plate boundary. The modeling technique presented here incorporates both discrete fault planes and more distributed ductile flow in the continental crust. The physical framework of this modeling approach is general and the author plans to apply this technique to more complex, transtensional plate boundaries, particularly to study the onset and evolution of continental rifting.

This study focuses on the rheologic structure of the crust and mantle and its influence on surface strain rates, faulting, seismicity, and heat flow. A major focus of this work is the factors that determine the geometry and dynamics of the upper crustal deformation zone. For example, a wide zone of surface deformation arises in the presence of a viscous lower crust (even if the mantle shear zone is narrow) and for broadly distributed shear in the mantle (even if the crust is primarily elastic). These scenarios differ in the distribution of shear within the crust, particularly in the relative importance of shear heating on fault planes and the volumetric distribution of viscous dissipation. Therefore, rheologic stratification within the crust, together with the distribution of shear in the mantle lithosphere, has important implications for surface deformation, faulting, the thermomechanics and surface heat flow at a strike-slip plate boundary.

References relevant to this abstract:

Roy, M., Evolution of fault systems at a strike-slip plate boundary: A viscoelastic model, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 2881-2884, 1998.

Roy, M. and L. H. Royden, Crustal rheology and faulting at strike-slip plate boundaries, 1, An analytic model, *J. Geophys. Res.*, 105, 5583- 5598, 2000.

Roy, M. and L. H. Royden, Crustal rheology and faulting at strike-slip plate boundaries, 2, Effects of lower crustal flow, *J. of Geophys. Res.*, 106, 5599-5613, 2000.

Cizalla en los límites entre placas: Implicaciones para la sismicidad, la interacción de fallas y el flujo de calor

Mousumi Roy

141 Northrop Hall, Dept. of Earth & Planetary Sciences, University of New Mexico,
Albuquerque, NM 87131-1116

Una incertidumbre fundamental en la interpretación de patrones superficiales de la deformación cortical en límites activos entre placas, es el grado de acoplamiento entre la corteza y el manto. Este estudio explora la sensibilidad de los patrones de deformación superficial a la distribución de cizalla en la corteza y la litósfera del manto, en un límite transcurrente entre placas. La técnica de modelado que se presenta aquí, incorpora a la vez planos discretos de fallas y flujo dúctil más distribuido en la corteza continental. El marco físico de esta parametrización es general, y el autor espera aplicar la misma técnica a límites de placas transtensionales, más complejos, sobre todo para estudiar el inicio y la evolución de la distensión continental.

Este estudio se enfoca en la estructura reológica de la corteza y el manto, y su influencia en las tasas de deformación superficial, fallamiento, sismicidad y flujo de calor. Un tema principal de este trabajo es entender los parámetros que determinan la geometría y la dinámica de la zona de

deformación en la corteza superior. Por ejemplo, una zona de deformación ancha en la superficie puede resultar de la presencia de una corteza inferior viscosa (aun si la zona de cizalla en el manto es estrecha) y por cizalla distribuida en el manto (aun si la corteza se comporta elásticamente). Estos escenarios difieren en la distribución de la cizalla dentro de la corteza, particularmente en la importancia relativa del calentamiento debido a cizalla en los planos de falla y a la distribución volumétrica de la disipación viscosa. Por consecuencia, la estratificación reológica dentro de la corteza, conjuntamente con la distribución de cizalla en la litósfera del manto, tiene implicaciones importantes para la deformación superficial, el fallamiento, la termomecánica y el flujo de calor cerca de un límite de placas transcurrente.

Bibliografía:

Roy, M., Evolution of fault systems at a strike-slip plate boundary: A viscoelastic model, *Geophys. Res. Lett.*, 25, 2881-2884, 1998.

Roy, M. and L. H. Royden, Crustal rheology and faulting at strike-slip plate boundaries, 1, An analytic model, *J. Geophys. Res.*, 105, 5583- 5598, 2000.

Roy, M. and L. H. Royden, Crustal rheology and faulting at strike-slip plate boundaries, 2, Effects of lower crustal flow, *J. of Geophys. Res.*, 106, 5599-5613, 2000.

Geometry and Quaternary history of the San Andreas fault zone in the Salton Trough, southern California

Rymer, Michael J., U.S. Geological Survey, 345 Middlefield Rd., Menlo Park, CA 94025, mrymer@usgs.gov

New geologic mapping in the northern part of the Salton Trough along with seismic reflection data collected across the San Andreas fault zone reveal the three-dimensional setting and Quaternary history of this plate-boundary structure. From southeast to northwest, the fault zone is defined by the San Andreas itself and then splits into the Mission Creek, Banning, and Garnet Hill faults of the San Andreas. Near the split from a single-stranded to a multiple-stranded zone, the San Andreas bends to a more westerly strike. Interpretations of seismic reflection data define a general trend in the subsurface geometry of the San Andreas fault zone.

>From southeast to northwest, the fault zone varies from vertical, to steeply inclined to the northeast, to gently inclined to the north-northeast. Dips as shallow as 45-50 degrees are inferred from our seismic lines across the Mission Creek, Banning, and Garnet Hill faults. These changes in fault inclination, from near vertical to shallow, coincide with where the fault zone progresses from single stranded to multiple stranded, near the eastern margin of the structurally complex San Geronio 'knot'. This change in inclination of the fault zone also coincides with where up to 20 percent of the strain of San Andreas fault is partitioned northward off the San Andreas and through the Little San Bernardino Mountains and then farther north into the eastern California shear zone in the Mojave Desert.

Further indications of structural complexity in the San Andreas fault zone and of local tectonics are revealed in hills located along the fault. Durmid Hill and the Mecca and Indio Hills,

transpressive warps composed of Pliocene and Pleistocene strata, have been uplifted, folded, faulted, and locally rotated, on either vertical or horizontal axes. The Bishop ash bed, 0.76 Ma, and the ash of Thermal Canyon, along with magnetostratigraphy and fossil vertebrates, provide age control for tectonic processes. Strata exposed between the Banning and Mission Creek faults have rotated clockwise about 14 degrees in the past 0.76 Ma; strata northeast of the San Andreas fault in the southeastern part of the Indio Hills have rotated at about the same rate, but in a counterclockwise direction. A block near the Banning fault has rotated on a horizontal axis about 30 degrees to the northeast in the same period. Provenance studies in the Indio Hills indicate a significant change in the source of sediments dispersed into the northern part of the Salton Trough during the same period. The change in clast source area started slightly earlier than, and was complete by, about 0.76 Ma and help constrain the timing of uplift of the Little San Bernardino Mountains, located northeast of the San Andreas fault.

La geometría y la historia cuaternaria de la zona de la falla de San Andrés en la Depresión de Salton, California meridional

Rymer, Michael J., U.S. Geological Survey, 345 Middlefield Rd., Menlo Park, CA 94025, mrymer@usgs.gov

Nueva cartografía geológica en la parte norte de la depresión de Salton, conjunto con perfiles de sísmica de reflexión a través de la Falla de San Andrés, muestran el marco tridimensional y la historia cuaternaria de esta estructura de límite de placas. Del sureste al noroeste, la zona de la falla se define por la falla de San Andrés misma que al noroeste se bifurca para formar las fallas Mission Creek, Banning, y Garnet Hills. Cerca del sitio de la bifurcación la falla de San Andrés cambia su rumbo a una dirección más hacia el oeste. Las interpretaciones de los datos sísmicos definen una tendencia promedio de la geometría de la zona de falla en el subsuelo.

Del sureste al noroeste, la zona de falla varía de vertical, a muy inclinada hacia el noreste, a menos inclinada hacia el nor-noreste. De nuestros perfiles sísmicos se infieren inclinaciones del plano de falla de 45° a 50° a través de las fallas Mission Creek, Banning, y Garnet Hill. Estos cambios en la inclinación del plano de la falla, de casi vertical a menos inclinada, coinciden con el sitio donde la falla cambia de un sola falla a fallas múltiples, cerca de la margen oriental del nudo estructural “San Gorgonio”. Este cambio en la inclinación de la zona de las fallas también coincide con el sitio donde hasta 20 por ciento de la deformación de la falla de San Andrés está repartida hacia el norte, saliendo de la falla San Andrés para seguir a las montañas Little San Bernardino y de allí, más al norte a la zona de cizalla de California Oriental en el desierto del Mojave.

En cerros a lo largo de las fallas se observan indicaciones adicionales de la complejidad estructural en la zona de la falla de San Andrés y de la tectónica local. El Cerro Durmid y Los Cerros Mecca y Indio, contienen pliegues transpresivos que consisten en estratos pliocénicos y pleistocénicos, levantados, plegados y fallados. Localmente han sufrido rotaciones alrededor de ejes verticales u horizontales. La capa de ceniza Bishop, con una edad de 0.76 Ma, y la ceniza de Thermal Canyon, conjunto con magnetoestratigrafía y vertebratos fósiles, dan control de la edad de los procesos tectónicos. Los estratos que afloran entre las fallas de Banning y Mission

Creek han girado en sentido horario aproximadamente 14 grados en los últimos 0.76 Ma; los estratos al NE de la falla de San Andrés en la parte sur-oriental de los cerros de Indio han girado con la misma velocidad pero en sentido antihorario. Un bloque cerca de la falla Banning ha girado alrededor de un eje horizontal aproximadamente 30 grados hacia el NE durante el mismo período. Estudios de dirección de transporte sedimentario en los cerros de Indio indican que hubo un cambio significativo en la fuente de los sedimentos que llegaron a la parte norte de la depresión de Salton durante el mismo período. El cambio en el área fuente de los clastos inició un poco antes de, y terminó aproximadamente en 0.76 Ma. Estos datos ayudan en constriñir el tiempo de levantamiento de las montañas Little San Bernardino, ubicados al noreste de la falla de San Andrés.

Dale S. Sawyer

Dept. of Geology and Geophysics, Rice Univ. MS-126, P.O. Box 1892, Houston, TX 77251, USA

713-348-5106 (tel); 713-348-5214 (fax); dale@rice.edu

My research focuses on the process of continental rifting and the creation of new oceans. I use reflection and refraction seismic profiling and numerical simulation of continental deformation in my studies.

Mis investigaciones estudian el proceso de distensión continental y de creación de nuevo material oceánico. Utilizo perfiles sísmicos, de reflexión sísmica y de refracción sísmica, y simulación numérica de la deformación continental en mis investigaciones.

Abstract

I am interested in applying 3-dimensional finite element models to improve our understanding of oblique continental rifting. The Gulf of California seems a type area for such a study. The region is also interesting because the Baja Peninsula is a good example of a sliver of continental crust being rifted from a larger continent. Such slivers are common and frequently end up as parts of mountain belts.

John Dunbar of Baylor University, Dennis Harry of University of Alabama, and I have developed a 3-dimensional finite element modeling techniques for simulating the deformation of continental lithosphere. We use the method to explore the effects of pre-rifting continental heterogeneity on the location and evolution of a rift. Our previous work has concentrated on normal (non-oblique) rifts in which the 3-D aspect of the model was important for considering along-axis variation in continental strength, and the rift propagation that can result. In the case of the Gulf of California, I expect to use the 3-D method's ability to apply displacements obliquely to the axis of rifting. Initially I am interested in the response of simple linear crust and upper mantle weaknesses to oblique stress. Beyond that, I anticipate exploring the effects of oblique

rifting on initial continental lithosphere models with more complicated fabric and perhaps along-axis heterogeneity.

At the workshop, I hope to learn more about the crust and lithosphere of the Gulf of California and the bordering continent and continental sliver. This background will be key to determining how modeling can contribute to the larger MARGINS goal of understanding the rupturing of continents. Modeling will be an essential part of addressing key research problems involving the spatial and temporal distribution of strain, the architecture of rifting, and the generation and emplacement of magma during rifting.

Resumen.

Estoy interesado en aplicar modelos de elementos finitos en tres dimensiones para mejorar nuestro conocimiento sobre distensión continental oblicua. El Golfo de California parece ser un área clave para este tipo de estudio. La región también es interesante debido a que la Península de Baja California, es un buen ejemplo de un bloque de corteza continental en proceso de separarse de un continente más grande. Estos bloques continentales son comunes y frecuentemente terminan incorporándose como cadenas montañosas.

John Dunbar de Baylor University, Dennis Harry de la Universidad de Alabama y yo hemos desarrollado unas técnicas de modelado de elementos finitos en tres dimensiones para simular la deformación de la litosfera continental. Utilizamos nuestro método para evaluar la influencia de heterogeneidades preexistentes en relación con la localización y evolución del *rift*. Nuestros trabajos anteriores se han concentrado en zonas de distensión ortogonal (no oblicua), en las cuales el aspecto tridimensional del modelo fue muy importante porque considera las variaciones de rigidez continental a lo largo del *rift* y la propagación subsecuente de éste. En el caso del Golfo de California, espero utilizar las bondades que ofrece el método tridimensional para aplicar desplazamientos oblicuos con respecto al eje del *rift*. En principio, me interesa ver la respuesta de debilidades simples y lineales dentro de la corteza y el manto superior. A largo plazo, anticipo explorar los efectos de la distensión oblicua en modelos de litósfera continental con estructuras más complejas, como zonas con heterogeneidades a lo largo del *rift*.

En el taller espero aprender más sobre la corteza y la litósfera del Golfo de California, el borde o plataforma continental y el bloque continental. Esta información será clave para determinar de qué manera el modelado puede contribuir a lograr la meta principal de MARGINS, relacionada a entender el proceso de ruptura continental. El modelado será una parte esencial para atacar problemas claves que involucran la distribución espacio-temporal de la deformación, la arquitectura del *rift* y el origen y emplazamiento de los magmas durante el proceso de distensión.

Role of inherited crustal anisotropy in the Mesozoic orogenic evolution of Baja California- is Cenozoic tectonism different?

SCHMIDT, Keegan L., WETMORE, Paul H., and PATERSON, Scott R., Dept. of Earth Sci., Univ. of Southern California, Los Angeles, CA 90089-0740, kschmidt@usc.edu.

Why has Cenozoic rupturing of continental lithosphere along the SW margin of North America occurred in the Gulf of California where there are no obvious inherited crustal weaknesses? In contrast crustal heterogeneity, including pre-established anisotropy and variation in crustal rheology, strongly controlled the location and dynamics of orogeny in the Jura-Cretaceous Peninsular Ranges batholith (PRB) of Baja and southern California. An inherited crustal boundary forms a margin-parallel transition zone in the middle of the batholith that juxtaposes oceanic-floored arc crust to the west with North American continental arc crust to the east. Structural and thermochronological studies across the central segment of the PRB indicate that this transition zone controlled sedimentation, focused contractional deformation, and accommodated more than 15 km of differential denudation between western and eastern zones of the batholith. Other sources of anisotropy and rheological contrasts are also apparent during Mesozoic orogenesis. The distribution of deformation in the eastern zone of the batholith indicates that more rigid crust may underlie shallow water facies of the Paleozoic miogeocline forming a buttress within crust of the eastern zone of the batholith. This effect further focused contractional deformation in the transition zone of the batholith. In contrast to the effects of inherited crustal anisotropy in the batholith, the locus of arc magmatism appears to have had less control on focusing deformation except under limited circumstances. Plutonism is apparent across both the western and eastern zones of the batholith as well as transition zone, yet deformation is focused within a narrow region in the transition zone <25 km wide.

With two exceptions, Neogene faults associated with the Gulf of California extensional province, as well as the location of the rift axis, appear to ignore the older crustal anisotropy that controlled Mesozoic orogenesis. These possible exceptions include the Sierra Las Tinajas and Puertecitos accommodation zones that allow reversal in upper plate transport direction on Neogene extensional fault systems in the western flank of the rift. Part of the Sierra Las Tinajas zone corresponds with the active dextral strike slip Agua Blanca fault, which during the Mesozoic served as a high strain zone that potentially accommodated collision of the southern part of the western zone of the batholith. The Puertecitos zone corresponds with the southern extent of miogeoclinal North American crust, a boundary that appears to have controlled along-strike contrasts in contractional deformation and denudation during Mesozoic orogenesis. Thus Cenozoic rifting clearly contrasts with Mesozoic orogeny in terms of the role played by inherited crustal anisotropy. Only for the case of accommodation zone development does reactivation of older crustal structure appear to have been important, and these reactivated structures played only a minor role during Mesozoic orogenesis. Other, potentially more significant, controls on Neogene lithospheric rupturing in the Gulf of California include the locus of Tertiary arc magmatism and the western boundary of earlier Basin and Range extension.

The Alarcon Basin : an opportunity (a) to test stretching models of continental margin formation and (b) to determine the age of a previous stretching event within the Gulf of California.

John Sclater(1), Antonio Gonzalez-Fernandez(2) and Peter Lonsdale(1)

- (1) Scripps Institution of Oceanography, UCSD, La Jolla, CA 92093, USA
- (2) Departamento de Geología, CICESE, Carr. Tijuana-Ensenada km 107, 22830 Ensenada, B.C., Mexico.

The semi-enclosed Alarcon basin is the southernmost basin in the Gulf of California. It is floored by oceanic crust with spreading beginning at 3.7 - 3.4 Ma. A recent CICESE/SIO Seabeam and 3 channel seismic survey reveals very sharp contacts between the oceanic crust and (a) the sheared continental northern margin and (b) the rifted eastern and western margins. The eastern and western margins are covered by a thin layer of sediment below which lie, what appear to be, rotated fault blocks. The western margin contacts the oceanic crust along a single large fault whereas a series of smaller faults separating a number of fault blocks make up the eastern margin. A ridge and an embayment lie between the eastern margin and the Sinaloa coast.

The oceanic spreading center within the Alarcon Basin is clearly visible as a long linear 2500 m high. When account is taken for the loading effect of the sediment, the oceanic crust descends to a depth of 2900 m before reaching the eastern margin of the basin. Thereafter the basement depth starts to rise reaching a depth of 900 m on the ridge between the basin and the coast. Assuming a simple one dimensional stretching model and instantaneous extension 4 million years ago, it is possible to use the sediment corrected depths to calculate the amount of extension. We find that the predicted extension varies from a factor of six near the contact with the oceanic crust to one and a half over the ridge. Such an extension requires a crustal thickness varying from 8 km next to the oceanic crust to roughly 25 km under the ridge. The predicted heat flow would also decrease from 230 to 60 mW/M² over the same path. The variations in crustal thickness and heat flow are very large and easily measurable. Also with a high quality multi-channel survey it should be possible to image the block faulting and compute the actual amount of extension directly. The total subsidence, the heat flow, the crustal thickness and the amount of extension visible on the multi-channel line are all a function of the amount of stretching and for the model to work should yield consistent values. We believe that the fact that all of these parameters can be measured on both margins makes the Alarcon Basin a particularly attractive venue in which to test such simple stretching models.

In the northern Gulf (Delfin basin), evidence has been found for two different episodes of extension. The first episode created a primitive basin, via detachment and metamorphic core complex formation. Then the migration of the deformation produced a new (present) basin to the northwest. Examination of the bathymetry suggests that this basin duality may be present throughout the entire gulf. A good match between the heatflow and the subsidence on the southeastern flank of the Alarcon Basin will validate our approach. In such a case we would be able to use the same approach to date the age of the extensional event that created the embayment between the ocean crust and the coast of Sinaloa.

There are a number of problems with the assumptions we have made. It is not clear that the last phase of continental stretching was instantaneous. Also we have assumed that the continental crust was at an equilibrium temperature before stretching and that all heat is lost vertically. However, most of these assumptions can be eliminated by making the model more realistic. The near expected depths in the Alarcon Basin show that the ocean floor subsides by thermal cooling. This provides a substantial additional reason for attempting to test simple stretching models on

the continental margins of the Alarcon Basin. Demonstrating their validity with such a test could provide a useful framework for investigating the rest of the Gulf.

La Cuenca de Alarcón: una oportunidad para (a) comprobar modelos de adelgazamiento en la formación de márgenes continentales y (b) determinar la edad de un evento previo de distensión dentro del Golfo de California

John Sclater(1, Antonio Gonzalez-Fernandez(2 and Peter Lonsdale(1)

(1) Scripps Institution of Oceanography, UCSD, La Jolla, CA 92093, USA

(2) Departamento de Geología, CICESE, Carr. Tijuana-Ensenada km 107, 22830 Ensenada, B.C., Mexico.

La cuenca semi-cerrada de Alarcón es la cuenca meridional del Golfo de California. Tiene piso oceánico formado por dispersión empezando en 3.7 – 3.4 Ma. Un estudio reciente, de parte de CICESE y SIO, con SeaBeam y perfiles sísmicos de 3 canales, muestra contactos muy bien definidos entre la corteza oceánica y (a) la margen septentrional (deformada por cizalla) y (b) las márgenes oriental y occidental. Éstas están sepultadas por una capa delgada de sedimentos, debajo de los cuales subyace lo que parecen ser bloques fallados que experimentaron una rotación. La margen occidental tiene un contacto con corteza oceánica por medio de una sola falla grande, mientras en la margen oriental hay una serie de fallas más pequeñas separando varios bloques fallados. Una cresta y una bahía se encuentran entre la margen oriental y la costa de Sinaloa.

La dorsal oceánica dentro de la Cuenca Alarcón es claramente visible, siendo una cresta lineal con profundidad de 2500 m. Cuando se toma en cuenta el efecto de peso del sedimento, la corteza oceánica baja a una profundidad de 2900 m antes de llegar al margen oriental de la cuenca. A partir de este punto la profundidad del basamento sube otra vez, alcanzando una profundidad de 900 m en la cresta entre la cuenca y la costa. Suponiendo un modelo unidimensional de adelgazamiento con una distensión instantánea hace 4 Ma, se puede utilizar las profundidades corregidas de los sedimentos para calcular la cantidad de extensión. Nuestro resultado es que la extensión pronosticada varía, de un factor de 6 cerca del contacto con la corteza oceánica, a un factor de 1.5 en la cresta. Tal extensión requiere un espesor cortical variando de 8 km cerca de la corteza oceánica a aproximadamente 25 km debajo de la cresta. Los flujos de calor pronosticados también disminuirían de 230 a 60 mW/m² sobre el mismo perfil. Estas variaciones en el espesor cortical son grandes y fáciles a medir. También con un perfil de sísmica de multicanal debemos conseguir imágenes del fallamiento de los bloques y calcular la cantidad de extensión directamente. La subsidencia total, el flujo de calor, el espesor cortical y el porcentaje de extensión visible en una línea sísmica multicanal son todos dependientes de la cantidad de distensión. En un modelo adecuado, todos estos valores necesitan ser consistentes. El hecho de que todos estos parámetros se pueden medir en ambos márgenes sugiere que la Cuenca Alarcón es un sitio ideal para comprobar los modelos sencillos de adelgazamiento cortical.

En la parte septentrional del Golfo (Cuenca Delfín), hay evidencias de dos etapas distintas de extensión. La primera etapa produjo una cuenca primitiva, con la formación de

fallas tipo *detachment* y *metamorphic core complexes*. La subsecuente migración de la deformación produjo una nueva (y actual) cuenca al noroeste. Los detalles batimétricos sugieren que esta dualidad en la formación de las cuencas posiblemente existe a lo largo del Golfo. Un buen ajuste entre el flujo de calor y la subsidencia en el flanco sur-oriental de la Cuenca Alarcón comprobaría nuestra técnica. En este caso sería posible utilizar el mismo método para fechar la edad del evento extensional que produjo la bahía entre la corteza oceánica y la costa de Sinaloa.

Hay varios problemas con nuestras suposiciones. No es claro que la fase final de distensión continental fue instantánea. Además, hemos postulado que la corteza continental estuvo a temperaturas equilibradas antes de la distensión y que todo el calor se pierda verticalmente. Las profundidades en la Cuenca Alarcón, casi iguales a las pronosticadas, muestran que el piso oceánico exhibe subsidencia por enfriamiento térmico. Éste da una razón adicional por intentar comprobar modelos sencillos en los márgenes continentales de la Cuenca Alarcón. La demostración de su validez con este tipo de prueba puede dar un marco muy útil para investigaciones en otros sitios del Golfo.

Stretching, Rotation, and Spreading in Continental Breakup:

The Salton Trough, California

Leonardo Seeber, John G. Armbruster, Michael Steckler
Lamont Doherty Earth Observatory, Palisades, NY 10964; nano@ldeo.columbia.edu
Rebecca Dorsey, University of Oregon
Christopher C. Sorlien,
Institute for Crustal Studies, UCSB, Santa Barbara, CA

Right-lateral transtension characterizes the Plio-Quaternary evolution of the Salton Trough along the North America-Pacific plate boundary in southern California. Three distinct mechanisms have been suggested to accommodate this motion: 1.) Crustal stretching and thinning by normal and detachment faults surfacing along the western border of the trough; 2.) Extension and dextral plate motion by a set of parallel northeast-striking blocks bounded by left-lateral cross faults rotating clockwise about vertical axes; and 3.) Spreading by dike injection along the Brawley seismic zone. This zone is the northernmost right jog between transforms and marks the terminus of the transitional portion of the boundary between the oceanic ridge-transform system in the Gulf of California and the San Andreas continental transform. Earthquakes and surface structure suggest that the current regime in the Salton Trough is dominated by subvertical transcurrent faults. The border faults were active in the early Quaternary, but not later. Focal mechanisms with reverse motion are almost as prevalent as ones with normal motion and account for little moment release. Can the known fault array account for the late Quaternary plate motion in the Salton Trough without major extensional faults?

Yes, provided clockwise rotation and spreading by dike injection are permitted. A simple irrotational model can account for the kinematic boundary conditions instantaneously, but it is rejected because it predicts right- rather than the observed left-lateral slip on the cross faults and requires unrealistically fast spreading along the Brawley zone. We propose instead a model where a set of parallel blocks progressively shorter to the south occupy the space between the

southern San Jacinto fault zone and the Brawley zone and rotate clockwise. A key constraint is that the motion of the western end of the longest and northern-most block moves parallel to the transform. This model can account for current fault kinematics as well as for the Quaternary evolution of the trough. In this model, clockwise rotation of the left-lateral faults contributes about half of the motion and spreading along the Brawley zone contributes a significant portion of the remainder. Given 26, 10, and 36mm/y fed into the Trough by the San Andreas, San Jacinto, and Imperial faults, respectively, the geometry of the fault array within the Trough prescribes their slip rates: clockwise rotation and left slip of the cross faults are 21°/m.y. and 6mm/y, respectively; transform-parallel spreading and right-lateral slip on the Brawley zone are 10mm/y and 7-to-17mm/y, north-to-south, respectively; and dextral slip at the southern end of the San Jacinto fault zone is only 3mm/y. The rate of injection is increasing, according to the model. Space problems are expected locally between rotational and irrotational parts of the system. Northwest and northeast shortening are predicted in the San Felipe Hills and the Durmid Hills, respectively, where early Quaternary subsidence and sedimentation have given way to current folding and uplift. Extension is predicted in the Salton Sea area. The model also accounts for southeastward branching of the San Jacinto fault zone as it approaches the rotation system. A mid-Quaternary basin-wide change from marine/lacustrine to fluvial sedimentation may mark the transition from stretching to rotation.

Left-lateral cross faults are found elsewhere in the Gulf of California. Vertical-axis rotation has been documented in many continental rift zones. The successive dominance of stretching, rotation, and spreading may characterize breakup of continents. According to our modeling of the Salton Trough, however, the onset of spreading and the formation of new crust by injection from below may occur early in this process. The axis of injection is $\approx 25^\circ$ to the transforms in the Salton Trough. The angles appear to widen progressively toward 90° for spreading axes progressively closer to the fully oceanic portion of the boundary in the Gulf of California. This spatial progression may correlate with age of spreading and thus suggest a progressive clockwise rotation of spreading axes. This rotation may stem from coupling between dyke injection and rotational tectonics in continental breakup.

Distensión, Rotación, y Dispersión en la Ruptura Continental: La Depresión de Salton, California

Leonardo Seeber, John G. Armbruster, Michael Steckler

Lamont Doherty Earth Observatory, Palisades, NY 10964; nano@ldeo.columbia.edu

Rebecca Dorsey, University of Oregon

Christopher C. Sorlien, Institute for Crustal Studies, UCSB, Santa Barbara, CA

La depresión de Salton se caracteriza por una evolución transtensional dextral plio-cuaternaria a lo largo del límite de placas Pacífico y Norteamérica en el sur de California. Se han sugerido tres mecanismos distintos para acomodar este movimiento. 1) Distensión cortical y adelgazamiento por fallas normales y de tipo *detachment* llegando a la superficie en el borde occidental de la depresión; 2) Distensión y movimiento dextral entre las placas, por un conjunto de bloques paralelos, con rumbos NE-SW, limitados por fallas transversales sinestrales girando en sentido horario alrededor de ejes verticales; y 3) dispersión por inyección de diques a lo largo de la zona sísmica de Brawley. Esta zona es el escalón más al norte entre las fallas transformes y representa

el límite de la transición entre el sistema oceánico de dorsales y fallas transformes del Golfo de California y la falla transformante continental de San Andrés. Los sismos y la estructura visible en la superficie sugieren que el régimen actual en la Depresión de Salton está dominado por fallas subverticales con movimiento transcurrente. Las fallas al límite del sistema fueron activas en el Cuaternario temprano, pero no más tarde. Los mecanismos focales con movimiento inverso son tan prevalentes como los de movimiento normal y suman un momento sísmico pequeño. Nos preguntamos, ¿ se puede acomodar el movimiento entre placas en la depresión de Salton con el arreglo de fallas conocidas en el cuaternario tardío, sin la existencia de importantes fallas tensionales?

Contestamos que sí, si se permite también rotaciones alrededor de ejes verticales, y distensión por medio de inyección de diques. Un modelo sencillo sin rotaciones puede acomodar las condiciones cinemáticas de contorno instantáneamente, pero se rechaza porque predice movimiento dextral, en vez del movimiento sinistral observado en las fallas transversales. También porque requiere dispersión demasiado rápida en la zona de Brawley. Proponemos como alternativa un modelo con un conjunto de bloques paralelos, progresivamente más cortos hacia el sur, en el área entre la zona de falla de San Jacinto sur y la zona de falla de Brawley. En este caso los bloques giran en sentido horario. Una restricción clave es que el movimiento del lado occidental del bloque más grande y más al norte, es de movimiento paralelo a la falla transforme. Este modelo puede explicar la cinemática actual de las fallas y también la evolución cuaternaria de la depresión. En este modelo, la rotación en el sentido horario de las fallas sinestrales contribuye aproximadamente con la mitad del movimiento, y la dispersión a lo largo de la zona de fallas de Brawley contribuye con una parte significativa restante. Dadas las tasas de 26, 10, y 36 mm/año de las fallas San Andrés, San Jacinto, e Imperial, respectivamente, cerca del Salton Sea la geometría del conjunto de fallas dentro de la Depresión prescribe sus tasas de movimiento: la rotación en sentido horario y el movimiento sinistral en las fallas transversales son $21^\circ/\text{Ma}$ y 6 mm/año, respectivamente; la distensión en dirección paralela a las fallas transformes y movimiento dextral en la zona de falla Brawley son 10 mm/año y 7-a-17 mm/año, de norte a sur, respectivamente; y el movimiento dextral del límite meridional de la zona de falla de San Jacinto registra únicamente 3 mm/año. La tasa de inyección está aumentando según el modelo. Localmente se esperan problemas geométricos entre las partes rotacionales y las partes no rotacionales del sistema. Se pronostica acortamiento hacia el NW y NE en San Felipe Hills y Durmid Hills, respectivamente, donde la subsidencia y sedimentación del Cuaternario temprano han cambiado a plegamiento y levantamiento actual. La distensión está pronosticada para el área del Mar de Salton. El modelo también tiene en cuenta la bifurcación hacia el SE de la zona de falla de San Jacinto cuando se acerca al sistema con rotaciones. En cambio de la sedimentación marina-lacustre a sedimentación fluvial en toda la cuenca durante el Cuaternario medio, puede indicar la transición entre la distensión y la rotación que actualmente predomina.

Fallas transversales sinestrales se encuentran en otros sitios en el Golfo de California. La rotación alrededor de ejes verticales ha sido documentado en muchas zonas de distensión continental. El predominio progresivo de distensión, rotación y dispersión puede caracterizar la ruptura de los continentes. Según nuestra modelización de la depresión de Salton, el inicio de la dispersión y la formación de corteza joven por inyección magmática puede ocurrir muy temprano en este proceso. El eje de inyección es $\sim 25^\circ$ a las fallas transformes en la depresión de Salton. Los ángulos parecen abrirse progresivamente hacia 90° en los ejes de dispersión cada vez más cercanos a la porción oceánica en el sur del Golfo de California. Esta progresión

espacial puede correlacionarse con la edad de la distensión y así sugerir una rotación progresiva en sentido horario de los ejes de distensión. Esta rotación puede resultar del acoplamiento entre la inyección de diques y la tectónica rotacional en la ruptura de los continentes.

**Block rotation and contraction within pull-apart basins: Marmara Sea,
Turkey, and Salton Trough, California**

Sorlien, C. C., Institute for Crustal Studies, University of California, Santa Barbara, CA 93106
Seeber, L., Lamont-Doherty Earth Observatory, Columbia University, Palisades, New York, 10964

Okay, A. I., Avrasya Yerbilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Turkey
Demirbag, E., Maden Fakültesi, Jeofizik Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Turkey
Kuscu, I., Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara Turkey
Steckler, M., Cormier, M.-H., Lamont-Doherty Earth Observatory, Columbia University, Palisades, New York, 10964

The Salton Trough of California is considered a pull-part basin centered at a right step in a right-lateral fault zone, from the San Andreas fault to the Imperial fault. Yet, there is tight Quaternary compressional folding west of Salton Sea. The Marmara Sea, Turkey fills what is commonly interpreted to be a series of pull-apart basins along the North Anatolian right-lateral fault system, but there has been no agreement on the basic fault geometry or kinematics within Marmara Sea. Comparison of these two basins and their settings can shed light on their similarities and aid in interpretation of each of them.

Difficulties in deciphering the tectonics in the Marmara Sea, despite several seismic imaging experiments, are related to limited precisely-located seismicity and because quantitative 3D structural modeling has not been employed to constrain interpretations. Two published interpretations include either counterclockwise or clockwise vertical axis block rotation associated with extension or contraction, respectively. Other interpretations, however, do not consider block rotation. Sedimentation rates are far higher in parts of Salton Trough than Marmara Sea, where active structure may be apparent in the bathymetry. NE-striking ridges oblique to the North Anatolian fault system have been interpreted as broad anticlines associated with compressional short-wavelength folding by Okay et al. (2000), rather than the predominant interpretation of horsts separating pull-apart basins.

The Salton Trough, in contrast, has more limited subsurface geologic and seismic reflection data. However, excellent imaging of active faulting by earthquake data and good surface geology provide constraints for 3D tectonic models. We propose an evolutionary geometric and kinematic model for Salton Trough which may provide a framework to understanding young shortening within Marmara Sea. In the Salton Trough, extension associated with the releasing step between the San Andreas and Imperial faults was accommodated by low-angle normal faults (detachments) and by magmatism associated with incipient seafloor spreading. Low-angle normal faults served to detach the upper crust. Both ductile dextral shear beneath the detachment

and “drag” along the bounding right-lateral faults could induced clockwise vertical-axis rotation. Normal faults are expected to form at an acute angle to the bounding right-lateral faults, defining elongate crustal blocks. A left-lateral slip component will increase on these faults as rotation proceeds. Active right-lateral faults and transverse left-lateral faults are illuminated by precisely-located seismicity in Salton Trough. The left-lateral faults define NE-elongate rectangular blocks bound by the San Andreas-Brawley and San Jacinto-Superstition Hills master faults. Angles between the blocks and master faults are wide but less than 90°. Thus extension is expected between elongate blocks. If rotation continues (or starts) beyond 90° to the bounding faults, contraction is expected between blocks (slats), unless the slats are permitted to move apart along the bounding faults. The location and amount of extension or contraction depends on whether the far-field blocks (outside the bounding faults) converge or diverge, with space problems between rotating and non-rotating blocks within the deformation zone. Vertical axis block rotation may thus localize extension and dike injection.

A major right-lateral fault within the Brawley Seismic zone (south of Salton Sea) strikes more northerly than the Superstition Hills fault. Thus the elongate parallel blocks are progressively shorter from north to south and therefore their rotation contributes correspondingly less to the plate motion. Slip rates on the right-lateral master faults bounding the Salton Trough appear to change spatially to maintain a uniform overall motion. As an extreme example, the Clark fault strand of the San Jacinto fault zone terminates into tight compressional folds associated with thrust earthquakes at the northern boundary of the rotation system. The similarity between total Quaternary slip on the San Jacinto fault system and the total dextral shear accommodated by the block rotation expected in our model suggests that they are genetically related. The progression from detachment-fault extension, to block rotation, and then to seafloor spreading involves considerable overlap and complexity of these processes. Block rotation models may explain some features seen in Marmara Sea. In turn, the large volume of existing and planned seismic reflection and other data from Marmara Sea, some shown here, should provide insight to features of Salton Trough.

Okay, A. I., Kaslilar-Ozcan, A., Imren, C., Boztepe-Guney, A., Dermirbag, E., and Kuscu, I., 2000, Active faults and evolving strike-slip basins in the Marmara Sea, northwest Turkey: a multichannel seismic reflection study, *Tectonophysics*, v. 321, p. 189-218.

Rotaciones de Bloques y Contracción Dentro de Cuencas Tipo *Pull-Apart*: Mar de Marmara, Turquía, y la Depresión de Salton, California

Sorlien, C. C., Institute for Crustal Studies, University of California, Santa Barbara, CA 93106
Seeber, L., Lamont-Doherty Earth Observatory, Columbia University, Palisades, New York, 10964

Okay, A. I., Avrasya Yerbilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Turkey
Demirbag, E., Maden Fakültesi, Jeofizik Bölümü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Turkey
Kuscu, I., Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara Turkey
Steckler, M., Cormier, M.-H., Lamont-Doherty Earth Observatory, Columbia University, Palisades, New York, 10964

La depresión de Salton en California se considera una cuenca *pull-apart* centrada en un traslape dextral de la falla de San Andrés y la falla Imperial. Sin embargo, hay plegamiento por compresión de edad cuaternaria al oeste del Mar de Salton. El Mar de Marmara, Turquía, rellena lo que típicamente se interpreta como una serie de cuencas tipo *pull-apart* a lo largo del sistema de fallas de Anatolia septentrional, pero no hay acuerdo sobre la geometría sencilla ni la cinemática dentro del Mar de Marmara. Una comparación de estas dos cuencas y sus marcos tectónicos pueden ilustrar sus similitudes y ayudar en la interpretación de cada uno de ellos.

La dificultad para descifrar la tectónica en el Mar de Marmara, a pesar de varios estudios sísmicos, se relaciona con la falta de similitud con localización precisa y porque el modelado cuantitativo tridimensional no ha sido utilizado para constriñir las interpretaciones. Dos interpretaciones publicadas incluyen rotaciones de bloques alrededor de ejes verticales, de sentido horario o antihorario, asociado con o distensión o compresión respectivamente. Otras interpretaciones no consideran la posible rotación de bloques. Las tasas de sedimentación son más altas en algunos sitios de la depresión de Salton que en el Mar de Marmara, donde las estructuras activas se pueden identificar en la batimetría. Los altos topográficos con rumbo NE-SW, oblicuos al sistema de fallas de Anatolia septentrional, se interpretaron por Okay y otros (2000) como anticlinales anchos asociados a plegamiento compresivo de corta longitud de onda, a diferencia de la interpretación corriente de *horsts* separando cuencas tipo *pull-a-part*.

La depresión de Salton, en contraste, tiene datos más limitados de geología o sísmica de reflexión bajo la superficie. Sin embargo, las excelentes imágenes de fallas activas obtenidas con base en sismos y el buen control geológico de la superficie, proporcionan datos útiles para los modelos tridimensionales. Proponemos un modelo de la evolución geométrica y cinemática de la depresión de Salton que puede proveer un marco para entender el acortamiento joven en el Mar de Marmara. En la depresión de Salton, la distensión asociada con el traslape de relajación entre las fallas San Andrés y Imperial se acomoda en fallas normales de baja inclinación (tipo *detachment*) y por magmatismo asociado con dispersión incipiente del piso oceánico. Las fallas normales de bajo ángulo sirvieron para despegar la corteza superior. La cizalla dextral dúctil debajo del *detachment* y/o el “arrastre” a lo largo de las fallas dextrales limítrofes pueden causar rotaciones alrededor de ejes verticales. Se supone que las fallas normales forman un ángulo agudo con respecto a las fallas dextrales que limitan la cuenca, definiendo así bloques alargados de la corteza. Una componente de movimiento sinistral en estas fallas aumentaría durante la rotación. Con sismos bien localizados se ubican fallas dextrales activas y fallas sinestrales transversales en la depresión de Salton. Las fallas sinestrales definen bloques rectangulares alargados en dirección NE, limitados por las fallas maestras de San Andrés-Brawley y San Jacinto-Superstition Hills. Los ángulos entre los bloques y las fallas maestras son abiertos pero menores de 90°. Consecuentemente, se espera ver distensión entre los bloques alargados. Si la rotación continua (o empieza) con un ángulo mayor a 90° con respecto a las fallas limitantes, se esperan contracciones entre los bloques si los bloques no pueden separarse a lo largo de las fallas limitantes. La posición y la cantidad de distensión o de contracción depende de si los bloques más alejados (fuera del sistema de fallas limitantes) convergen o divergen, con consecuentes problemas de espacio entre los bloques que giran y los que no giran dentro de la zona de deformación. Así, las rotaciones alrededor de ejes verticales pueden controlar la posición de distensión y de inyección de diques.

Debra Stakes
MBARI
7700 Sandholt Road
Moss Landing CA 95039-9644

My research focuses on hydrothermal alteration of oceanic and margin rocks. In addition, while at MBARI, I have worked extensively on the tectonics and lithology of central California, including the seismicity and age of faults that bound the Salinian block. My research interest in this meeting is the hydrothermal and magmatic impact of the transition from continental margin to oceanic crust.

MBARI is in the earliest planning stages for a major expedition to the Gulf of California in 2002. I would like to attend this meeting to see what other research has been/will be done on the geology and geophysics of the Gulf of California. The MBARI vessel, the Western Flyer and the ROV Tiburon would be capable of providing detailed geological mapping and sampling of outcrops, hydrothermal vents and even sediments.

Debra Stakes
MBARI
7700 Sandholt Road
Moss Landing CA 95039-9644

Mis investigaciones se enfocan en la alteración hidrotermal de rocas oceánicas y de las márgenes. Adicionalmente, en MBARI, he trabajado extensivamente en la tectónica y la litología de California central. Este trabajo incluye estudios de la sismicidad y de la edad de las fallas que limitan el bloque de Salinia. Mi interés en este taller es el impacto hidrotermal y magmático de la transición de la margen continental a la corteza oceánica.

MBARI está en una etapa preliminar de programar una expedición al Golfo de California en 2002. Deseo enterarme de las investigaciones que han sido realizados y/o están en progreso sobre la geología y la geofísica del Golfo de California. El barco de MBARI, el “Western Flyer” y el vehículo de operación remota “Tiburón” son capaces de proporcionar cartografía detallada y muestrear afloramientos, fuentes hidrotermales, y hasta sedimentos.

**ACTIVE FAULTS IN NORTHERN BAJA CALIFORNIA AND THEIR ROLE IN THE
PRESENT TECTONIC PROCESS**

Francisco Suárez-Vidal*, Javier Gonzalez-García**

* Depto de Geología ** Depto de Sismología

C I C E S E

Southern California and the northern part of the Península of Baja California form a common region affected by a number of regional-scale active faults, all constituting part of the San Andreas-Gulf of California fault system. Such faults are located in the Salton Sea tectonic province and cutting the Peninsula ranges. Among them are: Imperial and Cerro Prieto faults in the Mexicali Valley. The Cucapa and the Laguna Salada faults constitute the southern extension of the Elsinore Fault. Along the eastern margin of Sierra San Pedro Martir and Sierra Juarez there is the Gulf Main Escarpment. West of this escarpment there are two fault system, The Agua Blanca Fault which is oriented anomalously counterclockwise from the general trends of the southern San Andreas fault system, and the San Miguel Vallecitos faults, which extend from Sierra Juárez escarpment toward the Tijuana-san Diego area. Both the Agua Blanca and San Miguel extend offshore and connect with active faults in the continental borderlan.

Trenching studies have resolved the Holocene slip rate and the timing of some past earthquakes for the Agua Blanca, San Miguel, Laguna Salada and Imperial faults in northern Baja California. About 5-6 mm/yr of dextral slip is transferred across the Baja California Península via the Agua Blanca and San Miguel faults. Most of this slip (90%) is accommodate by Agua Blanca, which geologically is considered as an active fault , with very low seismic activity associated, whereas less than .5 mm/yr is carried by the highly seismically active San Miguel Fault. Although there are some discrepancy with the result obtained using the GPS, such difference is that the amount of slip of the Agua Blanca Fault is less and the rate over the San Miguel is greater. The same results are obtained in the Imperial and Cerro Prieto faults.

Nevertheless all these faults are seismically active to different degree as a result of the interaction between the Pacific-North America plates in the Gulf of California region. Although in the northern Gulf the amount of displacement measured between plates is less than in the southern Gulf, the difference (2.5-3.0 cm/yr) can be spread along the strike slip faults on the peninsula and those on the Continental Borderland.

LAS FALLAS ACTIVAS EN EL NORTE DE BAJA CALIFORNIA Y SU PARTICIPACIÓN EN LOS PROCESOS TECTÓNICOS RECIENTES

Francisco Suárez-Vidal* y Javier González-García**

*Depto de Geología ** Depto de Sismología

C I C E S E

El Sur de California y Norte de la Península de Baja California, forman una sola región afectada por un sin numero de fallas activas de gran extensión. Todas ellas forman parte del sistema de fallas San Andres-Golfo de California. Estas fallas se localizan en la provincia tectónica de Salton Sea o bien cortan transversalmente las cordilleras peninsulares. Estas son: las Fallas Imperial y Cerro Prieto localizadas en el Valle de Mexicali. Las fallas de Cucapa y Laguna Salada las cuales se constituyen como la extensión de la falla Elsinore hacia el sur de la frontera Mex-USA. A lo largo de la margen Este de las Sierras de San Pedro Mártir y Juárez se localiza el Escarpe Principal del Golfo. Al oeste del escarpe hay dos sistemas de fallas; el de Agua

Blanca el cual esta orientado anómalamente (casi E-W), con respecto a la tendencia general impuesta por el sistema San Andres. El segundo sistema es el de San Miguel-Vallecitos, el cual se extiende desde el escarpe de Sierra de Juárez hasta la región de Tijuana-San Diego. Ambos sistemas se continúan en el océano conectando con fallas activas localizadas en la margen continental.

Estudios en trincheras abiertas sobre el trazo de las fallas Agua Blanca, San Miguel, Laguna Salada y Imperial han permitido obtener las razones de desplazamiento de estas fallas durante el Holoceno; así como, identificar sismos históricos. Entre 5-6 mm/año de movimiento dextral se transfiere a través de la península por las fallas de Agua Blanca y San Miguel. La mayor parte de este deslizamiento (90%) lo hace la Falla de Agua Blanca, la cual geológicamente se considera como activa, pero con una sismicidad casi nula; mientras que, menos de .5 mm/año se lleva a cabo a través de la Falla San Miguel a la que se le asocia una muy alta actividad sísmica. Sin embargo existen discrepancias con los resultados obtenidos utilizando la información obtenida mediante mediciones geodésicas hechas con GPS. Los resultados obtenidos con esta metodología, indican que la cantidad de desplazamiento de Agua Blanca es menor y en San Miguel es mayor. Lo mismo ocurre con los resultados obtenidos en las Fallas Imperial y Cerro Prieto.

No obstante lo anterior, todas las fallas mencionadas son activas en diferentes niveles y como resultado de la interacción entre las Placas Norteamérica y Pacífico en la región del Golfo de California. Sin embargo, en la parte norte del golfo la cantidad de movimiento entre las dos placas es menor que en la región sur. La diferencia (2.5-3.0 cm/año) se puede distribuir a lo largo de las fallas de rumbo localizadas en la península y margen continental.

Evolution of the Margin of the Gulf of California near Loreto, Baja California Sur and Implications for research offshore and a comparison with the offshore La Paz region

UMHOFER, Paul J. Dept. of Geology, Northern Arizona University, Flagstaff AZ 86011
[summary of past research with Larry Mayer, Miami U. and Rebecca Dorsey, U. Oregon]

We have analyzed the history of deformation near Loreto, Baja California Sur, during formation of the Gulf of California. Our data support the model that orthogonal rifting in the Middle to Late Miocene (12 - 6 Ma) was overprinted by transtensional structures in the Pliocene to Quaternary and that the plate margin was segmented during orthogonal rifting. The Loreto segment is 85 km long along the rift and is bounded on the west by a discontinuous series of aligned, down-to-the-east monoclines and normal faults. These structures are modest in offset (0.5 – 2 km) in comparison to the oblique rift as a whole. These structures lie in front (east) of, a steep, 1000-1600-m high Gulf Escarpment that defines the western topographic margin of the rift zone. The Loreto segment is further defined by a rise in elevation of the Gulf Escarpment of up to 1 kilometer, and a ~500 – 800 m rise in structural relief of strata, from the segment boundaries to behind the main boundary faults. Structural analysis of secondary faults shows that faults that are known to be Pliocene to Quaternary are mixed normal and dextral-normal faults with a bulk extension direction of WNW-ESE (280° - 110°). In contrast, faults that cut only pre-rift rocks

are mainly normal faults with NE-SW to ENE-WSW bulk extension directions that average $245^{\circ} - 65^{\circ}$. These faults are interpreted to be late Miocene in age and formed during orthogonal rifting. The young faults record a change of extension direction of $\sim 35^{\circ}$ in Pliocene time, compatible with the onset of oblique rifting at 5-6 Ma. The oblique-divergent overprinting is mainly expressed as the Loreto fault and basin, major transtensional features with a short episode of very rapid activity at ~ 2.4 Ma. The Loreto basin evolved rapidly in the Pliocene with major fault reorganizations and partial basin inversion. Many observations suggest that the Pliocene Loreto fault was linked to the nascent Alt and Santa Cruz transform faults in the gulf. We speculate that Carmen Island, now trending anomalously to the NNE, rotated $\sim 35^{\circ} - 40^{\circ}$ clockwise within the complex Pliocene fault system. The Loreto fault-Alt transform link largely ended by 2 Ma, when most faulting jumped to the transform faults and only minor normal faulting is active in the coastal areas.

Several questions emerge from this research onshore and on Carmen Island that require investigation of the offshore region and other islands. These are specific queries that test (1) our model of the initiation of transform faulting and the transfer of faulting to the gulf, (2) the nature of strain partitioning, and (3) the nature of the crust from the rift margin to the plate boundary.

- (1) • Do the Alt and Santa Cruz transforms extend to the N and S ends of Carmen Island?
 - Is there a wedge-like graben between Loreto and Carmen Island related to rotation?
 - Are there Late Miocene normal faults and basins that were modified in the Pliocene-Quaternary?
 - Are the Miocene faults (& basins) larger than the rift-bounding structures near Loreto?
 - Does rift segmentation continue south of Loreto along the coast and offshore?
- (2) • Are there active N-S normal faults between the Alt and Santa Cruz transforms?
 - Do all active faults in the margin have normal offset as suggested from the onshore data?
- (3) • Can crustal thinning be quantified across the margin?
 - Is there systematic changes in the size and age of basins across the margin?

The Loreto region appears to be typical of much of the central gulf, while the southern gulf region differs from it in many ways. Near La Paz, there are 1-2 major faults onshore E of the rift margin (Fletcher et al 2000). One of these faults continues north into the offshore marine shelf and then dies. These faults are more active near La Paz than near Loreto. Current data near Loreto and La Paz strongly favors a comparative marine investigation of the shelf & islands.

- What is the nature of the offshore faults near La Paz and how do they connect onshore?
- Does the pattern of regional strain partitioning hold for the offshore belt?
- What is the nature of offshore basins along these faults?
- Is there systematic changes in the size and age of basins across the margin?
- How do the faults and basins of the southern gulf compare to the central gulf near Loreto?
- Is there a temporal evolution of faulting jumping into the gulf in both regions?

Evolución de la margen del Golfo de California cerca de Loreto, Baja California Sur, e Implicaciones para investigaciones marinas y un comparación con el borde continental en la región de La Paz

UMHOFER, Paul J. Dept. of Geology, Northern Arizona University, Flagstaff AZ 86011

[resumen de investigaciones realizadas con Larry Mayer, Miami U. y Rebecca Dorsey, U. Oregon]

Hemos analizado la historia de deformación cerca de Loreto, Baja California Sur, durante la formación del Golfo de California. Nuestros datos están de acuerdo con un modelo en el cual *rifting* ortogonal de edad miocénico tardío (12-6 Ma) produjo una segmentación de la margen y que este evento fue sobrepuesto por estructuras transtensionales pliocénicas-cuaternarias. El segmento de Loreto tiene una longitud de 85 km a lo largo del *rift*, y su borde occidental consiste en una serie discontinua de monoclinales y fallas normales alineadas, con echado hacia el oriente. Estas estructuras tienen desplazamientos pequeños (0.5-2 km) comparados con la zona oblicua del *rift* entero. Estas estructuras están colocadas al este de un escarpe pronunciado con una altura máxima entre 1000 y 1600 m. s.n.m. que define la margen topográfica occidental de la zona del *rift*. El segmento de Loreto también se define por mayores alturas del Escarpe de hasta 1 km, y unos 500 a 800 m adicionales de relieve estructural yendo de las orillas del segmento hasta la zona al oeste de las fallas principales limitantes. El análisis estructural de las fallas secundarias demuestra que las fallas de edad Plioceno-Cuaternario consisten en fallas normales y dextrales-normales con una dirección de distensión corporal de WNW-ESE (280°-110°). En contraste, las fallas que afectan únicamente las rocas pre-*rift* son sobre todo fallas normales con acimut de distensión corporal en dirección NE-SW a ENE-WSW (con un promedio de 245°-65°). Se interpreta que estas fallas son de edad Mioceno Tardío y se formaron durante la apertura ortogonal del *rift*. Las fallas jóvenes registran un cambio de la dirección de distensión de ~35° en el Plioceno, lo cual es compatible con el inicio de *rifting* oblicuo en 5 o 6 Ma. La superposición de divergencia oblicua se ve principalmente en la formación de la falla de Loreto y la cuenca de Loreto, rasgos importantes transtensionales que tuvieron un período corto de movimiento muy rápido en ~2.4 Ma. La cuenca de Loreto se evolucionó rápidamente en el Plioceno con la reorganización de fallas y una inversión parcial de la cuenca. Muchas observaciones sugieren que la falla pliocénica de Loreto se conectó con movimientos iniciales en las fallas transformes Alt y Santa Cruz en el Golfo de California. Especulamos que la isla Carmen, ahora con un rumbo anómalo en dirección NNE, giró ~35°-40° en sentido horario dentro de un sistema complicado de fallas pliocénicas. La conexión entre las fallas Loreto y Alt dejó de ser activa hace 2 Ma, cuando la mayoría del fallamiento brincó a las fallas transformes. El fallamiento normal de baja magnitud sigue activo en las zonas costeras.

Quedan algunas dudas de estas investigaciones en tierra y en la isla Carmen que requieren futuras investigaciones de la franja marina y otras islas. Estas son preguntas específicas que prueban (1) nuestro modelo del inicio de fallamiento tipo transforme y de la reubicación del fallamiento dentro del Golfo, (2) la cinemática y la historia de repartición de la deformación, y (3) la composición y origen de la corteza entre la margen del *rift* y la frontera activa entre las placas.

(1) ¿ Hay segmentos de las fallas transformes Alt y Santa Cruz hasta los extremos N y S de la isla Carmen?

___ ¿ Hay un graben en forma de cuna entre las islas Loreto y Carmen relacionado con rotación?

¿ Hay fallas normales de edad miocénico tardío que han sido modificados en el plioceno o cuaternario?

___ ¿ Sigue la segmentación del *rift* al sur de Loreto a lo largo de la costa y en la zona submarina?

- (2) ¿ Hay fallas activas normales de rumbo N-S entre las fallas transformes de Alt y Santa Cruz?
¿ Hay desplazamiento normal en todas las fallas activas de la margen, como se sugiere por los datos subaéreos?
- (3) ¿ Se puede cuantificar el adelgazamiento de la corteza en la margen?
¿ Hay cambios sistemáticos del tamaño o de la edad de las cuencas en dirección transversa a la margen?

La región de Loreto parece típica del golfo central, aunque difiere mucho de la región del golfo meridional. Cerca de La Paz, hay 1-2 fallas principales en tierra al este de la margen del *rift* (Fletcher y otros, 2000). Una de estas fallas continúa al norte hasta la plataforma marina y allí desaparece. Estas fallas son más activas cerca de La Paz que cerca de Loreto. Los datos actuales cercanos a Loreto y La Paz favorecen una investigación comparativa de la plataforma marina y de las islas.

- ¿ Cuáles son las características de las fallas submarinas cerca de La Paz, y ¿ cómo se conectan con las fallas en la costa?
- ¿ Hay el mismo patrón de repartición de la deformación regional también en la zona submarina?
- ¿ Cuáles son las características de las cuencas submarinas a lo largo de estas fallas?
- ¿ Hay cambios sistemáticos del tamaño o de la edad de las cuencas en dirección transversa a la margen?
- ¿ Qué tan similares son las fallas y cuencas del golfo meridional, comparados con las del golfo central cerca de Loreto?
- ¿ Hay una evolución temporal en la cual las fallas brincan hacia adentro del Golfo en las dos regiones?

SEISMOTECTONIC, ATTENUATION AND SEISMIC TOMOGRAPHY STUDIES AT THE TRES VIRGENES VOLCANIC AND GEOTHERMAL REGION IN BAJA CALIFORNIA SUR, MÉXICO.

VICTOR WONG Y LUIS MUNGUÍA

*DEPARTAMENTO DE SISMOLOGÍA, DIVISIÓN DE CIENCIAS DE LA TIERRA, CICESE
KM-107 CARRETERA TIJUANA-ENSENADA, ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO*

We analyzed the spatial distribution of the micro seismicity recorded during October of 1993 at the Tres Vírgenes volcanic and geothermal region, Baja California Sur. As a first result, it was determined that most of the seismic activity occurred at the Caldera El Aguajito and along the La Virgen fault. In the zone of the Tres Virgenes volcanic complex the recorded seismicity was only minor. Focal depths determined for 85 % of the located events range from 3 to 7 km. The statistical value of 1.29 calculated for *b*, the coefficient of the frequency-magnitude relationship, suggests a mechanism that produces small magnitude events (< 3.5) predominantly, as compared to the larger magnitude events that occur in the Gulf of California region.

On the other hand, estimated V_p/V_s and Poisson (σ) ratios vary within intervals that range from 1.68 to 1.76 and 0.23 and 0.26, respectively. Such variations suggest an inhomogeneous distribution of P and S wave propagation velocities in the region. Average values obtained for the entire region are 1.72 for V_p/V_s and 0.24 for σ .

Fault plane solutions calculated for some events indicated a clear predominance of strike-slip faulting, with small components of normal motion. The distribution of the principal stress axes resulting from these focal mechanisms suggests that the study area is experimenting compression and tension in the N-S and E-W directions, respectively, in agreement with the regional stress regime imposed by the transform fault system of the Gulf of California.

We also estimated quality factors from coda waves (Q_c) and from P (Q_p) and S (Q_s) waves using a single-scattering attenuation model and the spectral ratio method, respectively, in the frequency range from 4 to 24 Hz. The values of Q_c at six, out of seven stations analyzed, showed quite similar trends at all frequencies. The seventh station (E1), located in a densely fractured area with hydrothermal manifestations, showed a trend that differs, in the low frequency range, from the rest of the stations. With a relation of the form $Q_c(f) = Q_0 f^{-\eta}$ and data from the six stations having similar Q_c trends, we obtained $Q_c(f) = (50.0 \pm 3.0) f^{(0.65 \pm 0.20)}$ for the entire region. At the station E1, Q_c may be approximated by $Q_c(f) = (3.0 \pm 0.5) f^{(1.48 \pm 0.06)}$.

From the body wave attenuation analysis, low values of Q_p and Q_s were determined. At all frequencies considered, the P wave attenuation was stronger than the S wave attenuation, suggesting a partially saturated upper crust in the region. It was found that the frequency dependence of Q may be approximated by $Q_p(f) = (4.0 \pm 3.0) f^{(0.97 \pm 0.29)}$ and $Q_s(f) = (10.0 \pm 3.5) f^{(1.04 \pm 0.14)}$ for P and S waves, respectively, showing that Q_p and Q_s increase with frequency, in the same manner as Q_c does.

A simultaneous inversion of hypocenter and seismic velocity structure was also performed in a zone with volume $12 \times 16 \times 10 \text{ km}^3$ that includes the Tres Virgenes volcanic complex. We obtain low velocity zones at the La Virgen volcano, the Caldera El Aguajito, and in the hydrothermal zone. In the zone of the volcanoes the determined velocities are uniform both horizontally and vertically. The larger lateral velocity variations, which are observed up to 7-km depth, were associated with the volcanic edifices. The velocity variations that were determined within the inversion volume could be, among other reasons, due to effects of the inhomogeneous volcanic cover (pyroclastic rocks), the fractured granitic basement, the high temperatures in the volcanic zones, and the fluid content of fractures. High velocity was determined at the surrounding geological structures of the volcanic edifices.

SISMOTECTÓNICA DE LA REGIÓN VOLCÁNICA LAS TRES VÍRGENES, BAJA CALIFORNIA SUR, MÉXICO

VICTOR WONG Y LUIS MUNGUÍA

*DEPARTAMENTO DE SISMOLOGÍA, DIVISIÓN DE CIENCIAS DE LA TIERRA, CICESE
KM-107 CARRETERA TIJUANA-ENSENADA, ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO*

Se llevó a cabo un monitoreo sísmico en la región volcánica y geotérmica Las Tres Virgenes, Baja California Sur, durante octubre de 1993 con el objeto de conocer el nivel de actividad sísmica asociada a las estructuras volcánicas y a las mayores estructuras tectónicas del área. La región que mostró mayor actividad sísmica durante los 23 días de registro fue la zona

localizada al noreste de la red sísmica. También ocurrieron pequeños grupos de eventos asociados a la región ocupada por los aparatos volcánicos y por la falla de rumbo lateral derecho conocida como falla La Virgen. La profundidad focal de los eventos localizados se distribuye entre la superficie y los 10 km. Los eventos más someros ocurren principalmente bajo los aparatos volcánicos y los más profundos fuera de la región volcánica. El valor del parámetro b de 1.29 estimado con base en los eventos analizados sugiere un mecanismo que genera principalmente eventos locales de baja magnitud en comparación con los eventos de mayor magnitud que ocurren regionalmente. Las razones V_p/V_s sugieren variaciones laterales de velocidad en la región volcánica y una distribución heterogénea de las propiedades de los materiales. La distribución de los ejes principales de esfuerzo de los mecanismos focales estimados sugiere que la región de estudio experimenta compresión y extensión en direcciones N-S y E-O, respectivamente, en concordancia con el patrón de esfuerzos impuesto por el sistema de fallas transformadas del Golfo de California.

Dr. Xu Shunshan

Unidad de Ciencias de la Tierra, UNAM, Campus Juriquilla, Apdo. Postal 1-742, Querétaro, Qro., 76001, Mexico

Abstract

Making the best of the case, I obtained Master's degree and a job working for Geomechanics institute, China Academy of Geosciences in 1988. I have made good in working since 1988, accomplishing a lot of research programs, and publishing a number of research papers which involved in structural geology and natural resources, being awarded the title of "Progressive science and technology" for a time by ministry of Geology and mineral resources. But I feel that I have limited knowledge, so I assiduously studied as a doctoral candidate from 1995 to 1998 and graduated with doctoral degree at end of 1998. Now, I working in Unicit, UNAM.

I am mainly interested in three research theme: structural geology, dynamics of magma formation, ascent and emplacement, and metallogenic dynamics, which also are the theme of my doctoral thesis and most of my publications. I am especially interested in magmatic dynamics faulting. For example, my doctoral thesis has studied dynamics of Mesozoic magmatic activity in Shanghang-Youxi area and raised that dynamic model of Mesozoic magmation is that because of thickening of earth crust, stress relaxation, occurrence of decollement and delamination in late orogeny or after orogeny, partial melting is caused and magma emplaced into upper place under driving force. The paper has also studied primary structures and secondary structures of Zijinshan magmatic body and put forwarded its emplacement mechanism is ballooning.

Resumen.

Obtuve el grado de Maestro y un trabajo con el instituto de Geomecánica, Academia China de Geociencias, en 1988. He trabajado desde 1988, realizando muchos programas de investigación, y publicando varios trabajos de investigación sobre geología estructural y recursos naturales, premiado con el título "Ciencia y Tecnología Progresiva" por un tiempo, por el ministerio de Geología y Recursos Minerales. Pero siento que mis conocimientos son limitados,

asi que estudié como candidato para el doctorado entre 1995 y 1998 y me recibí del doctorado a fines del 1998. Ahora trabajo en UNICIT, UNAM.

Mi principales intereses de investigación son tres: la geología estructural, la dinámica de la formación, ascenso y emplazamiento de magmas, y la dinámica de la metalogénesis, que son también los temas principales de mi tesis de doctorado y de la mayoría de mis publicaciones. Estoy particularmente interesado en fallamiento relacionado con la dinámica de magmas. P. ej., mi tesis doctoral estudió la dinámica de la actividad magmática mesozóica en el área de Shanghang-Youxi y propuso un modelo dinámico para el magmatismo mesozóico en el cual, debido al engrosamiento cortical, relajación de los esfuerzos, existencia de fallas tipo *decollement* y delaminación en la terminación de la orogenia o después de una orogenia, la fusión parcial se produce y las magmas están emplazados dentro de la placa superior bajo los esfuerzos controlando la deformación. Este trabajo también ha estudiado las estructuras primarias y secundarias del cuerpo magmático de Zijinshan y propuse que su mecanismo de emplazamiento es *ballooning* (la inflación).

AUTHOR INDEX / INDICE DE AUTORES

- Abdelsalam, Mohamed G., 2
 Acosta, J., 43
 Aiken, Carlos L. V., 3
 Albarrán, Jorge Jacobo, 4
 Alvarez, M., 43
 Aranda-Gómez, José Jorge, 5
 Armbruster, John G., 100
 Axen, Gary, 7, 69
 Baldwin, Suzanne L., 9
 Bartolomé, Rafael, 34
 Bennett, Richard A., 11
 Bourrouilh, Robert, 82
 Buck, W. Roger, 12
 Calmus, Thierry, 14
 Cañon Tapia, Edgardo, 17
 Carreño, Ana Luisa, 18
 Castillo, Paterno R., 56
 Castro, Raúl, 19, 70
 Charré-Meza, Adolfo S., 20
 Clift, Peter, 22
 Constable, Steve, 69
 Contreras, Juan, 22, 23
 Córdoba, Diego, 34
 Cormier, M.-H., 103
 Dañobeitia, Juan José, 34
 Davis, J. L., 11
 Day, Steven, 23
 Decaix, Julien, 44
 Delgado Argote, Luis A., 34
 Demirbag, E., 103
 Diebold, J. B., 25, 89
 Dixon, T. H., 11, 26, 39, 44
 Dorsey, Rebecca, 28, 101
 Douglas, Robert, 82
 Ducea, Mihai, 31
 Dumitru, T. A., 77
 Dunn, Robert A., 32
 Eakins, B.W., 39
 Edwards, R.L., 39
 Esparza, Francisco, 91
 Espinosa-Cardena, J.M., 33, 55
 Fabriol, Hubert, 34, 43
 Ferrari, Luca, 35
 Fisher, A. T., 38
 Fitzgerald, Paul G., 9
 Fletcher, J.M., 39, 55, 70
 Flores, Carlos, 91
 Forsythe, Lance, 41, 70
 Frez, J., 43
 Frias-Camacho, Victor, 34
 Furlong, Kevin P., 44
 GAHERTY, JAMES B., 46
 Gaherty, Jim, 69
 Gans, Phil, 47
 García Abdeslem, Juan, 34, 91
 Giambalvo, E. R., 38
 Glowacka, Ewa, 50
 Gómez, Enrique, 70
 Gómez-Treviño, Enrique, 20, 91
 Gonzalez Fernandez, Antonio, 34, 51, 70, 89, 98, 99
 González, J., 11
 González, Mario, 54
 González-García, J. Javier, 43, 53, 107
 González-Ortega, J. Alejandro, 53
 Gorsline, Donn S., 82
 Harding, Alistair, 69
 Harris, R. N., 55
 Harry, D.L., 56
 Hawkins, James W., 56
 Hill, E. June, 9
 Hilton, David R., 56
 Holt, John W., 58
 Ireland, Trevor R., 9
 Jackson, James S., 60
 Janecke, Susanne U., 61
 Jiracek, George, 70
 Kastner, M., 38
 Kelemen, Peter, 64
 Kent, Graham, 65, 69
 Kier, Grant, 66
 Kimbrough, Dave, 70
 Kuscu, I., 103
 Lavier, Luc L., 12
 Ledesma Vázquez, Jorge, 66
 Lewis, Jennifer, 23
 Lewis, Jonathan C., 67
 Lizarralde, Dan, 69
 Lonsdale, Peter, 69, 70, 98, 99
 Lopez-Martínez, Margarita, 35
 Magistrale, Harold, 23
 Malservisi, Rocco, 44
 Martín-Atienza, Beatriz, 34
 Martín-Barajas, A., 70, 89
 Martinez, Fernando, 72
 McDowell, Fred W., 78
 Melbourne, Tim, 74
 Méndez-Sánchez, Jorge, 82
 Mendoza-Borunda, R., 39, 55
 Miller, E. L., 77, 80
 Miranda-Avilés, Raúl, 82
 Molina-Cruz, Adolfo, 82
 Monteleone, Brian, 9
 Mora-Klepeis, Gabriela, 78
 Mountain, G. S., 89
 Mueller, Karl, 66
 Munguía, Luis, 54, 112
 Nagy, Elizabeth A., 79
 Nava, A., 43
 Nava-Sánchez, Enrique H., 82
 Nourse, Jon A., 85
 Okay, A. I., 103
 Ortega-Rivera, Ma. Amabel, 83
 Oskin, Michael, 85
 Paterson, Scott R., 97
 Paz-Moreno, Francisco, 86
 Pérez-Flores, Marco A., 20
 Persaud, P., 89
 Pyle, D., 41
 Quidelleur, Xavier, 58
 Rebollar, Cecilio J., 70, 90
 Reilinger, R. E., 11
 Romero-Espejel, H., 55
 Romo, José M., 55, 70, 91
 Rosas-Elguera, José, 35
 Roy, Mousumi, 70, 92
 Rymer, Michael J., 94
 Saleeby, Jason, 31
 Sawyer, Dale S., 95
 Schmidt, Keegan L., 97
 Scholz, Christopher H., 22
 Sclater, John, 38, 98, 99
 Sedlock, R.L., 39
 Seeber, Leonardo, 100, 103
 Sorlien, Christopher C., 101, 103
 Stakes, Debra, 106
 Steckler, Michael, 89, 100, 103
 Stock, J. M., 89
 Stockli, D. F., 77
 Suárez-Vidal, F., 55, 107
 Surpless, B. E., 77
 Twiss, Robert J., 67
 Umhoefer, Paul J., 109
 Unruh, Jeffrey, R., 67
 Walter, R.C., 39
 Wernicke, B. P., 11
 Wetmore, Paul H., 97
 Wong, Victor, 112
 Xu, Shunshan, 113
 Xu, Xueming, 3