



**CARLOS EDUARDO ACOSTA**

**COLOMBIA Y LA TECTONICA  
DE PLACAS**



## COLOMBIA Y LA TECTONICA DE PLACAS

Carlos e. Acosta A.  
Universidad Nacional

De acuerdo con muchos científicos actuales, especialmente con el americano John Tuzo Wilson, la Geología está pasando en estos momentos por una revolución científica equivalente a la que tuvo lugar en Astronomía en tiempo de Copérnico, en Biología con el descubrimiento de la Evolución, en Química hacia el año 1800 y en Física con el nacer de las ideas referentes a la Relatividad.

Es verdad que aún actualmente hay muchos geólogos, y hasta escuelas de geología, que contradicen el hecho de la Tectónica de Placas, pero la inmensa mayoría de los científicos de la Tierra han recopilado tal cantidad de datos en su favor que es muy difícil oponerse a las opiniones de los geotectónicos que la sostienen basados en las investigaciones efectuadas principalmente durante los últimos veinte años.

Antes de que Wegener enunciara por primera vez en su conferencia de Frankfurt, en 1912, su teoría de la Deriva Continental, esta noción apenas si se había considerado como una vaga alucinación de algunos espíritus inquietos.

A partir de esta fecha fue ganando terreno y especialmente con sus publicaciones ulteriores en revistas científicas y, sobre todo, con la aparición de su libro "El Origen de los Continentes y de los Océanos", en 1915, y sus sucesivas ediciones de 1920, 1922 y 1929.

Sin embargo la publicidad de las ideas de Wegener provocó también la controversia y para el tiempo que siguió a la segunda guerra mundial quedaban muy pocos adeptos a estas hipótesis.

Se necesitó que la proximidad del Año Geofísico Internacional (1958-1960) despertara el afán investigativo de los geofísicos, quienes con su descubrimiento del Paleomagnetismo aportaron el argumento decisivo en apoyo de las ideas wegenerianas. La década de 1960-1970 fue crucial para éstas, que llegaron a su apogeo hacia esta última fecha.

La hipótesis de Deriva Continental es concomitante de las de Expansión de Fondos Oceánicos y de Tectónica de Placas y por eso no se puede estudiar la una sin conocer las otras.

## I. DERIVA CONTINENTAL

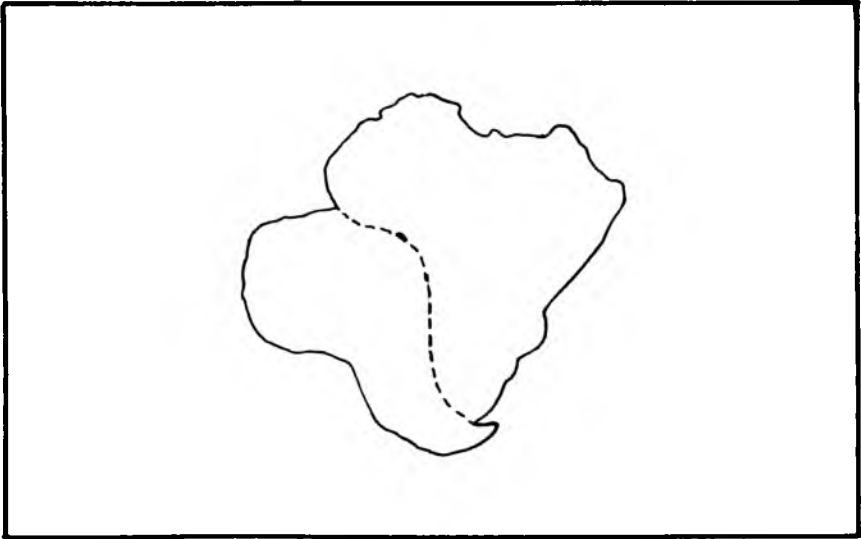
El primer esbozo de ideas acerca de la Deriva Continental fue trazado por Francisco Bacon hacia 1620; muchos científicos en los siglos siguientes han hecho hipótesis acerca de ella, algunas fantásticas, algunas aceptables.

Entre las opiniones más destacadas tenemos las de Snider en 1858, de Taylor en 1910, y de Baker en 1911. Ellos no elaboraron sus puntos de vista y nadie les prestó atención. Wegener y du Toit han revisado muy bien esos trabajos tempranos.

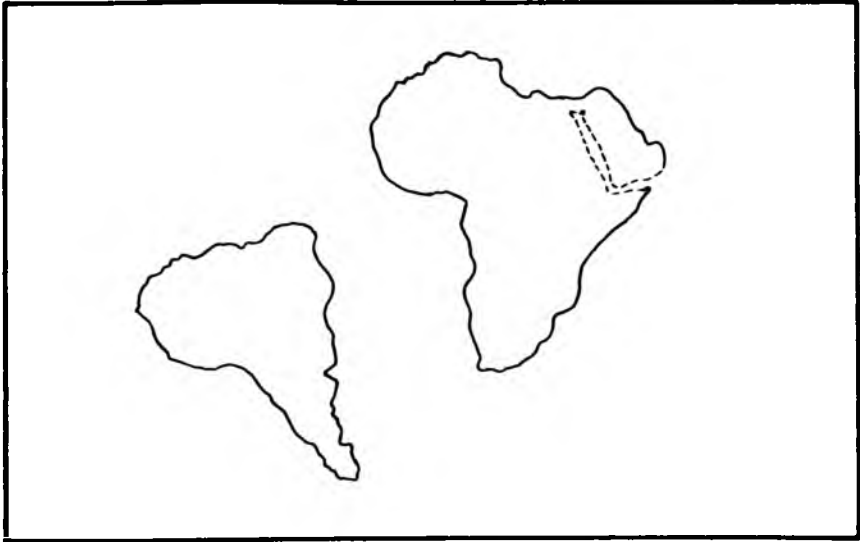
La Deriva Continental es una idea antigua formulada inicialmente para explicar el pasmoso paralelismo de las costas del Atlántico (Figura 1). Sin embargo el ajuste geométrico de los márgenes continentales no es aceptable por sí mismo como una prueba crítica de que el Océano Atlántico haya estado cerrado en alguna ocasión. En realidad, el ajuste estricto ha sido considerado como prueba favorable o desfavorable para la Deriva Continental según el punto de vista de los científicos. Los que están contra la Deriva Continental han sostenido que, si hubiera ocurrido un acontecimiento catastrófico suficientemente poderoso para hender una masa continental, entonces los márgenes continentales recientemente originados deberían encontrarse destendidos y seriamente deformados y entonces no sería posible que ajustaran tan bien.

Alfredo Wegener y otros compilaron una lista impresionante de pruebas en favor de la Deriva Continental, basadas en aspectos de geografía, geodesia, geofísica, geología, paleontología y paleoclimatología. Argumentos contrarios se han levantado oponiéndose a cada línea de prueba, y ha parecido que la teoría no puede ser aprobada ni desaprobada. La teoría ha sufrido a causa de una falta de datos cuantitativos y el tipo de prueba presentado quizá haya sido psicológicamente inaceptable para muchos geólogos.

Los opositores de la Deriva, siguiendo la dirección de eminentes geofísicos tales como Harold Jeffreys, argumentan contra la teoría por lo menos en parte en terrenos en que no hay explicación satisfactoria, por ejemplo en por qué los continentes han derivado y, aún más, que las propiedades físicas conocidas de la Tierra son tales que la propuesta migración lateral de los continentes es imposible. Los defensores de la Deriva, por otra parte, han argumentado que los hechos geológicos no pueden ser ignorados simplemente porque no se encuentre una explicación válida para ellos. Entonces otros expertos han discutido los "hechos geológicos". Los argumentos han continuado de manera interminable,



**DURANTE EL PERMICO**



**EN LA EPOCA ACTUAL**

## **AMERICA DEL SUR Y AFRICA**

**FIGURA 1:** Correspondencia de los bordes continentales de América del Sur y África. Modificada de Burke Wilson, 1976, *Continents Adrift* Continent Aground, 1976, p. 65. Redibujó Bernardo Barriga.

como muchas controversias filosóficas de la Edad Media, hasta que, hacia 1940, se ha logrado un empate. Justamente por este tiempo cualquier cosa que se pudiera argumentar en favor o en contra de la Deriva ya había sido escrita no sólo una sino muchas veces y el debate vino a terminarse por falta de pruebas adicionales.

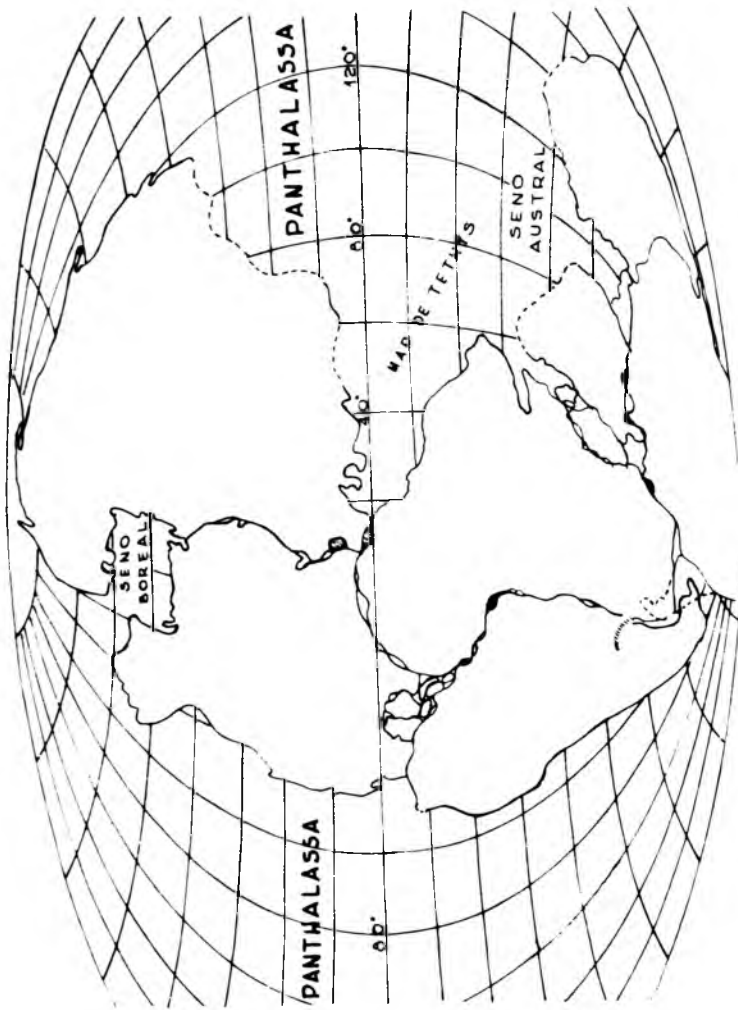
Todas las teorías de Deriva Continental requieren que antes del Mesozoico los continentes hayan estado agrupados en un solo bloque o en dos bloques.

Wegener propuso el nombre de *Pangeae* para el continente único que se creía hubiera existido en el Carbonífero Superior (Figura 2).

De acuerdo con Wegener la Pangea principió a romperse durante el período Jurásico, con los continentes del Sur moviéndose al Este, o hacia el Ecuador, o en ambas direcciones. Sur América y Africa principiaron a separarse durante el Cretáceo, hace un poco más de 70 millones de Años.

El pensaba que la apertura del Atlántico Norte había tenido lugar especialmente durante el Pleistoceno. La Península de la India, que originalmente era larga, derivó hacia el Nordeste y se comprimió en una montaña de pliegues contra el continente de Asia; y de la misma manera los Alpes de Europa y las Montañas del Atlas del Norte de Africa fueron atrapadas entre Africa y Europa, y pueden ser interpretadas como una extensión de la Cadena del Himalaya. Wegener sugirió que, cuando los márgenes frontales de los continentes en movimiento han encontrado la resistencia del fondo del Océano, han comenzado a comprimirse y a plegarse en forma de cadenas de montañas. De esta manera explicó él la Cordillera del Occidente de las Américas y las cordilleras de Nueva Zelanda y Nueva Guinea. Su explicación para los extremos puntiagudos de Groenlandia y de Sur América y para los arcos de islas que incluyan las Antillas y los que se encuentran en el Este de Asia es la de que esas regiones representan restos rezagados en la estela de las islas en movimiento. Fragmentos despegados han formado las largas hileras de islas.

El precursor de los dos continentes primordiales ha sido A. L. du Toit, quien ha sostenido que desde mediados de la Era Paleozoica hasta principios del Terciario el continente de Laurasia en el hemisferio Norte estaba separado del continente de Gondwanalandia en el hemisferio Sur por la Tethys, un enorme océano geosinclinal, del cual las montañas de los Alpes y del Himalaya emergieron eventualmente. Este agrupamiento de los continentes está de acuerdo con los grandes rasgos estructurales de la Tierra como existen en el presente.



## MASA TERRESTRE UNIVERSAL PANGAEA

Figura 2: Pangaea. Modificada de Dietz Holden, 1970, Deriva Continental y Tectónica de Placas, 1976, p. 158. Redibujó Bernardo Barriga.

Los mayores rasgos estructurales de la Tierra son los siguientes:

- 1° El grupo de Continentes de Laurasia con las cuencas intercaladas del océano Atlántico Norte y del océano Artico.
- 2° El grupo de continentes de Gondwanalandia con las cuencas intercaladas de los océanos Atlántico Sur e Indico.
- 3° La cuenca del océano Pacífico.

No hay que pensar que la Pangaea haya existido siempre como se conoce a finales del Paleozoico. En el Cámbrico, Paleozoico Inferior, los continentes estaban agrupados en dos bloques, los que más tarde irán a constituir los supercontinentes de Laurasia y Gondwanalandia. En esta época esos bloques continentales se presentaban orientados en una posición que se podría casi calificar de meridiana, situado el uno al Este y el otro al Oeste, diferentemente de como lo estuvieron más tarde, emplazados el uno al Norte y el otro al Sur (Figura 2A).

Pero esta posición del Cámbrico tampoco es la primitiva; aunque el origen del Sial, material continental, es muy discutido y muchos geólogos opinen que proviene de una segregación magmática que se habría efectuado en muy diversas regiones de la tierra en zonas de subducción de placas oceánicas por debajo de otras semejantes, en primitivos arcos de islas; sin embargo recientemente se ha emitido la opinión de que muy posiblemente todo el material siálico sería de origen extraterrestre, proveniente de un gran impacto con una nube de meteoritos o de asteroides, que habría tenido lugar hace aproximadamente de 4.200 a 4.100 millones de años, cuando aconteció un impacto semejante con la luna.

Este gran choque con materia silícea extraterrestre habría tenido lugar en una posición asimétrica, lateral, sobre la tierra. El impacto habría provocado fusión parcial de la delgada corteza basáltica primitiva y, en el manto, perturbaciones formidables que habrían sido la causa de todas las corrientes de convección, incluso de los penachos (plumes), causantes de los puntos calientes (Hot spots); posteriormente toda la masa siálica habría emergido a causa de su menor gravedad y habría constituido una Proto-Pangaea, situada asimétricamente en alguna región de la tierra, en forma de luna creciente o de herradura (Goodwin, 1976).

En favor de la Deriva Continental existen tres categorías de pruebas, a saber, Paleomagnéticas, Paleoclimáticas y Paleobiogeográficas.





**Figura 2A:** Deriva Continental Pre-Carbonífera (Masas Continentales en el Cámbrico).  
 Según Seyfert Sirkin, 1973, p. 197. Redibujó Bernardo Barriga.

## 1. EL PALEOMAGNETISMO

El debate acerca de la Deriva Continental se estancó hacia 1940, pero la controversia fue reavivada hacia 1950 por el trabajo de P. M. S. Blackett y S. K. Runcorn acerca de Paleomagnetismo. Sus resultados indicaron que las posiciones primitivas de los polos magnéticos han cambiado con respecto a los continentes y que la Deriva Continental es un proceso que podría explicar estos cambios. Esta nueva prueba condujo a muchos geofísicos a considerar la teoría de la Deriva Continental de una manera seria.

Es posible medir la dirección y la inclinación del campo terrestre en el tiempo en que las rocas registraron esos datos magnéticos.

La inclinación puede usarse para calcular la distancia al polo magnético.

En todos los continentes se han recopilado datos de magnetismo remanente a partir de rocas de diferentes edades. El estudio de los datos magnéticos a partir de rocas antiguas reciben el nombre de **paleomagnetismo**. Los polos magnéticos para cada edad (período geológico) en cada uno de los continentes se agrupan en una superficie bastante pequeña. Sin embargo, por lo general, para cada continente dado, cada período geológico tiene una colocación diferente.

Aquí tenemos, pues, una prueba de la Deriva Continental. Si el polo magnético se ha movido, debería encontrarse en el mismo punto durante cada período para cada continente; pero, en lugar de eso, cada continente da colocación diferente para cada período. Luego, si la interpretación de los datos paleomagnéticos es correcta, los continentes deben haberse movido los unos con relación a los otros.

Los polos magnéticos pueden también haberse movido.

Es de anotar que los datos magnéticos no indican deriva de Norte América con relación a Europa a partir del Eoceno.

Los datos paleomagnéticos tienen ciertas limitaciones. Ellos indican la dirección y la distancia al polo magnético. Luego muestran la rotación de un continente y su latitud. Pero no indican la longitud, y el continente puede encontrarse en la latitud indicada pero en cualquier longitud. Esto proporciona a la imaginación un campo más libre para proponer reconstrucciones, particularmente teniendo en cuenta que muchas de las rocas se encuentran incompletamente cartografiadas o datadas.

A pesar de la estrecha agrupación de polos para un período dado permanece la posibilidad de que un polo magnético no haya coincidido con el polo geográfico. En el tiempo presenta difieren en  $11.5^\circ$ .

## B. LA PALEOCLIMATOLOGIA

Según el principio del **uniformitarianismo**, expuesto por Jaime Hutton en el siglo XVIII, los fenómenos antiguos han tenido las mismas causas que en la actualidad producen los modernos.

De este modo podemos pensar que las grandes glaciaciones regionales se han originado en las cercanías de los polos y que los desiertos y grandes depósitos de evaporitas y de carbón se han formado en la vecindad del Ecuador.

Ahora bien, tenemos bastantes datos que se oponen a que los continentes hayan ocupado siempre su posición actual con respecto al polo o al Ecuador.

En la Antártida, antes de la glaciación, el clima era muy diferente del presente. Allí se han encontrado dunas que sugieren la existencia de desiertos. Igualmente se han hallado fósiles que indican climas templados o calientes, incluyendo lechos de carbón.

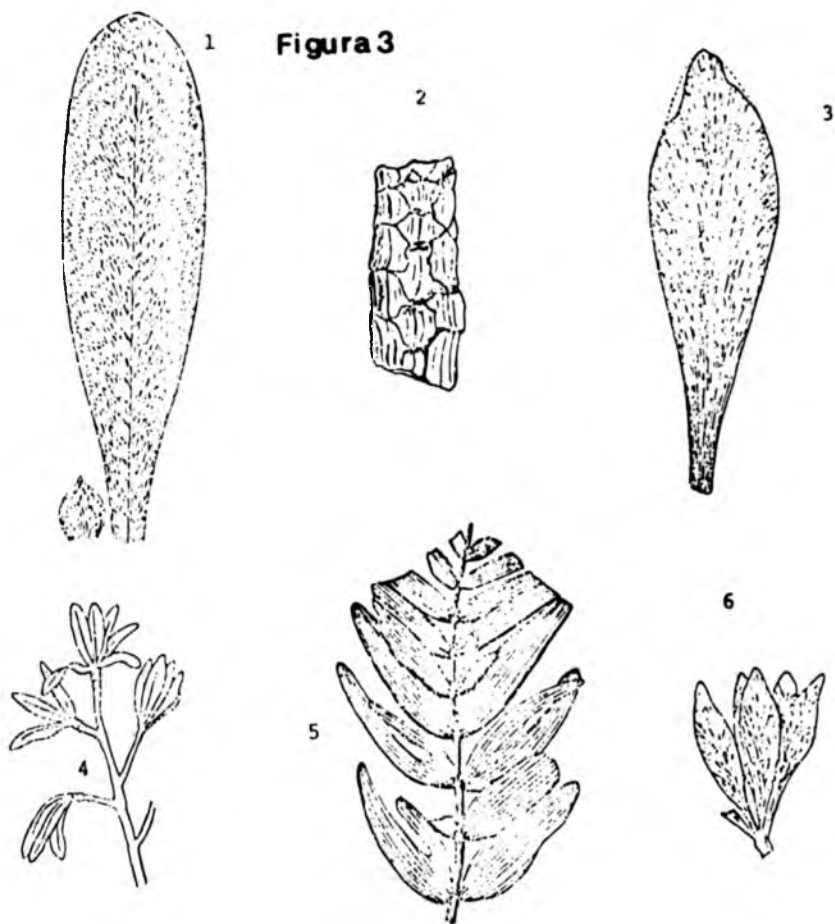
Antiguos depósitos de sal se encuentran en el Nordeste de Groenlandia, el Artico Canadiense, Siberia, Alemania, Kansas y Nuevo México, lo mismo que en otros lugares.

Los arrecifes de coral ordinariamente están confinados a una zona de 30° al Norte o al Sur del Ecuador, pero se han encontrado antiguos depósitos arrecifales muy lejos hacia el Norte.

## C. LA PALEOBIOGEOGRAFIA

La *flora de Glossopteris* se ha citado hace tiempo como prueba de conexión primitiva entre los continentes del Sur. Es posible que las esporas hayan podido flotar a través de los océanos para distribuir estas plantas, pero esto parece bastante inverosímil. En la actualidad una isla volcánica recientemente formada desarrolla rápidamente plantas; pero las semillas son transportadas ordinariamente por las aves. Los primeros animales voladores no aparecieron hasta decenas de millones de años después de la supuesta separación y deriva. Se ha sugerido la existencia de puentes y cadenas de islas en el pasado, pero el conocimiento de la estructura del fondo del océano cierra la puerta a esta posibilidad (Figura 3).

El **reptil nadador Mesosaurus**, encontrado tanto en Sur América como en Sur Africa, constituye igualmente una fuerte prueba en favor de la conexión



1. *Glossopteris*
2. *Vertebraria* (Rizoma de *Glossopteris*)
3. *Gangamopteris*
4. Reconstrucción de *Glossopteris*
5. *Schizoneura gondwanensis*
6. *Gangamopteris* (Ramillete de Hojas)

*Figura 3:* Flora de Gondwana. 1 y 5 - Según Termier, 160, p. 14;  
 2, 4 y 6 - Según Moret, 1949, p. 120;  
 3 - Según Woodford, 1970, p. 358.



*Figura 4: Mesosaurus. Modificada de Sullivan, 1974, P. 1974. Redibujó Bernardo Barriga.*

de estos dos continentes. A pesar de ser nadador este reptil acuático vivía en agua dulce, y es muy inverosímil que haya podido nadar a través de un océano. (Figura 4).

## II. EXPANSION DE FONDOS OCEANICOS

**Las contribuciones de H. H. Hess y de R. S. Dietz.** Voluminosa bibliografía acerca de la Expansión del Fondo Marino, como causa de la Deriva Continental, ha aparecido desde 1961, cuando Dietz introdujo el término con la primera publicación formal acerca de este tópico, “Evolución de los Continentes y de las Cuencas oceánicas por medio de Expansión del Fondo del Océano”. Sin embargo a Hess se le da ordinariamente la prioridad como autor de la teoría, aunque (y Dietz le reconoce esto) sin embargo su trabajo acerca de la “Historia de las Cuencas de los Océanos” no se publicó hasta 1962.

La prueba de Hess era puramente geológica y no tenía nada que ver con el geomagnetismo. En el tiempo en que Hess escribió este trabajo llegó a ser claro que con la proporción actual de acumulación el espesor total de sedimentos en la profundidad del océano se debería haber formado en menos de 100 millones de años. Dado que esto es solamente el uno o dos por ciento de los tiempos geológicos, por qué los sedimentos no son más espesos?

Aún más, se ha pensado que en algún lugar del Océano debería existir un registro geológico completo, que constara de estratos de todas las edades a partir del tiempo en que los océanos mismos se hubieran formado.

La investigación de tal registro dio, al contrario, nada más que 100 millones de años. Hess sugirió que estas observaciones se pueden explicar si la corteza oceánica, formada en el mar, se ha movido a través del fondo del océano, y finalmente se ha sumergido por debajo de los continentes y ha sido destruida.

Se ha cartografiado una cadena de enormes montañas en medio de los Océanos.

Según Bruce C. Heezen del Observatorio Geológico Lamont-Deherty, de la Universidad de Columbia, a partir del conocimiento de la Dorsal del Atlántico Medio han llegado los científicos a darse cuenta del hecho de que los océanos contienen una cadena de montañas de 40.000 millas de largo.

La enorme cadena submariana, cartografiada por Heezen y sus colegas bajo la dirección de Mauricio Ewing, da la vuelta al globo de una manera muy parecida a la costura de una pelota de baseball. (Figura 5).

La cordillera oceánica a su vez está dividida por un valle estrecho, profundo, a lo largo de su línea central. La extensión de este Graben fue reconocido primeramente por la geofísica María Tharp, una colega del Dr. Heezen, cuando juntos estaban cartografiando en detalle el fondo del Atlántico en 1953

El graben (la depresión) no solamente es claramente visible en los perfiles del fondo sino que, según Bruce Heezen, coincide casi exactamente con el mapa de los terremotos del medio del océano.

Varios años más tarde, cuando se inventaron sismógrafos super-sensitivos para detectar pruebas nucleares subterráneas, estos confirmaron los distintos patrones de los terremotos poco profundos del fondo del mar.

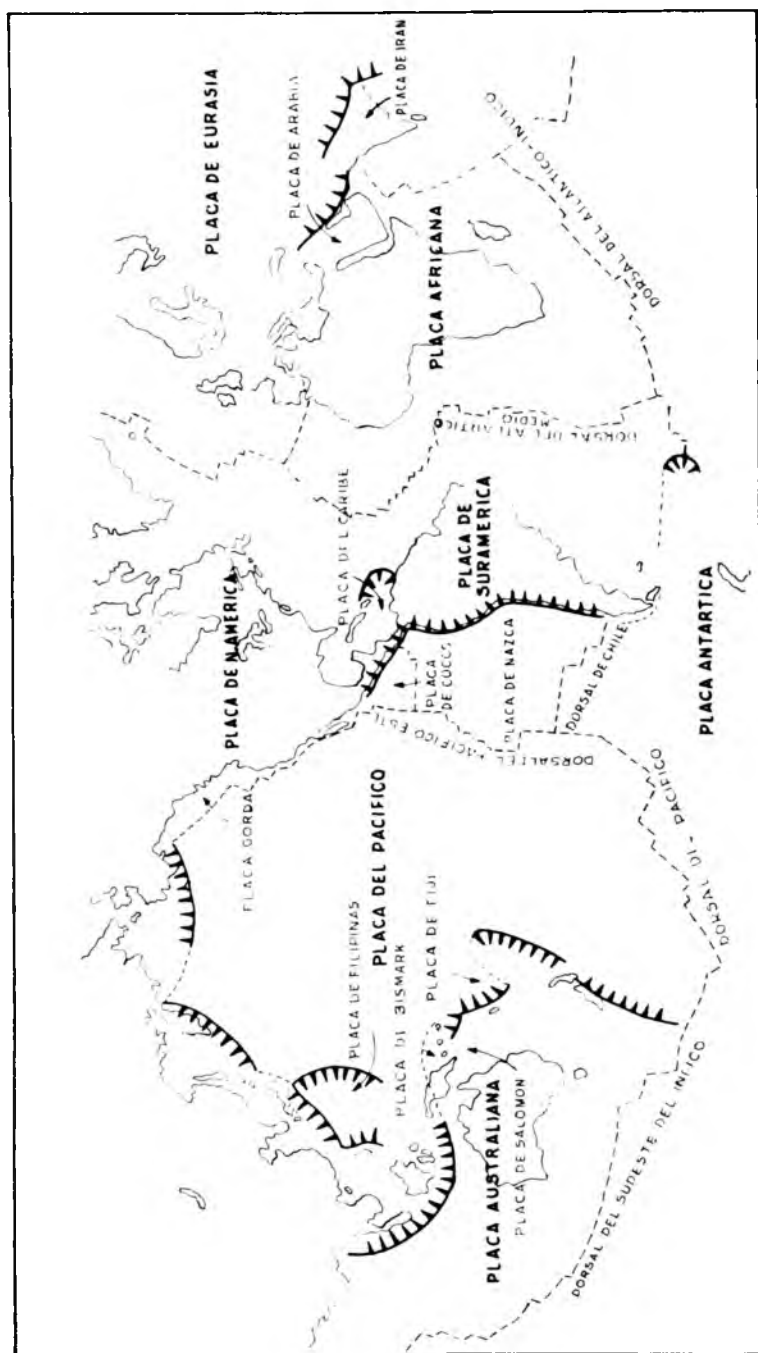


Figura 5: Sistema universal de Dorsales y Placas Litosféricas principales. Modificada de Dewey, 1972, *Continents Adrift* Continents Aground, pp. 34-35. Redibujó Bernardo Barriga.

Así se pudo definir con precisión el hundimiento del valle central y las grandes fallas o fracturas transversales en la cordillera, entre secciones del hundimiento.

El ancho total de la Dorsal es de unos 2.000 Km y ella se levanta unos 2 Km. por encima de las llanuras abisales circunvecinas. La topografía es muy escarpada cerca de la cresta, pero se hace más suave en los flancos antiguos donde un manto de sedimentos llena las depresiones.

La Dorsal sobresale no sólo hacia arriba, en el océano, sino también hacia abajo en el manto, como se demuestra por el aumento de la profundidad del Moho. El Moho se puede reconocer debajo de la cresta de la Dorsal en muchas regiones, y allí no se puede establecer un límite preciso entre corteza y manto.

Un valle de costados empinados se encuentra característicamente en la cresta de las Dorsales o cerca de la misma cresta. Aunque esta característica no llama particularmente la atención, cuando se mira en un simple perfil, su persistencia en todos los perfiles que se han estudiado ha llamado la atención hacia él.

Estos valles submarinos son notablemente semejantes en cuanto a forma y dimensiones a los Grabens (Firt Velleys).

En base a esta semejanza se ha sumergido la existencia de un sistema universal de Grabens que tendría su asiento principalmente en el fondo submarino.

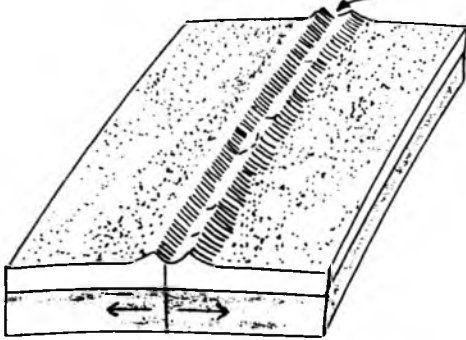
Se opina que la mayor parte de las inyecciones de rocas ígneas que acompañan la Expansión de los Fondos Oceánicos ha tenido lugar dentro del valle central de las Dorsales. (Figura 6).

Aunque estos valles submarinos se parecen topográficamente a los Grabens, sin embargo hay otro punto de diferencia. Gran parte de las rocas volcánicas que se encuentran en los Grabens continentales tienen una composición química que es inusitada en otra partá. Estas rocas son relativamente ricas en sodio y potasio. Por otra partá, las lavas procedentes de las Dorsales poseen porcentajes de esos metales alcalinos o normales o bajos.

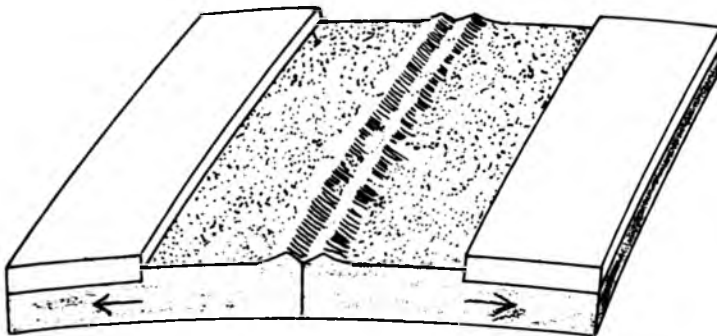
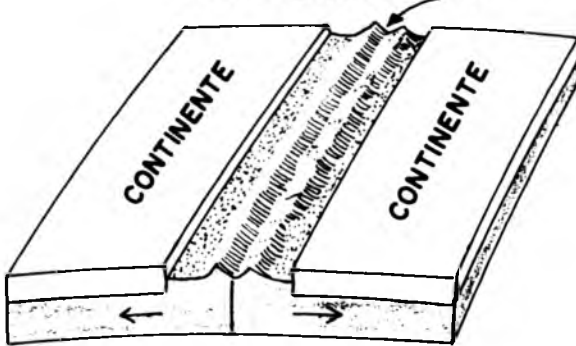
Las velocidades de expansión de los Grabens coniinetales deben ser mucho menores que las de las Dorsales. En los Grabens continentales no puede estar sucediendo nada que se acerque a los varios centímetros por año.



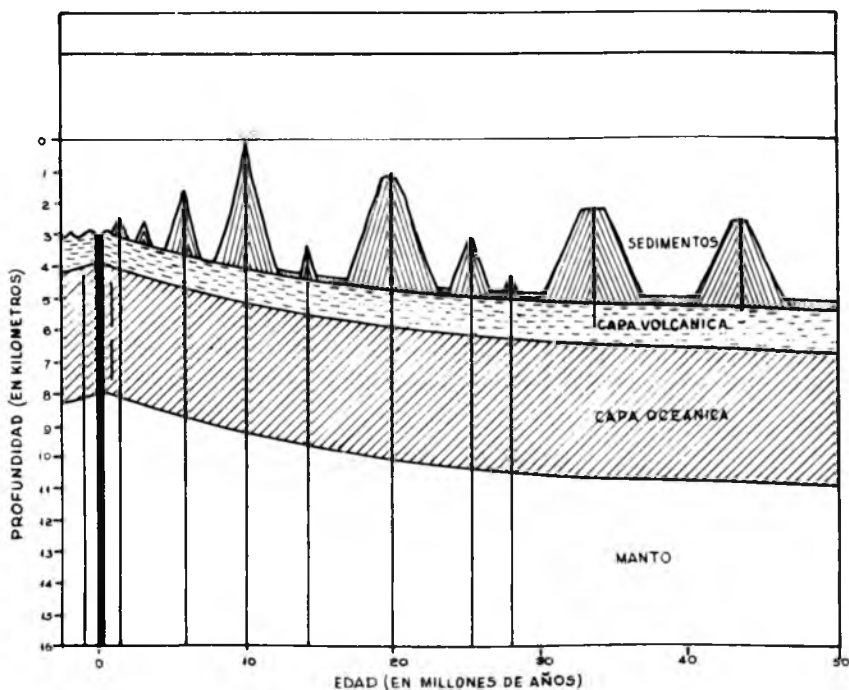
**DORSAL INCIPIENTE DEL MEDIO OCEANO**



**DORSAL DEL MEDIO OCEANO**



*Figura 6: Ilustración esquemática de la Expansión del Fondo del Océano. Modificada de Rona, 1973, Continents Adrift - Continents Aground, 1976, P. 213. Redibujó Bernardo Barriga.*



*Figura 7: Volcanes submarinos y su relación con la expansión del Fondo Oceánico. Modificada de Menard, 1969, Deriva Continental y Tectónica de Placas, 1976, p. 95. Redibujó Bernardo Barriga.*

Estas diferencias hacen surgir dudas acerca de la relación entre los valles centrales de las Dorsales Oceánicas y los Grabens continentales. Su analogía no puede ser tan estricta como a veces se ha sugerido. Pero no puede haber duda acerca de la importancia de los valles centrales. Podemos examinar uno de ellos que emerge en la superficie de la isla en Islandia!. Se trata del Valle Central en la Dorsal del Atlántico Medio, y en la Isla se conoce como el Graben Central de Islandia. La mayor parte de los volcanes activos de Islandia se encuentran dentro de él, y fallas y fisuras recientes atestiguan que en la actualidad están trabajando allí fuerzas de distensión. Esta es ciertamente la parte más activa de Islandia y, por analogía, de la Dorsal del Atlántico.

Hay otros dos criterios de prueba en cuanto a Expansión del Fondo Oceánico tomados del Océano Atlántico. Las lavas más antiguas encontradas en islas oceánicas se hallan en islas que están más lejanas de la Dorsal del Atlántico Medio. Al contrario, las lavas más jóvenes se encuentran en las islas cercanas a la Dorsal. (Figura 7).

Una segunda observación es el emplazamiento de la Dorsal misma. Ella divide el Atlántico en dos partes casi iguales y la curva que hace para equidistar de las masas de Africa y Sur América sugiere que su posición no tiene nada de accidental. La Expansión del Fondo Oceánico da automáticamente una explicación de esto.

Ulteriores corroboraciones han venido de las perforaciones en los sedimentos del mar profundo. Cerca de las Dorsales la cobertura sedimentaria es delgada y se encuentran presentes allí sólo los sedimentos más recientes. Los sedimentos más espesos y los estratos más profundos progresan en edad al alejarse de las Dorsales.

### LA HIPOTESIS DE VINE-MATTHEWS

La hipótesis de Vine-Matthews fue propuesta como un resultado de extensos estudios de las anomalías magnéticas. Antes de describirla debemos definir qué se entiende por *anomalía* en geofísica.

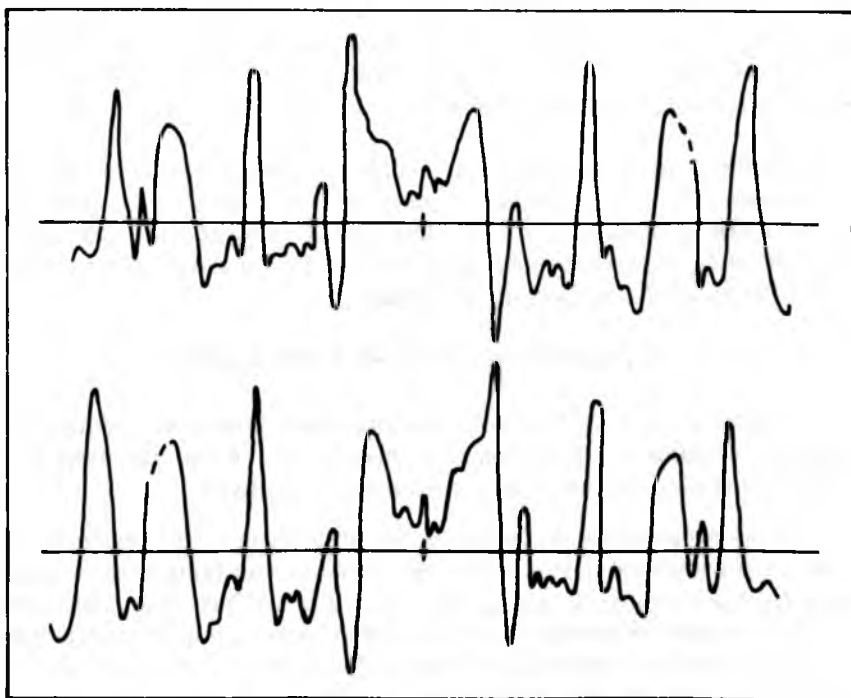
Algunas propiedades de la Tierra, de gran alcance, por ejemplo sus campos gravitacional y magnético, son medidas con tanta precisión que para escribir su valor se requiere de cinco a seis cifras. Aún más, tales cambios característicamente muestran cambios suaves en una escala global, sobre los cuales se sobreponen irregularidades locales. Muchas veces es conveniente sustraer estas modalidades de gran escala con el fin de hacer resaltar las pequeñas modalidades locales. En este proceso el número de cifras significativas que hay que transportar se reduce a cuatro o menos.

Una anomalía se define como la diferencia entre alguna cantidad medida y alguna referencia standard que usualmente se escoge para representar esas amplias variaciones de alcance universal tan precisamente como sea posible.

En el caso de la intensidad vertical del campo magnético, podemos escoger la suma de la componente vertical del dipolo más conveniente y las componentes no dipolares como referencia tipo. Substrayendo la intensidad vertical predicha por esta combinación de la intensidad vertical observada, resulta la anomalía magnética en el punto de la observación.

A medida que las observaciones magnéticas en el mar profundo se fueron haciendo más numerosas fue resultando un patrón sorprendente.

Fajas de anomalías alternativamente positivas y negativas se encuentran orientadas de modo paralelo a las importantes cadenas de montañas del Océano, tales como la Dorsal del Atlántico Medio y la Dorsal del Pacífico Este.



*Figura 8: Perfiles Magnéticos a través de la Dorsal del Pacífico Este. Modificada de Foster, 1971, p. 397. Redibujó Bernardo Barriga.*

Si se dibujan en negro las regiones de anomalía positiva y se dejan en blanco las de anomalía negativa, se obtendrá un esquema de franjas o menos blanco las de anomalía negativa, se obtendrá un esquema de franjas más o menos paralelas pero con contornos no rectos sino quebrados.

Si a partir de este patrón una gráfica magnética en la que en abscisa representamos las distancias hasta el centro de la Dorsal y en ordenada la intensidad de la anomalía en gamas, quedaremos sorprendidos del alto grado de simetría de estas anomalías a lado y lado de las Dorsales (Figura 8). Es tal esta simetría que si tomamos v. g. el perfil magnético que se ha elaborado a través de la Dorsal del Pacífico Este y le comparamos el mismo perfil invertido, de tal modo que su extremo Este, más bien que el Oeste, quede al lado de la mano izquierda, ambas líneas presentarán una semejanza tal que parecerán calcadas la una sobre la otra. Aún más, si tomamos el perfil magnético elaborado a través de la Dorsal del Atlántico Medio y adaptamos su escala a la de los perfiles del Pacífico Este, nos daremos cuenta de que la semejanza entre estos perfiles es pasmosa.

Qué puede producir tales anomalías alargadas, simétricas con respecto a las crestas de las Dorsales y semejantes de Océano a Océano en todo excepto en sus escalas de distancia?

F. J. Vine y D. H. Matthews emitieron la audaz hipótesis de que las anomalías son debidas a magnetización termorremanente en rocas basálticas de la corteza que está por debajo del fondo del mar.

Las zonas de anomalías positivas se deberían a rocas magnetizadas en la dirección del campo terrestre y que lo reforzarían; las anomalías negativas tendrían lugar allí donde las rocas están magnetizadas en dirección contraria y se opondrían al campo.

—Y cuál puede ser la causa de tales zonas de magnetización opuesta?—. La única explicación admisible que viene a la mente de inmediato, y la única defendida por Vine y Matthews, es la de las inversiones del campo magnético terrestre.

Se sabe que han ocurrido inversiones del campo magnético, y los tiempos de algunas de las más recientes han sido establecidos por cuidadoso estudio de secuencias de rocas bien datadas (Figura 9).

Pero las inversiones magnéticas son fenómenos universales, que han sucedido en tiempos definidos en el pasado, no efectos locales que afectaron solamente las franjas paralelas a las Dorsales oceánicas. La única solución para que las inversiones hayan podido producir este patrón de anomalías es que las rocas del fondo del mar hayan enfriado, atravesando los puntos de Curie de sus minerales magnéticos, en tiempos diferentes, implicando esto que las edades de las rocas basálticas crecen con las distancias a las crestas de las Dorsales. La relación de las duraciones de unas pocas épocas, de las primeras, de un campo principalmente normal o principalmente inverso con los anchos de las fajas correspondientes de anomalías es pasmosa.

Si, de acuerdo con la hipótesis de Vine-Matthews, se traza una gráfica de las inversiones del campo magnético, teniendo en cuenta su distancia al centro de las Dorsales, en función del tiempo, obtendremos una cantidad física que es rata o velocidad. De este modo llegaremos a la conclusión de que algo debe estar moviéndose (Figura 10).

El hecho de que cero distancia de la cresta de la Dorsal corresponda a cero tiempo, contando a partir del presente, muestra que lo que estamos observando es un movimiento relativo del fondo oceánico de la cresta de la Dorsal.

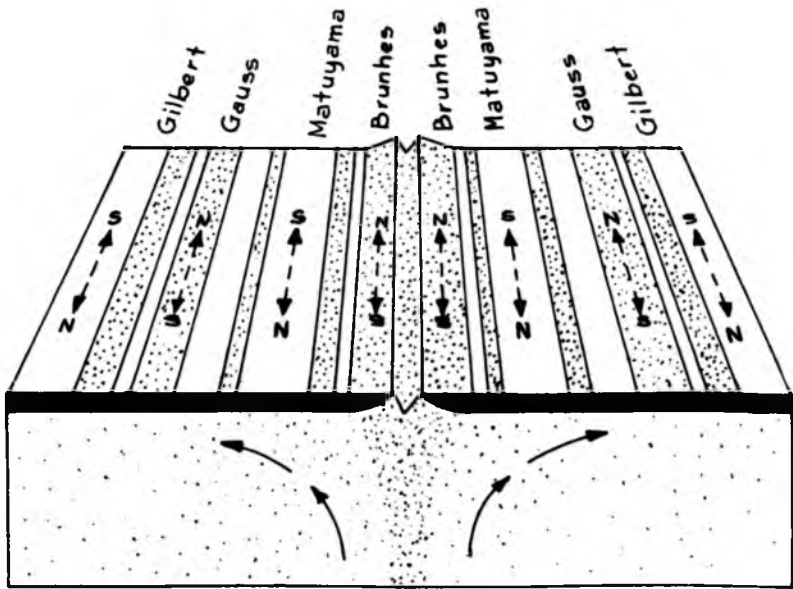


Figura 9: Paleomagnetismo Plio-Cuaternario. Nótese la alternancia de zonas magnéticas correspondientes a Epocas Normales e Inversas. Según Bellair Pomerol, 1977, p. 498. Redibujó Bernardo Barriga.

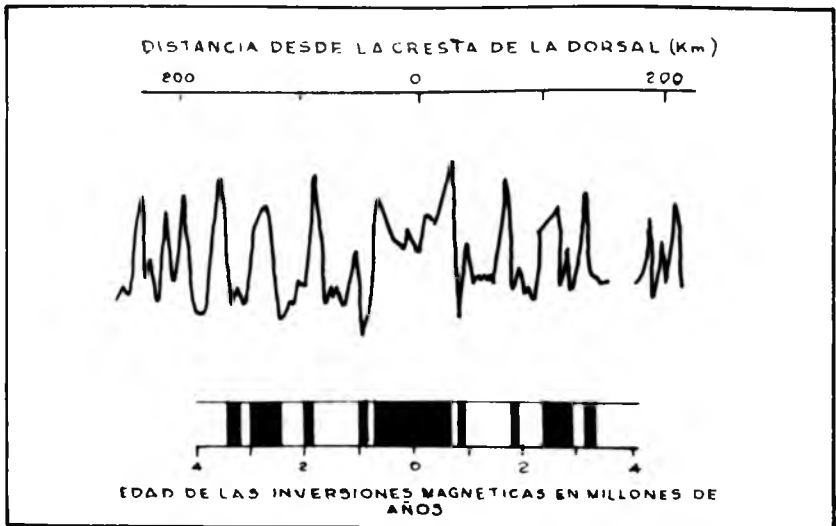


Figura 10: Anomalías Magnéticas en relación con el tiempo y la distancia a las Dorsales. Según Clark, 1971, p. 43. Redibujó Bernardo Barriga.

No podemos determinar, a partir de este argumento solamente, si la cresta de la Dorsal está emigrando a través del fondo oceánico o si el fondo oceánico se está alejando de la Dorsal. Sin embargo, la simetría del modelado de las anomalías está ampliamente en favor de la segunda alternativa. La simetría vendrá automáticamente si la corteza de debajo del mar se está formando en las crestas de las Dorsales y se está moviendo, alejándose de ellas, con velocidades iguales en ambas direcciones.

Este proceso es conocido con el nombre de *Expansión de Fondos Oceánicos*.

En cuanto al modo como se piensa que la Expansión de Fondos Oceánicos tenga lugar, se puede decir que cerca de la cresta de la Dorsal la corteza y parte del manto están continuamente abriéndose, creando fisuras alargadas que se llenan con roca fundida. La roca que se solidifica se magnetiza en la dirección del campo que prevalezca en el momento del enfriamiento.

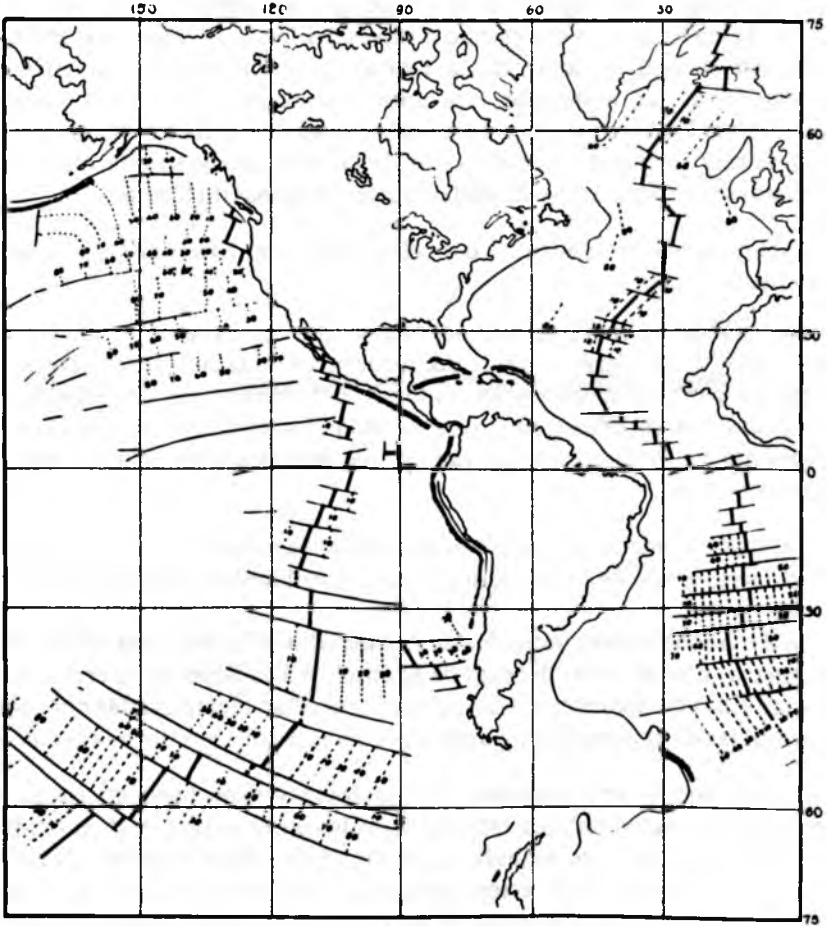
Las inyecciones tienen lugar en una zona cercana a la cresta de la Dorsal y existe cierto grado de casualidades para su distribución dentro de esta zona.

Aún más, las fisuras individuales se extienden solamente por unos pocos kilómetros o unas pocas decenas de kilómetros a lo largo de la cresta de la Dorsal. Ellas desaparecen diferente y se encuentran reemplazadas por otras, distribuidas de una manera ligeramente diferente con respecto a la cresta.

El movimiento de expansión es esporádico y tiene lugar en forma de reventones de actividad que están localizados en el espacio y en el tiempo. Estas irregularidades de pequeña escala en el movimiento influyen para que las fajas de anomalías estén limitadas por líneas rectas, que sean exactamente paralelas a la cresta de la Dorsal; la irregularidad de los límites está presente en todos los perfiles magnéticos.

La velocidad de Expansión del Fondo del Mar puede ser determinada partiendo de las distancias a la cresta de la Dorsal, distancias a las cuales se encuentran inversiones magnéticas de edades conocidas. Las velocidades "medias" de expansión de la Dorsal del Atlántico Medio y de la Dorsal del pacífico Este se ha encontrado que son más o menos de 1 Cm/año y de 5 Cm/año respectivamente.

Estas son las velocidades de movimiento de puntos en el fondo del mar con respecto a las crestas de las Dorsales; dos puntos en los lados opuestos de las Dorsales se alejan uno de otro dos veces más rápidamente. Las velocidades de expansión de otras Dorsales caen dentro de los mismos límites (Figura 11).



**Figura 11:** Correlación de Anomalías Magnéticas con sus edades en millones de años. Modificada de Heirtzler, 1968, *Deriva Continental y Tectónica de Placas*, 1976, p. 76. Redibujó Bernardo Barriga.

Para comparación, las velocidades principales de Deriva Continental pueden ser obtenidas de los datos ya presentados. Resulta que son más o menos de 1 a 3 Cm/año, comparables con las velocidades de Expansión del Fondo Marino.

Otras pruebas distintas de las que se derivan del geomagnetismo están también en favor de la idea de Expansión del Fondo Marino.

Pero, a partir de la publicación de la hipótesis de Vine-Matthews en 1963, ha tenido lugar una rápida evolución de ideas acerca de la Tectónica Global.



### III. TECTONICA DE PLACAS

Ulteriores desarrollos de esta idea han llevado a la *Tectónica de Placas*.

Se piensa que la superficie de la Tierra está dividida en cierto número de Placas, cada una de las cuales se comporta como una unidad más o menos rígida. Los intensos movimientos relativos de los continentes y otros que vamos a exponer tienen lugar únicamente en los contactos entre las Placas.

Pero antes de considerar las Placas individuales y sus relaciones con las formas tectónicas debemos examinar algunas estructuras especiales.

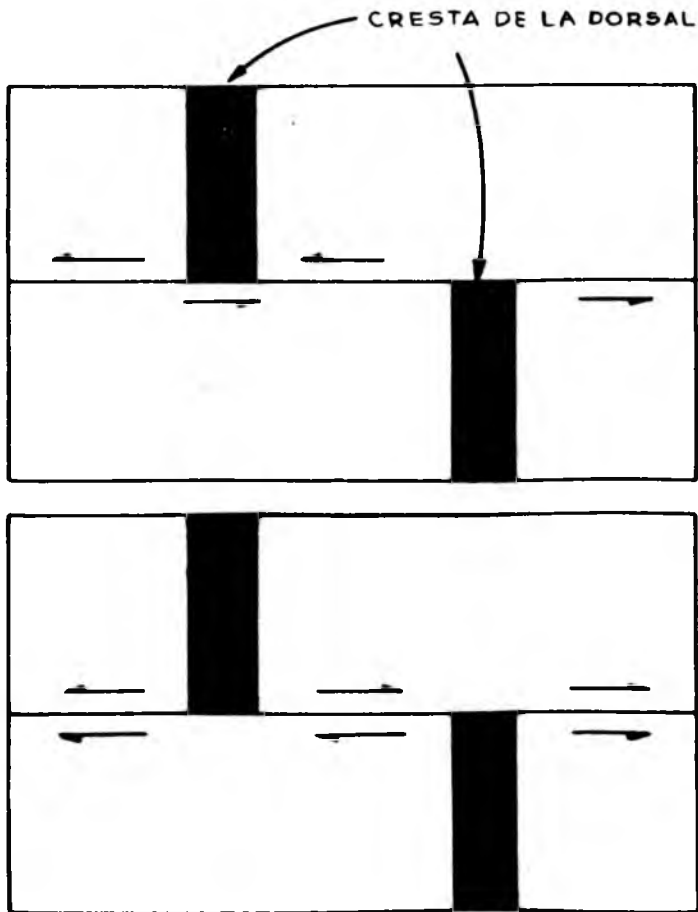
**FALLAS TRANSFORMANTES.** Las Fallas de *Transformación* se pueden producir cuando las nuevas rocas se forman en la superficie por inyección de material ígneo. Su papel capital en la Expansión del Fondo Oceánico ha sido reconocido por J. T. Wilson. Superficialmente parecen fallas *transcurrentes* pero un examen más detallado muestra que el solo detalle que tiene en común es el movimiento relativo horizontal. Dicho de otro modo, ellas están próximas a ser opuestas que idénticas.

Supóngase que la cresta de una Dorsal está dislocada por una falla. Si la dorsal no es, en ese momento, una fuente de expansión, la expresión de la dislocación en la topografía debe ser un movimiento a lo largo de la falla. Esta se interpreta entonces simplemente como *transcurrente* (Figura 12).

Pero ahora consideremos una Dorsal a partir de la cual tiene lugar actualmente un movimiento de expansión. El movimiento relativo tiene lugar a lo largo de la falla únicamente en el trayecto que conecta los dos fragmentos de la Dorsal; en cualquiera otra parte la falla es simplemente una cicatriz, ambos lados de la cual se mueven conjuntamente.

En el caso de una falla transcurrente, el desplazamiento de la Dorsal es consecuencia de fallamiento. En el caso de una falla transformante, el fallamiento es consecuencia de la dislocación de la Dorsal.

Las fallas transformantes capacitan los sistemas de Dorsales para cambiar de dirección bruscamente. La dirección de expansión no es necesariamente perpendicular al rumbo de la Dorsal, pero, si las placas son rígidas la velocidad con la cual es formada la nueva corteza puede cambiar bruscamente cuando la Dorsal cambia de dirección. Cuando el segmento diagonal de la Dorsal está en la misma dirección del movimiento, no se añade nuevo material a lo largo de él y él llega a ser simplemente una falla transformante.



*Figura 12: Diferencia entre Falla de Transcurrencia y Falla de Transformación. Según Clark, 1971, p. 48. Redibujó Bernardo Barriga.*

No es posible distinguir entre fallas transformantes y transcurrentes en el fondo del mar sino por el hecho de que el movimiento a lo largo de estas fallas tiene lugar en forma de deslizamientos periódicos, cada uno de los cuales produce un temblor de tierra.

La dirección del movimiento relativo de los bloques separados por la falla puede ser determinada a partir de un estudio cuidadoso de las vibraciones que se producen.

Además los temblores de tierra tienen lugar únicamente a lo largo de la parte de la falla que queda entre los dos segmentos de la Dorsal. Tal distribución de actividad es precisamente la que debíamos esperar de una

falla transformante; una falla transcurrente no puede ser activa en una parte tan restringida de su longitud. Los resultados aquí descritos son típicos de los terremotos que se originan a lo largo de las fallas que dislocan las Dorsales. Ellos demuestran que se trata de fallas transformantes, observación que constituye una prueba más en favor de la idea de Expansión del Fondo Oceánico.

**FOSAS OCEANICAS.** Con una velocidad de expansión de algunos centímetros por año, las Dorsales están formando un nuevo fondo oceánico con una rata de unos cuantos Km. cuadrados por año. A esta velocidad la superficie entera de la Tierra debió formarse en menos de 500 millones de años, es decir, en menos de un décimo del tiempo geológico. No hay razón para suponer que las velocidades de hoy en día difieran drásticamente de las del pasado y por eso nos encontramos con el hecho de que se produce más superficie de la que puede ser acomodada por la Tierra. El exceso debe ser destruido en alguna parte; aparentemente el lugar donde esto ocurre en las profundas Fosas Oceánicas.

Importante información acerca de la estructura de las Fosas proviene de los terremotos asociados con ellas. La mayor parte de los terremotos tienen lugar a profundidades pequeñas pero cerca de las Fosas pueden acaecer a profundidades hasta de 700 Km. Tales choques profundos son muy raros en otras regiones (Figura 13).

Las posiciones de estos terremotos están sistemáticamente relacionadas con sus profundidades, con temblores sumamente someros que tienen lugar casi directamente debajo de las expresiones topográficas de las Fosas, y otros progresivamente más profundos desplazados alejándose progresivamente de los océanos y debajo de los arcos de islas o de los continentes en los extremos opuestos a las Fosas. Esta relación es particularmente llamativa a lo largo de la costa occidental de Sur América (Nótese igualmente que todos los terremotos que tienen lugar debajo de las Dorsales son someros; ninguno tiene lugar a profundidad superior a los 100 Km.

Los terremotos debajo de la Fosa de Tonga están restringidos a una estrecha región inclinada con un ángulo de  $45^\circ$ , y esta modalidad es común a todas las fosas.

Las regiones caracterizadas por los terremotos se han llamado "*Zonas de Benioff*", quien fue el primer que las hizo notar. Las vibraciones producidas por los terremotos muestran que las Zonas de Benioff se están sumergiendo con relación a las que las rodean. La mayor parte de los volcanes activos de todo el mundo están situados en los arcos insulares y en

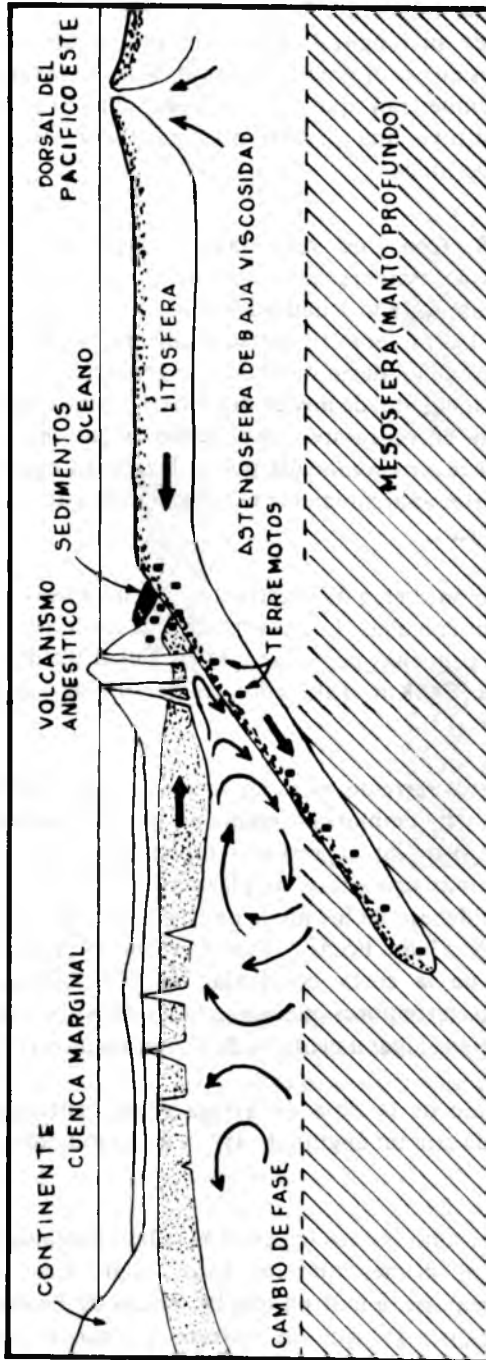


Figura 13: Esquema general de la Tectónica de Placas. Típicamente se refiere al Oeste del Pacífico. Según Toksoz, 1975, Continents Adrift. Continents Aground, 1976, p. 116. Redibujó Bernardo Barriga.

los márgenes continentales por encima de las Zonas de Benioff. La idea de que la corteza terrestre está siendo destruida en las Zonas de Benioff puede ponerse en colaboración con otras modalidades de la Tectónica de Placas y llegar a formar una imagen coherente.

Una lámina del fondo oceánico, que incluye toda la corteza oceánica y algo del manto que se encuentra debajo es arrastrada hacia abajo a lo largo de la Zona de Benioff y eventualmente digerida por el manto más profundo.

El arrastre de este material que desciende produce la depresión topográfica que observamos como Fosa (Figura 14).

Estamos enfrentados con una aparente paradoja, sin embargo, porque parece que la lengua descendente de material frío de cerca de la superficie originara los volcanes.

Parte de la solución de este problema debemos encontrarla en la química de la lengua descendente. Esta puede contener en su seno gran cantidad de agua que contamina el manto circundante y hace bajar su punto de fusión, produciendo rocas fluidas. Además la fricción entre el material descendente y el material circundante produce calor que eleva la temperatura tanto en la Zona de Benioff como en el manto adyacente, causando de este modo una fusión ulterior. Una parte importante del proceso de digestión de la Zona de Benioff implica fusión y remoción de líquido, una parte del cual alcanza la superficie para ir a formar los volcanes.

**FORMACION DE LAS MONTAÑAS.** Se observa comúnmente que las rocas deformadas que constituyen cinturones de montañas se han originado como secuencias extraordinariamente espesas de sedimentos depositados bajo condiciones marinas. Ya en tiempos tan remotos como 1859 Jaime Hall dio origen al concepto de *Geosinclinal*, nombre dado a la depresión que permite la acumulación de grandes espesores de sedimentos por subsidencia.

Trabajos ulteriores han demostrado que la historia de un Geosinclinal es complicada y que la actividad tectónica prevalece en todo.

Porciones de la depresión pueden durante cierto tiempo emerger en forma de islas, sufrir erosión y verter sedimentos en las profundidades circunvecinas, y luego subsidir para convertirse de nuevo en lugares de deposición.

La actividad volcánica puede también proporcionar parte del material pero no necesariamente a todas las partes del geosinclinal.

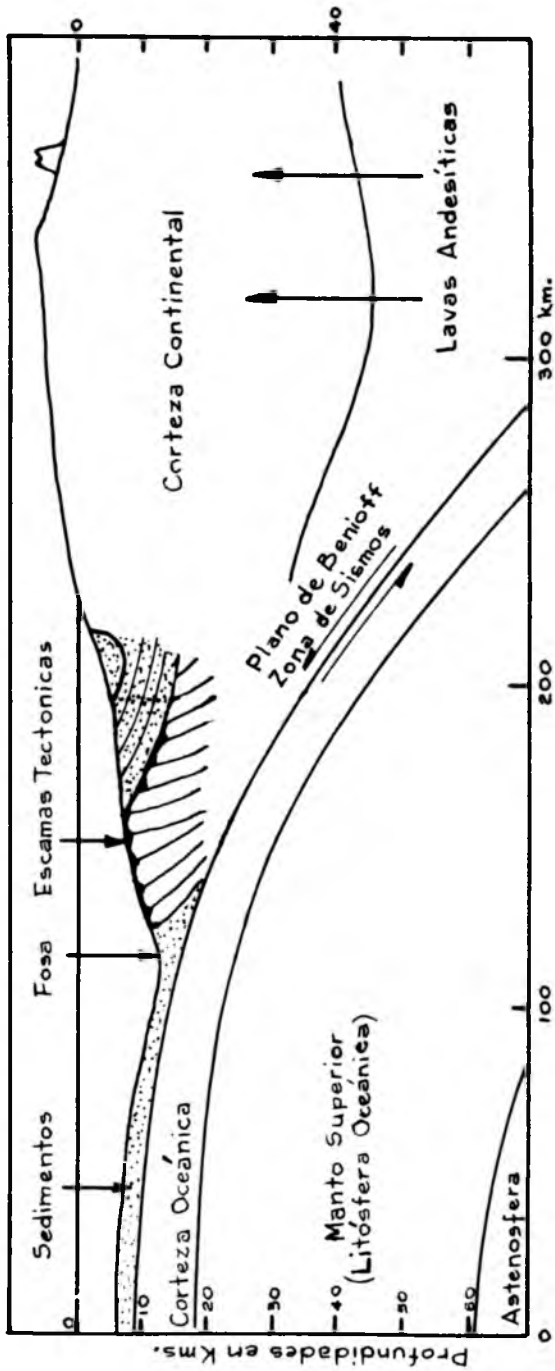


Figura 14: Diagrama Esquemático de la Tectónica de Placas del Pacífico Este. Según Bellair Pomerol, 1977, p. 502. Redibujó Bernardo Barriga.

Eventualmente las rocas del geosinclinal son comprimidas para formar montañas y levantadas fuera del mar, y el geosinclinal llega a quedar destruido como sitio de sedimentación.

El papel del geosinclinal como precursor de montañas y la complejidad y diversidad de los procesos orogénicos pueden explicarse dentro del marco de la Tectónica de Placas.

El papel central es desempeñado por la lengua descendente de material frío, que hunde la corteza, y por las márgenes de los continentes.

Los márgenes continentales pueden clasificarse sin mucha precisión en los tipos Atlántico y Pacífico. El primero es relativamente sencillo: los terremotos y los volcanes están ausentes y una acumulación de sedimentos se forma allí por erosión del continente adyacente. Las márgenes Pacíficas son muy diferentes. Se trata del tipo Cordillerano, del cual los Andes son un ejemplo excelente, y del tipo de margen caracterizado por un Arco de Islas y un mar marginal, tal como las Islas Japonesas y el Mar del Japón.

La interacción entre una lengua descendente y las márgenes continentales y los Arcos de Islas causan los procesos orogénicos.

La formación de una nueva lengua descendente puede transformar un margen continental de tipo Atlántico en un sistema Cordillerano de montañas.

La corteza oceánica, por debajo de la depresión llena de sedimentos, llega a ser inestable, se fractura e inicia una lengua descendente. Una posible razón de esta inestabilidad puede tener mucho que ver con la gravedad.

El arrastre de la lengua descendente comprime los sedimentos produciendo pliegues y fallas, y los líquidos generados durante la digestión de la lengua descendente emergen, llevando consigo suficiente calor para producir fusión parcial de la corteza continental que está encima y de los sedimentos.

A la conclusión de la orogénesis, el nuevo cinturón de montañas ha quedado como una extensión del continente original.

Una segunda manera según la cual una lengua descendente puede evolucionar hacia un cinturón de montañas es a través de lo que se puede denominar "colisiones", aunque los procesos son tan lentos que no tiene lugar un verdadero impacto.

La colisión sucede porque algo que está unido a una placa oceánica que se está hundiendo, tal como un continente, debe eventualmente llegar a la Fosa encima de la lengua descendente.

De esta manera el continente puede ser forzado contra un Arco de Islas o contra otro continente.

Como se comprende fácilmente, la corteza continental, compuesta de rocas ligeras, demasiado liviana para ser obligada a sumergirse con la lengua descendente. De esta manera la lengua desaparece; puede ser reemplazada por otra nueva, inclinada en dirección contraria, en el caso de la colisión de un continente con un Arco de Islas.

Hay muchas modalidades según las cuales una lengua descendente puede entrar en interacción con un margen continental para producir los diversos tipos de cinturones orogénicos que conocemos.

**MOVIMIENTO DE LAS PLACAS ACTUALES.** Los elementos estructurales que limitan las placas en superficie son de tres tipos.

El primer es el sistema de Dorsales, con sus Fallas Transformantes asociadas, donde se originan las Placas.

El segundo consta de Fosas, donde las Placas se destruyen y con ellas incluimos las recientes montañas de pliegues, tales como los Alpes, los que se interpretan como el producto de la interacción entre una lengua descendente y un margen continental.

El tercer elemento estructural es una red interconectada de Fallas Transcurrentes, las que ni crean ni destruyen Placas, pero las habilitan para pasar deslizándose las unas al lado de las otras.

Algunos detalles de este patrón deben todavía elaborarse más y en algunas regiones complejas, tales como el Mediterráneo Oriental, parece que existe cierto número de placas pequeñas; la interpretación es aún incompleta.

Las Placas pueden pertenecer a toda una colección de tamaños. Las mayores, tales como la Placa de Américas o la Placa del Pacífico, tienen dimensiones continentales (Figuras 5 y 15).

Otras, tales como la Placa del Caribe o la Placa de Arabia, son de tamaño subcontinental, y hacia abajo siguen Placas mucho más pequeñas.

Como ilustración de la Tectónica de Placas consideramos el movimiento de la gran Placa del Pacífico.



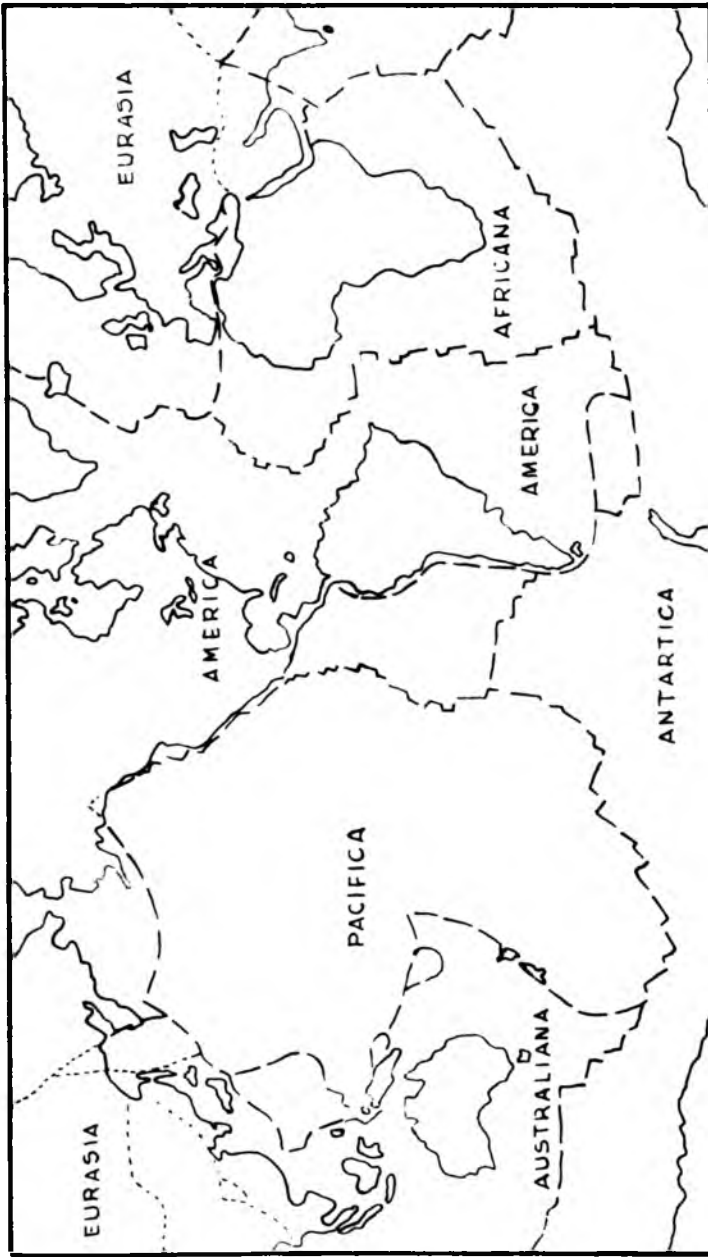


Figura 15: Las Seis Placas de Le Pichon (1968), denominadas Eurasia, América, África, Australia, Pacífica y Antártica. Según Burke Wilson, 1976, *Continents Adrift*. Continents Aground, 1976, p. 64. Redibujó Bernardo Barriga.

La fuente principal de esta Placa es la Dorsal del Pacífico Este y su continuación a través del Sur del Océano hasta un punto situado al SW de Nueva Zelanda.

Al Norte del Golfo de California el límite es el sistema de fallas transformantes de San Andres.

Entre el Norte del California y la frontera Estados Unidos-Canadá existen complicaciones porque allí interviene una pequeña Placa entre las grandes de América y del Pacífico.

El límite de la Placa del Pacífico vira abruptamente hacia el Oeste en el Golfo de Alaska y cambia de una Falla Transcurrente a una Fosa (la Fosa Aleutiana).

Esta es la parte más oriental de la línea a lo largo de la cual la corteza es destruida. La Fosa continúa hacia el Oeste a lo largo de la Cadena de las Aleutianas pero, a causa de la curvatura del Arco, la Fosa va gradualmente cediendo el paso a otra Falla Transcurrente, la que se extiende hasta la Península de Kamchatka. Aquí de nuevo el límite principia a ser una Fosa, la que persiste hasta el centro del Japón, donde se encuentra una nueva complicación.

La Fosa de Bonin-Marianas se extiende hacia el Sur a partir del Japón, haciendo resaltar otra pequeña Placa entre las de Asia y del Pacífico. Desde aquí hasta la Fosa bien definida que se extiende desde Tonga hasta Nueva Zelanda el límite es mal conocido. Parece que se necesita una Falla Transcurrente para poder aceptar el movimiento hacia el NW de la Placa del Pacífico, pero el movimiento hacia el Norte de la Placa Indico-Australiana requiere una Fosa la Fosa de Java, también a lo largo de este límite. A partir de Tonga el límite tipo Fosa se dirige hacia el SW hasta tocar la Dorsal al S del Océano.

Esta interpretación de la Tectónica de la Placa del Pacífico en general está de acuerdo con todos los datos geológicos y geofísicos conocidos y da una imagen coherente. Donde se encuentran ambigüedades o dificultades, estas se deben sea a información insuficiente sea a situaciones que otras observaciones (tales como las medidas magnéticas) muestran como muy complicadas. Es alentador el encontrar que la hipótesis de Placas rígidas pueda aparentemente tenerse en cuenta para la Tectónica del Pacífico, que abarca casi una cuarta parte de la superficie de la Tierra.

La Placa del Pacífico nos aporta igualmente la prueba de una dirección diferente en el movimiento relativo hacia Norte América en el pasado.

En el Pacífico Este se ha reconocido cierto número de importantes Zonas de Fractura y la orientación de las unas con relación a las otras está de acuerdo con la idea de que son cicatrices vestigiales de Fallas Transformantes que se habían originado en un sistema de Dorsales hacia el Este. Su orientación es incompatible con la actual dirección de expansión a partir de la Dorsal del Pacífico Este, y al presente tampoco existe una Dorsal al Este de las cuatro Zonas de Fractura más septentrionales.

Aparentemente lo que aquí se observa es una prueba de movimientos anteriores de la Placa del Pacífico en sentido de alejamiento de la Placa de Américas en una dirección SW hacia Nueva Guinea y las Filipinas.

Actualmente el movimiento relativo se hace hacia el NW, hacia el Japón y las Aleutianas.

La antigua Dorsal de la Costa del Pacífico de Norte América debe haber desaparecido debajo del Continente, lo que es posible solamente si existen cerca de la costa tanto una Fosa como una Dorsal.

Del estudio de la geología de las cordilleras de la costa pacífica se deduce que, alguna vez, estuvieron éstas asociadas con una Fosa y gran parte de la actividad geológica de la Cordillera de Norte América puede haber sido producida por el continente que se está corriendo sobre una Dorsal que alguna vez estuvo activa.

El margen Sur de la Placa Euroasiática y parte del margen de la Placa Este Asiática-Indonésica están bordeadas por las altas montañas de pliegues de la cadena Alpina-Himalaya. Una gran comunicación marina, conocida como la cuenca de Tethys recibía sedimentos geosinclinales a partir del Cámbrico y hasta los tiempos Eocénicos, pero en el extremo Oeste, o Europeo, las condiciones geosinclinales no comenzaron hasta el Período Pérmico.

Si en la Cuenca de la Tethys existió una Fosa durante el tiempo de sedimentación no se sabe, pero los grandes movimientos de las Placas Africana e Indo-Australiana con relación a la Placa Euroasiática, los que han sido sugeridos por el Paleomagnetismo, podrían ser más fáciles de entender si las Fosas hubieran existido por lo menos durante una parte del tiempo en los Períodos Mesozoico y Terciario.

La Tectónica de Placas da una solución no solamente al problema de las grandes compresiones que observamos en las montañas de pliegues sino también al problema de la terminación de Fallas Transcurrentes de gran desplazamiento.

Los grandes movimientos relativos eran justamente los que podíamos esperar si de veras la formación y la consunción de la corteza terrestre están sucediendo a las velocidades deducidas.

**EL MECANISMO DE DERIVA.** Apoyándose en los resultados de la sismología se ha llegado a la conclusión de que las Placas tienen en los océanos un espesor de 50 a 100 Km. y aún bastante más, quizás hasta de 200 Km., en los continentes.

Estas cifras son muy vagas pero de una precisión suficiente para nuestro objeto. El punto principal es que las Placas son delgadas en comparación con sus dimensiones horizontales, las que son del orden de los 10.000 km. en el caso de las grandes Placas.

El límite inferior debe estar muy bien lubricado, suficientemente para reducir el coeficiente de fricción ahí hasta los alrededores de cero, si tales cuerpos delgados deben moverse sin romperse.

El término *litósfera* se emplea para describir el material que produce las Placas. Originalmente se refería a toda la parte rocosa de la Tierra, pero la tendencia reciente es la de restringirla a las capas rígidas más externas.

Debajo de la *litósfera* yace la *asténósfera*, que es la capa plástica que proporciona la lubricación. Aunque este término es mucho más antiguo que la Tectónica de Placas, su uso aquí está de acuerdo con su definición original.

La litósfera no puede confundirse con la corteza terrestre. La primera se distingue por su resistencia bajo condiciones de muy baja deformación, mientras que la última se distingue por sus respuestas elásticas a corto término.

Nuestras ideas acerca de los mecanismos que hacen derivar las Placas todavía son vagas pero la gravedad desempeña un papel central.

Sin embargo en este momento se concede la máxima importancia a las corrientes de convección originadas en el manto terrestre. Sin que se conozca exactamente la causa que las produce, a ellas se atribuye el movimiento ascendente y horizontal del material litosférico que constituye las Placas.

#### IV. TECTONICA DE PLACAS EN COLOMBIA

Se dice ordinariamente que una Placa de fondo del Océano Pacífico se está sumergiendo por debajo del Continente en Colombia, como en Chile y Perú.

Si tenemos en cuenta que en caso de subducción de una Placa oceánica por debajo de una costa de tipo Pacífico Cordillerano suceden determinados fenómenos, podemos examinar los datos que en realidad poseemos de esta región y a la luz de ellos llegar a alguna conclusión.

Los fenómenos principales son los siguientes:

- 1° Terremotos de foco intermedio y profundo.
- 2° Fosas oceánicas con una profundidad superior en 3 o 4 kilómetros a la de las cuencas circunvecinas del fondo del mar.
- 3° Grandes anomalías negativas de la gravedad sobre la Fosa con pequeñas anomalías positivas sobre el Arco.
- 4° Crecimientos bruscos de los perfiles del flujo de calor a lo largo de la línea de los Arcos de Islas.
- 5° Volcanismo andesítico en cinturones de un ancho ordinariamente inferior a los 300 kilómetros a lo largo de los Arcos de Islas, los que ocupan el lado del Océano de la zona de alto flujo de calor.

##### 1° TERREMOTOS DE FOCO INTERMEDIO Y PROFUNDO.

Lonsdale (1978) hizo para el Ecuador un análisis de los terremotos acaecidos entre 1963 y 1974 en la región centrada en Quito, donde escogió una zona de 175 Km. de ancho por unos 600 de largo, orientada NW-SE, perpendicularmente a la Fosa del Ecuador, y llegó a la conclusión de que allí existía una zona de Benioff con sismos de profundidad variable entre los 33 y los 250 Km.

Se ha intentado hacer lo mismo para Colombia pero en mayores proporciones. La zona escogida tiene un ancho de unos 220 Km. y un largo de unos 1.000. Está orientada en dirección NW-SE, perpendicular a la Fosa de Colombia y abarca las ciudades de Cali, Popayán y Neiva, donde la sismicidad es muy acentuada. Se han anotado los principales sismos acaecidos en esta zona, según el Padre Ramírez (1975) (Figura 16).

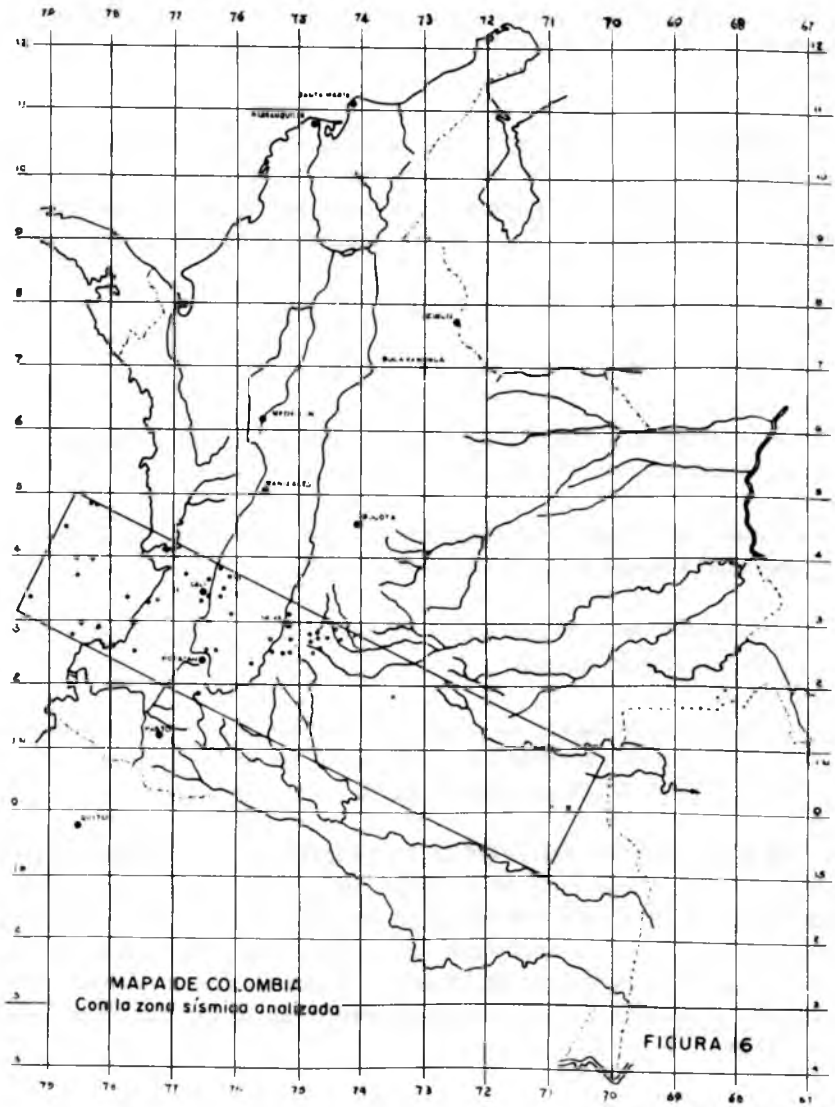


Figura 16: Mapa de Colombia y Faja Sísmica. Original. Dibujó Bernardo Barriga.

El perfil resultante (Figura 17) puede llevar a las conclusiones siguientes:

- a) Es notable la semejanza de la gráfica que se puede elaborar con estos datos con las que se han hecho de los sismos de Perú, Chile y Ecuador (Oliver, 1972, y Lonsdale, 1978).
- b) Existe un vacío entre los 200 y 600 Km. de profundidad, lo que se podría explicar quizás por una ruptura de la litósfera en subducción (Cf. Figura 27).
- c) Se ha propuesto para estas zonas de Benioff una gráfica que contenga un cambio de pendiente, de menos de  $45^\circ$  para los terremotos someros y de más de  $45^\circ$  para los profundos (Durán y López, 1968, Lonsdale, 1978). (Figuras 17A y 20).

**2. FOSAS OCEANICAS.** En la actualidad se da como segura la existencia de la Fosa de Colombia y de Ecuador, continuación hacia el Norte de la de Chile y Perú (Meyer et al., 1977, Meissner et al., 1977, Lonsdale, 1978). (Figuras 17A y 20).

**3. ANOMALIAS DE LA GRAVEDAD.** Existe en Colombia un Mapa Gravimétrico elaborado por el Sub-Comité de Gravimetria del Comité Nacional de Colombia para el Año Geofísico Internacional y editado por el Instituto Agustín Codazzi en el año 1959. Es un mapa de anomalías de Bouguer y tiene como base la línea de los 500 Miligales.

Paralelamente a la costa del Pacifico tenemos una serie de anomalías negativas seguida de otra serie de anomalías positivas más hacia el interior del Continente.

Los mismos datos fueron confirmados por los estudios que hacia 1968 fueron emprendidos en el Norte de Colombia especialmente por los Doctores Jaime Case, Luis Guillermo Durán y Alfonso López. Igual cosa se puede decir del trabajo que llevó a cabo el Doctor Case en el Sur del País, entre Tumaco y la localidad de Orito, a todo lo largo del oleoducto (Case et al, 1973).

**4. CRECIMIENTOS BRUSCOS DE LOS PERFILES DEL FLUJO A LO LARGO DE LA LINEA DE LOS ARCOS DE ISLAS.** En nuestro caso el Arco de Islas está representado por la misma Cordillera de los Andes. Desafortunadamente en Colombia aún no se ha hecho, que sepamos, el primer perfil calorimétrico; este es el aspecto geofísico más atrasado entre nosotros. Ojalá algún día pudiera hacerse algo a este respecto.

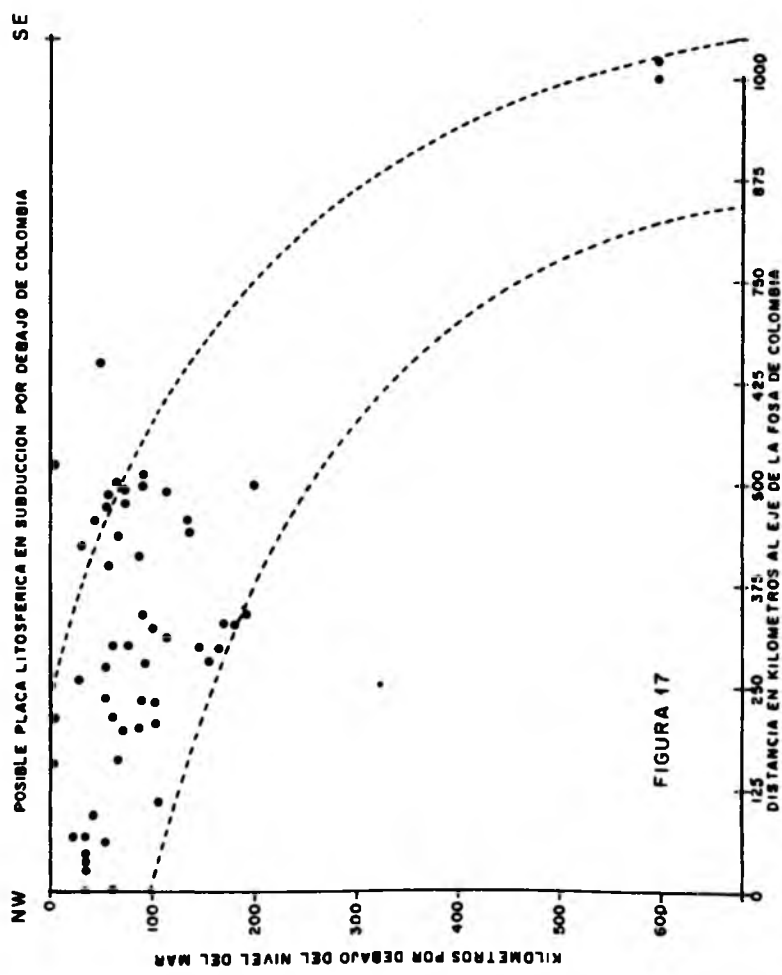


FIGURA 17

Figura 17: Posible Placa litosférica en Subducción por debajo de Colombia. Original Dibujó Bernardo Barriga.



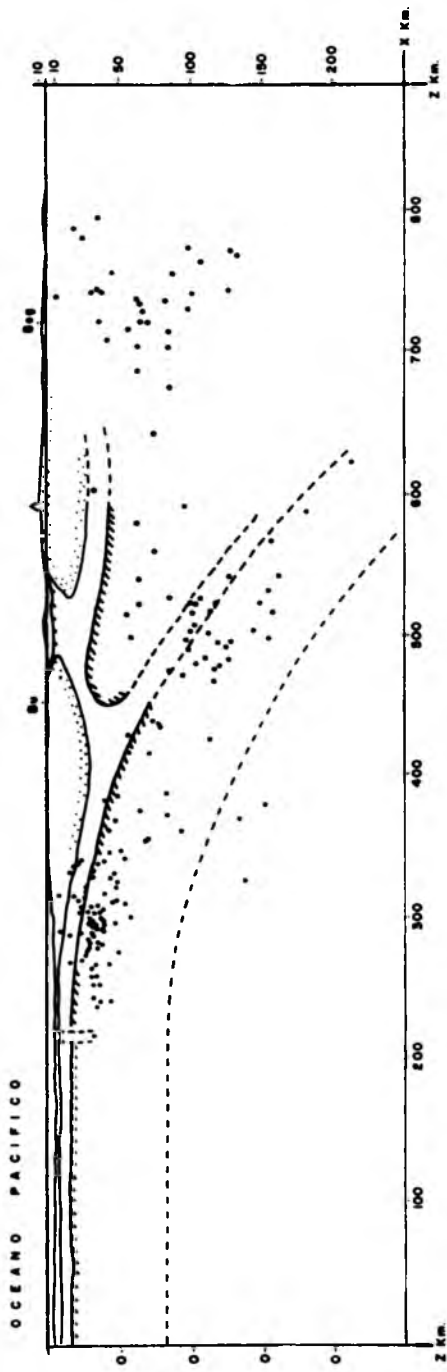


Figura 17A: Esquema litosférico del Perfil Malpelo-Buenaventura-Bogotá-Llanos. Según Meissner et al. (1977) Redibujó Bernardo Barriga.

**5. VOLCANISMO ANDESITICO.** En cuanto al Volcanismo Andesítico, lo tenemos bien característico en la Zona de Fuego de Colombia y Ecuador.

En el Ecuador tenemos volcanes relativamente muy modernos, extinguidos, desde el SW de Loja. A partir de la latitud del Golfo de Guayaquil los encontramos situados en el interior o en los bordes del Graben Interandino; algunos de estos se encuentran aún en actividad.

Lo mismo sucede en el Sur de Colombia, donde se encuentran situados tanto en la Cordillera Occidental como en la Central. Más al Norte se alinean en la Cordillera Central, pero en Antioquia tenemos los más septentrionales en contacto con la Cordillera Occidental, los Farallones de la Pintada.

Este volcanismo andesítico se debe a la ascensión y extrusión de magmas provenientes de la fusión e hidratación de los materiales de la litósfera en subducción, con la consiguiente contaminación ácida al entrar en contacto con los materiales graníticos continentales.

### **CONSIDERACIONES ACERCA DE LA SITUACION TECTONICA Y SISMICA DE COLOMBIA EN FUNCION DE EXPANSION DE FONDOS OCEANICOS, DE DERIVA CONTINENTAL Y DE SISMICIDAD CONSECUENTE.**

Colombia se encuentra situada geotectónicamente dentro del área del Caribe y de América Central.

“Las regiones de Centro América y del Caribe y las áreas oceánicas adyacentes incluyen notables dorsales oceánicas, arcos de islas y estructuras semejantes a arcos de islas y varias zonas mayores de fallas.

Ni la naturaleza de los desplazamientos a lo largo de estas estructuras geológicas mayores ni la interacción de estas zonas tectónicas con otras han sido bien establecidas. Esta es una de las pocas (tal vez la única) áreas del mundo en que una rama del sistema de cordilleras oceánicas se acerca a gran proximidad de un arco de islas. Así, estas regiones son importantes campos de prueba para las teorías de actividad tectónica en gran escala, tales como la hipótesis de la expansión del fondo marino, las fallas transformantes, la hipótesis de la expansión del fondo marino, las fallas transformantes, la subducción de arcos de islas y los movimientos de grandes placas superficiales de litósfera.

Este estudio muestra que la tectónica actual de la región del Caribe y de Centro América resulta primariamente de la interacción de dos placas de

litósfera, relativamente pequeñas, con placas que las rodean. Estas dos placas son:

1. **La Placa del Caribe** limitada hacia el Oeste por el arco centroamericano; hacia el Norte por la Fosa de Caymán; hacia el NE y hacia el E por las Indias Occidentales y hacia el Sur por la zona sísmica del N de Sur América.

2. **La Placa de Cocos**, limitada hacia el NE por el arco de Centro América; al E por la Zona de Fracturas de Panamá; hacia el Sur por la zona de "rift" de Galápagos; y hacia el Oeste por la Dorsal del Pacífico Este. (Fig 5, 18 y 19).

La Placa de Cocos incluye toda la Dorsal de Cocos y de ahí recibe su nombre.

Como ya se sugirió (Ducher, 1952, Hess, 1933, 1938, Hess y Maxwell, 1953; Wilson, 1966), la Placa del Caribe está moviéndose hacia el E con relación a una placa (la Placa de Américas), incluye Norte y Sur América y el SW del Atlántico.

La Placa de Cocos se está moviendo hacia el NE, en relación con la Placa de Américas y se está sumergiendo bajo Norte América en México (como lo sugirió Gunn, 1943)".

"El sentido del movimiento relativo de lados opuestos del plano de una falla puede producirse de mecanismos focales individuales. Los planos de fallas de movimientos sísmicos de poca profundidad son usualmente paralelos a las zonas de sismicidad o a las mayores forma estructurales que indican límites entre placas adyacentes. Por eso, los mecanismos focales en diferentes partes de cinturones sísmicos determinan el movimiento relativo de placas adyacentes.. Los movimientos relativos de las cinco placas mostradas en la figura fueron deducidos de las soluciones de mecanismo de 70 movimientos sísmicos, esencialmente todos suficientemente grandes para la determinación de mecanismos focales con datos de World-Wide Standardized Seismograph Network (WWSSN) para el periodo de 1962 a 1967". (Molnar, 1969, pp. 1640-1641).

"**La Zona de Fracturas de Panamá y la Zona de Rift de Galápagos**". Una zona de intensa actividad sísmica con rumbo casi N se puede reconocer al Sur de Panamá, cerca de los 85.5°W. Claramente esta zona *no* coincide con el Ridge de Cocos.

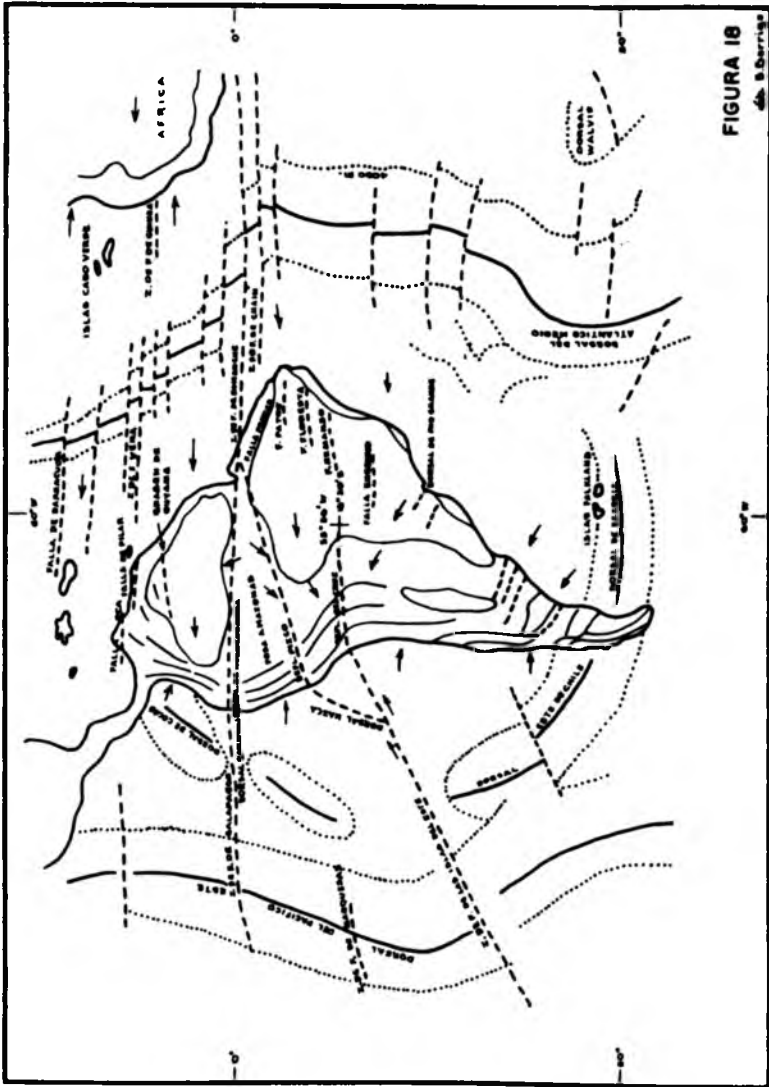


FIGURA 18  
 de B. Barriga

Figura 18: Principales Fallas Transcurrentes en América del Sur. Según Loczy, 1970, 1970, p. 189. Redibujó Bernardo Barriga.

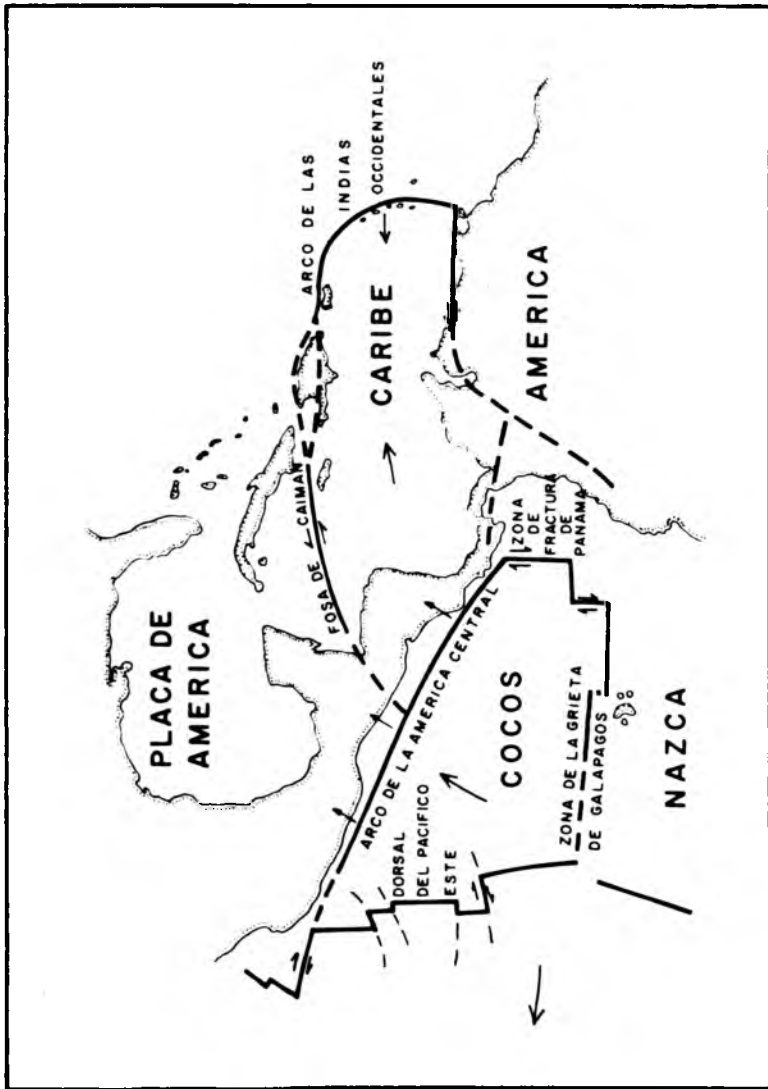


Figura 19: Mapa Esquemático de las Placas de la Litósfera en la región del Caribe y de América Central. Según Molnar Sykes, 1969, p. 1641. Redibujó Bernardo Barriga.

Los mecanismos focales... indican que este cinturón sísmico está caracterizado predominantemente por movimientos horizontales dextrógiros. Tanto las soluciones de mecanismos como lo estrecho del cinturón sísmico hacen pensar que esta zona es muy semejante a las fallas transformantes del sistema de dorsales del medio del océano (Sykes, 1967). Esta zona de fracturas, aquí llamada Zona de Fracturas de Panamá, aparece como conectando la Dorsal de Galápagos con el arco de Centro América. Luego se trata de una falla transformante de Dorsal y de arco.

Chase & Menard (1964) y Acharya (1965) han mostrado una serie notable de depresiones topográficas a lo largo de este cinturón sísmico” (Molnar, 1969, p. 1747).

“**Noroeste de Sur América**”. Los datos de mecanismos para el NW de Sur América no presentan un patrón suficientemente consistente para poder describir claramente la tectónica de esta región. Aquí se presentan varias zonas sísmicas, y la tectónica, como la de muchas áreas continentales, no aparece muy sencilla. Una zona de terremotos cercana a la costa oeste de Colombia, que buza hacia el E, sugiere sumergimiento de la Placa del Pacífico por debajo de Sur América. La solución 120, el único mecanismo obtenido para esta zona, indica el fallamiento inverso en un plano inclinado hacia el Sur. Esta dirección no es perpendicular a la costa de Sur América como se pudiera esperar de la sismicidad.

La solución 121 en el NW de Sur América tuvo lugar al Sur de Panamá en el cinturón sísmico de baja actividad que aparece extendiéndose desde el arco de Centro América. Como esta zona sísmica puede representar el límite SW de la Placa del Caribe y la región cercana a la costa W de Sur América, que constituye quizá parte de lo que aquí llamamos la Placa de Nazca. La solución indica un gran componente de fallamiento inverso a lo largo de un plano que buza o al NE o al SW. Este movimiento, sin embargo, es difícil de conciliar con los movimientos observados en la Zona de Fracturas de Panamá y en el Arco de Centro América. Se necesitan más mecanismos u otras informaciones para entender esta zona de actividad... Se han determinado tres mecanismos para acontecimientos que han tenido lugar cerca de 73.0°W, 6.8°N (Bucaramanga) con una profundidad de unos 150 Km. El mecanismo 124 indica en grandes componentes tanto de fallamiento inverso como de juego horizontal sobre un plano de buzamiento o al SE o al SW.

...De este modo, en el NW de Sur América, los datos presentes no parecen definir un patrón consistente. Hay muchos indicios del sumergimiento del Pacífico por debajo de Sur América a partir de los datos

sísmicos, pero hay presentes otras complicaciones. Además, las presentes soluciones de mecanismo no parecen clarificar mucho el patrón tectónico” (Molnar, 1969, pp. 1659-1661).

En Junio de 1971 Van Andel y otros publicaron un esquema de la Cuenca de Panamá en el que se puede ver la complicación que trae para Colombia la existencia de cinco Dorsales que se cortan en ángulo de 45° (p. 1490 Figura 20).

Estos autores escriben: “El lado Este de la Cuenca de Panamá está ocupado por una serie de hundimientos marginales limitados por fallas. Hundimientos semejantes existen sobre el continente en la zona costera de Colombia (Case y otros, 1971).

Más hacia el Este una ancha zona de actividad de temblores de mediana profundidad, mucho menos intensa que la del otro lado de la Fosa del Perú, continúa a través del centro y del Norte de Colombia.

Juntamente con las anomalías de la gravedad estudiadas y la morfología de hundimiento en las cercanías de la Costa, esta reducida actividad indica un tectonismo substancialmente más suave que el del área de la Fosa del Perú.

La zona de escasa actividad sísmica continúa hacia el Norte a través de la extremidad oriental del Istmo hasta el Caribe, donde Bowin (1970) ha demostrado que paralelamente a ella existe una zona de anomalías negativas de la gravedad que probablemente indica sumersión del fondo del Caribe por debajo de Sur América. De este modo el límite de la Placa de Sur América aparentemente continúa hacia el Norte desde la Fosa del Perú, a través del Occidente de Colombia hasta el Caribe. Este límite parece estar caracterizado por una combinación de fallamiento transformante y de sumersión en una zona limitada por la Falla de Boconó y sus continuaciones (Megacizallamiento de Dolores), por el Graben de Yaquina y por el Sur del Caribe. La menor actividad compresional, comparada con la del otro lado de la Fosa del Perú, puede resultar de un ángulo más bajo en el límite que separa la cuenca oriental de Panamá y la parte adyacente de Sur América con el vector de movimiento de las dos placas, o puede estar asociada con la iniciación de una nueva fase de sumersión que aún no está plenamente desarrollada” (p. 1505).

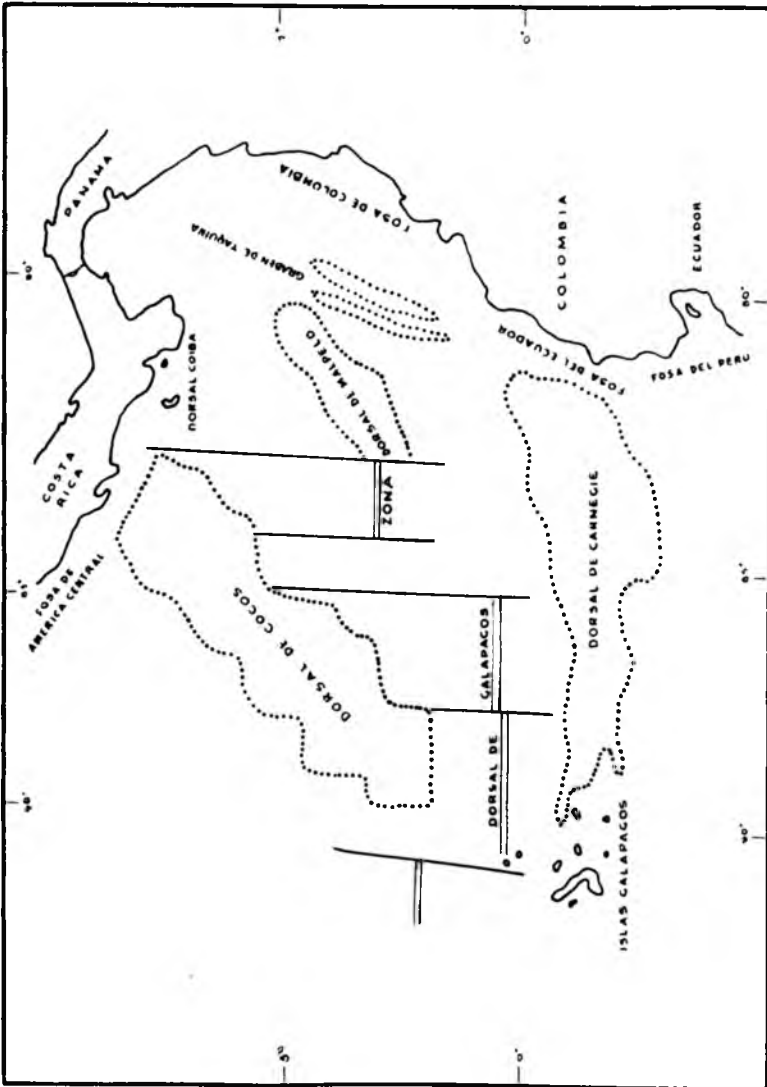


Figura 20: La cuenca de Panamá. Modificada de Van Andel y otros, 1971, p. 1490, Fig. 1. Redibujó Bernardo Barriga.



## **LOS ANDES DEL SUR DE COLOMBIA EN RELACION CON LA TECTONICA DE PLACAS.**

En Colombia, lo mismo que en el Ecuador, todos estamos familiarizados con nuestra Cordillera de los Andes. En ambas naciones es muy semejante pero aparentemente existe también una gran diferencia: en Colombia tenemos, según se dice ordinariamente tres ramales cordilleranos, las Cordilleras Occidental, Central y Oriental, y en el Ecuador (y aún en el Sur de Colombia, a partir del río Juanambú) sólo existen dos, a saber, la Cordillera Occidental y la Cordillera Oriental o Real, continuación de la Central de Colombia (Figura 21).

Pero con la ayuda de la Geología se ha podido precisar la verdadera constitución de esas cordilleras; en la actualidad se puede asegurar que en Colombia y Ecuador los ramales andinos son cuatro, a saber (Figura 22):

1° La Cordillera Oriental, bien diferenciada en Colombia y que, a partir de la depresión de Guairapungo, alineamiento de los ríos Juanambú, Mocoa y Caquetá, se adosa contra la Central y tectónicamente se sumerge parcialmente debajo de ella. En el Nudo de los Pastos ha recibido de los geólogos la designación de Cordillera Centro-Oriental. En el Ecuador se conoce con el nombre de Colinas Orientales de pie de monte; hacia el Sur constituye las cordilleras de Cutucú y del Cóndor.

2° La Cordillera Central de Colombia y su continuación en el Ecuador, la Cordillera Oriental o Real.

3° La Cordillera Occidental de Colombia y Ecuador.

4° La Cordillera de la Costa, que se puede reconocer desde el Golfo de Panamá (Serranía del Sapo) hasta el Cabo Corrientes en el Chocó y que en Colombia ha recibido el nombre de Serranía de Baudó. A partir de allí se sumerge en el Pacífico, aparece en Gorgona como isla testigo, hay algunos criterios para identificarla en la región de Tumaco y desde ahí continúa con un rumbo SW hasta tocar la extremidad occidental del Ecuador en la Provincia de Esmeraldas.

Al lado de estas cordilleras existe un conjunto de zonas bajas que son (Figura 23):

1. Al Occidente la Fosa del Océano Pacífico.
2. Entre la Cordillera de la Costa y la Occidental, la gran cuenca de hundimiento llamada por algunos autores el Geosinclinal de Bolívar.



*Figura 21:* Esquema Fisiográfico Colombo-Ecuatoriano. Original. Dibujó Antonio Reyes.

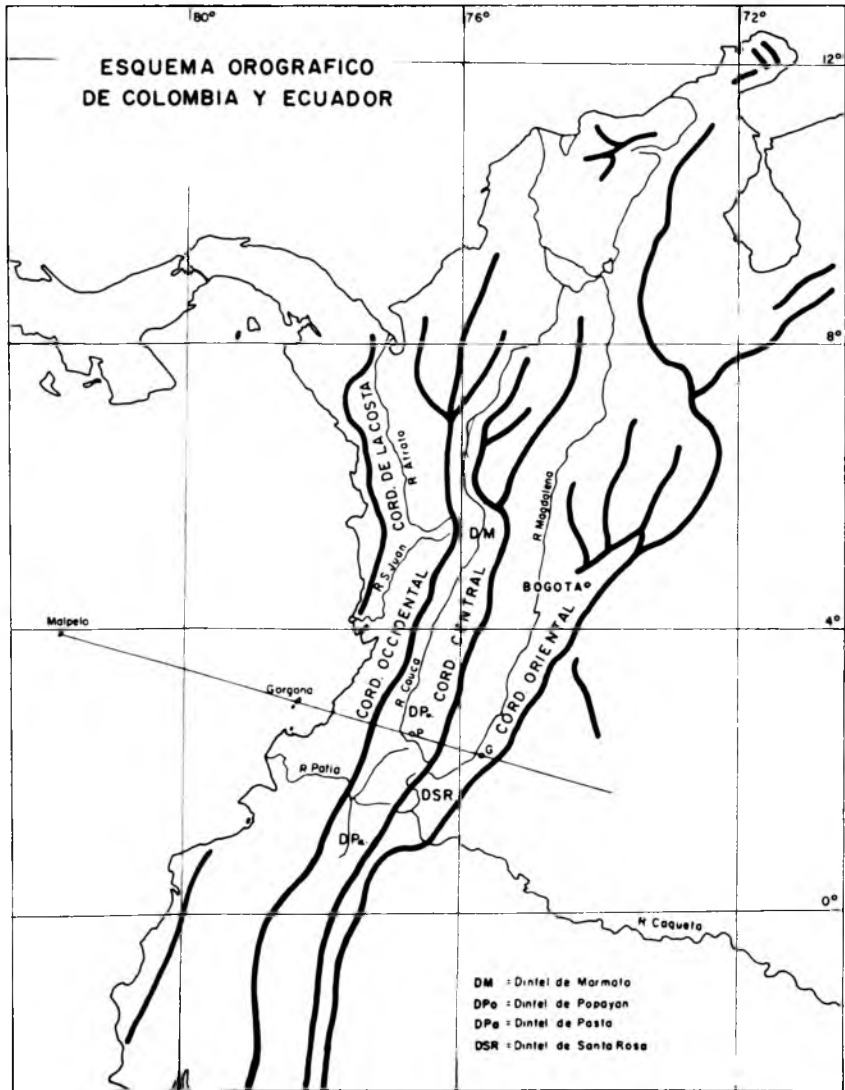


Figura 22: Esquema Orográfico Colombo-Ecuatoriano. Original Dibujó Antonio Reyes.

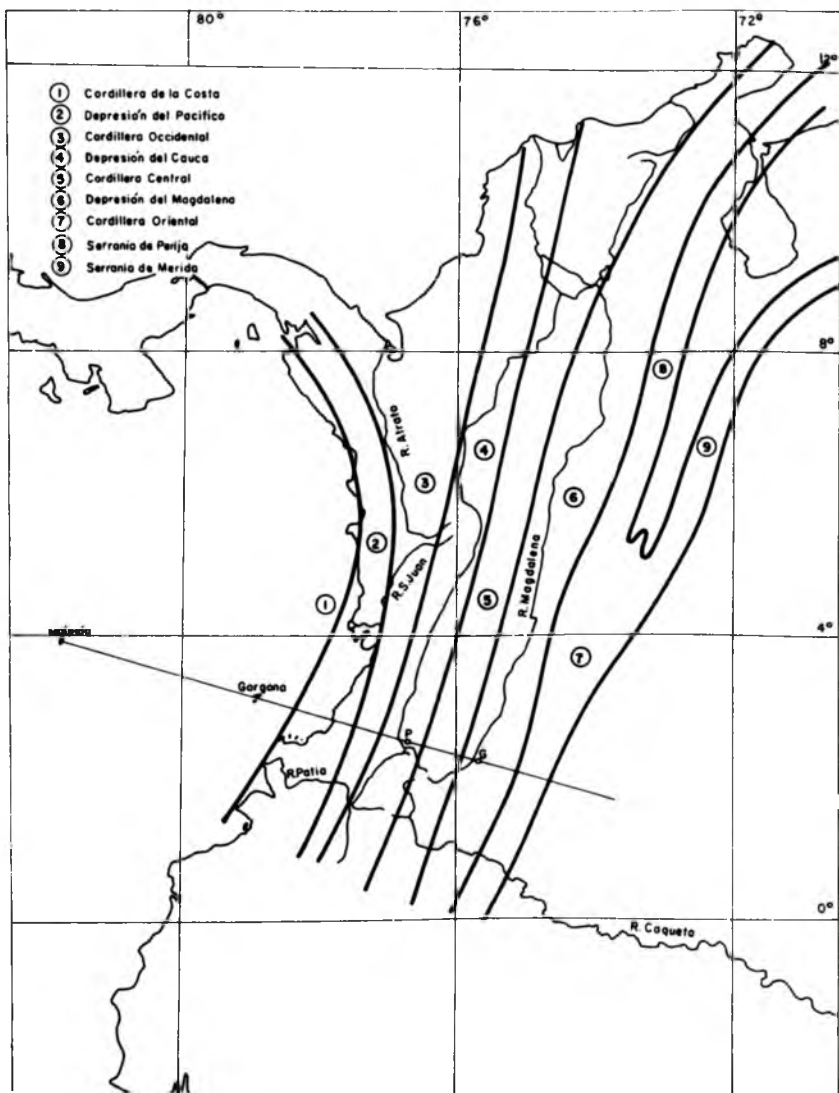


Figura 23: Construcción Andina en Colombia. Según Schaufelber, 1944, p. 23, Fig. 1. Redibujó Bernardo Barriga.

.3 Entre la Cordillera Occidental y la Central, la depresión del Cauca y del Patía, continuada en el Ecuador por el Corredor Inter-Andino.

4. Entre la Cordillera Central y la Oriental, el valle del Magdalena, continuado hacia el Norte por los valles de los ríos Cesar y Ranchería.

5. En último término está la depresión oriental, constituida por llanos y por selvas.

Desde la década de 1940 la inmensa mayoría de los geólogos que han estudiado el territorio Colombiano se han dado cuenta de que las depresiones que separan las cuatro cordilleras han sido originadas por fallas longitudinales que constituyen así el Suroeste de Colombia en un conjunto de cuatro Horsts (las cuatro cordilleras) con tres depresiones intermedias en forma de Graben (Pacífico-Atrato o Geosinclinal de Bolívar, Cauca-Patía, y Magdalena).

Se debe anotar el hecho de que, en general, los geólogos que han trabajado en estas regiones se han dado cuenta de que las fracturas que ponen aquí en contacto los Horsts con las depresiones son fallas de tipo inverso.

Aunque una falla inversa no pueda siempre, necesariamente, llamarse comprensiva, sin embargo, el hecho de que en una región todas las fallas importantes sean inversas sí supone que han sido producidas por comprensión. Así lo han comprendido la mayor parte de los geólogos que han estudiado los Andes de Colombia.

Llegamos, pues, a la conclusión de que en los Andes Colombiano (por lo menos en los del Sur) las cordilleras se han levantado en forma de Horsts a causa de compresiones laterales y de que los valles, en forma de grabens, pero limitados lateralmente por fallas inversas, no son fosas de hundimiento por gravedad sino simplemente dovelas alargadas que se han quedado retardadas en el levantamiento general. Se trata de lo que Bailey Willis (Cf. Fourmarier, pp. 622-623) ha llamado "Valles de rampa" (ramp valleys) para distinguirlos de los valles de grietas (rift valleys), considerados por muchos autores como los verdaderos grabens.

Llegados a este punto podemos preguntarnos: Si todos los elementos arquitecturales de los Andes del SW de Colombia están separados por fallas de compresión, de dónde proviene esa compresión y cuáles han sido realmente sus efectos?

Ante todo debemos admitir que necesitamos fuerzas laterales-tangenciales.

Desde el siglo pasado se vienen exponiendo a este respecto una serie de hipótesis basadas en la teoría de la contracción de la tierra. Esta teoría se puede considerar actualmente como desacreditada y por lo tanto esas hipótesis no se admiten como solución adecuada al problema de la surrección de nuestros Andes del Sur-Oeste.

Pero en la actualidad se encuentra en pleno apogeo la teoría de la expansión de los fondos oceánicos y de la tectónica de placas.

Según esta teoría comprendemos que en América del Sur, comprimida, por una parte, por la placa oceánica originada en la Dorsal del Atlántico Medio, y que se mueve hacia el Occidente, y, por otra parte, por la Placa de Nazca, que se mueve en subducción hacia el Oriente, produciendo necesariamente una fuerza de componente horizontal, tenemos las fuerzas laterales-tangenciales necesarias para originar una tectónica de compresión.

Hace ya algún tiempo se ha establecido un modelo de subducción para la América del Sur. Este modelo corresponde bastante bien a los datos gravimétricos y sísmicos recientes (Figura 17A).

Según este modelo las fuerzas compresionales necesarias para las tectogénesis del SW de Colombia están proporcionadas por las dorsales del Atlántico Medio y del Pacífico Este (Véase Figura 18).

Teniendo en cuenta este modelo y la existencia de esas fuerzas, podemos ahora explicar satisfactoriamente la surrección de nuestros Andes del Sur por medio de teorías que hace algunos años parecían erradas, pues se les atribuía una causa inadecuada pero que en la actualidad parecen muy razonables.

Se trata de la teoría de la "Cuña" de Chamberlin y de la de las "Cuñas Compuestas" de Migliorini.

"De medidas efectuadas en 1905 en los Apalaches para determinar el estrechamiento de la corteza terrestre se desprende que la masa deformada debe tener la forma de una cuña cuya punta estaría dirigida hacia abajo.

Las observaciones hechas posteriormente en las Montañas Rocosas han confirmado el hecho: en el borde oriental de la cadena las fallas de compresión y el clivaje se inclinan al Oeste; sobre la vertiente occidental se ha observado la disposición simétrica.

El macizo montañoso delimitado por fracturas que buzan hacia el interior de la cadena toma así la forma de una cuña. Tal disposición se observa en muchas regiones plegadas: la teoría de la cuña parece, pues, deber tenerse en consideración para explicar la formación de las montañas.

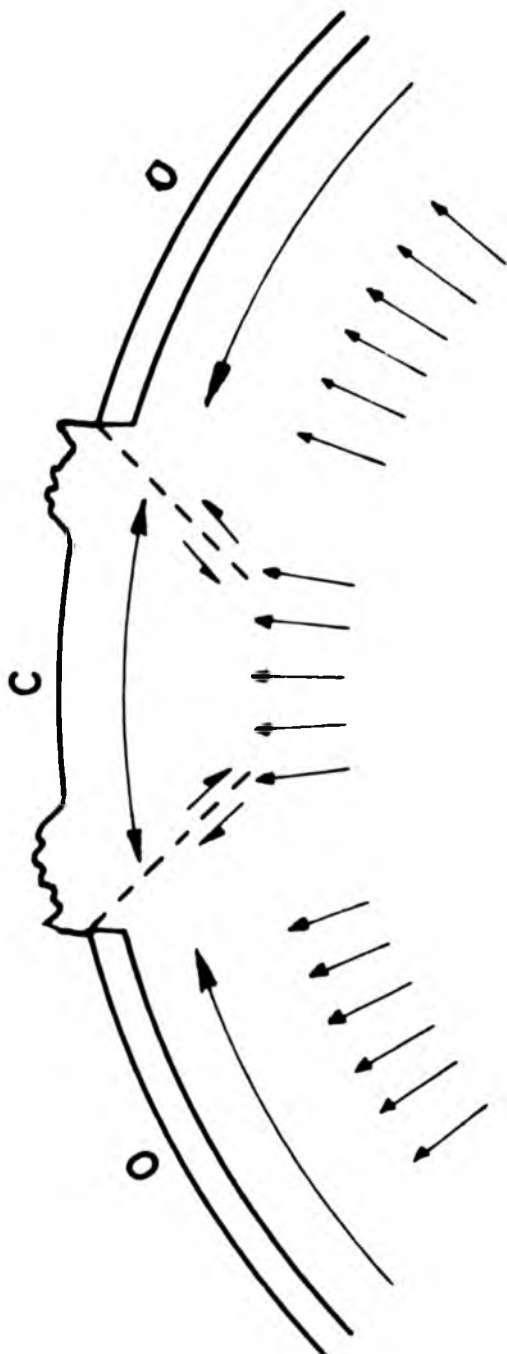
Las experiencias realizadas por Rollin t. Chamberlin en 1917 le han permitido producir estructuras que muestran alguna analogía con la naturaleza tanto por la inclinación de los pliegues hacia el interior de la cadena como por la presencia de fracturas que se inclinan simétricamente hacia el eje de ésta” (Fourmarier, p. 1020) —Figura 24—

Migliorini, estudiando los Apeninos, se dio cuenta de que en las zonas de litología rígida las dislocaciones de encogimiento prevalecen decididamente sobre los plegamientos. El escribe (p. 31): “las que se ven como fallas longitudinales, que allí constituyen el motivo tectónico regional dominante, están agrupadas en haces paralelos o casi, en algunos de los cuales las superficies de deslizamiento tienden a convergir en la base, dando así origen a una superficie de cuñas dispuestas, en sección en... abanico. Estas estructuras, a las cuales en una reciente comunicación a la Sociedad Geológica Italiana propuse dar el nombre de ‘Cuñas Compuestas’..., están solevantadas de modo que forman las cadenas paralelas que constituyen los Apeninos...

...La difusión de las cuñas compuestas en los Apeninos es ...tal que hace excluir que se trate de estructuras excepcionales o fortuitas, e induce a retener que sean, por el contrario, un efecto que normalmente han tenido, en determinados ambientes litológicos, las fuerzas orogénicas apeninas”.

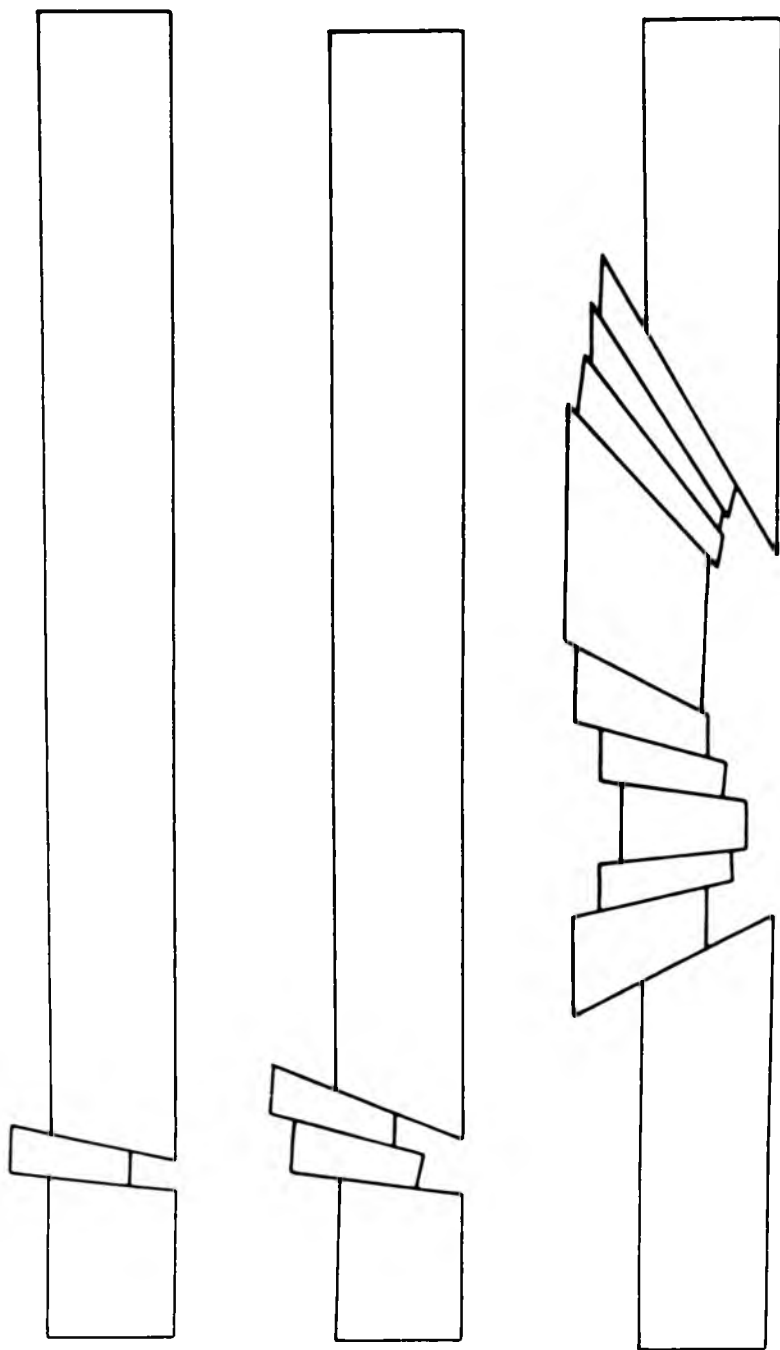
El mismo Migliorini (Ibid.) hace notar que el ambiente litológico y las condiciones tectónicas de los Apeninos no son algo excepcional sino que se encuentran también en otras numerosas cadenas montañosas. Y concluye: “por lo cual es lícito pensar que las cuñas compuestas no sean tampoco una particularidad apenínica, sino que sean, por el contrario, estructuras comunes y que se podrían hallar en otras partes del mundo” (Figura 25).

Es, pues, probable que en nuestros Andes del Sur tengamos una tectónica esencialmente comprensiva, que se manifiesta en una fracturación en bloques según el modelo de las cuñas compuestas de Migliorini (Figura 26).



**Figura 24:** Formación de los Continentes y de los Océanos en la Teoría de la Cufía. Según Fourmarier, 1960, p. 1020. Redibujó Bernardo Barriga.





**Figura 25: Cuñas Compuestas. Según Migliorini, 1949, p. 45. Redibujó Bernardo Barriga.**

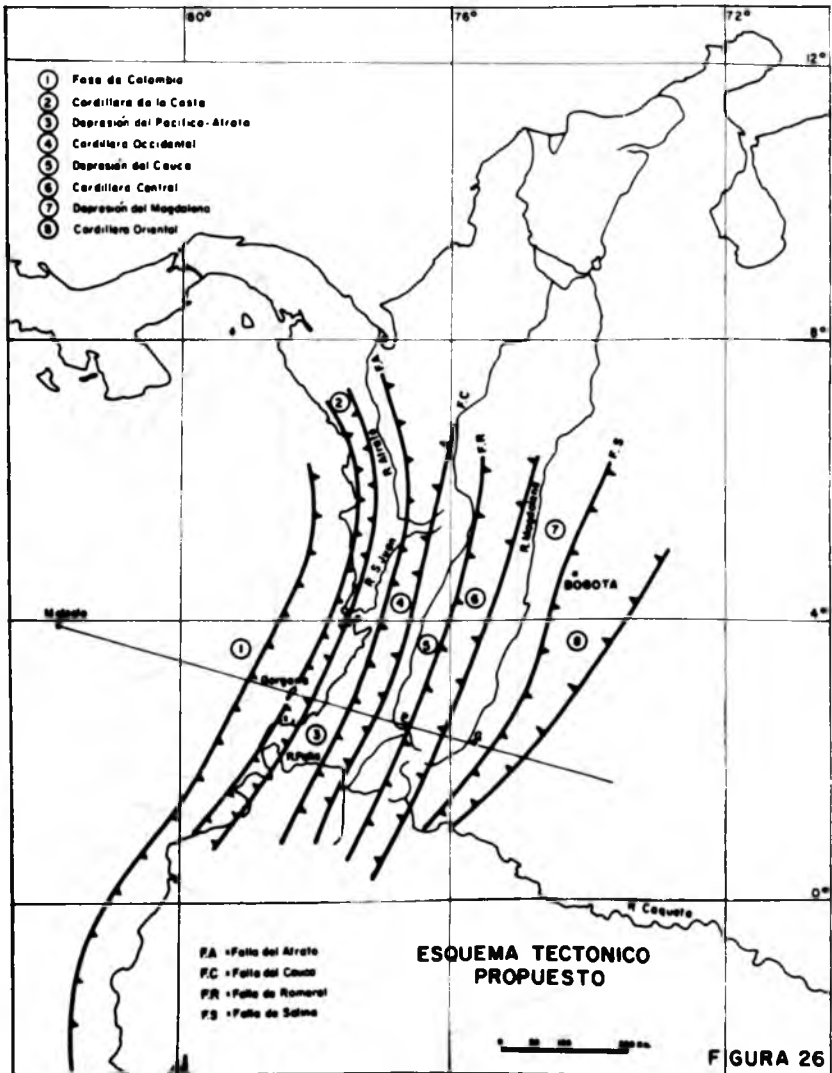


Figura 26: Esquema Tectónico Propuesto. Original. Dibujó Antonio Reyes.

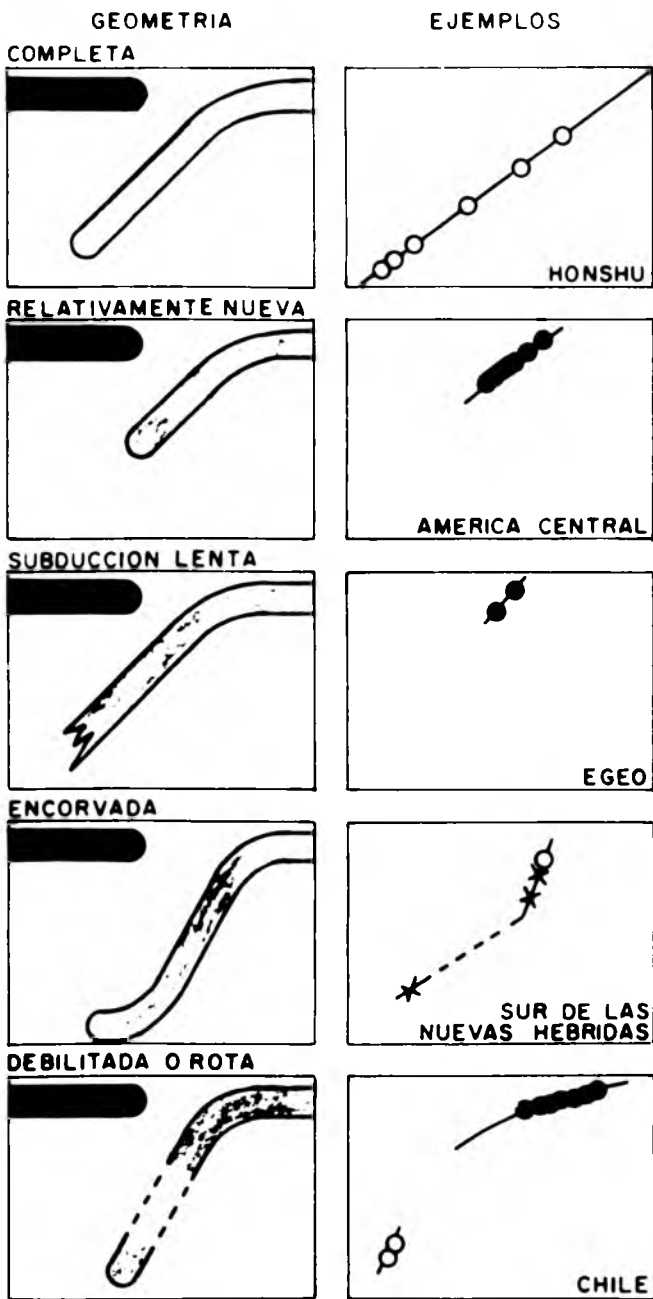


Figura 27: Cinco tipos principales de Placas de Subducción. Según Toksoz, 1975, Continents Adrift. Continents Aground, 1976, p. 117. Redibujó Bernardo Barriga.

## BIBLIOGRAFIA

1. ANDERSON, Don L. 1971. The San Andreas Fault. *Continents Adrift and Continents Aground-Scientific American* — 1976— pp. 87-102.
2. BELLAIR, Pierre; POMEROL, Charles. 1977. *Elements de Geologie*. Armand Colin — Paris— 528 pp.
3. BURK, C. A. Global Tectonics and world resources. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin* Vol. 56 N° 2 Febr. 1972 pp. 196-203.
4. BURKE, Kevin C. and WILSON, J. Tuzo. 1976. Hot Spots on the Earth's Surface. *Continents Adrift and Continents Aground-Scientific American* — 1976— pp. 58-69.
5. CASE, J. E.; DURAN, L. G.; LOPEZ, A. MOORE, W. R. 1971. Tectonic Investigations in Western Colombia and Eastern Panama. *Geological Society of America Bulletin*, Vol. 82, N° 10, Oct. 1971. pp. 2685-2712.
6. CASE, J. E.; BARNES, J.; PARIS, Gabriel; GONZALEZ, Humberto & VIÑA, Alvaro. 1973. *Trans Andean Geophysical Profile, Southern Colombia*. Geological Society of America Bulletin, V. 84, p. 2895-2904.
7. CLARK, Sydney P. Jr. 1971. *Structure of the Earth*. Prentice-Hall Inc. New Jersey. 132 pp.
8. COX, A. 1969. Geomagnetic Reversals. *Science*, Vol. 163, N° 3864, Enero 17. pp. 237-245.
9. DEWEY, John F. 1972. Plate Tectonics. *Continents Adrift and Continents Aground-Scientific American* — 1976— pp. 34-45.
10. DIETZ, Robert S. HOLDEN, John C. 1970. La Disgregación de la Pangea. *Deriva Continental y Tectónica de Placas* — *Scientific American*-1976— pp. 154-167.
11. DURAN, L. G. LOPEZ R., Alfonso. 1968. *Ensayo de Interpretación Tectonofísica para Colombia*. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*. Vol. XIII, N° 50. Diciembre de 1968. Pp. 279 285.
12. FOSTER, Robert J. 1971. *Physical Geology*. Carles E. Merrill Edit. Columbus, Ohio. Pp. 526.
13. FOURMARIER, P. 1950. *Principes de Géologie*. 3<sup>e</sup> édition revue et complétée. Tome second. Pp. 869-1523. Masson et Cie. Editeurs, Paris.
14. GOODWIN, Alan M. 1976. Giant Impacting and the Development of Continental Crust pp. 77-95. *En The Early History of the Earth*. Editado por Brian F. Windley. John Wiley Sons. New York. 619 pp.

15. HALLAM, A. 1973. *A Revolution in the Earth Sciences*. Clarendon Press. Oxford. 127 pp.
16. HEIRTZLER, J. R. 1968. *La Expansión del Suelo Océanico. Deriva Continental y Tectónica de Placas* —Scientific American-1976— pp. 76-87.
17. HOLMES, Arthur. 1975. *Principales of Physical Geology. Second Edition Completely Revised*. Nelson London. 1288 pp.
18. HURLEY, Patrick M. 1968. *La Confirmación de la Deriva Continental. Deriva Continental y Tectónica de Placas* —Scientific American-1976— pp. 63-74.
19. LOCZY, Louis de. 1970. *Tectonismo Transversal na América do Sul e suas Relações Genéticas com as Zonas de Fractura das Cadeias Meio-oceánicas*. An. Acad. Brasil. Cienc. (1970), 42(2).
20. LONSDALE, Peter. 1978. *Ecuadorian Subduction Systeme. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, Vol. 62, N° 12, PP. 2454-2477.
21. MATTHEWS, Samuel W. 1973. *This Changing Earth. National Geographic Magazine*. Vol. 143, N° 1 (Enero), pp. 1-37.
22. MEISNER, R. O.; FLUEH, E. R.; STIBANE, F. & BERG, E. 1977. *Dinámica del límite de Placas activo en el SW de Colombia, de acuerdo a recientes mediciones geofísicas. —La transición Océano— Continente en el Suroeste de Colombia. Nariño —Proyecto Cooperativo Internacional— 1973. —Instituto Geofísico— Universidad Javeriana —Bogotá— Pp. 169-198.*
23. MENARD, H. W. 1968. *El Fondo del Océano. —Deriva Continental y Tectónica de Placas— Scientific American —1976— pp. 87-97.*
24. MEYER, R. P.; MOONEY, W. D.; HALES, A. L.; HELSLEY, E. C. 1977.
25. MIGLIORINI, Carlo I. 1949. *I Cunei composti nell'Orogenesi. Bolletino della Società Geologica Italiana*, Vol. LXVII (1948), Roma pp. 29-142.
26. MOLNAR, Peter SYKES, Lynn R. 1969. *Tectonics of the Caribbean and Middle America Regions from focal Mechanisms and Seismicity. Geological Society of America Bulletin*, Vol. 80, pp. 1639-1684.
27. MORET, León. 1949. *Manual de Paléontologie Végétale. Masson et Cie. Editeurs Paris*. 230 pp.
28. OLIVER, Jack. 1972. *Contributions of Seismology to the Plate Tectonics. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*. Vol. 56, N° 2, pp. 214-226. Febr. 1972.
29. OROWAN, Egon. 1969. *The Origin of the Oceanic Ridg:s. Scientific American*, Vol. 221, N° 5, Nov. 1969, pp. 102-119.
30. RAMIREZ, Jesús Emilio S. I. 1975. *Historia de los Terremotos en Colombia. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá*, 250 pp.

31. RONA, Peter A. 1973. Plate Tectonics and Mineral Resources. Continents Adrift And Continents Aground —Scientific American-1976— pp. 207-216.
32. SCHAUFELBERGER, P. 1944. Apuntes Geológicos y Pedalógicos de la Zona Cafetera de Colombia. —Tomo I—. —Federación Nacional de Cafeteros de Colombia—. Imprenta Oficial, Manizales, 295 pp.
33. SEYFERT, Carl K. SIRKIN, Leslie A. 1973. Earth History and Plate Tectonics Harper Row, Publishers. New York. 504 pp.
34. SULLIVAN, Walter. 1974. Continents in Motion. Mc Graw-Hill Book Company. New York. 339 pp.
35. TAZIEFF, Haroun. 1973. Cordilleras, Terremotos y Volcanes. Biblioteca Salvat de Grandes Temas. N° 51. Salvat, Editores, Barcelona, 144 pp.
36. TERMIER, H. G. 1960. Paléontologie Stratigraphique. Deuxieme Fascicule. Masson et Cie. Editeurs —Paris— 220 pp.
37. TOKSOZ, M. Nafi. 1975. The Subduction of the Lithosphere. Continents Adrift and Continents Aground —Scientific American-1976— pp. 112-122.
38. VAN ANDEL, Tjeerd H.; HEAT, G. R. R. ; MALFAIT, Bruce T.; HEINRICH, Donald F. EWING, John I. 1971. Tectonics of the Panama Basin, Eastern Equatorial Pacific. Geological Society of America Bulletin, Vol. 82, pp. 1489-1598.
39. WILSON, J. Tuzo BELOUSSOV, V. V. 1968. Debate about the Earth. A Revolution in the Earth Science Geotimes, Diciembre 1968, pp. 10-22.
40. WOODFORD, A. O. 1970. Geología Histórica. Ediciones Omega S. A. Barcelona 536 pp.
41. WOLLARD, G. P.; HUSSONG, D. M.; KROENKE, L. W. & RAMIREZ, S. J.; J. E. Observación de refracción a través de una estructura clave, desde la isla de Malpelo hasta la Cordillera Occidental de Colombia. Nariño - Proyecto Cooperativo Internacional, 1973. Instituto Geofísico —Universidad Javeriana— Bogotá. Pp. 137-156.
42. WYLLIE, Peter J. 1971. The Dynamic Earth. John Wiley Sons Inc. 416 pp.

**Recopilaciones de SCIENTIFIC AMERICAN:**

Continents Adrift and Continents Aground. 1976. W. H. Freeman and Company. San Francisco. 17 artículos. 230 pp.

Deriva Continental y Tectónica de Placas. 2ª Edición. Editorial Blume, Madrid. 1976. 21 artículos. 271 pp.