

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

PROGRAMA ACADEMICO DE INGENIERIA CIVIL



ORIGEN Y PREDICCION DE SISMOS

**T E S I S**

PARA OPTAR EL TITULO DE:

**Ingeniero Civil**

FERNANDO LINARES ESPINOSA

LIMA-PERU

1 9 7 7

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco al Ing. **ROBERTO MORALES** cuya asesoría hizo posible la culminación de este trabajo.

Asimismo a todas aquellas personas que brindaron su desinteresada ayuda.

# ÍNDICE

	Pag.
CAPITULO I : INTRODUCCION	
1.1 Consideraciones generales.	1
1.2 Extensión y objetivos.	2
1.3 Antecedentes.	2
CAPITULO II : ORIGEN DE LOS SISMOS.	
2.1 Causas de los sismos.	8
2.2 Teoría de enfriamiento de la tierra.	9
2.3 La movilidad de la corteza terrestre	10
2.3.1 Deriva continental.	11
2.3.2 Expansión del suelo oceánico.	18
2.3.3 Tectónica de placas.	25
2.3.4 Consecuencias y ejemplos.	29
2.4 La evolución de los andes.	33
2.5 Análisis.	46
APENDICE "A": FIGURAS.	
CAPITULO III: FUNDAMENTOS PARA PREDECIR SISMOS.	
3.1 Experiencias previas.	50
3.2 Fenómenos precursores.	53
3.2.1 Deformaciones de la corteza.	55
3.2.2 Anomalías en la relación $V_p/V_s$	58
3.2.3 Anomalías en la resistividad eléctrica y en la emisión de radón.	60

	Pag.
3.2.4 Otros tipos de anomalías.	64
3.3 Modelos teóricos.	65
3.3.1 La dilatación con difusión de líquidos.	66
3.3.2 La dilatación sin difusión de líquidos.	73
APENDICE "B": FIGURAS.	
CAPITULO IV APLICACIONES DE LA PREDICCIÓN DE SISMOS.	
4.1 Análisis estadístico y clasificación de precursores.	79
4.2 El modelo chino.	84
4.3 Estudios para predecir sismos en el Perú.	93
APENDICE "C": FIGURAS.	
CAPITULO V CONCLUSIONES	
BIBLIOGRAFIA.	

# CAPITULO I

## INTRODUCCION

### 1.1 CONSIDERACIONES GENERALES

A partir de los últimos años de la década del 50 y en años posteriores, los conceptos sobre el origen de la tierra y de los continentes han sufrido una transformación que podríamos calificar de revolucionaria.

El origen de los sismos fue siempre uno de los puntos más oscuros de nuestra ciencia, y siempre ha sido analizado en una forma erudita y teórica.

Como **ingenieros** civiles somos responsables de proteger a la sociedad de los embates de la naturaleza. Y creemos que es nuestro deber estudiar profundamente el medio en que vivimos y nos desarrollamos para así actuar de manera adecuada en nuestra misión de preservar a la sociedad.

Hasta el presente, la obtención más útil que nos ha dado la sismología, es el mapa de regionalización sísmica, el presente trabajo trata que la utilidad de la sismología sea mayor, en el sentido de previsión, procurando encontrar aplicaciones prácticas para una predicción más exacta de sismos, lo que nos permitiría dar un

servicio muy valioso a la comunidad.

## **1.2 EXTENSION Y OBJETIVOS**

El presente trabajo, hace una reseña de lo que creemos es el origen de los sismos. Y explicamos como se llevó a cabo la revolución de conceptos, tomamos estos nuevos conceptos como guías para establecer una estrategia para analizar la factibilidad de un programa de predicción de sismos en el Perú, siguiendo el ejemplo de otros países que tienen problemas sísmicos y que han podido hacer algunas predicciones, como en el caso de los japoneses, rusos, chinos y norteamericanos.

Para alcanzar nuestros objetivos ha sido necesario apelar a una notable variedad de disciplinas científicas, de las que se dará breve reseña en el momento oportuno.

## **1.3 ANTECEDENTES**

La teoría tradicional de una tierra rígida sostiene que ésta en un principio caliente, está ahora enfriándose, llegando a ser rígida en una época temprana y que la contracción resultante del proceso de enfriamiento crea fuerzas de compresión que, a intervalos, hace surgir montañas a lo largo de los débiles márgenes continentales o en las profundas cuencas rellenas de sedimentos. Este punto de vista, sugerido por primera vez por Isaac Newton, fue establecido cuantitativamente en el siglo XIX para ajustarse a las ideas que entonces prevalecían.

Sin embargo, hace algún tiempo, los geólogos se vieron sorprendidos por las semejanzas de las **formaciones** rocosas descubiertas en Africa del Sur, el Dekkán, Madagascar y Brasil, y algunos de ellos formularon la hipótesis de un continente primitivo: El Gondwana. Los primeros estudios de la geología antártica les incitaron a atribuir una parte del continente austral al Gondwana. En diciembre de 1969, se descubrió en la antártida (Montes Alejandra) el cráneo de un listrosauro, este es un reptil que se supone que vivió a principios del período secundario, hace 230 millones de años. Fósiles análogos había sido encontrados en Africa del Sur y en Australia. Existen similitudes evidentes entre las floras fósiles de la Antártida y Africa del Sur, de Australia y de América del Sur. Y el carbón de la Antártida procede de fósiles que hacen pensar en un clima ecuatorial.

El paleomagnetismo es el estudio de la dirección y la intensidad del magnetismo en las rocas. La importancia de esta magnetización estriba en que está orientado en el sentido del campo magnético terrestre en la época del enfriamiento. En una roca sedimentaria se halla pues, contenida la indicación del campo magnético terrestre en un período dado.

Al proseguir en Europa los estudios sobre formaciones rocosas cada vez más antiguas, se descubrió que, cuanto más viejas son las rocas, nos dan posiciones del polo magnético más alejadas de la del polo geográfico ac

tual. Ciertas rocas de hace cuatrocientos millones de años nos dan posiciones del polo magnético más alejadas de la del polo geográfico actual. Ciertas rocas nos dan un polo situado en el ecuador. Así, pues, los polos, o los continentes han cambiado de sitio.

El estudio de las rocas de una misma época en continentes diferentes debería darnos igual posición para el polo. Sin embargo, los experimentos dieron un resultado distinto: en vez de coincidir, los polos paleomagnéticos de América del Norte se inclinan sistemáticamente al Oeste de los de Europa. Esto sólo tendría explicación si América del Norte se hubiese desplazado hacia el Oeste, en relación a Europa. Lo cual nos lleva de nuevo a la teoría del deslizamiento de los continentes.

De manera parecida, los antiguos polos de los continentes australes no coinciden con los polos del hemisferio Norte. Pero existe una diferencia: otros elementos permiten suponer que las tierras del hemisferio Sur se separaron más que las del hemisferio Boreal.

Las direcciones de magnetización tomadas de piedras sedimentarias de Africa Central sitúan el polo Sur en la República Sudafricana. Datos análogos observados en Australia sitúan aquel mismo polo, en igual período, en la parte meridional de Australia. Si estas indicaciones proporcionadas por Africa y Australia sobre la posición del polo Sur, hace 300 millones de años, son exactas, Australia debía encontrarse situada en aquél enton-

ces, un poco al Norte y junto a la costa este de Africa del Sur. Eso confirmaría la teoría de que hace trescientos millones de años, las tierras formaban una sola masa.

En 1963 Hess y Díez presentaron una hipótesis según la cual, bajo la arruga medio-oceánica existen levantamientos en el manto de la tierra.

Se formaría una nueva corteza sobre la cima de esta línea de crestas, mientras que la antigua corteza sería absorbida por las depresiones marinas. De este modo, el fondo del océano, situado entre las cadenas y las depresiones, se desplazarían progresivamente.

La idea de expansión de los fondos submarinos es relativamente reciente, y los indicios obtenidos en este campo constituyen uno de los elementos más sólidos de la cadena de pruebas que tienden a demostrar la movilidad de la corteza terrestre.

Si se crea una nueva corteza al nivel de las cadenas, es preciso que la corteza más antigua se destruya en alguna parte, a fin de que la Tierra conserve siempre la misma superficie. Según la hipótesis de la expansión del fondo submarino, esta corteza se destruye en el emplazamiento de las depresiones oceánicas.

En lo que respecta a la violencia y a la frecuencia de los temblores de tierra, el sistema de depresiones oceánicas es la zona más activa del globo. En estas regiones, los terremotos son corrientes e importantes.

Además es en aquellas depresiones donde ocurren los sismos más profundos que conocemos.

El Perú se encuentra situado precisamente frente a una depresión oceánica que pasa a unos 60 km. de distancia, en el mar, a lo largo de toda la costa. Siendo remecido constantemente por terremotos de diferentes magnitudes.

Es por esa razón que surge la necesidad imperiosa de establecer un sistema que permita anunciar los terremotos con la anticipación suficiente de tal manera que nos encuentre prevenidos. Ya que uno de los defectos más destructivos de un terremoto es el factor sorpresa.

Felizmente, las investigaciones han demostrado que un sismo antes de producirse da algunas señales. Los japoneses se han hecho famosos por los estudios de temblores superficiales en la región de Matsushiro. Hasta hicieron una película en la que demuestran como un sismo anunciado con un mes de anticipación, de magnitud más que mediana produce sus efectos. El origen de los sismos se debe allí a una larga falla activa de la corteza terrestre que se estudia en todos sus detalles. Las maestras de escuela salen todos los días a medir cuantos milímetros o décimas de milímetro se ha desplazado un bloque de la corteza terrestre con respecto a otro, midiendo el movimiento sobre dos placas de cemento colocadas previamente a ambos lados de la falla.

Los soviéticos y norteamericanos se atribuyen los preanuncios de temblores de Garm y de Blue Mountain Lake, atribuyendo éstos a cambios de velocidades en las ondas primarias y secundarias.

Los sismólogos han identificado un cierto número de fenómenos geofísicos anunciadores de terremotos tales como deformaciones mecánicas de la corteza terrestre, anomalías de ondas primarias y secundarias, aumento de la conductividad terrestre. Este método se utilizó hace poco para predecir un temblor en Kamchatka. Mencionan también cambios en la composición química de aguas tomadas en pozos profundos; anotando en particular la emisión de gases como argón y radón como efecto de las tremendas presiones experimentadas por las rocas antes del temblor. A este método se atribuye el aviso con varias semanas de anticipación de dos distintos temblores en la región de Tashkent URSS.

En cuanto a la aplicación de estos sistemas como caso especial se puede citar el ejemplo chino que debido a grandes pérdidas en la población **por terremotos** han procurado hacer un sistema expeditivo que ya está aplicándose, y se han atribuido la predicción de los terremotos hasta la fecha de nuestra información (nov. 1975).

Toda esta experiencia organizativa, y un análisis estadístico de fenómenos precursores a nivel mundial nos permitieron hacer un pequeño esbozo para un programa peruano para la predicción de sismos.

## C A P I T U L O    I I

### ORIGEN DE LOS SISMOS

#### 2.1 CAUSAS DE LOS SISMOS

La primera teoría científica que procuró determinar las causas de los sismos, es la que supone que la tierra se contrae gradualmente a medida que su superficie se enfría, y se explica de esta manera: nuestro planeta posee una corteza muy delgada relativamente fría, y una zona interior de gran temperatura (Fig. A-a). La corteza descansa sobre la parte interna del globo, y cuando esta se encoge, por enfriamiento, deja sin punto de apoyo ciertas partes de dicha corteza, las cuales quedan expuestas a hundirse o agrietarse (Fig. A-2).

En la actualidad se considera que la corteza terrestre se desplaza continuamente, debido a que está constituida por cierto número de placas tectónicas, cada una con movimiento propio. Cuando dos de ellas se encuentran, se produce acumulación de energía elástica, dando así origen a los sismos por la liberación de esta energía.

En este capítulo, analizaremos principalmente la validez de la movilidad de la corteza terrestre como

causa de los sismos, y para tener un punto de partida, a analizaremos brevemente la teoría ortodoxa del enfriamiento de la tierra.

## **2.2 TEORIA DEL ENFRIAMIENTO DE LA TIERRA**

Esta teoría, considera que la tierra nació hace 2,000 millones de años a consecuencia de una gigantesca lengua desprendida del Sol, por la acción de una estrella que pasó por sus cercanías.

La evolución de esa lengua solar dió origen a todos los planetas que hoy forman parte del sistema solar. Como consecuencia, la tierra en un principio fue una enorme bola de fuego ardiente en estado gaseoso. Alejada del Sol, la tierra empezó a enfriarse en forma rápida, pasando del estado gaseoso al líquido. Durante esta época, los materiales que la formaron se distribuyeron en capas de acuerdo a sus densidades: los materiales más pesados pasaron a ocupar la parte central y los más livianos la parte superficial. El proceso de enfriamiento continuó con mucha rapidez y pronto la capa superficial formó una costra o corteza sólida.

Sin embargo, a medida que la corteza sólida iba aumentando su espesor por la continua solidificación, el proceso de enfriamiento se iba haciendo más lento. Una capa cada vez más gruesa iba separando el núcleo interior, a gran temperatura, del exterior, y así se hacía cada vez más difícil la pérdida del calor inicial. Se supone que

durante los últimos dos millones de años la temperatura de la Tierra ha quedado prácticamente invariable.

Como consecuencia del enfriamiento se formaron las cadenas de montañas, y se suele dar como ejemplo la manzana que se seca arrugándose.

De acuerdo a esta teoría, los geólogos calculan que hubo cinco épocas de grandes plegamientos, durante los cuales se han formado las cadenas montañosas.

Un detalle bastante importante como veremos posteriormente en las siguientes teorías, es que los volcanes se encuentran generalmente cerca al mar; la presente teoría no correlaciona este hecho con ninguna explicación.

### **2.3 LA MOVILIDAD DE LA CORTEZA TERRESTRE**

Durante los cuatro siglos que han transcurrido desde que, por primera vez fueron cartografiadas las costas del Atlántico, muchos observadores, como Francis Bacon, Placet y Buffon, han debatido diversas teorías sobre su formación. Algunos incluyendo a Von Humbolt, señalaron la similitud de formas de las costas opuestas de Africa y América del Sur. Los comentarios de estos hombres eran vagos y cortos; sin embargo, no fue hasta 1858 en que un francés, A. Snider, expuso con claridad de que los continentes, en otro tiempo, habían estado ajustados unos a otros, formando un único supercontinente, y en consecuencia, desde entonces se habían estado separando. Pocos comprendieron como los continentes podían haberse mo

vido a través de un suelo oceánico de roca sólida, y la mayoría ignoró las ideas de Snider.

Entre 1910 y 1914, Frederick B. Taylor, H. D. Baker y Alfred L. Wegener **propusieron** una hipótesis de deriva continental muy similar a la actual.

"Yo mismo empecé mis investigaciones con la intención de demostrar que la teoría de Wegener era absurda", declaró en 1969 Patrick M. Hurley, profesor de geología del M.I.T. Pero ante el cúmulo de hechos recientemente descubiertos, reconoció que el sabio alemán tenía razón en lo esencial. Los continentes cambian de sitio.

### **2.3.1 Deriva Continental**

A principios del siglo XX el geólogo austriaco Eduard Suess agrupó a todos los continentes en una única masa de tierra gigantesca que llamó Gondwana (Gondwana es una provincia de gran importancia geológica situada en la parte centro oriental de la India).

Como consecuencia de este hecho fue lanzada la primera teoría general sobre la deriva continental por el meteorólogo Alfred Wegener en 1912. Argumentó que si la tierra podía deslizarse verticalmente en respuesta a fuerzas verticales, también podría hacerlo lateralmente. En apoyo de un primitivo acoplamiento diferente de las masas de la Tierra, él fue capaz de aportar un asombroso número de estrechas afinidades de fósiles, rocas y estructuras en los lados opuestos del Atlántico que sugerían

según él, que encajaban igual que las líneas impresas de los bordes de dos trozos de un periódico roto cuando se juntan de nuevo. De acuerdo con Wegener, todos los continentes han estado unidos en un único supercontinente hace 200 millones de años, con los continentes del Hemisferio Norte desplazados hacia el este y encajados contra las costas occidentales de Europa y Africa, y con los continentes del Hemisferio Sur agrupados en la parte sur de esta Pangea. Bajo la acción de fuerzas asociadas con la rotación de la Tierra, los continentes se rompieron y se pararon abriendo los océanos Indico y Atlántico.

Una analogía intercontinental impulsó a J. Tuzo Wilson a publicar una investigación (1963). Una enorme falla de gran antigüedad secciona Escocia a lo largo de Great Glen, en las Caledónicas. En el lado oeste del Atlántico pudo demostrar que una línea de fallas bien conocidas, estaba asociada a otra enorme falla de la misma antigüedad. "La falla Cabot", que se extiende desde Boston hasta el norte de Terranova. Estas dos grandes fallas son mucho más antiguas que la cordillera submarina y el "rift" descubierto recientemente en el fondo del Atlántico, que demuestra ser una formación reciente. Las dos fallas serían una sola si la reconstrucción de Wegener u otra parecida fuese correcta.

Una de las primeras ayudas a la comprensión del mecanismo que moviera continentes, apareció hace más de treinta años con la aplicación a los suelos oceánicos de

las sensibles técnicas de la gravimetría que han establecido la regla del equilibrio hidrostático o isostasia en los continentes. El geofísico holandés Félix A. Vening al hacer mediciones gravimétricas en las fosas del Pacífico encontró graves deficiencias de gravedad llegando a la conclusión que la isostasia no actuaba en las fosas. Alguna fuerza que allí actuaba atraía a la corteza dentro de las profundidades de las fosas con más fuerza que la gravitatoria.

Arthur Holmes, de la Universidad de Edimburgo y D. T. Griggs se animaron con estas observaciones a re-examinar y restablecer con términos modernos una vieja idea de los geofísicos: que el interior de la tierra está en estado de convección térmica extremadamente lenta, girando de la misma manera que lo hace el agua cuando es calentada en una cacerola. Demostraron que las corrientes de convección eran necesarias para explicar la transferencia de calor que venía del interior de la tierra a través del material poco conductor del manto; la región que se encuentra entre el núcleo y la corteza. Las fosas, decían, indican los lugares donde las corrientes en el manto descienden otra vez dentro del interior de la tierra, atrayendo hacia abajo el suelo oceánico.

Las corrientes de convección en el manto juegan ahora el papel principal en cada discusión sobre los procesos a gran escala y larga duración que se producen en la tierra. Si bien, su evidencia es indirecta. Pero

de todas maneras se puede juzgar muy probable que funcionen corrientes de convección en la tierra.

Según J. Tuzo Wilson (1963), si se puede aceptar que el continente Mesozoico propuesto existió y se expansionó, la geología suministra cierta guía de la historia de su fragmentación. El sistema actual de corrientes de convección parece que ha sido constante en su configuración general desde el Mesozoico, aunque no todas sus partes son igualmente activas durante todo este tiempo. Un poco antes del comienzo del cretácico, hace unos ciento veinte millones de años, el continente desarrolló un "rift" que se abrió para formar el actual océano Atlántico. El "rift" se extendió más ampliamente en el sur, con el resultado de que los continentes han debido girar ligeramente alrededor de un vértice cercano a las islas de Nueva Siberia. Los geólogos soviéticos han encontrado que la compresión y levantamiento que elevó las montañas de Verkhoyansk, a través del este de Siberia, comenzó aproximadamente en este tiempo. Hacia el sur, una continuación del "rift" separó Africa de la Antártida y se extendió diagonalmente a través del océano Indico, abriendo el "rift" noreste. Africa y la India se movieron entonces hacia el norte, desde las tierras todavía intactas de Australia y la Antártida.

Parece razonable sugerir, particularmente según la geología de las montañas de Verkhoyansk y de Islandia, que a principios del Terciario, aproximadamente

hace 60 millones de años, este sistema de convección empezó a ser activo y el desarrollo del rift empezó en otra parte. Un nuevo rift se abrió a lo largo del otro, en una diagonal noroeste en el océano Indico, separando África de la India y Australia de la Antártida. Con la colisión del subcontinente Indico contra la plataforma sur de la tierra asiática, comenzó la ascensión de las montañas del Himalaya. La propuesta actividad sucesiva de dos cordilleras principales en el océano Indico puede explicar por qué la India se ha movido dos veces más lejos hacia el norte con relación a la Antártida de lo que lo ha hecho Australia o África, y por qué la cordillera nor-oriental es un accidente algo borroso en el suelo oceánico.

El rift más moderno en el océano Indico parece haberse extendido a lo largo de la cordillera del Pacífico Este y de la cordillera de Cocos, a través del Caribe. Una rama también pasa al sur de Sudamérica. Como estas cordilleras centrales han continuado ensanchándose, han sido forzadas por su crecimiento a emigrar hacia el norte, formando grandes cizallas, a lo largo de la costa de Chile y a través de California. Según esto, una hipótesis puede ser establecida con la idea de que cada cordillera centro-oceánica termina anormalmente en una gran falla o un punto de giro, como en el caso de las islas de Nueva Siberia.

Hace unos pocos millones de años decreció la

actividad de este sistema, permitiendo a los continentes de Norte y Sudamérica unirse por el Istmo de Panamá. El rift del Atlántico ha vuelto a ser ahora otra vez más activo, produciendo nuevas elevaciones en las montañas de Verkhoyansk y actividad volcánica en Islandia y en las otras cinco islas todavía volcánicas del Atlántico. Otra vez el modelo del rift en el océano Indico ha sido alterado. La distribución de los recientes terremotos demuestra que la mayor actividad, se extiende a lo largo de la mitad occidental de cada cordillera diagonal, desde el Atlántico Sur a la entrada del mar Rojo, desde allí por dos brazos a lo largo del rift del valle del río Jordán y a través de los rifts de los valles africanos, donde da la impresión de que ha comenzado la ruptura de un continente.

Los rifts que se extienden actualmente corren todos de norte a sur o al nordeste, de forma que la compresión dominante este y oeste de la corteza exterior es absorbida por fracturación y hundimiento de la corteza a lo largo de los lados oriental y occidental del cinturón de fuego del Pacífico. Por esta razón, el este de Asia, Oceanía y Los Andes son las regiones más activas del mundo. La presión dirigida al oeste de la porción del Atlántico Sur de la cordillera centro Atlántica, ha forzado al bloque continental de Sudamérica contra y sobre la fosa oceánica a lo largo de la costa del Pacífico. Las corrientes dirigidas hacia el nor-oeste, bajo el suelo del Pacífico, han sumergido las fosas bajo los ocho arcos in

sulares alrededor del oeste y norte del Pacífico, desde el norte de Filipinas a las Aleutianas, Incluso en la superficie del Pacífico, la dirección del movimiento subcortical está indicado por la dirección de varias cadenas paralelas de islas volcánicas, tales como las de Hawaii, que se puede pensar que se han elevado como burbujas en una corriente procedente de este movimiento lento y más profundo que viene del interior. Estas cadenas corren paralelas con la actividad sísmica de las fallas de cizallamiento que bordea cada lado del Pacífico, a lo largo de la costa de Norteamérica y desde Samoa a las Filipinas. La compresión ejercida por la cordillera centro-oceánica es absorbida a través de los Mares del Sur, con menos actividad sísmica, a lo largo de una línea desde Nueva Zelanda, a través de Indonesia, y desde las alturas del Himalaya hasta los Alpes Europeos. En todos los casos, el ángulo del plano en que están localizados los focos de terremotos profundos, parece que se hunde en la tierra, siguiendo la dirección de la corriente subsuperficial hacia el este y hacia abajo, por ejemplo, en la costa del Pacífico de Sudamérica y hacia el oeste y hacia abajo en los arcos insulares en el lado opuesto del Pacífico.

Según Patrick M. Hurley (1968). Las recientes investigaciones llevadas a cabo en la Antártida demostraban que todavía no se había formado antes de finalizar el Pérmico. Solamente existía la parte este de la antártida incluyendo los grandes sistemas de rocas plegadas

que forman los Montes transantárticos. Estos están formados por dos geosinclinales o fosas rellenas de sedimentos: el interno Eopaleozoico y el externo Paleozoico. El interno incluye sedimentos finales del Precámbrico y principios del Cámbrico, que fueron plegados e instruidos por rocas igneas durante el Cámbrico Superior o en los primeros tiempos del Ordovínico (hace unos 500 millones de años). Por lo tanto, éste tiene una edad parecida al resto del continente de Gondwana. Esto viene señalado por el fósil cámbrico "Archaeocyata", organismo que formaba en aquél entonces arrecifes barreras.

### **2.3.2 La Expansión del Suelo Oceánico**

El largo debate suscitado sobre la deriva continental, fue la causa por la cual se sembró la inquietud investigadora que llevó al descubrimiento de la expansión del suelo oceánico. Los datos aportados por la evidente concordancia en sus formas, en sus estructuras geológicas y su paleontología entre varios continentes y el resultado de los estudios llevados a cabo en los últimos veinte años sobre el paleomagnetismo fosilizado en las rocas volcánicas, han sugerido que los continentes se han desplazado en el curso de millones de años, hasta sus actuales posiciones a partir de otras diferentes. La posibilidad de que estos desplazamientos se hayan realmente producido, empezaba a ser cada vez más considerada como cierta, pero no está aún aclarado que fuerzas han sido la causa del movimiento de estas grandes masas de

tierra sobre la superficie del globo.

Alrededor de 1960, Harry H. Hess, de la Universidad de Princeton, sugirió la idea de que el suelo del océano quizás pudiera estar en movimiento. El, propuso una especie de movimiento convectivo que forzaba material desde el interior de la tierra hacia las zonas más superficiales, a través y a lo largo de los ejes de las cordilleras centro-oceánicas, extendiéndose sobre el suelo oceánico y desapareciendo en las fosas cercanas a los bordes continentales (Esta hipótesis era particularmente atrayente para el caso del océano Pacífico, el cual está bordeado de fosas, pero era poco satisfactoria para otros océanos que carecen de ellas).

Por este mismo tiempo, Ronald G. Mason, Arthur D. Raff y Víctor Vacquier, de la Scripps Institution of Oceanography, descubrieron que el suelo de la costa oeste de América del Norte mostraba un modelo de bandas, notablemente regular, de las variaciones en la intensidad magnética. El modelo sugería la existencia de grandes cuerpos magnéticos de forma filiforme orientados norte-sur y desplazados a intervalos por claras distintas líneas que forman un ángulo recto con las bandas. No había estructuras geológicas conocidas que pudieran explicar tal modelo. En 1963, después de haberse detectado un cuerpo magnético claro en el mismo eje de la cordillera centro-oceánica, F. J. Vine y D. H. Matthews, de la Universidad de Cambridge propusieron una prueba convincente para de-

mostrar la hipótesis emitida por Hess. Estaría basada en el descubrimiento que entonces se estaba confirmando con todo detalle, de que el campo magnético terrestre se había invertido de sentido un determinado número de veces a lo largo de los pasados tiempos geológicos. Ellos pensaban razonadamente, que las rocas fundidas que eran expulsadas por la sutura a lo largo del eje de la cordillera centro-oceánica, se magnetizaban en la dirección del campo magnético y al solidificarse se "fosilizaba" en las rocas esta dirección. Si se expulsaban nuevos materiales a lo largo de esta misma sutura centro-oceánica, al solidificarse nuevamente, quedarían también con la dirección del campo magnético entonces establecido, con lo cual se formarían bandas magnéticas alternadamente, según el campo fuera "normal" o "inverso". Todo esto podía ser detectado por un magnetómetro dispuesto en un barco que navegaba a través de los océanos, el cual señalaría estas anomalías magnéticas positivas o negativas sobre el campo magnético normal de la tierra.

En 1963 J. R. Heirtzler y colaboradores del Lamont Geological Observatory de la Universidad de Columbia y la Oficina Oceanográfica naval de los Estados Unidos, fueron encargados de un detallado estudio de la cadena Reykjanes, en el segmento de la cordillera centro-oceánica al sur de Islandia, donde se conocían grandes anomalías magnéticas. Comprobaron que las anomalías magnéticas eran lineales y dispuestas simétricamente según el eje de la cordillera centro-oceánica. Lo que apoyaba

considerablemente la idea del desplazamiento del suelo oceánico a partir de la cordillera submarina y la formación de anomalías magnéticas tales como Vine y Matthews habían supuesto.

Después de 1965 se reveló un modelo mundial referente al desplazamiento del fondo del océano, y este modelo tiene sentido, puesto que se ha construido en base a una extensa variedad de observaciones. También con él pueden ser explicados los terremotos que se producen en algunas zonas. El modelo establece además, una detallada relación cronológica de las inversiones del campo magnético a través del tiempo, así como la dirección y valor de la deriva continental.

Las masas rocosas magnetizadas del fondo del océano, nos han suministrado una asombrosa y completa historia sobre las inversiones del campo magnético terrestre, que llega desde la actualidad hasta el período cretácico, es decir, hasta hace unos 76 millones de años. Empezaremos con la escala de tiempo que ha sido establecida por los trabajos de la Universidad de Stanford y la U. S. Geological Survey, los cuales correlacionaron el magnetismo y los datos sobre la edad absoluta, obtenidos por métodos radioactivos, de las muestras de rocas con una edad no superior a 3.5 millones de años. Por comparación de edades, han encontrado cambios específicos del campo geomagnético relacionados con la distancia de las correspondientes anomalías, al eje de la cordillera cen

tro-oceánica. Con esto, se pudo ampliar las observaciones de Vine y Wilson a la mayor parte del suelo oceánico y se pudo determinar la velocidad con la que el suelo se expande en los diferentes océanos.

Los valores encontrados para esta velocidad son diferentes según las distintas secciones de la cordillera, pero parecen ser notablemente constantes en algunas áreas a lo largo del tiempo. Estos valores varían desde un poco más de 1 cm. a más de 5 cm. por año, alejándose de los ejes de expansión. Aunque estos valores del movimiento nos pueden parecer muy pequeños, son grandes en consideración a la escala de tiempos geológicos. Su magnitud sorprendió a los geofísicos cuando las compararon con el deslizamiento que habían observado a lo largo de la falla de San Andrés, que es una manifestada zona de fractura situada al sur de California.

Suponiendo que existe un valor constante de expansión y sobre esta hipótesis podemos asignar valores a las inversiones del campo geomagnético para tiempos más lejanos que los 3.5 millones de años. Esta extrapolación del valor de expansión puede no parecer justificada en un principio, pero está resguardada por los datos obtenidos en todos los océanos y por otros datos geofísicos, tales como la datación radioactiva o paleontológica de las muestras recogidas. Dentro de los probables errores de método no hemos encontrado discrepancias. Se han encontrado 171 inversiones en el campo magnético terrestre

durante los últimos 76 millones de años y se cree que los datos obtenidos para cada caso son completamente exactos. En general, la evidencia de la exactitud de la escala cronológica es tan firme que puede ser utilizada, a su vez, para el estudio de las variaciones de la expansión a lo largo del tiempo en áreas donde no hay gran deformación.

El intervalo promedio de magnetización normal (es decir cuando el campo magnético estaba orientado como lo está hoy) da un valor de 420,000 años, y el intervalo promedio "inverso" es de 480,000 años. Estos valores medios indican que la tierra puede, con igual probabilidad, encontrarse tanto en una situación como en otra. La actual situación considerada como de polaridad normal, ya viene teniendo una duración de 700,000 años. ¿Estamos destinados pues a un próximo cambio? Solamente el 15 por 100 de los intervalos con polaridad normal han tenido una duración mayor que el actual, e incluso algunos de ellos tuvieron según parece, una duración de tres millones de años. Los intervalos más cortos parecen haber sido menores a 50,000 años, pero habremos de decir que dados los errores que tienen los métodos de datación de edad absoluta, resulta difícil confirmar datos para períodos relativamente breves en relación con la escala geológica de tiempos.

Los movimientos del suelo oceánico a que nos hemos venido refiriendo son, en valor y dirección, los que se consideran para la deriva continental. Los testi

monios, tanto de índole topográfica como geológica, han puntualizado la probable existencia hace 200 ó 300 millones de años de una única gran masa de tierra en el Hemisferio Meridional denominada Gondwana. Que comprendía África, India, Sudamérica, Australia, Nueva Zelanda y la Antártida; así como en el hemisferio Septentrional, había otra gran masa denominada Laurasia. Las posiciones de los actuales continentes con respecto a esos grandes continentes no están claramente establecidas aún, y todavía no han podido trazarse en detalle la secuencia de acontecimientos que sucedieron en su separación.

Las lineaciones magnéticas que se observan en el centro de los océanos pueden servirnos como huellas de esos continentes, señalándonos sus respectivas posiciones antes que llegaran a su actual localización. Se ha descubierto que estos lentos, pero constantes y prolongados desplazamientos, son suficientes para separar Sud-américa de África -con la formación del océano Atlántico Sur- en un tiempo de unos 200 millones de años, y Australia de la Antártida en alrededor de 40 millones de años. Con esto, y dado que muchas zonas del suelo oceánico están detalladas cronológicamente, se puede establecer mucho más exactamente cuando se separaron todos o algunos de los continentes y también cómo y por dónde tuvo lugar este movimiento. Ahora pues, es posible reconstruir la posición original que tuvieron los continentes y las someras plataformas continentales, y tanto más exactamente de forma que los geólogos de campos puedan confrontar

mejor las estructuras geológicas antiguas, y que se separaron cuando tuvo lugar la deriva continental.

### **2.3.3 Tectónica de Placas**

El concepto de la expansión del suelo del océano no se ha emparejado en la actualidad con la antigua idea de la deriva continental, y se han unido para constituir un solo cuerpo conceptual, al que se ha denominado la Teoría de la Tectónica de placas. La parte geométrica de esta teoría nos hace ver a la Litósfera, o capa más externa de la tierra, como constituida por un número de rígidas placas. La parte cinemática de la teoría sostiene que las placas están en continuo movimiento relativo que puede conseguirse por: que las dos placas se deslicen una junto a la otra, o bien ambas pueden llegar a converger, en cuyo caso una de las dos se destruye.

Tras estas consideraciones veamos ahora cómo varios hechos observados y relacionados con la inestabilidad de la corteza terrestre pueden ser vistos a la luz de la teoría de la tectónica de placas.

Según John F. Dewey (1972), la mayor parte de los terremotos tienen lugar en estrechas zonas que se unen y forman una malla continua que limita regiones en las que la sismicidad es poco activa. Esta red sísmica está asociada con una variedad de rasgos característicos tales como "rift valleys", cordilleras oceánicas, cadenas orogénicas y profundas fosas oceánicas. Estas áreas

sísmicas marcan, precisamente los límites entre las placas las cuales son las zonas que están extentas de los efectos sísmicos. Han podido diferenciarse cuatro tipos de zonas sísmicas, pudiéndose distinguir unas de otras por sus características morfológicas y geológicas.

El primer tipo está representado por zonas estrechas con gran emanación de flujo calorífico y de gran actividad volcánica (con emanaciones basálticas), y que se sitúan a lo largo de las cordilleras centro-oceánicas, donde los sismos tienen sus focos a una profundidad moderada (menos de 70 kilómetros de profundidad). Los ejes de las cordilleras, por supuesto, son los lugares activos a partir de los cuales se produce la expansión del suelo oceánico. En Islandia, en donde la cordillera centro-Atlántida se encuentra por encima del nivel del mar, el valor de la expansión ha podido ser calculado en cerca de dos centímetros por año.

El segundo tipo de zona sísmica está caracterizada por terremotos de profundidad somera y ausencia de fenómenos volcánicos. Unos buenos ejemplos de ello son la región cercana a la falla de San Andrés, en California, y las regiones adyacentes a la falla de Anatolia, al norte de Turquía; a lo largo de ambas han sido medidos desplazamientos paralelos a las fallas.

El tercer tipo de zona sísmica está íntimamente relacionado con las profundas fosas oceánicas, asociadas a su vez, con los sistemas de islas de constitución

volcánica tales como los que se encuentran en el océano Pacífico. Los focos sísmicos en estas regiones son de profundidad somera, intermedia (de 70 a 300 km) y profundos (de 70 a 300 km de profundidad), lo cual está de acuerdo con la idea de que en estas áreas es donde se produce la sumersión de la placa litosférica que franjea la fosa. Y así se tiene que los hipocentros (los puntos de la corteza terrestre donde se produce el sismo) definen una estructura geológica que se inclina hacia el interior de la tierra desde donde está situada la fosa. Esta zona inclinada donde se sitúan los focos sísmicos se ha denominado zona de Benioff, y sobre ella se sitúan las cadenas volcánicas activas y otras formas de variada complejidad.

El cuarto tipo de zona de terremotos está tipificada por la faja sísmica que se extiende desde Birmania hasta el mar Mediterráneo. Está constituida de una ancha y difusa zona continental, dentro de la cual están asociados terremotos que generalmente tienen una profundidad somera, y que a su vez, están relacionados con cadenas de montañas de gran altitud que claramente muestran los efectos de grandes esfuerzos de compresión. En algunas áreas se dan terremotos de profundidad intermedia, tales como las de Hindukush y Rumania. Sin embargo, los focos sísmicos son raros; se han podido localizar en algunos pocos sitios, como por ejemplo, justamente al norte de Sicilia, bajo los volcanes Tirrenienses.

Podemos por tanto, construir un modelo superficial en todo el globo, que esté compuesto por un mosaico de placas, cada una de las cuales muestra uno o más de los tipos de límites anteriormente descritos. En un eje de cordillera oceánica, cuyas placas se separan, se genera nuevo material cortical por una continua acreción de corteza oceánica en los bordes posteriores de las placas. En las fallas de transformación, las placas se desplazan una respecto a la otra y en ellas no se crea ni se destruye material alguno. En las zonas de subducción, una de las placas va desapareciendo y va gradualmente consumiéndose conforme ella se va deslizando hacia el interior del manto superior, bajo y frente al borde de la otra placa.

Además de las seis grandes placas que pueden ser consideradas en todo el mundo, hay otras que varían mucho, en cuanto a su tamaño, de aquellas. Así por ejemplo, la placa Pacífica es prácticamente tan grande como su homónimo océano, si bien existen placas más pequeñas, como la que fundamentalmente viene a coincidir, en sus límites con Turquía. Por otra parte, los límites de las placas no siempre coinciden con los márgenes de los continentes; y así, en efecto, ocurre que hay bordes continentales en los que no se da sismo alguno, ni existen regiones en las que haya fenómenos volcánicos. Es decir, que una placa puede estar constituida en parte por una cuenca oceánica y el resto por un área continental, o bien puede darse el caso de coincidir exactamente con un océano, o bien corresponderse con un continente. Este

hecho llega a ser una de las tradicionales objeciones que se han hecho a la deriva continental, y, en particular, la dificultad mecánica que se deriva de que un geológicamente débil continente pueda desplazarse a través de un suelo oceánico rígido. Sin embargo, y de acuerdo con las ideas de la tectónica de placas, los continentes y los océanos son "balsas" que tanto unos como los otros, se ven igualmente sometidos a la acción de celdas de convección.

#### **2.3.4 Consecuencias y Ejemplos**

Según Bjorn Kurtén, paleontólogo de la Universidad de Helsinki. La diferencia entre el número de órdenes de reptiles y el número correspondiente para los mamíferos nos ha hecho intrigarnos. ¿Cómo es que los mamíferos se diversifican en órdenes una cantidad mayor que los reptiles en una tercera parte del tiempo que éstos?. La respuesta puede estar conectada con la teoría de deriva continental. Según esta teoría durante la mayor parte de la era de los reptiles los continentes estuvieron unidos en dos grandes supercontinentes. Uno en el Hemisferio Norte y otro en el Hemisferio Sur. Al empezar la era de los mamíferos, los dos supercontinentes se rompieron y disgregaron según fragmentos que representan los continentes de hoy, pero si bien entonces se separaron, todavía no se habían realizado las conexiones de los continentes que existen en la actualidad. Como se podrá fácilmente suponer, estos acontecimientos tuvieron un pro-

fundo efecto en la evolución de los seres vivos.

El mundo de los organismo vivos, es un mundo de especialistas. Cada animal o planta tiene su función ecológica especial. Entre los mamíferos de América del Norte por ejemplo, los hay que se alimentan de hierbas de la pradera, como el antílope americano; los que comen ramas de las regiones arboladas como el venado; los que comen carne, especializándose en grandes presas como el puma, o de animales más pequeños como lo hace el zorro, y así sucesivamente. Cada orden de mamíferos comprende un determinado número de especies que se encuentran relacionadas unas con otras por el hecho de tener una ascendencia común, compartir el mismo grado de especialización y el tener cierto parecido físico unos con otros. El orden carnívoro, por ejemplo, está constituido por un número de formas relacionadas (Comadreja, osos, perros, gatos, hienas, y otros más), muchos de los cuales comen carne. Hay algunas excepciones (el oso hormiguero, es un tipo de buen comedor de insectos y el panda gigante, que se alimenta de retoños de bambú), pero ésta se considera un grado de especialización alcanzado en tiempos recientes.

Hecho el anterior estudio de las consecuencias de la deriva continental en la evolución, pasaremos a ver otros ejemplos que testifican esta teoría.

La actividad volcánica, salvo contadas excepciones se encuentra situada principalmente en los centros

de expansión o cercanos al mar y su explicación se puede hacer de una manera gráfica. (Ver gráfico N<sup>o</sup> A-8).

Un punto muy interesante para la deriva continental es el Triángulo Afar. Es un territorio agreste y áspero, cincelado en un clima desértico con una altitud, en algunas zonas, por debajo del nivel del mar. El material que constituye los continentes, es una capa rocosa siálica relativamente menos densa, que está por encima de un magma basáltico con una mayor densidad.

En su lado nororiental el Triángulo Afar está separado del Mar Rojo por una serie de elevaciones producidas por la deformación de la corteza terrestre a causa de acción de fallas y fenómenos volcánicos. De norte a sur se encuentran: un horst tectónico (bloques levantados) denominado los Alpes Danakil; una cadena montañosa constituida por rocas sedimentarias e intrusivas; un macizo volcánico compuesto de un volcán activo y tres acumulaciones volcánicas coronados por sus respectivas calderas (los cráteres hundidos de volcanes), y, en el extremo sur, otro horst montañoso. El lado sur del triángulo se encuentra limitado por el escarpe de la alta Somalia, que va desde los 1,500 a los 2,000 metros de altura. En el oeste, en el tercer lado del triángulo se yergue el escarpe de la inmensa Etiopía, con una altitud en algunos lugares superior a los 4,000 metros. Aquí los altos escarpes se sitúan con respecto al suelo de las depresiones, mucho más altos que en cualquier otro lugar

del mundo. Por lo que se refiere a la superficie del mismo triángulo, está formada por suaves elevaciones de unos 120 metros bajo el nivel del mar en la parte septentrional, a elevaciones de unos 1,000 metros sobre el nivel del mar en la frontera Somalí, unos 500 kilómetros al sur.

Aún hasta tiempos muy recientes, la mayor parte de los geólogos pensaban que el triángulo Afar tenía esta forma de un gran embudo debido a alguna causa inexplicable relacionada con el gran rift-valley del este de Africa, pero los estudios de Haroun Tazieff (1970) demostraron que el suelo del triángulo era realmente una parte del Mar Rojo. Es decir, de la misma característica geológica.

Para la deriva continental esto tiene importancia, pues incluyendo este triángulo en el mar Rojo, la costa etíope de Africa encaja perfectamente con la correspondiente costa arábiga del Yemen.

En América, el sistema de fallas de San Andrés constituye el límite entre las placas de Norteamérica y del Pacífico Norte y separa la región suroeste de California del resto de América del Norte.

En general, el Océano Pacífico y esta región de California, al oeste de la falla de San Andrés. Poseen un movimiento al noroeste respecto al resto del continente, no obstante, aún en el mismo continente, al menos hasta Utah, se perciben los efectos de interacción de estas placas.

El movimiento relativo entre Norteamérica y el Pacífico Norte se ha calculado mediante diversos procedimientos. Las técnicas sísmicas aportan valores entre 1.3 y 6.5 centímetros al año. Las edades de las bandas magnéticas en el fondo del océano indican, de modo aproximado, 6 cm. al año. Por otra parte, la edad de las anomalías magnéticas lejos de la costa de California indica que la cresta oceánica interceptó con el continente hace al menos 30 millones de años. Geólogos y geofísicos y cierto número de instituciones (U. de Cambridge, U. de Princeton, Scripps Institution of Oceanography, etc.) han propuesto que los procesos geológicos están afectados profundamente cuando una placa continental es interceptada por una línea de cresta oceánica.

Los anteriores ejemplos constituyen sólidas pruebas de la deriva continental o si se prefiere de la tectónica de placas, a continuación desde este punto de vista vamos a estudiar los nuevos conceptos de orogenia en los Andes.

## **2.4 LA EVOLUCION DE LOS ANDES**

Al sudeste del lago Titicaca, se levantan los testigos de una asombrosa cultura prehistórica: Tiahuanaco. En varias hectáreas de terreno, vemos pirámides truncadas, montículos artificiales, hileras de monolitos, plataformas, cámaras subterráneas, pórticos de dos pilares y dintel, tallados en piedra. La famosa puerta del Sol, con sus inscripciones, hace pensar según se ha dicho en

un calendario astronómico. Y la estructura de todo el conjunto sugiere que existió allí un gran puerto marítimo.

Estos hechos quedan aclarados con el nuevo concepto de orogenia para los Andes estudiado por David E. James, miembro de la Carneige Institution (1973).

La cordillera de los Andes está constituida por una serie de cadenas montañosas que recorren la costa oeste de América del Sur, desde Venezuela y casi América Central, hasta la extremidad meridional de Chile. Relacionándose claramente con este conjunto de cadenas montañosas, a las que acompaña casi paralelamente, se encuentra la fosa Peruano-chilena, que se sitúa entre los 4° de latitud norte hasta los 40° de latitud sur. Unos 15,000 metros de relieve casi vertical separan las zonas más profundas de esta fosa, de los picos más altos de la cordillera andina. El arco andino, que comprende las montañas y la fosa es un sistema vivo. Es parte del "anillo de fuego" circumpacífico, y los volcanes activos que se reparten por la cordillera y los devastadores terremotos, nos llevan al proceso orogénico que dió origen a las cadenas montañosas andinas, y que sigue vivo en la actualidad.

La mayor parte de la actividad tectónica del mundo -terremotos, volcanes y orogenias- se concentra a lo largo de los bordes de las placas. La costa oeste de Sudamérica es uno de esos bordes. La placa oceánica de Nazca, generada a lo largo de la cordillera pacífica oriental, es absorbida en la fosa peruano-chilena, en donde

se desliza hacia el interior bajo la placa sudamericana con una velocidad media de unos seis centímetros al año. La observación de la estructura y geología de los Andes Centrales revela que mucha de la actividad orogénica actual y de la evolución geológica en los últimos 200 millones de años puede ser considerada como el resultado de un sistema de subducción, o consunción de esta placa oceánica bajo América del Sur. Esta interacción de las dos placas es la que dió lugar al arrugamiento del margen continental estable que pasa así a constituir una cadena de montañas de materiales plegados, que son los que forman ahora las actuales alineaciones montañosas de los Andes; el nacimiento de la gran cordillera volcánica andina, al oeste; y el crecimiento hacia el oeste de América del Sur.

Para el conocimiento de la evolución de los Andes Centrales es necesario utilizar dos tipos de datos: los geológicos y los geofísicos. Las observaciones geofísicas incluyen la distribución de terremotos, y la distribución en el interior de la corteza y del manto superior, de ciertas propiedades físicas, tales como: velocidad de las ondas sísmicas, absorción de su energía (su atenuación), y la densidad de las distintas masas rocosas que las constituyen. A partir de estas propiedades, se puede deducir información acerca del tipo de roca que se halla en el interior, así como si se encuentra rígida o móvil. Los datos geológicos derivan de los estudios que se efectúan sobre las rocas que afloran en la super-

ficie, y de ellos se recoge información de sus componentes, sus estructuras, etc.; en realidad, la historia de lo acontecido en el pasado, sólo nos la pueden llegar a revelar los datos que obtengamos de la geología. Iniciaremos nuestra descripción con los datos geofísicos en primer lugar, ya que ellos nos han suministrado las observaciones básicas sobre muchos de los conocimientos concernientes a cómo se produjo la unión de las placas Sudamericana y de Nazca.

La distribución de los terremotos nos evidencia, en su análisis, los lugares de interacción de las placas. Según la teoría de la tectónica de placas, la zona sísmica, que según un plano inclinado se sitúa bajo las fosas oceánicas (Zonas de Benioff), determinan precisamente la parte superior de las placas oceánicas descendentes. Las placas litosféricas que descienden, se encuentran a menor temperatura y se comportan con una mayor rigidez que la astenósfera, en la cual se sumergen, y por otra parte, está generalmente aceptada la suposición de que solamente en la litósfera es en donde se pueden hallar rocas lo suficientemente rígidas como para soportar una fracturación frágil, o sísmica. Esta suposición está basada en la observación realizada en muchos de los arcos islas en que los terremotos parecen quedar confinados casi enteramente a la placa descendente.

Bajo los Andes Centrales, sin embargo, los terremotos no tienen lugar solamente en la placa descendente.

te, sino que también se dan a lo largo de una superficie situada entre la corteza y la placa oceánica que se sumerge a una profundidad de unos 200 a 300 km. Esta observación nos hace sospechar que el borde delantero de la desbordante litósfera Sudamericana, puede tener un espesor anormal de 200 a 300 kilómetros, que es mucho más importante que los valores normales aceptados, de 100 kilómetros para la mayor parte de las placas, y es especialmente mayor que el espesor de 50 kilómetros de la placa de Nazca que se desliza sumergiéndose por debajo, y que se ha medido por métodos sísmicos. También los resultados obtenidos del análisis de los sismogramas muestran una clara evidencia de que la litósfera andina tiene un espesor de 200 a 300 kilómetros y que en esta área no existe zona de baja velocidad, ni zona de alta atenuación de las ondas sísmicas.

La zona de baja velocidad y la zona de alta atenuación situadas en el manto son interpretadas comúnmente como regiones de rocas más blandas que se encuentran asociadas a la Astenósfera; en otras palabras, la ausencia de estas zonas implica que las rocas allí situadas son relativamente rígidas. Una importante consecuencia que se deriva del espesor de la placa bajo los Andes, es que ello impide la acomodación convectiva en el manto bajo la zona de Benioff. Es precisamente esta convección inducida la que según se cree provoca la producción de centros secundarios de expansión del suelo del océano cuyo desarrollo da lugar tras de sí, a la formación de arcos

de islas y que claramente no se encuentran en el arco continental andino.

Un segundo e importante grupo de observaciones geológicas, acerca del espesor de la corteza, nos ha proporcionado un eslabón adicional para el estudio de la relación entre el régimen actual de las placas tectónicas de los Andes y la historia orogénica de los Andes tal y como se deduce de los datos geológicos. Los estudios sísmicos llevados a cabo, muestran que la corteza de la zona central de los Andes es extremadamente variable en espesor. Y así en una distancia de un poco más de 500 kilómetros, varía desde unos 11 kilómetros de profundidad (incluyendo la columna de agua de mar) en la cuenca del Pacífico, a 30 ó 35 kilómetros a lo largo de la costa (en una normal corteza continental), a más de 70 kilómetros bajo las crestas de las cadenas volcánicas occidentales, a 50 ó 55 kilómetros bajo las cadenas de sedimentos plegados al este, y, finalmente a 35 kilómetros bajo la plataforma brasileña. Comparadas con otros lugares del mundo podemos decir que únicamente los himalayas es donde se ha encontrado un espesor cortical de más de 70 kilómetros.

Para conseguir la reconstrucción de los sucesivos acontecimientos ocurridos en el sistema andino debemos atender a la información que nos ofrecen las observaciones geológicas. Las rocas sedimentarias paleozoicas depositadas entre los 250 y 450 millones de años, son los materiales más antiguos que forman los Andes Centrales.

Aquí no nos dedicaremos a ellas especialmente aunque diremos que se encuentran deformadas y fracturadas, y constituyen las cadenas de montañas orientales. Estas rocas tienen un espesor de hasta 10 kilómetros, en los que se encuentran interestratificadas capas de areniscas y limos que constituyen lo que se conoce con el nombre de depósitos del geosinclinal; fueron depositadas en un inactivo margen continental que durante el paleozoico se encontraba al oeste de América del Sur.

Durante los tiempos del Pérmico y del Triásico, es decir entre hace 200 y 250 millones de años, la calma de la costa oeste de América del Sur dió paso a la producción de inestabilidades debidas a la todavía incipiente rotura del Supercontinente La Pangea, y al comienzo del desarrollo de un ciclo de tectónica de placas. El borde continental, por todo ello, fue sometido a esfuerzos tales que plegaron y levantaron los estratos del geosinclinal. Rocas magmáticas, derivadas posiblemente de la fusión parcial de las capas más profundas del geosinclinal, invadieron y se inyectaron a través del conjunto sedimentario plegado, dando lugar a batolitos (masas rocosas constituidas por materiales ígneos intrusivos) en profundidad y volcanes sobre la superficie. Los volcanes más antiguos ya han desaparecido, pero las rocas volcánicas eyectadas por ellos durante este período se encuentran interestratificadas con capas sedimentarias. Las rocas intrusivas representan probablemente las raíces o

cámaras más profundas de los volcanes, y se encuentran normalmente, en la actualidad, aflorantes en los núcleos de las cámaras plegadas orientales, incluidas entre las rocas del geosinclinal, fuertemente deformadas.

Hace unos 190 millones de años, en los comienzos del Jurásico, el eje de mayor actividad tectónica se trasladó cientos de kilómetros hacia el oeste, hacia el océano. La litósfera se rompió a lo largo del límite entre el continente Sudamericano y la cuenca oceánica del Pacífico, iniciándose entonces el desarrollo de la placa oceánica hacia el manto, bajo el lado occidental de América del Sur. Podemos solamente especular acerca de qué razones hubo para que se produjera tal catastrófica ruptura en la litósfera, pero hay evidencias de que tal fenómeno se produjo en respuesta a un mecanismo de expansión del suelo oceánico a lo largo de una antigua cordillera pacífica oriental. En esta época todavía no se había formado el Atlántico Sur, y por tanto América del Sur, y Africa permanecían unidas.

La sumersión de la placa pacífica bajo América del Sur dió lugar a la emisión de magmas andesíticos hacia la superficie, derivados de los productos fundidos y exudados de la corteza basáltica oceánica descendente. La andesita es precisamente una roca volcánica característica de los Andes, de donde toma el nombre; es más rica en sílice y por lo tanto menos densa que el basalto. Su composición química puede ser considerada como la de

un término medio entre el basalto y el granito. Estas rocas andesíticas se encuentran en buenos afloramientos a todo lo largo de las regiones costeras del sur del Perú y norte de Chile; a pesar de ello queda aún como cuestión a resolver, si las andesitas fueron extruídas sobre la corteza siálica (continental o de aguas someras), o sobre la corteza simática (oceánica o de aguas profundas.) No obstante, cabe decir que las lavas parecen haber sido eyectadas bajo el agua, puesto que presentan una gran alteración por la acción del agua del mar.

Podemos suponer por todo ello que el arco volcánico de los Andes Centrales se inició siendo un conjunto de arcos islas que se desarrolló en la zona del océano, próxima a la costa en una región que ahora ocupan el sur del Perú y norte de Chile. Aún así, la imagen de un arco jurásico como el aquí citado y descrito no es tan sencilla como puede parecer, puesto que las rocas volcánicas del Jurásico en el sur del Perú se introdujeron entre rocas metamórficas de al menos 400 millones de años de edad. La explicación correcta de cómo es posible encontrar restos de este tipo pertenecientes a la antigua corteza siálica, a unos 300 kilómetros al oeste de donde debían encontrarse depósitos geosinclinales del borde continental Paleozoico, es todavía una cuestión que está por resolver. Por otra parte, la presencia de rocas siálicas en estas áreas no implica necesariamente, que el arco jurásico se formara sobre una corteza continental. Estas rocas pueden haber sido parte de un microcontinente

Paleozoico o de una península, que se encontraba al oeste de la línea de costa de América del Sur. O también pueden ser restos "flotantes" de Sial arrastrados y emplastados en el borde de Sudamérica, o fragmentos arrancados de las regiones superiores de la placa oceánica cuando se sumergió la fosa.

Dejando aparte estas dificultades, el arco volcánico andino se fue desarrollando progresivamente durante los tiempos del Jurásico. El hecho de que las rocas volcánicas Jurásicas se encuentren aún hoy ampliamente representadas en estas áreas, nos viene a indicar además, que el arco Jurásico nunca ha estado en una posición demasiado alta con respecto al nivel del mar, y por consiguiente sólo ha sufrido una escasa destrucción por la erosión. Por otra parte, parece que toda la región situada al oeste del arco Jurásico, se extendía mucho más al este, abarcando el área que actualmente ocupan los Andes y estando en su mayor parte en niveles próximos a los del mar, puesto que se han encontrado en esta zona depósitos de sedimentos marinos. Esta observación tiene su importancia, por el hecho que demuestra que la corteza de los Andes era por entonces todavía delgada, probablemente con espesor no mayor de 35 kilómetros.

Ya hemos dicho que el arco Jurásico se formó durante un período en el cual América del Sur y África constituían todavía un solo continente. La datación de las bandas magnéticas del Atlántico Sur, realizada por

Walter C. Pitman III y colaboradores de la Universidad de Columbia, indica que sólo hace unos 135 millones de años empezó a abrirse el Atlántico Sur, debido a la expansión a lo largo de la cordillera centro atlántica. Con la formación del arco Jurásico se inició, pues, la impresionante serie de episodios que dieron como resultado la edificación de esta cordillera andina, pero el verdadero proceso orogénico andino no ocurrió sino hasta un cierto tiempo después de que se produjera la separación de América del Sur y África.

Hace unos 100 millones de años, es decir ya durante los tiempos Cretácicos, se empezó a formar un segundo y mayor arco volcánico, paralelo al anterior arco Jurásico, y a su lado este, es decir más cercano al continente (el tratamiento que se da a la evolución de los Andes como una serie de pocos episodios es una simplificación, pero útil para trazar el esquema). Las lavas de esta cadena volcánica fueron extruídas a la superficie en regiones situadas por encima del nivel del mar, lo cual es una clara evidencia de que estas rocas ígneas se desarrollaron sobre una corteza continental. La actividad del arco cretácico alcanzó su máxima intensidad hace unos 50 ó 60 millones de años, en que se produjo una invasión de la corteza por parte de gran cantidad de masas magmáticas. Estos magmas cristalizaron formando enormes batolitos que, ahora por la acción erosiva, afloran a todo lo largo del lado oeste de las cadenas occidentales.

Los volcanes contemporáneos a estos fenómenos intrusivos debieron sobresalir por encima del nivel del mar, y desde entonces han estado sometidos a los procesos erosivos, por lo que han sido denudados y en su lugar afloran rocas intrusivas subyacentes al arco volcánico, es decir, los batolitos andinos. En algunas áreas, tales como la región meridional del Perú, la erosión no ha llegado a despojar los materiales tan profundamente, por lo que pueden verse aparatos volcánicos por encima de pequeños batolitos, siendo las rocas que los forman de una edad y composición similar. Estos pequeños cuerpos intrusivos, en este caso, son probablemente partes del complejo de alimentación de los volcanes. A veces, las raíces volcánicas de los batolitos, puede ser que hayan sido también erosionadas, y es solamente entonces cuando se puede ver en afloramiento la base del desaparecido arco volcánico cretácico.

El complejo volcánico andino actual empezó a emerger hace unos 15 millones de años. En el norte de Chile y sur del Perú, tuvo lugar una serie de erupciones volcánicas explosivas que causaron el depósito de grandes masas de cenizas volcánicas silíceas; estas rocas volcánicas salieron a través de fisuras y fluyeron hacia arriba desde los centros eruptivos, repartiéndose sobre cientos de miles de kilómetros cuadrados. Aún ahora, cuando muchas de estas cenizas han sufrido un largo proceso erosivo, se calcula que cubren de unos 100,000 a 150,000 kilómetros cuadrados, con un espesor medio de 500 metros.

Las erupciones de cenizas volcánicas continuaron aún unos cuatro millones de años, y cuando bruscamente finalizaron, fueron inmediatamente seguidas por flujos de lavas andesíticas provenientes de salidas volcánicas. Estas últimas lavas constituyen grandes estrato-volcanes, algunos todavía activos, que predominan en la cadena andina y se elevan a altitudes de hasta seis kilómetros en los Andes Centrales.

La afluencia masiva de magma en la corteza, bajo el recién formado arco andino, provoca el acrecentamiento de la corteza y produce la deformación, por plegamiento y fracturación, de los materiales depositados en el altiplano y en las cadenas orientales. Los sedimentos del geosinclinal empujados a un lado, más lejos, por el conjunto magmático en expansión, y las cadenas orientales fueron estrujadas y levantadas, dando lugar a la formación de una estrecha y alargada cadena de altas montañas. Los productos sedimentarios provenientes de la erosión que actuó entonces sobre estas masas rocosas elevadas, se depositaron, inundando los flancos oriental y occidental de esta cadena, durante el terciario, y se acumularon en zonas deprimidas del altiplano formando un conjunto sedimentario con un espesor de más de 15 kilómetros. Actualmente asistimos a una relajación parcial de su actividad con la aparición de fenómenos de distensión en el altiplano desarrollados como consecuencia de la relajación que se deriva de los anteriores esfuerzos de compresión. Y en concreto, el Lago Titicaca es un notable

ejemplo que corresponde a una de tales estructuras en distensión: un graben, es decir una larga depresión que se forma entre dos líneas de falla.

Después de haber visto el pasado orogénico andino, ya podemos tener una idea de lo que nos puede deparar el futuro.

## **2.5 ANALISIS**

Es indudable que la tectónica de placas nos proporciona un análisis completamente racional en cuanto a los fenómenos físicos observados en la corteza terrestre a la luz de los avances de la tecnología de observación moderna.

En la actualidad sabemos con certeza que las placas tectónicas han estado funcionando a lo largo de, al menos los últimos 200 millones de años de la historia de la Tierra. Durante este tiempo fueron creados prácticamente todos los actuales océanos y otros fueron destruídos. Hace 200 millones de años, las grandes masas continentales estaban ensambladas, constituyendo un único supercontinente, La Pangea, lo que sucedió hace unos 180 millones de años, señaló el comienzo del desarrollo de las placas tectónicas. Los estudios geológicos de las cadenas orogénicas anteriores a esos 200 millones de años, viene a señalar que ellas deben su origen a procesos que operaban en los límites de placas que actualmente no existen. Las cadenas orogénicas de los Urales y Caledónica-

Apalachiana, las cuales formaban parte de la antigua Pangea, tienen unas zonas relativamente estrechas en las que se encuentran ofiolitas. Estas antiguas zonas ofiolíticas, semejantes a las de la cadena orogénica Alpino-Himalaya, nos señalan los lugares en que los océanos desaparecían. Esto implica que los Urales, por ejemplo, se formaron por la colisión de dos masas continentales y que las ofiolitas se generaron, por la expansión del suelo oceánico, a lo largo de la cordillera axial, antes que los continentes se unieran.

Movimientos continentales a gran escala en la horizontal, antes de los últimos 200 millones de años, se han venido conociendo por otras líneas de razonamiento. Los depósitos glaciares, y otros datos, indican que hace unos 400 millones de años, un polo Sur, con su correspondiente casquete de hielo, cubría el Sahara. Durante este mismo tiempo, el Ecuador se encontraba cerca del este de Norteamérica. Al situar sobre la reconstrucción de la Pangea estas posiciones del entorno polar y ecuatorial, se ve que son incompatibles: indican que Africa y América del Norte estaban separadas por un océano de unos 10,000 kilómetros de ancho. La contracción de este océano y la colisión resultante de Norteamérica y Africa fueron probablemente, los principales responsables de la formación de la cadena orogénica apalachiana. Parece razonable suponer que las zonas largas y estrechas, bien definidas, en las que se formaron las cadenas orogénicas, fueron establecidas a lo largo de las zonas de convergen

cia de placas. Si esto es cierto, las placas tectónicas han estado operando, al menos, durante los pasados 2,000 millones de años.

Los conceptos clásicos que tratan de explicar la formación de montañas, caso de nuestra cordillera andina; formulado antes que naciera y se desarrollara la teoría de la tectónica de placas, sostenían que las rocas de los geosinclinales constituían unas cuencas alargadas de gran subsistencia, y que estas cuencas eran necesariamente, las precursoras de las posteriores fajas de montañas, las cuales se suponía eran formadas a partir de la deformación y fusión de los grandes espesores sedimentarios del geosinclinal. Los mecanismos tectónicos, por los cuales estas rocas sedimentarias llegan a fundirse y deformarse, fueron siempre un misterio, así como tampoco se llegó a precisar el origen de la misma subsidencia de la cuenca. Al aplicar los conceptos clásicos sobre los geosinclinales a los Andes Centrales, surgen un buen número de problemas. Así: la corteza bajo las crestas volcánicas supera los 70 kilómetros, y ninguna cuenca sedimentaria puede establecerse sobre una corteza con más de 35 a 40 kilómetros de espesor sin elevarse sobre el nivel del mar, con lo que se produciría a su vez, el fin de la sedimentación.

Si las rocas del geosinclinal hubieran sido acumuladas para formar la corteza en la cordillera occidental, deberían haber experimentado un acortamiento, mo

tivado por su plegamiento, que hubiera duplicado el espesor de la corteza. Sin embargo, en la cadena volcánica no se encuentran estructuras tectónicas tales como fallas, cabalgamientos, ni pliegues que puedan hacernos sugerir que la corteza haya sufrido aquí ningún tipo de acortamiento, al contrario, los estudios realizados sobre los mecanismos de los terremotos y sobre el modo en que se producen, indican que el estilo de la deformación es extensional; es decir, la tierra bajo el arco volcánico se está dilatando en vez de contrayendo. Así pues, el conocimiento de la evolución cortical andina no puede llevarse a cabo mediante el manejo de los conceptos clásicos de los geosinclinales y la formación de cordilleras.

El análisis conceptual de estas teorías, nos permite deducir con gran fundamento, que los terremotos del Perú en particular, son producidos por el frotamiento y fricción de la placa Nazca con la placa continental Sudamericana.

## CAPITULO III

### FUNDAMENTOS PARA PREDECIR SISMOS

#### 3.1 EXPERIENCIAS PREVIAS

Desde el comienzo de la moderna sismología, se ha invertido mucho esfuerzo, alrededor de la acumulación de datos que puedan ser relevantes para la predicción de sismos. El progreso de esta línea ha sido resaltante especialmente en la última década y las naciones guías en este aspecto son Japón, U.S.A. y U.R.S.S.

Numerosas y variadas leyendas se han contado en todo el mundo, y nos hablan de comportamientos inusuales en peces y animales, una climatología extraordinaria y luces misteriosas que precedieron a los terremotos, pero lamentablemente, no nos pueden dar una guía para datos científicos que puedan ser sometidos a un análisis. La mayoría de los datos que pudieron ser tomados de esta manera, durante el primer período de la moderna sismología, pueden ser estimados como vagos y fragmentarios.

Hacia 1960, cerca de Denver, Estados Unidos, se notó que la inyección de agua a pozos de petróleo era causante de temblores en la región. La gente se alarmó, se suspendió la inyección de agua y los temblores cesaron.

Hechas varias pruebas, se ha confirmado que en esta región la introducción al subsuelo de agua, actúa a la manera de gatillo que desata anticipadamente temblores de foco superficial.

Por otra parte, los japoneses han venido estudiando y prediciendo movimientos sísmicos por medio de estudios de deformaciones en fallas activas conocidas, que tienen epicentros superficiales, como en el caso anterior.

Los rusos, a su vez, vienen estudiando detenidamente sus regiones sísmicas, y aportando valiosos datos para predicción.

La predicción de sismos, supone especificar el tiempo, el lugar y la magnitud de un futuro evento sísmico, y los parámetros que pueden ser valederos para la predicción, recién están empezando a conocerse, así que por el momento, la predicción de un evento presenta mucha dificultad. Sin embargo, los investigadores han establecido las primeras bases de predicción, constreñidas a zonas de frecuente actividad sísmica. El punto de partida ha sido la recopilación estadística, obteniéndose así la primera aplicación práctica que usamos en ingeniería, es to es, el mapa de regionalización sísmica.

Cuando se identifica un foco sísmico, este hecho no nos da una indicación del tiempo en el cual se debe esperar el evento: así que se han sugerido dos tipos de aproximaciones al problema de determinar el tiempo.

El primero, considerado el más especulativo, se basa en que los mayores terremotos, están situados a lo largo de los cinturones sísmicos del mundo. Una vez evaluada la secuencia espacial, se puede considerar evaluada una base para identificar la próxima brecha o foco sísmico, si bien se puede considerar incierto el plano de activación.

La segunda aproximación, trata de fijar una estimación de tiempo por medio de estadísticas de recurrencias. Cualquier forma de análisis estadístico de actividad en el pasado, o en forma más determinística, por estadísticas de esfuerzos basado en la tectónica de placas, han servido para este tipo de aproximación.

El modelo de placas tectónicas provee de bases para poder estimar los porcentajes de acumulación de esfuerzos en los límites de las placas, aunque todavía hay grandes incertidumbres con respecto a la estimación de los porcentajes de movimientos corrientes de placas relacionadas con el monto de los movimientos relativos de una superficie donde se toma el deslizamiento sísmico, y el valor de la falla sísmica. Tsuneji Rikitake estimó algunos de los valores críticos del esfuerzo con los cuales ocurren los grandes terremotos japoneses, y los porcentajes con que el esfuerzo se acumula en algunas zonas activas selectas. Asumiendo que el último gran terremoto redujo la energía a cero, y estimó, por ejemplo, que la probabilidad de ocurrencia de un terremoto de magnitud 8 en Sagarin Bay en (1923) es de 0.2 antes de 1980 y no mayor

de 0.8 para 2080. Yuri V. Riznichenko y sus colaboradores han establecido una correlación entre el nivel de actividad de una región, está dado por el valor normalizado de  $\log N$  ( $N$  representa el número de Sismos) para una magnitud seleccionada, y la máxima magnitud que sea expectable. Su técnica fue aplicada a varias regiones activas de U.R. S.S., pero a pesar de todo, no se pudo establecer hasta que punto se pueden aprovechar los datos de grandes eventos sísmicos.

Debido a que las incertidumbres se producen por que se depende completamente de las experiencias pasadas, Igor E. Gubin sugirió una combinación de datos geológicos y sismológicos para poder juzgar con acierto el posible terremoto. Y considerando que los mapas geológicos esmerados pueden determinar las posiciones y longitudes geológicas para que puedan ser consideradas como una sola unidad mecánica. Los datos sismológicos señalan las máximas profundidades en que ocurren corrimientos de fallas en la región. Estos mapas así considerados, pueden facilitar-nos la estimación de las grandes masas rocosas que puedan moverse en un terremoto. Si bien no ha habido movimiento parejo en el record histórico. Infortunadamente hay muchos lugares en el mundo en que el mapeo detallado no hace posible la aplicación de esta aproximación.

### **3.2 FENOMENOS PRECURSORES**

La atenta observación de los registros sísmicos, y sobre todo por medio de un análisis detenido de todos

los fenómenos manifestados antes de un terremoto, han permitido establecer en una forma realmente determinística, la existencia de fenómenos geológicos, sísmicos y atmosféricos que anteceden a un sismo.

La primera vez que se registró científicamente un fenómeno precursor, ocurrió en 1793 en Ajikazawa, Japón; fue un retiro del mar debido a una elevación del terreno entre uno y dos metros, que precedió a un sismo de magnitud 6.9 con una anticipación de 0,17 días (cuatro horas). Este tipo de fenómeno precursor fue registrado también en 1802, 1872 y 1927, en Japón, para sismos de magnitudes similares.

En los últimos años los esfuerzos dedicados a encontrar fenómenos precursores han dado sus frutos, analizando y clasificando estos efectos, es obvio que caen en dos clases principales de efectos: de corto plazo, que preceden a los terremotos en horas o unos pocos días, y precursores de largo plazo que preceden a los sismos en meses o en años.

Un examen de los precursores de corto plazo demuestra que la mayoría, aunque no todos los precursores de esta clase, pueden ser atribuidos a un fenómeno denominado dilatación explicado inicialmente por A. Nur (1972) y que estudiaremos en este capítulo.

Como punto de partida vamos a describir algunos de los fenómenos precursores ya clasificados.

### **3.2.1 Deformaciones de la Corteza**

La acumulación de esfuerzo tectónico en la corteza terrestre hace que ésta presente deformaciones. La deformación de la zona puede ser detectada por medio de trabajos geodésicos. Este tipo de trabajo, da los datos por medio de repetición de reconocimientos superficiales del terreno. Otro medio para detectar esta clase de anomalía precursora, es con la ayuda de inclinómetros y extensómetros. Este último método para medir las deformaciones de la corteza terrestre es más económico, pero debido a la naturaleza del instrumento, sus registros no indican rumbo.

Un caso particularmente bien documentado ha sido el terremoto de Niigata, Japón, ocurrido en 1964 y de magnitud 7.5.

Por medio de repetición de mediciones geodésicas de la región del epicentro, se pudo deducir haciendo una extrapolación, que los movimientos verticales registrados, habrían estado sucediendo a una velocidad constante y lenta desde 1898 a 1955. Pero comenzando 1958 se presentó un rápido levantamiento de casi cinco centímetros en la región del epicentro, esta anomalía fue seguida de un período de cinco años de poco movimiento y terminando con el terremoto. La naturaleza absoluta del levantamiento, fue confirmada por una caída correspondiente en el nivel medio del mar, en la estación de mareas cercana en Nezugasebi. La magnitud del levantamiento pre-

cursor disminuía gradualmente con la distancia en ambas direcciones medida a partir del epicentro, y no era observada a distancias mayores de unos 100 kilómetros.

De otra parte, los medidores de inclinación han registrado varios casos de movimientos precursores de la corteza; en uno de tales casos, un sismo de magnitud 6 en Odaigahara, Japón, en 1960. Cinco medidores de inclinación ubicados en diferentes localidades a una distancia de hasta 100 kilómetros del epicentro, detectaron movimientos precursores seis meses antes del terremoto, una rápida inclinación en la dirección que se alejaba del epicentro comenzó a registrarse en dos localidades, a 40 y 100 kilómetros respectivamente del epicentro, un extensómetro, ubicado en uno de estos sitios, comenzó a mostrar anomalías en forma de altos valores de proporción de extensión simultánea. Este fenómeno continuó durante tres meses y luego cesó, en este tiempo, una estación más lejana situada al sur comenzó a inclinarse. Un mes antes del terremoto estas tres estaciones comenzaron a inclinarse en la dirección opuesta y dos estaciones adicionales comenzaron a inclinarse rápidamente, de lo que se pudo deducir que el reverso de la inclinación indica algún tipo de precursor inmediato.

Beaumont y Berger (1974), llegaron a la conclusión, después de estudios en modelos numéricos aplicados a este tipo de anomalías que el observar y registrar las deformaciones corticales presentaba una serie de ventajas:

primero, la técnica es asísmica, no se necesita el análisis de la actividad sísmica y no es necesario un perfil de refracción, lo que sería necesario en el caso de tener que determinar las propiedades elásticas de una zona focal. Esta técnica tiene por consiguiente una aplicación inmediata en áreas de baja sismicidad. Segundo; las mareas terrestres proveen de una señal de potencia espacialmente determinística, y no hay problemas análogos a los de localizar los hipocentros de los terremotos e identificar planos de rayos particulares. Tercero, las mareas terrestres proveen de una señal continua (input) que puede ser muestreada continuamente, y la capacidad de este método para detectar cambios en las propiedades elásticas de la corteza, es inversamente proporcional a la raíz cuadrada del período promedio. Por ejemplo, actualmente el lapso para detectar anomalías precursoras para un sismo moderado ( $M=6$ ) se estima en 500 días, suficiente tiempo para 17 estimaciones de 30 días en la admisión de mareas terrestres. Para una comprensión más clara de las conclusiones de Beaumont y Berger, hemos de puntualizar que investigaron las mareas terrestres en el observatorio de Pinon Flat, por medio de calibradores de laser, que registraban datos en tres direcciones; norte, este y noroeste.

Otro de los aspectos que hacen detectable la deformación de la corteza terrestre, es su influencia en el mar, éste suele presentar retiros anómalos y variaciones en el registro normal de mareas.

Según la recopilación de Tsuneji Rikitake (1975) se ha podido clasificar como fenómenos precursores hasta el momento un total de 103 datos del tipo de deformaciones corticales; en Japón, U.R.S.S., U.S.A. y Hungría, de acuerdo con la información disponible.

### **3.2.2 Anomalías en la Relación $V_p/V_s$**

La observación de cambios en la relación de velocidades sísmicas  $V_p/V_s$ , previos a terremotos; ha proveído de nuevos ímpetus al problema de la predicción de sismos. Una teoría que ya se está haciendo corriente, es que la anomalía  $V_p/V_s$ , en la que es predominante la variación en  $V_p$ , es causada por la dilatancia en el perímetro de la región focal. La dilatancia ha sido estudiada en experimentos controlados en laboratorio, y se considera que es un incremento inelástico de volumen por la creación y crecimiento de microfracturas (3.3).

En Nueva York, en la zona conocida como Blue Mountain Lake, fueron reportadas variaciones en la razón de velocidades por Aggarwal (1971), que los clasificó como fenómenos premonitores de dos eventos sísmicos de magnitud moderada. Además, las observaciones de registros sísmicos obtenidos en Garm, U.R.S.S.; Adirondacks, U.S.A.; y las observaciones de los registros del terremoto de San Fernando, muestran que antes de cada uno de estos terremotos, la razón de las velocidades sísmicas  $V_p/V_s$ , decrecieron a valores anormalmente bajos.

La anomalía en la relación  $V_p/V_s$  se presenta de esta manera: en todos los casos, la razón de velocidad primeramente decrece y posteriormente se incrementa gradualmente hasta llegar a su valor normal un tiempo previo al evento principal. Un estudio más detallado de los cambios de las ondas P, en la zona focal de los terremotos, indica que la razón de velocidad decrece debido al decremento de la velocidad de las ondas P, en alrededor del 15%.

El estudio de las velocidades sísmicas, presenta algunas dificultades que vamos a señalar: Cuando observamos a primera vista un sismograma, vemos una línea sinusoidal que presenta muchas variaciones, esto se debe a que cada estrato, refleja el frente de onda, y el instrumento capta todos los reflejos, o sea, primeramente se deben seleccionar los frentes de onda, una vez resuelto este problema, e identificados los estratos, se debe identificar el frente de ondas que presenta anomalías en el tiempo de viaje de las ondas sísmicas, para de esta manera identificar la zona dilatante, este trabajo es muy complicado y sólo tiene una ayuda teórica, que son los diagramas de Wadati, que se emplean para determinar el tiempo de origen del frente de ondas.

Debido a este tipo de problema, la anomalía  $V_p/V_s$  como fenómeno precursor se encuentra sometido a controversia, según la zona donde se desarrolla; por ejemplo, Van-Wormer (1975), hizo un análisis de la sismicidad en una zona cercana a Fairbanks, Alaska; y en su informe declaró:

"En suma, otros investigadores han encontrado cambios de la relación  $V_p/V_s$  para tener una técnica útil de predicción. No estamos en ese caso particular".

Esta opinión, nos permite deducir que evidentemente hay zonas donde sí se puede aplicar con éxito y facilidad este tipo de fenómeno precursor, y zonas donde es muy difícil.

Dentro de las zonas donde se aplicó con éxito esta solución podemos enumerar: Garm, U.R.S.S.; 13 resultados positivos entre los años 1956 a 1967, de acuerdo con la recopilación de Semyenov (1969). Blue Mountain Lake, U.S.A.; 6 resultados positivos en el año 1971. San Fernando, U.S.A.; un resultado positivo en 1971. Windy Island, Aleutianas; un resultado en 1971. Japón, seis veces entre los años 1962 a 1970.

### **3.2.3 Anomalías en la Resistividad Eléctrica y en la Emisión de Rodón**

Entre las propiedades de la roca más fuertemente afectadas, figura la resistividad eléctrica. La resistividad eléctrica depende generalmente de la cantidad de agua de poro que la roca contiene.

Las mediciones de resistividad de larga base (6 km.) que se vienen realizando en la región de Garm, U.R.S.S.; desde 1967, demostraron que existía una fuerte correlación entre los valores mínimos de la resistividad eléctrica y la ocurrencia de terremotos.

A diferencia del caso para la anomalía  $V_p/V_s$ , la resistividad eléctrica no retorna a su valor normal, sino que continúa disminuyendo durante el proceso, hasta que ocurra el sismo. La reducción del esfuerzo producido por el sismo, permitiría la expulsión del agua intersticial, permitiendo posteriormente el retorno a su valor normal.

Los estudios de laboratorio con respecto a la resistividad eléctrica de las rocas, muestran que sería muy difícil explicar estas caídas de resistividad por ninguna otra forma que no sea el incremento del contenido de agua de poro.

Un fenómeno aún más sorprendente se observó que precedía al terremoto de Tashkent de 1966. El análisis de las aguas en un pozo profundo en la región del hipocentro, mostró que había una variación interesante en el contenido de radón. Varios años antes del terremoto, el contenido de radón aumentó muy rápidamente, doblando su valor normal. El contenido de radón se mantuvo en este alto valor, hasta que sucedió el terremoto, tiempo en el cual, o poco después retornó a su valor habitual.

El precursor más espectacular de un terremoto, es la aparición de luces misteriosas antes del suceso (E.Q.L.), que inicialmente daba pábulo a leyendas de dragones que circulaban en forma de murmuraciones entre las personas sencillas del campo, cuando estas llegaron a

oídos de los científicos, fueron tomados los hechos como parte del folklore. Pero en 1968, Kondo procuró resolver el misterio de E.Q.L., para lo cual hizo mediciones de las variaciones del campo eléctrico terrestre, en la época de las réplicas del terremoto de Matsushiro. Y en contró en algunas ocasiones cambios substanciales, de una proporción del 20 por ciento en el campo eléctrico atmosférico; era probable que los cambios ocurrieran con la fuerza del terremoto. Kondo sugirió que el campo disminuiría con el incremento de radón en la atmósfera. Sin embargo no fue hecha una evaluación cuantitativa de esta relación.

Finkelstein y Powel (1970), formularon una teoría muy interesante de luces sísmicas piezoeléctricas; de safortunadamente, las medidas en las resistividades de las rocas hechas por el mismo Finkelstein en 1973, revelaron que las resistividades eran insuficientemente grandes, por varios órdenes de magnitud, para que la teoría piezoeléctrica fuera viable.

Mas recientemente, Press (1975) y Allen (1975), hicieron un diseño general de las observaciones de aumentos de radón en Rusia y China, observados en pozos profundos de agua antes de un terremoto. King (1975), observó incrementos significativos en la emisión de radón, medrados en fosas profundas, varias semanas antes de terremotos menores, a lo largo de la activa falla de San Andrés en California. Viendo el interés de esta materia,

se puede considerar apropiado estimar los cambios en la electricidad atmosférica, que podrían ser causados por un aumento del contenido de radón atmosférico. Y si estos cambios son realmente apreciables, analizando el campo eléctrico atmosférico -procedimiento técnicamente muy simple- podríamos usarlo en la predicción de sismos.

E.T. Pierce (1976), lanzó una hipótesis con respecto a la influencia del radón en la atmósfera, esta teoría todavía está en la etapa experimental, y teniendo en cuenta que todavía no se ha hecho una evaluación definitiva, vamos a presentarla.

Los cálculos de los efectos del aumento de la emanación de radón en la electricidad atmosférica pueden ser muy complicados. Sin embargo, desde que hay considerables incertidumbres en el modelaje físico y en los valores de los parámetros para el cálculo, el modelo será simplificado. El objetivo es meramente estimar la magnitud de los efectos; en consecuencia se adopta un modelo simple.

En la discusión de la hipótesis Pierce deduce que la detección de anomalías sea del todo impracticable cuando el clima esté disturbado por nubes y precipitaciones, y hay que tener en cuenta que en condiciones normales se generan cargas por medios naturales y humanos. Las condiciones óptimas para poder evaluar una posible asociación entre los cambios en los campos cercanos a la superficie y terremotos, fácilmente identificables son:

- 1) Medidas en una activa área sísmica.
- 2) Mediciones sobre el terreno de alto contenido radiactivo.
- 3) Un campo en el que no se encuentre fuertes fluctuaciones debidas a cargas naturalmente creadas (nubes, precipitaciones, polvaredas, etc.)
- 4) Que no se perciban fuertes fluctuaciones de campo debido a cargas humanas (líneas conductoras, factorías, etc.
- 5) Sin experiencias de fluctuaciones de campo debidas a cambios irregulares en el contenido aerodisuelto (producido en forma natural o humana).
- 6) Un modelo diurno de estrato mezclado de regular desarrollo y de producción de aerosol.

Muchas de estas condiciones se satisfacen en el verano en áreas rurales de valles californianos, así que esperamos que se haya encontrado un efectivo precursor.

#### **3.2.4 Otros Tipos de Anomalías**

Los sismos premonitores; son un fenómeno que se ha registrado en muchas ocasiones y en diferentes países: Japón, Is. Kuriles, Estados Unidos, Chile, Grecia, Nicaragua, Venezuela y U.R.S.S. Es evidente que su explicación la da la teoría elástica.

Valor-b; el valor b se puede definir como un valor proporcional que se obtiene de la microsismicidad, según la relación de Utsu (1966) es:

$$b = \frac{S \log (e)}{\sum M_j - S M_s}$$

donde S es el número total de terremotos de magnitud mayor o igual a  $M_s$  y  $\sum M_j$  es la suma de las magnitudes de todos los S terremotos. VanWormer (nov. 1975), determinó que, un contínuo cálculo o cómputo del valor b promete una investigación que podría tener éxito en la predicción de sismos, pues en su estudio de Fairbanks, encontró una disminución estadísticamente significativa, precediendo a un sismo moderado.

Geomagnetismo.- El campo magnético también puede presentar variaciones antes de un sismo, se han encontrado variaciones en el campo magnético en Niigata, unos diez años antes del sismo; y en Tanabe (Japón) unos ocho años antes del sismo.

### **3.3 MODELOS TEORICOS**

Podríamos considerar que el problema de la predicción de sismos, evoluciona hacia su solución a pasos lentos, pero poco a poco, va aumentando la comprensión de los mecanismos sísmicos. Primeramente, empezó la búsqueda de fenómenos precursoros, a pesar que el adelanto en este campo es lento, ya se han recopilado informaciones sobre unos 10 diferentes tipos de fenómenos precursores. Posteriormente era necesario hallar una explicación de la razón de estos fenómenos e incorporarlos a un conjunto que pudiera explicar detalladamente el mecanismo

de cada sismo, este paso se está dando, y aunque todavía sometido a debate, el proceso se va completando.

### **3.3.1 La Dilatancia con Difusión de Líquidos**

Para explicar la naturaleza del fenómeno precursor  $V_p/V_s$ , Nork y Aggarwal propusieron un modelo basado en estudios de laboratorio, donde pudieron demostrar, que las fracturas en roca sufren un incremento volumétrico y elástico antes de la falla. A este incremento se le llama dilatancia.

La dilatancia es producto de la formación y propagación de fallas dentro de la roca, y se manifiesta a valores bajos de esfuerzo, a la mitad del esfuerzo de rotura.

La acumulación de deformación tectónica que produce un incremento lento y constante del esfuerzo efectivo (motivado por un desplazamiento de placas tectónicas). En el punto B (ver gráfico N° B-2), el esfuerzo se ha hecho lo suficientemente grande como para empezar a producir la dilatancia, a una velocidad mayor que la velocidad a la cual la velocidad de agua de poro fluye hasta el volumen de poro recientemente creado. La roca se hace saturada y  $V_p$  comienza a caer siguiendo la trayectoria BC, etapa II, puesto que  $V_s$  es apenas aceptada por la presencia de agua,  $V_p/V_s$  también disminuye. A lo largo de BC la presión de poro en la región dilatante caerá a medida que el agua de poro fluya desde las fallas y po

ros cercanos, hacia las fallas recientemente formadas, y así, el esfuerzo efectivo aumentará. Esto dará por resultado un fortalecimiento de la roca, endurecimiento por dilatación que progresivamente inhibirá aún más la dilatación hasta un punto que se alcanza en el punto C, al cual la velocidad de flujo del fluido hacia la región dilatante de este, procedente de las áreas circundantes; domina la dilatación y la roca comienza a hacerse más saturada, en este punto comienza la etapa III, y  $V_p$  aumenta a lo largo de CD, la presión de poro puede aún estar cayendo durante este tiempo; esto es así porque la subsaturación no implica que la presión de poro sea cero, puesto que se requerirá algún tiempo para que el agua fluya hacia las fallas recientemente formadas, desde las fallas y poros adyacentes, de aquí que el mínimo en la presión de poro ocurrirá en el punto D, en que la roca esté otra vez saturada. En el punto que  $V_p/V_s$  ha recobrado su valor normal y la presión de poro comienza a aumentar al nivel ambiental a lo largo de la trayectoria DE, puesto que el esfuerzo tectónico ha continuado aumentando durante el período dilatante, la presión de poro, creciente a lo largo de DE, desencadena un terremoto en la misma forma que lo hace la inyección de fluido o llenado de un reservorio.

En general (Scholz et al. 1973), el proceso del fenómeno de la dilatación puede dividirse en tres etapas:

1.- Acumulación de deformación tectónica, que produce un

incremento lento y constante del esfuerzo efectivo.

- 2.- La dilatancia se produce cuando el esfuerzo es lo suficientemente grande, y el agua de saturación fluye con lentitud con respecto al agrietamiento que produce la subsaturación.
- 3.- Cuando la subsaturación cesa y la presión de poro se vuelve normal, ésta, que aumenta produce un deslizamiento friccional.

La dilatancia, entonces, retarda al terremoto por reducción de la presión de la falla, y luego lo desencadena cuando la presión de poro se ha recuperado.

Posteriormente, Beaumont y Berger (1974), hicieron un estudio numérico de dilatancia, en relación con el fenómeno de las mareas terrestres. Las dimensiones del modelo numérico estuvieron condicionadas por las siguientes reglas: latitud de  $20^{\circ}$  a  $40^{\circ}$ , 200 kilómetros de profundidad por 2,200 km. (de  $20^{\circ}$  a  $40^{\circ}$ ).

La solución de elementos finitos estipula los desplazamientos radiales y tangenciales de los puntos nodales de la superficie. Estos desplazamientos son mecánicamente diferenciados por interpolación en tablilla cúbica, pero dan las componentes norte-sur de inclinación y deformación (figura N<sup>o</sup> B-5).

De acuerdo a los resultados obtenidos, recomiendan lo siguiente: Si las anomalías  $V_p/V_s$  son verdaderamente precursoras de sismos, las observaciones precisas

de las mareas terrestre proveen de una señal más sensitiva de variaciones en las mareas del orden del 50 por ciento, contra variaciones del 15 por ciento en la razón  $V_p/V_s$ .

En un intento de universalizar esta teoría, Scolz aplicó el fenómeno de la dilatancia para explicar una serie de precursoros:

El levantamiento de la corteza en la región del epicentro. Este fenómeno lo asocia directamente con la dilatancia.

Después de un largo período de acumulación de esfuerzos tectónicos, se presentará un levantamiento de la corteza más rápido, de varios centímetros durante la etapa II, en la etapa III, la velocidad de elevación es lenta o ha terminado y el agua de poro está fluyendo hacia la región dilatante, acompañada de un movimiento vertical pequeño de la corteza, también incluye una etapa IV para representar una etapa posible de muy rápido movimiento justo antes del terremoto, como se sugiere por la existencia de fenómenos precursoros de corto plazo, esta etapa puede marcar el comienzo del deslizamiento. La etapa V es el terremoto mismo y la etapa VI es el período de reajuste durante la secuencia post-terremoto.

La variación en la resistividad eléctrica se explica según esta teoría, de acuerdo a la saturación de la roca o zona dilatante, se espera que en la etapa II comience una disminución en la resistividad eléctrica en

la zona, y continúa a través de la etapa III. La reducción de esfuerzo producido por el terremoto permitirá que las fallas se cierren y expulsen el agua desde la región de origen en la etapa VI.

Otro fenómeno precursor se debe a la velocidad de flujo de agua en las rocas, en la zona dilatante y sus alrededores sería incrementado varias veces. Las mediciones sensitivas de las velocidades de flujo tales como las cuentas de emisión de isótopos de corta vida, como radón, estarán así influenciados por la dilatancia (fig. B-7), la sismicidad también puede estar influenciada, y hay una caída en la actividad debida al endurecimiento de la dilatancia en la etapa II y se eleva otra vez después del punto D en la etapa III, esto es, después del fin de la anomalía  $V_p/V_s$ . Este efecto produce un período de quiescencia anómala, por algún tiempo antes del terremoto y un corto período de actividad antes del evento principal, según el modelo de fenómenos previos, obtenido de varios sismos de gran magnitud, y el endurecimiento de la dilatancia permite explicar a qué se debe la presencia constante de este patrón, en vez del incremento gradual en sismicidad que conduce al evento principal, como podría esperarse de otra manera.

Los estudios de laboratorio sobre fractura y las consideraciones teóricas, indican que el valor b, debería disminuir para la mayor parte de las etapas dos y tres, donde se presenta el endurecimiento de la dilatancia,

puesto que el esfuerzo local requerido para causar fracturas durante este período de tiempo debe ser mayor que el anterior endurecimiento, aquí otra vez el valor debería aumentar justamente antes del terremoto.

El radón tiene una vida media de sólo 3.8 días y su distancia de difusión durante su tiempo de vida es sólo de algunos centímetros, así, su concentración, incrementada en el pozo de Tashkent antes del terremoto y sus mayores réplicas, podrían ser causadas por dos medios solamente, sea por el incremento del área de superficie de la roca en la región del epicentro, debido a fallas o por incremento en la velocidad de flujo de agua de poro, ambos efectos predichos en el modelo de dilatancia.

Evidentemente, es necesario mucho trabajo para demostrar completamente la validez y el grado de universalidad de la dilatancia. Una de las mayores cuestiones a resolver, es la extensión espacial de la región dilatante.

Las observaciones previas del terremoto de Niigata, indican que la zona dilatante se extiende sobre una región de aproximadamente dos longitudes de falla, en dimensión. Las anomalías  $V_p/V_s$  en San Fernando y Garm, sin embargo, fueron observadas en estaciones sismográficas considerablemente lejos del epicentro. En Garm, por ejemplo, las estaciones fueron concentradas en un rango de distancias de 15 a 45 kilómetros, y las anomalías fueron observadas para terremotos más pequeños que la magnitud 4.5, que pueden ser asociados con dimensiones de fallas

de sólo algunos kilómetros (1 a 16). Además, sólo pocos sismos cercanos al epicentro de los inminentes eventos de Garm, produjeron anomalías en la razón  $V_p/V_s$ , sugiriendo que el volumen dilatante estaba localizado.

Esto presenta contradicciones a la hipótesis de dilatancia pero es posible demostrar que la baja aparente de las razones  $V_p/V_s$  pueden ser observadas en estaciones completamente fuera de la región dilatante debido al enfocamiento de los rayos y a la refracción. Las estaciones fuera de la zona dilatante siempre registran un pequeño declive en  $V_p/V_s$ , lo que puede ocurrir dentro de la zona anómala. Además, la prueba sería más esporádica, desde que sólo focos epicentrales cerca o dentro de la zona dilatante, muestran bajas razones  $V_p/V_s$ . Esta discusión se convierte en aparente, comparando los resultados de Garm con las observaciones de Blue Mountain Lake, donde todas las estaciones sísmicas estuvieron dentro de seis kilómetros del epicentro. En Blue Mountain Lake, todos los eventos dentro de la red de trabajo sísmico produjeron bajas  $V_p/V_s$  y las magnitudes de caída en  $V_p/V_s$  fueron observados más de dos veces en Garm y San Fernando. Un punto adicional es que la región que encerraba todos los terremotos y que producía anomalías en  $V_p/V_s$  en Garm, parecen ser considerablemente más pequeñas que la zona dilatante total que fue indicada por mediciones de resistividad eléctrica. Para un terremoto de magnitud 4.5, el ancho precedente fue cinco kilómetros mientras que el último fue de 15 kilómetros. Y de esta manera

se encuentra prometedor que los terremotos que producen anomalías en la razón  $V_p/V_s$  en Garm, fueran localizados en la región dilatante.

Hasta aquí, en general, la dimensión del volumen dilatante parece ser varias longitudes de falla. Sólo queda llevar a cabo observaciones sísmicas y la geometría de la fuente, el receptáculo y la región dilatante.

En la controversia desatada por la teoría de la dilatancia, se pueden distinguir claramente dos bandos, uno de ellos, defiende y busca aplicaciones prácticas a la teoría dilatante, el otro bando la combate basándose en que siempre se ha aplicado con éxito la teoría de dislocación en campos cercanos, para lo cual se emplea un modelo matemático que no contempla la dilatancia. Para conciliar los criterios, William D. Stuart (1974) elaboró una teoría muy completa, que concilia la teoría de la dilatancia y la teoría de dislocación en campos cercanos.

### **3.3.2 La dilatancia sin difusión de líquidos.**

Los esfuerzos que inducen el agrietamiento de las rocas a presiones apropiadas para la corteza superior, son muy conocidos en los experimentos de laboratorio. Y se considera muy razonable asumir un comportamiento similar de la corteza, donde los agrietamientos podrían ser microscópicos, o más probablemente, juntas y fracturas preexistentes con difusión de fluidos en

forma general, sin embargo, no se acepta fácilmente la permeabilidad finita, existente en los fluidos de poro, y las ostensiblemente grandes distancias que se ven en vueltas en grandes terremotos.

La suposición central del modelo de Stuart, es que el terremoto ocurre dentro de una zona relativamente delgada de material cuyas propiedades mecánicas y registros de deformación, son enteramente diferentes de las rocas corticales más lejanas del hipocentro, quizás sólo de pocos metros o decenas de metros de ancho. Que es denominada tradicionalmente zona de falla gubia, o zona de corte, y contiene el deslizamiento o causa terrestre de la dislocación, y promedios de esfuerzos sufridos que son finitos y no pueden ser cubiertos. Esto es, durante la deformación, la energía aplicada a la zona, se disipa en lugar de almacenarse elásticamente. Las rocas de la corteza circundante, sin embargo, experimentan esfuerzos infinitesimales, y el trabajo de deformación presenta gran disipación, por transferencia de esfuerzo a procesos focales. Porque el material de la corteza es en realidad continuo, excepto por la dislocación del terremoto.

La Fig.B-6 muestra una vista simplificada bidimensional del modelo de falla de dos fases. El estado del esfuerzo en ambas zonas es idéntico al que tendrían si ambos fueran homogéneos en contacto soldado, y sometidos a corte simple o desplazamiento del límite externo.

Los esfuerzos difieren en varios órdenes de magnitud en las dos zonas. Sin embargo, y dependiendo de las propiedades constitutivas de cada zona. Los desplazamientos relativos al corte  $e$ , en el límite del modelo,  $e_1$  del límite de la zona de falla, y la diferencia de los dos  $e_2 = e - e_1$ , tienen magnitudes similares. Los desplazamientos relativos son medidos con respecto a la zona de falla en su línea central, y son iguales a las deformaciones de corte integradas sobre los anchos de zona.

Las propiedades constitutivas de la zona de falla se postulan teniendo un esfuerzo de valor doble. Esto es, la curva de desplazamiento del esfuerzo relativo tiene una tensión máxima más allá del cual la deformación no catastrófica puede continuar. Las leyes constitutivas para los dos tipos de medio ideal, aquí llamado zona de falla no uniforme, y la casi-uniforme corteza, se puede ver como líneas gruesas en la figura B-6. Ambas leyes son representaciones muy simplificadas de una función tridimensional más general, de los tensores esfuerzo-deformación esperados para el material cortical.

Se supone que la zona de falla tiene alguna clase de material de brecha o agregado granular. Los experimentos de laboratorio en material granular, demuestran que éste, bajo ciertas condiciones presenta tensiones máximas; por ejemplo, para ensayos de compresión uniaxial, en tierra, a presiones de confinamiento de 1 a 120 bars, mostraron diferentes esfuerzos máximos y deformaciones

de 5 a 30 por ciento, con una forma irregular semejante a la curva no lineal constitutiva de la fig.B-6 . A las más altas presiones de confinamiento, el esfuerzo máximo viene a ser menos pronunciado y ocurre a grandes deformaciones. La deformación es también acompañada de un aumento de volumen debido a dilatación.

Ambos tipos de material asumidos para la corteza muestran dilatación, pero con enormes diferencias en escalas espaciales. Debido a su pequeño espesor, el material de la falla presenta una dilatación que es presumible que tenga relativamente pequeña influencia en la propagación de ondas sísmicas exceptuando algunas trayectorias de onda. Físicamente, la dilatación en la zona de falla es probablemente debida a un posterior reacondicionamiento de partículas rígidas, sufriendo desplazamientos finitos y rotaciones respecto a las otras. La dilatación en la zona casi-uniforme es presumiblemente debida a pequeñas grietas o fracturas de aperturas insignificantes. El último efecto es la base de todos los modelos dilatantes.

La deformación del sistema acoplado puede ser trazado durante el desplazamiento progresivo de los límites externos, asumiendo que la condición de la zona de falla en el límite es un simple desplazamiento de corte que se incrementa proporcionalmente al tiempo. Sólo se examinan esfuerzos de corte y desplazamiento, pues todo el proceso es muy complejo. Para comparación, los

episodios identificados como etapas II y III en el modelo dilatante de Scholz se define: el intervalo entre los puntos 1 y 2, etapa II; puntos 2 y 3, etapa III. Porque ambos materiales mostrados en la fig.B-6 tienen que experimentar en cualquier momento, idénticos esfuerzos de corte, la intersección de líneas horizontales de corte constante con las curvas constitutivas, llevado por el acoplamiento relativo de cada zona. Empezando por el origen, los esfuerzos de corte aumentan en ambas zonas donde se registra el punto 1, con el tiempo se empiezan a detectar efectos dilatantes. Los desplazamientos adicionales de los límites se pueden obtener con aumento del esfuerzo de corte, cuyo máximo ocurre en la zona II. La zona casi-uniforme ha alcanzado ahora su mayor distorsión y dilatancia. El desplazamiento adicional del límite sólo puede reflejar el esfuerzo de corte en ambas zonas. La disminución de esfuerzo, en contraste con las primeras etapas, es actualmente acompañado por aumento relativo de desplazamiento en la zona de falla en que se rebajan los esfuerzos, pero decreciendo los desplazamientos relativos en el medio circundante. Consecuentemente la dilatancia debe también decrecer cuando se cierran los agrietamientos.

Para el punto 3, donde el nivel de esfuerzo iguala al del punto 1, la anomalía detectable ha desaparecido. Esto indica aproximadamente, que en el punto 3, el terremoto podría tener lugar si las condiciones energéticas son favorables. La inestabilidad sísmica solo

puede ocurrir cuando la razón de energía es librada por las dos zonas por medio de un pequeño desplazamiento de límites que sea mayor que la energía absorbida durante el aumento de desplazamiento. Esta es una condición necesaria pero no suficiente porque puede dar cabida a un desplazamiento acelerado.

Se pueden deducir algunas consecuencias cualitativas del modelo de acuerdo a las expectativas del modelo dilatante con difusión. Ambos modelos predicen la misma forma para las curvas de la razón de velocidades de ondas compresionales y de corte  $V_p/V_s$ , porque en el punto 2 las grietas son secas, en ambos casos. En el punto 3, la curva retorna a su valor normal. Asimismo, ambos modelos predicen una resistividad eléctrica similar, porque las grietas cerradas son como las rellenas con fluido, decrece la resistividad.

La ley constitutiva de la zona de falla con un esfuerzo máximo implica que el material puede recobrar rigidez y ceder al esfuerzo después de un terremoto, que vuelve a ocurrir en la misma situación, los más plausibles mecanismos para el aumento, son cementación química y recristalización del material, un proceso promovido por altas presiones y temperaturas, incluyendo fluidos de poro. El proceso de generación o cicatrización debe competir con la tendencia de deformación del material debilitado.

Puede considerarse modelada hasta aquí, esta aproximación teórica del comportamiento dilatante de una falla.

## **C A P I T U L O   I V**

### **APLICACIONES DE LA PREDICCIÓN DE SISMOS**

#### **4.1 ANALISIS ESTADISTICO Y CLASIFICACION DE PRECURSORES.**

Durante la primera etapa de análisis, de los diferentes tipos de fenómenos precursores de sismos, ha sido necesario el estudio global del mayor número posible de fenómenos precursores registrados en el mundo, para así poder establecer en una forma general, las leyes naturales que rigen este tipo de fenómenos. La recopilación más completa de fenómenos precursores es la de Tsuneji Rikitake (1975); que hizo un compendio de un total de 282 fenómenos precursores, clasificándolos en 15 categorías, o disciplinas.

En forma global, en la tabla 1, se dan los datos agrupados para cada disciplina de precursores.

El primer paso del estudio estadístico, será un histograma del tiempo precursor  $T$ , en el que se incluirá todos los precursores observados. Debido a que el tiempo precursor varía entre algunos minutos a cientos de días, la escala que se empleará será  $\log_{10} T$ , donde  $T$  estará dado en días.

**TABLA 1**

<u>Disciplina</u>	<u>Abreviación</u>	<u>Nº de datos</u>
Deformación del terreno	1	19
Inclinación y elongación	1	84
Sismo premonitor	f	73
Valor b	b	11
Microsismicidad	m	3
Mecanismo focal	s	6
Corrimiento anómalo	c	2
$V_p/V_s$	v	27
$V_p$ y $V_s$	w	11
Geomagnetismo	g	2
Mareas terrestres	e	13
Resistividad	r	17
Radón	1	9
Agua subterránea	u	2
Flujo de aceite	o	3
TOTAL		282

La figura C-1 muestra el tiempo precursor en es cala logarítmica, que se da en lapsos de 0.5 días. A pri mera vista podemos apreciar que se presentan frecuencias máximas alrededor de  $\log T = -1$  y  $1$ , respectivamente.

Uno de los principales problemas que se presen tan en la predicción de sismos, es relacionar el fenómeno precursor con la magnitud, como primera aproximación, pa ra poder efectuar un análisis coherente, vamos a represen

tar en la figura C-2 un juego de histogramas, clasificados por rangos de magnitud. En la figura C-2 podemos ver gráficamente histogramas relacionados entre la magnitud y tiempo precursor, en este caso para precursores que se identifican como del mecanismo focal; se puede apreciar con toda claridad que la frecuencia máxima, varía para cada rango de magnitud, mientras más grande es el lapso precursor, parece más grande la magnitud del terremoto que anuncia.

Esta ley, muy general, ha permitido deducir la primera aproximación, en forma de una recta logarítmica del tipo  $\log T = aM + c$ . Los coeficientes han sido determinados por diferentes investigadores y son:

$$\log T = 0.76M - 1.83 \quad (\text{Rikitake})$$

$$\log T = 0.685M - 1.57 \quad (\text{Scholz})$$

$$\log T = 0.80M - 1.92 \quad (\text{Whitcomb})$$

$$\log T = 0.79M - 1.88 \quad (\text{Tsubokawa})$$

Originalmente, los fenómenos precursores fueron clasificados en dos tipos: A, de corto plazo y B, de largo plazo; posteriormente, un análisis de mayor número de datos permitió clasificarlos en los tipos  $A_1$ ,  $A_2$ , y B.

El precursor tipo  $A_1$  se presenta bajo diferentes formas, a veces por medio de deformaciones del terreno, cambios de resistividad, que anuncian el próximo terremoto en un lapso de horas, suele ser difícil identificarlo debido al ruido de fondo. Precursores de este tipo

se ven frecuentemente acompañados por terremotos de gran magnitud, p.e. M mayor que 6 ó 7. Físicamente hablando, se puede deducir que es producto de un deslizamiento de falla, antes de la ruptura principal en la región focal, lo que caracterizaría a los precursores de este tipo.

Un precursor tipo  $A_2$  se caracteriza por la dependencia del lapso precursor, con respecto a la magnitud del terremoto que se avecina. Con frecuencia este tipo de precursor es observado en términos de la deformación del terreno, cambios en las velocidades en las ondas sísmicas y cambios en la resistividad. Precursores de este tipo son usuales para predecir un terremoto con un lapso de días, meses o años, dependiendo de la magnitud del sismo que le sigue. Si pudiéramos preveer la magnitud por algunos otros medios, tales como la extensión espacial de deformación cortical anómala (Rikitake, 1969), sería posible estimar a grosso modo el tiempo de ocurrencia. En el mismo momento de observar un precursor  $A_2$ , y contando con otra información, es posible hacer una aproximación probabilística para inferir el tiempo de ocurrencia. Los tipos  $A_2$  pueden interpretarse como relacionados con el desarrollo de la dilatancia.

El precursor tipo B, es el fenómeno que todavía no ha sido relacionado con ningún mecanismo focal conocido, aunque ya puede ser explicado por la tesis de Stuart; algunos de ellos se registran en instrumentos especiales como en vasos comunicantes o inclinómetros empo

trados, no pudiéndose establecer ninguna tendencia en el tiempo de precedencia, son anomalías que pueden ser o no precursoras de sismos.

Generalizando, cuando observamos una señal anómala de un fenómeno geofísico listado en la tabla 1, las probabilidades de que éste sea clasificado en los tipos  $A_1$ ,  $A_2$  y B, se estiman según los siguientes tres casos, basándonos en los datos existentes de los tipos respectivos.

- Caso 1 Datos para disciplinas t y f, se asignan al tipo B.
- Caso 2 Datos sólo para disciplinas f, se asignan al tipo B.
- Caso 3 Similar al caso 2, pero de datos tomados de vasos comunicantes e inclinómetros empotrados, se transfieren al juego de datos A.

En la tabla 2, están dadas las posibilidades basadas en el actual porcentaje de datos empleados para señales precursoras que están asignados a sus respectivos tipos de precursor.

**TABLA 2**

PROBABILIDADES EN PORCENTAJE PARA QUE UNA SEÑAL PRECURSORA, SEA ASIGNADA A SU TIPO RESPECTIVO.

	$A_1$	$A_2$	B
	(%)	(%)	(%)
Caso 1	6	36	58
Caso 2	8	49	43
Caso 3	11	57	32

---

## **4.2 EL MODELO CHINO.**

El programa chino de predicción de sismos es un ejemplo único en el mundo, donde a partir de prácticamente nada, se ha establecido un sistema que podríamos considerar el más grande en la actualidad.

Este programa, representa parte de un constante esfuerzo de expansión en la ciencia y la tecnología, un esfuerzo que recibe un apoyo masivo en hombres y materiales, todo ello consecuencia de la revolución cultural china de 1966 a 1969, en las que se racionalizaron todas las ciencias de la tierra, y se simplificó su administración, se redujo los estudios teóricos a gran escala transformando el esfuerzo en aplicaciones prácticas, incluyendo una descentralización de la autoridad, en beneficio de los niveles regionales y provinciales. Se dió a las ciencias de la tierra un enfoque para tópicos de significado nacional inmediato.

El programa chino de predicción de sismos, abarca todos los métodos que se han sugerido alguna vez en cualquier parte del mundo. Los científicos chinos se mantienen al tanto de la literatura corriente en nuevas técnicas, y desarrollan sus propios experimentos empleando instrumentos de su propia manufactura. Sus sismógrafos son modernos, y tienen detectores de radón en gran número. (Un programa de campo más avanzado que en Estados Unidos), geodímetros de laser capaces de determinar distancias de una parte en un millón sobre una distancia de 20 km., también

tienen magnetómetros de presección nuclear. Al mismo tiempo emplean computadoras modernas y disponen de gran número de datos.

El énfasis en la investigación sísmica se debe a la numerosa pérdida de vidas debido a los sismos.

Haciendo una comparación, en los Estados Unidos se indica la posibilidad de ocurrencia de un sismo en un tiempo y lugar determinado, en China, se hace un anuncio público que resulta con la evacuación de la población. Se deduce que los chinos tienen experiencia con los aspectos sociales de una predicción. El problema de comunicar esta información al público, sus consecuencias y la reacción a las falsas alarmas. Pero creen que el acto de predecir es tan importante como encontrar una base técnica para la predicción, pues no se puede o debe mover grandes masas de población, con un sistema elemental de predicción.

En estos momentos, en Pekín se están empleando varias técnicas de programación y clasificación de sismos precursores, este trabajo se extiende a otras regiones, como Montaña Roja y Yunan. Trabajan en cambios de velocidades sísmicas, flujo de radón, nivel de agua en pozos, mareas telúricas, campo geomagnético, deformaciones corticales y frecuencia de ocurrencia de microsismos.

Donde han conseguido acumular una gran cantidad de datos, es en la recopilación de anomalías electromagnéticas, hechas por personal voluntario, y damos muestra de

su valía en los siguientes ejemplos.

En Yunan, antes del sismo del 17 de Julio de 1972, de  $M = 4.8$ , las medidas telúricas a 20 kilómetros del epicentro, mostraban caídas anormales en sus valores algunos días antes del terremoto. Observando los registros de 20 días antes, aparecían cambios anómalos. Estos datos combinados con cambios en pozos de agua, inclinaciones, anomalías en radón y comportamiento anómalo de animales, se emplearon para hacer una predicción. El anuncio decía que se esperaba un sismo de  $M = 5$ , alrededor de algunos días antes o después del 15 de Julio.

En Yunshan-Takuan, algunos días antes del terremoto del 11 de Mayo de 1974, del  $M = 7.1$ . Un telurímetro de aficionado mostró una caída de alrededor de 70 A a unos 90 km. del epicentro. El nivel de ruido para los dos meses precedentes había caído algunos microamperes. Después de una réplica de  $M = 6$ , la corriente subió cerca de 50 microamperes y se mantuvo durante 30 días, esto fue registrado para ambos sismos por otros dos telurímetros de aficionado. No obstante, la réplica fue anunciada públicamente en Junio 12, como un terremoto  $M = 5$  para Junio 13 ó 14. El suceso ocurrió el 15 de Junio, después de las medidas tomadas en los condados afectados. El anuncio se basó en otras observaciones: notables cambios en las cualidades de agua de pozos y comportamiento inusual de animales.

En el observatorio cercano a Hsingt'ai, el ana-

lista Ma Shen Ling, reportó anomalías en el ploteo de las diferencias diarias de una red de magnetómetros que precedieron a dos terremotos de  $M = 4.4$  y  $5.2$ , considerándose que las desviaciones en las diferencias en el flujo medio, si es del mismo signo durante 5 días consecutivos, constituyen una anomalía.

El grupo investigador de Montaña Roja, argumentó una predicción pública de un terremoto de  $M = 5.9$  que ocurrió el 6 de Junio de 1974. La predicción estuvo basada en una variedad de observaciones que incluyeron un gran incremento anómalo en el campo magnético diferencial dos días antes del evento, también la resistividad aparente mostró una disminución que fue aumentando 2 ó 3 meses antes del terremoto.

Otro de los métodos en uso, es la medición continua de deformaciones en la corteza por medios instrumentales. El trabajo geodésico es controlado por el SSB, la instrumentación empleada es comparable a la más moderna que se emplea en los Estados Unidos.

En Marzo de 1971, tuvo lugar un terremoto de  $M = 6.8$  a 35 km. aguas abajo del Lago Tosu en la provincia de Tsingt'ai. El nivel del Lago en el reservorio bajó 41 cm. un mes antes del evento, la razón de disminución fue inusualmente rápida y en sentido opuesto de la subida normal experimentada normalmente en este tiempo del año. Veinticuatro horas antes del movimiento, el nivel volvió a su

bir antes que tuviera lugar el terremoto. Una elevación adicional de 17 cm. fue registrada antes que el nivel se estabilizara una semana después del terremoto.

En la península de Shantung fue detectado un cambio de 25 cm. en el nivel del mar por un calibrador de mareas, antes del terremoto del golfo de Po Hai de  $M=7.4$  ocurrido el 18 de Julio de 1969. Este cambio empezó a ocurrir unos ocho años antes del terremoto, y volvió a la normalidad después del sismo.

Los registros de inclinómetros mostraron anomalías previas a dos terremotos. En 1971, un terremoto  $M=6.0$  localizado cerca de Mapien, fue precedido por una variación de inclinación de  $7 \times 10^{-6}$  rad, unos tres días antes del evento. La inclinación empezó a ceder en el día precedente al terremoto y continuó decreciendo pasado el evento, recobrando su valor previo en una semana.

El terremoto del 17 de Julio de 1972, de  $M=4.8$  en la provincia de Yunán, fue predicho públicamente. Fue precedido por una inclinación anómala, por un período de 15 días antes del evento, los vectores de inclinación diaria fueron dirigidos casi directamente al sur, y tuvo una variación aproximadamente constante. Tres días antes del terremoto, la orientación cambió a NNO, pero continuó con la misma amplitud diaria, la orientación cambió al este el día antes de la ocurrencia del terremoto.

Los trabajos en radón, se efectúan con un elec

trómetro para medir el flujo de partículas alfa (y por consecuencia radón) de muestras de agua tomadas de pozos y brotes cercanos a zonas de falla. La técnica puede ser empleada por personal no especializado.

En China se han controlado y muestreado las variaciones de radón en gran número de pozos. Esto les ha permitido observar seis casos de terremotos entre  $M = 4.3$  y  $M = 7.9$  que han sido precedidos por aumentos anómalos en el contenido de radón. El lapso entre anomalía y evento es de algunos días a decenas de días. Para cinco de los eventos entre los rangos de magnitud 4.3 - 5.0, las anomalías fueron registradas a distancias menores de 110 km. del epicentro, para temblores mayores de 7.9 en el golfo de Pohai, los pozos que mostraron anomalías se localizaron hasta 250 - 300 km.

Los mejores ejemplos registrados en precursores de radón, vienen de cuatro pozos de una profundidad entre 50-200 m., cerca al observatorio de Montaña Roja. Antes de varios eventos, el flujo de radón se incrementó 2-3 veces el nivel normal. Uno de estos ejemplos fue el terremoto de magnitud 6.9 ocurrido el 6 de Junio de 1974; donde se manifestó el fenómeno precursor unos 15 días antes, a una distancia de 49 kilómetros del epicentro. Para el mismo evento hubo cambios en la razón  $V_p/V_s$  de alrededor de 3.5 meses de duración, y un período de quietud anómala de microsismos, de dos meses de duración, que fue detectado por el sistema de estaciones cercanas a

Montaña Roja.

Los cambios en las velocidades sísmicas también se emplean en China como delatores de terremotos, y tienen numerosos ejemplos. Feng publicó dos documentos en cambios  $V_p/V_s$ , y de variaciones en la razón de amplitud de ondas P y S, para terremotos en el área de Lanchow. Encontró que cuando  $V_p/V_s$  vuelve a la normalidad, tiende a sobredispararse a valores de 1.8 antes de ocurrir el evento, en concordancia con la teoría de dilatación.

En los registros históricos chinos, y más recientemente en registros instrumentales, se nota un período de baja en la actividad sísmica normal, antes de grandes terremotos. El catálogo histórico indica bajas anomalías de eventos moderados en un período de decenas de años, antes de varios terremotos. Dando como ejemplo el de Shensi en 1556, de magnitud 8 ó más, en Shangtun en 1668 y en Kansu en 1920. Los sismólogos chinos suponen que las zonas de ruptura de grandes terremotos, tienden a formar brechas sísmicas. Presentándose en forma de una sobreestructura activa de sismos moderados que ocurren en los perímetros de estas brechas sísmicas antes de grandes terremotos. La actividad en el área inmediata antes de los terremotos del área de Hsingt'ai de 1966, se reportaron bajo 20 años antes de los eventos de 1966, pero fue mayor de lo normal en el área circundante durante el mismo período.

También registran en los catálogos históricos 15

instancias, desde el 94 AC a 1973, en que hubo aumentos o caídas de centímetros a varios metros de los niveles de agua en pozos, antes de terremotos.

Los científicos de la estación de Tahuinchiang, estudiaron cambios de nivel en tres pozos en el área de Pekín, apartados unos 50 km. y con una profundidad de 250-300 m. Los cambios de nivel de agua tuvieron correlación entre pares de pozos, partiendo estos unos 4.5 meses antes del sismo de magnitud 4.5, el 25 de Marzo de 1972, localizado a unos 40 km. de los pozos. Este chequeo continuo de niveles de agua en pozos, se efectúa en varios lugares de la China, incluyendo también características físicas (burbujas, color, turbiedad y olor inusual) que han sido reportadas corto tiempo antes de algunos terremotos.

Un fenómeno que ha merecido la atención como precursor, es el sonido acústico subterráneo, llegando a establecer que se debe a focos muy superficiales y una muy alta vibración.

El punto más revolucionario del sistema chino de predicción de sismos, se encuentra en la observación del comportamiento anómalo de animales. En tres ejemplos de terremotos predichos públicamente, el comportamiento inusual de animales fue listado como una de las principales bases para hacer la predicción. El fenómeno no puede ser analizado en laboratorio, pero algunas de sus descripciones cualitativas son notables. Se han visto ratas de-

jar graneros y casas, comportándose de manera irracional, culebras dejar sus guaridas en gran número, gallinas rehusarse ir a sus gallineros al anochecer, perros ladrando todo el día, y en tanto, los aldeanos han tomado seriamente las observaciones reportándolas a las brigadas sismológicas. Estos datos, posiblemente sirven para localizar el evento en espacio y tiempo.

El proceso de alarma y de anuncio público de terremotos, se ha puesto en actividad unas 11 veces. Cuando se presentan anomalías en los registros, de tipo premonitor, los científicos de las brigadas sismológicas locales se dedican a inspeccionar detalladamente los datos de las estaciones de las brigadas sismológicas locales (SSB), reportándose al observatorio central en la provincia. Si los científicos acuerdan que es inminente un terremoto, se estudia la posibilidad de hacer un estimado del tiempo, lugar, localización y magnitud, y los oficiales del condado son informados. Si la magnitud predicha es grande, digamos  $M$  mayor que 5.5, se informa al SSB de Pekín antes que la acción tenga lugar. Las medidas que se toman inciden en la evacuación de estructuras particularmente peligrosas en caso de sismos menores.

El aldeano de las áreas sísmicas está inusualmente bien informado sobre terremotos y sus efectos, este esfuerzo educacional, se lleva a cabo por las brigadas sismológicas locales donde instruyen también sobre posibles precursores.

### **4.3 ESTUDIOS PARA PREDECIR SISMOS EN EL PERU.**

Uno de los factores que dificultan este tipo de estudios en nuestro país, es la dificultad para obtener datos sísmicos completos que nos permitan efectuar un análisis cualitativo y cuantitativo de los fenómenos precursoros que caracterizan a nuestras regiones.

El primer intento, se efectuó en 1965, por un convenio de cooperación con el instituto de prevención de desastres de la Universidad de Kyoto, Japón y el instituto geofísico del Perú. Por intermedio del convenio, se situaron ocho estaciones de observación para deformación cortical en la zona sur del Perú, en la vecindad de Ica y Arequipa. Cada estación de observación, estaba equipada de la siguiente manera: 2 extensómetros, tipo cuerda de extensión, 2 inclinómetros, de tipo péndulo horizontal.

El 7 de Junio de 1966, a 0h 59 m. 46 s. GMT; ocurrió un terremoto en el mar, a 98 kilómetros de la estación de observación de Ica. Sus coordenadas focales tuvieron una latitud  $14.89^{\circ}\text{S}$  y long.  $75.84^{\circ}\text{Oeste}$ , ubicado a una profundidad de 48 km., y de una magnitud calculada de 6.5 en la escala de Richter.

Por medio de un estudio de las réplicas, D. Huaco (1975), determinó que se había producido una dislocación de 40 kilómetros de longitud, estimando el monto de dislocación en 0.1 m.

El punto de nuestro interés, estriba en que varios días antes del terremoto, la estación de deformación cortical de Ica, mostró un constante incremento de pendientes, además, en correspondencia con las teorías dilatantes, cuatro días antes del terremoto la componente EW cambió de dirección.

El otro punto de correspondencia con nuestros análisis teóricos, también concuerda con la extensión teórica calculada por Scholz para una zona dilatante, de aproximadamente dos longitudes de falla, la discordancia se presenta en la profundidad, también puede ser explicado el fenómeno por medio de la teoría de dislocación estática, que lo explicaría como situada la estación en zona de corte, según el modelo matemático hecho por el doctor Huaco.

El 24 de Julio de 1969, se produjo un sismo de magnitud 5.9 en Pariahuanca, Huancayo; a 20 kilómetros de la estación sismológica de Huancayo. Este terremoto tuvo un epicentro muy superficial, a un km. de profundidad, y a continuación fueron registradas 300 réplicas, posteriormente, el 1 de Octubre de 1969, ocurrió un sismo en la misma zona a 4 km. de profundidad, de magnitud 6.4; no hubo en este caso, lamentablemente, registro instrumental de deformaciones, aunque por mediciones esporádicas, se estableció una velocidad promedio del desplazamiento en 10 cm/año.

Esta característica de falla activa, y la sismi

cidad aumentada debido a las réplicas del sismo de Julio, permitieron a Deza hacer un gráfico de frecuencias de microsismos, que incluimos en la fig. C-5, donde podemos apreciar una disminución de sismicidad antes del evento del primero de Octubre.

Estos hechos, aislados, nos demuestran que en nuestro país sería posible establecer métodos y sistemas de predicción, cuyo costo quedaría ampliamente amortizado con la primera predicción acertada que se hiciera.

# CAPITULO V

## CONCLUSIONES

Queda demostrado que el origen de los sismos se debe a la dinámica de la corteza terrestre. Esta dinámica en la que está incluida la deriva continental, queda probada en forma fehaciente. Y consideramos que los datos aportados, investigando su origen, credibilidad y valor, son firmes pruebas de esta teoría.

En nuestro caso, el Perú se encuentra situado en un borde de placa, la Placa Sudamericana y sometidos a la interacción dinámica de la Placa Nazca y la Sudamericana, la Placa Nazca se sumerge en la fosa Perú-Chile; y causa los movimientos de origen telúrico en el borde de placa en el que estamos situados.

La predicción de sismos, presenta caracteres científicamente probados, los fenómenos precursoros podemos considerarlos como un hecho consumado y la interpretación teórica ya ha dejado de ser una mera hipótesis, para convertirse en un razonable criterio científicamente probado.

El modelo Chino, casi desconocido para nosotros, nos muestra hasta que punto se puede organizar un adecuado sistema de alarma, aplicando en forma práctica, los fenómenos precursoros aquí descritos, incluyendo en su apli

cación, un sistema de aviso y evacuación de la población.

La aplicación de estos sistemas de predicción, es muy necesario para nuestro país, siéndonos casi imprescindible empezar lo más pronto posible, el costo, como hemos dicho anteriormente, quedaría plenamente amortizado con la primera predicción acertada que se hiciera.

## BIBLIOGRAFIA

- (1) ALFRED WEGENER.  
"The Origin of Continents and Oceans"  
Dover Publications, Inc. 1966.
- (2) F.J. VINE  
"Spreading of the Ocean Floor: New Evidence"  
Science, Vol. 154. 1966
- (3) J. TUZO WILSON  
"Deriva Continental y Tectónica de Placas"  
Ediciones H. Blume. 1976
- (4) J.V. RIZNICHENKO, I.L. NERSESSOV  
"A Detailed Study of the Seismic Regime in the Garm  
Epicentral Region"  
Pub. of Phis. of the Earth. Acad. Sci. USSR.1961
- (5) V.I. BUNZ, M.V. GZOVSKIR, et al.  
"Translation"  
Pub.of Foreing Tecnology Division. 1963
- (6) E.O.S.  
"Earthquake Research in China!"  
Pub. of American Geophysical Union. 1975
- (7) SCHOLZ, SYKES, AGGARWAL.  
"A Physical Basis for Earthquake Prediction!"  
Columbia University Press. 1973.

- (8) BEAUMONT AND BERGER.  
"Earthquake Prediction: Modifications of the Earth  
tide, Tilts and Strain by Dilatancy"  
Pub. of Geophys. J.R. astr. Soc. 1974.
- (9) PIERCE, E.T.  
"Atmospheric Electricity and Earthquake Prediction"  
Pub. of Stanford Research Institute, Calif. 1976
- (10) STUART, W.D.  
"Difusionless Dilatancy Model for Earthquake precursors"  
Pub. of National Center for Earthquake Research.U.S.  
Geological Survey. 1974.
- (11) J.D. VANWORMER, et al.  
" $V_p/V_s$  and b-values: A test of the Dilatancy model  
for Earthquake Precursors!"  
Pub. of Seismological Laboratory, Mackay School of  
Mines, Reno, Nevada. 1975
- (12) NUR, A.  
"Dilatancy, pore fluids, and premonitory variations  
of  $T_s/T_p$  travel times!"  
Bull seism. Soc. Am. 62 1217-1222 1972.
- (13) E. DEZA  
"The Pariahuanca Earthquake"  
Instituto Geofísico del Perú. 1971.
- (14) D. HUACO  
"Tesis de Doctorado" (copia personal)  
Instituto Geofísico del Perú. 1975