

LA FUENTE SÍSMICA

Introducción

En este apunte se realiza una breve introducción a la Fuente Sísmica y se resumen algunos temas de importancia práctica para la ingeniería antisísmica, como son, los mecanismos focales y los patrones de radiación asociados.

Debido a que esta materia posee una alta complejidad matemática, la que esta fuera de los alcances de este curso, **realizaremos solo una aproximación intuitiva** a este tópico.

Aproximación Geológica

En primer lugar, como una manera de acercarnos al entendimiento de la fuente sísmica, desarrollaremos una **“aproximación geológica”** al problema.

Consideraremos, tal como se realiza en el campo de la geología estructural, la existencia de una **falla geológica en superficie**.

Esta falla se entiende como un **plano que corta en dos a un bloque**, el que podría corresponde a una estratificación de suelos, tal como la indicada en la Figura 1.

De acuerdo a la inclinación del plano y al movimiento relativo de ambos bloques, se pueden establecer distintos **tipos de fallamiento**.

En el caso de que al moverse, ambos bloques **“tiendan”** a separarse, se habla de una **fallamiento de tipo normal** y si **“tienden”** a juntarse, se habla de **fallamiento de tipo inverso**. Estos tipos de fallamiento se denominan **dip-slip**.

En el caso de que los bloques **“tiendan”** a desplazarse horizontalmente uno respecto del otro, se habla de **fallamiento de tipo strike-slip**, el que puede ser **derecho o izquierdo**, de acuerdo a si se **acerca el bloque de la derecha** o si se **acerca el bloque de la izquierda**, respectivamente. Un ejemplo de strike-slip izquierdo corresponde al caso de la **Falla de San Andrés**, San Francisco, California, Estados Unidos.

En el caso de fallamientos de **tipo inverso con bajo ángulo**, se habla de **fallamientos tipo thrust**, el que corresponde al típico caso de **subducción Chileno-Peruana**.

En general, los movimientos relativos de los bloques pueden tener una orientación cualquiera, por lo que el tipo de fallamiento es una **combinación de fallamientos dip-slip con fallamientos strike-slip**, tal como muestra el ejemplo de la Figura 1, de una **falla inversa lateral izquierda**.

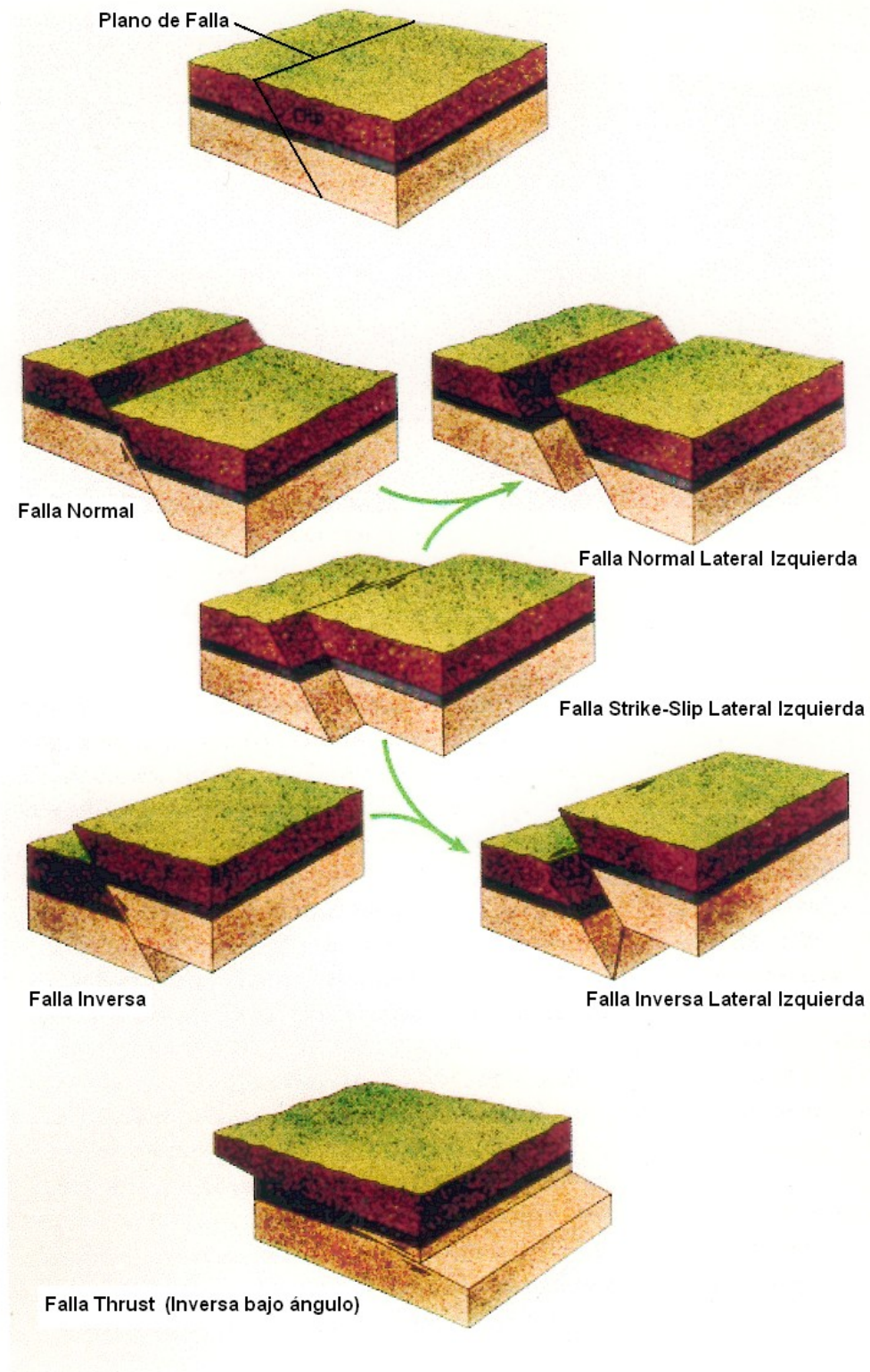


Figura 1: Tipos de fallamiento.

Aproximación Sismológica

La interpretación que elaboran los sismólogos de la fuente sísmica es muy similar y totalmente análoga, a la desarrollada por los geólogos para el caso de las fallas geológicas.

Los sismólogos modelan un terremoto como el desplazamiento de una falla, es decir, como una **discontinuidad de desplazamiento a través de una superficie interna en un medio elástico**.

Esta discontinuidad de desplazamiento en la fuente, **“induce”** un campo de desplazamientos en puntos alejados de esta, pudiendo ser evaluado mediante la **Función de Green**, $\vec{G}(\vec{x}, t)$, del medio.

La Función de Green proporciona el **campo de desplazamiento** en un punto \vec{x} , que resulta de la aplicación de una fuerza unitaria en el punto \vec{x}_0 .

El campo de desplazamiento resultante de una distribución cualquiera de fuerzas de cuerpo, puede ser calculado como la **suma o superposición de las soluciones (o Funciones de Green)**, para las distintas fuentes puntuales individuales.

Se puede demostrar que, el **campo de desplazamientos inducido por el desplazamiento de una falla**, coincide con el producido en el campo lejano por una distribución de **“fuerzas de cuerpo equivalentes”** para el modelo de falla.

Esta distribución de fuerzas equivalente es conocida como una **doble cupla**, ya que corresponde a **dos pares de fuerzas actuando simultáneamente**:

Un par de fuerzas actúa sobre el plano **“real”** de falla o **plano principal de falla**, en direcciones opuestas separadas una distancia d , y el otro par de fuerzas, actúa **sobre el plano auxiliar de falla**, también en direcciones opuestas y también separadas una distancia d .

Debido a que estos planos de falla producen exactamente los mismos desplazamientos sísmicos en el campo lejano, **existe ambigüedad en su determinación**.

La ambigüedad en la identificación del plano principal de falla y el plano auxiliar de falla se aprecia en la Figura 2, donde se han representado los mecanismos focales de un **fallamiento thrust (izquierda)** y de un **fallamiento normal (derecha)**.

En esta figura se observa que tanto los **planos modales a) y c)**, podrían corresponder al **patrón de primeras llegadas** mostrado en **b)**. Una breve explicación del significado de **“patrón de primeras llegadas”** se desarrolla a continuación.

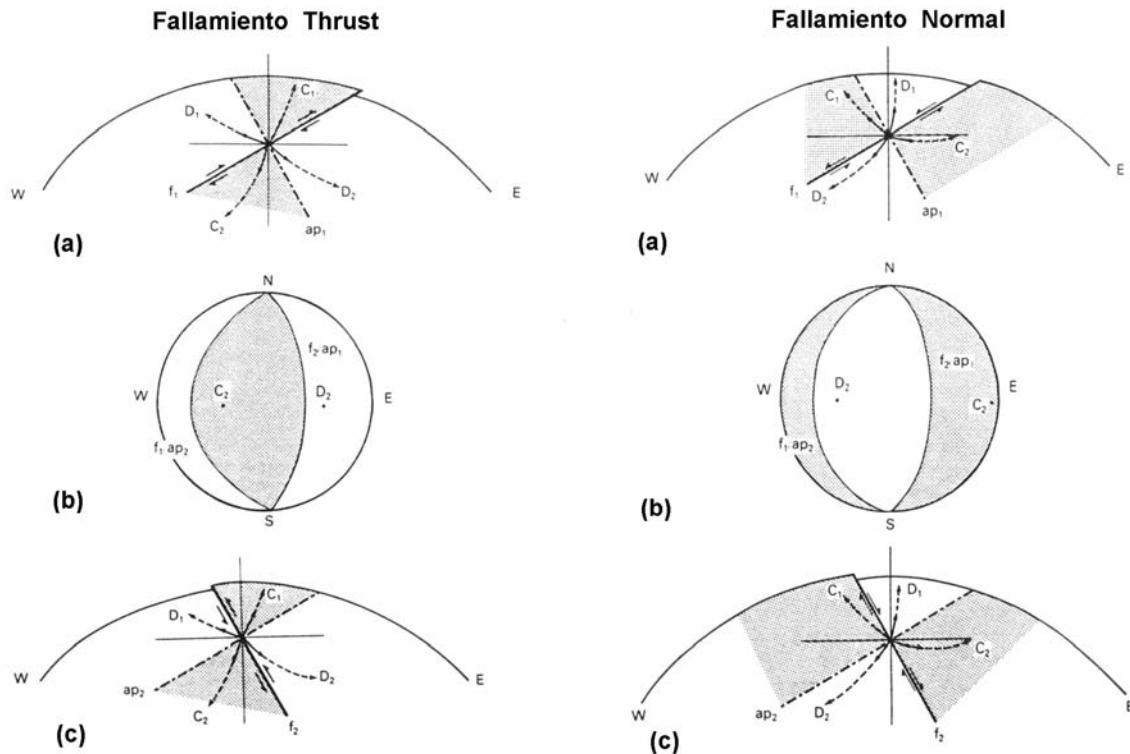


Figura 2: Ambigüedad en la solución de mecanismos focales para fallamientos de tipo thrust (izquierda) y fallamientos de tipo normal (derecha). Tanto los planos modales (a) como los (c), podrían corresponder al patrón de primeras llegadas (b).

Primeras Llegadas de la Onda P

La determinación del mecanismo focal de un sismo se realiza mediante **sofisticados métodos de inversión del tensor de momento**.

No obstante lo anterior, existe un **“método simplificado”** que se ha utilizado ampliamente en la determinación de mecanismos focales de los sismos.

Este método está basado en el **análisis de las primeras llegadas de las ondas P** de los registros, y solo se necesita saber el **sentido de la componente vertical del instrumento (hacia arriba o hacia abajo)** de la primera llegada de la Onda P.

Dada la **geometría del plano de falla** y la **dirección de la dislocación de la falla**, se puede utilizar la **teoría de rayos** para proyectar los rayos de todas las observaciones **“hacia atrás”** para determinar el ángulo al cual ellos **“dejaron”** la fuente.

En cada estación sismológica se determina el **“sentido”** de la primera llegada de las Ondas P, es decir, si es hacia **“arriba”** o hacia **“abajo”**.

Este “sentido” se puede graficar en forma conjunta, considerando la ubicación sobre la superficie de la tierra de cada estación sismológica, para determinar los **cuadrantes de compresión y dilatación** asociados al mecanismo focal de un sismo.

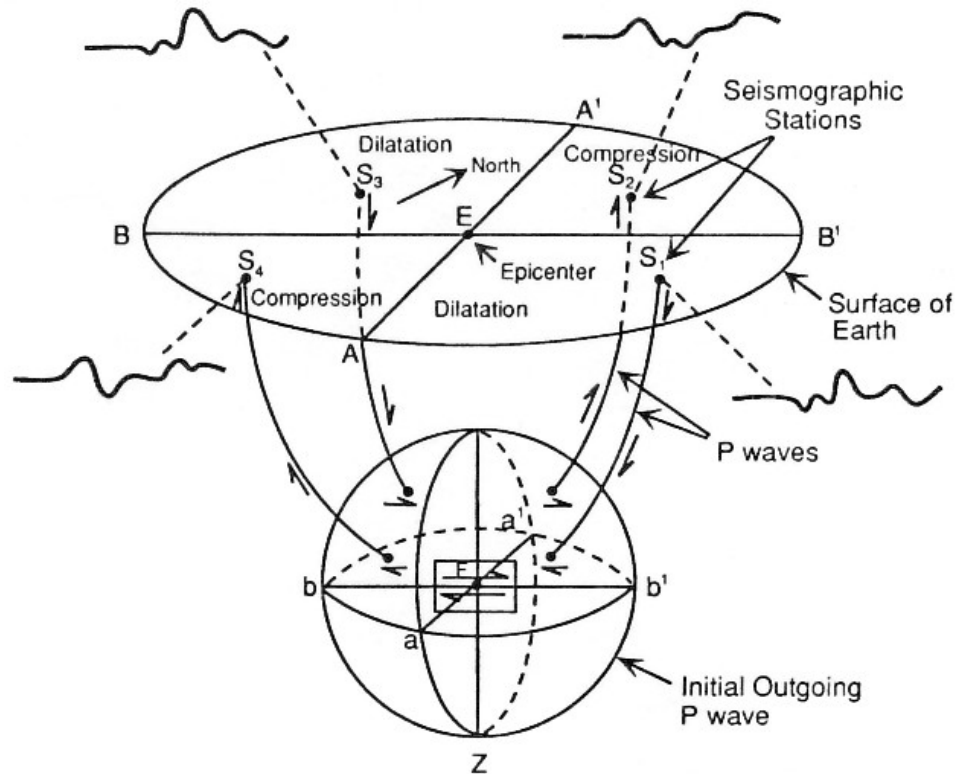


Figura 3: La determinación de los signos de las primeras llegadas de la Onda P en sismómetros ubicados en varias direcciones permite determinar la orientación del plano de falla. Permanece aún la ambigüedad de cual es el plano principal de falla y cual es plano auxiliar de falla.

El resultado de estas observaciones se grafica en lo que es denominado la **esfera focal**, una esfera imaginaria que rodea a la fuente y que muestra los ángulos de “**salida**” de los rayos.

En el caso de **vista en planta**, se acostumbra a representar el **hemisferio “inferior”** de la esfera focal. En el caso de **vistas en perfil o corte**, se acostumbra a representar el **hemisferio “posterior”** de la esfera focal.

Si existen suficientes datos de polaridad, es posible dividir la esfera focal en cuadrantes compresionales y dilatacionales. El mecanismo focal se determina entonces, **encontrando dos planos ortogonales** cuyos círculos máximos en la esfera focal, separan estos cuadrantes.

Tal como ya se dijo, no existe modo de decir, basándose solo en este criterio, cual es el plano principal de falla y cual es el plano auxiliar de falla, permaneciendo la ambigüedad al respecto.

En resumen, **el mecanismo focal de un sismo queda determinado por la orientación en el espacio de los planos principal y auxiliar de falla, y de la dirección de desplazamiento relativo entre las caras del plano principal de falla.** La manera de cómo hacer esto, se discute a continuación.

Fallas Sísmicas

Como ya se discutió, **los terremotos pueden ser idealizados como movimientos de planos de falla de orientación arbitraria.**

Esta orientación en el espacio del plano de falla y el movimiento relativo de sus caras, se describe en función de **tres parámetros** que corresponden a los ángulos **“strike”**, **“dip”** y **“rake”**, tal como muestra la Figura 4, y cuyas definiciones se desarrollan a continuación.

La **orientación en el espacio del plano de falla** se define mediante los ángulos **strike** y **dip**:

El ángulo **strike** corresponde al **“rumbo”** o **“azimut”** de la “traza” de la falla, medido en un plano horizontal, con sentido horario y con origen en el norte geográfico. La “traza” de la falla corresponde a la intersección del plano de falla con la superficie horizontal.

El ángulo **dip** corresponde al **“manteo”** o **“buzamiento”** del plano de falla. Se mide en un plano vertical, desde el plano horizontal hacia **“abajo”** hasta el plano de falla mismo. El plano vertical donde se mide este ángulo, queda definido por la línea de máxima pendiente de la traza horizontal del plano de falla.

El tercer y último parámetro que define el mecanismo focal de un sismo, corresponde al que **describe el movimiento relativo entre un lado de la falla respecto del otro**:

El ángulo **rake** o **slip** corresponde al ángulo de **“deslizamiento”**, el que describe el movimiento relativo del bloque superior, respecto del bloque inferior de la falla, considerado este último como “quieto”. Este ángulo se mide sobre el plano de falla mismo, desde la horizontal hasta la nueva ubicación del punto que se encontraba inmediatamente adyacente en el plano que se quedó quieto.

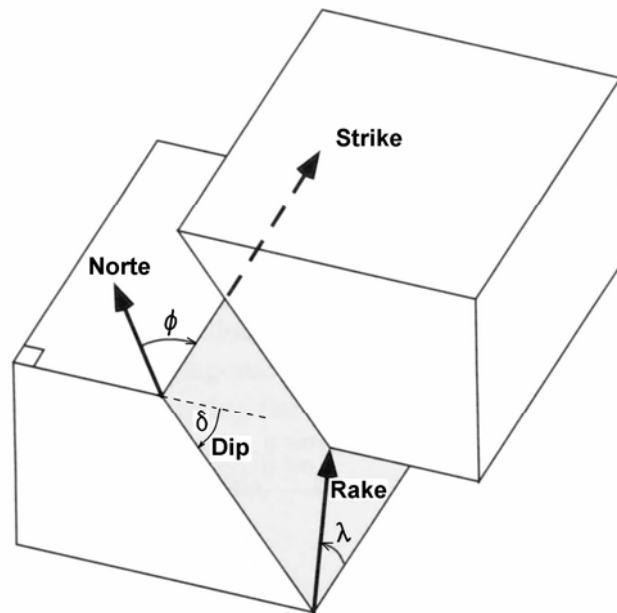
Figura 4: Definición de una falla plana. Se muestran los tres parámetros que definen la orientación en el espacio del plano de falla y su vector de deslizamiento relativo.

Los rangos de variación de los tres ángulos que definen el mecanismo focal de un sismo, se acostumbra a establecer en:

$$\text{strike: } 0 \leq \phi < 360^\circ$$

$$\text{dip: } 0 \leq \delta \leq 90^\circ$$

$$\text{rake: } 0 \leq \lambda < 180^\circ$$



Ejemplos de esferas focales y sus correspondientes geometrías de falla

Considerando la nomenclatura recién establecida para definir los mecanismos focales de los sismos, en esta sección los relacionaremos con las geometrías de fallas más comunes.

En la Figura 5 se observa los típicos fallamientos **dip-slip** y **strike slip** y cuales serían las esferas focales asociadas.

Fallas Strike - Slip

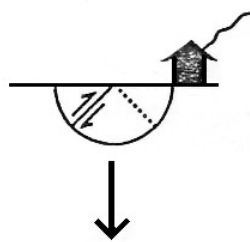


Strike = 45°
Dip = 90°

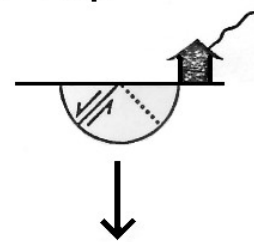


Strike = 0°
Dip = 45°

Fallas Dip - Slip



Falla Inversa



Falla Normal

Figura 5: Fallamientos de tipo strike-slip y dip-slip, y sus esferas focales asociadas.

Otros ejemplos, que contienen ángulos strike distintos de 0° y mecanismos oblicuos, se pueden observar en la Figura 6. Obsérvese una vez más, la dualidad existente entre los planos de falla principal y auxiliar.

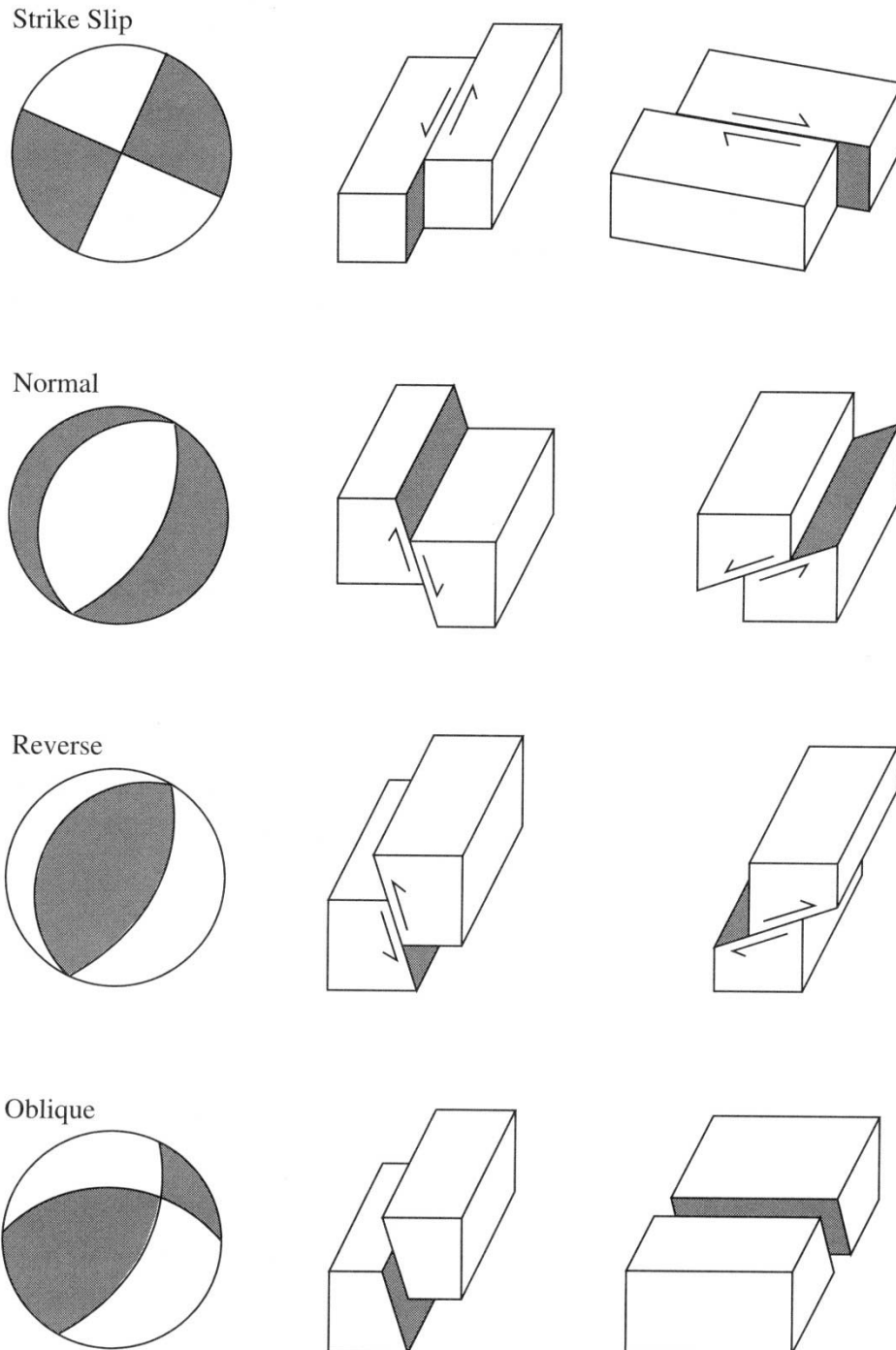


Figura 6: Ejemplos de esferas focales y sus correspondientes geometrías de falla. Observe, una vez más, la dualidad existente entre los planos principales de falla y los planos auxiliares de falla.

Debido a la **similitud de forma** entre la representación de **algunos mecanismos focales** y ciertas **pelotas de playa**, es que a estas representaciones se les ha dado en llamar **“beach balls”**.

Para tener una idea de la diversidad de los mecanismos focales que existen primordialmente en las distintas regiones del mundo, observe la Figura 7.

En esta Figura se puede apreciar, por ejemplo, el **fallamiento típico subductivo** en Chile, representado por los **mecanismos thrust**, y el **fallamiento típico transcurso** de California, representado por **fallamientos de tipo strike slip**.

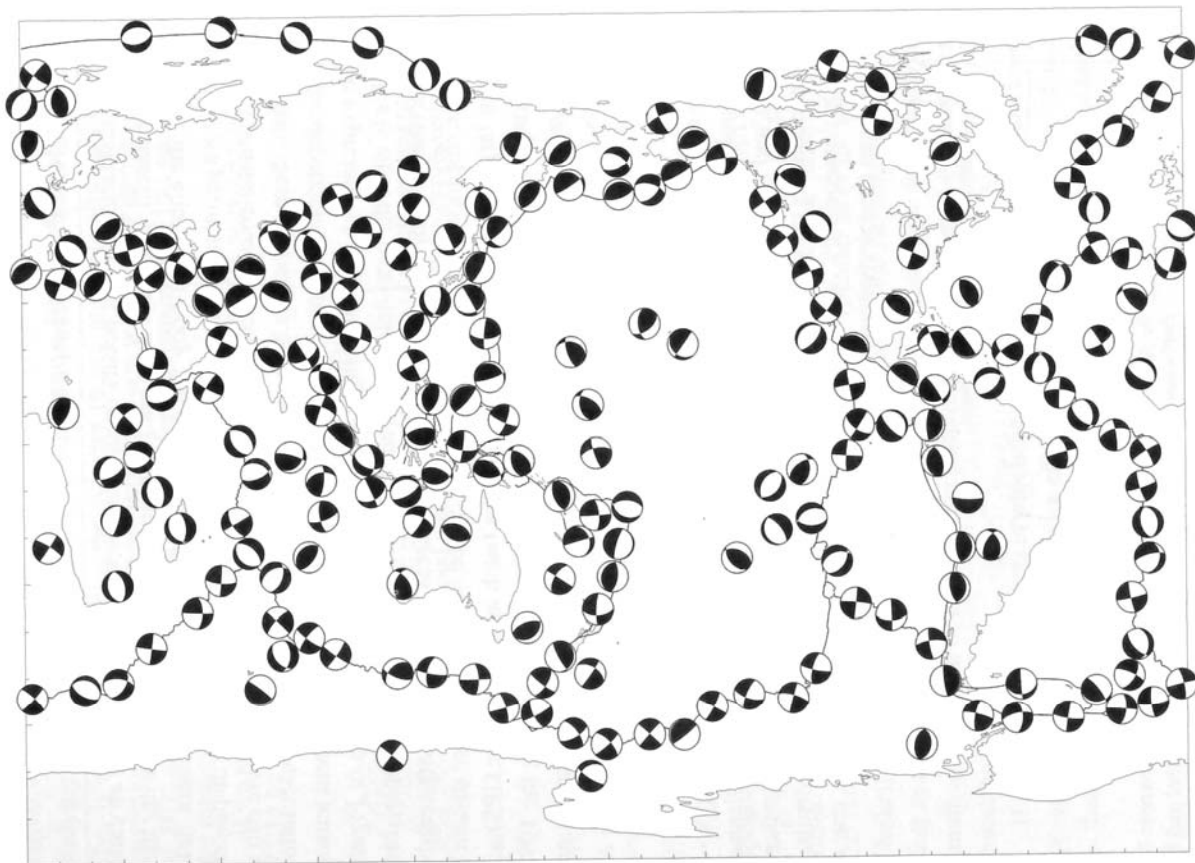


Figura 7: mecanismos focales característicos de algunas regiones del mundo.

Patrón de Radiación de las Ondas S y de las Ondas P

Otro fenómeno relacionado con los mecanismos focales es el de la **orientación relativa de los planos de falla con respecto al sitio específico de emplazamiento de una obra**.

Dada esta orientación relativa, y dado el tipo de onda considerada, ya sea **onda P** u **onda S**, existe una gran variación entre las “**amplitudes**” de onda observadas en un sitio.

Esto se debe a que el **desplazamiento de campo lejano producido por una doble cupla, tiene un patrón lobular** como el indicado en la Figura 8.

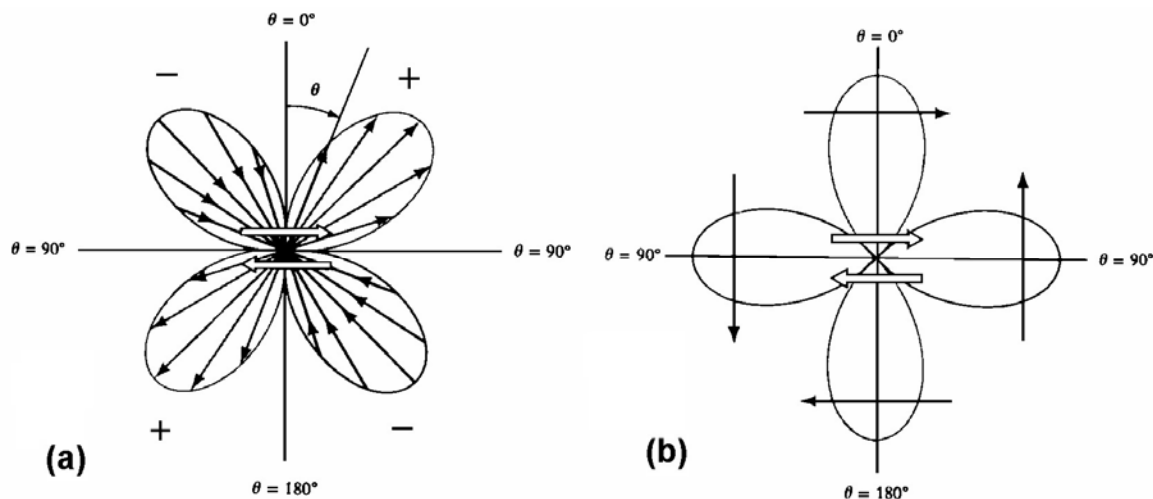


Figura 8: Patrones de radiación producidos por una doble cupla. **(a)** Patrón de radiación de las ondas P. **(b)** Patrón de radiación de las ondas S.

En esta figura se aprecia que para el caso de la **onda P**, la máxima amplitud se produce a **45° de los planos principales y auxiliares** (Figura 8 (a)), y para la **onda S** en cambio, la máxima amplitud se produce justo sobre estos planos (Figura 8 (b)).

Esta propiedad de los patrones de radiación, de tener máximos en direcciones específicas, puede ser especialmente importante en el caso de “**encontrarnos**” justo en esta dirección.

Por ejemplo, si consideramos el **patrón de radiación de la onda S**, y nos encontramos **justo “sobre” uno de los planos de falla**, percibiremos la amplitud de la onda S en su máximo.

Este podría ser el caso de un **sismo intraplaca de profundidad intermedia** que ocurriera **justo bajo el sitio de interés**, con uno de sus **planos de fallas de orientación vertical**.

En este caso nos encontraríamos justo en el **máximo del patrón de radiación de la onda S**, y **“sentiríamos”** el sismo en toda su magnitud.

El caso recién descrito podría corresponder al **Terremoto de Chillán de 1939**, el que si bien no tuvo una magnitud demasiado grande ($M_s = 7.8$) y cuyo hipocentro se encontraba bastante alejado de la superficie ($H = 90\text{ km}$), produjo una gran destrucción y el mayor número de víctimas fatales registrado en Chile (aprox. 28.000 muertes).

Como **ejemplo hipotético**, podríamos hacer el ejercicio de **comparar los patrones de radiación** asociados a dos tipos de sismos ocurridos en Chile: un **sismo típico interplaca de subducción**, con un **sismo intraplaca de profundidad intermedia**.

Esta situación se presenta en forma esquemática en la Figura 9. En esta figura se ha utilizado una **sección transversal de la geometría de la subducción**, a una latitud correspondiente a la ciudad de Antofagasta aproximadamente.

Se han graficado los planos principales y auxiliares de falla de ambos tipos de sismos (**interplaca subductivo** e **intraplaca de profundidad intermedia**), suponiendo la orientación más probable de estos.

El **sitio hipotético de interés** correspondería a un punto ubicado en el salar de Atacama, como la ciudad de Calama, o genéricamente, en cualquier ciudad ubicada en el valle central de Chile donde la geometría de subducción fuera similar.

Sobre estos planos de falla **se ha graficado los patrones de radiación** de las **ondas S** para ambos tipos de sismos. Se ha graficado también, una estimación de la **trayectoria de los rayos** desde las fuentes al sitio de interés.

El análisis de la figura permite concluir que la **amplitud relativa de los patrones de radiación es mucho mayor en el caso del sismo intraplaca de profundidad intermedia que en el caso del sismo interplaca subductivo**.

El caso de la ocurrencia de un sismo de tipo intraplaca de profundidad intermedia, en la zona bajo el salar de Atacama, podría corresponder a lo ocurrido en el **Terremoto de Calama de 1950**.

En conclusión, el **conocimiento del mecanismo focal** y de su **patrón de radiación** asociado, debería tenerse presente al momento de determinar el **sismo de control del diseño**, en un caso específico.

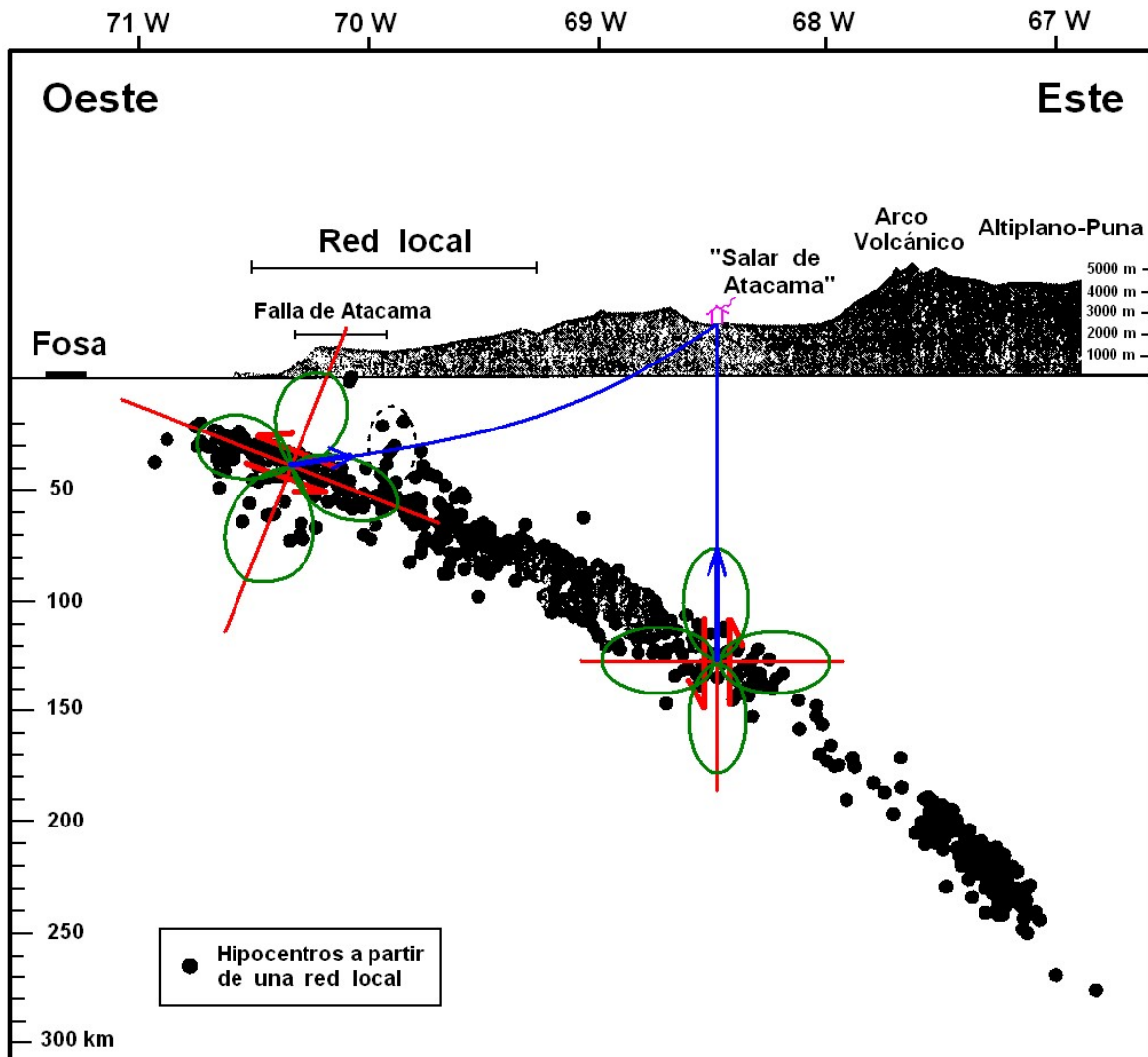


Figura 9: Ejemplo hipotético de comparación de patrones de radiación producidos por sismo de tipo interplaca subductivo y por un sismo de tipo intraplaca de profundidad intermedia. En rojo, se grafican los planos de falla principales y auxiliares de ambos sismos. En verde, se grafican los patrones de radiación de las ondas S, asociados a cada uno de los sismos. En azul, se grafican la trayectoria aproximada de los rayos que van desde la fuente hasta el sitio de interés. En azul, con línea azul mas gruesa se grafica la "amplitud" de los patrones de radiación correspondiente a cada uno de los sismos.