

Universidad de Chile

Departamento de Geofísica

Sismología

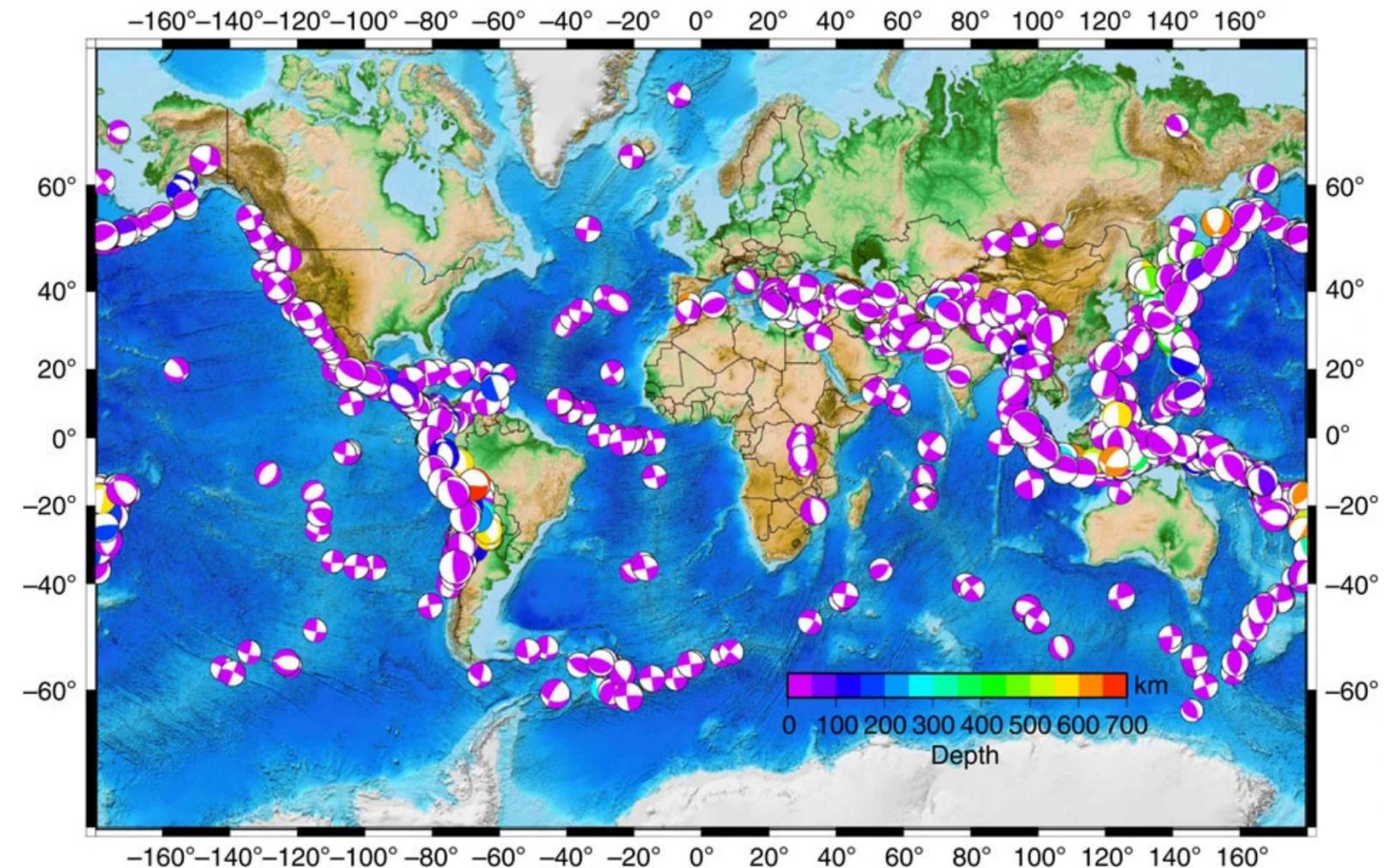
GF 4001-2

Profesor: Sergio Ruíz

Auxiliar 4

Hermann Schwarze

2020



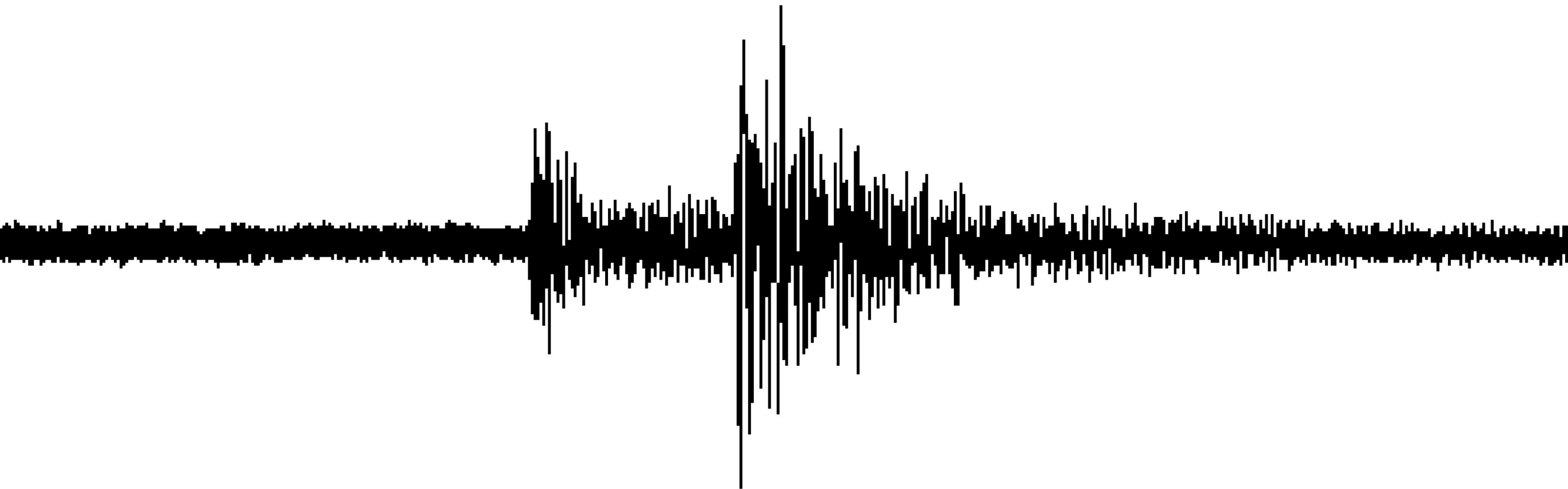
¿Que hemos visto?

- ¿Que es un sismo?
- Ciclo Sísmico
- Leye empíricas
- Tipos de ondas
- Ley de Snell
- Propagación de ondas
- Esfuerzos y deformación
- Tipos de fallas

¿Que viene ahora?

- Repaso sobre ondas
- Patrón de radiación
- Análisis de los Sismogramas
- Localización de terremotos

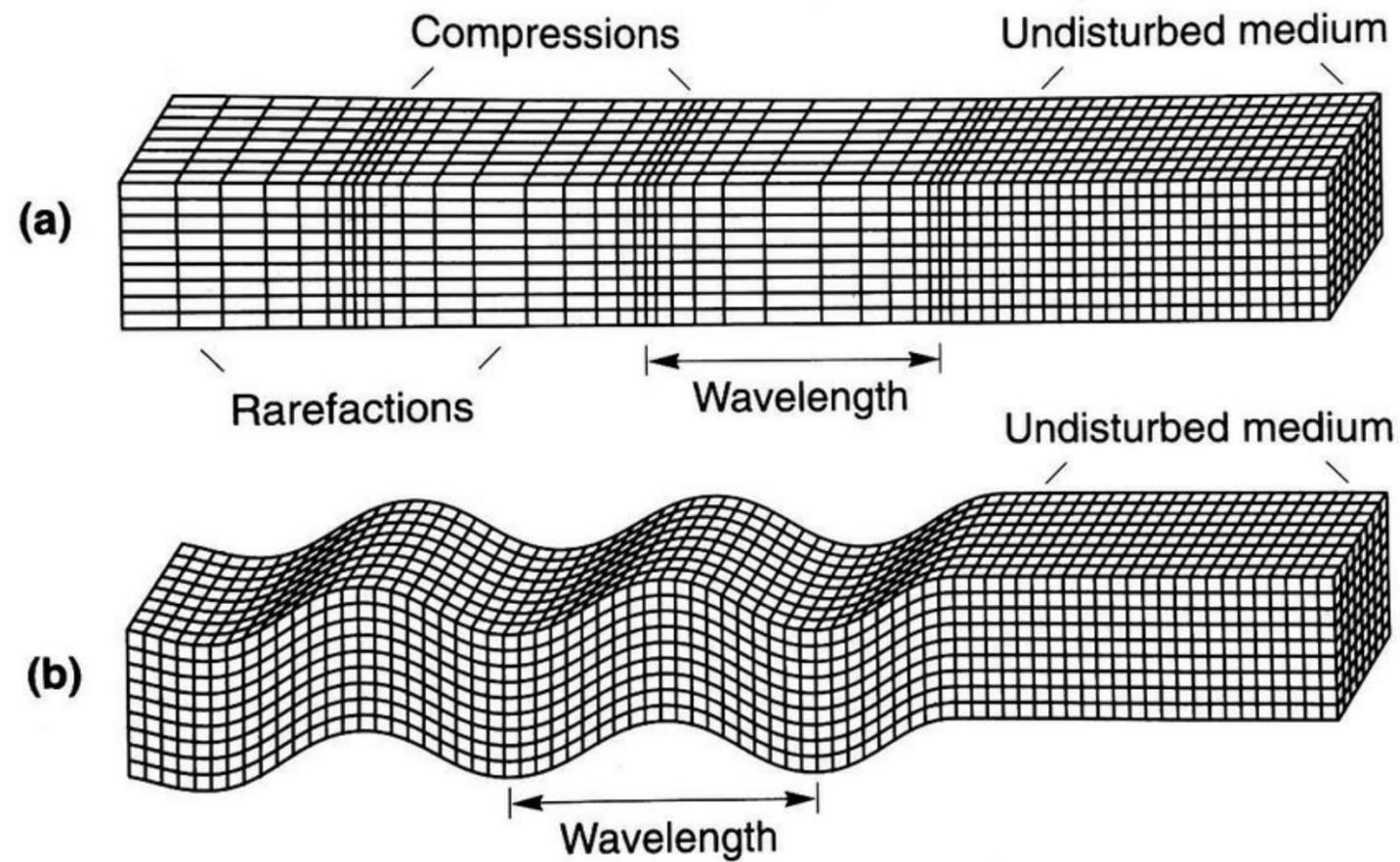
Repaso de Ondas Sísmicas



ONDAS DE CUERPO

ONDAS P

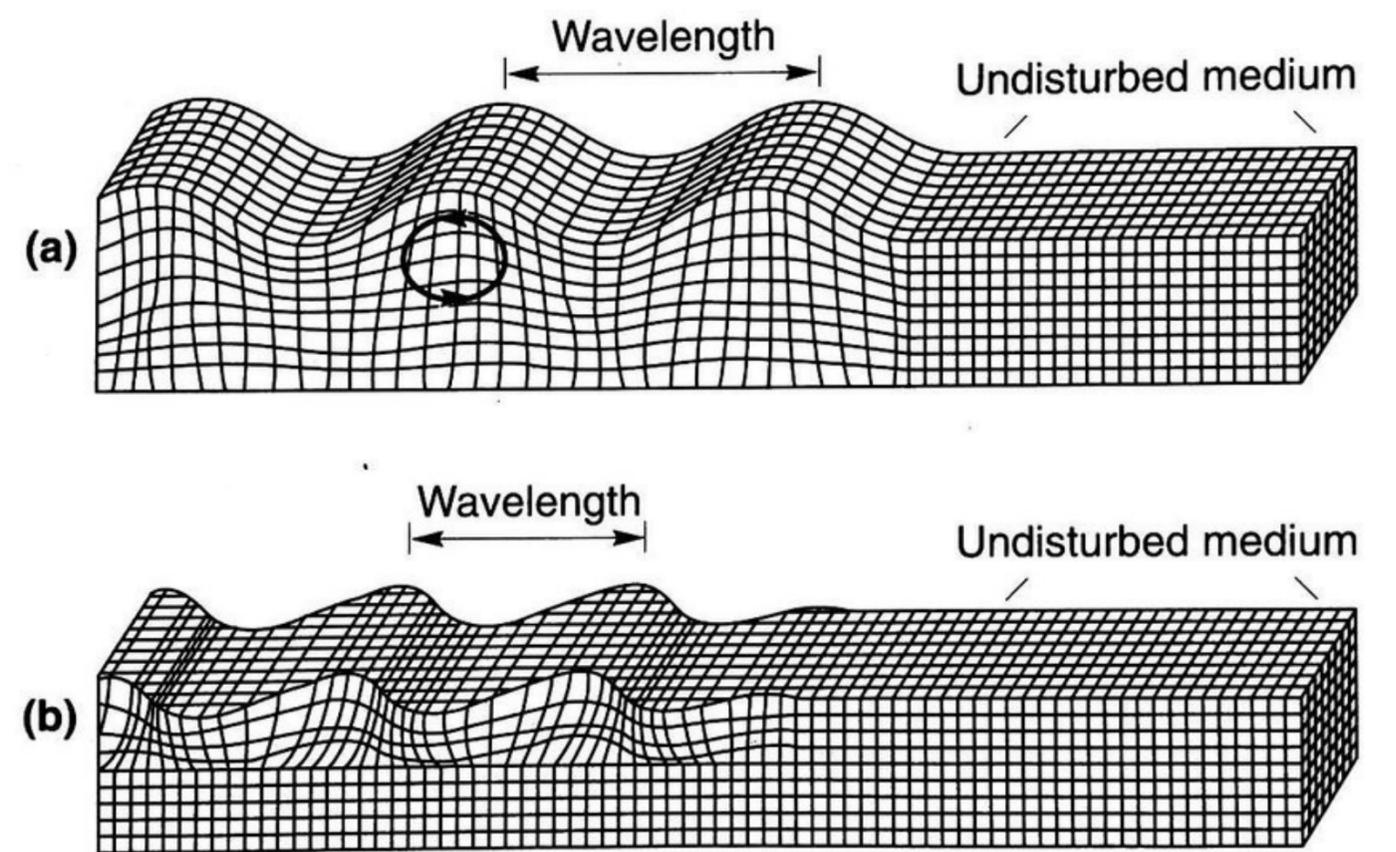
ONDAS S



ONDAS SUPERFICIALES

ONDAS RAYLEIGH

ONDAS LOVE



ONDAS P

Son las ondas primarias (viajan más rápido que ondas S).

Generan un movimiento longitudinal, ya que mueve las partículas en la dirección de propagación del frente de ondas, produciendo dilatación y compresión en el medio (cambio de volumen).

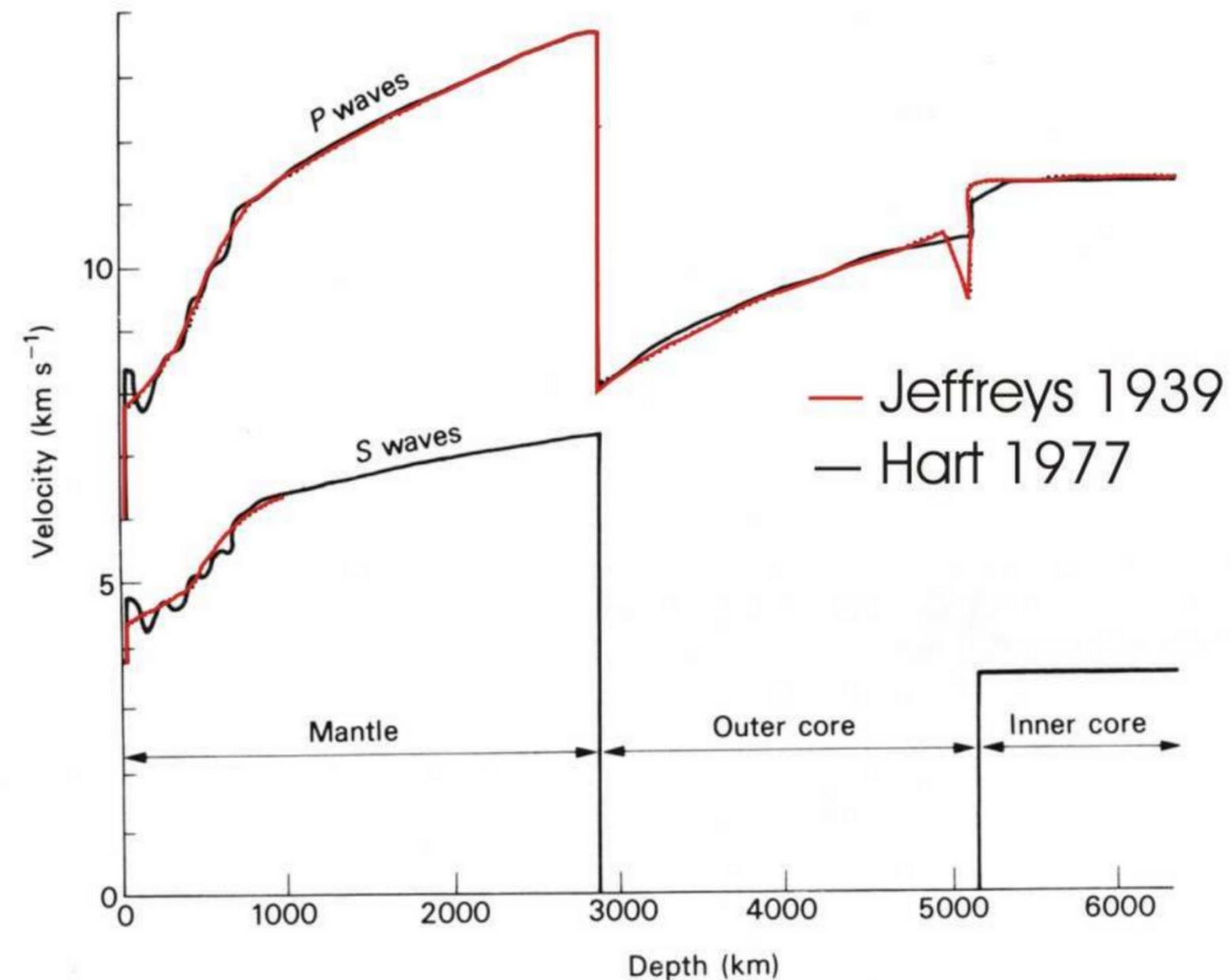
Su movimiento de compresión y dilatación les permite viajar a través de los tres estados de la materia.

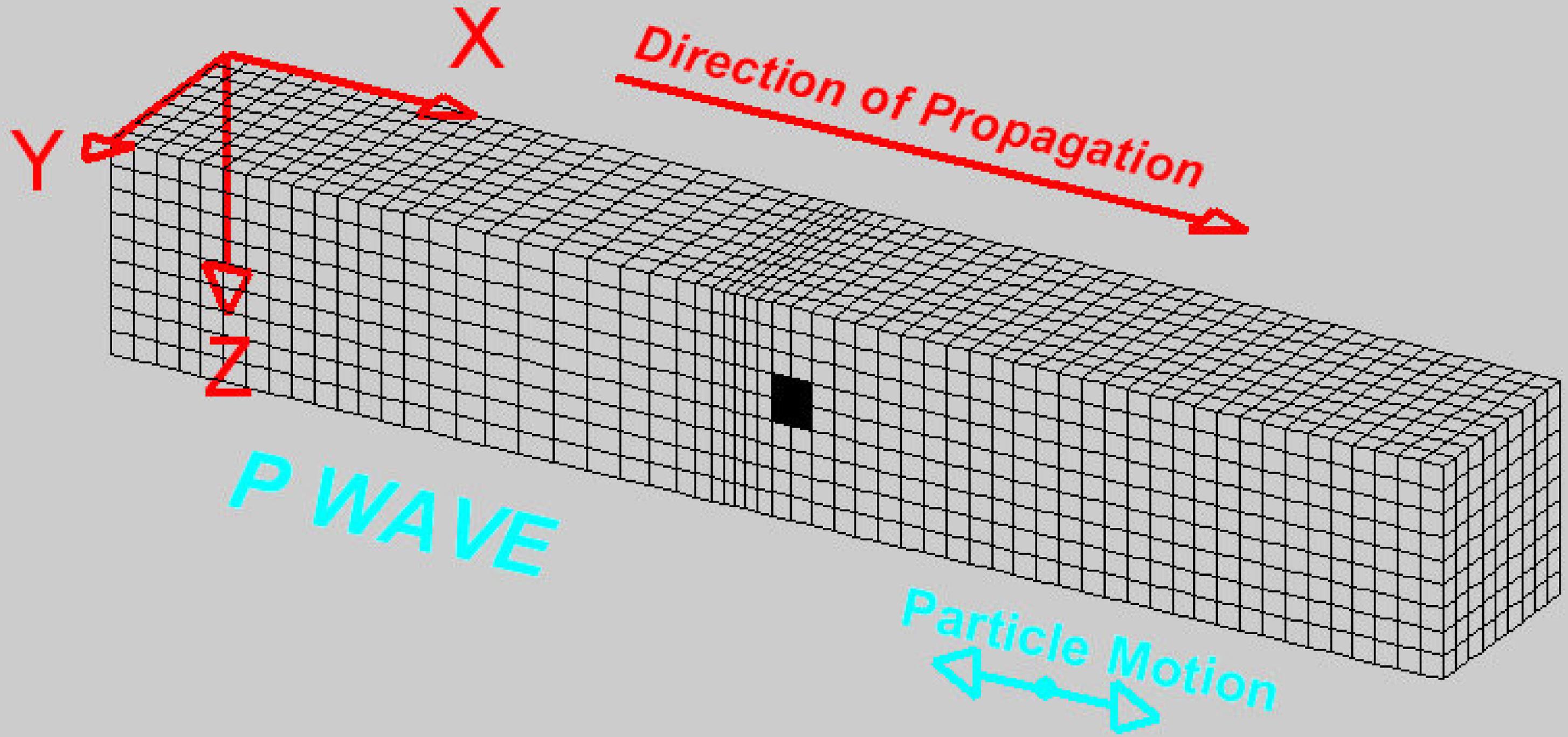
Su velocidad puede escribirse como

$$\alpha = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{\kappa + \frac{4}{3}\mu}{\rho}}$$

donde λ y μ son los parámetros de Lamè, κ es el modulo de incomprensibilidad y ρ es la densidad.

Suelen tener amplitudes inferiores a las de las ondas S.





ONDAS S

Son ondas Secundarias (viajan más lento que ondas P).

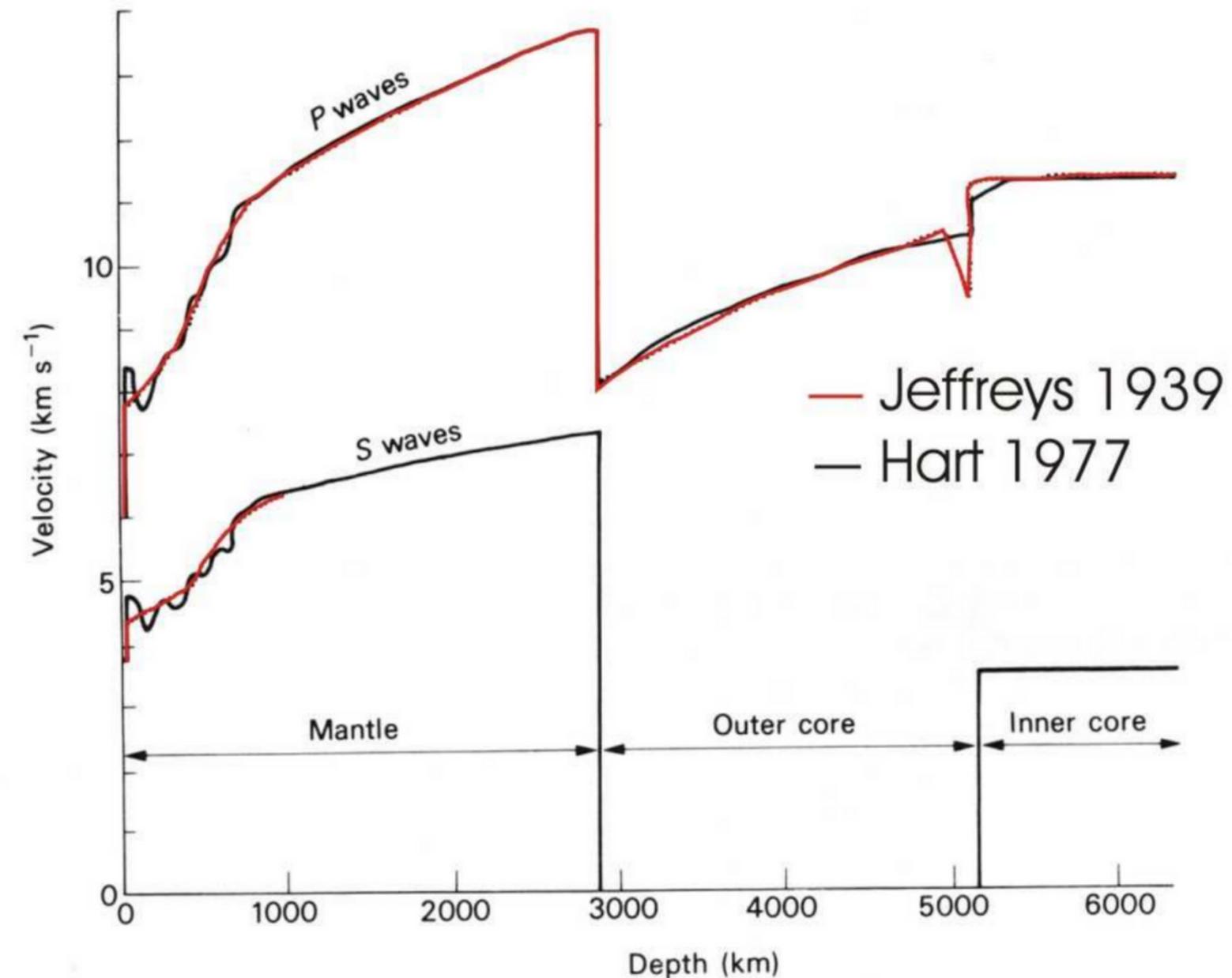
Generan un movimiento transversal, ya que mueven las partículas de forma perpendicular a la dirección de propagación. (movimiento de cizalla).

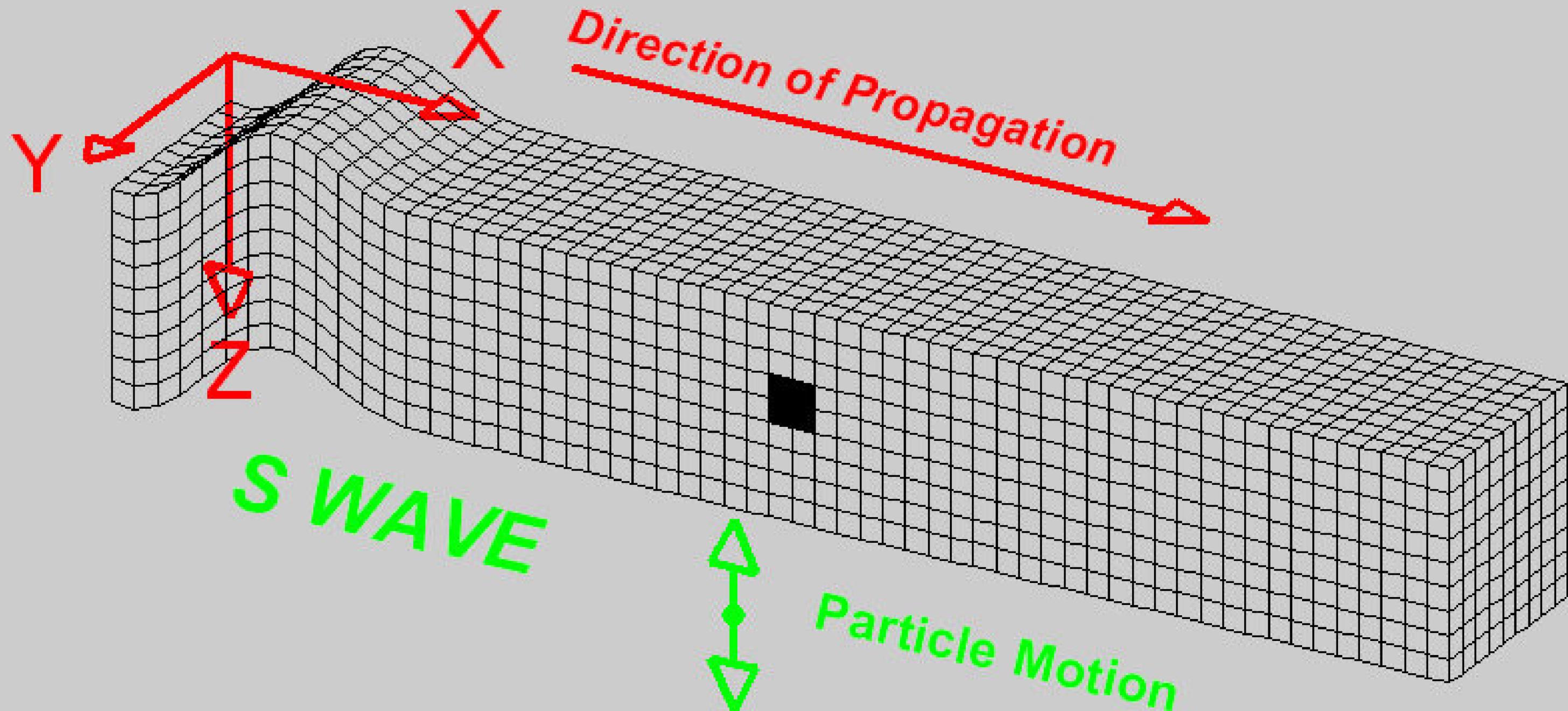
Su fuerza restauradora principal proviene de los esfuerzos de corte, por lo que no pueden propagarse en líquidos ni gases.

Las ondas S se propagan sobre un plano, por lo que podemos descomponerlas en dos ondas con dirección de movimiento ortogonal: Ondas SV y ondas SH.

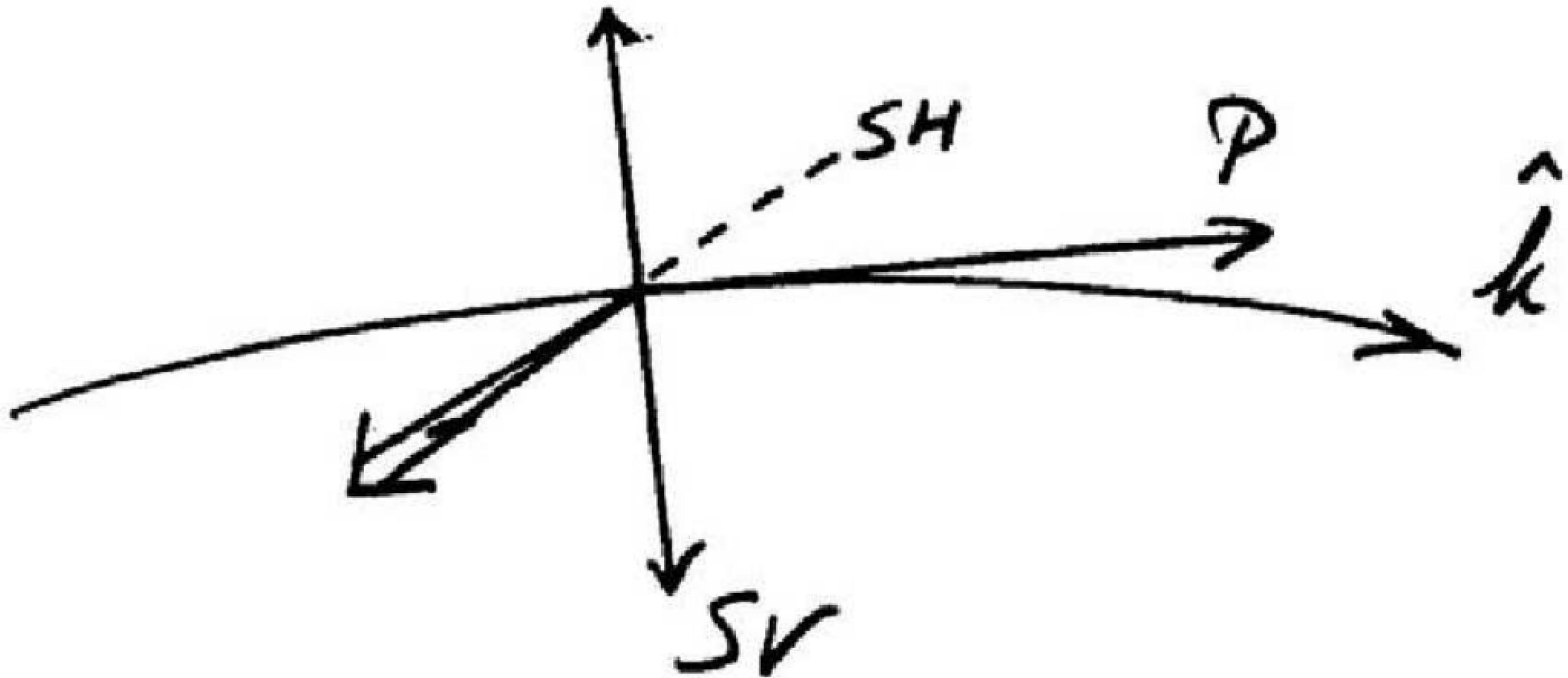
Su velocidad puede escribirse como $\beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$

al juntar las dos velocidades $\alpha = \sqrt{3}\beta \Rightarrow \alpha > \beta$



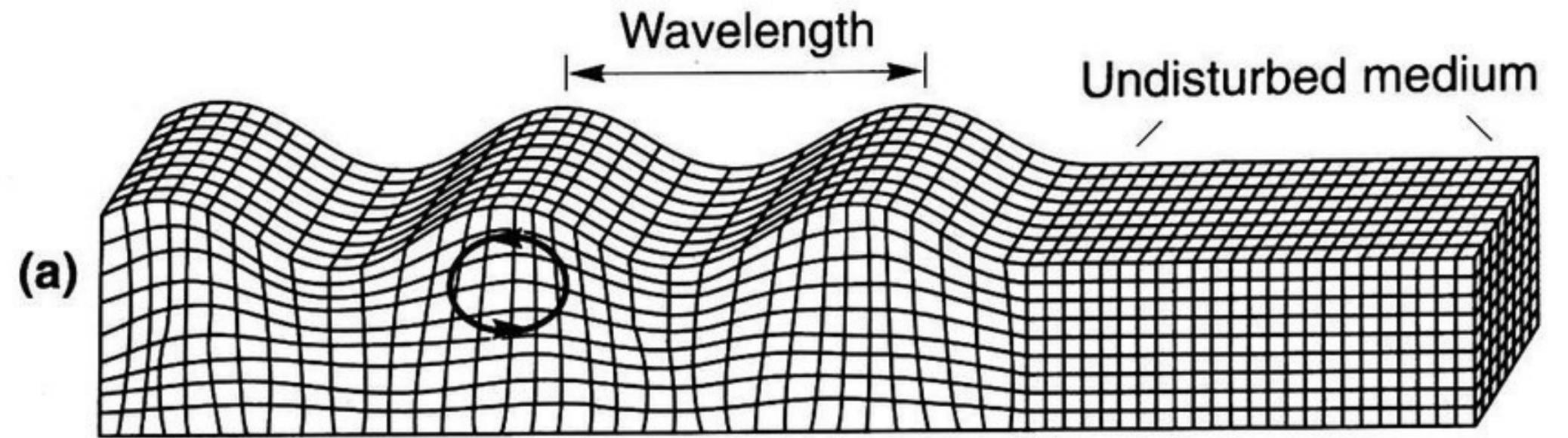


DIRECCIÓN DE MOVIMIENTO DE PARTICULAS

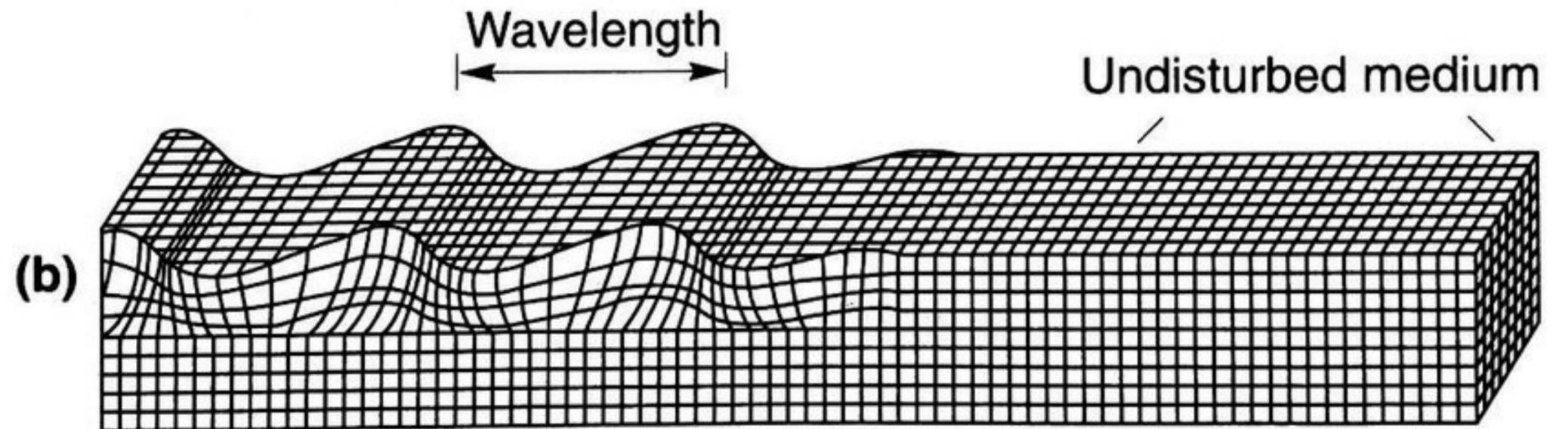


ONDAS SUPERFICIALES

ONDAS RAYLEIGH



ONDAS LOVE



ONDAS SUPERFICIALES

Son causadas por la interacción de las ondas de cuerpo (P,S) con la superficie libre, esto genera una interferencia constructiva, la cual causa ondas que se propagan por la superficie.

Estas ondas se propagan de forma paralela a la interfaz y su amplitud decae con la profundidad.

Hay dos clases de ondas de superficie:

- (a) Ondas Rayleigh, las cuales se generan por interferencia entre las ondas P y SV en la interfaz
- (b) Ondas Love, las cuales se generan por interferencia de ondas SH entre la interfaz y estructuras de capas internas.

Las ondas Rayleigh sólo necesitan de un semi espacio uniforme para existir, mientras que las ondas Love requieren de una estructura estratificada en donde la velocidad del material aumente con la profundidad.

ONDAS SUPERFICIALES

La energía de las ondas decae como $1/r$ donde r es la distancia entre la fuente y el frente de ondas. La amplitud de las ondas está relacionada con la raíz cuadrada de la energía, por lo que esta decae como $1/\sqrt{r}$.

Si lo comparamos con las ondas de cuerpo, vemos que su energía decae como $1/r^2$, por lo que su amplitud decae como $1/r$.

Esto implica que las amplitudes de las ondas de superficie son típicamente mayores a las de las ondas de cuerpo y esta diferencia se nota mejor a grandes distancias.

Las ondas de superficie tienen frecuencias típicas más bajas a las de las ondas de cuerpo, en muchos casos dichas frecuencias se aproximan mucho a las frecuencias de resonancia de las construcciones, cosa que sumado a su mayor amplitud, provoca la mayor parte de la destrucción en los terremotos.

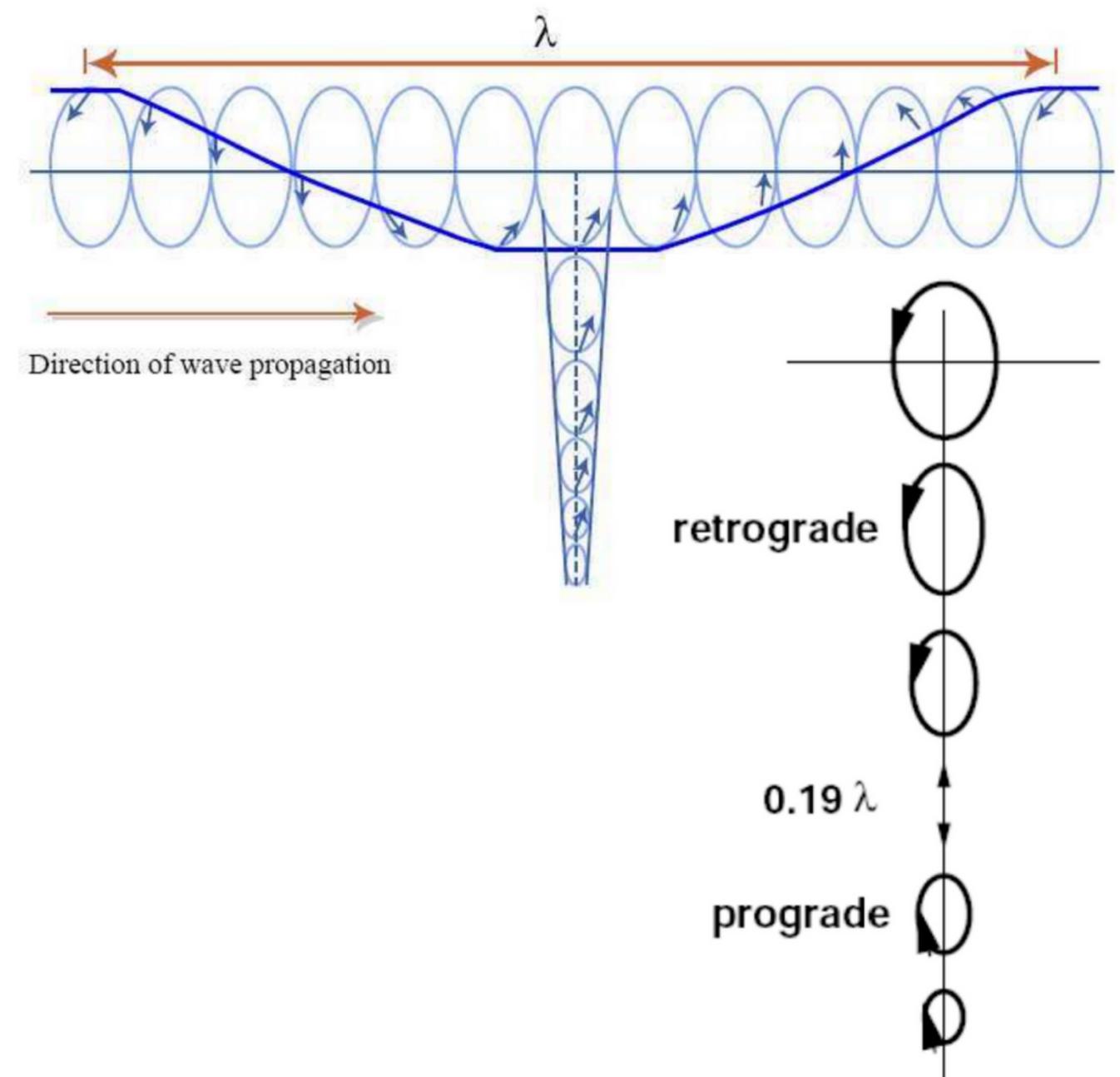
ONDAS RAYLEIGH

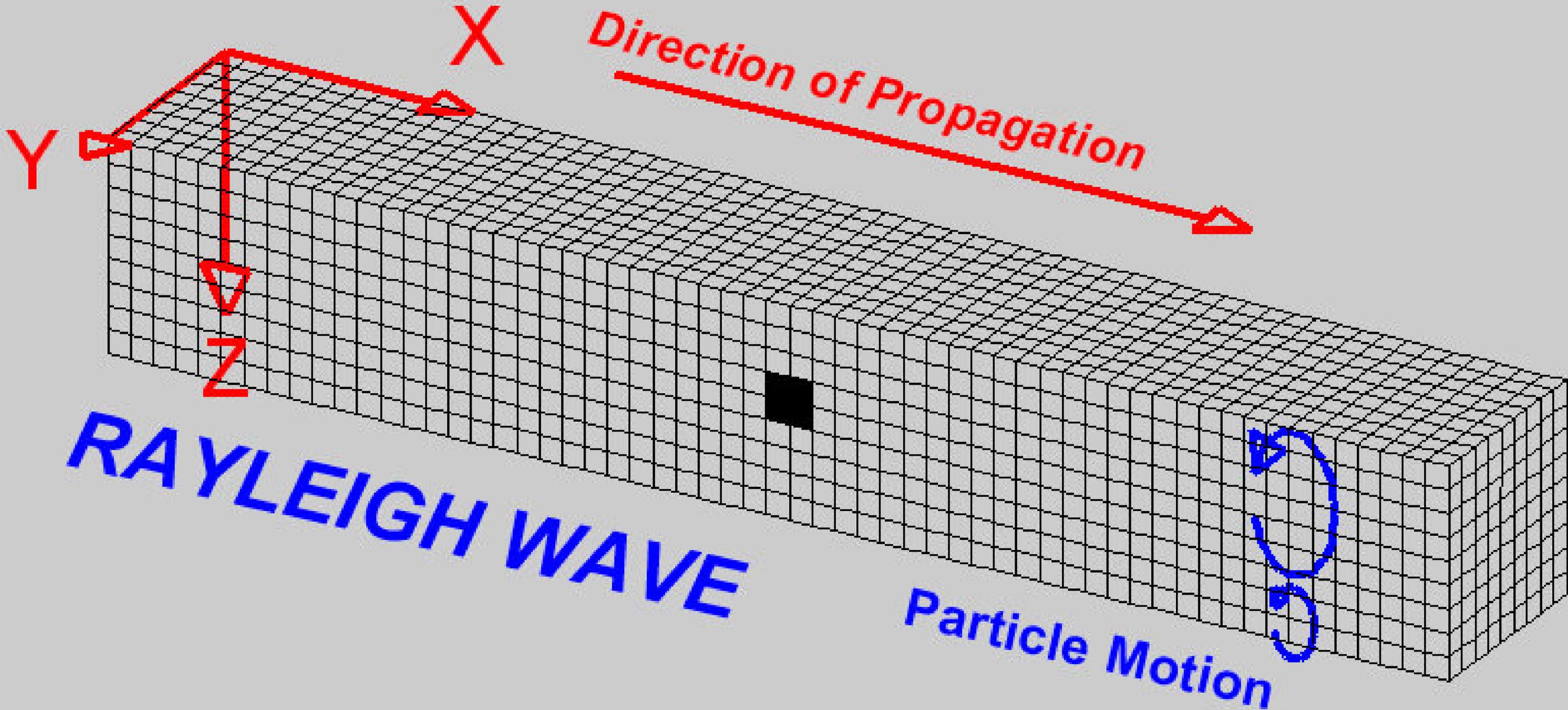
Son causadas por interferencia entre ondas P y SV en la superficie libre.

Debido a esto, son observables en las componentes vertical y radial de los sismogramas. (Dirección entre la fuente y la estación).

El movimiento de las partículas en superficie es retrógrado elíptico y su amplitud decae con la profundidad, por lo que son ondas análogas a las generadas por el viento en alta mar.

Bajo una profundidad igual a 0.19λ el movimiento de las partículas se convierte en progrado elíptico.





ONDAS LOVE

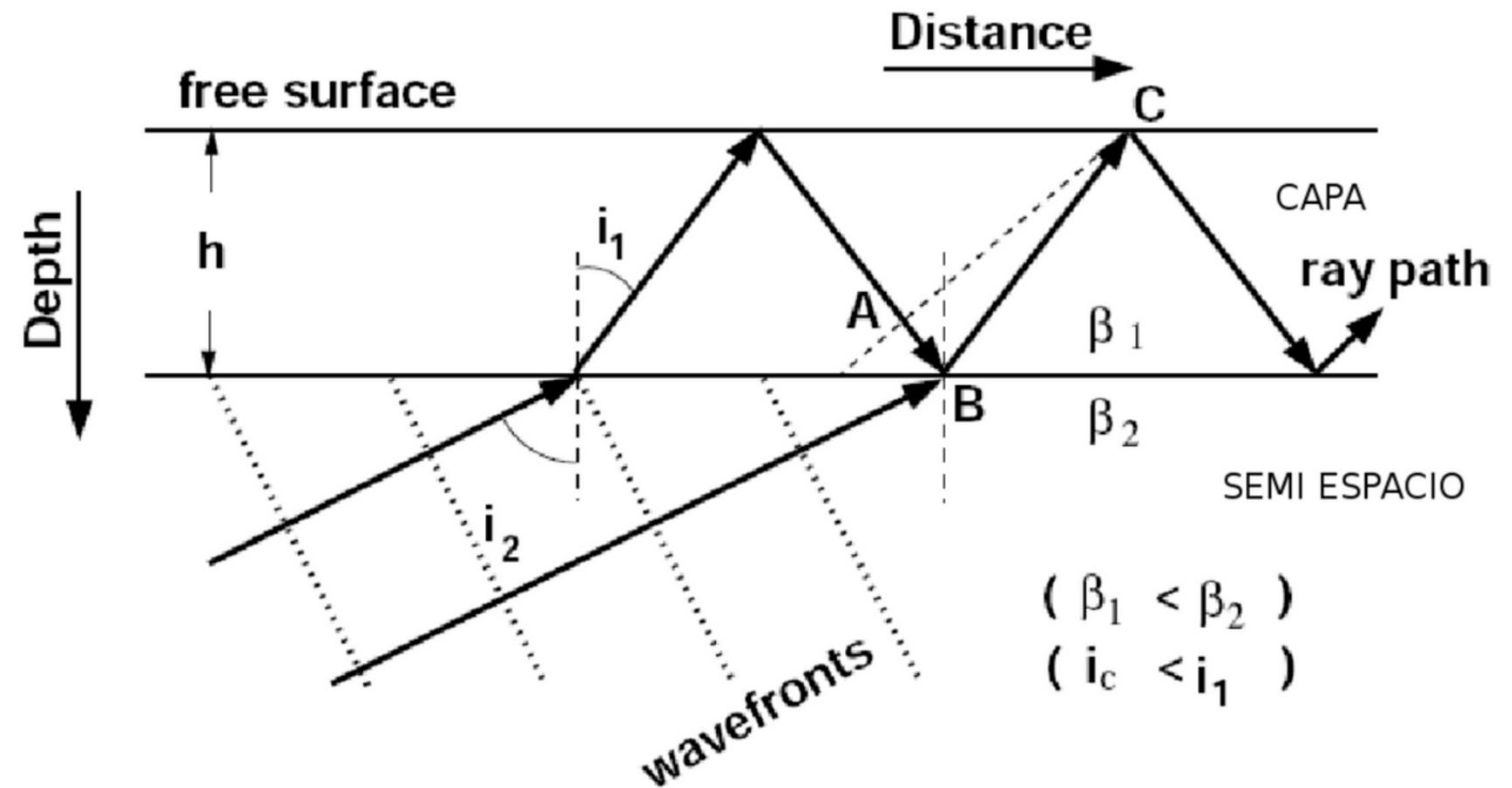
Son generadas por la interacción entre las ondas SH y la superficie libre.

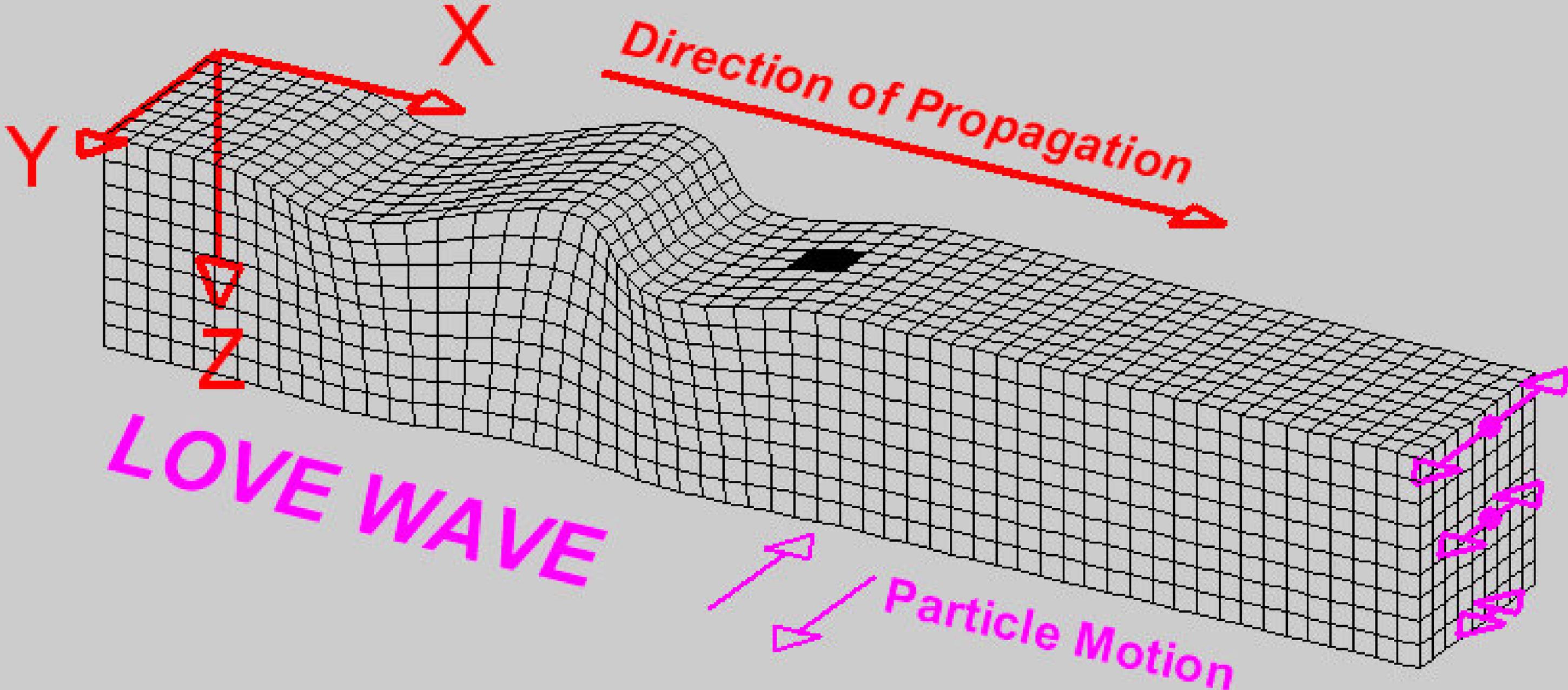
Es necesario que se genere una reflexión total de las ondas dentro de una capa entre el semi espacio y la superficie libre, atrapando la energía de la onda SH dentro de esa capa.

Es necesario que esta capa tenga una velocidad inferior a la del semiespacio.

Dado que son generadas por ondas SH, pueden ser observadas en la componente tangencial de un sismograma.

La velocidad de las ondas Love es 0.9 de la velocidad de las ondas S y es ligeramente mayor a la velocidad de las ondas Rayleigh.





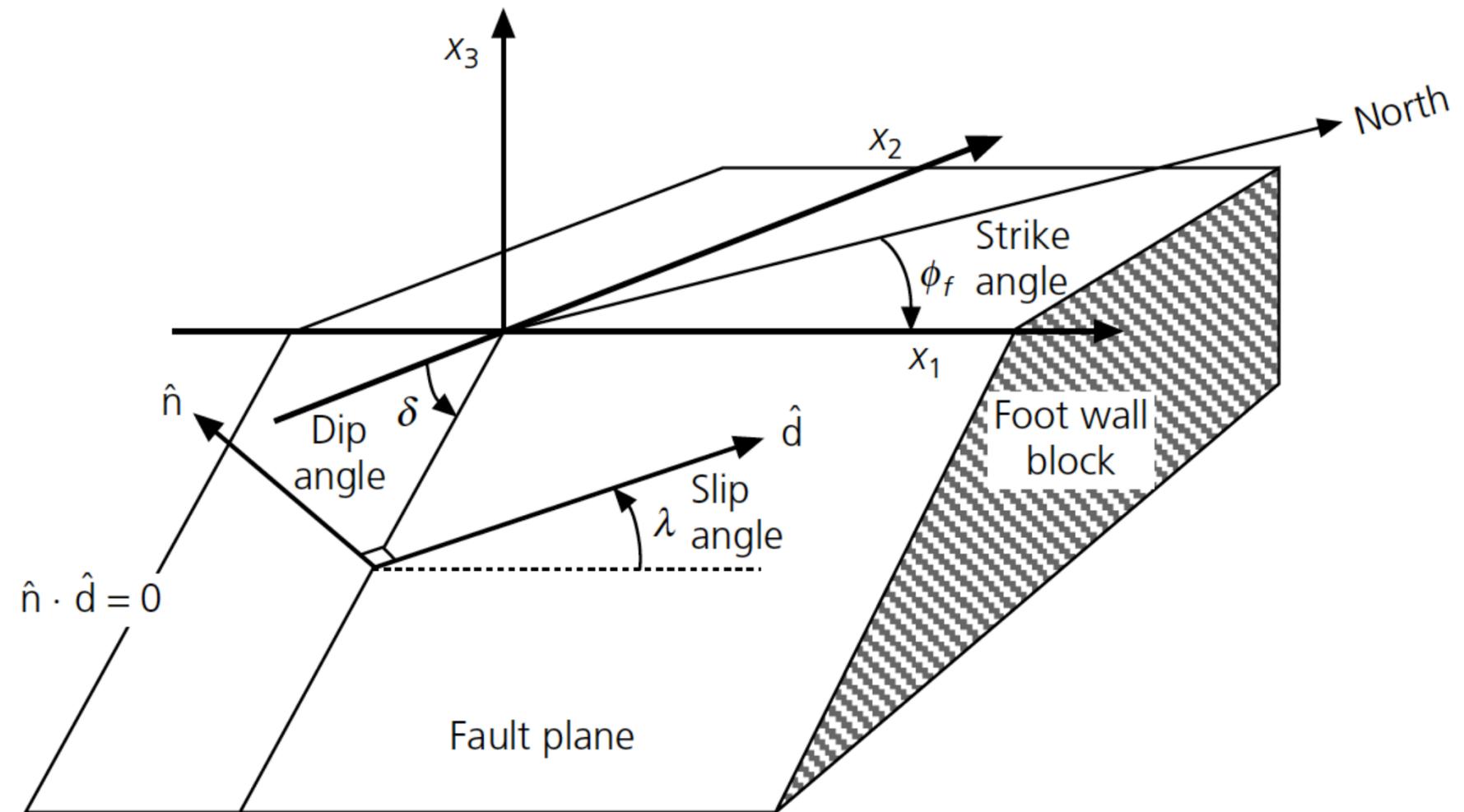
MOTIVACIÓN

¿Como conocer la geometría de falla a partir de las ondas sísmicas?

- La geometría de las fallas puede conocerse a partir de la información de sismogramas ubicados a múltiples azimuts de la fuente de un terremoto
- Las ondas sísmicas entregan información importante para conocer la geometría de la falla de la fuente.

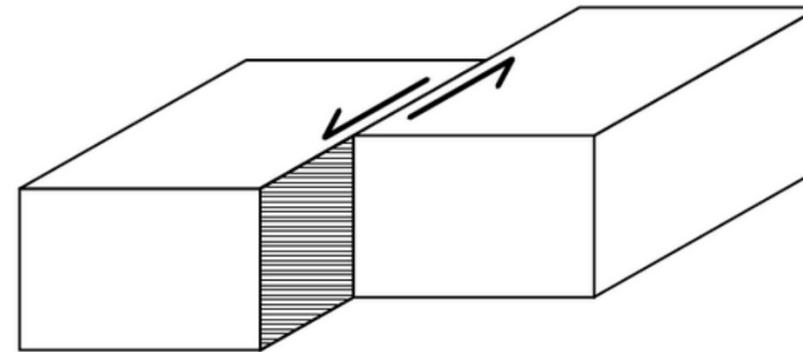
GEOMETRÍA DE FALLA

- \hat{n} es el vector normal al plano de falla.
- \hat{d} es el vector deslizamiento.
- ϕ_f es el rumbo (strike) de la falla, se mide en sentido horario con respecto al norte (0° - 360°).
- δ es el manteo/buzamiento (dip)
- λ es el ángulo de deslizamiento (rake) entre el eje x_1 y d en el plano de falla (0° - 360°).

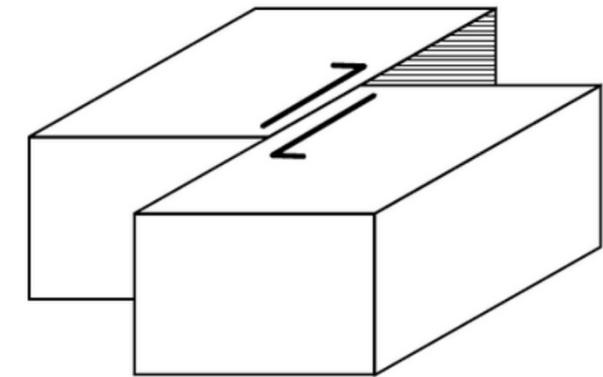


GEOMETRIA DE FALLAS

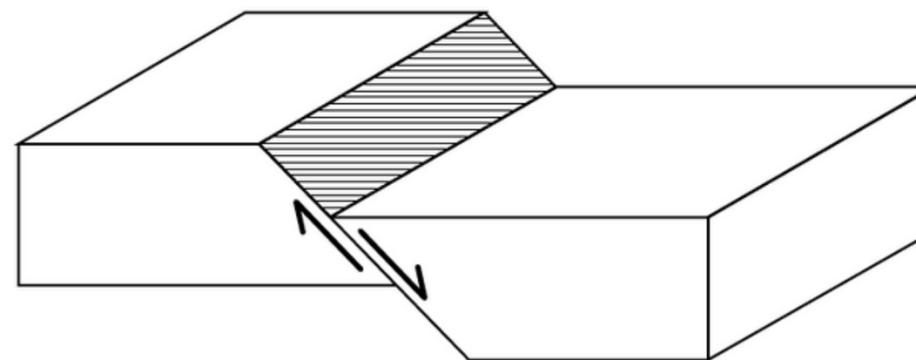
- Falla transcurrente (strike-slip) lateral-derecha. $\lambda = 0^\circ$
- Falla transcurrente (strike-slip) lateral-izquierda. $\lambda = 180^\circ$
- Falla normal. $\lambda = 270^\circ$
- Falla inversa. $\lambda = 90^\circ$



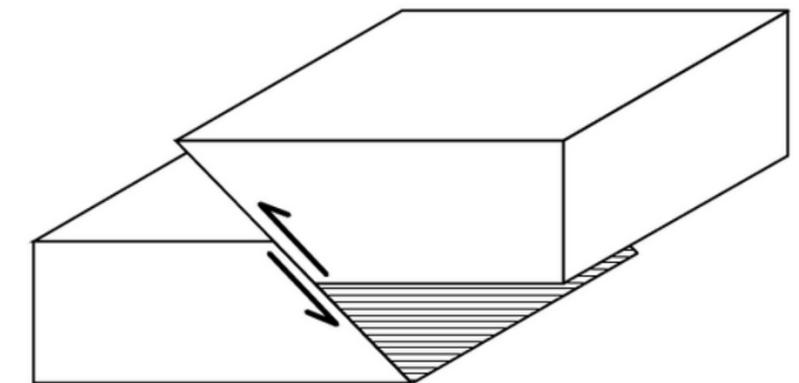
Left-lateral strike-slip fault
($\lambda = 0^\circ$)



Right-lateral strike-slip fault
($\lambda = 180^\circ$)



Normal dip-slip fault
($\lambda = -90^\circ$)



Reverse dip-slip fault
($\lambda = 90^\circ$)

PATRÓN DE RADIACIÓN



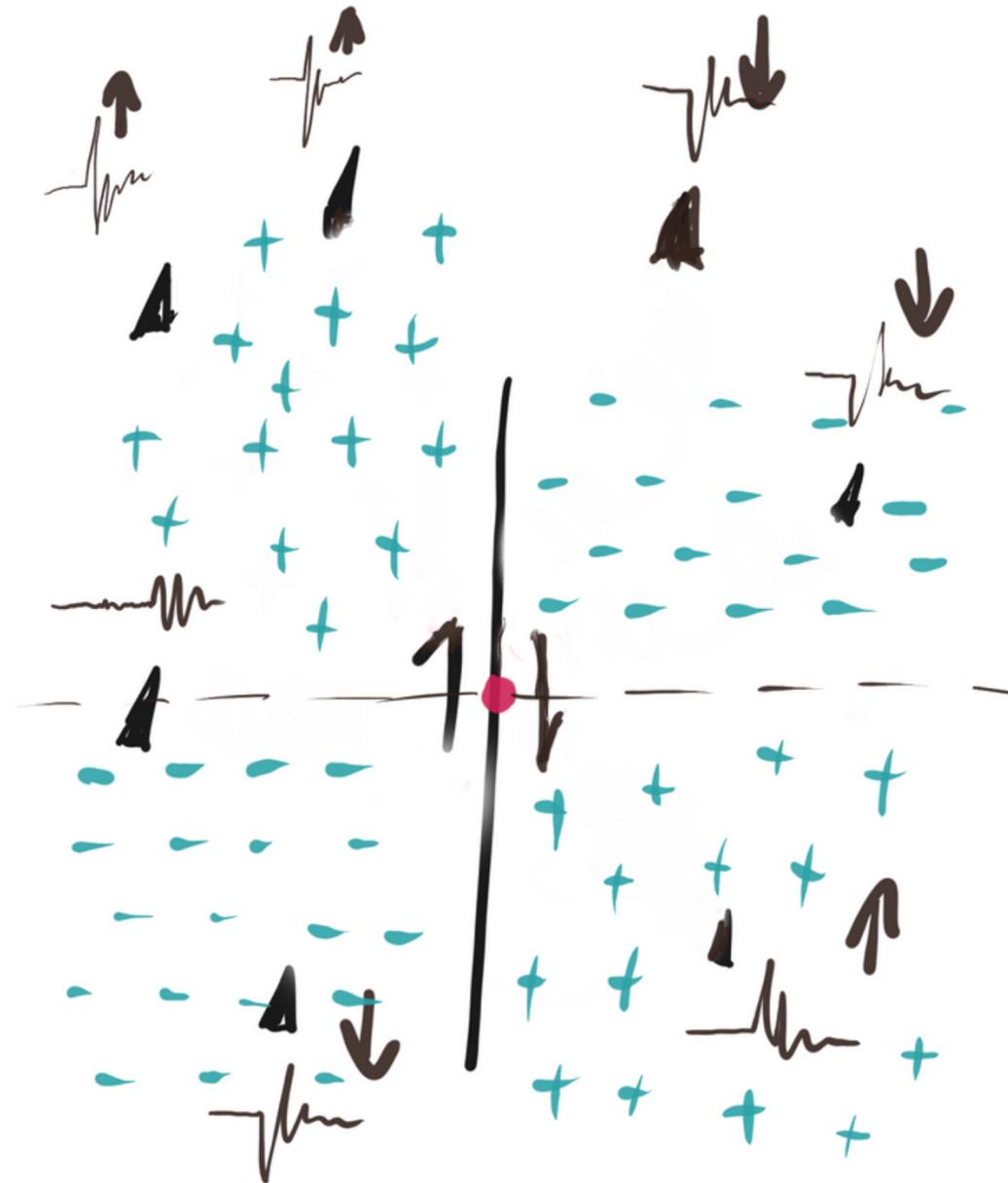
PATRÓN DE RADIACIÓN



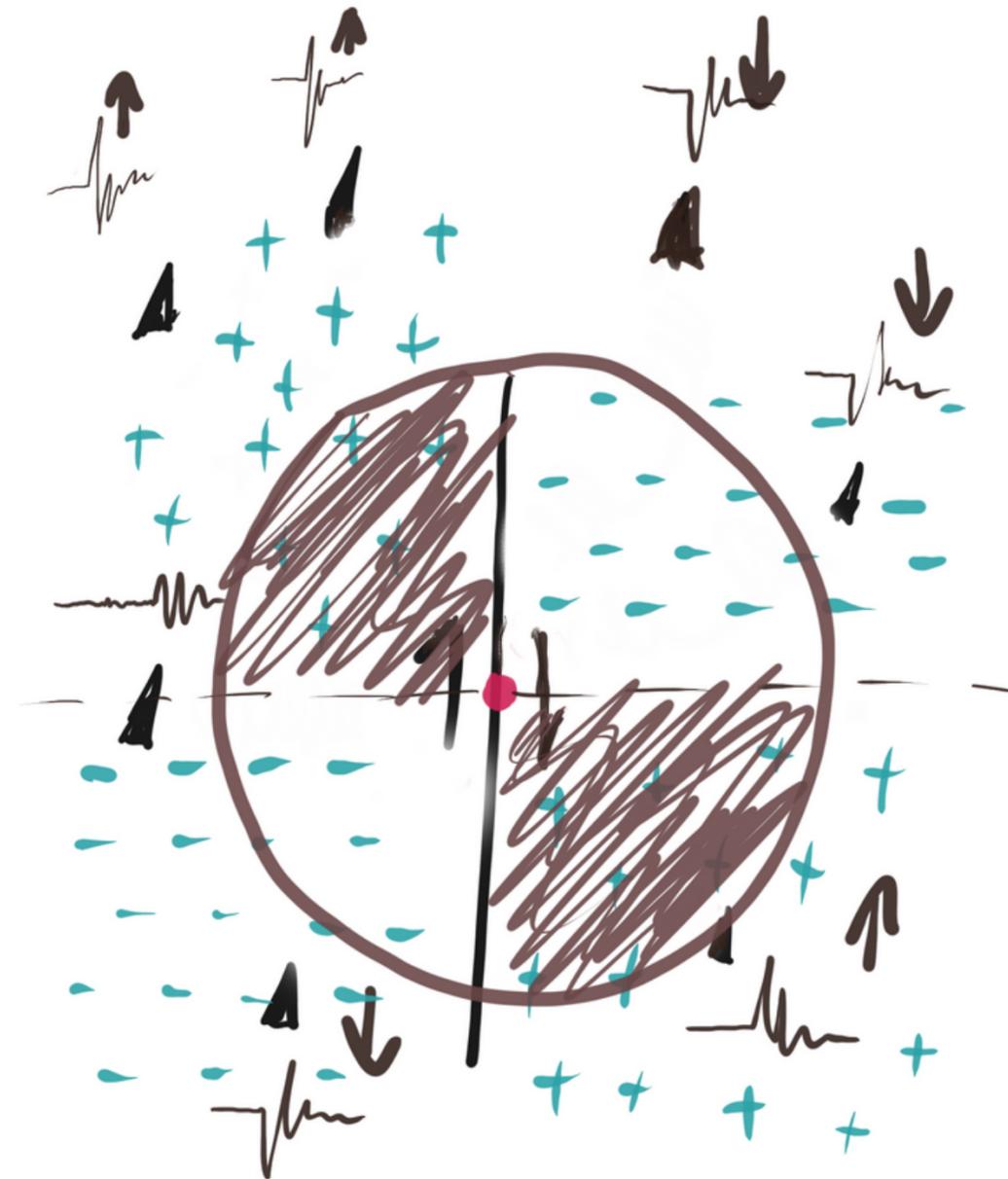
PATRÓN DE RADIACIÓN



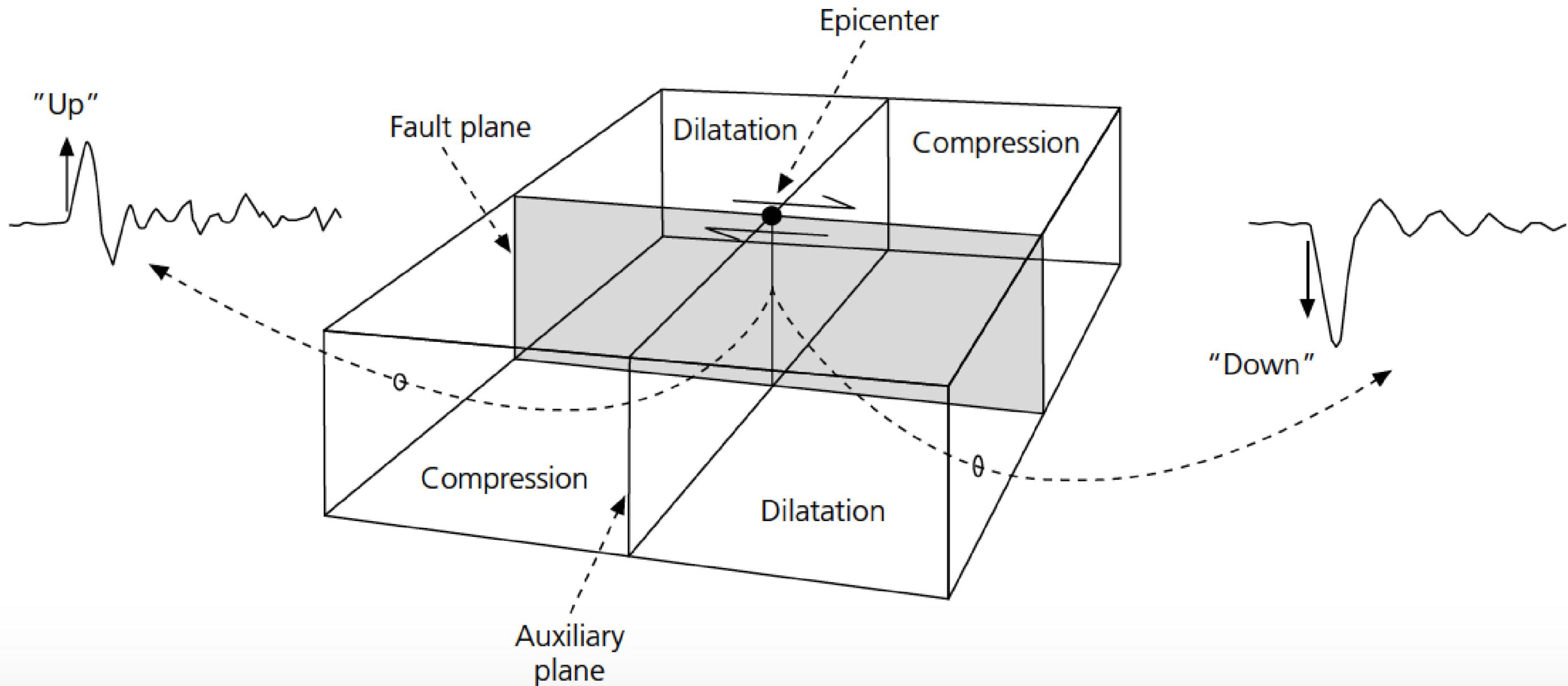
PATRÓN DE RADIACIÓN



PATRÓN DE RADIACIÓN



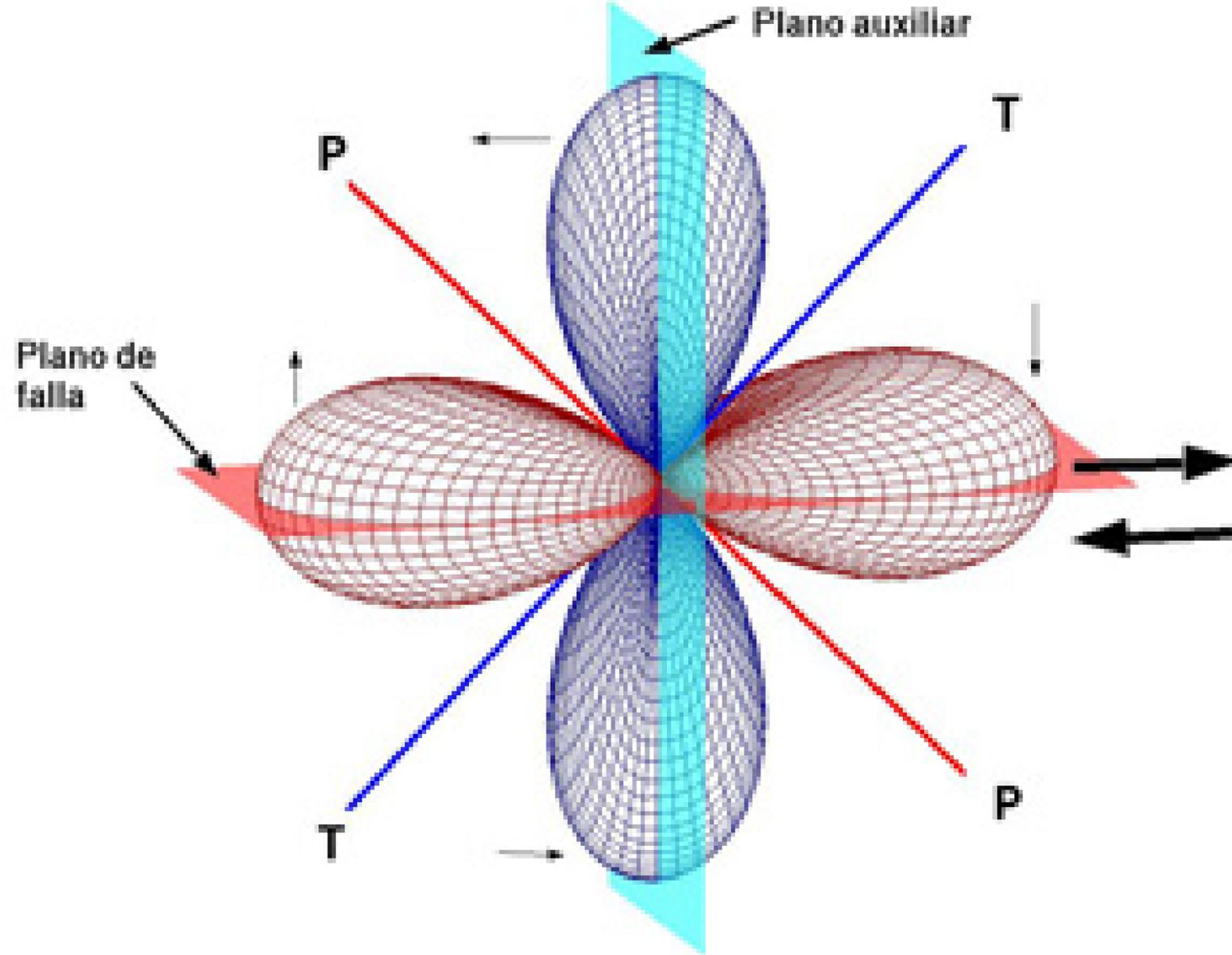
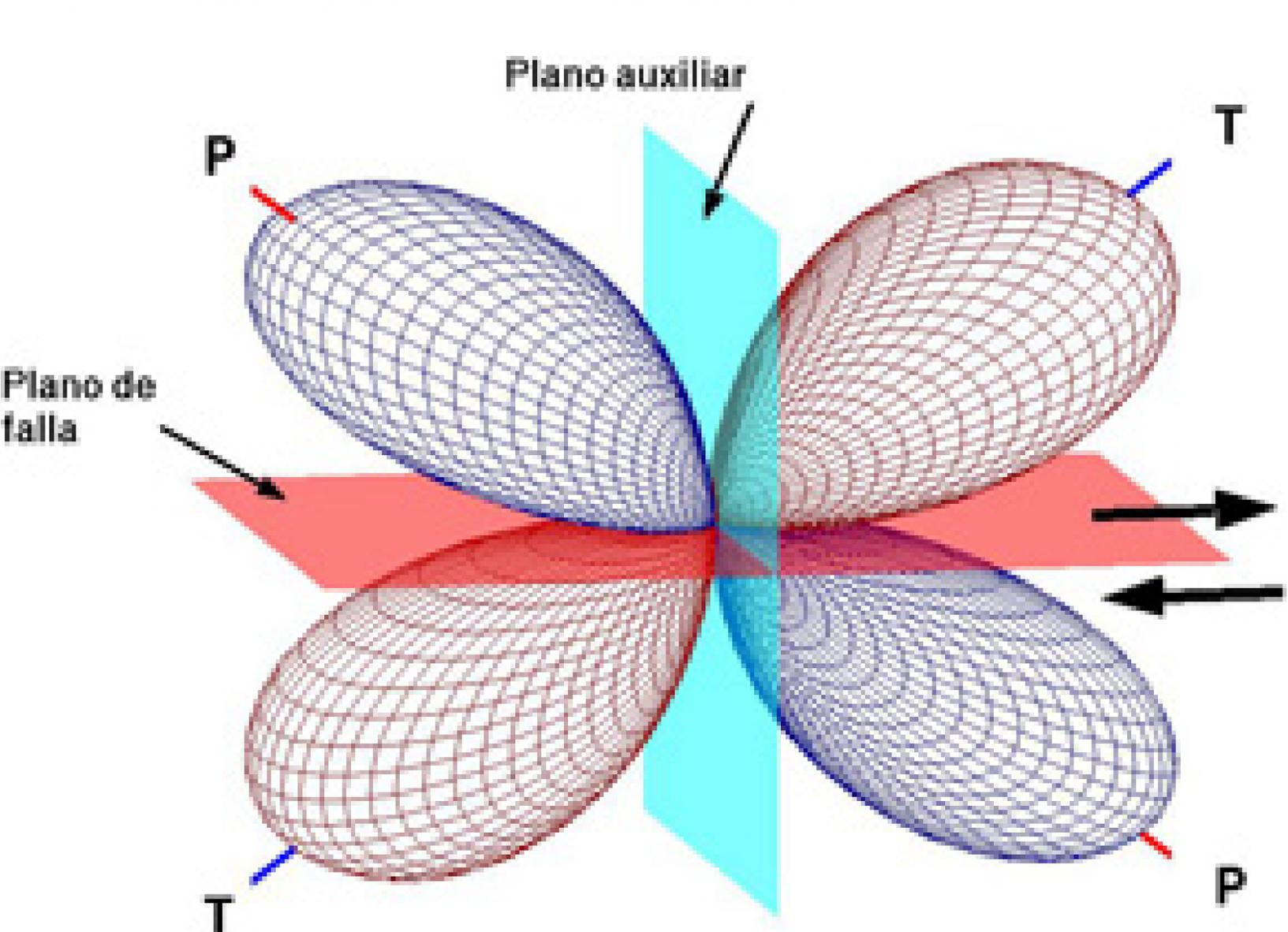
PATRÓN DE RADIACIÓN



PATRÓN DE RADIACIÓN

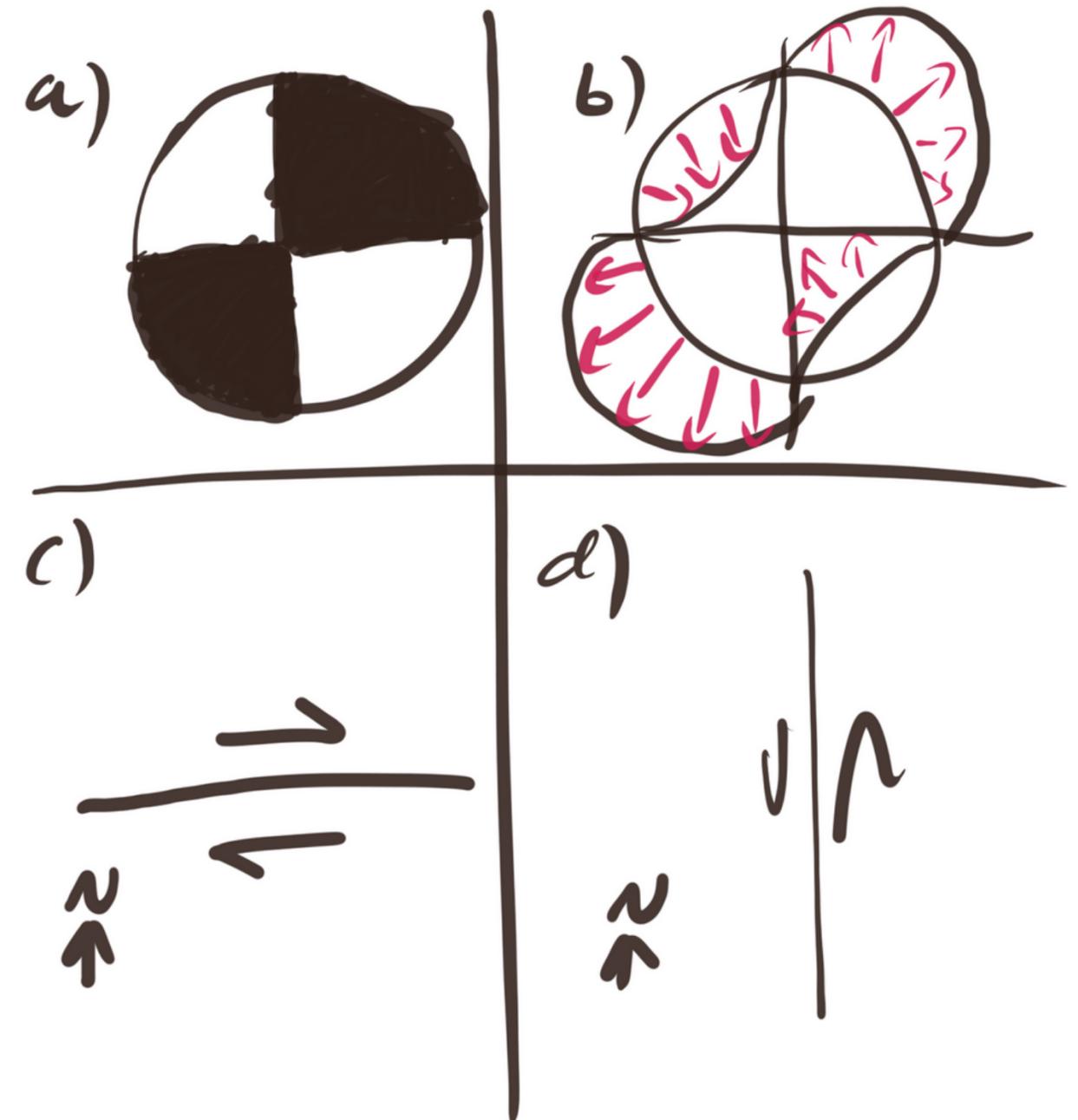
PATRON DE RADIACION DE ONDAS P

PATRON DE RADIACION DE ONDAS S



LOS MECANISMOS FOCALES REPRESENTAN DOS SOLUCIONES POSIBLES A LA VEZ

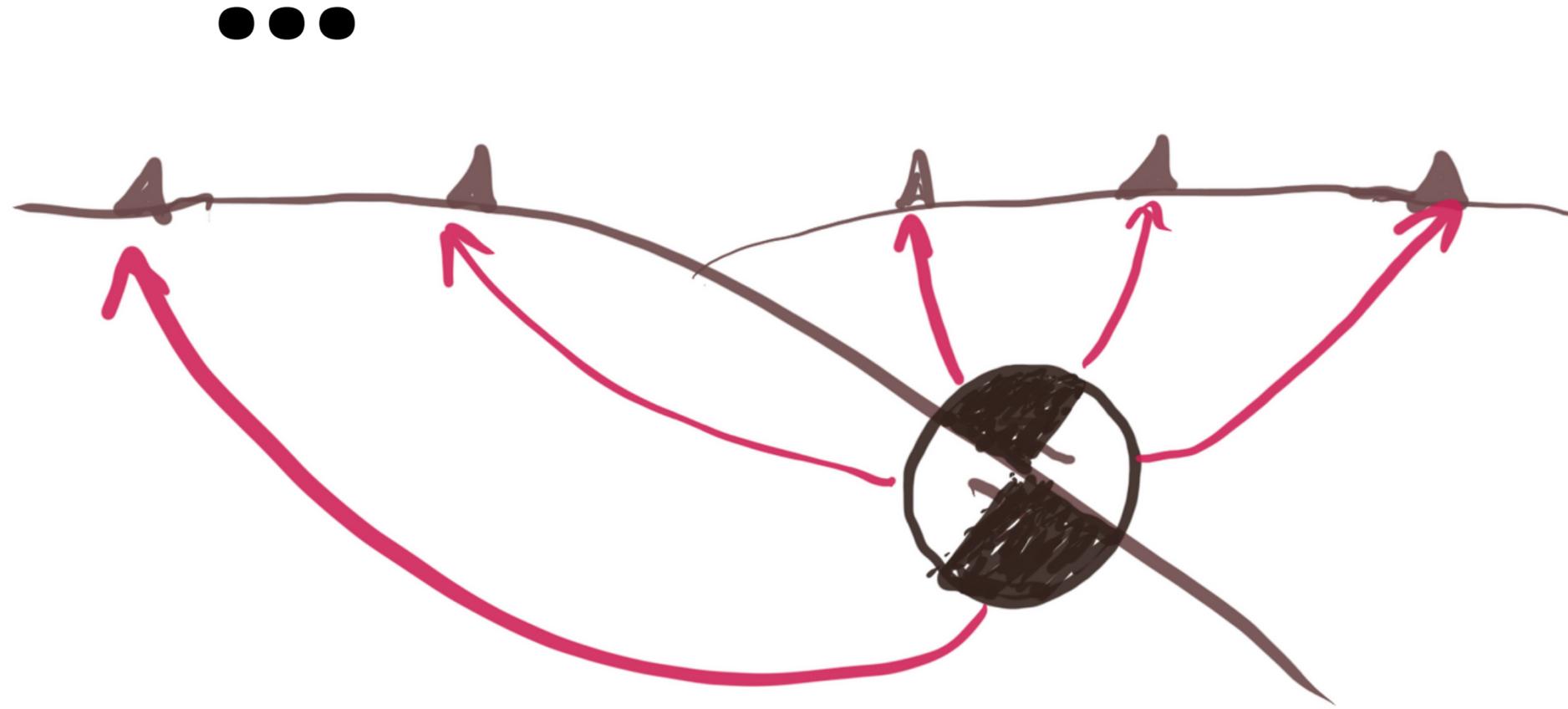
- a) Mecanismo focal de una falla transcurrente.
- b) Patrón de radiación.
- c) Falla transcurrente posible perpendicular a la dirección norte.
- d) Falla transcurrente posible paralela a la dirección norte.



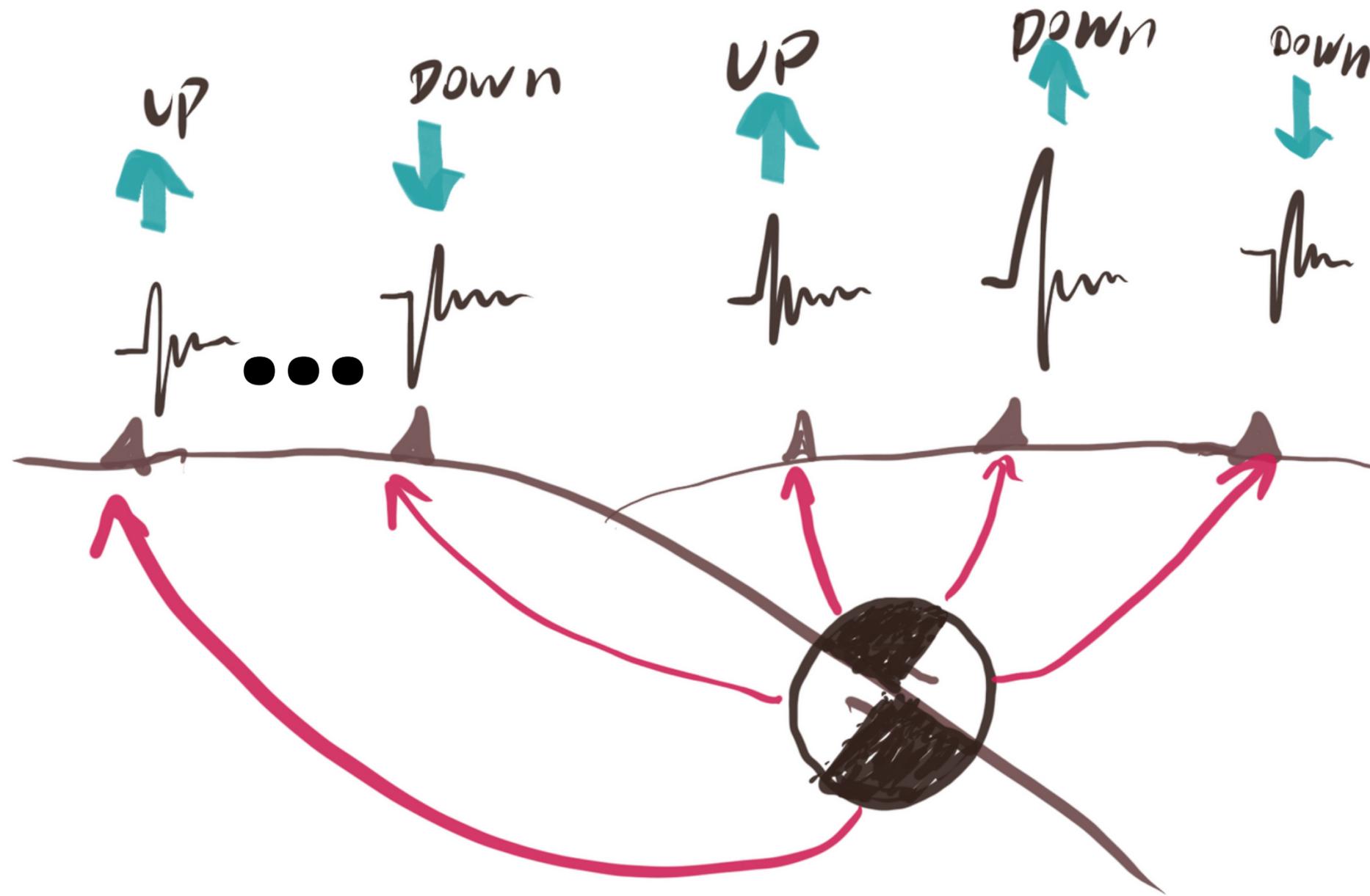
¿QUÉ PASA EN UNA FALLA INVERSA?



¿QUÉ PASA EN UNA FALLA INVERSA?



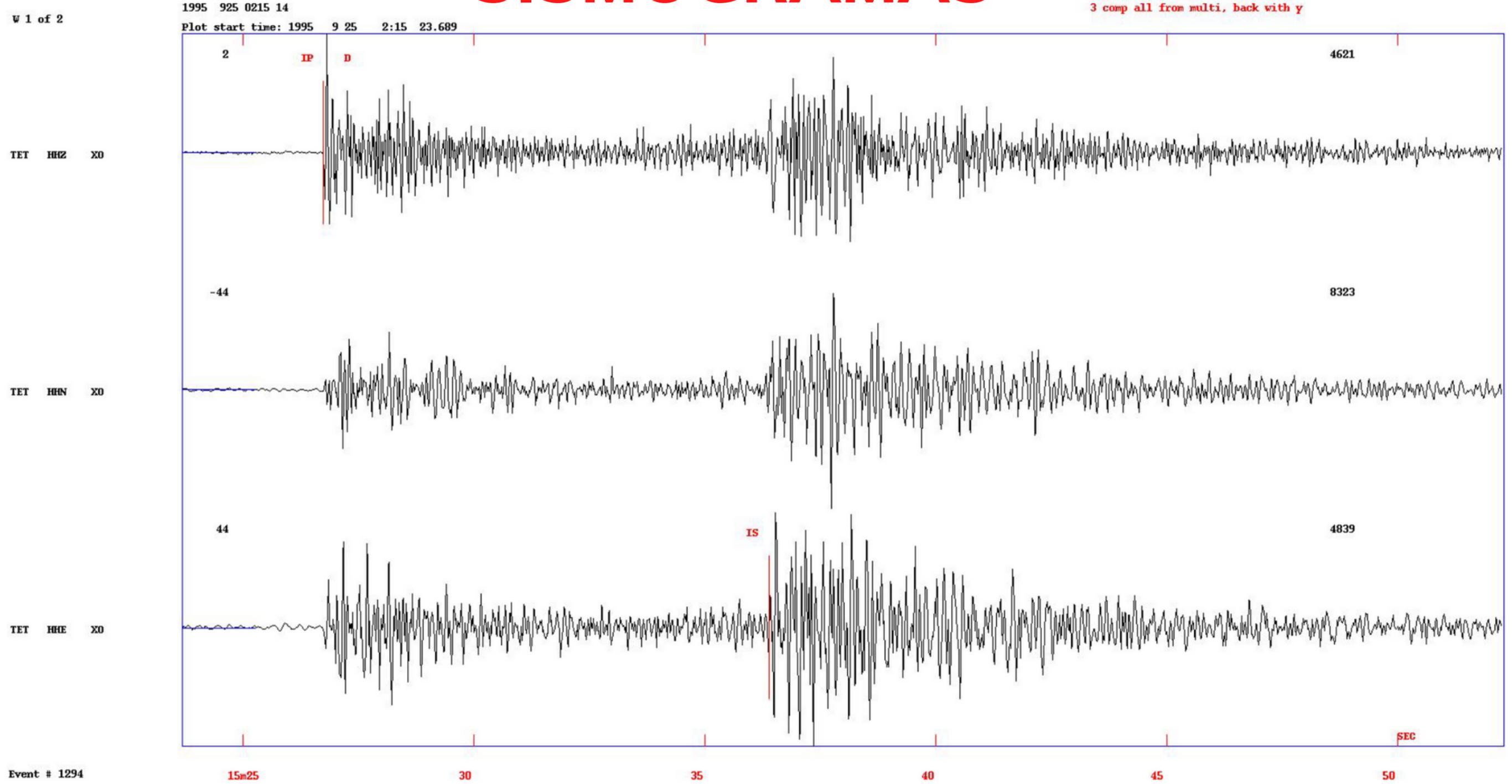
¿QUÉ PASA EN UNA FALLA INVERSA?



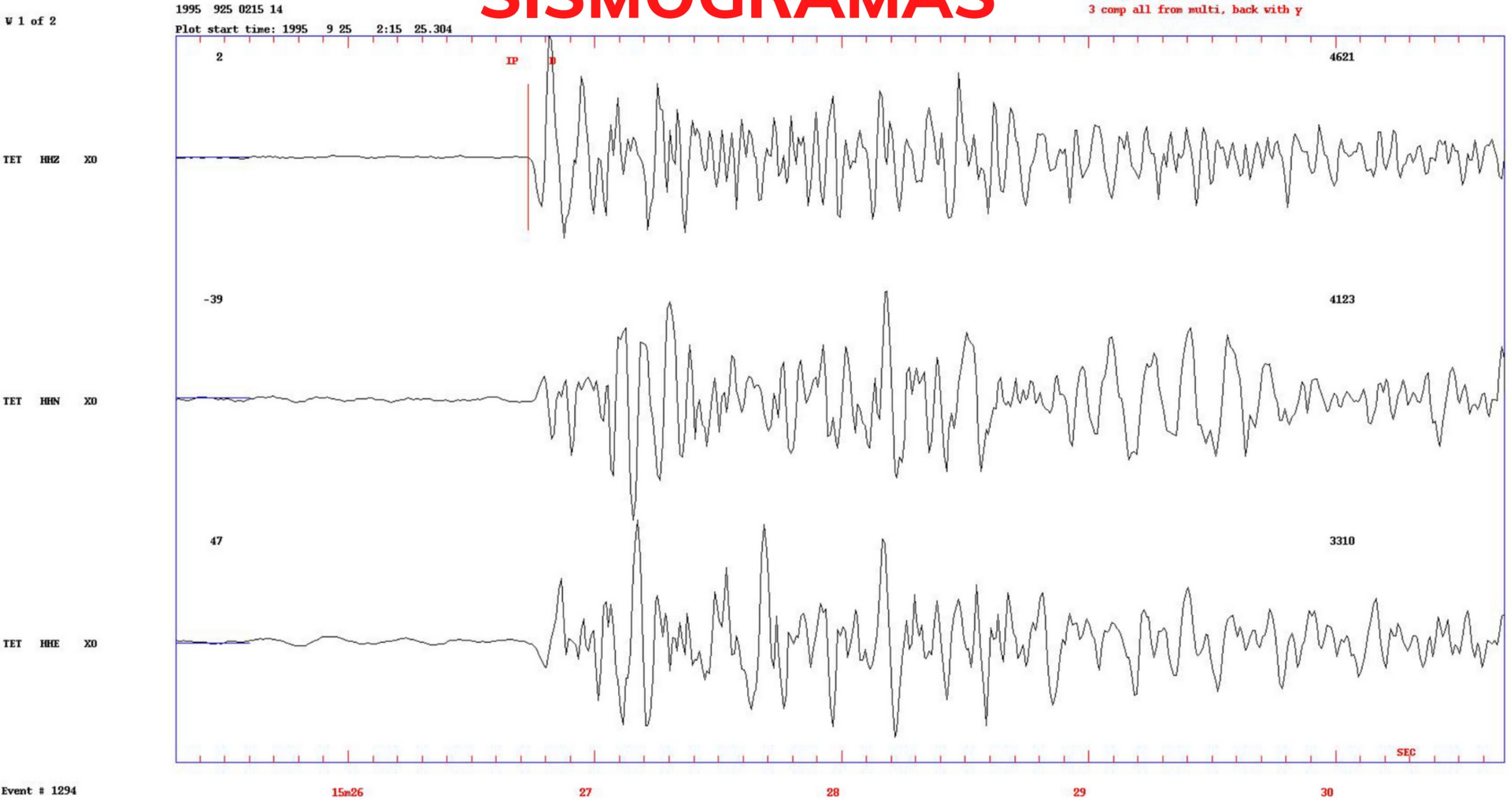
Ya hemos hablado acerca de los distintos tipos de ondas sísmicas, el patrón de radiación y la geometría de falla.

Ahora veremos como podemos "leer" la forma de onda de los sismogramas, para deducir esta información.

IDENTIFICAR ONDAS DE CUERPO EN SISMOGRAMAS



IDENTIFICAR ONDAS DE CUERPO EN SISMOGRAMAS



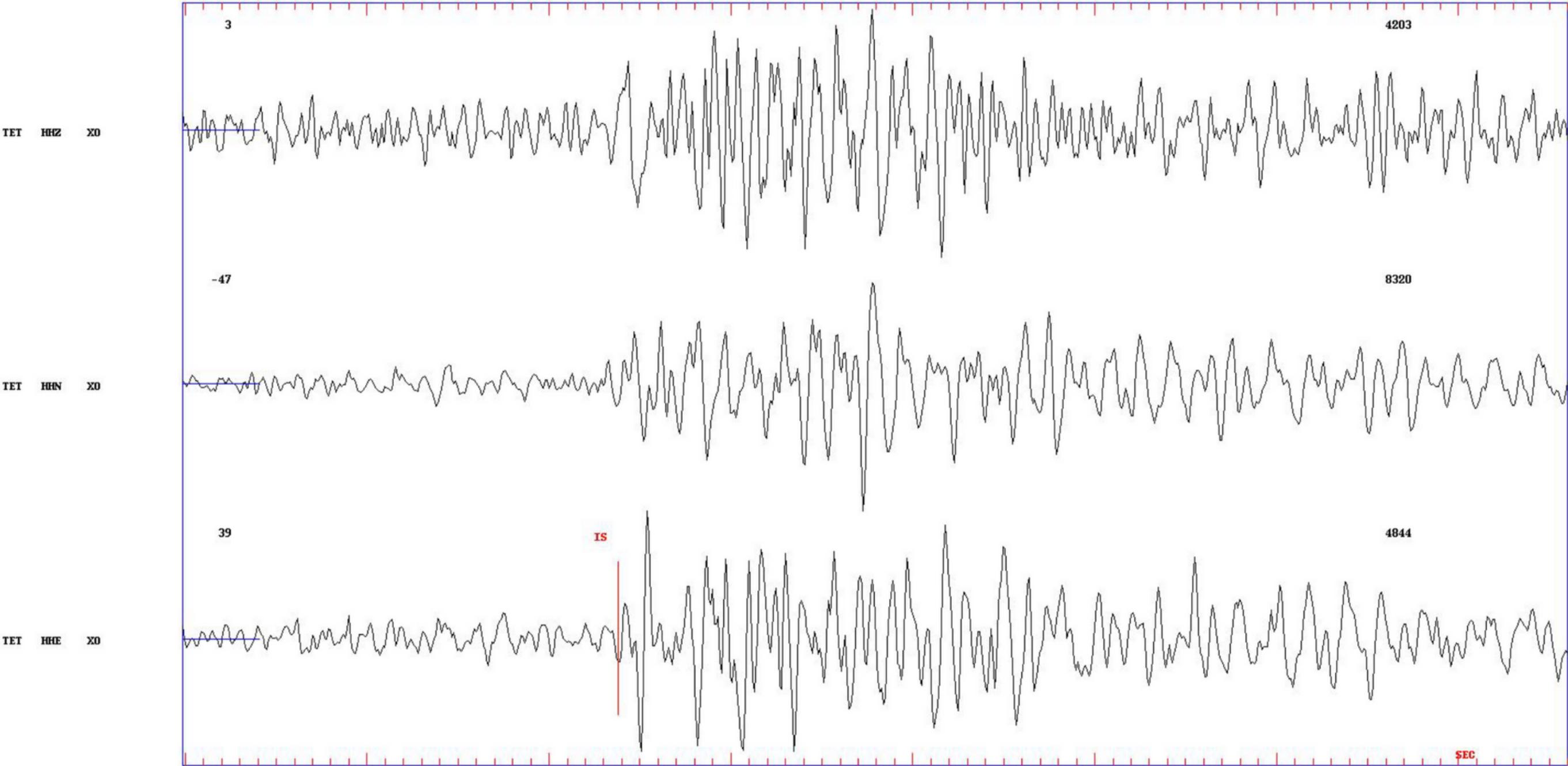
IDENTIFICAR ONDAS DE CUERPO EN SISMOGRAMAS

W 1 of 2

1995 925 0215 14

Plot start time: 1995 9 25 2:15 33.988

3 comp all from multi, back with y



Event # 1294

15m34

35

36

37

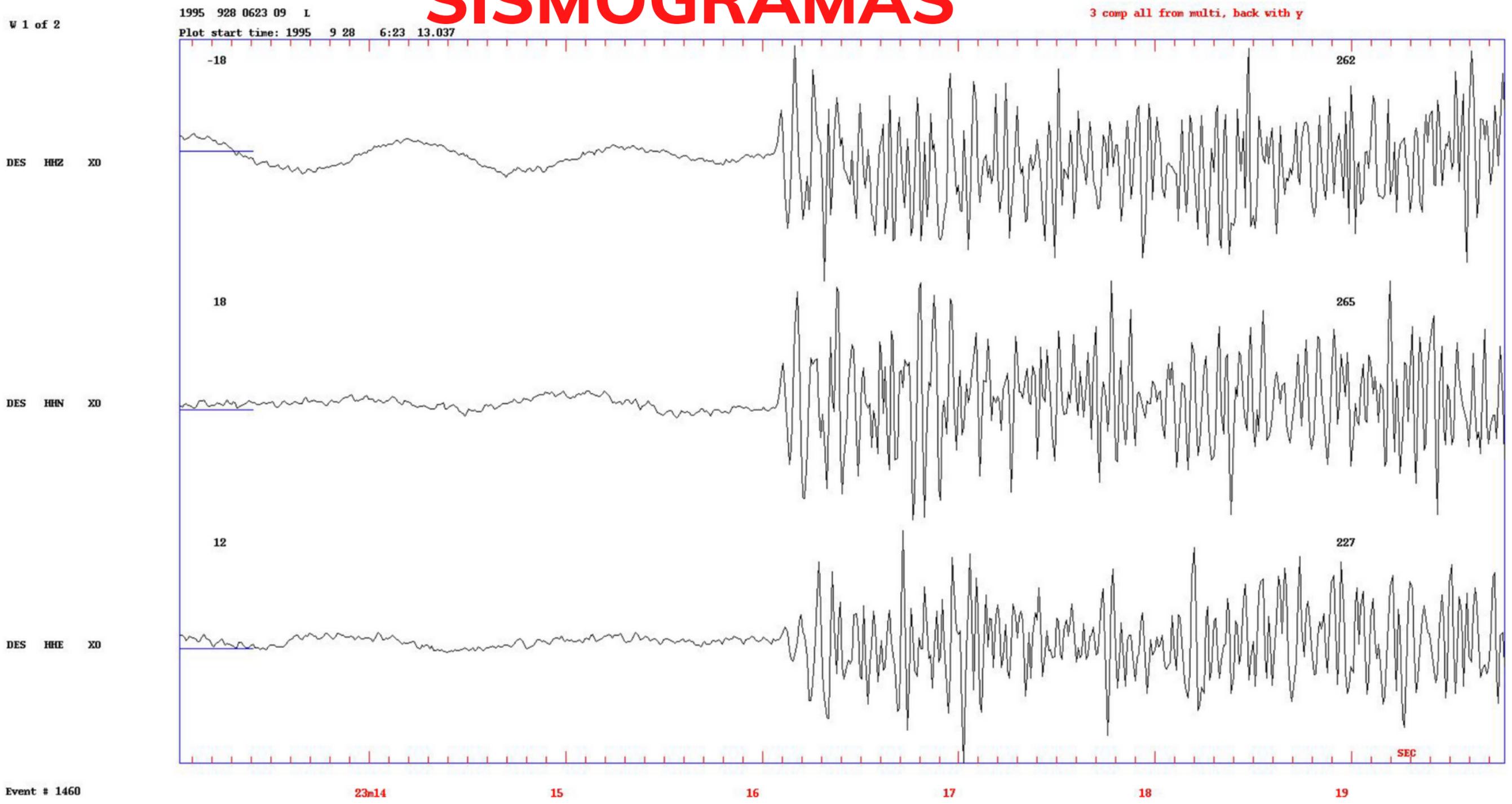
38

39

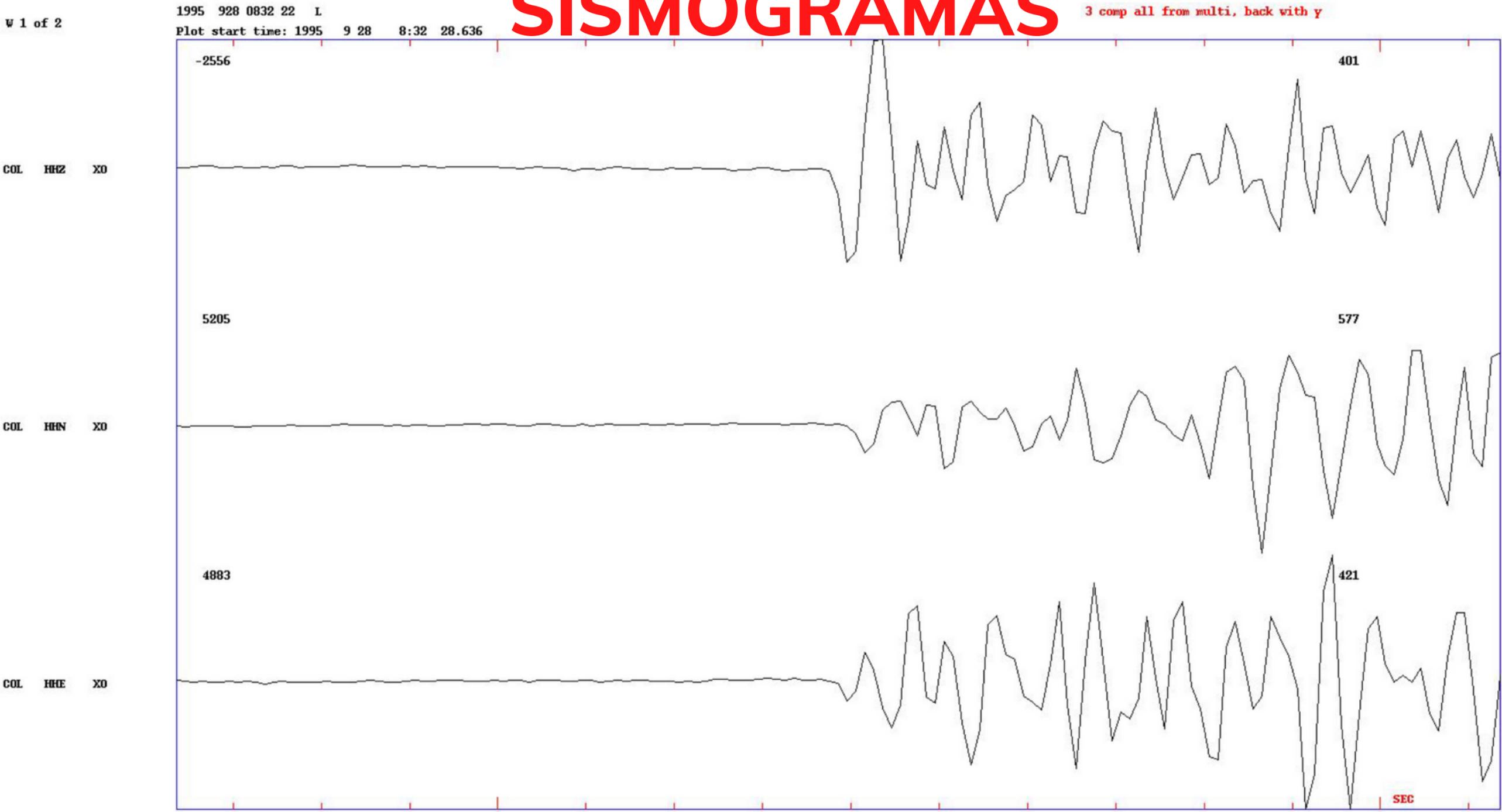
40

41

IDENTIFICAR ONDAS DE CUERPO EN SISMOGRAMAS



IDENTIFICAR ONDAS DE CUERPO EN SISMOGRAMAS



EVENTO REGIONAL

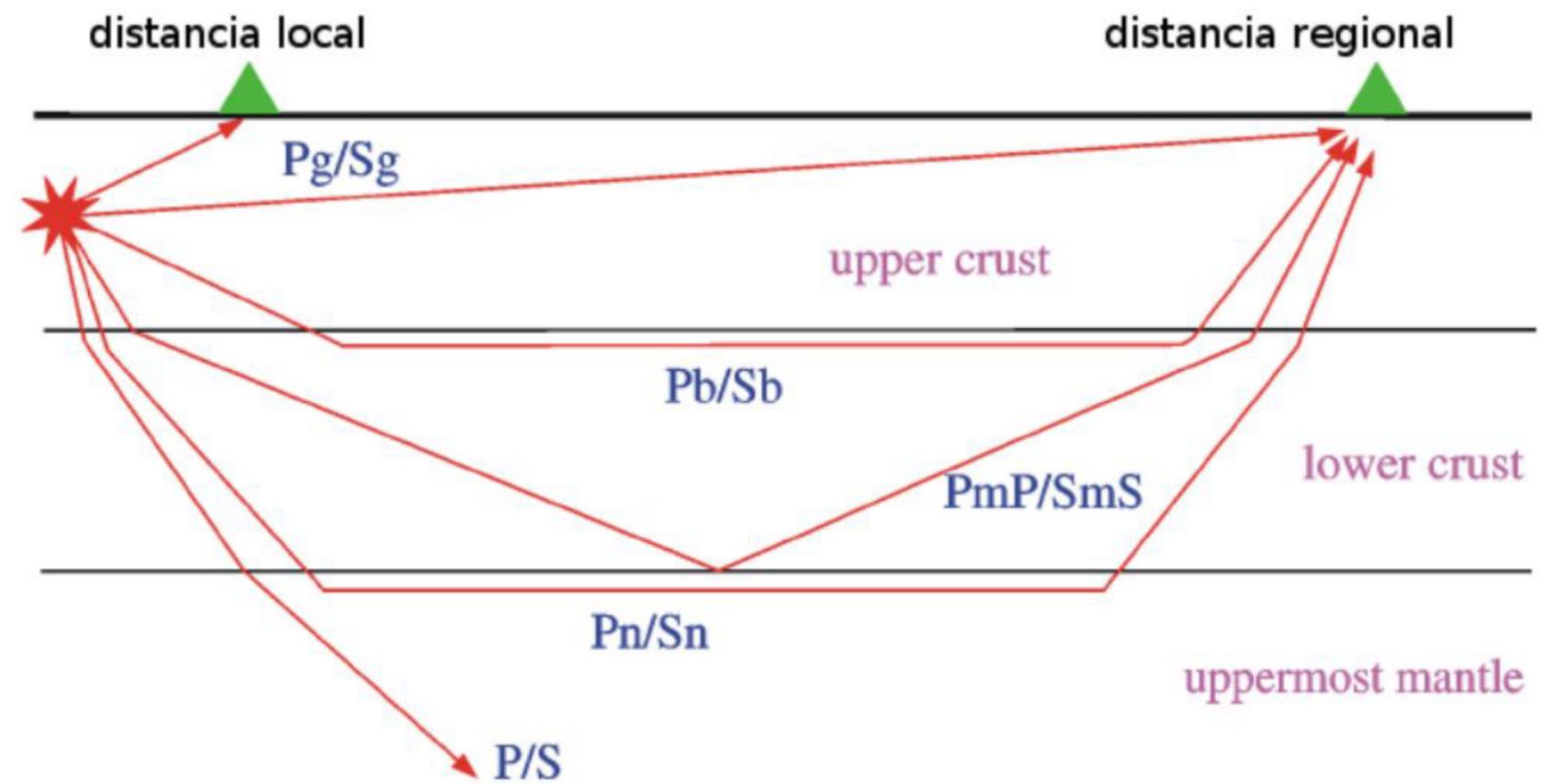
Fases de ondas de cuerpo

Fases de la corteza: Pg, Sg

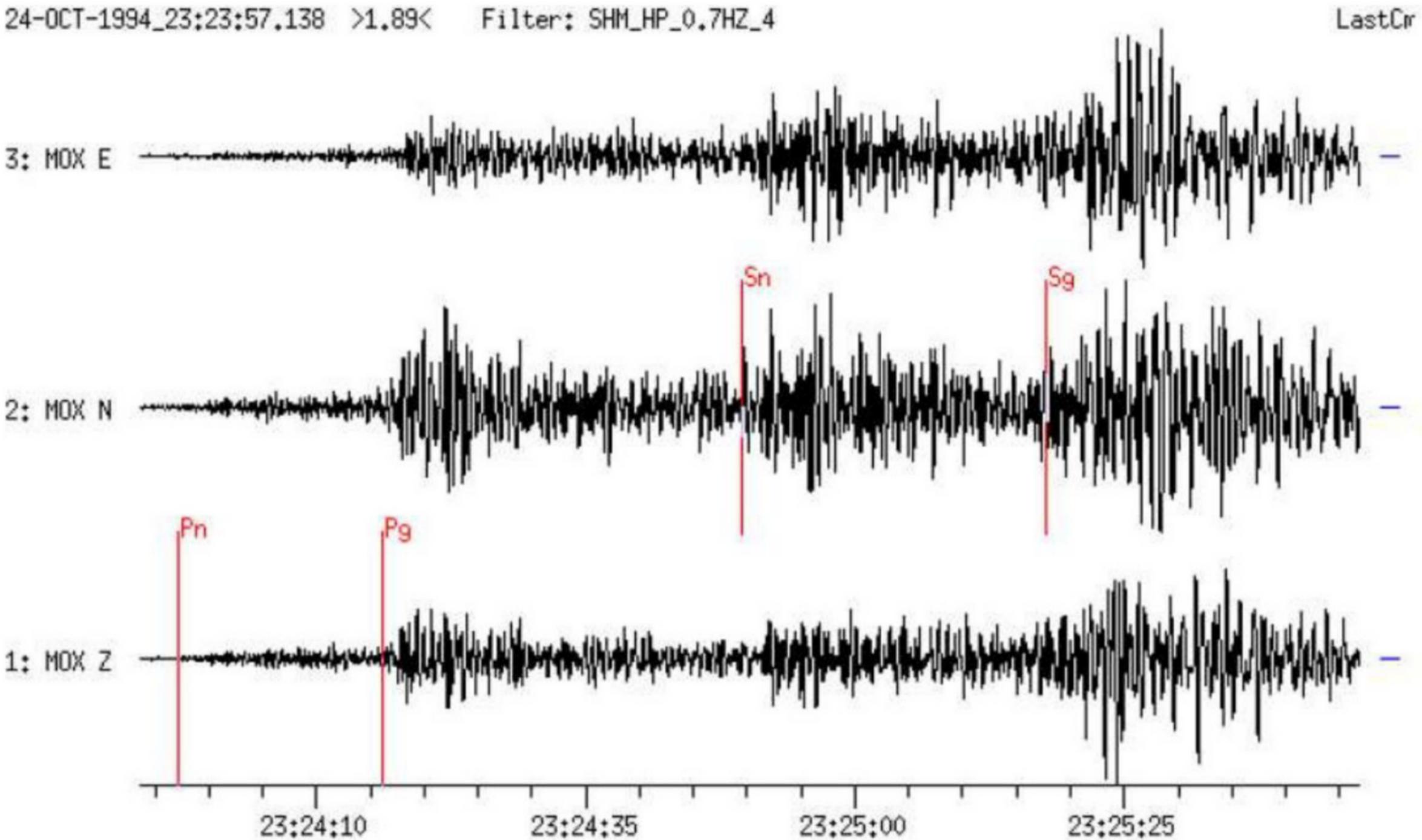
Fases refractadas bajo el Moho: Pn, Sn

Discontinuidades de la corteza: Pb, Sb

Reflexión del Moho: PmP, SmS



EVENTO REGIONAL



EVENTO TELESÍSMICO

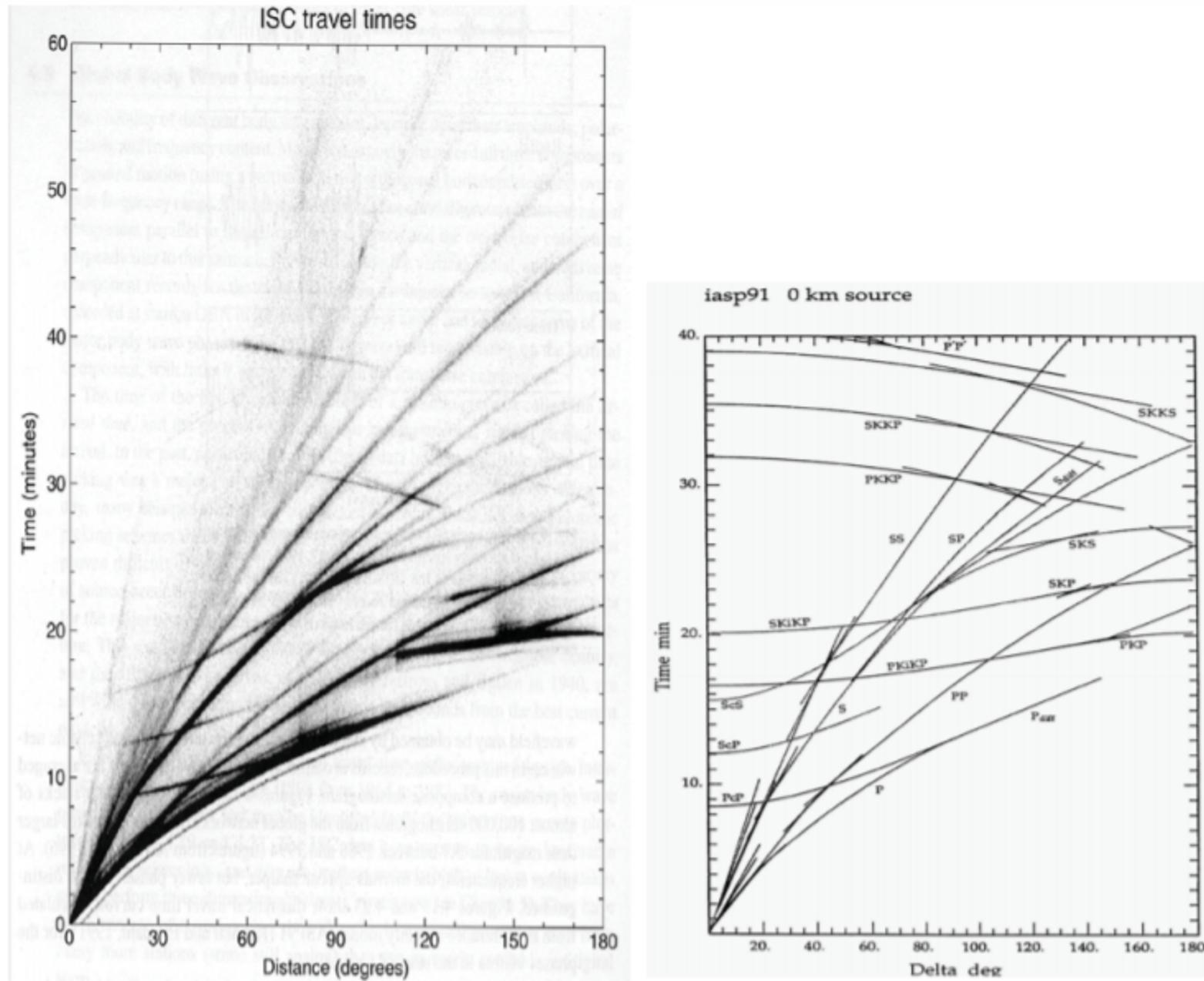
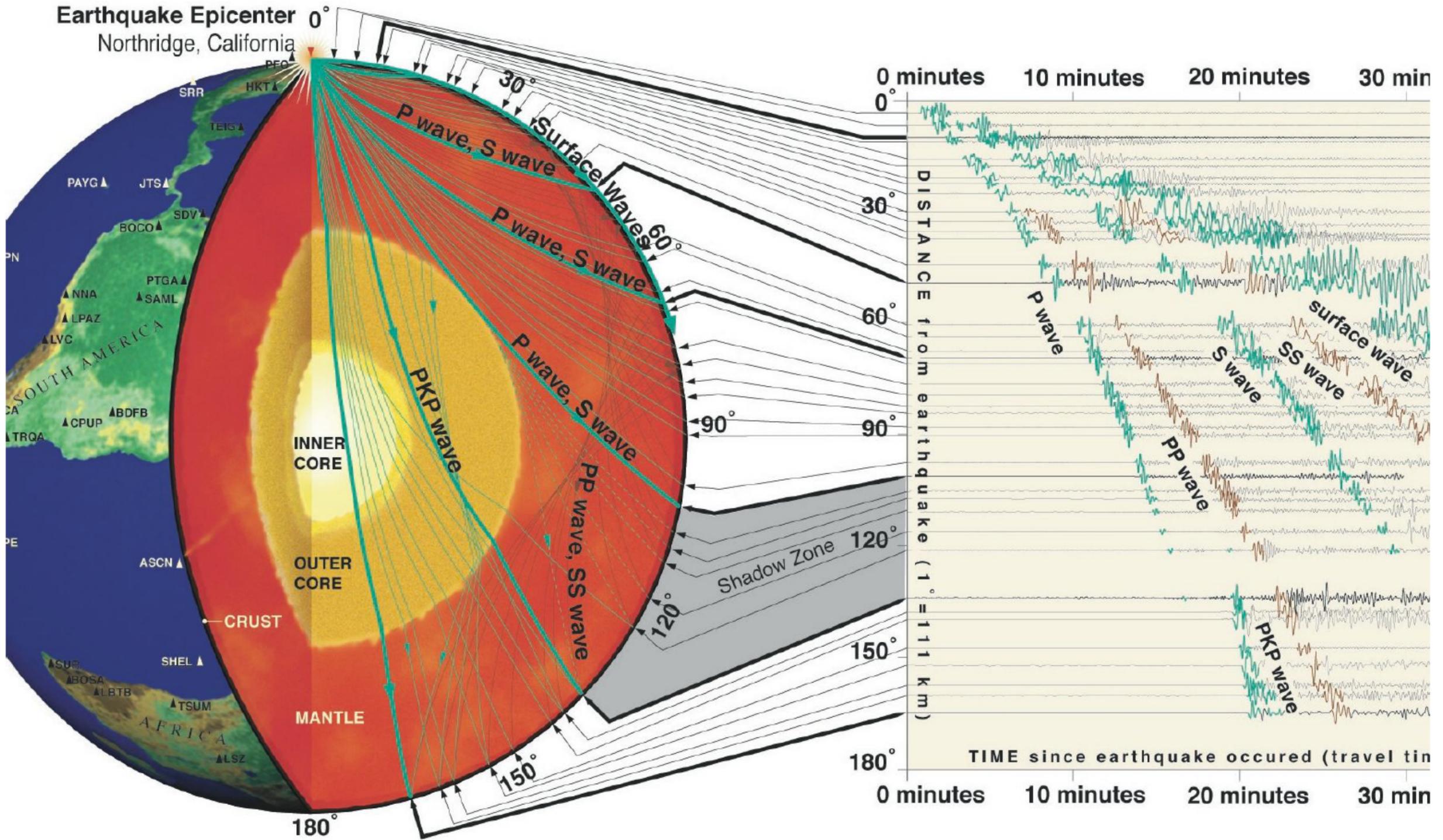


Fig. 2.56 **Left:** Travel-time picks collected by the ISC between 1964 and 1987 for events shallower than 50 km. (From Shearer, Introduction to Seismology, 1999; © with permission from Cambridge University Press). **Right:** IASP91 travel-time curves for surface focus (from Kennett, 1991).

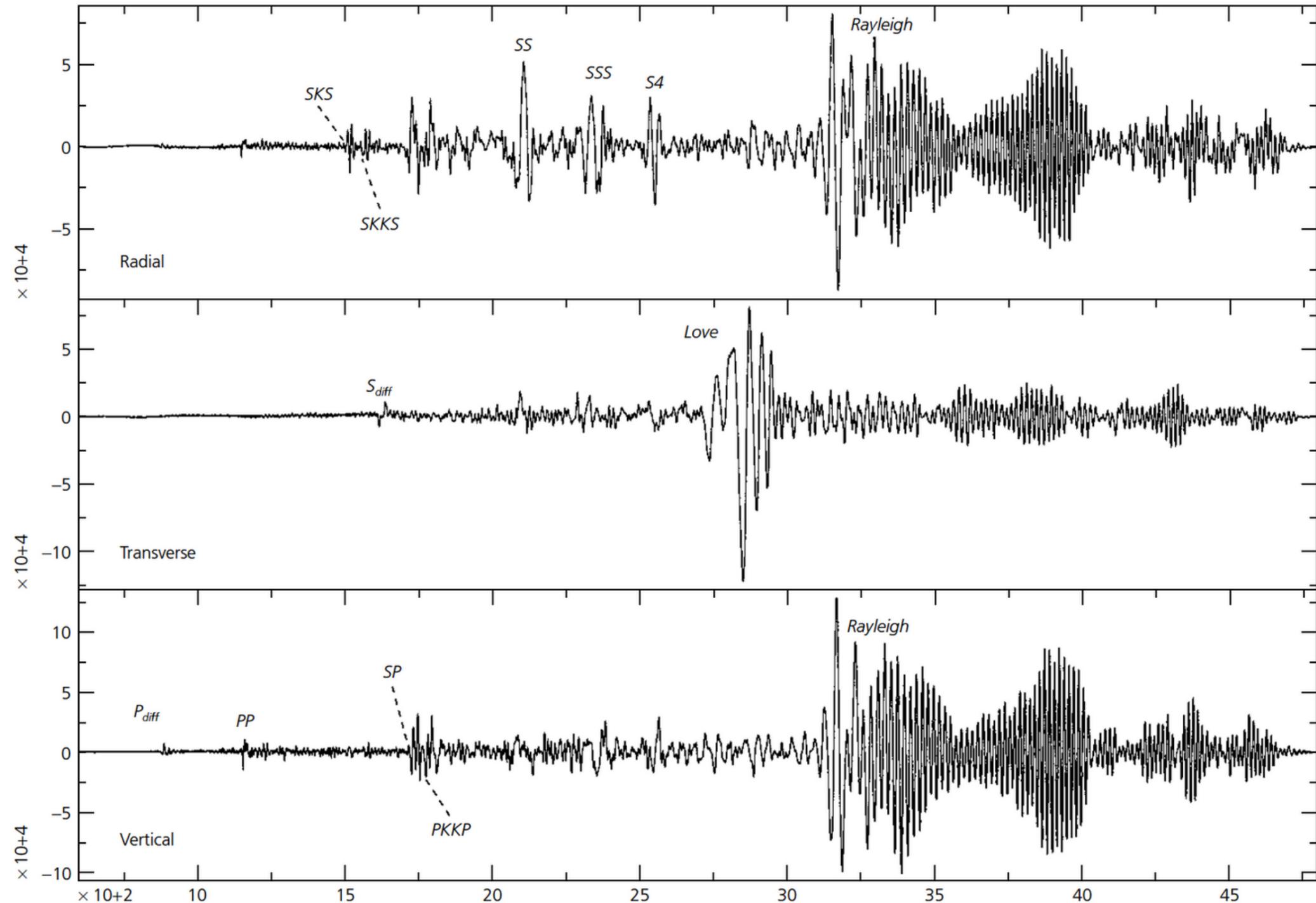
EVENTO TELESÍSMICO



EVENTO TELESÍSMICO

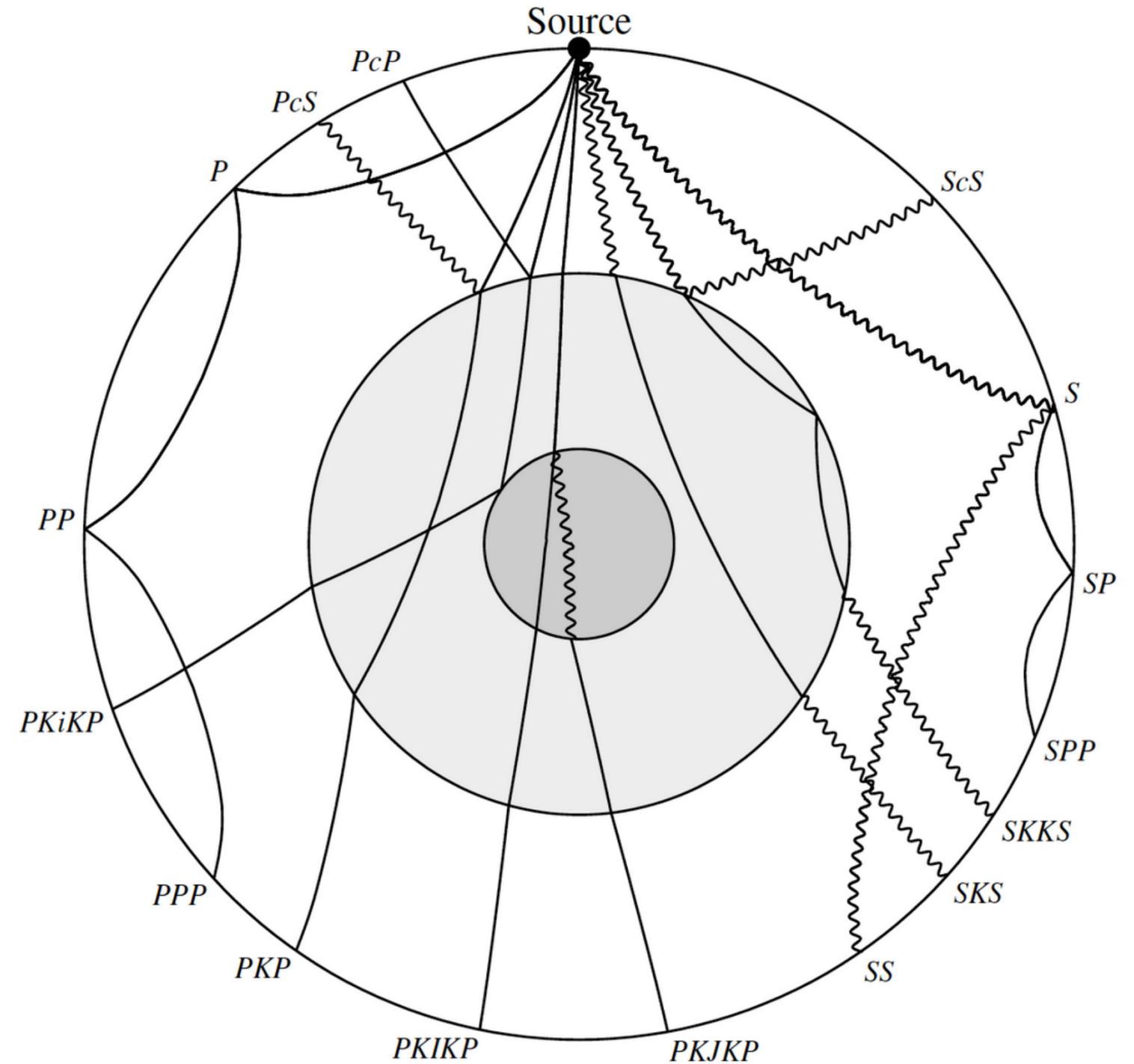
Sobre los 15° es posible observar los eventos telesísmicos.

Se pueden observar muchas más fases sísmicas debido a reflexiones y refracciones dentro de la tierra y la interacción de las ondas con la superficie libre, las distancias telesísmicas se consideran entre los 30° - 90°



EVENTO TELESÍSMICO

- K: Onda P en el núcleo externo
- I: Onda P en el núcleo interno
- J: Onda S en el núcleo interno
- c: Una reflexión en el borde núcleo externo-manto
- i: Una reflexión en el borde núcleo interno-núcleo externo



EVENTO TELESÍSMICO

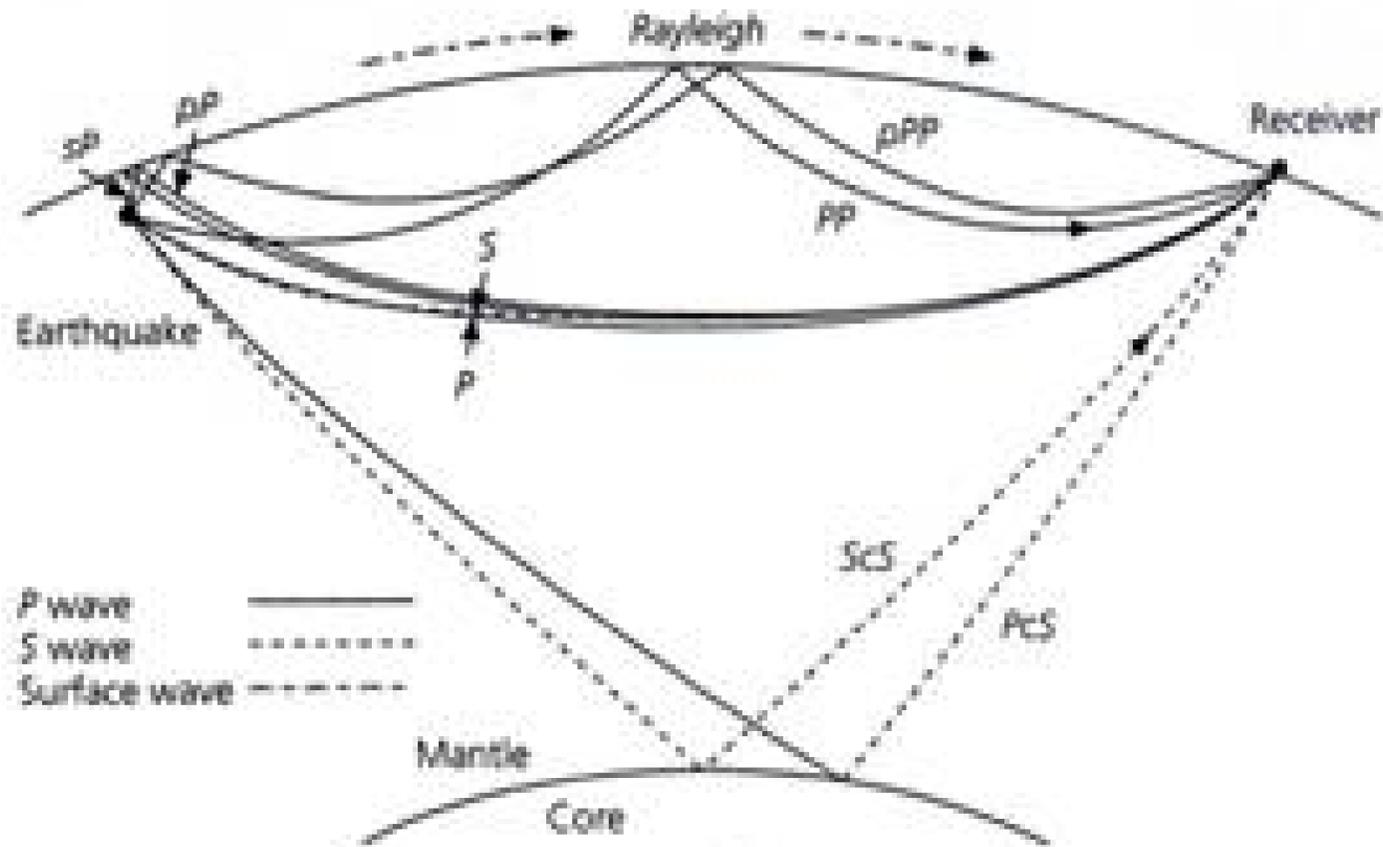
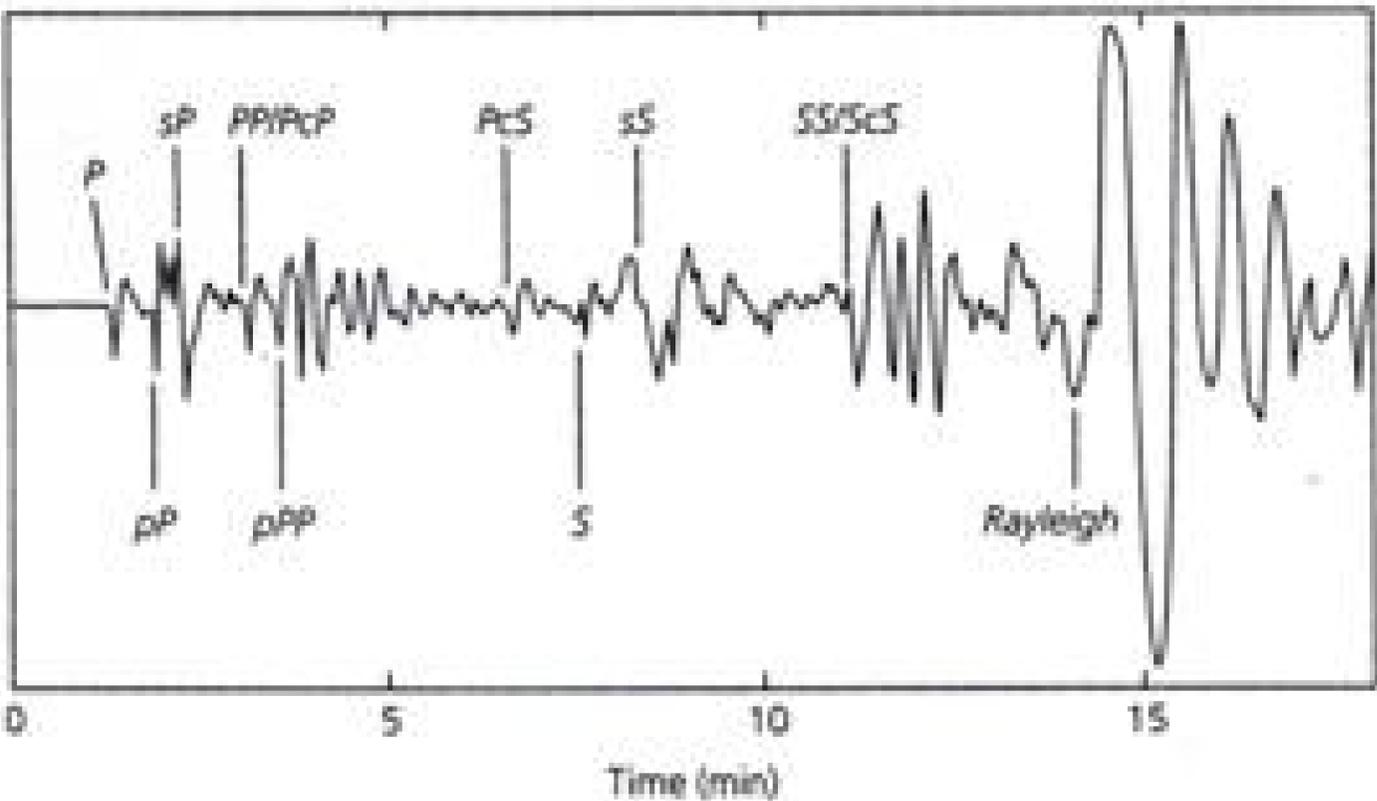


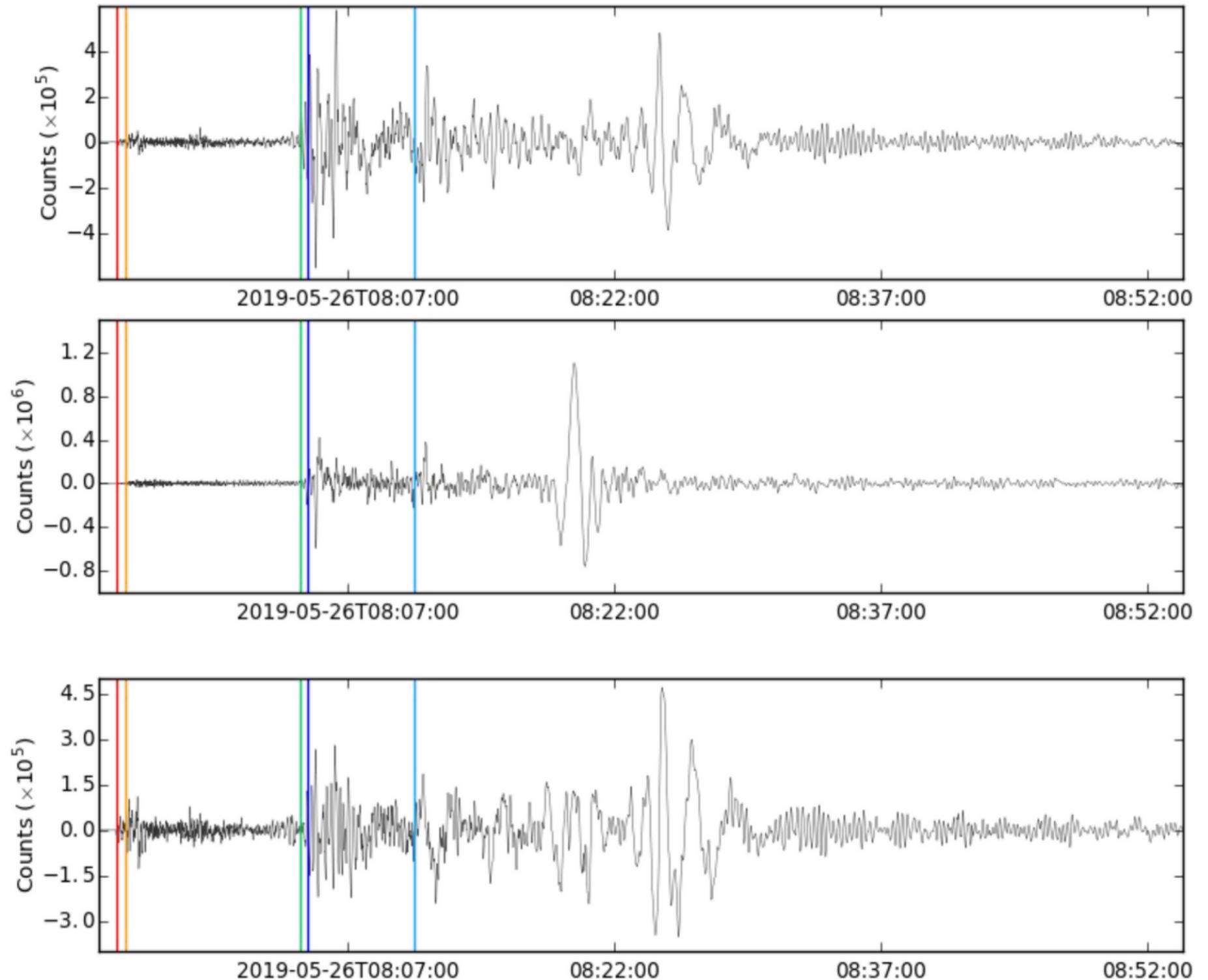
Fig. 1.1-3 Left: Long-period vertical component seismogram at Golden, Colorado, from an earthquake in Colombia (July 29, 1967), showing various seismic phases. The distance from earthquake to station is 44°. Right: Ray paths for the seismic phases labeled on the seismogram.

EVENTO TELESÍSMICO

Registro del terremoto Mw 8.0 al norte de Perú, el pasado 26 de Mayo de 2019, en una estación ubicada en Alemania (90° de distancia).

De acuerdo a lo que observa, Podría señalar cuál es la componente vertical?

Identifique las ondas superficiales. ¿ Se puede ver la onda de Rayleigh y la de Love?



LOCALIZACIÓN USANDO TIEMPOS DE LLEGADA

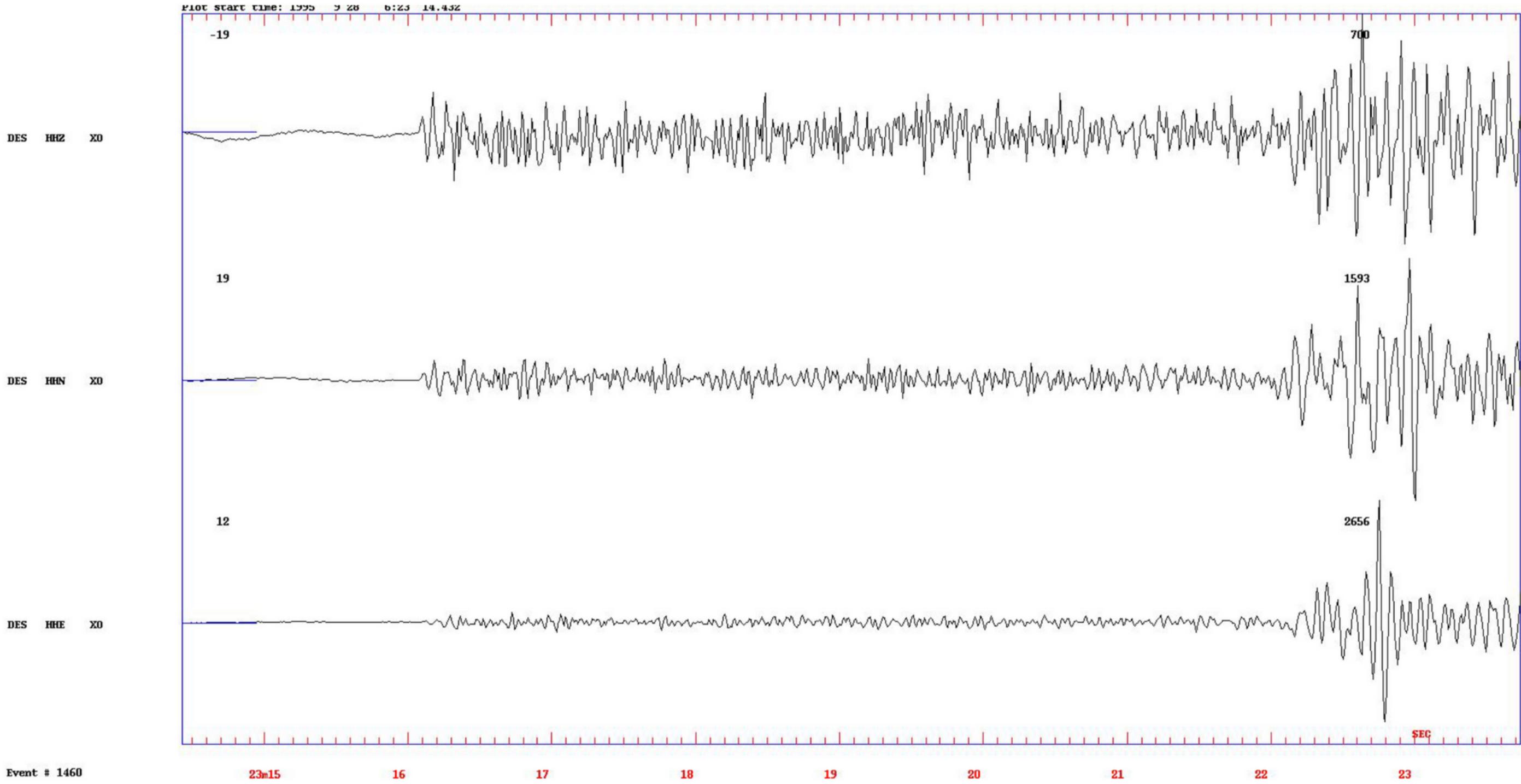
Los sismos locales, a una distancia de aprox. 200 km de la fuente pueden ser localizados utilizando la diferencia en los tiempos de llegada entre las ondas P y S.

Del ejemplo anterior, la diferencia entre la llegada de la onda P y S (S-P) es de aproximadamente 10 s.

Considerando velocidades constantes para la onda P y S de 6 km/s y 3.5 km/s, respectivamente. Se puede calcular la distancia entre el sismo y la estación de la siguiente forma:

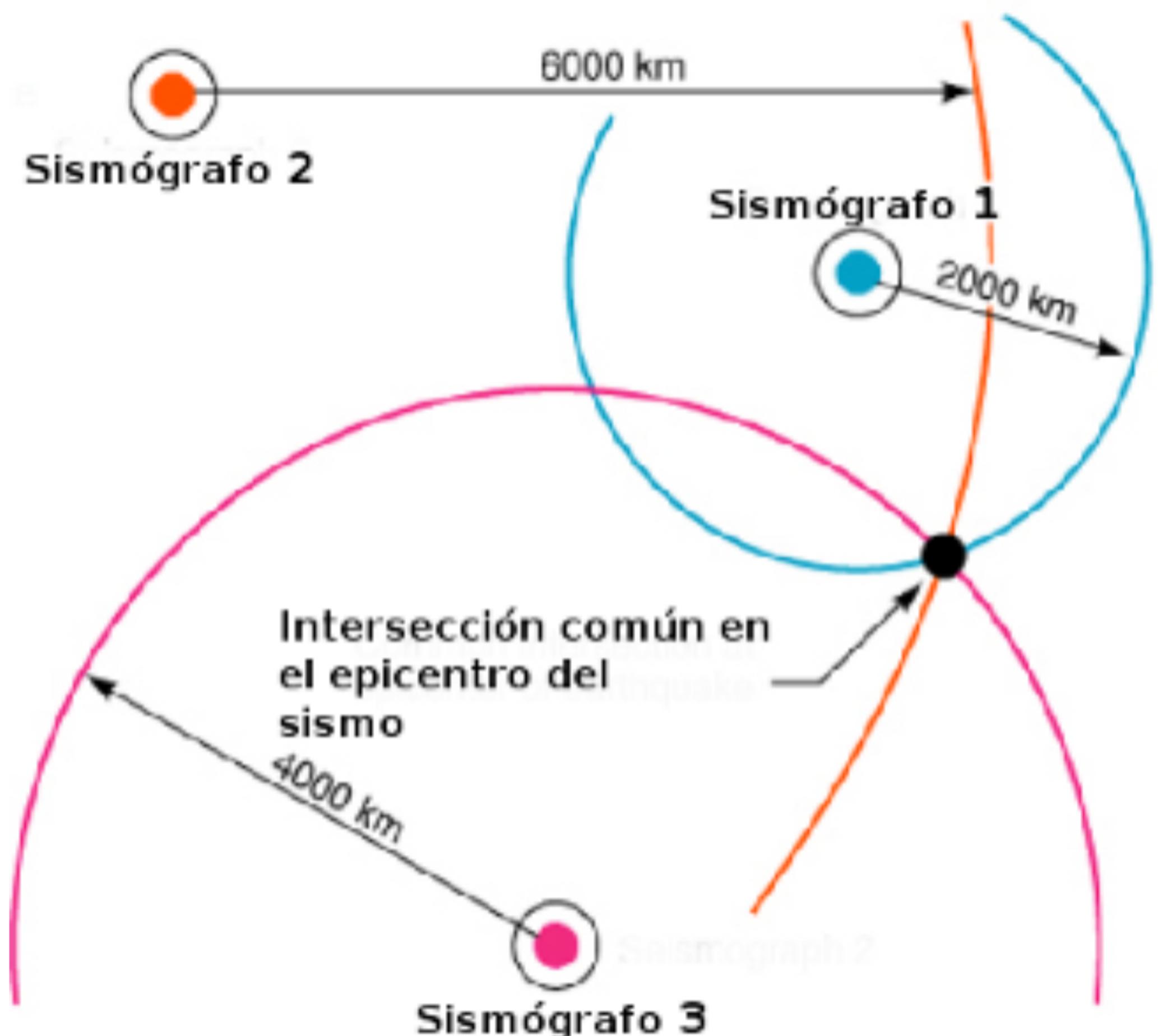
$$\begin{aligned}\text{Tiempo (S-P)} &= \left(\frac{x}{v_s} - t_0 \right) - \left(\frac{x}{v_p} - t_0 \right) \\ \Rightarrow x &= (\text{S-P}) \frac{v_p v_s}{v_p - v_s}\end{aligned}$$

LOCALIZACIÓN USANDO TIEMPOS DE LLEGADA



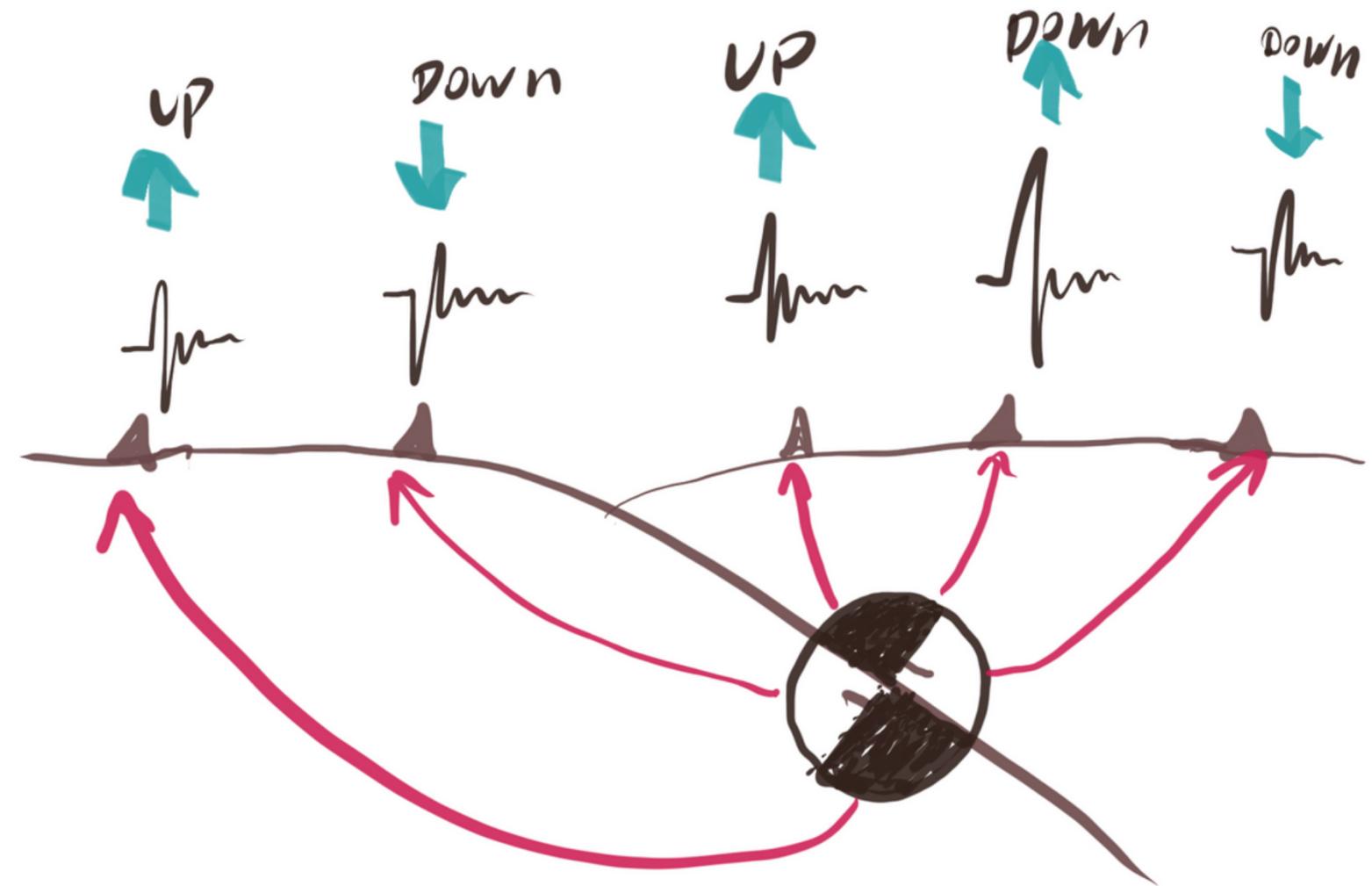
LOCALIZACIÓN USANDO TIEMPOS DE LLEGADA

**¿CÓMO PODEMOS ENCONTRAR EL EPICENTRO DEL
TERREMOTO?**



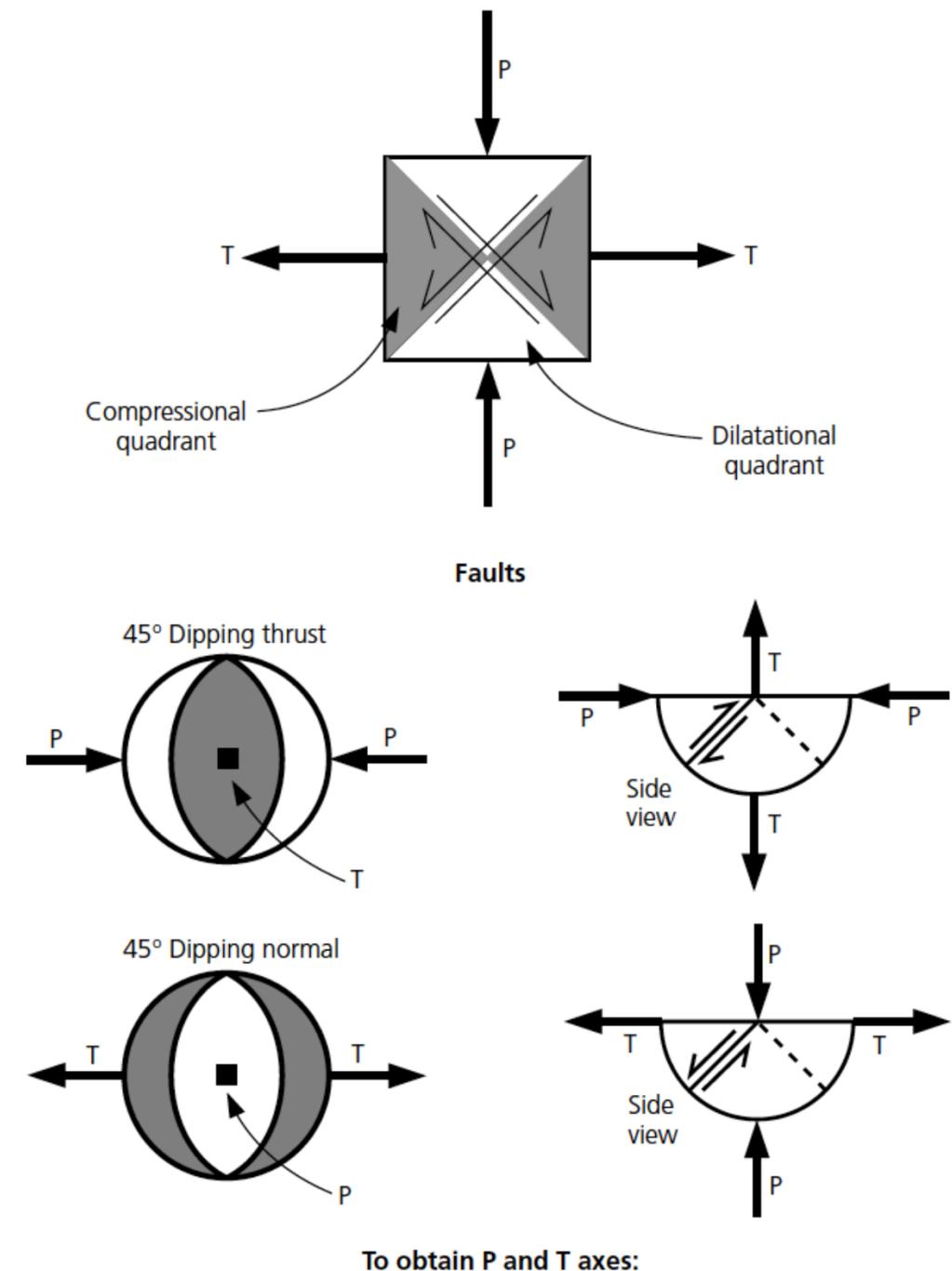
MECANISMOS FOCALES

- La esfera focal es una esfera imaginaria infinitesimal que envuelve al hipocentro.
- Puede dividirse en cuatro cuadrantes, dos compresionales y dos dilatacionales.
- Para los terremotos telesísmicos la primera llegada de la onda P es un rayo que sale de la parte inferior de la esfera.
- Para terremotos en el campo cercano la primera llegada de la onda P es un rayo que sale de la parte superior de la esfera.



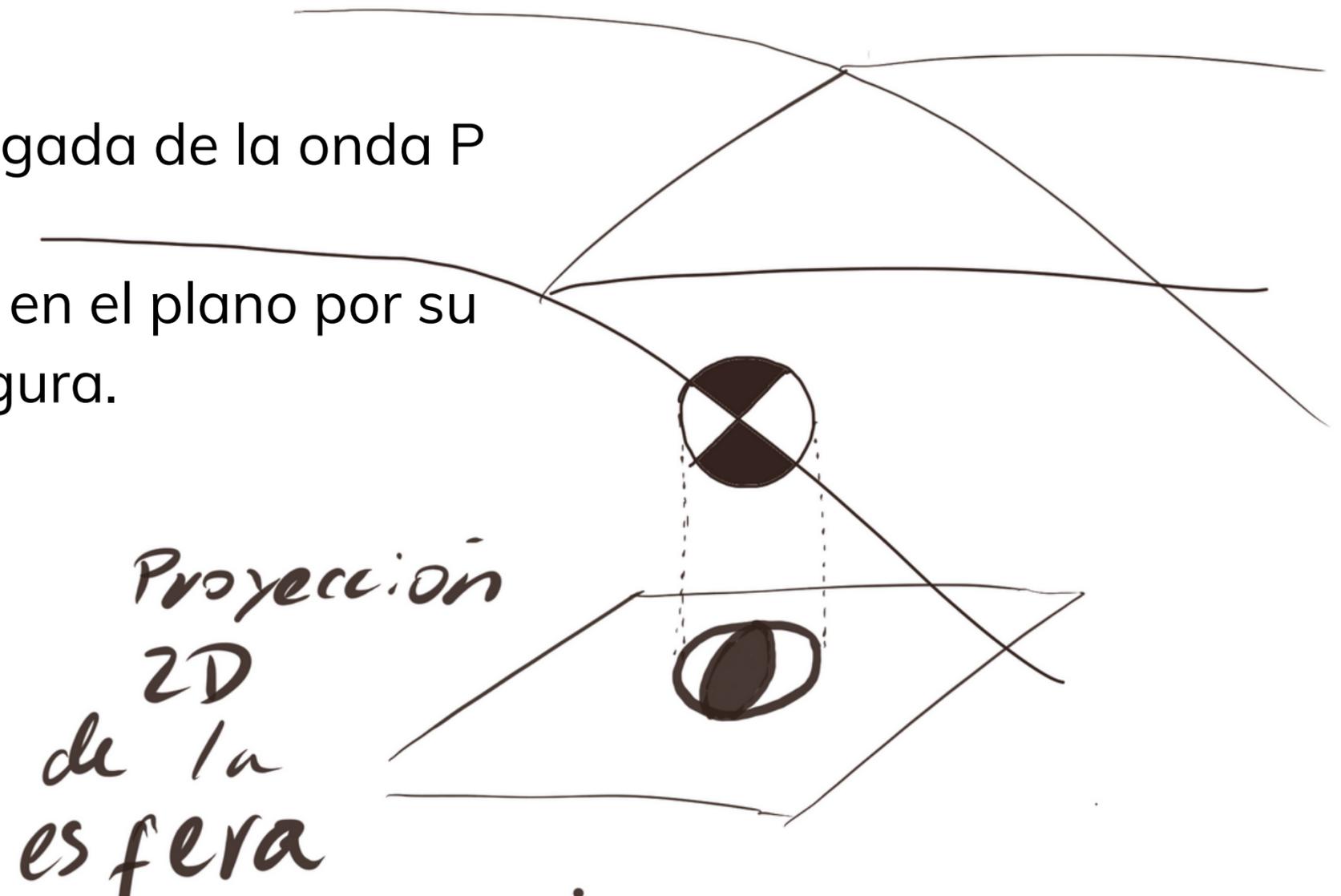
MECANISMOS FOCALES

- Los mecanismos focales contienen dos planos nodales perpendiculares, uno de los cuales representa el plano de falla y el otro es un plano auxiliar perpendicular.
- Para poder identificar cual de los dos planos es el que representa la falla, es necesario tener más información, como del tipo (1) geológica, (2) geodésica, (3) directividad.
- No hay movimiento en los planos nodales.
- Por convención los cuadrantes compresionales se representan por (T) y son pintados de color, mientras que los cuadrantes dilatacionales se representan por (P) y no se colorean.



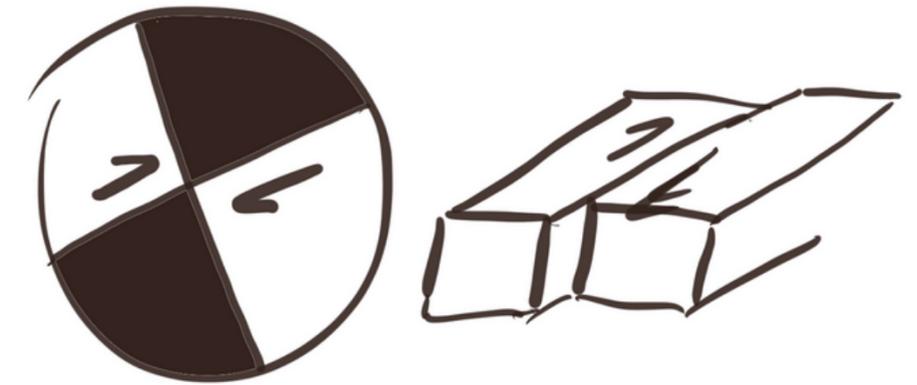
MECANISMOS FOCALES

- Se construyen a partir de la primera llegada de la onda P en la componente z del sismograma.
- Las esferas focales son representadas en el plano por su proyección inferior, como se ve en la figura.



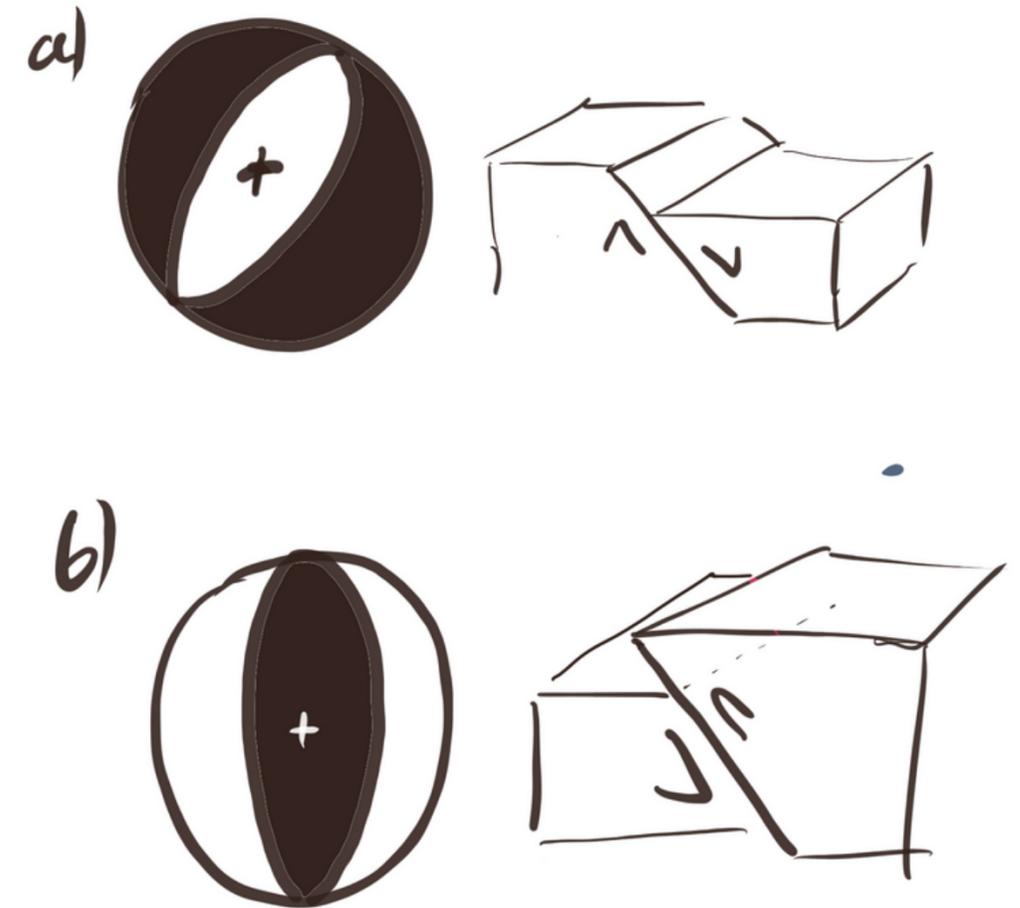
MECANISMOS TRANSCURRENTES

- Si las flechas del bloque opuesto al observador apuntan hacia la derecha, se tiene una falla transcurrente-dextral.
- Si las flechas del bloque opuesto al observador apuntan hacia la izquierda, se tiene una falla transcurrente-sinestral.



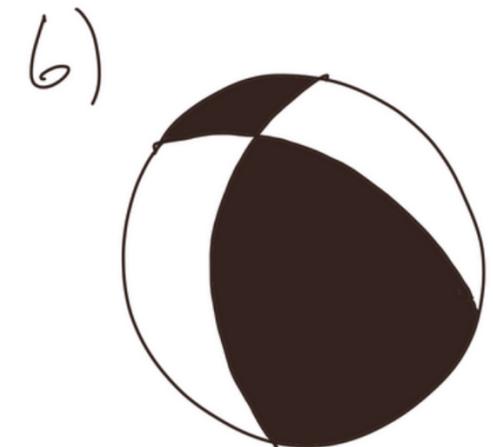
MECANISMOS NORMALES E INVERSOS

- Sólo se pueden observar tres de los cuatro cuadrantes.
- Si el centro del mecanismo es blanco, se trata de una falla normal.
- Si el centro del mecanismo está pintado, se trata de una falla inversa.



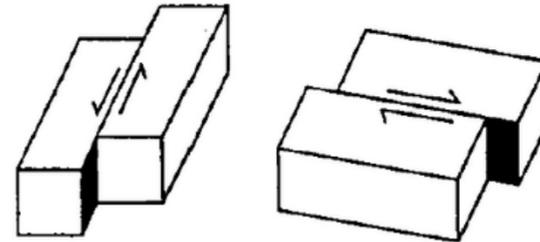
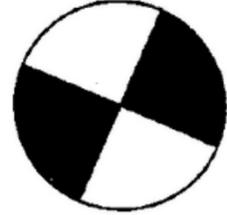
MECANISMOS OBLICUOS

- Los mecanismos oblicuos tienen aportes de los dos tipos de deslizamientos.
- Si el centro de un mecanismo está en un cuadrante blanco, se dice que es un mecanismo oblicuo con componente normal, sin tener en cuenta cual de los dos planos nodales es el plano de falla.
- Si el centro del mecanismo está en un cuadrante negro, este será un mecanismo oblicuo con componente inversa.

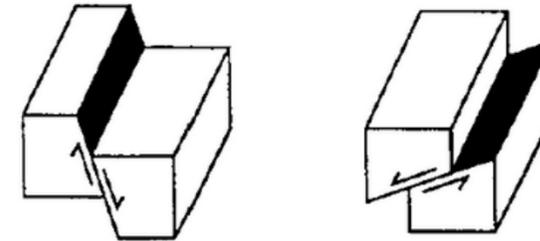


GEOMETRÍAS DE FALLA ASOCIADAS A MECANISMOS FOCALES.

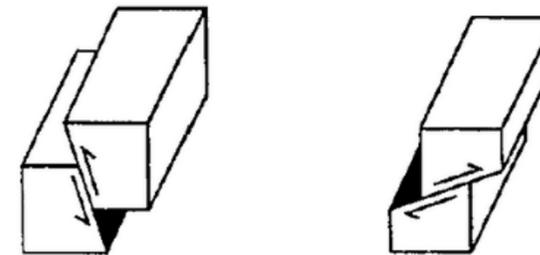
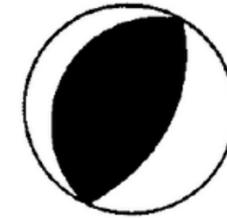
Strike Slip



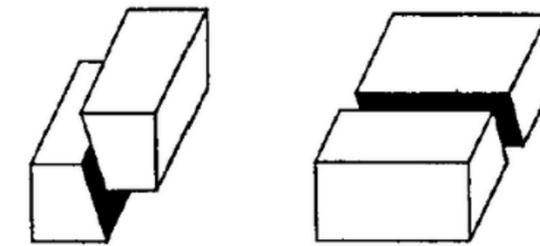
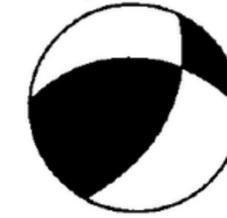
Normal



Thrust



Oblique

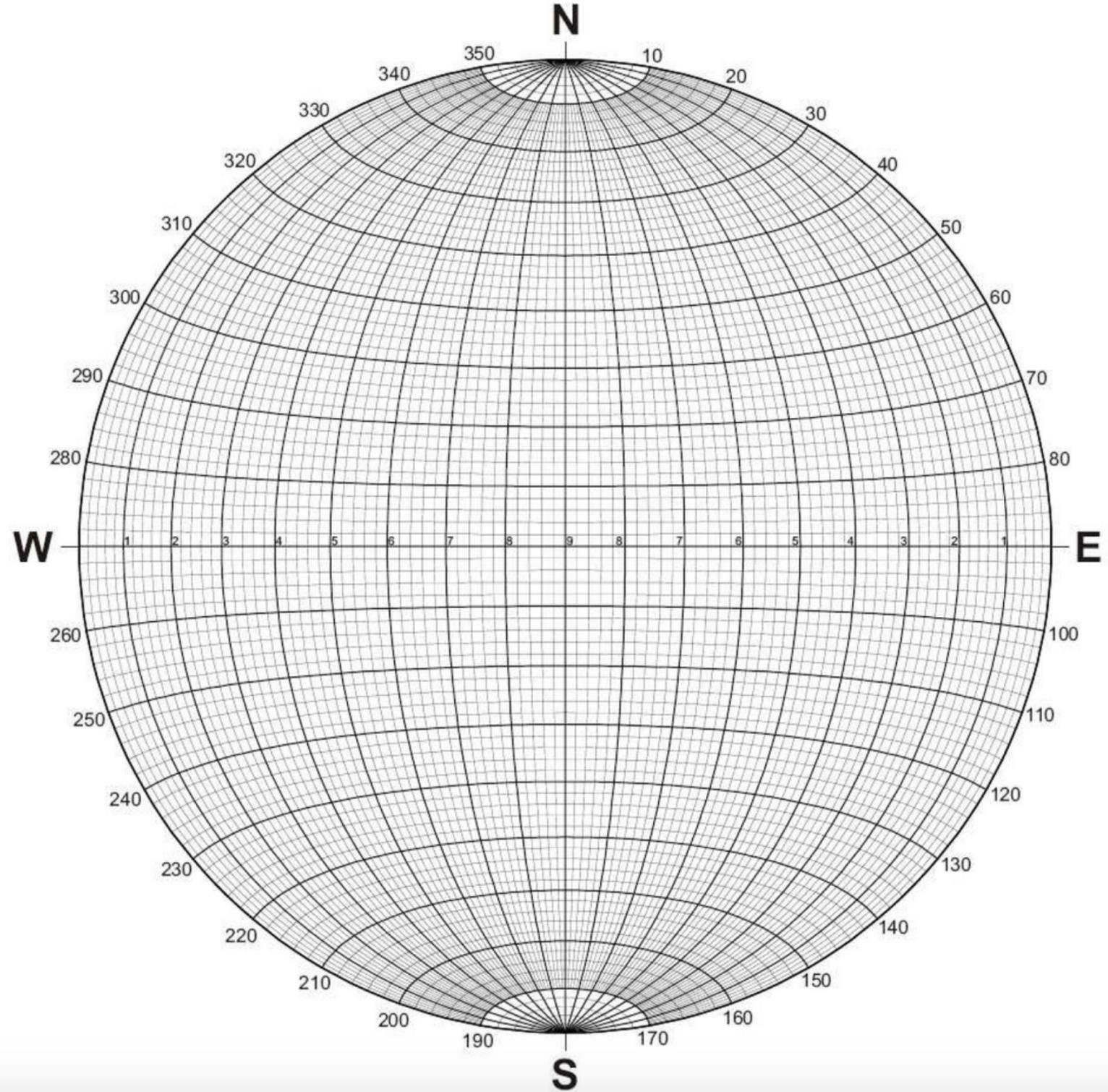


SOLUCIÓN DE UN MECANISMO FOCAL

- Observamos el registro de la componente vertical de cada estación y evaluamos si el primer movimiento detectado fue un movimiento "UP" o "DOWN" o sin señal aparente en el tiempo t.
- Para representar los datos en el sismograma hacemos uso de la red estereográfica de Schmidt
- Cada primera llegada de los sismogramas será representado por uno de estos tres símbolos: un círculo negro (●) si el primer movimiento de la onda P es "UP", un círculo blanco (○) si el primer movimiento de la onda P es "DOWN" y una (×) si el primer movimiento es muy débil para diferenciarlo.

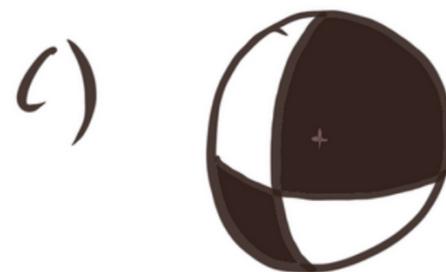
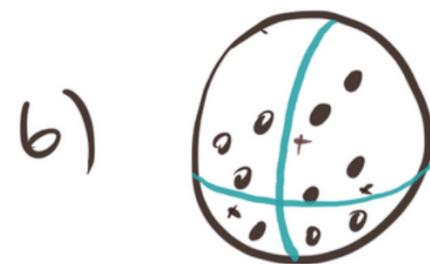
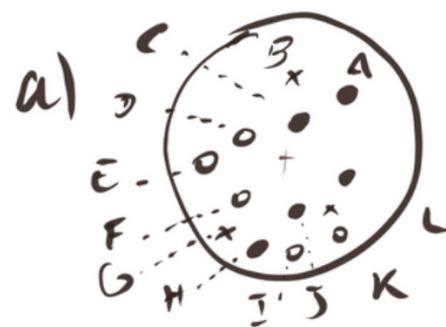


RED ESTEREOGRÁFICA DE SCHMIDT



SOLUCIÓN DE UN MECANISMO FOCAL

- a) Representación estereográfica de los datos sísmicos.
- b) Trazados de los planos nodales en una red estereográfica.
- c) Identificación de los cuadrantes.



Est.	P wave	Symbol.
A		●
B		x
C		●
D		○
E		○
F		○
G		x
H		●
I		○
J		●
K		○
L		x

TIPOS DE FALLAS SEGÚN EL VALOR DEL RAKE

Tabla 1: Valores permitidos para el Rake y el tipo de falla correspondiente.

Rake	Tipo de falla
0° o 180°	Transcurrente
90°	Inversa pura
-90°	Normal pura
-20° a 20°	Transcurrente sinestral
20° a 70°	Oblicua-inversa-sinestral
70° a 110°	Inversa
110° a 160°	Oblicua-inversa-dextral
-160° a 160°	Transcurrente dextral
-110° a -160°	Oblicua-normal-dextral
-70° a -110°	Normal
-20° a 70°	Oblicua-normal-sinestral.

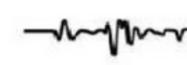
EJERCICIO

Construir un mecanismo focal a partir de las primeras llegadas de las siguientes estaciones.

- (a) Identificar primera llegada de cada estación marcando los círculos de las estaciones de la página 28 con UP(●), DOWN(○) o no identificado(×) según corresponda.
- (b) Usando el diagrama de Schmidt, trazar los arcos que representan los planos nodales del mecanismo focal.



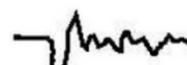
BUL



AAE



BAG



CAR



SNG



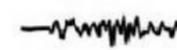
QUE



TAB



NIL



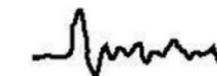
MSH



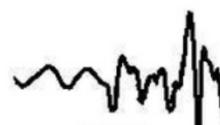
TOR



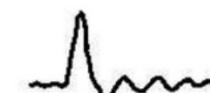
WIN



HLW



COL



JER



ANT



P00



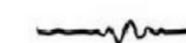
SHI



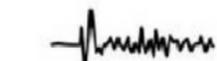
NAI



MAT

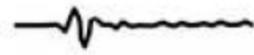


KEV



NUR

EJERCICIO



KBS



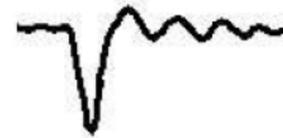
KON



AKU



UME



BEC



MAL



VAL

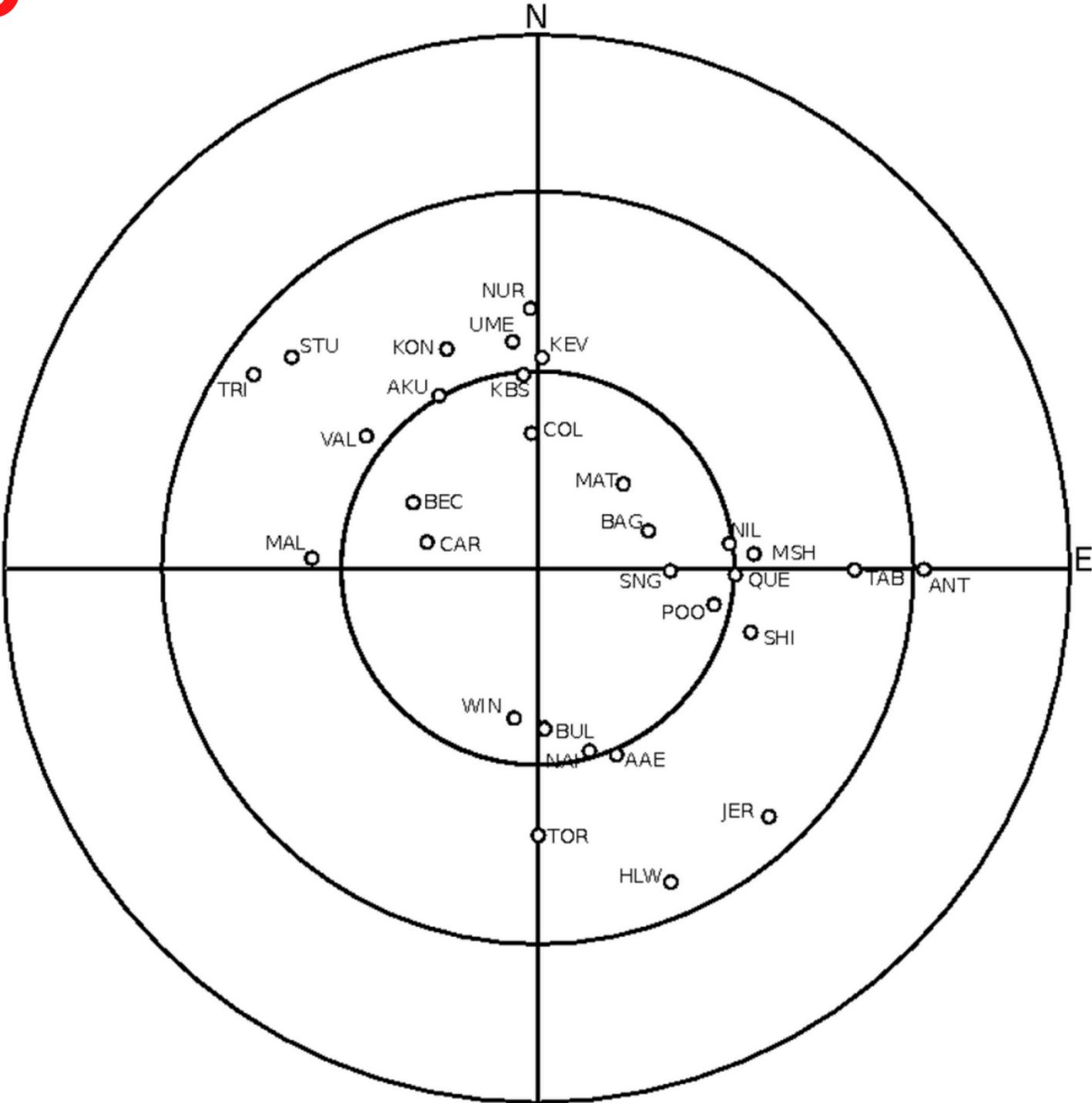


STU



TRI

EJERCICIO



EJERCICIO

