

10° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos  
 Simposio de Geofísica: La Geofísica como vínculo entre el conocimiento de la tierra y la sociedad

## DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD S EN EL INTERVALO QUINTUCO-VACA MUERTA A PARTIR DE UN ZERO OFFSET- VSP Y ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS ASOCIADOS

Aylén Pontoriero<sup>1</sup>, Eduardo L. Corti<sup>1</sup>, Juan F. Moirano<sup>2</sup>

1: Facultad de Cs. Astronómicas y Geofísicas, Universidad Nacional de La Plata, aylenpontoriero@gmail.com,  
 eduardo.corti@gmail.com

2: Pan American Energy, jmoirano@pan-energy.com

Laboratorio Maggia, Ftd. de Cs. Astronómicas y Geofísicas, Univ. Nac. de La Plata, jmoirano@fcaglp.unlp.edu.ar

Palabras clave: Z-VSP, Ondas S, Vs, Qs, Quintuco-Vaca Muerta

### ABSTRACT

S waves detection in a Zero offset VSP. S waves Velocity estimation, Poisson modulus and seismic quality factor (Q) for Quintuco-Vaca Muerta Fms.

S waves presumably generated in the near surface have been detected on a Z-VSP and can be followed along the whole profile. The intensity of this Down S-wave train allowed the estimation of shear velocities (Vs) in several intervals along the well, including the Quintuco and VacaMuertaFms. These velocities were used together with compresional velocities (Vp) in the determination of elastic parameters such as Poisson Modulus ( $\sigma$ ). Seismic quality factors Q(p) and Q(s) were also estimated from the analysis of the Down P and S wave trains.

### INTRODUCCIÓN

El VSP de incidencia normal (Z-VSP) fue adquirido con un sensor VSI de 3 componentes en el área Lindero Atravesado, provincia de Neuquén, Argentina por Pan American Energy, que facilitó los datos para la realización del presente trabajo.

El Z-VSP exhibe una clara presencia de ondas S en todo el perfil por lo que presumiblemente se deban a una componente de corte en la misma fuente sísmica o a la heterogeneidad cercana a la superficie (Xiaomin Z. *et al* 2005) (Yang L. *et al* 2007) (L. Girolodi *et al* 2002).

El objetivo del presente trabajo consiste en el tratamiento de los datos del Z-VSP para estimar un modelo de velocidad de onda P y de onda S en el intervalo Quintuco – Vaca Muerta. Dicho intervalo abarca desde los 1880 m hasta los 2780 m desde el nivel del terreno, alcanzando los 900 metros de espesor en la zona de estudio.

Se ha utilizado para el tratamiento del dato el software de procesamiento sísmico ECHOS de PARADIGM, que a pesar de no estar diseñado específicamente para sísmica de pozo, permitió

llevar a cabo el trabajo. El mismo se encuentra disponible en la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas para uso académico gracias a un convenio establecido con Paradigm.

Una vez calculadas las velocidades de la onda P y de la onda S, se calculó la relación  $V_p/V_s$ , el módulo de Poisson y los factores de atenuación  $Q(p)$  y  $Q(s)$ .

## METODOLOGÍA

El primer paso en la secuencia de procesamiento fue la carga y la edición de los datos.

Se efectuaron varios disparos por nivel, contando con un mínimo de 5 disparos buenos durante la adquisición del Z-VSP con el fin de garantizar la calidad de los mismos. Para el procesado nos quedamos con un mínimo de 3 trazas por nivel para los primeros 23 niveles (niveles de checkshot) y un mínimo de 5 trazas por nivel para el resto de los niveles (VSP).

Los disparos con mala relación señal-ruido se eliminaron durante la edición y se utilizaron sólo los de buena calidad.

Luego, se realizó una suma por nivel de las trazas seleccionadas, aprovechando que ésta permite mejorar la relación señal-ruido según  $1/\sqrt{n}$ , siendo  $n$  el número de trazas por nivel. Como resultado se obtiene una traza por nivel y un total de 150 niveles para la componente Z, y 149 niveles para las componentes X e Y. A continuación, en las imágenes 1, 2 y 3, se muestran las 3 componentes luego de la edición.

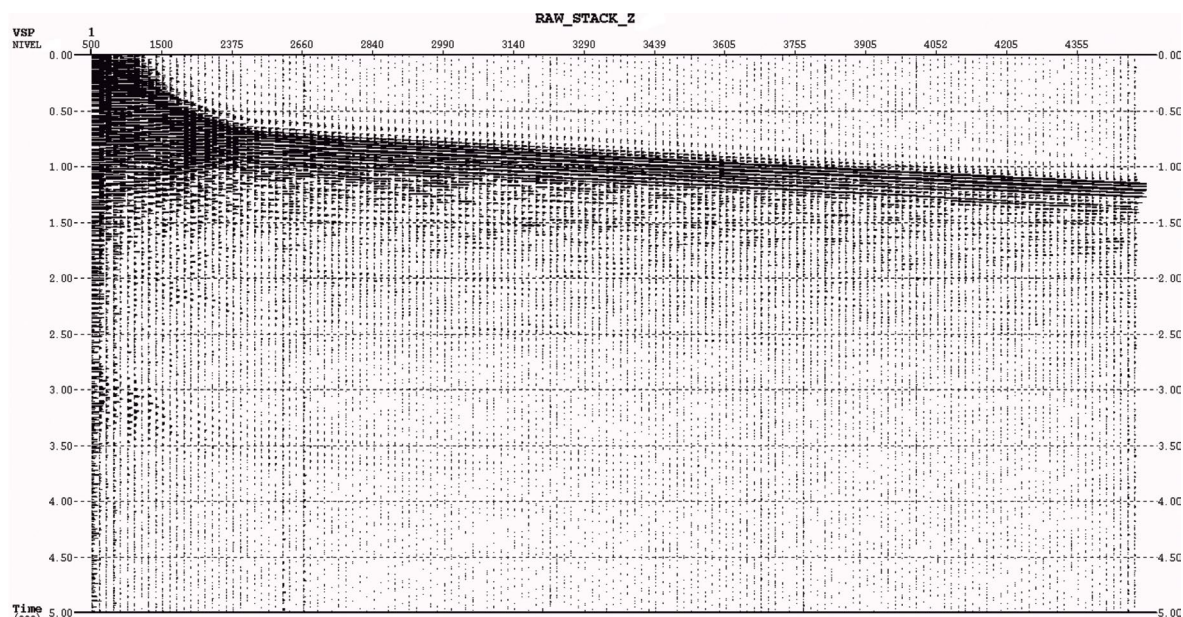


Figura 1. Componente Z



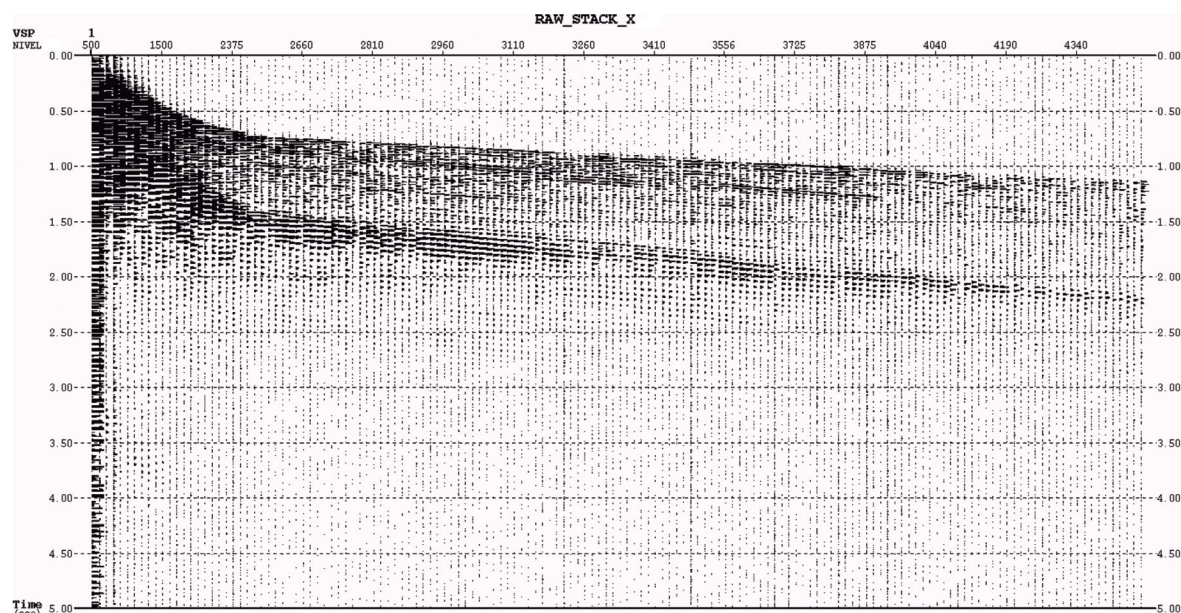


Figura 2. Componente X

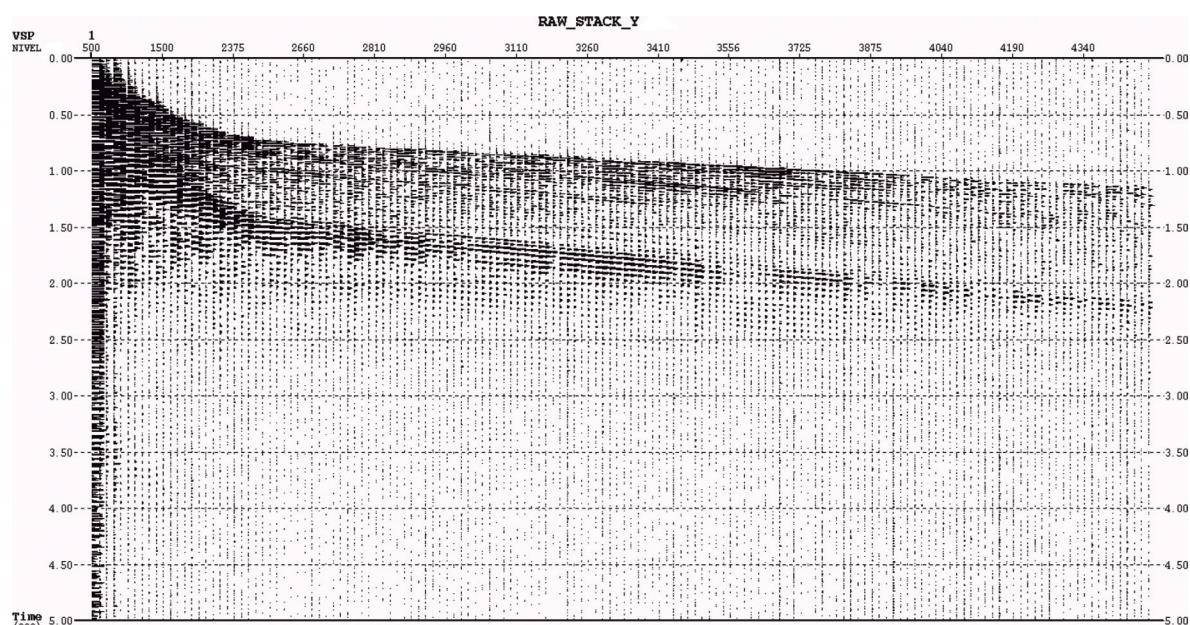


Figura 3. Componente Y

## Procesamiento onda P

Un procesamiento típico de ondas P puede ser ejemplificado en la figura 4:

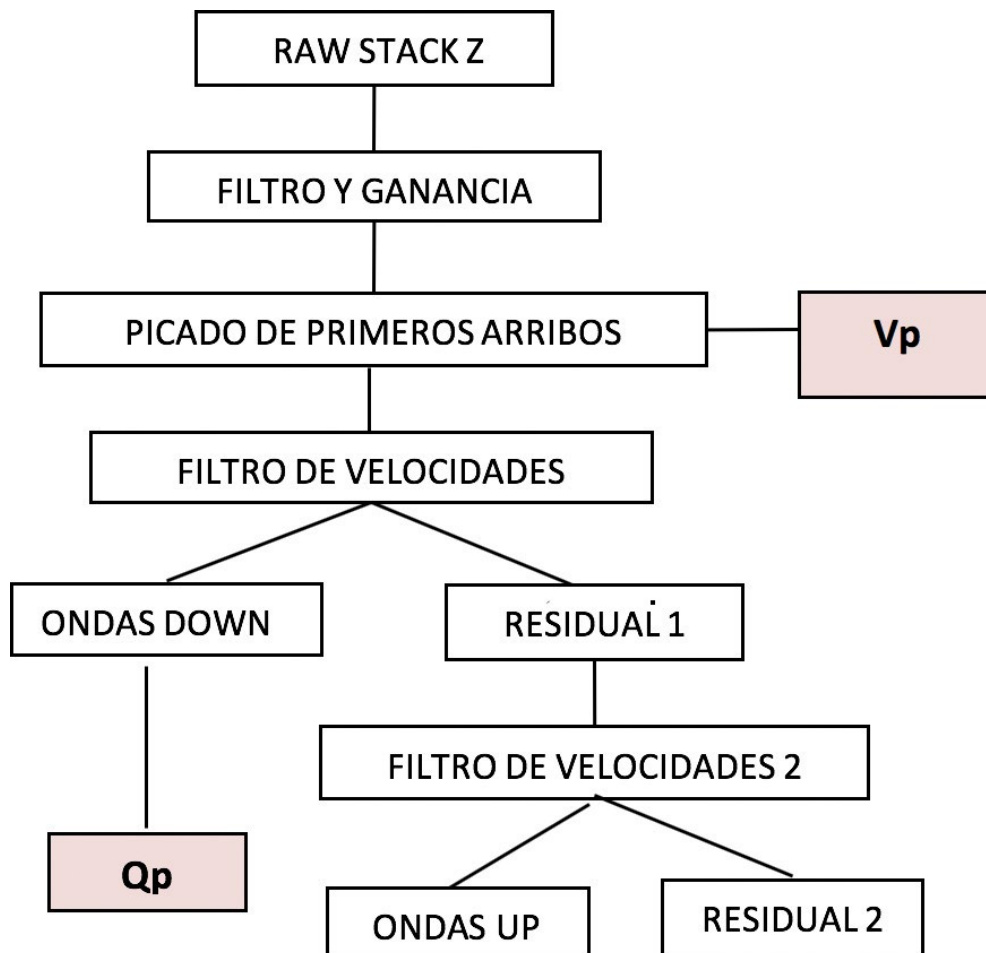


Figura 4. Esquema de procesamiento onda P (Santivañez R. 2008)

El primer paso en el procesamiento de la onda P es aplicarle a la componente Z un filtro y una corrección por ganancia. El filtro se aplica para eliminar cualquier frecuencia espuria que pueda estar mezclada en la señal y la ganancia se aplica para compensar el decaimiento de amplitud por divergencia esférica.

En nuestro trabajo se aplicó un filtro Butterworth de orden 3, de fase cero y ancho de banda de 10-80 Hz. El resultado de aplicarle a la componente Z el filtro y la ganancia se muestra en la figura 5.



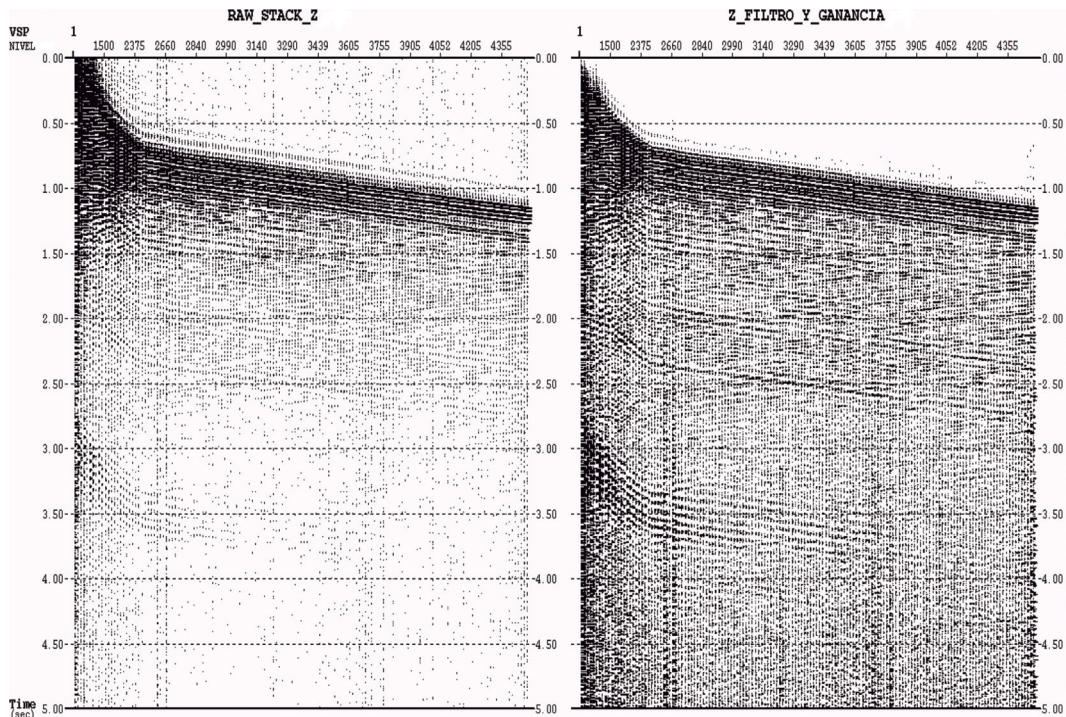


Figura 5. Componente Z con filtro y ganancia

Una vez obtenida la componente Z con filtro y ganancia se procede a picar los primeros arribos P. En la figura 6 se observa el picado de los tiempos. Con los tiempos de los primeros arribos, y siendo conocidas las profundidades para cada disparo, se estimó la velocidad interválica para el intervalo Quintuco - Vaca Muerta.

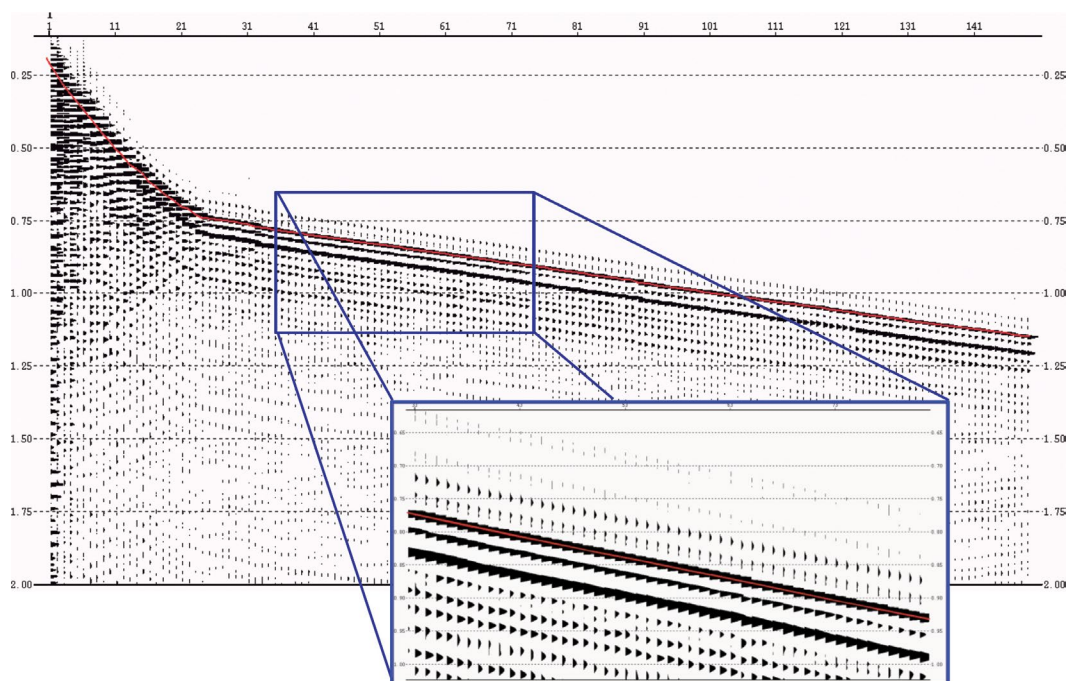


Figura 6. Picado de primeros arribos P

## Cálculo del Factor $Q_p$

$Q$  es un coeficiente que cuantifica la atenuación dependiente de la frecuencia, debido a la absorción inelástica (Sheriff 1991). El mismo describe la eficiencia que tiene un medio a transmitir la energía de las ondas sísmicas y se define como el cociente entre la energía por ciclo y la pérdida de energía por ciclo.

Se ha utilizado para el cálculo del factor  $Q$  el método del cociente espectral (Leaney 1999) donde se seleccionan los datos correspondientes a dos profundidades de receptor a través de un medio asumido con valor de  $Q$  constante.

La relación entre los espectros de amplitud,  $A_1$  y  $A_2$ , a los tiempos  $t_1$  y  $t_2$  para un rango de frecuencias dado viene dada por:

$$A_2(t_2, f) = A_1(t_1, f) e^{\frac{-\pi f(t_2 - t_1)}{Q}}$$

Si tomamos el logaritmo del cociente de amplitudes espectrales  $\frac{A(t, f)}{A_o(t_o, f)}$ , queda expresado como:

$$Q = - \frac{\pi f(t_2 - t_1)}{\ln\left(\frac{A_2(t_2, f)}{A_1(t_1, f)}\right)}$$

Expresado así, el factor  $Q$  es una función lineal de la frecuencia  $f$  y se puede calcular siendo conocidos  $(t_2 - t_1)$  y obteniendo la pendiente que resulta del ajuste lineal realizado sobre la relación espectral.

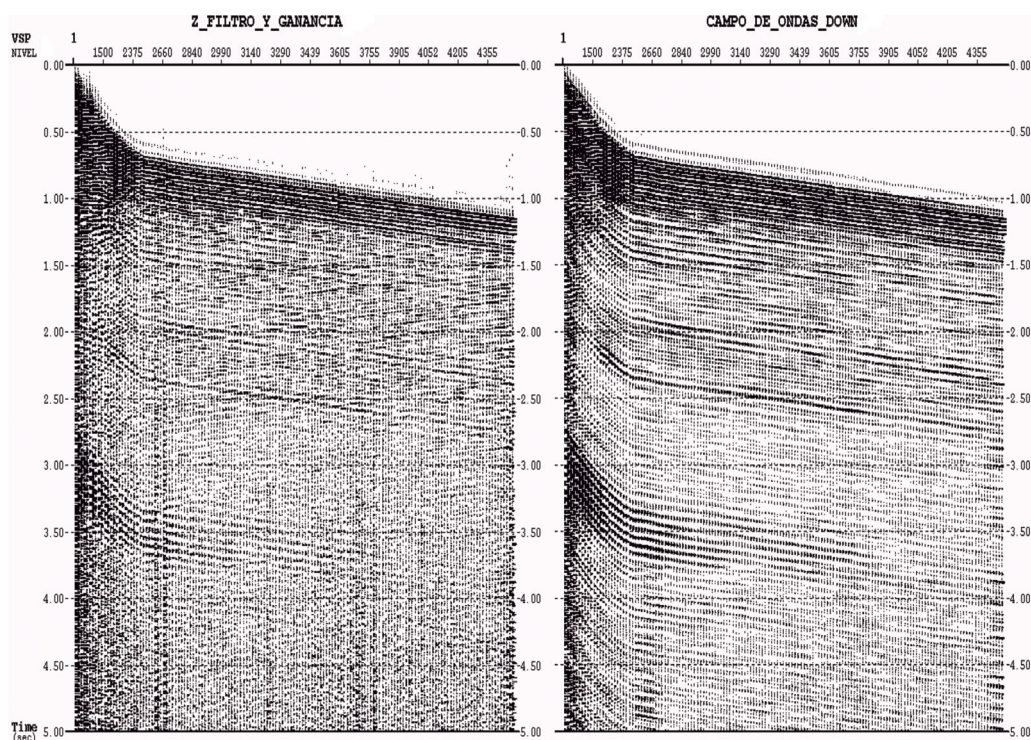


Figura 7. Campo de ondas Down de componente Z



El primer paso de la estimación del Factor  $Q_p$  fue aplicarle a la componente Z un filtro de mediana de 7 niveles para obtener el campo de ondas descendentes (Fig. 7). Luego se seleccionó la ventana de datos para realizar el cálculo. La misma se diseña para que contenga al primer arribo y múltiples de corto período, ya que de esta manera se obtiene un espectro de amplitud mejor muestreado. La longitud de ésta fue de 300 ms (Fig. 8).

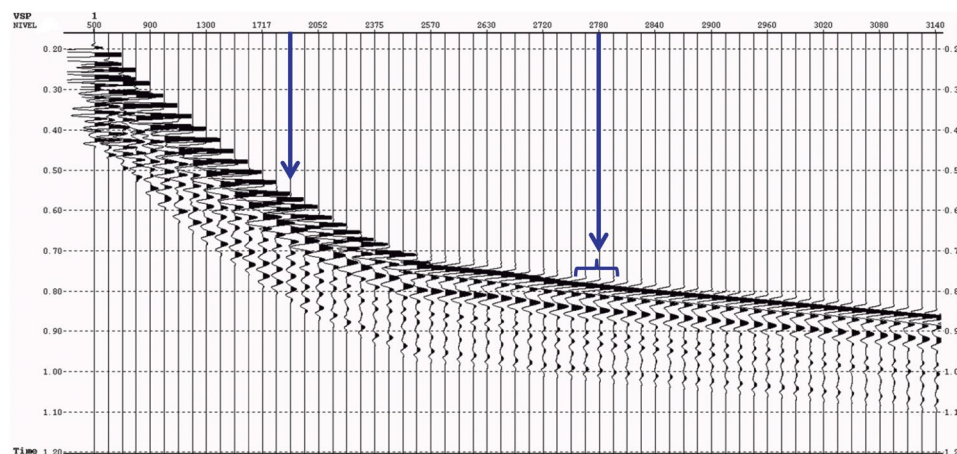


Figura 8. Ventana de datos utilizada

Para el Tope de Quintuco (a 1.880 m desde GL) se utilizó la traza que se encuentra a una profundidad de 1844 m. Utilizamos la traza más próxima debido a que el tope de Quintuco está dentro del intervalo de checkshot. Para la base de Vaca Muerta (a 2.780 m desde GL) se utilizó un promedio de los espectros de las trazas correspondientes a las profundidades 2765 m, 2780 m y 2805 m respectivamente. De esta manera, intentamos compensar si en algunos de los 3 niveles hay alguna diferencia de acople de la herramienta.

Los espectros correspondientes se muestran a continuación en la figura 9, y el cociente espectral de los mismos en la figura 10.

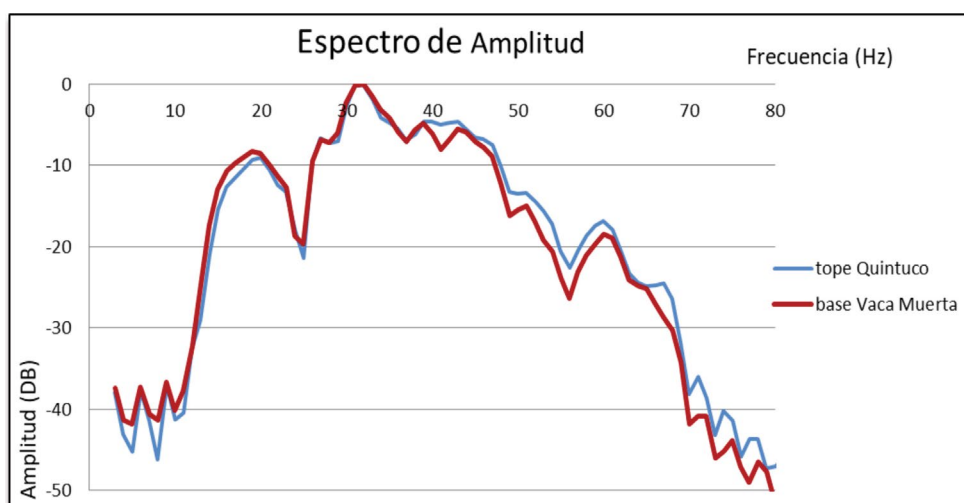


Figura 9. Espectros de amplitud

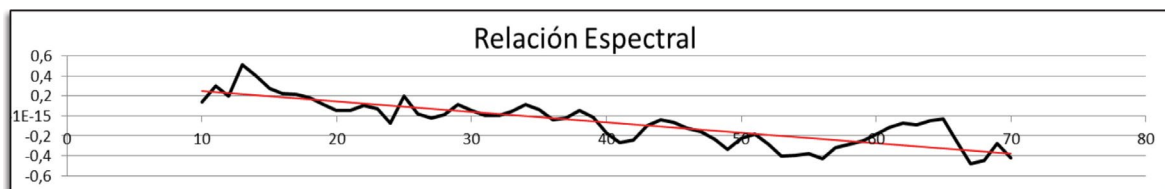


Figura 10. Relación espectral

Para un rango de frecuencias de 10 – 70 Hz se obtuvo un valor de Factor  $Q_p = 61$ .

## Procesamiento Onda S

El esquema de procesamiento de la onda S, que resulta más complejo que la onda P, se puede observar a continuación en la Figura 11.

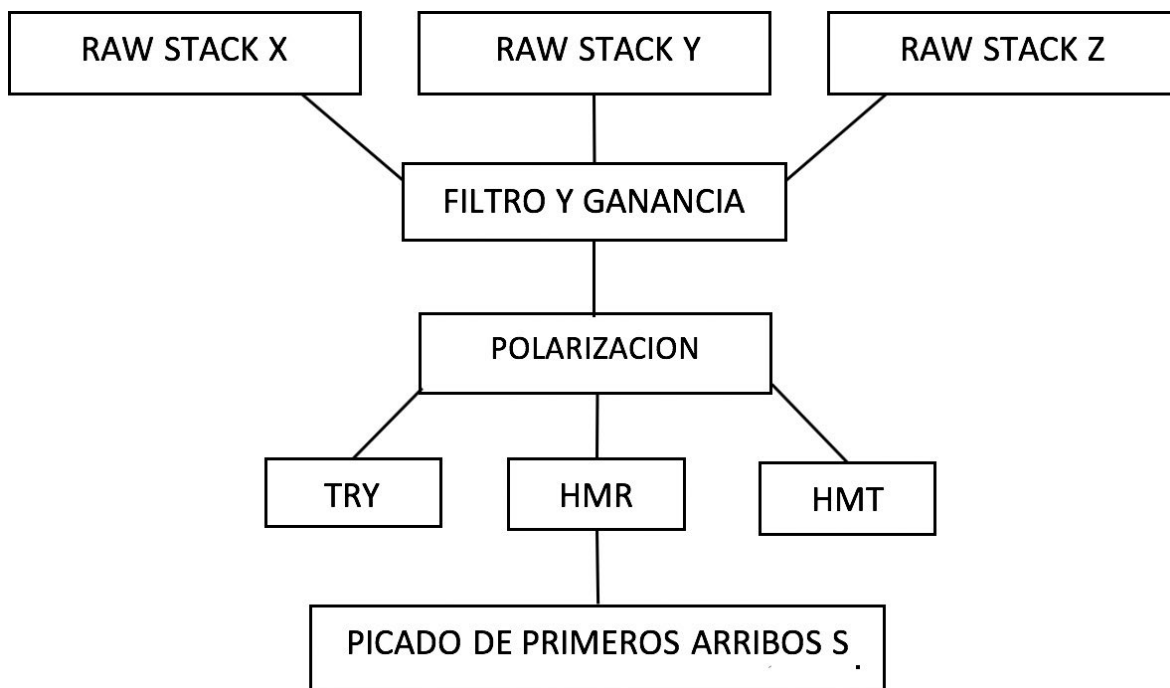


Figura 11. Esquema procesamiento onda S (Santiváñez R. 2008)

Inicialmente se aplica un filtro y una ganancia a las componentes X e Y. El filtro, al igual que la onda P, se aplica para eliminar las frecuencias espurias que pueden estar mezcladas con la señal y la corrección de ganancia se realiza para compensar el decaimiento de amplitudes por divergencia esférica.

Se aplicó un filtro Butterworth de orden 3, fase cero y ancho de banda 12-50 Hz. El ancho de banda es menor que para las ondas P y esto está justificado porque se espera una mayor atenuación de las altas frecuencias para las ondas S.



Las componentes X e Y con Filtro y ganancia se muestran en las figuras 12 y 13.

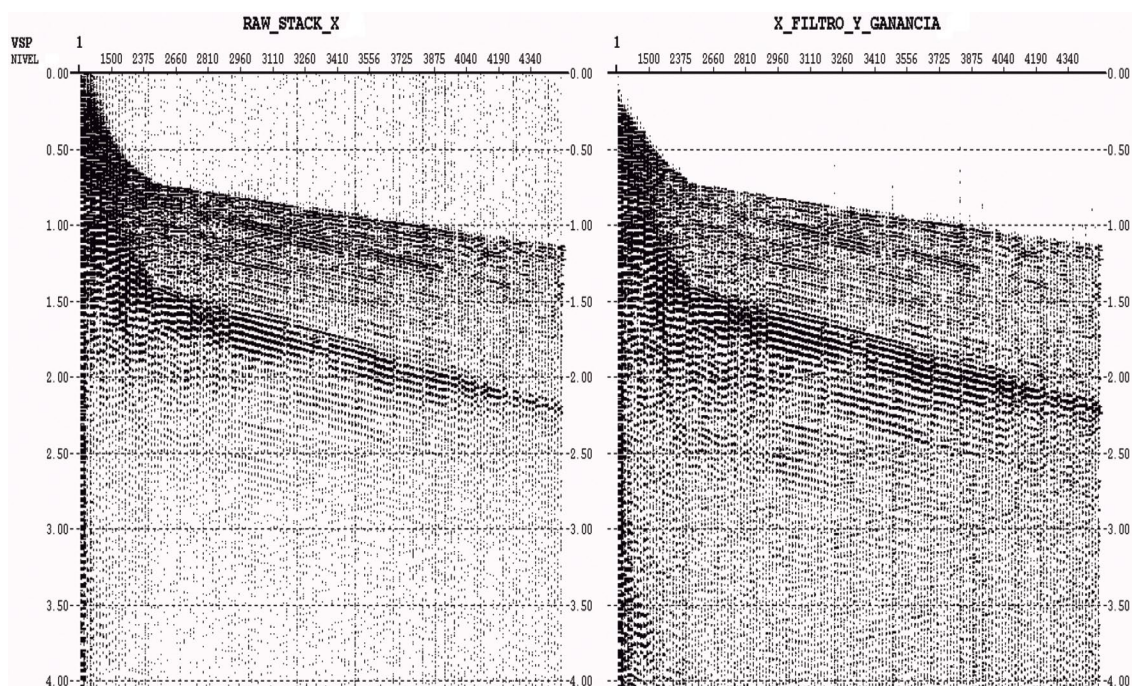


Figura 12. Componente X con filtro y ganancia

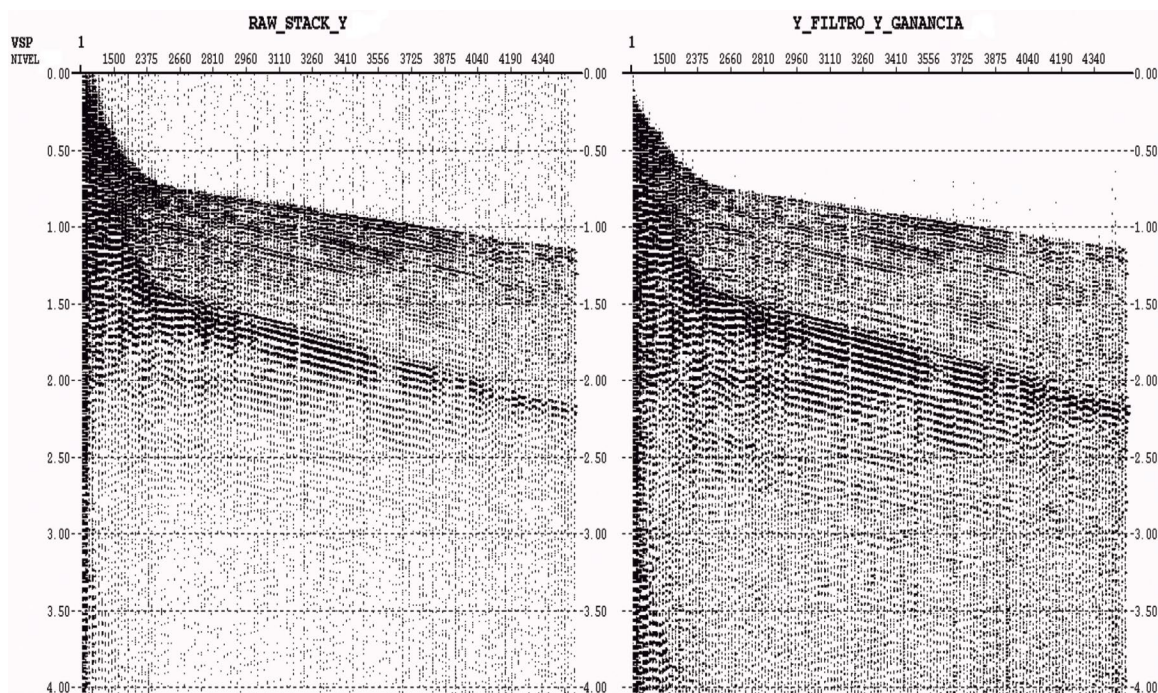


Figura 13. Componente Y con filtro y ganancia

Para analizar y correlacionar señales registradas en las componentes horizontales, éstas deben estar correctamente orientadas a ejes de referencia fijos. Pero la herramienta rota y orienta las componentes horizontales en forma aleatoria entre nivel y nivel debido a variaciones en la forma de la sección del pozo y la tensión del cable que la sostiene.

Procedemos entonces a realizar un análisis de polarización sobre las 3 componentes de nuestro dato con el fin de realizar la rotación sobre el campo de ondas iniciales y así poder obtener los nuevos ejes de referencia fijos: dos en el plano horizontal, HMR (componente Máxima Radial) y HMT (componente Máxima Transversal) y una en dirección de arribo de la onda P, TRY. Observamos un esquema de los nuevos ejes en la figura 14.

Debido a que estos datos son provenientes de un Z-VSP, se puede considerar incidencia normal cuando se analiza la componente vertical Z. Es decir que, en nuestro caso, el eje de la componente Z coincide con la definición del eje TRY.

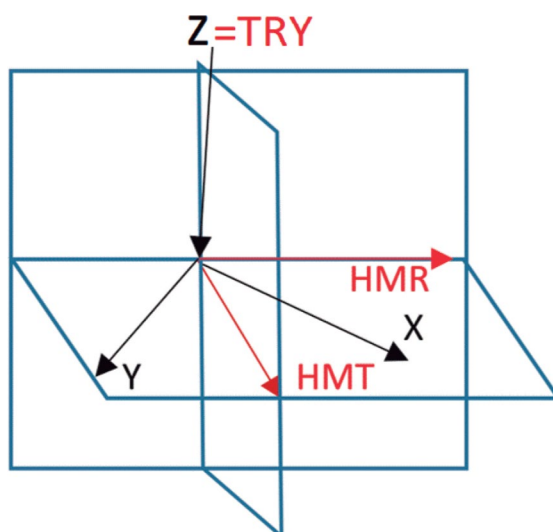


Figura 14. Ejes de referencia de la herramienta (Z, X, Y) y nuevos ejes (Z, HMR, HMT)

Una vez realizado el análisis de polarización en cada nivel, se procede a picar, sobre los nuevos ejes, los primeros arribos S.

### Polarización:

Definimos un sistema de coordenadas horizontales consistente llamado HMR - HMT usando como eje de referencia fijo la dirección de arribo de la onda P (TRY), es decir, la dirección a lo largo de los rayos que apuntan a la fuente. Se utiliza esta dirección ya que es consistente nivel a nivel.

Mediante un hodograma se grafican las amplitudes de la señal registrada en X e Y, muestra por muestra, en una ventana de tiempo corta que incluya el arribo directo compresional (Figura 15). Estos hodogramas van a proporcionar la orientación de la herramienta respecto del acimut de la fuente.

Como los registros sísmicos están siempre contaminados por ruido y múltiples, la curva resultante en el hodograma es cercana a una elipse (en vez de una línea recta), cuyo eje mayor define la dirección principal del arribo de energía en el plano (X,Y). Esta dirección HMR es calculada ajustando una recta a la nube de puntos (x(t),y(t)) mediante mínimos cuadrados (Fig. 16).

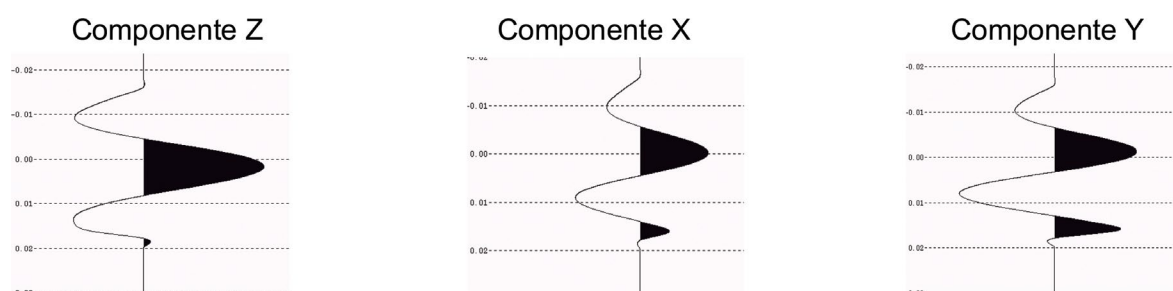


Figura 15. Ventana que contiene el primer arribo P utilizada para el análisis de polarización.

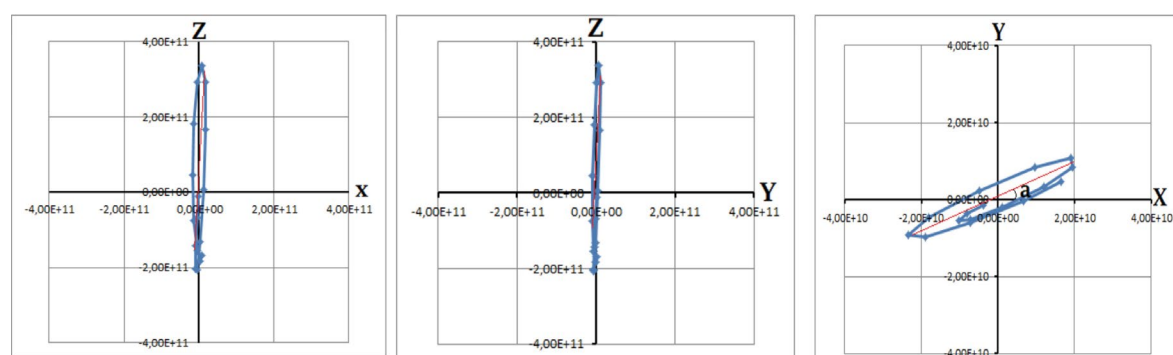


Figura 16. Hodogramas resultantes. El ángulo  $a$  indica la dirección de máxima energía.

Una vez que  $HMR$  ha sido determinada por medio de su ángulo  $a$  con el eje  $X$ , se realiza una transformación de coordenadas de la componente horizontal  $X$  a la horizontal  $HMR$ , y de la coordenada  $Y$  a la horizontal  $HMT$ , donde  $HMT$  es ortogonal a  $HMR$  en el plano  $(X,Y)$ :

$$HMR = X \cdot \cos(a) + Y \cdot \sin(a)$$

$$HMT = -X \cdot \sin(a) + Y \cdot \cos(a)$$

Esta técnica es usada para cada profundidad de receptor. Las figuras 17 y 18 muestran los registros en los nuevos ejes.



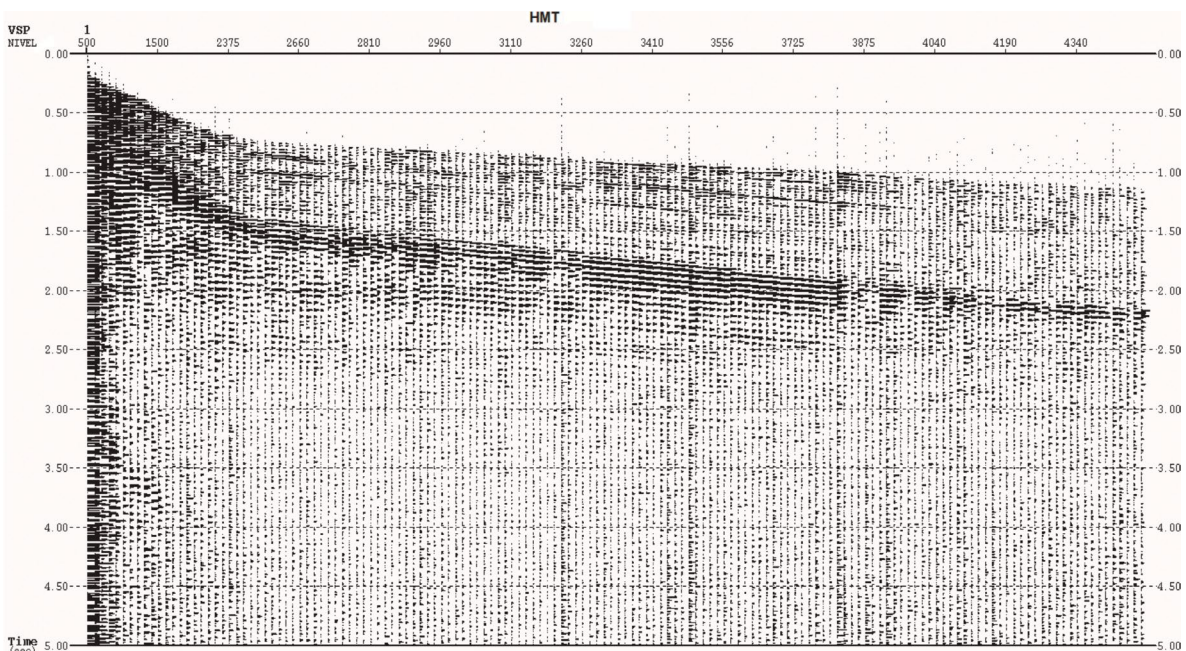


Figura 17. Eje HMT

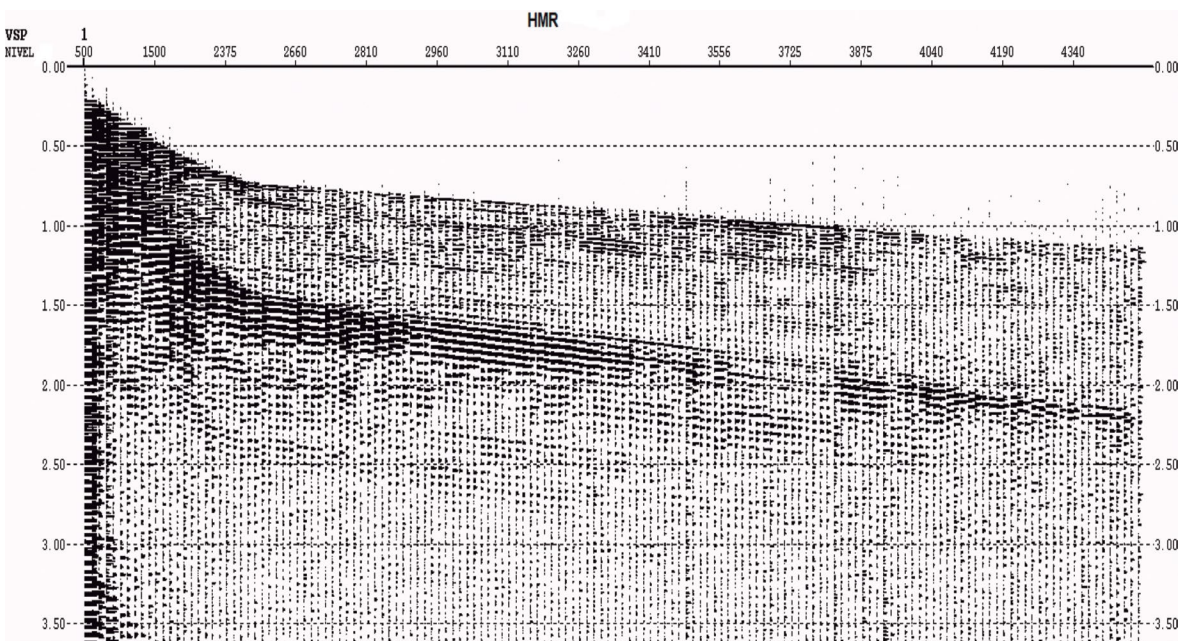


Figura 18. Eje HMR

En esta instancia lo habitual sería efectuar el picado del primer arribo de la onda S en el eje HMR, pero dado que estos ejes están orientados a partir de la dirección de los primeros arribos de las ondas P, es conveniente efectuar una segunda polarización a fin de encontrar la dirección de máxima energía de la onda S y entonces efectuar el picado definitivo. Vemos a continuación el diagrama de rotación de polarización en dirección de la onda S (Fig. 19).

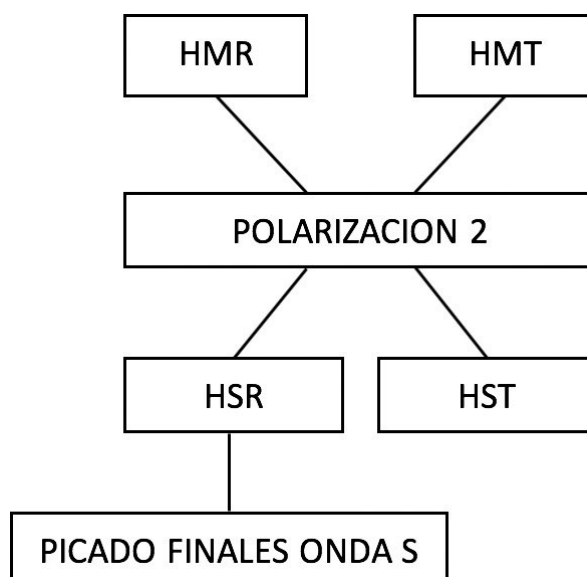


Figura 19. Diagrama de procesamiento para la polarización en dirección de la onda S, (Santivañez R. 2008).

## Polarización 2:

Se utiliza el tiempo del picado preliminar de la onda S medido en la componente HMR para definir la ventana de cálculo que se utilizará para la rotación definitiva de las ondas S. El resultado de esta rotación será una componente en la dirección de polarización de la onda S (HSR) y su transversal (HST). Estos ejes están definidos en la figura 20 y las hodógrafas resultantes en la figura 21. Esta determinación se hace para todas y cada una de las estaciones de la herramienta por fuera del paquete de procesamiento utilizado.

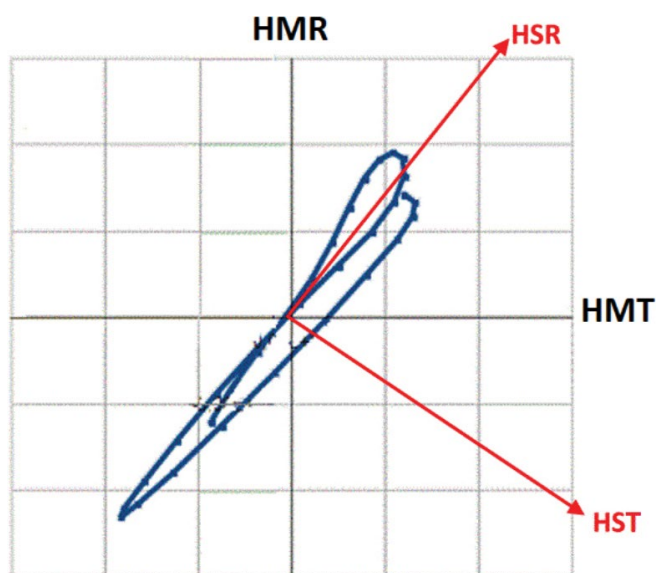


Figura 20. Rotación de ejes de acuerdo la dirección de polarización de las ondas S

En la figura 21 se puede notar el diferente grado de polarización para distintos intervalos. El intervalo Lotena-Punta Rosada es de mejor polarización en la dirección HSR. Para Quintuco – Vaca Muerta se observa una mayor componente horizontal transversal HST que en Lotena –Punta Rosada. Esto puede ser debido a una componente de ruido y la posible ocurrencia de anisotropía HTI de baja intensidad, y que en la ventana de análisis se superpondrían un tren de ondas S rápido con uno transversal lento, con poca separación en tiempo.

Los resultados de la segunda polarización, es decir, de las nuevas componentes HSR y HST se muestran a continuación en las figuras 22 y 23.

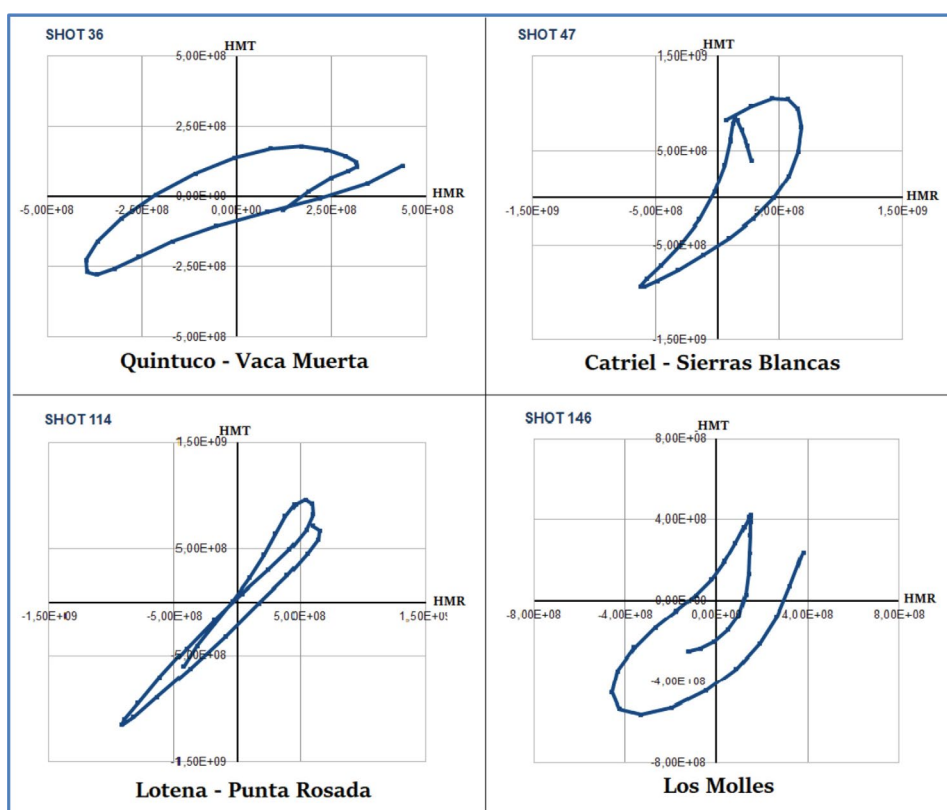


Figura 21. Hodógrafas ejemplo de cada intervalo

El eje HSR debería contener toda la onda S y no debería haber amplitudes significativas en la componente normal de la onda S (HST) a menos que el medio sea anisótropo.

Con este campo horizontal Radial de la onda S (HSR) podría picarse los tiempos con mejor precisión y estimar  $Q(S)$ .

La presencia de energía S en la componente transversal podría ser indicio de capas no perfectamente elásticas o que presentan anisotropía de eje de simetría horizontal (HTI).



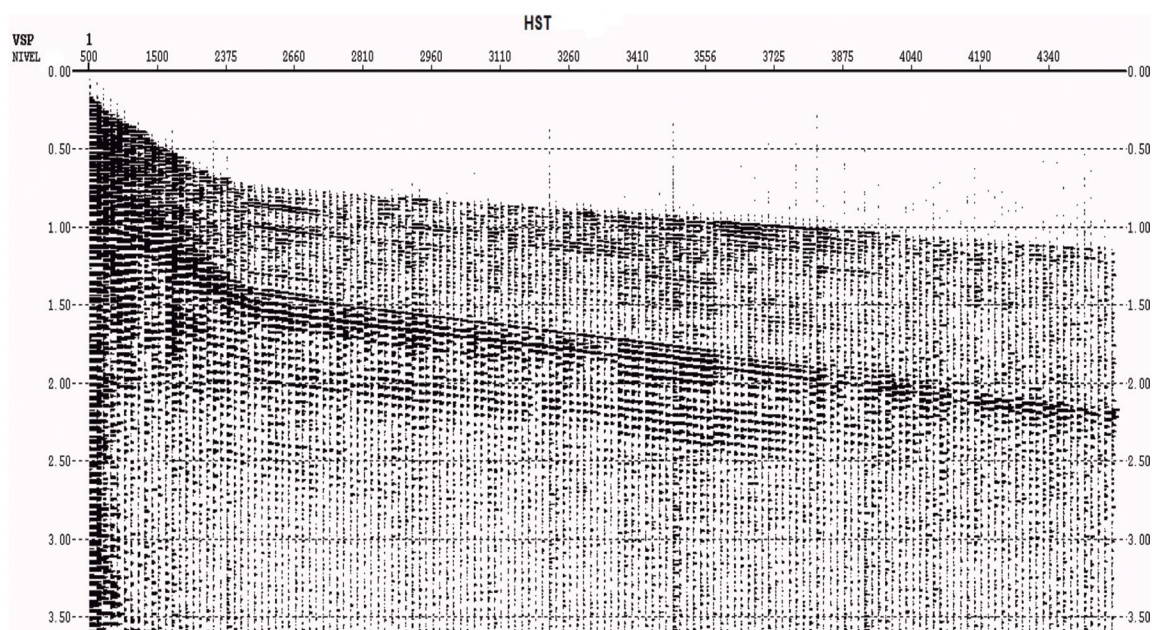


Figura 22. Componente HST

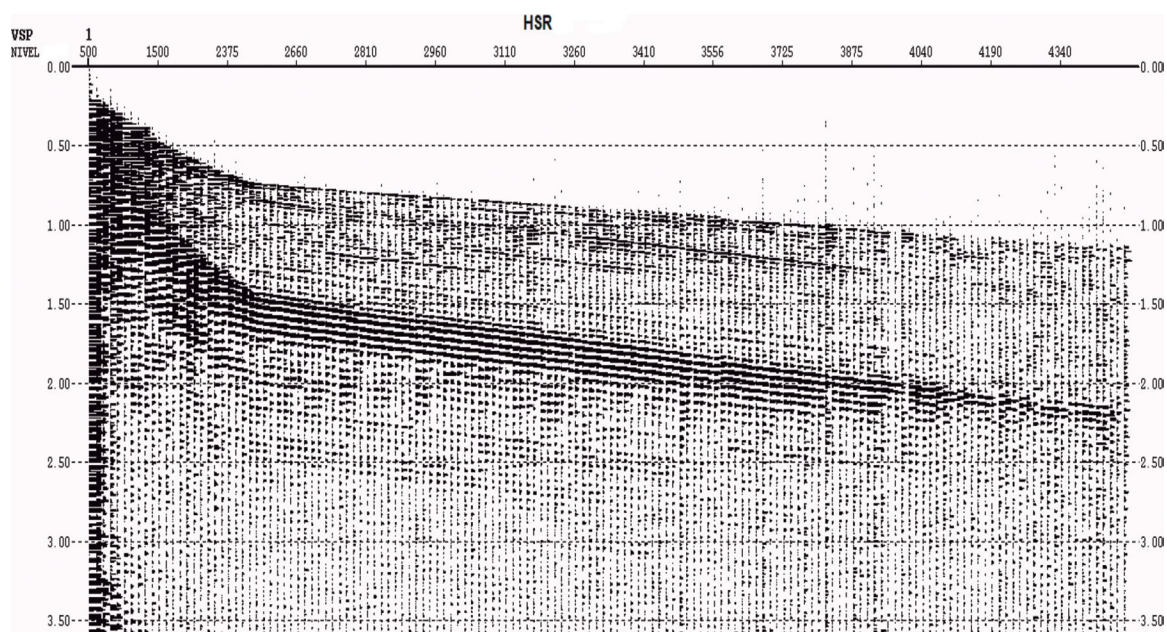


Figura 23. Componente HSR

Sobre la componente HSR se realizan los picados finales de la onda S. Esto se muestra en la figura 24.



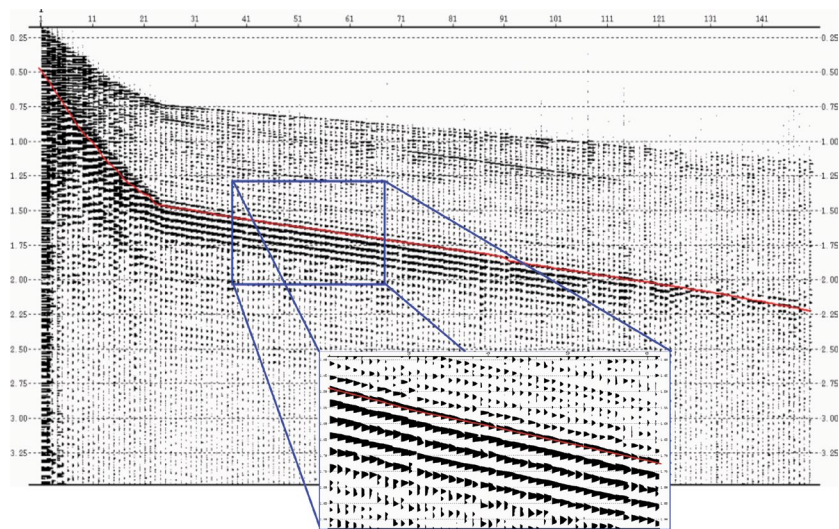


Figura 24. Picados de onda S finales

### Calculo Factor $Q_s$

Dada la relativa baja amplitud de las ondas S debe cuidarse el nivel de ruido. Por eso es que el valor de  $Q$  se calculó dentro del intervalo de VSP, quedando el nivel más somero dentro de Quintuco, y el nivel profundo en Vaca- Muerta.

El primer paso del cálculo fue aplicarle a la componente HSR un filtro de mediana de 7 niveles para obtener el campo de ondas descendentes S (Fig. 25). Luego se seleccionó una

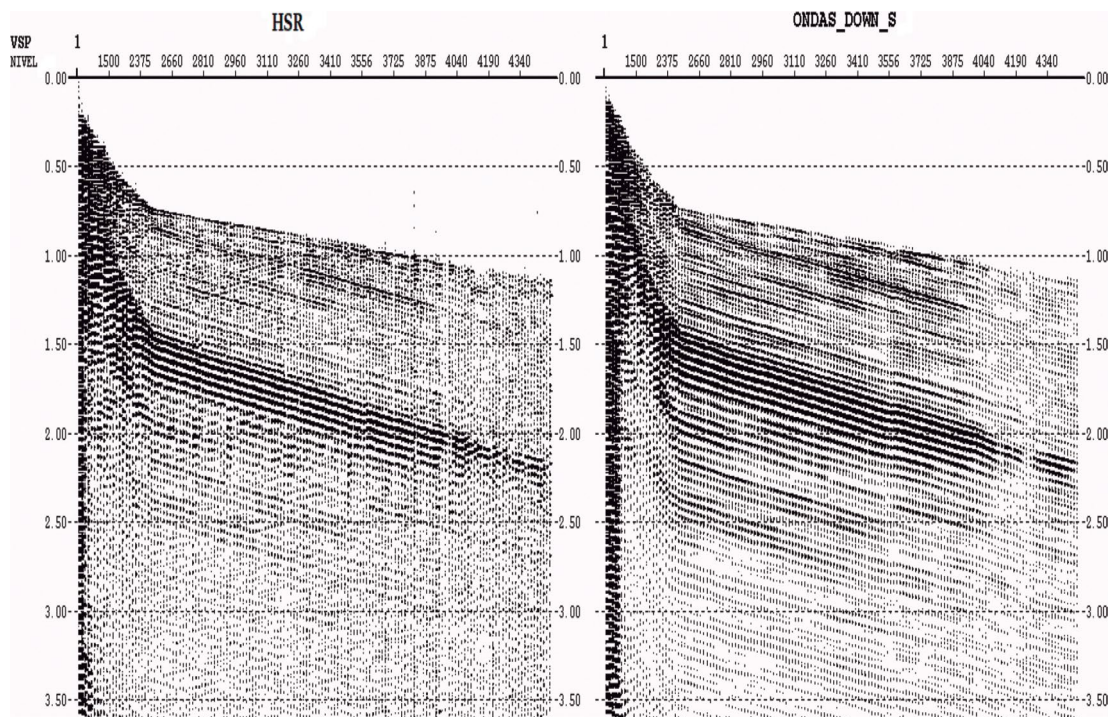


Figura 25. Campo de ondas descendentes S

ventana de 300 ms para realizar el cálculo (Fig. 26). La misma se diseña para que contenga múltiples de corto período, ya que de esta manera se obtiene un espectro de amplitud mejor muestreado.

Para la Fm. Quintuco se usó la primera traza del VSP, que corresponde a una profundidad de 2555,02 m. Para el cálculo se realizó un promedio de los espectros correspondientes a las trazas de profundidades 2555,02 y 2570,01 m. Para la base de Vaca Muerta (a 2781 m desde GL) se utilizó un promedio de los espectros de las trazas correspondientes a las profundidades 2765 m, 2780 m y 2805 m respectivamente.

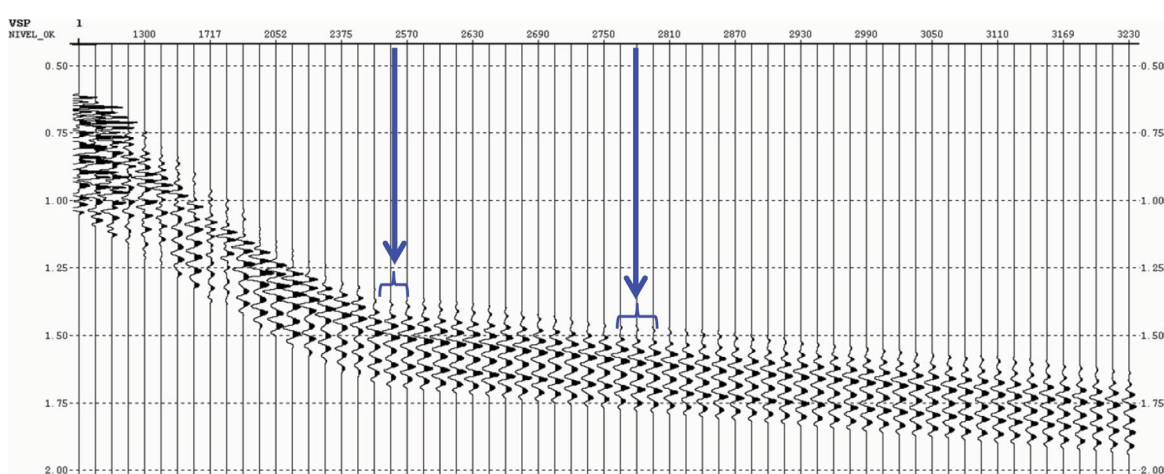


Figura 26. Ventana de datos utilizada para el cálculo  $Q_s$

A continuación vemos los espectros de amplitud correspondientes y la relación espectral obtenida (Figs. 27 y 28).

Para un rango de frecuencias de 13 – 43 Hz se obtuvo un valor de Factor  $Q_s = 37$ .

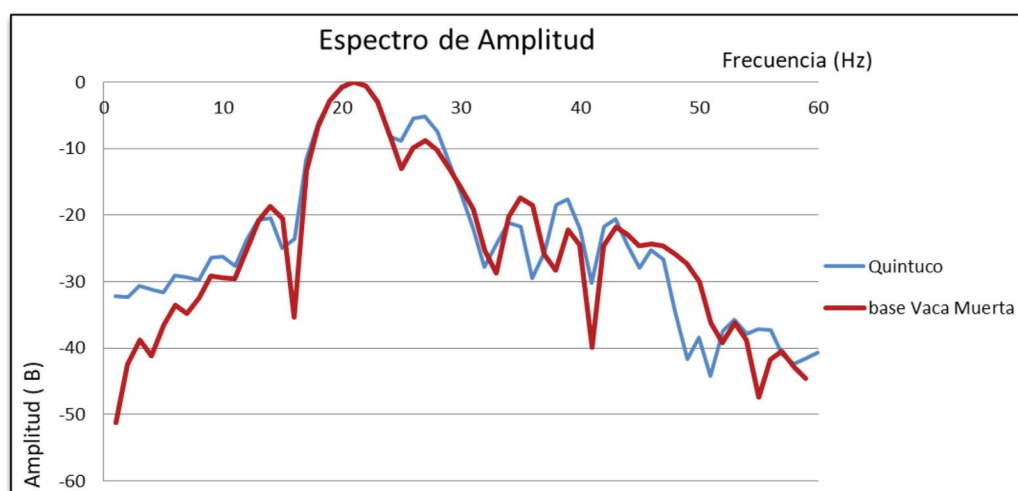


Figura 27. Espectros de amplitud



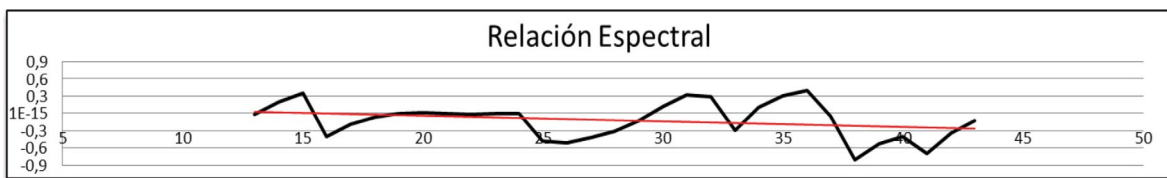


Figura 28. Relación espectral obtenida

## RESULTADOS

Fue posible estimar las velocidades intervállicas P y S y calcular, a partir de ellas, la relación  $V_p/V_s$  y el Modulo de Poisson cuya expresión en función de las velocidades es:

$$\nu = \frac{1}{2} \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{(V_p^2 - V_s^2)}$$

Otro parámetro importante es el valor de Q obtenido para las ondas P y las S. Vcuyos resultados pueden verse en las figuras siguientes:

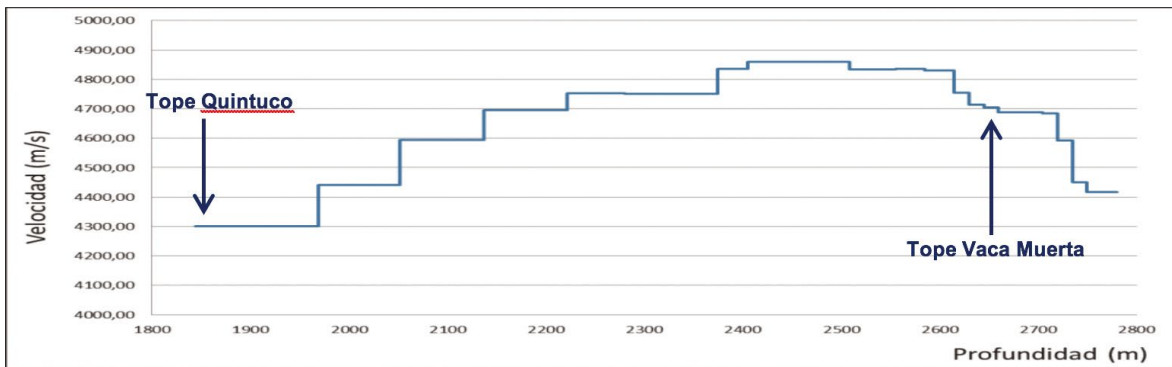


Figura 29. Velocidad intervállica onda P en el intervalo Quintuco - Vaca Muerta

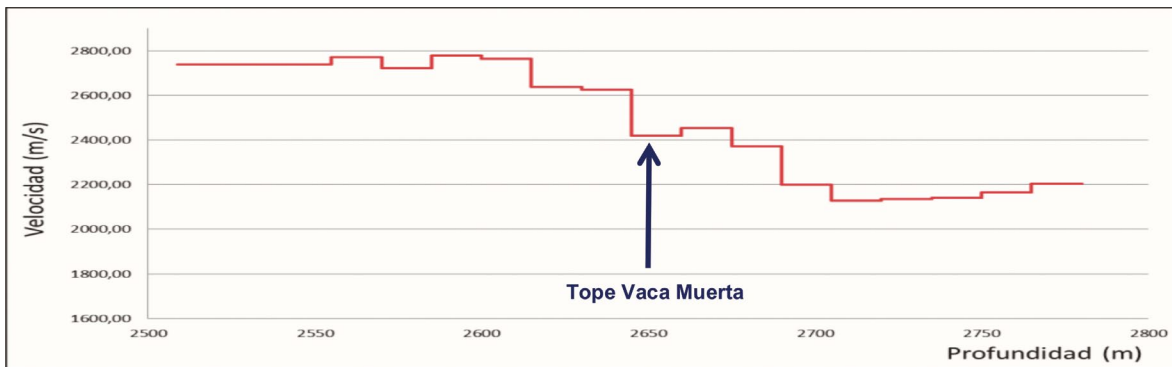


Figura 30. Velocidad intervállica onda S dentro de la zona de VSP en el intervalo Quintuco-V.M

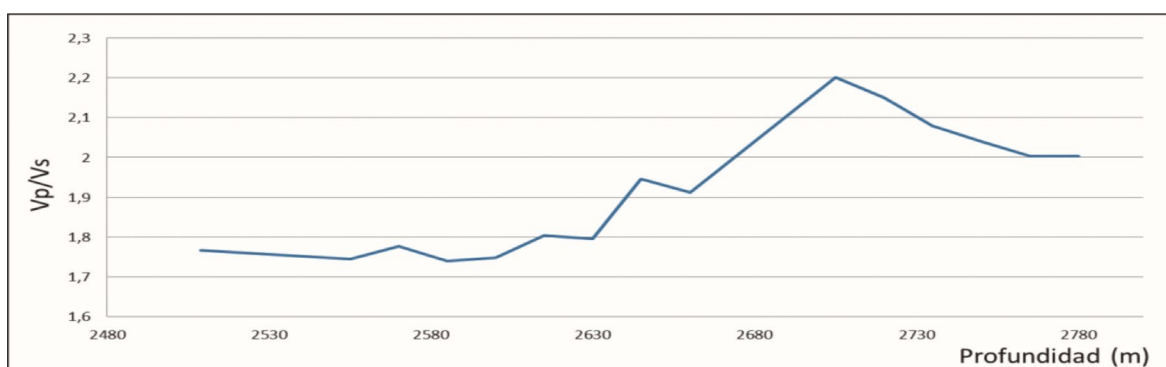


Figura 31. Relación Vp/vs

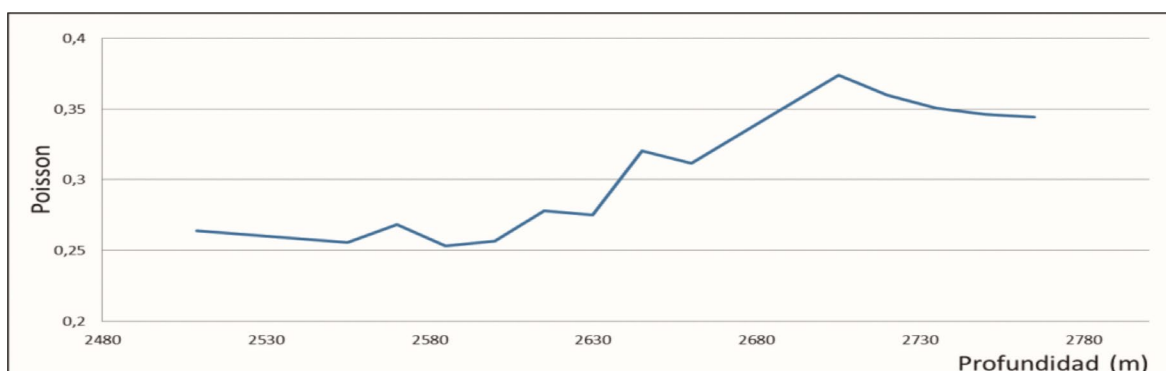


Figura 32. Relación de Poisson

Los valores de  $Q_p$  y  $Q_s$  para el intervalo de estudio resultaron:  $Q_p=61$  y  $Q_s=37$

## CONCLUSIONES

- Se ha podido determinar la velocidad de la onda P en todo el intervalo Quintuco -Vaca Muerta. Esto ha sido posible gracias a que el dato pudo ser trabajado de manera correcta en todo el intervalo y a la calidad del dato de ondas P.
- La velocidad de ondas S se pudo identificar dentro del intervalo de VSP porque es necesario separar adecuadamente este tipo de ondas. Se logró una buena estimación dentro del intervalo Quintuco - Vaca Muerta, entre los 2508 m y 2780 m.
- La conversión/generación de ondas P a S se encuentra en una zona cercana a la superficie. Podría deberse a la capa meteorizada que por lo general es inelástica y/o al Vibroseis utilizado en el relevamiento.
- Luego de la segunda polarización, la presencia de energía en el eje de mínima energía HST podría evidenciar un intervalo anisotrópico. No pudo analizarse este comportamiento porque el tren de ondas S estudiado es muy ancho y presenta un tren de múltiples largo, produciendo una probable superposición de los dos trenes de onda.

La estimación de la velocidad de las ondas S ( $V_s$ ) resulta de gran importancia, porque junto con la velocidad compresional ( $V_p$ ), permite estimar, en el intervalo de VSP, la relación  $V_p/V_s$ , el módulo de Poisson (estas relaciones son marcadamente diferentes en Vaca Muerta, quedando en evidencia las distintas propiedades de cada intervalo), y los factores de atenuación  $Q_p$  y  $Q_s$ , permitiendo caracterizar mejor el intervalo de estudio.

- Los valores de factor  $Q_p$  para el intervalo de Quintuco – Vaca Muerta fue de 61, siendo éste un valor esperable para la zona de estudio.
- El factor  $Q_s$  ha sido determinado para los niveles del intervalo Quintuco – Vaca Muerta dentro de la zona de VSP. El valor fue de 37. Éste resultado, menor que el factor  $Q_p$ , es esperable ya que la atenuación de la onda S es mayor que el de la onda P, debido a que el desplazamiento transversal de la onda S es más proclive a las pérdidas por fricción.

## AGRADECIMIENTOS

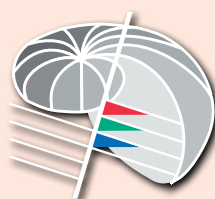
Queremos agradecer a Panamerican Energy por autorizarnos el uso de los datos que permitieron realizar este trabajo, y en especial a Luis Vernengo, quien fue el encargado de llevar a cabo las gestiones necesarias para concretarlo.

## REFERENCIAS CITADAS

- 3C Seismic and VSP: Converted waves and vector wavefield applications, 2016, Society of Exploration Geophysicists, ISBN 978-1-56080-086-6 (series), ISBN 78-1-56080-335-5 (volume).
- Aki R & Richards P. 1980. Quantitative Seismology: Theory and Methods, W.H. Freeman and Company, San Francisco, CA. 700 pp.
- Chuangdong Xu and R. Stewart, 2006, Estimating seismic attenuation ( $Q$ ) from VSP data and  $Q_p$  versus  $V_p/V_s$ , SEG Technical Program Expanded Abstracts, 1938-1942.
- Da Silva A., R. M. Miságia and M. Rofrigues Ceia, 2013,  $Q$  Factor estimation from surface and VSP seismic data: A Numerical Modeling Study, Revista Brasileira de Geofísica (2013) 31(4): 683-697.
- Santiváñez R., 2008, Tesis de Grado en Geofísica "Análisis del campo de ondas S convertidas, en un Perfil Sísmico Vertical (VSP), FCAG-UNLP.
- Giroldi L. y Oviedo E., Corti E., Moyano B., Gaiser J. & Omana J., 2002, Well-driven seismic: The role of the VSP on a 3C-3D seismic survey in Cerro Dragón (Golfo San Jorge Basin, Argentina), V Congreso Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Mar del Plata-Argentina.
- Harris, P.E C. Kerner, and R. E. White, 1997, Multichannel estimation of frequency-dependent  $Q$  from VSP data: Geophysical Prospecting, 45, 87 – 109.
- Leaney, S., 1999, Walkaway  $Q$  inversion: 69th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 1311- 1314.
- Stewart R., J. Gaiser, J. Brown, and Lawton D., 2003, Tutorial converted wave seismic exploration: Applications. Geophysics, 68(1):40-57.



- Schlumberger, Fundamentos de la tecnología de sísmica de Pozo, ISBN 978-1-937949-00-6.
- Zhao Z., Zhou R., Li Y., Janak P., and Dushman D., 2005, Shear waves from near-offset VSP survey and applications, SEG Technical Program Expanded Abstracts 2005: pp. 2629-2632.
- Yang L., Qinghong Z., Leiyang B., and Xiucheng W., 2007, Pure S-waves in land P-wave source VSP data, APPLIED GEOPHYSICS, Vol. 4 No.3 (September 2007), P. 173 – 182.
- Sheriff, R.E., 1991. Encyclopedic Dictionary of Exploration Geo- 414 physics, 3rd ed. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, 415 OK.



**10° CONGRESO DE  
EXPLORACIÓN Y  
DESARROLLO DE  
HIDROCARBUROS**

**Energía y Sociedad  
aliados inseparables  
Mendoza 2018**