

Laboratorio de Sísmica y Sismología - Informe 2^a)Daniel Felipe Forero Sánchez^{1, b)}

201415069

(Dated: 2 de abril de 2016)

El presente informe muestra en detalle el trabajo desarrollado para solucionar el segundo taller del Laboratorio de Sísmica y Sismología. Se tomaron distintos archivos SEG Y (.sgy) y se picaron para todos ellos los primeros arribos usando el software Geogiga, cuyos resultados fueron analizados mediante el desarrollo de un programa en Python con el que se calcularon para cada caso las cantidades v_w , v_b , y z_w usando el método apropiado según la geometría del reflector (buzante o no). En la segunda parte se calcularon distintos parámetros de la roca como v_s , K , μ , ρ y ν usando modelos que permiten aproximar el valor de v_s y ρ necesarios para calcular los demás tanto en un simple modelo de capas como en una tomografía de refracción.

Keywords: Bulk modulus, Shear modulus, Coeficiente de Poisson, velocidades de onda, tomografía de refracción, *shot*, *countershot*

I. INTRODUCCIÓN

En un registro sísmico es posible identificar las formas de los distintos tipos de onda que son fácilmente registrados como lo son la onda directa, las refracciones y las reflexiones. Al ver las distintas expresiones para estos tipos de onda podemos deducir qué tipos de onda se obtendrán.

$$t_d = \frac{x}{v_w} \quad (1)$$

$$t_r = \frac{x}{v_b} + 2h\sqrt{\frac{1}{v_w^2} - \frac{1}{v_b^2}} \quad (2)$$

$$t_R = \frac{1}{v_w}\sqrt{x^2 + 4h^2} \quad (3)$$

Podemos ver que la onda directa (eq 1) es una recta que corta el eje en $t = \tau_d = 0$, la onda reflejada (eq 3) es una hipérbola y la onda refractada (eq 2) es una recta que corta el eje en $t = \tau_r = 2h_0\sqrt{\frac{1}{v_w^2} - \frac{1}{v_b^2}} \neq 0$, razón por la cual veremos que en el sismograma se verán formas como las que se muestran en la figura 1.

Existe una distancia denominada *crossover distance* y denotada por nosotros como x_c (x_d en la figura 1), antes de la cual el primer arribo corresponde a la onda directa y después de la cual corresponde a la onda refractada.

Al conocer x_c es posible conocer la pendiente de las dos rectas que intersectan en dicha abscisa. Dichas pendientes (m_w para $|x| < x_c$, m_b para $|x| > x_c$) corresponden a los inversos de las velocidades de onda P (v_w para la capa meteorizada y v_b para la capa base).

$$m_w = \frac{1}{v_w} \quad (4)$$

$$m_b = \frac{1}{v_b} \quad (5)$$

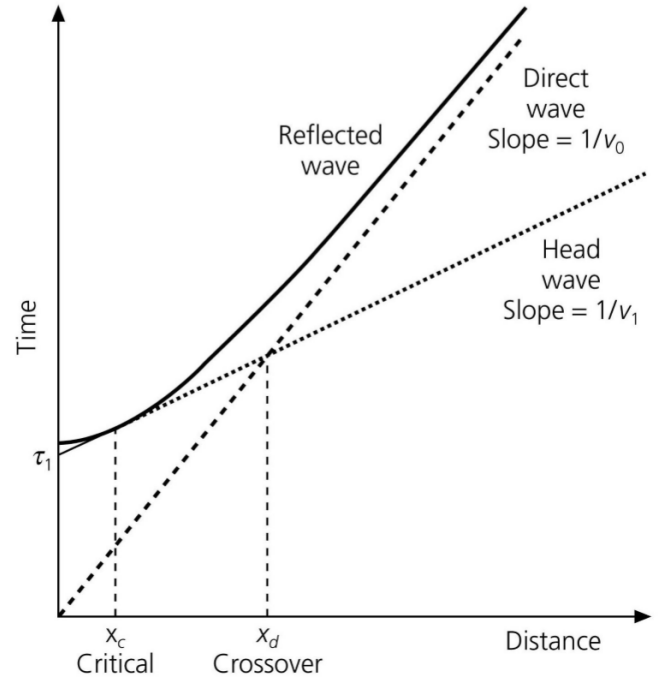


Figura 1. Se muestran los tres tipos de ondas principales como se ven recibidas en un cierto arreglo¹.

Para capas no buzantes se toman las velocidades de onda obtenidas y se calcula el espesor de la capa meteorizada mediante:

$$Z_w = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{v_b - v_w}{v_b + v_w}}x_c \quad (6)$$

Para capas buzantes con ángulo φ (bajo la horizontal medido desde la fuente) se tienen generalmente dos *shots* desde extremos opuestos del arreglo, de forma que hay dos gráficas Offset vs. Tiempo en distintos marcos de referencia. Se calculan las cantidades v_b^- , x_c^- y t_i^- del *shot* y v_b^+ , x_c^+ y t_i^+ del *countershot*, donde t_i^\pm corresponde al intercepto de la recta t_r^\pm con el eje t del marco de referencia propio de la posición de la fuente.

^{a)}Segundo informe del Laboratorio de Sísmica y Sismología

^{b)}Departamento de Geociencias/Departamento de Física, Universidad de Los Andes; Electronic mail: df.forero10@uniandes.edu.co

En general, se tratará con índice $-$ a las cantidades medidas en el marco de referencia del *shot* y con $+$ a las medidas en el marco de referencia del *countershot*. Lo anterior se ve mejor ilustrado en la imagen 2.

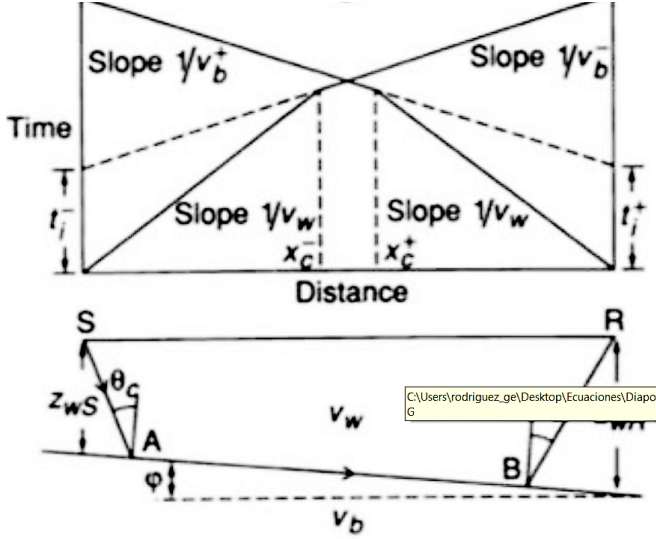


Figura 2. Se muestra el diagrama² con las distintas variables manejadas.

Todo lo anterior para lograr definir las relaciones a utilizar en el caso de un reflector buzante:

$$\varphi = \frac{1}{2} \left[\arcsin \frac{v_w}{v_b} - \arcsin \frac{v_w}{v_b} \right] \quad (7)$$

$$v_b = \frac{2 \cos \varphi}{\frac{1}{v_b} + \frac{1}{v_b}} \quad (8)$$

$$Z_w^\pm = \frac{v_b v_w t_i^\pm}{2 \cos \varphi \sqrt{v_b^2 - v_w^2}} \quad (9)$$

Por otro lado, las velocidades de onda se encuentran relacionadas en cierta medida, por lo cual, siendo conocida la velocidad de onda P, es posible calcular la velocidad de onda S usando, por ejemplo, la compilación de Brocher (eq 10):

$$v_S(km/s) = 0,7858 - 1,2344v_P + 0,7949v_P^2 - 0,1238v_P^3 + 0,0064v_P^4 \quad (10)$$

Así mismo se usan las siguientes relaciones para encontrar los demás módulos pedidos:

$$\rho(g/cm^3) = 1,6612v_P - 0,4721v_P^2 + 0,0671v_P^3 - 0,0043v_P^4 + 0,000106v_P^5 \quad (11)$$

$$\mu = \rho v_S^2 \quad (12)$$

$$K = \rho \left(v_P^2 - \frac{4}{3} v_S^2 \right) \quad (13)$$

$$E = 3K(1 - 2\nu) \quad (14)$$

$$\nu = \frac{v_P^2 - 2v_S^2}{2(v_P^2 - v_S^2)} \quad (15)$$

A continuación se ha usado Python y la librería Obspy (se adjunta el código en el archivo **Taller2_Sismica.ipynb**) para graficar los registros sísmicos ubicando cada traza en su respectiva coordenada x evitando así que el registro se vea distorsionado como se ve en Seisec (que grafica las trazas uniformemente espaciadas sin importar sus coordenadas).

1. Array1_SP01

Para el primer arreglo se tiene una capa no buzante, por lo cual se hace solo un *shot*. En general es un registro sin mucho ruido al lado izquierdo de la fuente pero con más al lado derecho. En la figura 3 se ve el ruido encerrado en un rectángulo cian. En verde se encierra parte de la onda superficial (*ground roll*), caracterizado por su amplitud notablemente mayor al de los primeros arribos. En rojo se identifica la recta correspondiente a la onda directa y en azul la onda refractada (este par de rectas han sido extraídas de la figura 10 y superpuestas en el registro, por lo tanto puede ser más claro verlas en dicha imagen).

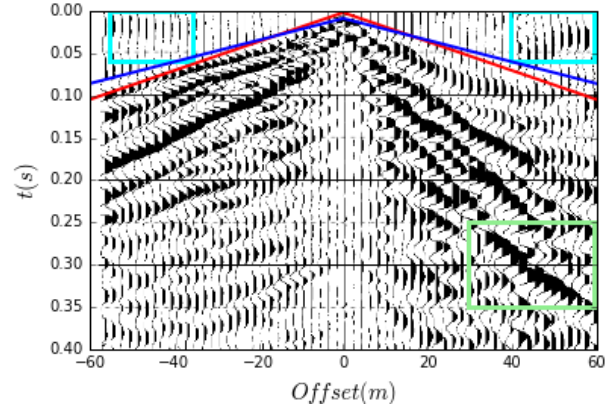


Figura 3. Se ve el registro sísmico para el primer arreglo (extraído de Seisec)

2. Array2_SP01

El segundo arreglo se extiende sobre una capa buzante con ángulo φ , este registro es el obtenido del *shot*. En general es un registro bastante limpio casi que sin ruido. Se utilizan las mismas convenciones de color antes vistas. Nótese que en la figura 4 las rectas (tomadas de la figura 12) coinciden con un arribo en específico y es posible seguir dicho arribo a lo largo de todo el arreglo.

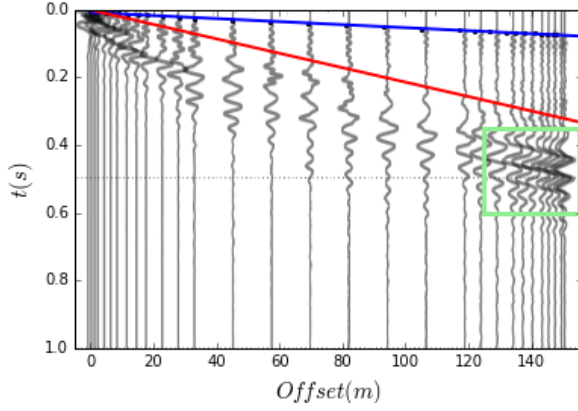


Figura 4. Registro sísmico para el *shot* en el segundo arreglo (graficado en Obspy).

3. Array2_SP02

Este registro muestra el *countershot* en el segundo arreglo. Es igualmente limpio al anteriormente descrito y maneja la misma convención de colores. El registro se muestra en la figura 5.

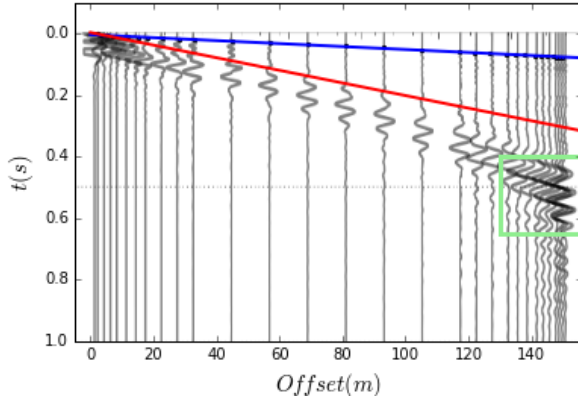


Figura 5. Registro sísmico para el *countershot* del segundo arreglo (graficado en Obspy).

4. Array3_SP01

Este registro muestra el *shot* hecho en el arreglo 3 sobre una capa buzante con ángulo φ . Es un registro que presenta bastante ruido (al verse esn Seisee) hacia el final del arreglo, pero al se graficado con Obspy (donde se grafican unicamente las 38 trazas que pudieron ser picadas) no se alcanza a ver este ruido. Se muestra el registro en la figura 6, donde se aumento el *gain* para observar fácilmente los primeros arribos. Como en registros anteriores se ve que las rectas siguen un arribo a lo largo de todo el

registro.

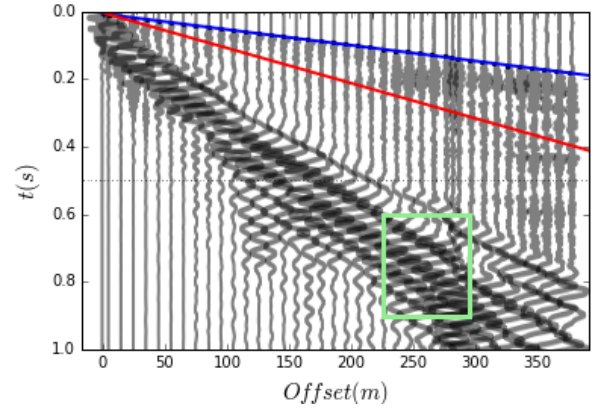


Figura 6. Registro obtenido en tercer arreglo (graficado en Obspy).

5. Array3_SP31

Este registro muestra el *countershot* del arreglo 3. Es un registro limpio, no se ve mucho ruido. En el recuadro verde, una porción del *ground roll*.

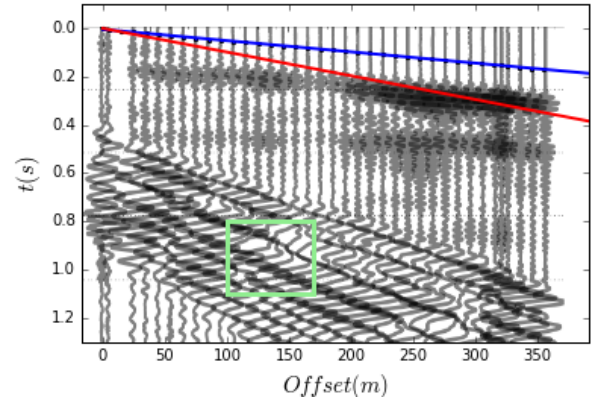


Figura 7. Registro del *countershot* del arreglo3 (graficado en Obspy).

6. Array3_SP15

Este registro se obtiene al poner la fuente en el centro del arreglo. Es un registro bastante limpio, pero no muestra las trazas más cercanas a la fuente, por lo que fue inútil para calcular velocidades de onda, ya se profundizará en esto (los detalles en el código). En la gráfica 8 se ve solo onda refractada, dado que la ausencia de datos cercanos a la fuente hace que no sea posible identificar la

onda directa. Las ondas de gran amplitud encerradas en verde son las superficiales.

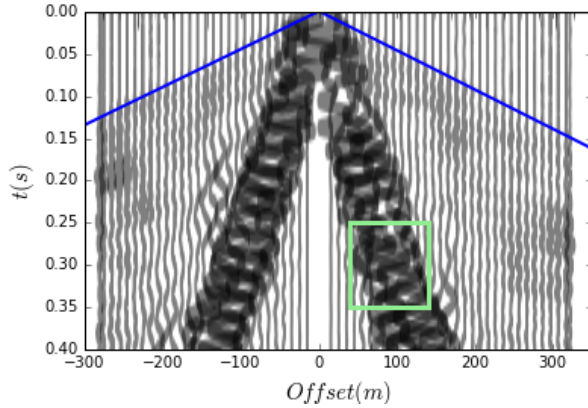


Figura 8. Tercer registro obtenido del tercer arreglo (graficado en Obspy). Se graficó solo una pequeña parte para que la recta se viera mejor.

II. PROCEDIMIENTO

A. Parte Uno

1. Se tomó cada registro sísmico y, con ayuda del software Geogiga, se picaron los primeros arribos con la mayor precisión posible, el tiempo de cada arribo es guardado en un archivo TXT.
2. Dichos arribos son contrastados con las distancias al origen calculadas según los datos entregados en el archivo Taller2.Coordenadas.xlsx; obteniendo un gráfico Offset (x) vs. Tiempo (t).
3. Se buscan entonces cambios en la pendiente de la gráfica resultante; de manera que se logre encontrar la distancia x_c .
4. Conocido x_c se hace una regresión lineal a ambas rectas (antes y después de x_c), para así extraer las velocidades de onda de las capas y el espesor de la capa meteorizada según las relaciones antes expuestas.
5. También es posible, con ese análisis, calcular el ángulo de buzamiento del reflector, de ser necesario.

B. Parte Dos

1. Dados valores de velocidad de onda P (v_P) se calculan los valores de velocidad de onda S (v_S), densidad (ρ), *shear modulus* (μ), *bulk modulus* (K) y coeficiente de Poisson (ν).

2. Con ayuda del software Surfer y de la grilla de v_P provista se calculan grillas para v_S , ρ y los distintos módulos elásticos, obteniendo así las distintas tomografías sísmicas.

III. RESULTADOS

A. Parte Uno

1. Array1_SP01

El primer arreglo se hace sobre un reflector plano, con reflectores equidistantes finamente espaciados ($2m$). El *shot* se hace desde el punto medio donde se sitúa el origen del marco de referencia. Para los valores negativos de x se tiene un registro muy limpio, con poco ruido antes del primer arribo; mientras después, para valores de x positivos, hay un registro con mucho más ruido.

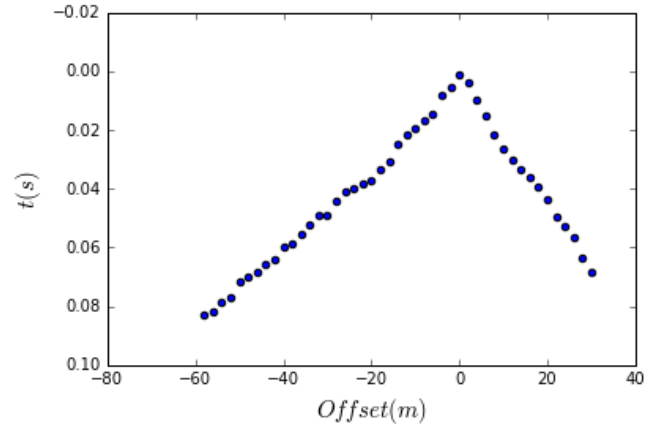


Figura 9. Se muestra el gráfico obtenido tomando los primeros arribos en el arreglo 1.

Dado que el registro de $x > 0$ tiene menos puntos, se tomó únicamente el registro de $x < 0$ para los cálculos. En este orden de ideas, una detallada observación de la figura 9 muestra que el cambio de pendiente parece estar en $x_c = -14m$. Sin embargo se probó con otro posible $x_c = -22m$ obteniendo coeficientes de correlación mejores para ambas rectas; lo cual es prueba suficiente de que x_c debe estar en $-22m$ en vez de $-14m$.

Cuadro I. Coeficientes de correlación en los x_c más probables

$x_c(m)$	r_{DW}^2	r_{RW}^2
-14	0.977	0.991
-22	0.995	0.996

Teniendo en cuenta lo mostrado en el cuadro I (donde DW denota onda directa y RW denota onda refractada)

se calculan las velocidades de onda P; los resultados son mostrados en la figura 10.

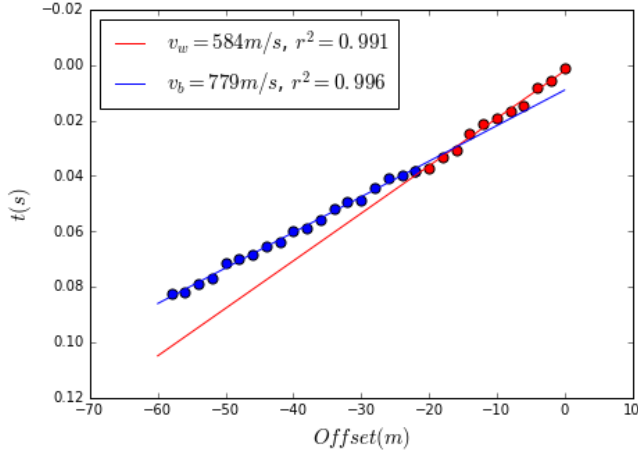


Figura 10. Cálculo de velocidades de onda P tomando $x_c = -22m$ con el respectivo coeficiente de correlación.

De los resultados obtenidos para v_w , v_b y x_c se calculó $Z_w = 4,17m$ según la relación 6.

Cuadro II. Resumen de los resultados del primer arreglo

$x_c(m)$	-22
$v_w(m/s)$	584
$v_b(m/s)$	779
$Z_w(m)$	4.17

2. Array2_SP0X

El arreglo 2 se hace sobre una capa buzante con ángulo φ . Los sensores no son colocados equidistantes sino que se toma una mayor densidad de estos en $x \approx x_0$ siendo x_0 la posición de la fuente. Dado que es una capa buzante, es necesario realizar un *shot* y *countershot*, teniendo dos marcos de referencia distintos ($-$ y $+$ respectivamente) centrados en cada una de las fuentes. El *shot* es denominado **Array2_SP01** y el *countershot* **Array2_SP02**.

Las rectas calculadas para dichos arreglos se muestran en las figuras 12 y 13 respectivamente.

Con los valores obtenidos en ambos marcos de referencia y las relaciones 7 a 9 se calculan $v_b = 2153,73m/s$, $\varphi = -0,49^\circ$, $Z_w^- = 2,05m$ y $Z_w^+ = 0,94m$. El ángulo φ es negativo, de manera que es evidente que la capa reflectora buza hacia la abscisa del *shot*, es decir, hacia el NE, lo cual es soportado por el hecho de que la distancia Z_w^- (distancia bajo la fuente del *shot*) es mayor que la distancia bajo la fuente del *countershot* (Z_w^+).

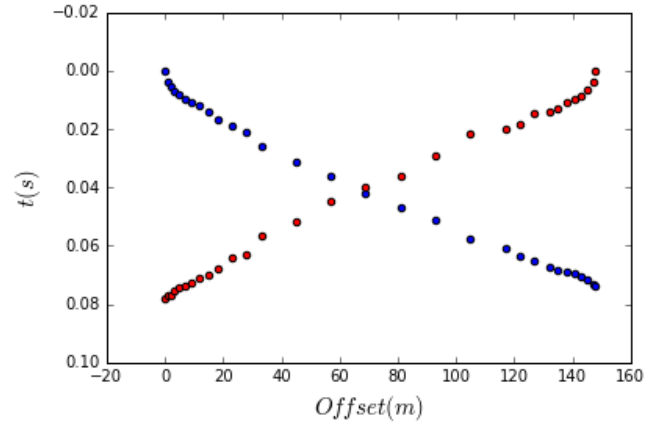


Figura 11. Se muestra el gráfico obtenido tomando los primeros arribos del arreglo 2. En color azul el *shot* y en color rojo el *countershot*.

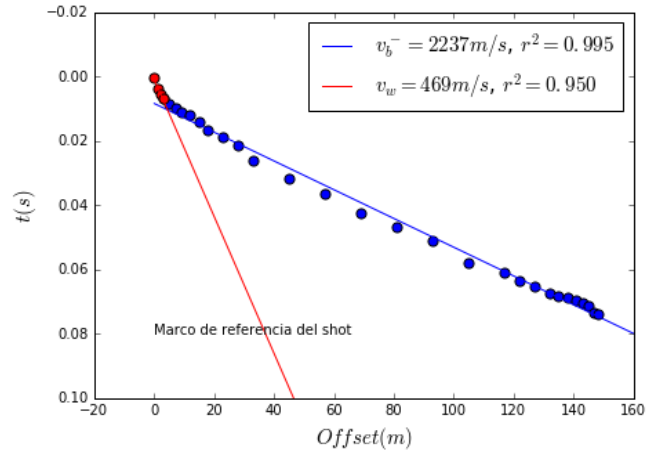


Figura 12. Cálculo de velocidades de onda P utilizando $x_c^- = 3m$.

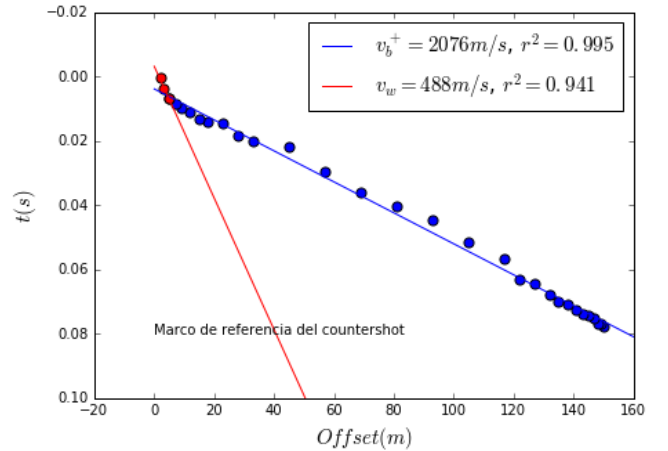


Figura 13. Cálculo de velocidades de onda P utilizando $x_c^+ = 5m$.

Cuadro III. Resumen de los resultados obtenidos para el arreglo 2

$x_c^-(m)$	3
$x_c^+(m)$	5
$v_b^-(m/s)$	2237
$v_b^+(m/s)$	2076
$v_w^-(m/s)$	469
$v_w^+(m/s)$	488
$v_w(m/s)$	478.5
$v_b(m/s)$	2153.73
$Z_w^-(m)$	2.05
$Z_w^+(m)$	0.94
$\varphi(^{\circ})$	-0.49

3. Array3_SP0XX

El arreglo 3 se hace sobre un reflector buzante con ángulo φ con un espaciamento de 5m entre los extremos y los sensores contiguos mientras el resto de sensores está espaciado 10m, por lo cual es bastante difícil que se logre ver el cambio en la pendiente. Al tratarse también de una capa buzante, se hace un *shot* y un *countershot*.

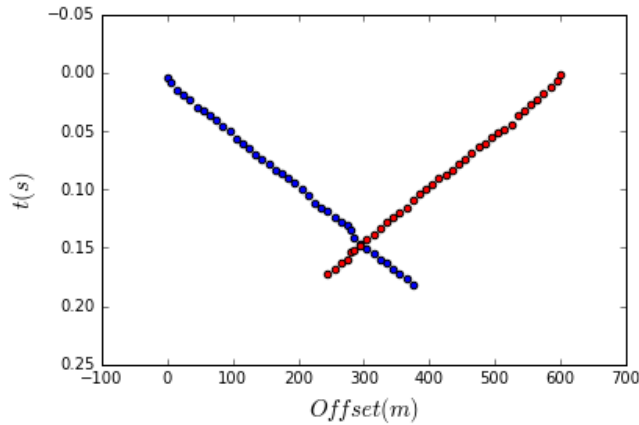
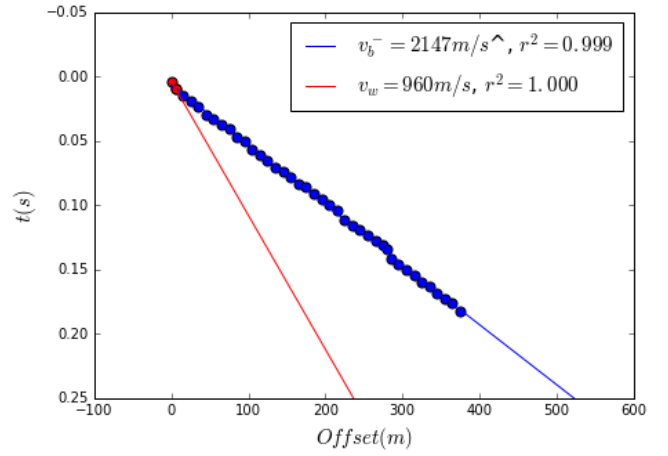
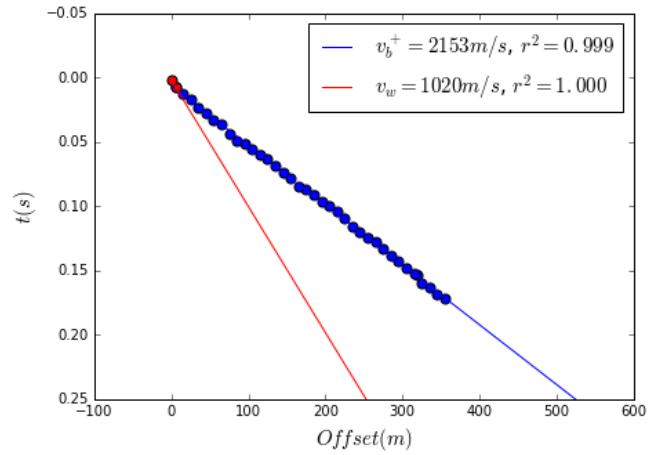


Figura 14. Se muestran los picados de primeros arribos del tercer arreglo

Los cambios de pendiente, aunque difíciles de identificar, se deben encontrar cerca a la fuente como se muestra en las figuras 15, y 16 junto con las velocidades calculadas.

Con base en los resultados recién mostrados se calculan el resto de cantidades requeridas como lo son $v_b = 2150,53m/s$, $\varphi = 0,037^{\circ}$, $Z_w^- = 3,66m$ y $Z_w^+ = 3,51m$. El ángulo de buzamiento es muy pequeño, por lo cual, aún con una separación de 600m, el espesor de la capa meteorizada bajo las fuentes es muy parecido.

Cabe mencionar que también se realizó un *shot* desde el punto medio del arreglo, pero como se muestra en las figuras 15 y 16, x_c se encuentra bastante cerca a la fuente.

Figura 15. Se muestran los valores de velocidad de onda P obtenidos para el *shot*.Figura 16. Se muestran los valores de velocidad de onda P obtenidos para el *countershot*.

Dado que en el punto medio el espaciamento es de 10m, es claro que la primera onda que registren los sensores más cercanos a este punto será ya la onda refractada y, por ende, no se encontrará un cambio de pendiente (figura 17), por lo que no es de interés este *shot*.

B. Parte Dos

1. Modelo de capas

Para las estimaciones de velocidades se tomaron los datos presentados en la tabla V.

Se hizo uso de MS Excel para calcular los valores pedidos según las relaciones 10 a 15. Para las velocidades de onda S se usó la relación de Brocher (eq 10) dado que para el basalto se supera la velocidad de onda P de 6000m/s.

Se ve una ligera diferencia entre las densidades calcu-

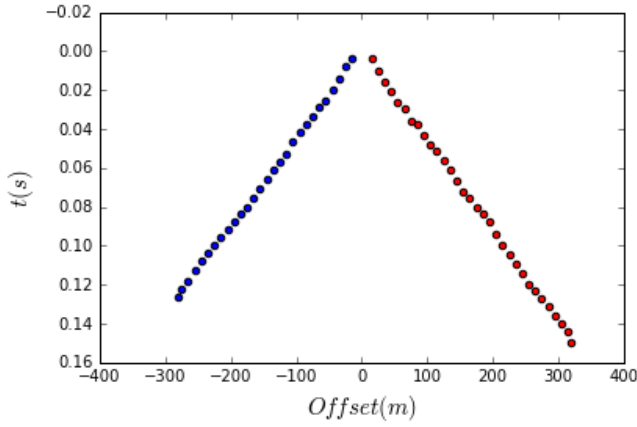


Figura 17. Picado de los arribos del *shot* hecho desde el punto medio, nótese que son rectas (sin cambios de pendiente)

Cuadro IV. Resumen de los resultados obtenidos para el arreglo 3

$x_c^-(m)$	5
$x_c^+(m)$	5
$v_b^-(m/s)$	2147
$v_b^+(m/s)$	2153
$v_w^-(m/s)$	960
$v_w^+(m/s)$	1020
$v_w(m/s)$	990
$v_b(m/s)$	2150.73
$Z_w^-(m)$	3.66
$Z_w^+(m)$	3.51
$\varphi(^{\circ})$	0.034

ladas y las dadas. Se calcula entonces el error porcentual (cuadro VII) que muestra valores bajos (nada superior al 15 %), por lo cual se usarán los valores de ρ_{calc} para el cálculo de las demás cantidades (cuadro VIII).

2. Tomografía de refracción

Los resultados de las tomografías de refracción hechas en Surfer se encuentran en los archivos llamados **PropertyName_Tomography.pdf**.

Cuadro V. Valores dados para el desarrollo del segundo punto.

Hole ID	Techo (m)	Base (m)	Litología	v_P (m/s)	$\rho(g/cm^3)$
BH-1	0	350	Lutita	2500	2.3
BH-1	350	700	Arenisca	3500	2.6
BH-1	700	1100	Caliza	5000	2.7
BH-1	1100	1400	Dolomita	6000	2.8
BH-1	1400	1700	Sal	4500	2.2
BH-1	1700	2000	Basalto	6400	2.9

Cuadro VI. Velocidades de onda S y densidades calculadas.

Litología	v_P (m/s)	v_S (m/s)	$\rho_{calc}(g/cm^3)$
Lutita	2500	984	2.09
Arenisca	3500	1855	2.32
Caliza	5000	3011	2.53
Dolomita	6000	3549	2.72
Sal	4500	2671	2.46
Basalto	6400	3729	2.81

Cuadro VII. Error porcentual entre las densidades calculadas y las dadas.

$\rho(g/cm^3)$	$\rho_{calc}(g/cm^3)$	% error
2.3	2.09	9
2.6	2.32	11
2.7	2.53	6
2.8	2.72	3
2.2	2.46	12
2.9	2.81	3

IV. CONCLUSIONES

- Se puede concluir que al identificar los distintos tipos de ondas en los registros sísmicos se puede llegar a ser muy subjetivo puesto que no siempre es fácil identificar ondas como las reflexiones, caracterizadas por hipérbolas difíciles de encontrar.
- Se puede ver que la forma en la que se dispone el arreglo es fundamental para el análisis del registro sísmico obtenido, ya que es necesario colocar una mayor densidad espacial de sensores cerca a la fuente para obtener una mayor resolución y así identificar fácilmente la distancia x_c .
- Se analizó el coeficiente de correlación (r^2) para las rectas utilizadas, encontrando así, con una mayor facilidad, el x_c más apropiado. Por lo tanto se puede afirmar que dicho análisis es fundamental al encontrar x_c de una forma más objetiva.
- Con base en la anterior conclusión se puede decir que un análisis de datos más exhaustivo podría darse al generar un programa más completo que analice por sí mismo, con base en r^2 , cual par de rectas

Cuadro VIII. Módulos físicos de las rocas calculados.

Litología	μ (GPa)	K (GPa)	E (GPa)	ν
Lutita	2.02	10.38	5.70	0.41
Arenisca	7.98	17.76	20.82	0.30
Caliza	22.98	32.72	55.87	0.22
Dolomita	34.23	52.17	84.25	0.23
Sal	17.56	26.44	43.14	0.23
Basalto	39.04	62.97	97.07	0.24

se ajustan mejor a los datos que se tienen.

- En cuanto a los modelos de capas, se puede reconocer la importancia de los modelos para distintas propiedades de las rocas basados en la velocidad de onda P que puede ser obtenida como se vio en la primera parte del taller. Dicha importancia radica en el hecho de que representan una forma de maximizar la obtención de información permitiendo así un análisis más acertado de métodos a utilizar y formas de proceder.

- Se logró también tener una aproximación al manejo de software especializado como Surfer, que permitió calcular las distintas grillas para la visualización de todas las distintas tomografías sísmicas.

REFERENCIAS

- ¹Seth Stein and Michael Wysession. *An introduction to Seismology, earthquakes, and earth structure*. Wiley-Blackwell, United Kingdom, 04 2009.
- ²Ozdogan Yilmaz and Stephen M. Doherty. *Seismic data analysis: Processing, inversion, and interpretation of seismic data*. Soc. of Exploration Geophysicists, Tulsa, Ok, 2 edition, 2001.