

Programa para calcular tiempos de viaje en pruebas con elementos bender

Software for calculating travel times in bender element tests

Alfonso Fernández-Lavín

Coordinación de Geotecnia, Instituto de Ingeniería – UNAM, México, afernandezl@iingen.unam.mx

Efraín Ovando-Shelley

Coordinación de Geotecnia, Instituto de Ingeniería – UNAM, México

Claudia Chamorro-Zurita

Coordinación de Geotecnia, Instituto de Ingeniería – UNAM, México

Resumen: El uso de cristales piezoeléctricos para determinar velocidades de propagación de ondas sísmica se ha popularizado en estudios del comportamiento elástico de geomateriales a muy pequeñas deformaciones, debido a su bajo costo y a la facilidad con la que pueden instalarse en equipos convencionales de laboratorio. Un aspecto crucial de esta metodología, es la manera de interpretar correctamente el tiempo de viaje de la onda sísmica para lo cual se han propuesto diversos criterios, desde la evaluación visual de puntos característicos hasta procesos matemáticos más complejos, que facilitan la interpretación de este tipo de señales. En este artículo se revisan los criterios comúnmente utilizados para interpretar este tipo de pruebas y se presenta el programa TAEBv1 para analizar señales usando una interfaz gráfica programada en MATLAB. El programa incluye varios métodos, tanto visuales como matemáticos para establecer el tiempo de viaje de una onda sísmica. Su uso se ilustra mediante el análisis de señales adquiridas en pruebas efectuadas con arcillas blandas del Ex Lago de Texcoco usando una cámara triaxial equipada con cristales piezoeléctricos.

Abstract: The use of piezoelectric crystals is now popular in studies into the elastic behaviour of geomaterials at very small strain levels, owing to their low costs and to the ease with which they can be installed in conventional laboratory devices. A crucial aspect of this methodology is the necessity of interpreting correctly seismic waves arrival times for which several criteria are now available such those relying on visual identification of characteristic points and those based on relatively complex mathematical procedures intended to facilitate the interpretation of signals. This paper reviews the criteria commonly used to interpret bender element tests and presents the TAEBv1 programme developed to interpret these signals using a graphical interface programmed in MATLAB. The programme includes visual and mathematical methods to calculate arrival times of seismic waves. Its use was applied in signals obtained from tests performed on soft clays retrieved from the former Texcoco Lake using a triaxial cell equipped with piezoelectric crystals.

Palabras clave: Cristales piezoeléctricos, ondas sísmicas, wavelet, transformada de Fourier, correlación cruzada, triaxial.

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, existen muchas técnicas tanto de campo como de laboratorio para conocer el comportamiento dinámico en el rango lineal-elástico de diferentes tipos de geomateriales, es decir, se enfocan en la obtención de estas propiedades a muy pequeñas deformaciones. Un parámetro muy importante en la ingeniería geotécnica, en tareas tanto de investigación como en la práctica profesional, es el módulo de rigidez al cortante máximo ($G_{m\acute{a}x}$) cuya evaluación es relativamente sencilla (ec. 1) cuando previamente se conoce tanto la velocidad de onda cortante (V_s) como la densidad (ρ) del material estudiado.

$$G_{m\acute{a}x} = \rho V_s^2 \quad (1)$$

Un método de laboratorio que ha ido ganando popularidad para conocer el $G_{m\acute{a}x}$ son los cristales piezoeléctricos debido a que esta herramienta puede ser instalada en diversos equipos convencionales de laboratorio. Los elementos bender (BE) son cristales piezoeléctricos instalados como una viga en cantiléver

para propagar ondas cortantes. La piezoelectricidad es una propiedad capaz de generar una señal eléctrica cuando son sometidos a deformaciones mecánicas y viceversa (Brignoli et al., 1996). Además, del costo relativamente bajo de estas pruebas, su popularidad ha ido incrementando debido a su versatilidad para estudiar otros parámetros de los geo materiales que pueden ser relacionados con la propagación de ondas, como son: la anisotropía (Chamorro-Zurita & Ovando-Shelley, 2020), el movimiento de ondas longitudinales (Leong et al., 2009), la evolución de la estructura debido a cambios en el estado de esfuerzos efectivos (Cha et al., 2014), entre otros.

Para interpretar la velocidad de onda cortante ($V_s = L/\Delta t$), a partir de las señales generadas en estas pruebas, únicamente se requieren conocer dos parámetros. Por un lado, la longitud recorrida por la onda (L) cuya dimensión no representa un problema debido al consenso generalizado sobre el uso de la distancia de punta a punta entre el cristal emisor y el receptor (Yamashita et al., 2009). Por otro lado, Δt representa el tiempo empleado por la onda cortante para viajar desde el emisor hasta el receptor dentro de la probeta.

Aunque la técnica de elaboración e instalación de los cristales piezoeléctricos en diferentes equipos de laboratorio ha sido bien documentada (e.g. cableado, aislamiento, puesta a tierra y dimensiones), todavía no existe un consenso para establecer el Δt . Existen extensas discusiones referente a los diferentes métodos para definir el Δt (Arulnathan et al., 1998; Viana da Fonseca et al., 2009; Ogino et al., 2015; Kawaguchi et al., 2016), sin embargo, aún no se ha acordado un método universalmente aceptado para interpretar los resultados y se recomienda utilizar varios criterios, con el fin de comparar sus resultados (Yamashita et al. 2003).

Por esta razón, en este artículo se presenta un programa desarrollado en MATLAB para identificar el tiempo de viaje de la onda sísmica en pruebas con elementos bender. La evaluación del Δt se efectúa con varios criterios visuales basados en la identificación de puntos característicos presentes tanto en la señal emisora como en la receptora. Además, se emplean criterios matemáticos en los que la información de la señal se transforma de dominio para identificar el tiempo de viaje de la onda sísmica. Este programa permite calcular con varios métodos para que el usuario pueda comparar los resultados obtenidos y la selección del criterio utilizado pueda ajustarse a las necesidades propias de las señales analizadas.

2. DESARROLLO DEL PROGRAMA

El programa TAEbv1 provee una interfaz gráfica amigable para el usuario cuando se está llevando a cabo la identificación del tiempo de viaje de la onda sísmica. En la Figura 1, se muestra una vista de la pantalla de acceso al programa, donde se presenta en la parte izquierda el menú disponible para el usuario. La aplicación se realizó en un lenguaje de programación gráfico que permite desarrollar estructuras modulares denominado MATLAB 21b. Cada una de las rutinas, que representan los diferentes métodos de interpretación, fueron desarrolladas y probadas de manera exhaustiva con señales adquiridas en diferentes equipos de laboratorio equipados con cristales piezoeléctricos antes de ser ensablados en este programa (Fernández-Lavín, 2020).

Una vez que se carga el archivo, que contiene las señales tanto de entrada como de salida, se despliega el gráfico de voltaje (amplitud) contra tiempo de ambas señales. En caso de que los picos máximos o mínimos de voltaje de las señales no ocurran en el mismo eje de las ordenadas, el programa permite corregir este desfase (polaridad de la señal receptora). El usuario puede seleccionar alguno de los criterios programados para establecer el tiempo de arribo de la onda sísmica y se desplegarán los gráficos correspondientes para seleccionar el punto correspondiente acorde al método empleado. A continuación, el programa permite seleccionar otro criterio de interpretación y una vez culminado su uso, se podrá repetir el procedimiento con otro método de análisis, las veces que el operador considere necesarias.

Los gráficos generados por el programa pueden almacenarse a criterio del usuario para utilizarse posteriormente y el reporte final de los tiempos de viaje de la onda sísmica pueden guardarse como una hoja de cálculo. A continuación, se revisan los diferentes métodos incluidos en el programa TAEbv1 para establecer el Δt .

2.1. Criterios visuales

Fueron los primeros métodos usados para la obtención de Δt y se fundamentan en la medición del tiempo entre dos puntos con características similares presentes en las señales tanto de entrada como de salida, aunque debido a su simplicidad y subjetividad, este enfoque ha sido elemento de muchas discusiones por parte de diversos autores (Viggiani & Atkinson, 1995; Lohani et al., 1999).

Figura 1.- Interfaz gráfica del programa

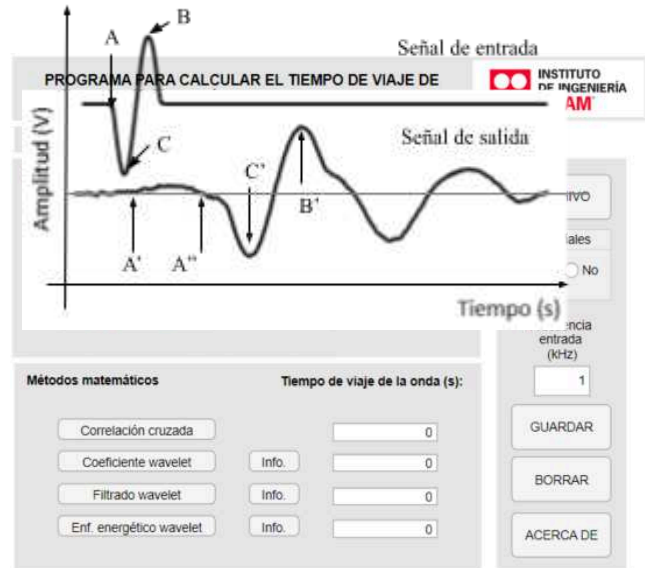


Figura 2.- Criterios visuales para interpretar Δt

La Figura 2 muestra un ejemplo de señales de entrada y salida típicas adquiridas en pruebas con cristales piezoeléctricos y se muestra los criterios visuales incluidos en el programa para la estimación de Δt , como son: el primer arribo o deflexión (A-A''), la intersección con amplitud cero (A-A'') y de los picos máximos (B-B') o mínimos (C-C'). Además, el programa despliega en pantalla la señal de salida para que el usuario seleccione los puntos característicos con los que se calculará el Δt . Es importante mencionar que los puntos característicos de la señal de entrada se calculan de manera automática por el programa. Los autores han desarrollado un criterio en el dominio del tiempo que relaciona dos puntos comunes en las señales de entrada y de salida, puntos que son independientes de la frecuencia de excitación, observándose resultados muy satisfactorios (Fernández-Lavín et al., 2023). Este criterio será incorporado en el programa en una siguiente actualización.

2.2. Criterios matemáticos basados en la transformada de Fourier

En la búsqueda de explorar nuevos enfoques y automatizar la interpretación del Δt , se han planteado metodologías basadas en el procesamiento de las señales en el dominio de la frecuencia empleando la transformada de Fourier. Aunque es importante mencionar, la transformada de Fourier no siempre es adecuada para analizar señales naturales o fenómenos que exhiben patrones complicados a lo largo del tiempo donde pueden coexistir simultáneamente componentes de baja frecuencia con una larga duración y componentes de alta frecuencia con corta duración (Gencay et al., 2002).

Correlación cruzada. – Esta herramienta mide el grado de correlación entre dos señales y el pico que producen con respecto al eje del tiempo, se toma como el tiempo de viaje de la onda sísmica. Aunque los cálculos se realizan en el dominio de la frecuencia, su interpretación se hace en el dominio del tiempo. El cálculo en el dominio de la frecuencia es la forma versión más utilizada en pruebas con cristales piezoeléctricos para establecer el Δt (Viggiani & Atkinson, 1995; Yamashita et al. 2003; Ogino et al., 2015), es importante mencionar que esta rutina puede programarse en una hoja de cálculo para realizar los cálculos de una manera discreta en el dominio del tiempo (Chamorro-Zurita

& Ovando-Shelley, 2018). En la interfaz del programa se despliegan los gráficos para que el usuario puede seleccionar el pico máximo de correlación que corresponde al Δt . En este método, uno de los picos en la correlación cruzada proporciona el tiempo de viaje correcto, sin embrago, se ha observado que no necesariamente puede ser el máximo (Airey & Mohsin, 2013). Por esta razón, se pueden usar resultados obtenidos con otros criterios para verificar el Δt obtenido.

Además, otra metodología usada para establecer el Δt en el dominio de la frecuencia es la denominada como ángulo de fase. Este método ha sido usado para interpretar señales generadas con trenes de onda sinusoidal (Greening & Nash, 2004; Styler & Howie, 2014) y debido a que esta práctica no es tan común para el análisis de pulsos sinusoidales, en esta versión del programa no ha sido incluido.

2.3. Criterios matemáticos basados en la transformada wavelet

En este tipo de análisis se obtiene una serie de coeficientes wavelet (C) que representan la medida de similitud entre la sección de la señal analizada y la versión escalada de una señal prototipo (wavelet). La transformada wavelet continua (TWC) se expresa como:

$$(T^{wav} f)(a, b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \int dt f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2)$$

donde, la función $\psi^{a,b}$ es la denominada wavelet madre (prototipo), a es el factor de escala (normalmente se considera $a > 0$) y b el factor de traslación en el eje del tiempo. La wavelet se dilata cuando $a > 1$ y se contrae cuando $a < 1$. El factor de escala se encuentra relacionado heurísticamente con el parámetro de frecuencia debido a que valores pequeños de a corresponden a wavelets comprimidas (identifican detalles de cambios rápidos correspondientes a altas frecuencias), y valores grandes de a corresponden a wavelet dilatadas (identifican cambios suaves y corresponden a bajas frecuencias). Con este enfoque se observa una equivalencia escala-frecuencia. Un detalle más comprensivo de la teoría de la transformada wavelet puede encontrarse en varias publicaciones especializadas (Percival & Walden, 2000; Bultheel, 2002; Gallegati & Semmler, 2014).

Para analizar señales discretas, convenientemente los parámetros a y b toman valores discretos, resultando la transformada discreta wavelet (TDW). Para a se emplea un entero potencia de un parámetro de dilatación $a_0 > 1$, es decir $a = a_0^m$ y diferentes valores de m corresponderán a diferentes anchos de wavelet. El parámetro de traslación también dependerá de m , para altas frecuencias (wavelets estrechas) serán desplazadas en pequeños tramos con el fin de cubrir la totalidad del eje del tiempo y, por otro lado, para bajas frecuencias (wavelets anchas) serán desplazadas en grandes tramos. El ancho de $\psi\left(a_0^{-m} t\right)$ es proporcional a a_0^m y el valor discreto de b es $nb_0 a_0^m$, donde $b_0 > 0$ y n es entero. En los trabajos de Daubechies (1992), Priestley (1996) y Percival y Walden (2000) se encuentran los detalles para aplicar el método. La expresión discreta de las wavelets será:

$$\psi_{m,n}(t) = a_0^{-\frac{m}{2}} \psi\left(a_0^{-m} t - nb_0\right) \quad (3)$$

A continuación, se presentan los criterios basados en la transformada wavelet para establecer el Δt , incluidos en el programa TAEBv1.

Como un primer pico máximo en un diagrama tiempo-escala-frecuencia. - Una wavelet madre debe tener un

valor promedio de cero y debe decaer su valor de una manera rápida. Una wavelet comúnmente utilizada en ingeniería sísmica es la conocida como pulso de Ricker o sombrero mexicano. Esta wavelet no tiene función de escalas y es derivada desde una función que es proporcional a la segunda derivada de una función Gaussiana (ec 4).

$$\psi(x) = \frac{2}{\sqrt{3}} \pi^{-\frac{1}{4}} (1 - x^2) e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (4)$$

En esta investigación, se seleccionó esta wavelet madre debido a que su forma se asemeja mucho a la forma inicial de las ondas de salida estudiadas. El fundamento de la transformada wavelet se basa en que una onda madre escalada, se trasladada a lo largo del eje del tiempo y en cada una de estas posiciones se calcula un coeficiente wavelet que representa el grado de similitud que existe entre la onda trasladada y la porción de la señal analizada. Este mismo análisis se repite para cada uno de los diferentes niveles analizados, es decir, que se calculan diferentes coeficientes para diferentes escalas en todas las secciones de la señal. Como resultado es posible observar la información de la señal de salida representada en tres ejes coordenados (tiempo, escala y coeficientes) que se denomina como escalograma y la primera llegada de la onda cortante consiste en ubicar el pico de los coeficientes respecto a la escala de tiempo (Fernández-Lavín & Ovando-Shelley, 2019a).

Una vez que se calculan los coeficientes wavelet, en la pantalla se despliega el escalograma correspondiente y el usuario deberá seleccionar el pico máximo de los coeficientes wavelet que corresponda al arribo de la onda sísmica.

En señales reconstruidas a partir un filtro wavelet. - Las señales son fácilmente contaminadas por ruidos durante la adquisición de datos, es decir, que la señal recibida (Re) se puede descomponer en la suma de la señal sin ruido (S) más el ruido (Rs), como se muestra en la ecuación 5.

$$Re = S + Rs \quad (5)$$

Para interpretar señales de salida generadas con BE, se asume que es necesario extraer aquellos coeficientes que no se encuentran relacionados con el arribo de la onda cortante como si fuera ruido en la señal. Una vez filtrados los coeficientes wavelet, aquellos que se relacionan con el tiempo de arribo se retienen y los demás se le asigna igual a cero; para el filtrado se utiliza el método del umbral debido a su rapidez y sencillez. Finalmente, se reconstruye la señal de salida a partir de los coeficientes wavelet filtrados y apoyado en los coeficientes filtrados se selecciona el tiempo en el que se produce el evento del arribo de la onda cortante (Fernández-Lavín & Ovando-Shelley, 2019b). Posterior a que la señal se reconstruye con la transformada wavelet discreta inversa (TDWI), el usuario selecciona el tiempo de arribo de la onda cortante.

Este método se basa en el análisis multiresolución de la serie temporal mediante el uso de la transformada Haar, que como se discute más adelante, el cálculo de los coeficientes es sencillo y emplea pocos recursos informáticos.

Como un pico máximo de energía respecto a la energía promedio contenida en un nivel wavelet. - La wavelet más antigua que data de inicios del siglo XX es la función Haar (Daubechies, 1992) y se usa en este enfoque. En la TDW se obtienen dos pares de conjuntos de coeficientes, el primero conformado por los componentes de baja frecuencia (ec. 6) denominados como coeficientes de aproximación o escala (p) y el segundo conformado por componentes de alta frecuencia (ec. 7) denominados como coeficientes de detalle o wavelet (d).

$$p(j + 1, i) = \frac{1}{\sqrt{2}} [S(j, 2i - 1) + S(j, 2i)] \quad (6)$$

$$d(j + 1, i) = \frac{1}{\sqrt{2}} [S(j, 2i - 1) - S(j, 2i)] \quad (7)$$

donde, i representa la posición con respecto al tiempo, desde $i=0$ a $(2^{j-1}-1)$, j es el índice de escala o nivel de transformación que varía desde $j=0$ a $(J-1)$. Por otro lado, el máximo número de niveles de transformación se definirá por los requerimientos propios de la aplicación en la que se emplee la transformada o por el número total de datos de la señal analizada (N), es decir $J = \text{Log}_2(N)$.

La suma de los coeficientes obtenidos de esta transformación permiten expresar a la función inicial como: $f(t) = a(8) + d(8) + d(7) + d(6) + d(5) + d(4) + d(3) + d(2) + d(1)$. Basados en la información contenida en cada uno de los niveles, a simple vista es difícil identificar el tiempo de arribo de la onda cortante, razón por la que el siguiente paso será calcular la cantidad de energía contenida en cada nivel de análisis, utilizando la ec. 8:

$$E(j) = \sum_{i=0}^{2^{j-1}-1} [d(j, i)]^2 \quad (8)$$

donde, $E(j)$ es la energía en un nivel j , evaluada para los coeficientes wavelet ($d_{j,i}$).

Para establecer el punto del primer arribo de la onda cortante en el eje del tiempo, es necesario encontrar la posición del primer pico máximo de energía con respecto a la energía promedio contenida en este nivel, utilizando la ec. 9:

$$e(j) = \frac{[d(j, i)]^2}{\frac{1}{2^{j-1}} \sum_{i=0}^{2^{j-1}-1} [d(j, i)]^2} \quad (9)$$

Conociendo la cantidad de energía presente en un cierto nivel de transformación, en la escala de tiempo serán fácilmente identificables aquellos coeficientes que presenten una contribución mayor de energía respecto al promedio de energía contenido en un nivel de transformación, observándose estas particularidades como picos de energía en la señal (Fernández-Lavin & Ovando-Shelley, 2020).

3. MUESTRAS, EQUIPO DE LABORATORIO Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

La probeta de suelo usada en esta investigación se obtuvo a partir de una muestra inalterada recuperada a una profundidad de 2,2 m, procedente de un programa de exploración y muestreo mediante sondeos selectivos en el sector del ex Lago de Texcoco (14 km al noreste del centro de la Ciudad de México). El sector estudiado se encuentra conformado por un estrato superficial de arcillas y arenas limosas secado por el sol de 0,2 a 5,0 m de espesor. Esta capa suele presentar fisuras verticales rellenas con depósitos eólicos debido al secado y humedecimiento estacional, y el nivel freático se encuentra ubicado dentro de esta formación. Subyaciendo a la capa superficial, se identifica un potente estrato de arcilla lacustre de alta plasticidad, que está intercalado por lentes arenosos delgados, de la cual se extrajo la muestra de suelo. Este estrato puede llegar a tener 28 m de espesor hacia la parte central del área del antiguo lago y alrededor de 10 m cerca de sus bordes. Además, la estratigrafía se complementa con: la primera capa dura, la formación de arcilla inferior, los depósitos profundos superiores, la tercera formación de arcilla y los depósitos profundos inferiores (IINGEN 2016; Ovando-Shelley et al., 2021).

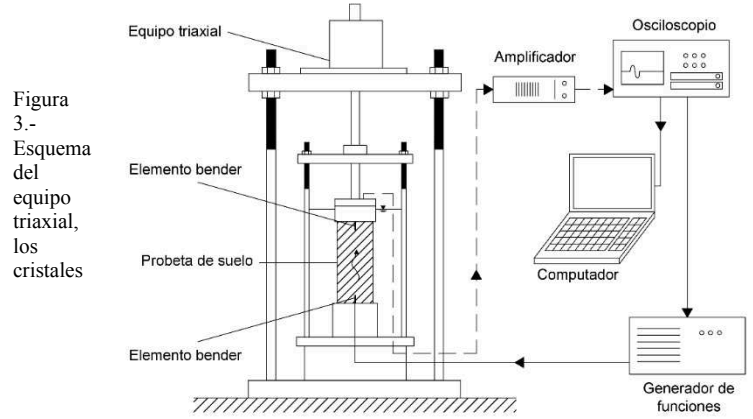


Figura 3.- Esquema del equipo triaxial, los cristales piezoeléctricos y el equipo periférico

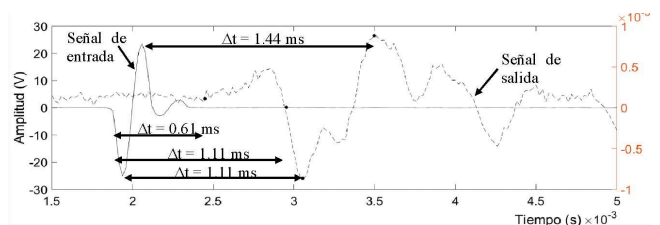
Las dimensiones iniciales de la probeta fueron de 85 mm de alto y 35 mm de diámetro y sus propiedades físicas son: contenido de agua natural de 254.8%, límite de líquido de 247.5%, índice de plasticidad de 158.7%, gravedad específica de 2.6, relación de vacío de 6.5. La probeta fue ensayada en una cámara triaxial instrumentada con BE en ambos lados, es decir, con una propagación de onda vertical y los cristales piezoeléctricos fueron de 12 x 6 x 1 mm, recubiertos con resina fotosensible con el fin de impermeabilizarlos y evitar daños eléctricos.

La cámara triaxial consta de un panel para controlar las presiones aplicadas dentro de la cámara y de un sistema digital para el control automático de la prueba (desplazamiento, contra presión, presión de cámara y carga axial). El equipo periférico para propagar las ondas sísmicas dentro de la probeta de suelo está conformado por: un amplificador, un generador de funciones y un osciloscopio modelo HP54540A, todos ellos conectados a un computador que almacena de las señales. En la cámara triaxial se aplicaron simultáneamente presiones de confinamiento y contrapresión hasta que la probeta de suelo se saturó con un parámetro B de Skempton mayor a 0.95, manteniendo un esfuerzo efectivo de 10 kPa. La señal de salida se generó con un pulso sinusoidal, cuya frecuencia fue de 4 kHz, una vez que la etapa de consolidación primaria culminó bajo un esfuerzo efectivo isotrópico de 29.1 kPa. En la Fig 3, se presenta esquemáticamente el equipo triaxial, los cristales piezoeléctricos y el equipo periférico empleado.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación, se analizan un par de señales generadas por elementos bender, con varios métodos de interpretación para establecer el Δt utilizando el programa TAEBv1. Como puede verse, en el reporte de resultados de los métodos visuales presentado en la Fig. 4, se usaron los criterios descritos en el acápite 2.1 para establecer el tiempo de viaje de la onda cortante. Con el método que consideran la distancia entre los puntos mínimos de las señales, se obtuvo un $\Delta t = 1.11$ ms y, por otro lado, considerando los puntos máximos se identificó un $\Delta t = 1.44$ ms. Esta diferencia, se debe a que la amplitud se la señal de salida se encuentra alterada por un cambio brusco de voltaje ubicado en el eje del tiempo a 3.2 ms que distorsiona la señal y desplaza el punto máximo de la señal hacia la derecha. Con el método de la intersección con amplitud cero, se obtuvo un $\Delta t = 1.11$ ms que es muy similar al establecido con los puntos mínimos.

Figura 4.- Reporte de resultados de los métodos visuales



Además, en la Fig 4 se observa que utilizando el primer criterio del primer arribo o deflexión se adquirió un $\Delta t = 0.61$ ms, que es muy distinto a lo identificado con los otros métodos visuales. Esta diferencia, se puede explicar debido a la influencia del efecto de campo cercano observado en la señal de salida. Este efecto indeseable, que es una fuente de error comúnmente observada en pruebas con cristales piezoeléctricos en el laboratorio, enmascara el arribo de la onda cortante y se produce por el arribo simultáneo de la onda cortante y de dos lóbulos normales de la onda longitudinal que aparecen en los lados del cristal emisor y se reflejan en las fronteras de la probeta (Viggiani & Atkinson, 1995). Además, se ha observado que esta interferencia depende de la geometría del espécimen (Arroyo et al., 2006), la saturación del suelo (Yamashita et al., 2009), las características o tipos de BE (Leong et al., 2005) y del tipo de suelo (Khan et al., 2019). Por esta razón, a pesar de que este criterio de identificación del arribo de la onda sísmica fue el primero en ser utilizado, en la actualidad, se prefieren usar los otros métodos visuales presentados previamente, debido a que éstos son más consistentes y menos propensos a errores de apreciación del usuario (LaRochelle et al., 2008). El siguiente método de interpretación usado para establecer el Δt , fue la correlación cruzada cuyo reporte gráfico se muestra en la Fig 5a.

Comúnmente, en este tipo de pruebas se observan alteraciones a la forma de señal de salida a medida que se modifican tanto el esfuerzo efectivo de consolidación como la frecuencia de entrada. Estas alteraciones se presentan como oscilaciones antes del arribo de la onda sísmica que esconden el primer arribo. Además, a medida que se incrementa la frecuencia de entrada, también aparecen alteraciones de la señal debido al ruido como se observa en la Fig 5a. En señales en las cuales estas alteraciones ocasionan picos anteriores en la correlación cruzada y pueden dificultar la identificación del Δt (Fig 5a), es posible comparar los resultados obtenidos con los otros criterios, permitiendo seleccionar el pico de correlación adecuado. Como se muestra en la Fig 5a, se estableció un $\Delta t = 1.38$ ms que no corresponde al primer máximo, sin embargo, se asemeja los valores obtenidos con otros métodos de interpretación. Además, en la Fig 5b se muestra la ubicación del primer arribo de la onda cortante en la señal de salida, a partir del Δt obtenido en la Fig 5a.

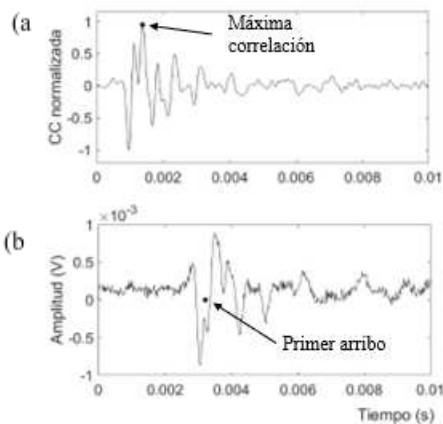


Figura 5.- Reporte de resultados de la correlación cruzada (a) correlación cruzada normalizada y (b) señal de salida

En la Fig 6, se observa el reporte gráfico del programa para el criterio en el que se identifica el arribo de la onda cortante como un pico máximo en un diagrama tiempo-frecuencia-coeficientes. Es importante mencionar que la zona de altas frecuencias (correspondiente a pequeñas escalas) presentan los valores de coeficientes wavelet más altos. En otras palabras, esto significa

que en este sector se presentan las mayores coincidencias entre la señal analizada y la forma de la wavelet seleccionada (pequeñas escalas y pequeños desplazamientos). A medida que la escala se incrementa, así como también las distancias de desplazamiento de la wavelet madre en el eje del tiempo, los coeficientes van disminuyendo hasta incluso aproximarse a cero.

En la Fig 6b se presenta una proyección bidimensional del escalograma mostrado previamente en la Fig 6a, referido a los ejes del tiempo y coeficientes wavelet. En esta nueva figura es posible definir el tiempo de la primera llegada de la onda cortante como el mayor pico de los coeficientes wavelet ubicado en un tiempo de 3.14 ms ($\Delta t = 1.31$ ms). Es importante mencionar que esta técnica permite evaluar la Vs en señales con ruido pues separa los componentes de la señal en diferentes anchos de banda (diferentes escalas) reteniendo los componentes de alta frecuencia (ruidos) en los niveles más bajos y conforme estos niveles se incrementan, la información que representa el tiempo de arribo de la onda cortante puede ser identificado de una manera clara

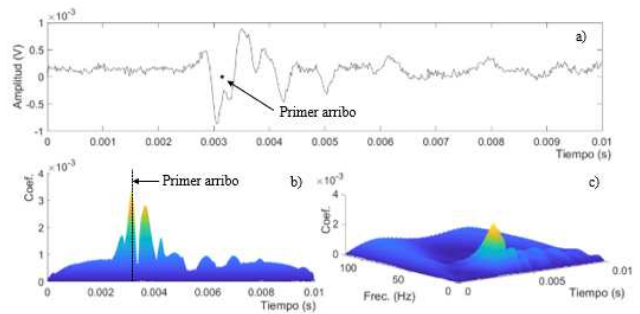
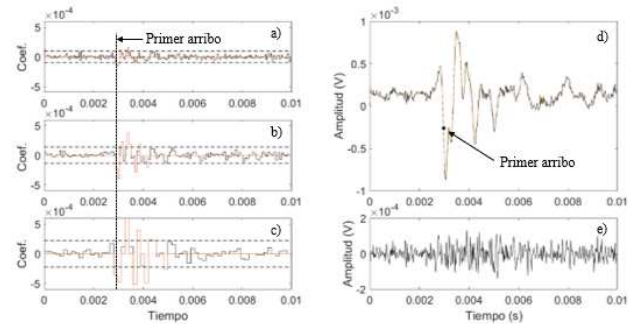


Figura 6.- Reporte de resultados del primer pico máximo wavelet: a) señal de salida, b) coeficientes wavelet y c) escalograma

Figura 7.- Reporte de resultados del método de filtrado: coeficientes



wavelet a) nivel 1, b) nivel 2, c) nivel 3, d) señal de salida y e) ruido (línea negra original y café filtrados)

La Fig 7 muestra el reporte gráfico a partir de aplicar un filtro con método de umbral para determinar el tiempo de arribo de una señal. En una primera etapa, se transforma la señal por medio de un análisis multiresolución utilizando las TDW tipo Haar y una vez obtenidos los coeficientes de detalle para los niveles 1, 2 y 3, se calcularon los umbrales respectivos para extraer los datos que se encontraron dentro del umbral (Fig 7a, 7b y 7c). Finalmente, utilizando la TDWI se procedió a reconstruir la señal utilizando la forma matricial para identificar el arribo de la onda (Fig 7d).

En estricto rigor, un filtro ayuda a eliminar ruidos presentes en una señal que normalmente poseen altas frecuencias. En nuestro caso, esta herramienta de filtrado permitió resaltar con mayor detalle los coeficientes más altos facilitando la interpretación de los tiempos de arribo de la onda cortante. Como se puede apreciar en Fig 7d, el tiempo de viaje de la onda cortante corresponde a 1.14 ms.

Usando el criterio de comparar la energía contenida en cada uno de los niveles wavelet analizados, en la Fig 8 se muestra el reporte

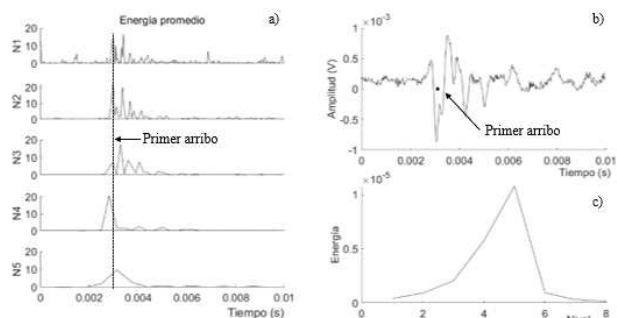


Figura 8.- Reporte de resultados del método energético respecto a la energía promedio contenida en un nivel wavelet: a) energía promedio (nivel 1 a 5), b) señal de salida y c) energía total contenida en un nivel

del programa. La distribución de la energía en cada nivel para la señal de salida analizada (Fig 8c), muestra que en conjunto los dos primeros niveles aportan el 6.3 % de la energía de la señal. Por otro lado, los niveles que reúnen la mayor cantidad de energía son el tres, cuatro y cinco con valores de 9.6 %, 26.9 % y 50.7 %, respectivamente; estos últimos niveles reúnen el 87.2 % de la energía total de la señal de salida; en contraste los coeficientes de detalle de los niveles restantes reúnen en conjunto el 6.5 %.

El arribo de la onda sísmica se asocia en este criterio a un valor relativamente alto de la energía debido a que este evento contribuye más que la energía promedio en un determinado tiempo para un nivel de transformación; esto quiere decir, que existe una singularidad como función del tiempo (el primer pico de energía en el eje del tiempo). Para establecer el punto del primer arribo de la onda cortante, es necesario encontrar la posición del primer pico máximo con respecto al promedio en el eje del tiempo. Como se observa en la Fig 8a, este pico se ubica en 2.96 ms en el eje del tiempo y corresponde a un $\Delta t = 1.27$ ms. De los cinco niveles presentados en la Fig 8a, únicamente en el nivel 3, el pico máximo de energía se encontró desplazado a la derecha, efecto que puede ser atribuido a que la amplitud de la señal de salida se encuentra alterada por un cambio brusco de voltaje ubicado en el eje del tiempo a 3.2 ms que distorsiona la señal. Finalmente, la Fig 8b muestra la ubicación del arribo de la onda cortante respecto a la señal de salida analizada.

Tabla 1. Δt obtenido con diferentes criterios

Criterio de análisis	Δt (ms)
Primer arribo	0.61
Intersección con el eje	1.11
Máximo – máximo	1.44
Mínimo – mínimo	1.11
Correlación cruzada	1.38
Primer máximo coef. Wavelet	1.31
Método de filtrado	1.14
Enfoque energético wavelet	1.27

En la Tabla 1, se presenta un resumen con los valores de Δt obtenidos con los criterios incluidos en el programa. El valor promedio es de 1.25 ms, calculado sin incluir al valor estimado con el criterio del primer arribo debido a que es muy diferente a

los otros valores obtenidos con los demás criterios de interpretación del Δt .

Como se observa en la Tabla 1, existe una diferencia marcada entre los valores obtenidos con diferentes criterios de análisis. Por un lado, en los criterios visuales este comportamiento se relaciona con la apreciación del usuario al momento de seleccionar los puntos característicos tanto de la señal de entrada como de salida y en caso de automatizar este paso, se debe considerar las deformaciones de la señal debido a efectos indeseados como son: el efecto de campo cercano, ruido o señal cruzada (*cross-talk*).

Del grupo de valores mostrados en la Tabla 1, el Δt más lejano se obtuvo con el criterio del primer arribo debido a la fuerte deformación de la señal rectora a causa del efecto de campo cercano. Por otro lado, en los criterios matemáticos usados se observa que el criterio del método de filtrado presenta el valor más bajo del Δt . Este valor puede estar relacionado con la perturbación de la señal receptora debido al efecto de campo cercano, aunque en menor grado, comparado con el criterio visual del primero arribo. Además, es posible observar en la Tabla 1 que el criterio del primer máximo de los coeficientes wavelet tiene un valor medio entre los criterios de correlación cruzada y el enfoque energético wavelet. Es importante mencionar que los criterios basados en la transformada de Fourier se basan en la comparación de series sinusoidales cuya amplitud es constante y su duración va desde $-\infty$ a $+\infty$. Por otro lado, una característica importante de la transferencia wavelet es que la señal prototipo con la cual se compara la señal analizada tiene características son transitorias y tiene una amplitud variable.

Ante la pregunta de cuál de estos métodos es el que representa el valor más representativo del Δt y, por este intermedio, de la velocidad de onda cortante, los autores han observado que en señales sísmicas generadas con elementos bender en muestras lacustres del Valle de México es posible usar un criterio en el dominio del tiempo que relaciona dos puntos comunes en las señales de entrada y de salida, puntos que son independientes de la frecuencia de excitación sobre señales generadas con diferentes frecuencias (Fernandez-Lavin et al., 2023). Esta técnica denominada como intersección de ondas ha sido probada en señales experimentales afectadas por el efecto de campo cercano, ruido, señal cruzada o deriva, observándose resultados muy satisfactorios. Conjuntamente, se ha observado que esta técnica permite obtener el Δt representativo del ensayo efectuado mediante la propagación de ondas sísmicas en el laboratorio. Es importante mencionar que esta técnica no ha sido incluida en esta versión del programa y esta siendo programada para una próxima versión.

5. CONCLUSIONES

Los cristales piezoeléctricos se han convertido en una herramienta muy usada para estudiar la rigidez al cortante a muy pequeñas deformaciones, sin embargo, existen varios criterios para interpretar el tiempo de viaje de la onda sísmica y no se ha establecido un acuerdo entre la comunidad científica para definir cuál de ellos es más adecuado.

En este artículo, se presenta el programa TAEBv1 para analizar señales de onda sísmica que, por medio de una interfaz gráfica, permite al usuario seleccionar el método más adecuado de acuerdo con las características de la señal.

El programa TAEBv1 permite usar criterios visuales y permite al usuario seleccionar los puntos característicos de la señal de salida para establecer el Δt . Además, se incluyen criterios matemáticos basados en la transformada de Fourier y wavelet, en los cuales, una vez cargadas las señales a ser analizadas, todos los cálculos son realizados de manera automática por el programa. Finalmente, en la pantalla se presentan reportes gráficos que permiten al usuario seleccionar el tiempo de arribo de la onda

sísmica, conforme el criterio de análisis propio del método seleccionado.

Los valores de Δt son redundantes debido a que el programa permite seleccionar varios métodos de interpretación para que el usuario pueda comparar entre sí los datos obtenidos. Es importante mencionar que cada uno de los criterios representados en este artículo pueden usarse en diferentes tipos de señales de salida conforme las propiedades propias de la señal analizada y de los factores que puedan alterar la señal ocultando el arribo de la onda sísmica.

En este artículo, se presenta el análisis de señales adquiridas en el laboratorio, sin embargo, estos métodos de interpretación de Δt pueden aplicarse a otros métodos de investigación tanto de campo como de laboratorio basados en el análisis de señales. Es decir, el programa TAEBv1 puede usarse en varios ámbitos de la ingeniería.

Los valores obtenidos con las diferentes técnicas presentes en este artículo presentan diferentes valores debido a diferentes razones. Por un lado, en los métodos visuales dependerán del criterio del técnico que analiza las señales y de la influencia del efecto de campo cercano, ruido o señal cruzada. Por otro lado, los métodos matemáticos están basados en diferentes hipótesis, la correlación cruzada se basa en el uso de la transformada de Fourier y las wavelet usadas en los diferentes métodos son diferentes.

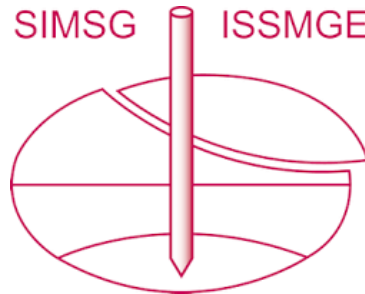
6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero del CONACYT y del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Se agradece a I. Cázares por su apoyo técnico durante la ejecución de las pruebas de laboratorio. Además, A. Fernández-Lavín también agradece al SENESCYT (Ecuador).

7. REFERENCIAS

- Airey, D. & Mohsin, A. (2013). Evaluation of shear wave velocity from bender elements using cross-correlation. *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 36 (4), 506-514.
- Arroyo, M., Muir Wood, D., Greening, P. D., Medina, L., & Rio, J. (2006). Effects of Sample Size on Bender-Based Axial Go Measurements. *Geotechnique*, 56 (1), 39-52.
- Arulnathan, R., Boulanger, R.W., & Riemer, M.F. (1998). Analysis of bender element tests. *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 21 (2), 120-131.
- Brignoli, E. G., Gotti, M., & Stokoe, K. H. (1996). Measurement of shear waves in laboratory specimens by means of piezoelectric transducers. *Geotechnical Testing Journal*, 19 (4), 384-397.
- Bultheel, A. (2002). Wavelets with applications in signal and image processing.
- Chamorro-Zurita, C. & Ovando-Shelley, E. (2018). Análisis de señales: Aplicación de la correlación cruzada discreta para la determinación del primer arribo de la onda cortante. En las memorias de la XXIX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica, SMIG, Noviembre 22 al 24, 2018 – León, Guanajuato
- Chamorro-Zurita, C. & Ovando-Shelley, E. (2020). Anisotropy of lacustrine soils in a large oedometer equipped with bender elements. *Soils and Foundations*, doi.org/10.1016/j.sandf.2020.02.009, [en línea], n.d.
- Cha, M., Santamarina, C., Kim, H., & Cho, G. (2014). Small-Strain Stiffness, Shear-Wave Velocity, and Soil Compressibility. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 140 (10)
- Daubechies, I. (1992). Ten lectures on wavelets.
- Fernández-Lavín, A. (2020). Interpretación de señales: uso de transformada wavelet para obtener parámetros dinámicos en suelos. Tesis de Doctorado en Ingeniería Civil, Universidad Nacional Autónoma de México, México
- Fernández-Lavín, A., Chamorro-Zurita, C., & Ovando-Shelley, E. (2023). An alternative method to analyze waveforms from bender element tests in soft clays. *Geotechnical and Geological Engineering Journal* https://doi.org/doi.org/10.1007/s10706-023-02551-0
- Fernández-Lavín, A. & Ovando-Shelley, E. (2019a). Interpretación de señales usando transformadas wavelet continuas. In Proceedings of the XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 17-20 November 2019, Cancun, Mexico [in spanish]
- Fernández-Lavín, A. & Ovando-Shelley, E. (2019b). Método de filtrado con wavelet para el análisis de señales. In Proceedings of the XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 17-20 November 2019, Cancun, Mexico [in spanish]
- Fernández-Lavín, A. & Ovando-Shelley, E. (2020). Haar wavelet transform for arrival time identification in bender element tests [on line]. *Geotechnical Testing Journal*, 43 (4), n.d doi:10.1520/GTJ20180400.
- Gallegati, M. & Semmler, W. (2014). Wavelet applications in economics and finance. In, *Dynamic modelling and econometrics and finance*. Springer.
- Gencay, R., Selcuk, F., & Whitcher, B. (2002). An introduction to wavelet and other filtering methods in finance and economics. Academic Press, Inc.
- Greening, P. D. & Nash, D. FT. (2004). Frequency Domain Determination of Go Using Bender Elements. *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 27 (3), 288-294.
- IINGEN., 2016. "Investigaciones y Estudios Especiales Relacionados con Aspectos Geotécnicos del Nuevo Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (NAICM) en el Vasó del Ex Lago de Texcoco, Zona Federal." Ciudad de México.
- Kawaguchi, T., Ogino, T., Yamashita, S., & Kawajiri, S. (2016). Identification Method for Travel Time Based on the Time Domain Technique in Bender Element Tests on Sandy and Clayey Soils. *Soils and Foundations*, 56 (5), 937-946.
- Khan, Q., Subramanian, S., Wong, DYC., & Ku, T. (2019). Bender elements in stiff cemented clay: shear wave velocity (Vs) correction by applying wavelength considerations. *Can. Geotech. J.*, 56, 1034-1041.
- LaRochelle, EP., Schmalz, DA., Sheahan, TC., Landon, MM., & DeGroot, DJ. (2008). Development of a PC-based bender element system for shear wave measurements in soft soil. *Deformational Characteristics of Geomaterials*. IOS Press, Burns, Mayne and Santamarina (eds), 725-732.
- Leong, EC., Cahyadi, J., & Rahardjo, H. (2009). Measuring shear and compression wave velocities of soil using bender-extender elements. *Can. Geotech. J.*, 46, 792-812.
- Leong, EC., Yeo, SH., & Rahardjo, H. (2005). Measuring Shear Wave Velocity Using Bender Elements. *Geotechnical Testing journal*, 28 (5), 488-498.
- Lohani, T. N., Imai, G., & Shibuya, ST. (1999). Determination of Shear Wave Velocity in Bender Element test. Proceedings of the Second International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, junio 21 - 25, Lisbon, Portugal, 1, 101-106.
- Ogino, T., Kawaguchi, T., Yamashita, S., & Kawajiri, S. (2015). Measurement Deviations for Shear Wave Velocity of Bender Element Test Using Time Domain, Cross-Correlation, and Frequency Domain Approaches. *Soils and Foundations*, 55 (2), 329-342.
- Ovando-Shelley, E., Fernández-Lavín, A., Hernández, Z., & Flores, O. (2021). Propiedades Dinámicas y Comportamiento Cíclico del Suelo Lacustres del Ex Lago de Texcoco. *Memorias de XXX Reunión Nacional de Ingeniería Geotécnica, SMIG, Guadalajara, Jalisco, México*
- Percival, D. & Walden, A. (2000). *Wavelet Methods for Time Series Analysis*.
- Priestley, M. (1996). Wavelets and Time-Dependent Spectral Analysis. *Journal of Time Series Analysis*, 17 (1), 85-103.
- Styler, M. & Howie, J. (2014). Continuous Monitoring of Bender Element Shear Wave Velocities During Triaxial Testing. *Geotechnical Testing Journal*, 37 (2), 219-229.
- Viana da Fonseca, A., Ferreira, C., & Fahey, M. (2009). A Framework Interpreting Bender Element Tests, Combining Time-Domain and Frequency-Domain Methods. *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, 32 (2), 91-107.
- Viggiani, G. & Atkinson, J. H. (1995). Interpretation of Bender Element Tests. *Geotechnique*, 45 (1), 149-154.
- Yamashita, S., Fujiwara, T., Kawaguchi, T., Mikami, T., Nakata, Y., & Shibuya, S. 2003. "International Parallel Test on the Measurement of Gmax Using Bender." Technical committee, TC29 (Stress-strain and Strength Testing of Geomaterials) of International Society of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE).
- Yamashita, S., Kawaguchi, T. NY., Mikami, T., Fujiwara, T., & Shibuya, S. (2009). Interpretation of International Parallel Test on the Measurement of Gmax Using Bender Elements. *Soils and Foundations*, 49 (4), 631-650.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and was edited by Gonzalo Montalva, Daniel Pollak, Claudio Roman and Luis Valenzuela. The conference was held from November 12th to November 16th 2024 in Chile.