

DESARROLLO DE UNA FUENTE SÍSMICA PORTÁTIL PARA ADQUISICIÓN SÍSMICA DE ALTA RESOLUCIÓN

Omar Pinto¹, Diego Rivera¹, Germán Ojeda², Alexander Martínez²

RESUMEN

Una de las fuentes de energía sísmica más frecuentemente utilizadas para la adquisición de datos sísmicos someros es la porra o martillo grande. Sin embargo, el pulso sísmico generado por este tipo de fuentes no es repetible, pues depende del estilo de operación de la persona que maniobra el martillo. Para obtener una mejora relativa en términos de mayor penetración de ondas elásticas en el subsuelo, mayor relación señal-ruido, mayor resolución vertical, mayor energía de impacto, mayor contenido frecuencial y menor número de disparos por sitio, en el estudio aquí reportado, se diseñó, construyó y probó un equipo portátil Generador de Impactos Sísmicos (GIS). La validación del equipo se realizó comparando los resultados obtenidos sobre una misma línea sísmica con el equipo GIS y la porra. Se concluyó que los datos sísmicos obtenidos con el GIS brindan mayor resolución y profundidad que los obtenidos con porra, ya que la amplitud de la señal, relación señal-ruido, penetración de las ondas acústicas en subsuelo y número de reflectores visualizados fue mayor.

Palabras clave: Sismología somera, Fuente sísmica, Equipo, Energía de impacto

DEVELOPMENT OF A PORTABLE SEISMIC SOURCE FOR HIGH RESOLUTION SEISMIC ACQUISITION

ABSTRACT

One of the seismic energy sources most frequently used for shallow seismic data acquisition is the sledgehammer. However, the seismic pulse generated by the sledgehammer is not repeatable, it depends on the operating style of the person to use the sledgehammer. For a relative improvement in terms of increased penetration of waves elastic in the ground, to increase the signal - noise ratio, higher resolution vertical, the more impact energy, higher frequency content, and fewer of shots per site, the study reported here shows the design, building and testing of a device named GIS (Generador de Impacto Sísmico). Device testing was conducted by comparing the results obtained on the same seismic line with the GIS and the sledgehammer. It was concluded that seismic data obtained with the GIS provide higher resolution and research depth than that obtained with the sledgehammer, as the signal amplitude, signal - noise, penetration of acoustic waves in the subsoil and number of reflectors displayed was greater.

Keywords: Near-surface Seismology, Seismic source, Equipment, Impact energy.

¹ Convenio Ecopetrol S.A. – Universidad Industrial de Santander, Grupo de Investigación Estabilidad de Pozo
opinto03@gmail.com, diferimo85@hotmail.com

² ECOPETROL – Instituto Colombiano del Petróleo. A.A. 4185 Bucaramanga, Santander, Colombia

INTRODUCCIÓN

Los métodos sísmicos son técnicas geofísicas que involucran la generación y grabación de ondas sísmicas con el propósito de obtener imágenes del subsuelo. Cada método es basado en la propagación de ondas desde una fuente artificial hasta un grupo de geófonos, seguido por el análisis de las ondas grabadas en términos de las propiedades del subsuelo (Butler, 2005). Este método tiende a ser más efectivo cuando la onda sísmica de interés es grabada con un alto contenido frecuencial y una alta relación señal/ruido (Yilmaz, 1987). Aunque estas características de señal deseada son limitadas por la física de la propagación de ondas en medios porosos y el ruido acústico presente en todos los entornos, el diseño de fuentes sísmicas y la instrumentación ha mejorado sustancialmente la calidad de los datos sísmicos.

Una fuente sísmica ideal es aquella que es segura, tiene alta relación costo eficiencia, repetitividad de la onda sísmica con un amplio ancho de banda y una señal fuerte y adecuada en cada receptor (Butler, 2005). Entre las numerosas fuentes sísmicas artificiales (en contraste con las fuentes naturales que incluyen a los terremotos y las mareas) que existen en el mercado, hay tres tipos de fuentes principales: (1) fuentes de impacto, (2) explosivos y (3) vibradores, las cuales pueden ser usadas en tierra, agua y en perforaciones (Reynolds, 1997). Una fuente de impacto es aquella que genera una fuerza de corta duración a través de una pequeña área sobre la superficie de la tierra. Estas fuentes incluyen impactos con masas en caída libre o aceleradas que funcionan con bandas elásticas o aire comprimido y que son activadas con dispositivos hidráulicos o eléctricos (Miller *et al.*, 1986; Miller *et al.*, 1994) donde los datos adquiridos son más útiles y efectivos que los adquiridos con otras fuentes (Doll *et al.*, 1998).

La fuente impulsiva de impacto más común es la porra o martillo grande (*sledgehammer* en inglés) la cual ofrece varias ventajas como su bajo costo, portabilidad, fácil manejo y seguridad (Miller *et al.*, 1986). Sin embargo, la porra no es una fuente ideal dada su escasa penetración de ondas elásticas en el subsuelo, relativamente baja relación señal/ruido, baja resolución vertical, débil energía de impacto, bajo contenido frecuencial y normalmente requiere un alto número de disparos por sitio. El presente artículo reporta los resultados exitosos obtenidos luego de la construcción y pruebas de una fuente sísmica diseñada específicamente para mejorar estos parámetros.

Para cumplir con el objetivo se diseñó y construyó un equipo de generación de pulsos sísmicos bautizado GIS (GENERADOR DE IMPACTOS SISMICOS) que

utiliza la energía potencial de dos resortes que aceleran una masa (martillo) y cuyo soporte es un trípode. Es importante mencionar que el GIS es portátil debido a su diseño modular, no requiere alimentación de energía eléctrica ni combustible y se puede transportar fácilmente por terrenos planos o abruptos. Para la validación del GIS se adquirieron datos a lo largo de dos líneas sísmicas con un idéntico arreglo geométrico, pero diferentes fuentes de impacto: el equipo GIS y la porra. Estos datos permitieron comparar los sismogramas y espectros de los disparos apilados con el fin de contrastar sus respectivos contenidos frecuenciales y penetración de ondas en profundidad, y establecer la relación señal/ruido obtenida con cada uno de ellos. Los datos se adquirieron en el municipio de Piedecuesta, Santander con un equipo de adquisición sísmica de 32 canales, un computador portátil, un geófono multi-componente, el GIS y la Porra de 9 kg. Los archivos fueron grabados en formato SEG-Y y procesados en el *cluster* del Instituto Colombiano del Petróleo.

PARÁMETROS GEOFÍSICOS RELEVANTES EN FUENTES SÍSMICAS

Es necesario reflexionar acerca de la naturaleza de los parámetros de las fuentes sísmicas que impactan directamente la calidad de los datos adquiridos. A continuación se describen brevemente los principales parámetros.

Resolución: es el tamaño mínimo detectable de características individuales del subsuelo en una imagen.

Relación señal/ruido: es la relación de la energía de una señal con respecto a la energía de otros campos que interfieren con la señal deseada. Esto puede ser expresado como una relación de amplitud o una relación de potencia.

Ancho de banda: rango de contenido frecuencial de una señal o rango de frecuencias muestreado por un sistema.

Disparo: pulso de energía sísmica, originalmente con explosivos, pero también comúnmente usado para algún tipo de pulso sísmico en particular fuentes de energía impulsiva.

Energía de la fuente: es el mecanismo para generar ondas sísmicas con medios tales como explosivos, vibradores o terremotos; un equipo de potencia eléctrica con baterías o generador, etc.

DISEÑO DEL EQUIPO GIS

En el diseño del equipo GIS se tuvo en cuenta que su principal aplicación sería la sismología somera de alta resolución y que eventualmente reemplazaría -y por lo tanto debería superar- el uso de la porra en las adquisiciones de campo. Otro aspecto que se debía tener en cuenta era la clase de fuente a diseñar, seleccionándose el tipo impacto ya que reemplazaría la porra y no impulsivos debido a que requieren de personal capacitado en manejo de rifles o explosivos, además del daño ambiental que estos generan, ni vibradores debido a que el requerimiento era de un sólo impacto y no una secuencia de impactos (Pinto y Rivera, 2009).

Para el diseño del equipo fue importante establecer los requerimientos que hicieran al equipo GIS superior al método tradicional con porra. Estos requerimientos fueron:

- La energía de impacto generada por el equipo debía ser como mínimo cuatro veces la energía obtenida por el golpe de una persona con una porra de 9 kg.
- La energía de impacto debía ser constante en todos los disparos propuestos en la adquisición sísmica.
- Portabilidad (no robusto, peso menor a 100 kg), para facilitar su traslado por zonas donde no se tenga acceso vehicular.
- Modularidad, para un fácil transporte, armaje e instalación en el lugar de operación.
- Ensamblaje rápido y sencillo de los módulos.
- Independencia de fuentes convencionales de energía (combustibles y electricidad).
- Operación manual.
- Fabricación de bajo costo

Algunos aspectos de seguridad del equipo GIS incluyen la utilización de un sistema de bloqueo del martillo después de efectuado el disparo, de esta manera, en caso de presentarse un volcamiento del equipo GIS estando cargado (en posición de disparo), se evita que el martillo salga expulsado accidentalmente hacia cualquier parte poniendo en riesgo la integridad de las personas que se encuentran alrededor. Sin embargo, para evitar situaciones como ésta, el GIS fue diseñado para ser anclado en el sitio de disparo mediante un

sistema de estacas en la base de la estructura. Otra característica de seguridad incluye la utilización de un sistema retenedor de resortes instalados en la parte de abajo de la unión inferior (FIGURA 1). Este sistema cumple tres funciones principales: impedir que los resortes salgan expulsados, permitir que los resortes queden en su sitio de instalación una vez realizado el disparo y por último, ayudar a atenuar las vibraciones de los resortes y evitar el ingreso de ruido en la señal captada por los geófonos.

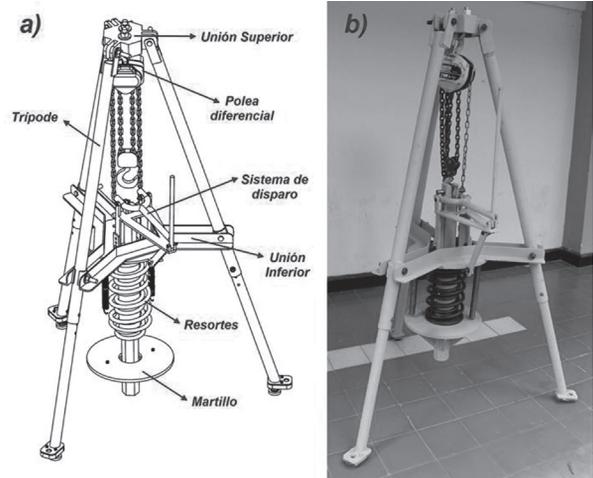


FIGURA 1. Equipo GIS **a)** Diseño en planos y **b)** GIS construido, las dimensiones son de 1,75 m de alto y 1,20 m de longitud entre las patas del trípode.

El diseño del GIS consiste de un sistema que genera un impacto en la superficie de la tierra, produciendo de esta manera ondas acústicas que viajan a través del subsuelo. Su estructura es en forma de trípode y el impacto se lleva a cabo por medio de una masa acelerada (martillo) que desciende y golpea un disco de metal ubicado sobre el terreno. El disco metálico tiene un área superficial de 400 cm² aproximadamente, esta área es óptima para obtener señales de mayor amplitud y mayor ancho de banda (Keiswetter and Steeples, 1995). La energía que acelera la masa es entregada por un sistema de dos resortes que al comprimirse acumulan energía potencial suficiente para impulsar la masa que genera el impacto a la tierra. Esta fuente elástica se comprime manualmente con la ayuda de una polea diferencial, la cual no necesita de fuentes de energía convencionales para su funcionamiento. Al elevar la masa y comprimir los resortes, un sistema de disparo es el encargado de liberar el martillo y generar el impacto (FIGURA 1).

La configuración del GIS permite su instalación por módulos, lo cual ayuda a la portabilidad, bajo peso,

fácil transporte e instalación en campo. En la FIGURA 1 se muestran los principales módulos que conforman el GIS y su prototipo construido. El diseño de detalle se encuentra en el trabajo de Pinto y Rivera, 2009. El GIS está compuesto por siete (7) módulos principales: trípode, unión superior, unión inferior, polea diferencial, resortes, martillo y sistema de disparo. La función principal de cada uno de estos módulos se describe a continuación:

Trípode: está compuesto por tres patas en acero estructural A36 (denominación establecida por *American Society for Testing and Materials*), encargadas de brindar una adecuada estabilidad al equipo y soportar la carga ejercida por la compresión de los resortes.

Unión inferior: consiste en un disco de acero estructural sobre el cual se encuentran soldados tres perfiles en “L” que sirven como brazos para conectar este módulo con el trípode. Además, en la parte inferior tiene instalado un tubo de acero que funciona como guía para el movimiento del martillo y para instalar los resortes concéntricamente.

Polea Diferencial: dispositivo mecánico que permite comprimir los resortes manualmente a medida que se eleva el martillo. La carga máxima que debe ejercer la polea diferencial es equivalente a la fuerza ejercida por los resortes a su máxima compresión (1.720 kg aprox.).

Unión superior: este elemento estructural permite soportar la carga que ejerce la polea diferencial cuando comprime los resortes. Además, sirve como punto de conexión para las patas del trípode en la parte superior del equipo.

Resorte Helicoidal: la función del resorte es la de acelerar el martillo a alta velocidad para producir la energía de impacto deseada. El procedimiento realizado para determinar el valor de la constante elástica del resorte se describe más adelante.

Martillo: barra maciza de acero estructural encargada de transmitir la energía de impacto hacia una placa de acero ubicada en el suelo. La utilización de esta última permite generar ondas sísmicas de mayor amplitud.

Sistema de Disparo: su función es permitir la desconexión manual del pasador del martillo con el gancho de la polea diferencial para poder realizar de esta manera el disparo.

Estimación de la energía entregada por impacto del GIS

Para comparar la energía de impacto que debe entregar el GIS con respecto a un golpe de porra, se calculó inicialmente la energía cinética que genera una persona de tamaño promedio al golpear un disco metálico con una porra de 9 kg. Estudios previos a este trabajo muestran que al variar la masa de la porra y la longitud del mango del mismo, se obtienen diferentes valores de energía cinética (Keiswetter and Steeples, 1995). En nuestro caso, para el cálculo experimental se tuvieron en cuenta valores específicos de la porra y del tiempo de impulso del mismo (TABLA 1), generando aproximadamente 313 Newtons-metro (N.m) de energía cinética.

TABLA 1. Energía entregada por una persona con porra.

Cálculo de la energía promedio entregada por una persona	
Masa porra [kg]=	9
Altura [m]=	2,5
Tiempo de impulso [s] =	0,3
Velocidad de impacto [m/s]=	8,3
Energía entregada [N.m]=	312,5

Debido a que el equipo GIS fue diseñado para entregar como mínimo cuatro veces el valor de energía anterior, se estableció que la energía total generada por el GIS debía ser de al menos 1.250 N.m, la cual se sobredimensionó a 1.500 N.m para garantizar la energía mínima de impacto. Con base en estos requerimientos, se calculó la constante elástica que debería tener el resorte y la fuerza máxima ejercida por la polea diferencial para el posterior cálculo de los elementos mecánicos del equipo (TABLA 2).

TABLA 2. Cálculo de la constante elástica del resorte

Datos de entrada	
Masa [kg]=	30
Desplazamiento [m]=	0,17
Gravedad g [m/s ²]=	9,81
Impacto esperado [N.m]=	1.500
Datos calculados	
Constante k [N/m]=	10.0343,9
Velocidad de Impacto [m/s]=	10
Fuerza máxima ejercida por la diferencial [kg]=	1.768,9

Para determinar la constante elástica del resorte se realizó el siguiente balance de energía:

$$E_{\text{impacto}} \cong E_{\text{resorte}} + E_{\text{potencial gravitatoria}} \quad (1)$$

Teniendo en cuenta que la energía potencial gravitatoria no es muy significativa, se tiene:

$$E_{\text{impacto}} \cong \frac{1}{2} KX^2 \quad (2)$$

Al despejar de la ecuación anterior se tiene una constante elástica de $K \cong 100 \text{ KN/m}$.

Debido a que no se encontró un resorte con capacidad de entregar este nivel de energía, fue necesario emplear dos resortes instalados concéntricamente (FIGURA 2).

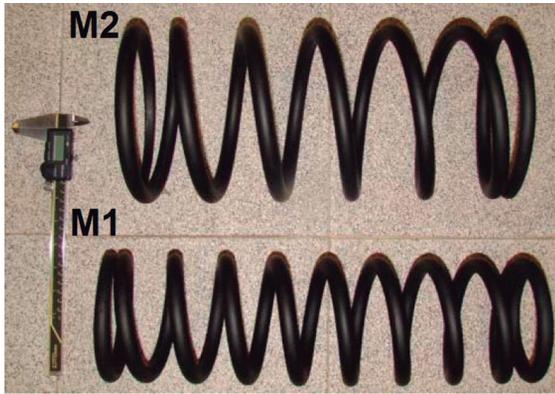


FIGURA 2. Resortes M1 y M2 de 5 y 7 pulgadas de diámetro interno respectivamente.

El cálculo de la constante de estos resortes se realizó en el Laboratorio de Ingeniería de Materiales del Instituto Colombiano del Petróleo ICP (FIGURA 3), donde la suma de las constantes elásticas fue de 100 KN/m aproximadamente (Pinto y Rivera, 2009).

El diseño de detalle de los módulos del GIS así como el cálculo estructural y análisis por elementos finitos para validar los cálculos dimensionales de los elementos mecánicos, factores de seguridad y planos se discuten en detalle en el trabajo de Pinto y Rivera (2009).

ADQUISICIÓN DE DATOS EN CAMPO

La adquisición de datos se realizó en el municipio de Piedecuesta en el Departamento de Santander. Este municipio se encuentra ubicado a 7 km al Sur de Bucaramanga, la capital del Departamento de Santander. Sobre la vía que de Bucaramanga conduce a Piedecuesta en el km 7 están las instalaciones del

Instituto Colombiano del Petróleo de ECOPETROL, allí existe un carreteable aledaño al ICP, en donde se realizó la adquisición de datos (FIGURA 4).

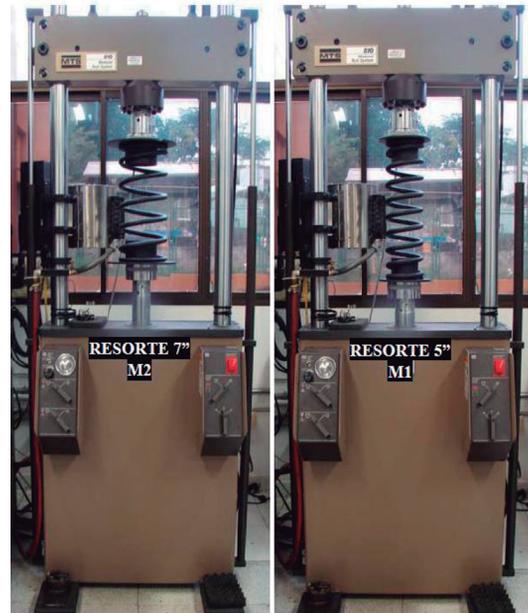


FIGURA 3. Montaje de los resortes en la máquina MTS (Material Test System) del ICP.



FIGURA 4. Ubicación geográfica de la línea sísmica.

Las fuentes sísmicas fueron el GIS y una porra de 9 kg (FIGURA 5). El receptor fue un geófono multicomponente. Los datos se adquirieron con un equipo sísmico de 32 canales, de los cuales se usaron cuatro (uno para cada componente del espacio y uno para el tiempo cero). También se utilizó un computador portátil donde se almacenaron los datos provenientes del sísmógrafo.



FIGURA 5. Fuentes sísmicas. GIS y Porra.

Arreglo Geométrico

Para el arreglo geométrico se utilizó el concepto de ventana óptima propuesto por Hunter *et al.* (1984). El arreglo consistió en una línea de 51 m de longitud en donde se mantuvo un *offset* constante de 27 m. El punto de disparo se desplazó 3 m entre estaciones lo mismo que el receptor, hasta cubrir los 51 m de la línea sísmica (FIGURA 6). El número de trazas adquiridas fue de 17. Para la línea con Porra se realizaron cinco disparos por estación con el objetivo de aumentar la relación señal/ruido. Para la línea adquirida con el GIS se realizaron solamente dos disparos por estación.

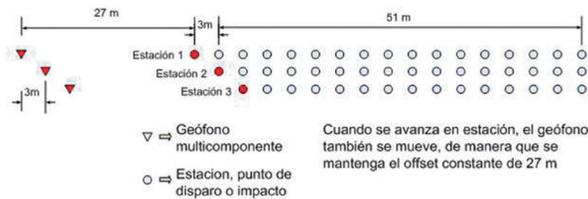


FIGURA 6. Arreglo geométrico en campo.

RESULTADOS

Antes de realizar la adquisición de datos para la línea sísmica, se realizó una prueba que consistió en disparar una vez con el GIS y otra con la porra, con el fin de comparar las amplitudes de señal en el dominio del tiempo (FIGURA 7). El receptor se ubicó a dos metros de las fuentes. En la FIGURA 7 se observa que la amplitud de la señal del GIS duplicó la señal de la porra, confirmando que el diseño cumplió con el objetivo de aumento de energía transmitida al subsuelo.

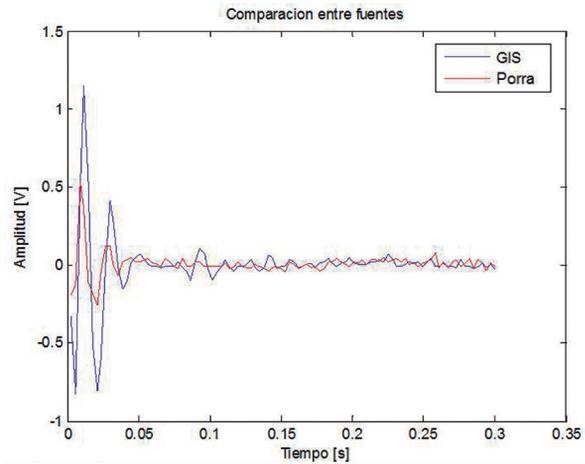


FIGURA 7. Comparación de amplitudes entre GIS y Porra.

Después de la adquisición de datos de las dos líneas sísmicas se apilaron los cinco disparos de la porra y los dos disparos del GIS. Posteriormente se realizó la comparación de amplitud de energía impacto y contenido frecuencial entre la porra y el GIS (FIGURAS 8-10), donde se analizó cada fuente en sus tres componentes: Vertical, Radial y Transversal. También se obtuvo un estimado de la cantidad de energía entregada por cada fuente en sus componentes. La energía relativa fue calculada sumando los cuadrados de las amplitudes (Keiswetter and Steeples, 1994).

Las FIGURAS 8 y 9 muestran mayor energía de impacto del GIS respecto de la porra (tres veces) y en la FIGURA 10 la energía del GIS es seis veces la de

la porra, lo cual representa más penetración de ondas elásticas en el subsuelo debido a que las partículas allí vibran con más energía y por lo tanto la onda viaja mayores distancias.

Con respecto al contenido frecuencial, se observa que el GIS y la porra aportan el mismo ancho de frecuencias donde la única diferencia es la amplitud de la energía (FIGURAS 8-10).

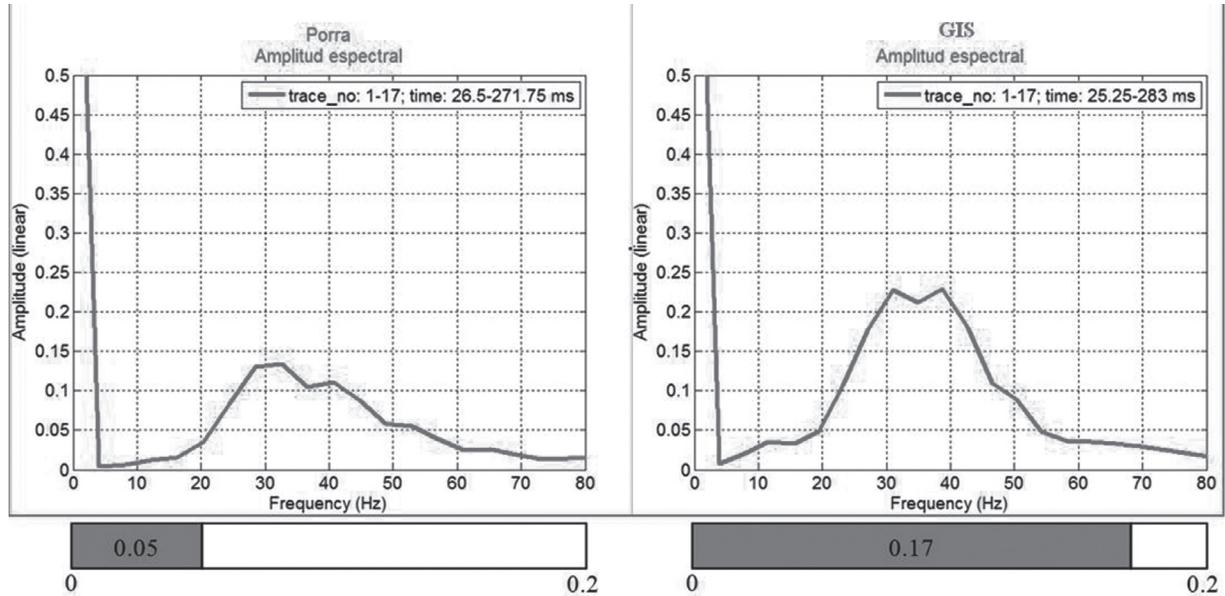


FIGURA 8. Componente vertical, porra (izquierda) y GIS (derecha). Las barras gráficas representan la energía relativa de porra y GIS.

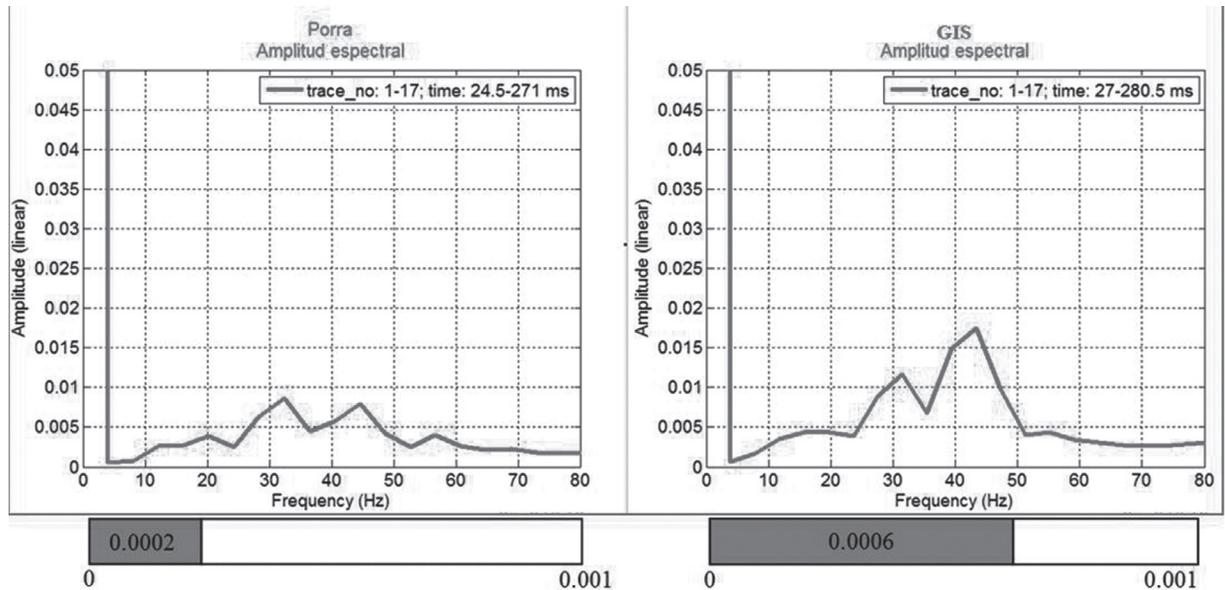


FIGURA 9. Componente radial, porra (izquierda) y GIS (derecha). Las barras gráficas representan la energía relativa de porra y GIS.

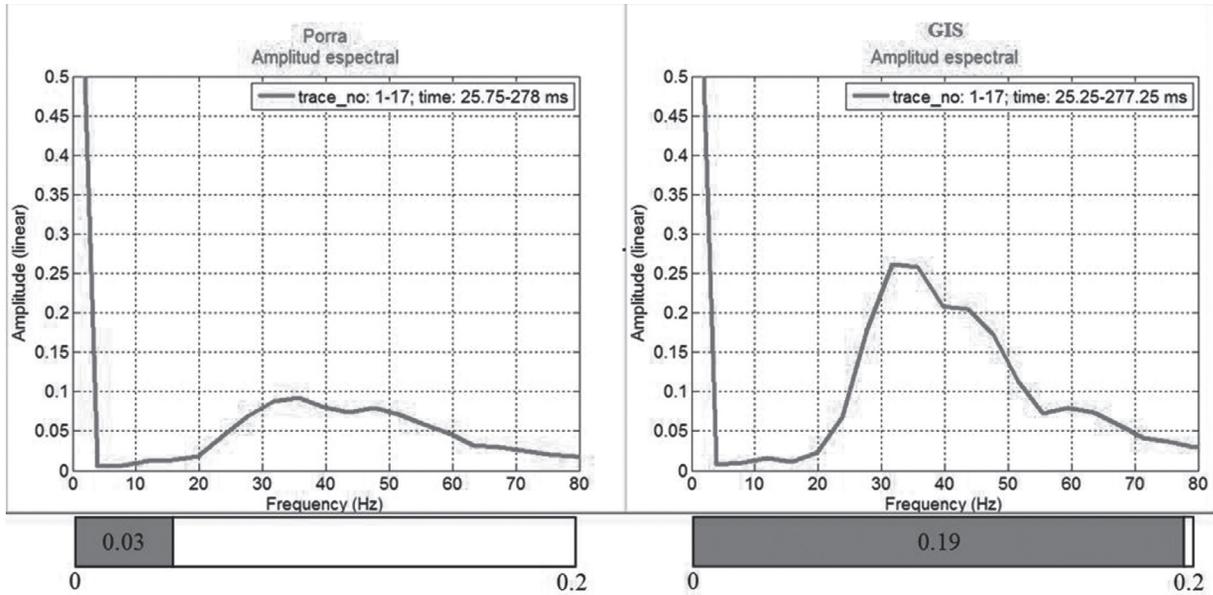


FIGURA 10. Componente transversal, porra (izquierda) y GIS (derecha). Las barras gráficas representan la energía relativa de porra y GIS.

Posterior al análisis espectral, se compararon los perfiles sísmicos adquiridos en la componente vertical con la porra y el GIS (FIGURA 11), debido a que ésta tiene mayor utilización en estudios tradicionales de sismología somera. En el sismograma adquirido con porra (FIGURA 11, izquierda), se observa claramente entre 100 y 200 ms el primer reflector (1) y hay duda si también se está visualizando un segundo reflector (2). Para el sismograma del GIS (FIGURA 11, derecha), entre 100 y 200 ms se ven dos reflectores llamados reflector 1 y reflector 2, además se podría observar un tercer reflector (3). Es importante mencionar que para los dos sismogramas, los eventos de los reflectores 1 y 2, coinciden en la escala del tiempo, lo que supondría que se están visualizando los mismos reflectores del subsuelo.

Al distinguir mayor número de reflectores con el GIS que con porra, se evidencia que el GIS entrega mayor cantidad de energía al subsuelo y, por regla general hay mayor penetración de las ondas en el subsuelo.

DISCUSIÓN

Una fuente sísmica adecuada es aquella que muestra alta relación señal-ruido, amplio contenido frecuencial, repetitividad de la onda sísmica y una señal fuerte y adecuada en cada receptor. Con base en estos requerimientos, se observa en las FIGURAS

7, 8, 9 y 10, mayor cantidad de energía en las ondas elásticas generadas por el GIS que con la porra ya que al menos se triplica la energía en las tres componentes espaciales, lo cual manifiesta que se pueden realizar arreglos geométricos más extensos en longitud y por regla general se obtendrá mayor profundidad de investigación.

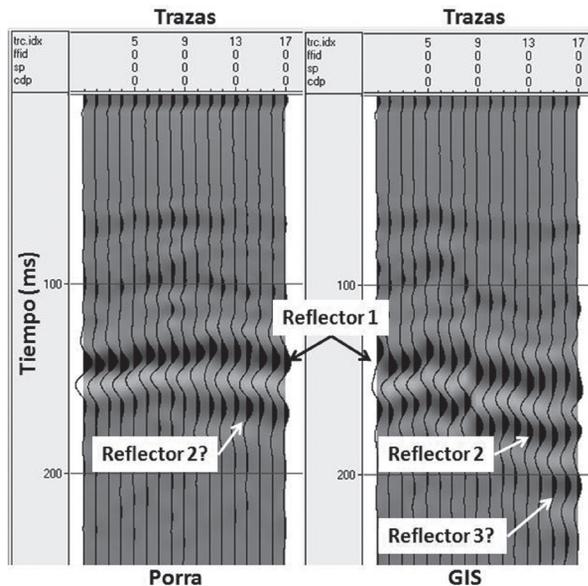


FIGURA 11. Perfil sísmico componente vertical, porra (izquierda) y GIS (derecha).

Con respecto a las FIGURA 8, 9 y 10 se nota mayor amplitud del contenido frecuencial en los datos del GIS, evidenciando en la FIGURA 11 mejor resolución del perfil sísmico. Hay que resaltar con que el GIS se obtuvieron señales con mayor amplitud de contenido frecuencial entre 5 y 20 Hz, y entre 60 y 80 Hz donde las frecuencias más altas permiten mejor resolución, lo que se traduce en una visualización más detallada del perfil sísmico (Yilmaz, 1987).

En la FIGURA 11 se visualiza mayor número de reflectores con el GIS que con la Porra, lo que indica que la cantidad de energía del GIS es superior, al igual que la relación señal-ruido, teniendo en cuenta que la relación de disparos por estación fue de 2:5 para porra y GIS, respectivamente.

Para los reflectores de la FIGURA 11 (Porra y GIS), los tiempos de arribo son aproximadamente los mismos, lo que evidencia que las señales adquiridas por cada fuente sísmica contienen imágenes de los mismos eventos en profundidad.

CONCLUSIONES

El GIS triplica la amplitud de energía de impacto de la porra de 9 kg. Esto resulta una capacidad de penetración de las ondas en el subsuelo significativamente mayor que con el método convencional con porra.

Se observa que la relación señal-ruido es mayor con el GIS que con la porra, lo cual significa que se obtiene una mejor resolución vertical a pesar de que la relación de disparos por estación fue de 2:5 para GIS y porra, respectivamente.

Otro aspecto importante es que se observa un contenido frecuencial de más amplitud con el GIS en las tres componentes, lo cual se traduce en el logro de una mayor resolución vertical con el GIS.

Las imágenes sísmicas muestran mayor número de reflectores visualizados con el GIS que con la porra.

Es necesario además, mencionar las características adicionales del GIS: portabilidad, modularidad, seguridad, repetitividad de la onda sísmica, fácil transporte por zonas de difícil acceso, no necesita de energía eléctrica ni combustibles para su funcionamiento y es una fuente de bajo costo con alta eficiencia.

AGRADECIMIENTOS

Al Grupo de Investigación de Estabilidad de Pozo del Convenio 002 entre Universidad Industrial de Santander – ECOPEPETROL S.A., por apoyar académicamente y económicamente el desarrollo del prototipo. A los compañeros de Geofísica del Instituto Colombiano del Petróleo María Duarte, Julián Vargas, Elkin Hernández y Carlos Pérez por su colaboración durante la realización de las pruebas de campo; y al ingeniero Andrés Calle por su apoyo en el procesamiento de los datos. A los ingenieros Danilo Ordoñez y Ricardo Jaimes por sus aportes durante el desarrollo de este proyecto. A los técnicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica Gonzalo Calderón y Henry Cruz por la ayuda brindada en la construcción del equipo. A COLCIENCIAS (Programa Jóvenes Investigadores), a la empresa SUBSELO3D y a la CORPORACIÓN GEOLOGICA ARES por financiar parcialmente la preparación del presente manuscrito.

REFERENCIAS

- Butler, D.K., 2005, Near-surface geophysics. Investigations in geophysics No. 13, Society of exploration geophysics, 732p.
- Doll, W.E., Miller, R.D., and Xia, J. 1998. A noninvasive shallow seismic source comparison on the Oak Ridge reservation, Tennessee. *Geophysics*, 63: 1318-1331.
- Hunter, J.A., Pullan, S.E., Burns, R.A., Gagne, R.M., and Good, R.L. 1984. Shallow seismic reflection mapping of the overburden-bedrock interface with the engineering seismograph-Some simple techniques. *Geophysics*, 49: 1381-1385.
- Keiswetter, D.A., and Steeples, D.W. 1994. Practical modifications to improve the sledgehammer seismic source. *Geophysical Research Letters*, 21: 2203-2206
- Keiswetter, D.A., and Steeples, D.W. 1995. A field investigation of source parameters for the sledgehammer. *Geophysics*, 60: 1051-1057.
- Miller, R.D., Pullan, S.E., Waldner, J.S., and Haeni, F.P. 1986, Field comparison of shallow seismic sources. *Geophysics*, 51, 2067-2092.
- Miller, R.D., Pullan, S.E., Keiswetter, D.A., Steeples, D.W., and Hunter, J.A. 1994, Field comparison of

shallow P-wave seismic sources near Houston, Texas. *Geophysics*, 59: 1713-1728.

Pinto, O.F., y Rivera, D.F. 2009. Diseño y construcción de un equipo generador de ondas acústicas por impacto para su aplicación en adquisición sísmica. Tesis Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 158p.

Reynolds, J. M., 1997. An introduction to applied and environmental geophysics, Wiley, 796p.

Yilmaz, O., 1987. Seismic Data Processing, Ed. Society of Exploration Geophysicists, 2027p.

Trabajo recibido: febrero 20 de 2012
Trabajo aceptado: Junio 1 de 2012