

## ADQUISICIÓN SÍSMICA 3D CSI (COMPRESSIVE SEISMIC IMAGING): INNOVACIÓN, EFICIENCIA Y ALTA CALIDAD DE DATOS. EL TURBIO ESTE, CUENCA AUSTRAL, SANTA CRUZ

Vicente Roselló<sup>1</sup>, Martín Mallea<sup>2,3</sup>, Daniel Pérez Simón<sup>3</sup> y Marcelo F. Santiago<sup>3</sup>

1: Consultor Independiente. roselloborrull@gmail.com

2: Actualmente en CGC S.A. martin.mallea.mm@gmail.com

3: ENAP Sipetrol Argentina S.A. daniel.perezsimon@enap.com.ar, marcelo.santiago@enap.com.ar

Palabras clave: Compressive Seismic Imaging (CSI), El Turbio Este, nodos, barrido simultaneo, grilla irregular

### ABSTRACT

ENAP Sipetrol Argentina, operator of the El Turbio Este exploration area (Austral-Magallanes Basin, Santa Cruz province, Argentina), executed a 1300Km<sup>2</sup> 3D seismic acquisition project between November 2018 and March 2019, awarded to contractor UGA S.A. An innovative methodology called CSI (Compressive Seismic Imaging), patented by ConocoPhillips (partner company in the area), was used here for the first time in South America. The CSI project implied changes over the traditional seismic acquisition, such as the use of single source and single sensor per point and simultaneous, unsynchronized independent sweeps, recording these data using nodes. The CSI method includes the separation of these records through *deblending*, a seismic inversion process to obtain clean individual records.

CSI is a variation of the general CS (Compressive Sensing) method, based on a random spatial sampling of the wave field, as opposed to the standard sampling of sources and receivers of the conventional seismic. Using the same number of emission and reception points of a conventional seismic, the CSI method exceeds the resolution limit imposed by the Shannon-Nyquist criterion for regular sampling. CSI obtains the same resolution as conventional seismic using a lower density of points per Km<sup>2</sup>, or a better resolution using the same. The design of a conventional seismic can be redefined by CSI to meet the same objectives in less operation time or better resolution, or both. CSI allows the recording of several points (*blending fold*) in the time that only one is recorded in ping-pong mode, thereby achieving higher efficiency. The use of vibroseis sweeping from 1 Hz combined with 5-Hz, high sensitivity single sensors, allowed to obtain a good image of the deeper structures and the top of the basement, normally hard to see in other 3Ds in the region.

The use of 17,000 nodes allowed each one of the 10 vibroseis working simultaneously to have a complete receiver template from their positions. Real-time QC was focused on the performance and position of the vibroseis through radio link to the Observer's central unit.

The contractual production of 3,364 VPs/d for a 73-day project was completed in 67 days. With a budget for an equivalent conventional seismic, a 30% larger area was acquired, with excellent data quality and a remarkable time reduction.

## INTRODUCCIÓN

El programa de inversiones exploratorias del Área El Turbio Este, llevado adelante por el operador ENAP Sipetrol Argentina y su socio ConocoPhillips, incluyó la realización de un programa sísmico 3D, cuya extensión originalmente prevista era de 1000 km<sup>2</sup>. Para ello se estudiaron alternativas de diseño que cubrieran dicha superficie y se enfocaran en los objetivos exploratorios definidos.

Se partió con un primer diseño del tipo convencional, con distancias regulares entre líneas fuente y receptoras, el uso normal de registro por cables, grupos de cuatro vibradores por punto de emisión trabajando en modalidad ping-pong, y una plantilla de registro que cumpliera con los parámetros de tamaño del bin, recubrimiento o *fold* del bin, y rangos de *offset* y acimut necesarios para tener una buena imagen de los objetivos principales del trabajo exploratorio.

Teniendo como base la geometría de adquisición de ese primer diseño, con un muestreo regular del campo de ondas, se procedió a modificar esa distancia regular entre fuentes y receptores hacia un muestreo irregular siguiendo la metodología CSI (Compressive Seismic Imaging), de propiedad intelectual y patentada por ConocoPhillips.

La implementación del método CSI exige el uso de fuentes puntuales (1 vibro - 1 barrido/VP) y un sensor por estaca receptora, nodos autónomos de grabación continua y barridos simultáneos e independientes.

Una vez definido este diseño de CSI con estos cambios de equipamiento necesarios, se enviaron a las compañías de servicio los dos diseños para que entregaran sus ofertas técnicas y económicas en el proceso licitatorio. Como resultado general, todas las compañías ofrecieron el equipo necesario para ambos diseños, junto a una oferta económica más baja y plazos de ejecución menores para el diseño CSI en todos los casos. La elección cayó sin dudas en el trabajo de adquisición sísmica por CSI, que permitió además aumentar un 30% la superficie del proyecto de adquisición con el mismo presupuesto, llevándolo a 1300 km<sup>2</sup>.

La ausencia de experiencia previa en Argentina demandó un gran esfuerzo en capacitación del personal propio, así como del contratista. El resultado, como se verá en detalle en el desarrollo de este trabajo, fue plenamente satisfactorio. El uso de barridos simultáneos y nodos, registrando en modalidad *blending* o mezclado, ha llegado para quedarse como una práctica común en los siguientes trabajos de adquisición sísmica.

## EL DISEÑO CSI Y SU IMPLIMENTACIÓN EN CAMPO

Para representar fielmente una señal análogica en formato digital, se requiere seleccionar de la misma una suficiente cantidad de muestras. El teorema de Nyquist-Shanon sobre el muestreo establece que se requieren al menos dos muestras por ciclo de la señal para recuperar o reconstruir

plenamente la señal analógica desde su representación digital. Si no se cumple este criterio mínimo de dos muestras por ciclo en un muestreo regular de la señal, sea éste en tiempo o en espacio, se generan señales coherentes falsas no presentes en la señal original, lo que se conoce como efecto de “aliasing”.

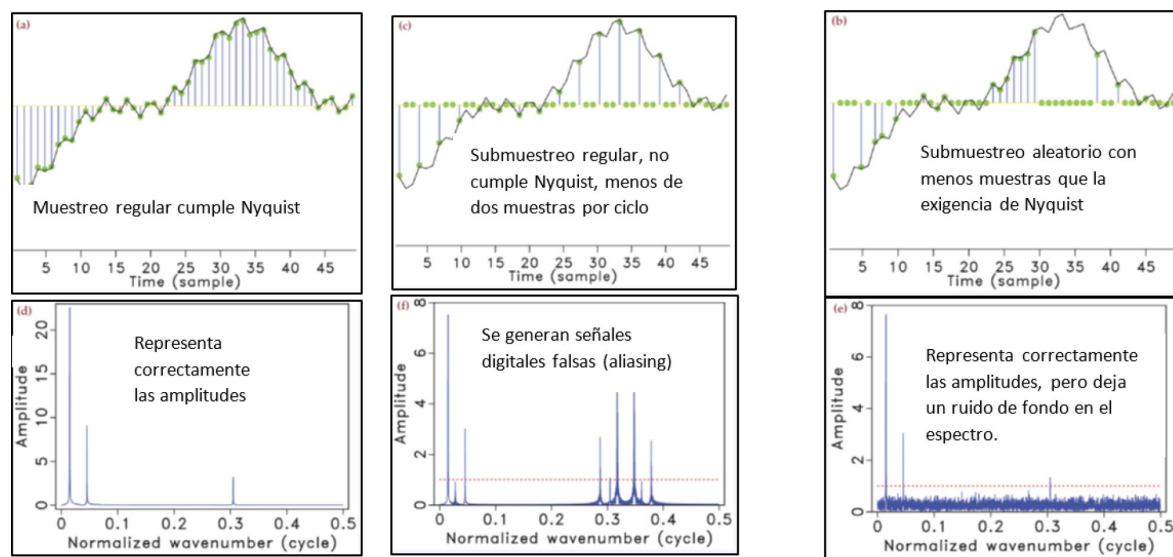


Figura 1: Muestreo digital regular e irregular de una señal. Modificado de Herrmann et. al 2010.

En una adquisición sísmica convencional, al momento de muestrear o digitalizar la señal sísmica se evita la ocurrencia de este fenómeno filtrando en dos dimensiones: en tiempo y en espacio.

En el tiempo, el filtrado se hace limitando la frecuencia máxima de la señal analógica entregada por el sensor, el llamado filtro “antialias”, que corta las frecuencias mayores a la mitad de la frecuencia del muestreo. Por ejemplo, si se muestrea a 250 Hz (muestras cada 4 ms), se filtra o corta a cero la amplitud de la señal de entrada a 125 Hz como máximo.

Para evitar *aliasing* en el espacio, se filtra cada punto de muestreo espacial de la señal (estaciones receptoras) a través de un arreglo de sensores que actúan como filtro “antialias”, cubriendo en su totalidad la distancia regular entre estaciones. Cuanto más fino es el espacio entre elementos de este arreglo, mayor será la efectividad en prevenir el *aliasing*. En el campo del muestreo digital de señales, ha surgido la técnica de “*compressive sensing*” (CS) (Figura 1) que rompe esta limitación, pudiendo representar la señal con menos muestras que las que impone Nyquist para un muestreo regular, muestreando la señal de una manera aleatoria cumpliendo ciertas condiciones. Dentro de la metodología de CSI (*Compressive Seismic Imaging*) de ConocoPhillips usada aquí, el muestreo, si bien es aleatorio, se maneja de manera tal que el ruido de fondo sea un mínimo. Este muestreo no uniforme óptimo, denominado NUOS (*Non-Uniform Optimal Sampling*) debe calcularse para cada geometría de diseño en específico.

El diseño de esta sísmica partió de una geometría de adquisición (Figura 2) enfocada en los objetivos exploratorios del proyecto para obtener los atributos necesarios de *offset* mínimos y máximos, un tamaño de celda adecuado para la migración de las pendientes estructurales estudiadas, buena distribución de *offset*-acimut y un recubrimiento o *fold* necesario para una buena relación señal/ruido del producto migrado antes de apilar.

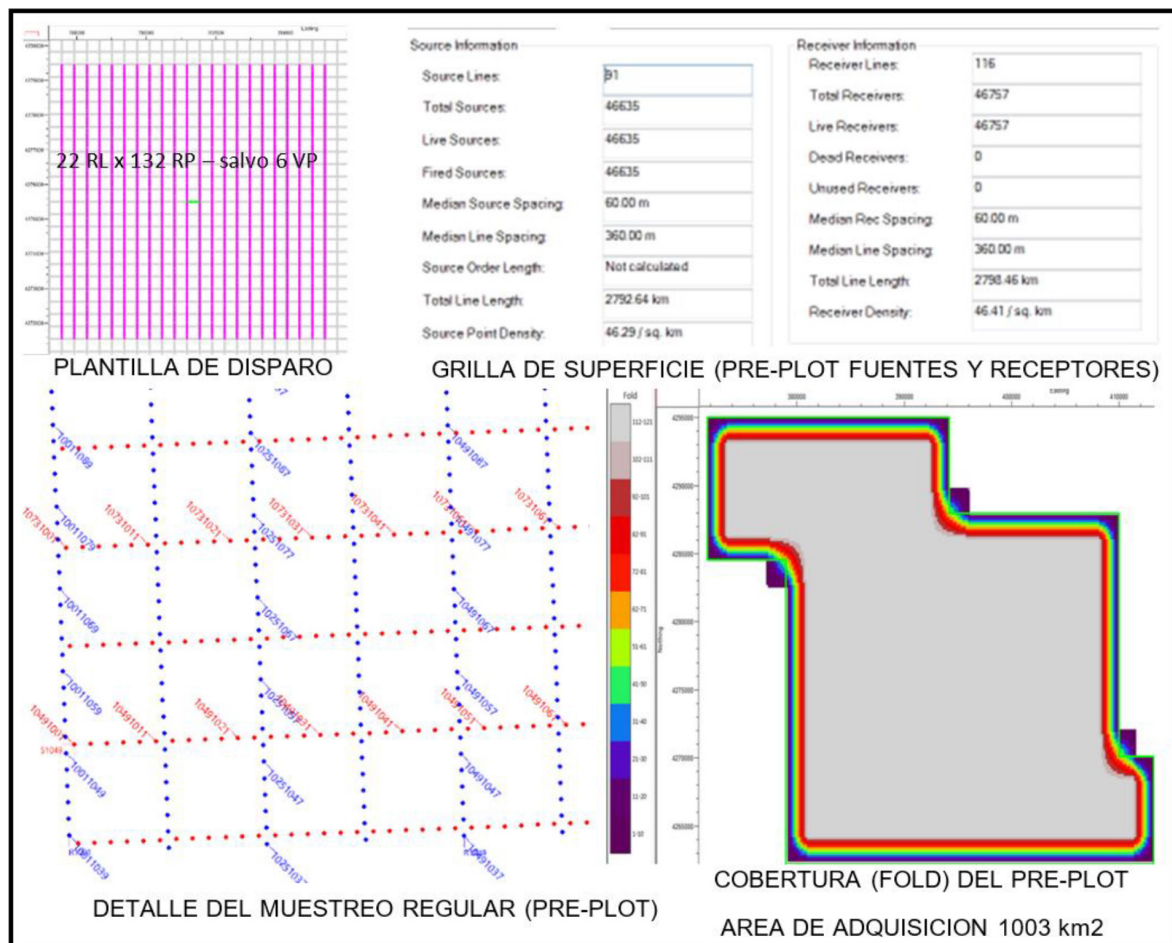


Figura 2: Resumen de los parámetros del diseño geométrico de la sísmica 3D convencional (no realizada).

El diseño CSI va a modificar esta grilla regular (Figura 3) para convertirla en una grilla de muestreo aleatoria, de secuencia tal que la representación en el dominio de la transformada tenga un mínimo de ruido de fondo y una distribución de ruido gaussiana. El muestreo del campo de ondas se realiza con cinco variables: las coordenadas X e Y de la fuente, las coordenadas X e Y del receptor y el tiempo de la muestra. Para hacer aleatorio el muestreo del punto medio (o CMP) sólo es necesario variar una de las coordenadas de la fuente, la coordenada Este, por ejemplo, y variar la otra coordenada de la receptora, así el punto de

muestreo CMP tendrá la aleatoriedad necesaria para comprimir los datos en el dominio de la transformada.

En el diseño CSI se mantienen las distancias entre líneas, de 360 m en este caso, y la variación aleatoria se realizará sobre las distancias entre los puntos fuente y receptores. La distancia entre puntos vibrados (VP), sin embargo, se cambia de 60 a 15 m, necesario para equiparar a la energía entregada por km<sup>2</sup> de la sísmica convencional con 4 vibros por punto, dado que el diseño en CSI tiene por fuente de energía un solo vibro y un solo barrido por punto.

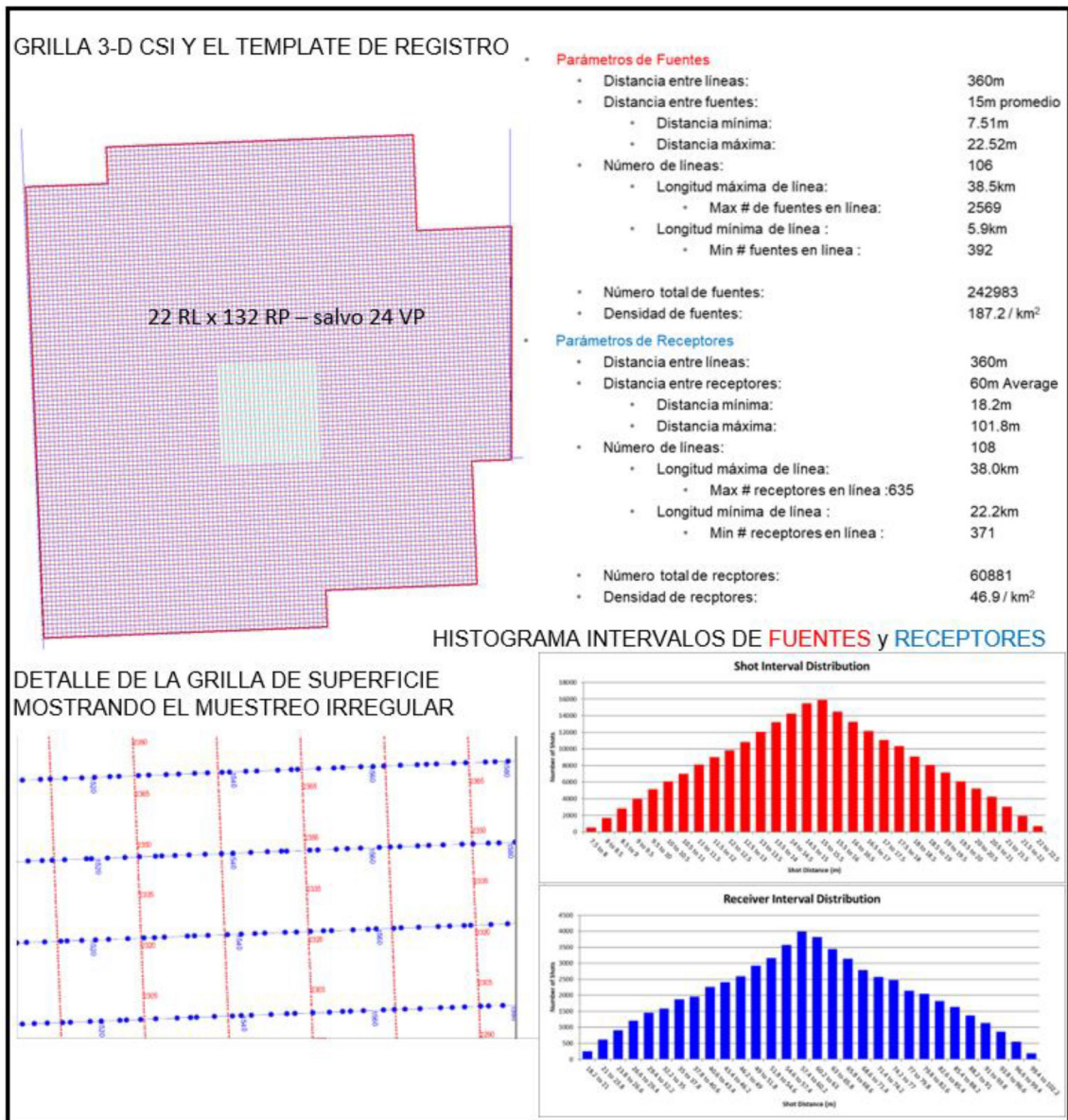


Figura 3. Resumen de los parámetros geométricos del diseño de la sísmica 3D CSI (realizada).

## CARACTERÍSTICAS DE RECEPTORES Y FUENTES EN LA SÍSMICA CSI DE EL TURBIO ESTE

La distribución irregular del intervalo entre receptores del diseño CSI obliga a la elección de nodos autónomos como elemento sensor único y registrador de la señal sísmica, y sensor de frecuencia natural (5 Hz) de alta sensibilidad (80 V/m/s), acercándose a la sensibilidad de una ristra de seis geófonos en serie (120 V/m/s), típicamente usados en la sísmica convencional. Una vez encendido, el nodo graba una sola traza en forma continua a la tasa de muestreo seleccionada, estampando en la serie de muestras el tiempo de grabación de la muestra, sincronizando en milisegundos el tiempo de muestreo con el tiempo recibido por el receptor GPS interno del nodo. Este tiempo grabado, sirve posteriormente para extraer la traza registrada en el nodo a partir del tiempo GPS en que se inició un barrido. El nodo va grabando en forma continua todo lo que el sensor mide, tanto ruido ambiente como cualquier señal dentro del rango de frecuencia del receptor. El nodo posee un amplificador 0 – 24 dB en pasos de 6 dB y un conversor Sigma-Delta de 24 bits.

El geófono de mayor sensibilidad y frecuencia natural 5 Hz (Figura 4) entrega, en las bajas frecuencias, una amplitud mayor a 24 dB sobre el geófono de 10 Hz utilizado en la sísmica convencional. La posibilidad de registrar con buena amplitud las señales de baja frecuencia, que un vibrador moderno entrega, permitió en esta adquisición tener datos con un mayor ancho de banda y por tanto de mayor resolución y claridad de imagen en eventos profundos del tope del Basamento de la cuenca y del relleno de los grábenes jurásicos.

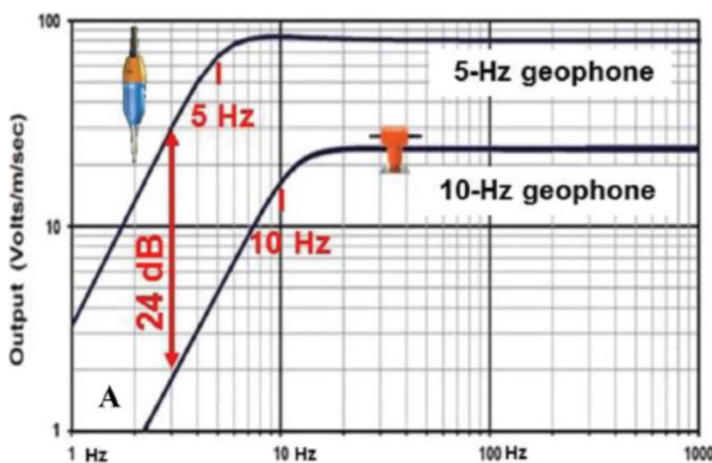


Figura 4. Comparación de sensibilidades de geófonos de 5 y 10 Hz.

En esta adquisición sísmica se usaron vibradores Sercel Nomad 65 Neo, con capacidad de emitir barridos de baja frecuencia, siempre teniendo en cuenta no sobrepasar las limitaciones mecánicas e hidráulicas del vibrador para mantenerse dentro de los límites de operación permitidos. Estas limitaciones ocurren en la zona de baja frecuencia, y pueden manejarse de dos maneras (Figura 5).

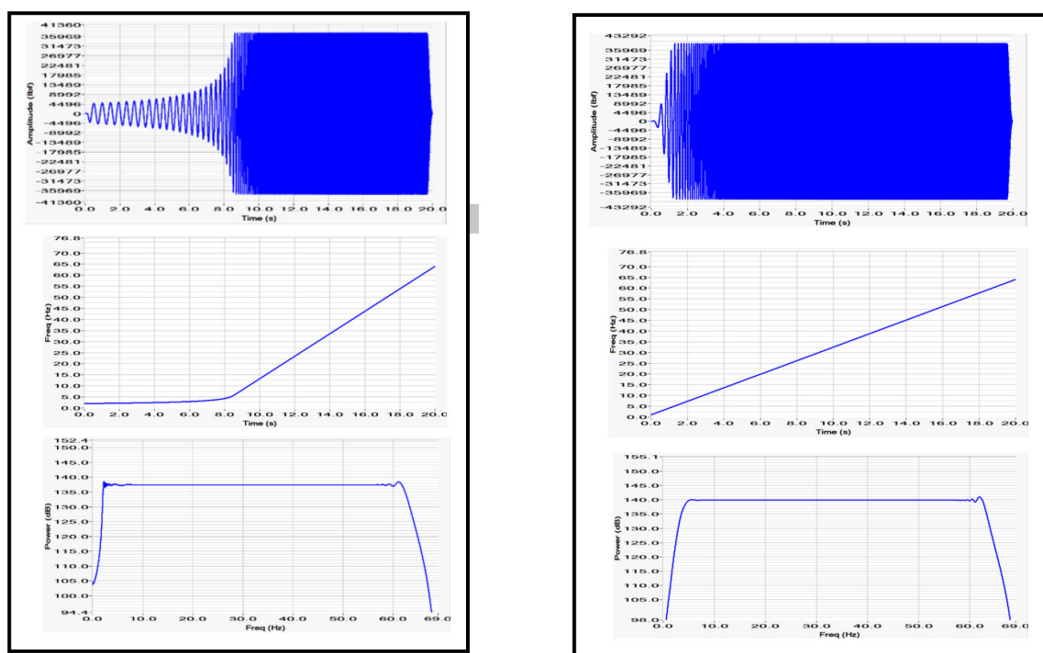


Figura 5. Comparación de un barrido “low dwell” con uno lineal 1-64 Hz con taper inicial de 1,3 s, equivalente.

Una de ellas es generar un barrido no lineal (*low dwell* o *custom sweep*), dando más tiempo a la parte de baja frecuencia del barrido y reduciendo el drive para mantener así la amplitud en el espectro de esa zona del barrido. La señal que se va registrando antes de correlación es baja, algunas veces unos pocos bits del convertidor A/D. La amplitud de la señal es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo, de manera que, si en la parte de baja frecuencia del barrido se limita a un 25% de su fuerza máxima, se deberá aumentar 16 veces el tiempo del barrido en esa parte, lo que deja menos tiempo barriendo las frecuencias intermedia y alta, reduciendo la relación señal/ruido en esa zona del espectro. Para evitar esa disminución en la relación señal/ruido, y teniendo el vibro Nomad 65 Neo la capacidad de aplicar “full drive” a partir de 5,4 Hz del barrido. Después de varias pruebas realizadas en campo, tanto para bajas como altas frecuencias, se optó por un barrido lineal 1–64 Hz de 20 segundos y taper inicial de 1,3 segundos.

Los parámetros finales del barrido elegido para los vibradores fueron los siguientes:

|                          |                                  |
|--------------------------|----------------------------------|
| Modelo del Vibrador      | Sercel Nomad Neo 65              |
| Vibradores por punto     | 1                                |
| Fuerza de Salida         | 70 % del HDW (70% de 62,000 lbs) |
| Barridos por punto       | 1                                |
| Longitud del barrido     | 20 s                             |
| Fase inicial del barrido | 90°                              |
| Frecuencia inicial       | 1 Hz                             |
| Frecuencia final         | 64 Hz                            |
| Taper inicial            | 1300 ms                          |
| Taper final              | 320 ms                           |
| Modalidad de trabajo     | Autónoma Independiente           |

Tabla 1. Parámetros del barrido usados en la adquisición sísmica 3D de El Turbio Este.

La modalidad de trabajo autónoma independiente significa que cada vibrador inicia su barrido en cuanto esté en la posición de *pre-plot* definida según su navegador, la plancha abajo y la señal “*ready*” encendida, sin esperar ningún control o señal externa que le dé la partida. El operador de vibro tiene el control a través de su tableta con navegador GPS, donde están cargadas las coordenadas de las posiciones previstas a vibrar durante el día de trabajo. La única comunicación digital del vibro con la unidad central de control del Observador Sísmico es la señal que cada vibro envía al final de cada barrido (PSS) conteniendo la información de las coordenadas de su posición y los valores promedios y máximos de fuerza, fase y distorsión.

La labor que desempeña el Observador en esta sísmica sin cables es controlar la recepción en tiempo real de la señal PSS que envía cada vibro, controlar la posición de cada vibro en cada VP dentro del rango de tolerancia, y que su desempeño de fuerza, fase y distorsión estén dentro de los rangos de tolerancia. La partida del barrido, si bien es comandada por el operador del vibro, se sincroniza con la señal de tiempo de GPS recibida por el vibrador en modalidad de alta precisión diferencial RTX (cinemática en tiempo real). Este tiempo del reloj de la señal GPS es el mismo que están recibiendo los nodos, estampándolo en el registro de las muestras grabadas. El tiempo recibido y registrado por cada vibro se utiliza luego para extraer o descargar los datos almacenados en los nodos receptores. Estos tiempos de inicio del barrido son descargados de cada vibro conectando vía USB una memoria externa (*pen drive*). La pérdida de esta información impedirá descargar la señal sísmica desde los nodos, y el trabajo se perderá y deberá repetirse.

Con los tiempos de cada punto vibrado por cada vibro, junto a las coordenadas del punto vibrado, el desempeño del vibro en cada punto y otros parámetros del punto, se genera un archivo ASCII con toda la información necesaria para extraer los datos de los nodos receptores e iniciar su carga para el procesamiento. Este archivo, denominado ACLog y diseñado por la supervisión técnica de este grupo, reemplaza al llamado Reporte del Observador de la sísmica convencional por cable, y es generado consecutivamente día tras días durante toda la grabación del proyecto sísmico.

La geometría de esta adquisición, diseñada con metodología CSI, generó una grilla de subsuperficie de celda nativa 30 x 7,5 metros de *fold* 121 y densidad  $0,5378 \times 10^6$  trazas/km<sup>2</sup>. Dicha celda, después de recomponer y regularizar durante el proceso en el dominio de la transformada de CSI quedó en 15 x 15 metros de *fold* 242 y densidad de  $1,0576 \times 10^6$  trazas/km<sup>2</sup>, Nótese que esta densidad resulta ocho veces mayor que la de una sísmica de muestreo regular de celda de 30 x 30 metros de *fold* 121, que entrega una densidad de  $0,1344 \times 10^6$  trazas/km<sup>2</sup>.

## QCDIARIO EN UNA SÍSMICA CON NODOS Y BARRIDOS SIMULTÁNEOS INDEPENDIENTES

Los nodos SmartSolo® utilizados en esta adquisición, una vez que están en tierra plantados y encendidos sólo tienen una luz LED que indica si el nodo está trabajando normalmente, si está apagado o bien si tiene un problema y está trabajando fuera de especificaciones. Todas las pruebas de instrumento y

de sensor del nodo se toman y analizan antes de ser plantados en el terreno. Los nodos fueron programados para registrar en un esquema de *on/off* de 12 horas diarias de trabajo, y durante el tiempo en que el nodo permanece trabajando en tierra, las mismas pruebas se repiten cada día en el “despertar” (inicio programado de registración) del nodo. Los resultados de estas pruebas no pueden verse diariamente, sino que se almacenan en la memoria interna del nodo, y solo pueden ser revisadas cuando los nodos salen del *spread* activo, son levantados del terreno y se descargan sus datos. Esta situación que impide tener un control del tendido en tiempo real, como lo tiene la sísmica convencional por cable, podría llamar a desconfiar del sistema nodal, pero, por lo contrario, el mismo ha demostrado ser confiable y seguro.

En este proyecto, del total de 60.863 estaciones receptoras definidas en post-plot, solo 56 nodos terminaron sin datos, lo que representa una falla menor al 0,092%, demostrando que es un sistema muy confiable. Las pruebas de inicio, luego repetidas diariamente en forma automática en el nodo al despertar diariamente, se presentan aquí en un resumen, mostrando unas pocas líneas del reporte de cada prueba.

|                                           |           |             |          |                |                  |                   |                     |            |               |                     |              |                     |
|-------------------------------------------|-----------|-------------|----------|----------------|------------------|-------------------|---------------------|------------|---------------|---------------------|--------------|---------------------|
| Pass:288 Fail:0 EIN TEST                  |           |             |          |                |                  |                   |                     |            |               |                     |              |                     |
| Test Result                               | SN        | Device Type | Firmware | Test Type      | Sampling Rate    | Gain (dB)         | Low Cut (Hz)        | Phase Type | EIN (uV)      | DC (uV)             | Dynamic (dB) | Date Time           |
| Pass                                      | 350029961 | IGU-16 5Hz  | V1.0.7.2 | Ein            | 2                | 24                | 0                   | Minimum    | 0.25          | 0.03                | 112.91       | 2018-12-17 08:53:31 |
| Pass                                      | 350039208 | IGU-16 5Hz  | V1.0.7.2 | Ein            | 2                | 24                | 0                   | Minimum    | 0.25          | -0.1                | 112.91       | 2018-12-17 08:53:31 |
| Pass                                      | 350054185 | IGU-16 5Hz  | V1.0.7.2 | Ein            | 2                | 24                | 0                   | Minimum    | 0.26          | 0.02                | 112.57       | 2018-12-17 08:53:32 |
| Pass:287 Fail:1 TOTAL HARMONIC DISTORTION |           |             |          |                |                  |                   |                     |            |               |                     |              |                     |
| Test Result                               | SN        | Device Type | Firmware | Test Type      | Sampling Rate    | Gain (dB)         | Low Cut (Hz)        | Phase Type | THD (dB)      | Date Time           |              |                     |
| Pass                                      | 350022866 | IGU-16 5Hz  | V1.0.7.2 | Thd            | 2                | 24                | 0                   | Minimum    | -108.77       | 2018-12-17 10:02:14 |              |                     |
| Pass                                      | 350025504 | IGU-16 5Hz  | V1.0.7.2 | Thd            | 2                | 24                | 0                   | Minimum    | -108.38       | 2018-12-17 09:05:13 |              |                     |
| Pass                                      | 350025618 | IGU-16 5Hz  | V1.0.7.2 | Thd            | 2                | 24                | 0                   | Minimum    | -109.09       | 2018-12-17 08:53:46 |              |                     |
| Pass                                      | 350025816 | IGU-16 5Hz  | V1.0.7.2 | Thd            | 2                | 24                | 0                   | Minimum    | -110.18       | 2018-12-17 11:51:33 |              |                     |
| Pass:288 Fail:0 COMMON MODE REJECTION     |           |             |          |                |                  |                   |                     |            |               |                     |              |                     |
| Test Result                               | SN        | Device Type | Firmware | Test Type      | Sampling Rate    | Gain (dB)         | Low Cut (Hz)        | Phase Type | CMRR (dB)     | Date Time           |              |                     |
| Pass                                      | 350022866 | IGU-16 5Hz  | V1.0.7.2 | CMRR           | 2                | 24                | 0                   | Minimum    | 112.32        | 2018-12-17 10:02:26 |              |                     |
| Pass                                      | 350025504 | IGU-16 5Hz  | V1.0.7.2 | CMRR           | 2                | 24                | 0                   | Minimum    | 112.46        | 2018-12-17 09:05:25 |              |                     |
| Pass                                      | 350025618 | IGU-16 5Hz  | V1.0.7.2 | CMRR           | 2                | 24                | 0                   | Minimum    | 112.27        | 2018-12-17 08:53:58 |              |                     |
| Pass                                      | 350025816 | IGU-16 5Hz  | V1.0.7.2 | CMRR           | 2                | 24                | 0                   | Minimum    | 112.22        | 2018-12-17 11:51:46 |              |                     |
| Pass:288 Fail:0 GAIN TEST                 |           |             |          |                |                  |                   |                     |            |               |                     |              |                     |
| Test Result                               | SN        | Device Type | Firmware | Test Type      | Sampling Rate    | Gain (dB)         | Low Cut (Hz)        | Phase Type | Gain Accuracy | Date Time           |              |                     |
| Pass                                      | 350022866 | IGU-16 5Hz  | V1.0.7.2 | Gain Accuracy  | 2                | 24                | 0                   | Minimum    | -0.2685       | 2018-12-17 10:02:39 |              |                     |
| Pass                                      | 350025504 | IGU-16 5Hz  | V1.0.7.2 | Gain Accuracy  | 2                | 24                | 0                   | Minimum    | -0.2724       | 2018-12-17 09:05:38 |              |                     |
| Pass                                      | 350025618 | IGU-16 5Hz  | V1.0.7.2 | Gain Accuracy  | 2                | 24                | 0                   | Minimum    | -0.2457       | 2018-12-17 08:54:11 |              |                     |
| Pass                                      | 350025816 | IGU-16 5Hz  | V1.0.7.2 | Gain Accuracy  | 2                | 24                | 0                   | Minimum    | -0.2348       | 2018-12-17 11:51:58 |              |                     |
| Pass:279 Fail:9 SENSOR PROPERTIES         |           |             |          |                |                  |                   |                     |            |               |                     |              |                     |
| Test Result                               | SN        | Device Type | Firmware | Test Type      | S.Resistance (Q) | S.Sensitivity (V) | S.Damping           | Noise (mV) | N.Freq (Hz)   | Date Time           |              |                     |
| Pass                                      | 350022866 | IGU-16 5Hz  | V1.0.7.2 | Sensor Propert | 1756.82          | 73.44             | 0.674               | 1.1293     | 4.88          | 2018-12-17 10:03:28 |              |                     |
| Pass                                      | 350025504 | IGU-16 5Hz  | V1.0.7.2 | Sensor Propert | 1748.89          | 76.6              | 0.692               | 0.1867     | 5.05          | 2018-12-17 09:06:26 |              |                     |
| Pass                                      | 350025618 | IGU-16 5Hz  | V1.0.7.2 | Sensor Propert | 1775.6           | 76.02             | 0.692               | 0.7193     | 4.99          | 2018-12-17 08:54:58 |              |                     |
| Pass                                      | 350025816 | IGU-16 5Hz  | V1.0.7.2 | Sensor Propert | 1744.6           | 76.86             | 0.688               | 0.249      | 4.82          | 2018-12-17 11:52:47 |              |                     |
| Pass                                      | 350025834 | IGU-16 5Hz  | V1.0.7.2 | Sensor Propert | 1763.41          | 77.87             | 0.686               | 2.2129     | 5.03          | 2018-12-17 09:55:41 |              |                     |
| Pass                                      | 350025936 | IGU-16 5Hz  | V1.0.7.2 | Sensor Propert | 1735.49          | 77.77             | 0.693               | 1.8615     | 5             | 2018-12-17 09:29:23 |              |                     |
| Pass:285 Fail:3                           |           |             |          |                |                  |                   |                     |            |               |                     |              |                     |
| Test Result                               | SN        | Device Type | Firmware | Test Type      | Frequency (Hz)   | Sensor_THD (%)    | Date Time           |            |               |                     |              |                     |
| Pass                                      | 350022866 | IGU-16 5Hz  | V1.0.7.2 | Sensor THD     | 11.715           | 0.022             | 2018-12-17 10:04:29 |            |               |                     |              |                     |
| Pass                                      | 350025504 | IGU-16 5Hz  | V1.0.7.2 | Sensor THD     | 11.715           | 0.036             | 2018-12-17 09:07:27 |            |               |                     |              |                     |
| Pass                                      | 350025618 | IGU-16 5Hz  | V1.0.7.2 | Sensor THD     | 11.715           | 0.019             | 2018-12-17 08:55:59 |            |               |                     |              |                     |
| Pass                                      | 350025816 | IGU-16 5Hz  | V1.0.7.2 | Sensor THD     | 11.715           | 0.016             | 2018-12-17 11:53:48 |            |               |                     |              |                     |
| Pass                                      | 350025834 | IGU-16 5Hz  | V1.0.7.2 | Sensor THD     | 11.715           | 0.023             | 2018-12-17 09:56:43 |            |               |                     |              |                     |
| Pass:287 Fail:1                           |           |             |          |                |                  |                   |                     |            |               |                     |              |                     |
| Test Result                               | SN        | Device Type | Firmware | Test Type      | Frequency (Hz)   | Sensor_impedance  | Date Time           |            |               |                     |              |                     |
| Pass                                      | 350022866 | IGU-16 5Hz  | V1.0.7.2 | Sensor Impeda  | 12               | 5633.1            | 2018-12-17 10:04:45 |            |               |                     |              |                     |
| Pass                                      | 350025504 | IGU-16 5Hz  | V1.0.7.2 | Sensor Impeda  | 12               | 5743.67           | 2018-12-17 09:07:42 |            |               |                     |              |                     |
| Pass                                      | 350025618 | IGU-16 5Hz  | V1.0.7.2 | Sensor Impeda  | 12               | 5702.41           | 2018-12-17 08:56:14 |            |               |                     |              |                     |

Tabla 2. Resumen de las pruebas de inicio y diarias del nodo IGU-16.

El control diario realizado al trabajo de los vibradores consiste en dos partes. La primera de ellas se realiza en tiempo real desde la cabina de control de los observadores, mientras los vibros están trabajando en línea. La segunda parte del control que se realiza al término de la labor diaria, cuando todos los archivos electrónicos almacenados en las memorias de los vibros y la unidad central de control son recibidos por el grupo de Sismología de la brigada.

En el control de campo en tiempo real, los observadores de la unidad central controlan la posición del barrido de cada vibro, siguiendo las posiciones de trabajo asignadas a cada uno de ellos según el *pre-plot* cargado en sus navegadores controlados por GPS-RTX, verificando que lo estén haciendo dentro del radio de tolerancia permitido (2 m). Al mismo tiempo, se está controlando en la cabina el desempeño de cada vibro al recibir por radio las señales de fuerza, fase y distorsión en sus valores medios y máximos (Figura 6). Cualquier punto que se repita, aunque no se vaya a procesar después, debe ser grabado en tiempo y posición, pues este dato es necesario para descontaminar la interferencia al momento de ejecutar el *deblending* de los datos por inversión sísmica, y debe estar incluido en el reporte de posición-tiempo (ACLog) del registro sísmico diario y total.

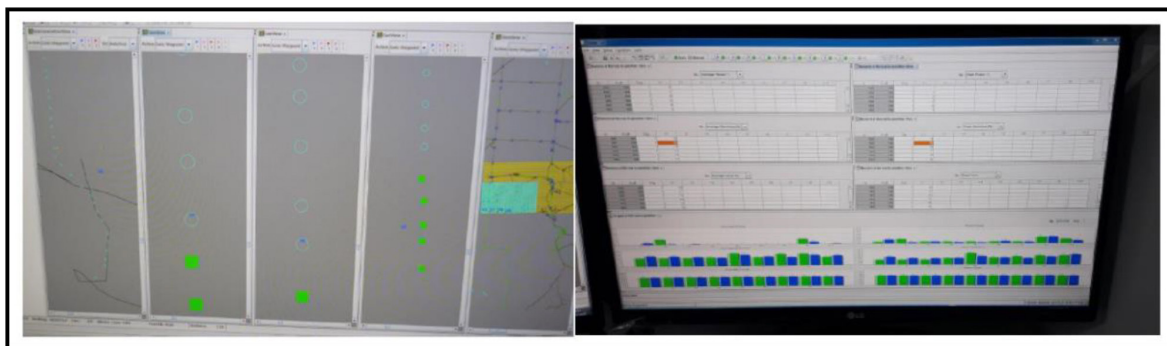


Figura 6. Imagen ilustrativa de las pantallas de la cabina: izquierda QC de posición y derecha QC de fuerza, fase y distorsión para cada vibro operativo.

La operación se realizó sin estacado previo de los puntos a vibrar; los vibros sólo se manejaron por navegación satelital utilizando el sistema GPS-RTX de alta precisión, por lo que los operadores de vibro tuvieron un período de adaptación a trabajar sin estacas y solo con el navegador. Además, la operación fue siempre nocturna para evitar el ruido contaminante causado por el fuerte viento que normalmente hay durante el día en la zona (Figura 7).

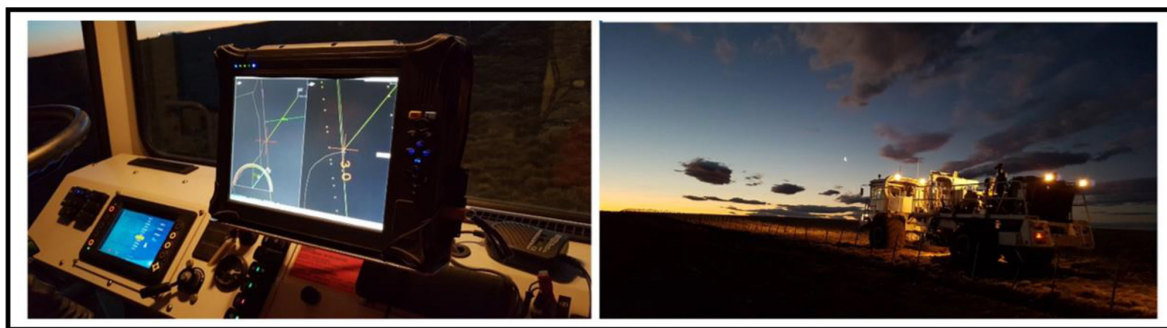


Figura 7. Vibro moviéndose al próximo punto (VP) a barrer, sin estacas y navegando con GPS-RTX NavSat.

Al trabajar con nodos autónomos y vibros operando en forma simultánea y autónoma, la logística de operación es crucial para poder tener éxito en la operación. Para ello se implementó una Gerencia de Registro con la función de coordinar el manejo del material de línea con las tareas que los vibros debían realizar diariamente. En la sísmica convencional estas tareas son responsabilidad principalmente del Observador Sísmico, lo que no es factible en esta modalidad de trabajo.

La Gerencia de Registro debe coordinar diariamente con el grupo de Sismología la cantidad de puntos y la zona del tendido en que va a trabajar cada vibro, y procurar que se carguen diariamente en el navegador de cada vibro las posiciones de *pre-plot* que vaya a ocupar en la jornada. Debe coordinar también con Sismología la entrega a los Observadores de la información de las líneas de nodos plantadas hacia adelante en el avance de los vibros, para no pasar hacia posiciones en que no haya material de nodos cubriendo el patch o plantilla nominal de registro. Dicha plantilla es sólo virtual, pues todos los nodos encendidos reciben señal independientemente, y sólo se selecciona una plantilla cuando se descargan todos los datos de los nodos de una línea receptora.

La Gerencia de Registro también debe coordinar con los Observadores, Sismología y Jefe de Línea el momento de levantar nodos. Cuando ya una línea receptora ha quedado fuera de la plantilla teórica de adquisición, sus nodos se pueden apagar, retirar del terreno y descargar sus datos en la unidad de trabajo para dicho propósito.

Toda la información que los vibros generan, incluyendo las señales completas de los acelerómetros de plancha, de masa de reacción, barrido piloto y señal de ground force de cada barrido y de cada vibro, son salvadas y grabadas en una memoria externa al término de cada jornada diaria. Dicha información es recibida diariamente por el grupo de Sismología de la brigada para su control, que tanto este grupo como la Supervisión Externa realizan al término de cada jornada de registro para asegurar la cantidad, integridad y calidad de los datos adquiridos. Los datos de las memorias externas, más los recibidos por radio en la cabina de observadores, es la información base del QC a realizar diariamente por Sismología en campo base de la brigada.

## **CONTROL DE CALIDAD DE LA OPERACIÓN SÍSMICA AL TÉRMINO DE LA JORNADA DIARIA**

Una vez terminada la labor diaria de los vibradores, sigue un intensivo trabajo de control de calidad de las tareas realizadas, además de verificar el avance de la producción diaria y preparar el programa de trabajo para los vibros y el material de línea de la jornada siguiente.

El primer control se realiza para verificar la validez del barrido de cada uno de los puntos reportados como emitidos durante la jornada, analizando por correlación cruzada entre el barrido grabado por cada vibro en cada punto (archivo SEG-D de las cuatro señales) y el barrido master generado con los parámetros entregados al contratista el primer día de operación (Figura 8).

RM acc. BP acu Ground Force Reference X-Correlación de la Referencia con el piloto Master

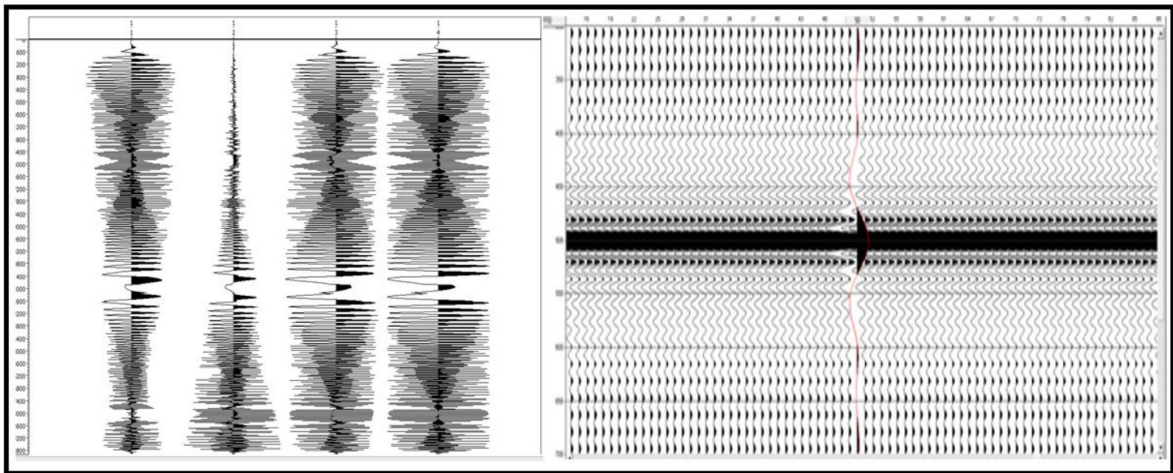


Figura 8. Señales de vibros (archivos SEG-D) y X-correlación con piloto master detectando un barrido malo.

Lo que se recibe y visualiza como control de los vibradores en tiempo real durante la operación, es sólo el valor máximo y promedio de amplitud o fuerza, fase y distorsión de cada vibro en cada barrido (Figura 9). Al final de la jornada diaria se grafican en común los valores máximos de todos los vibradores.

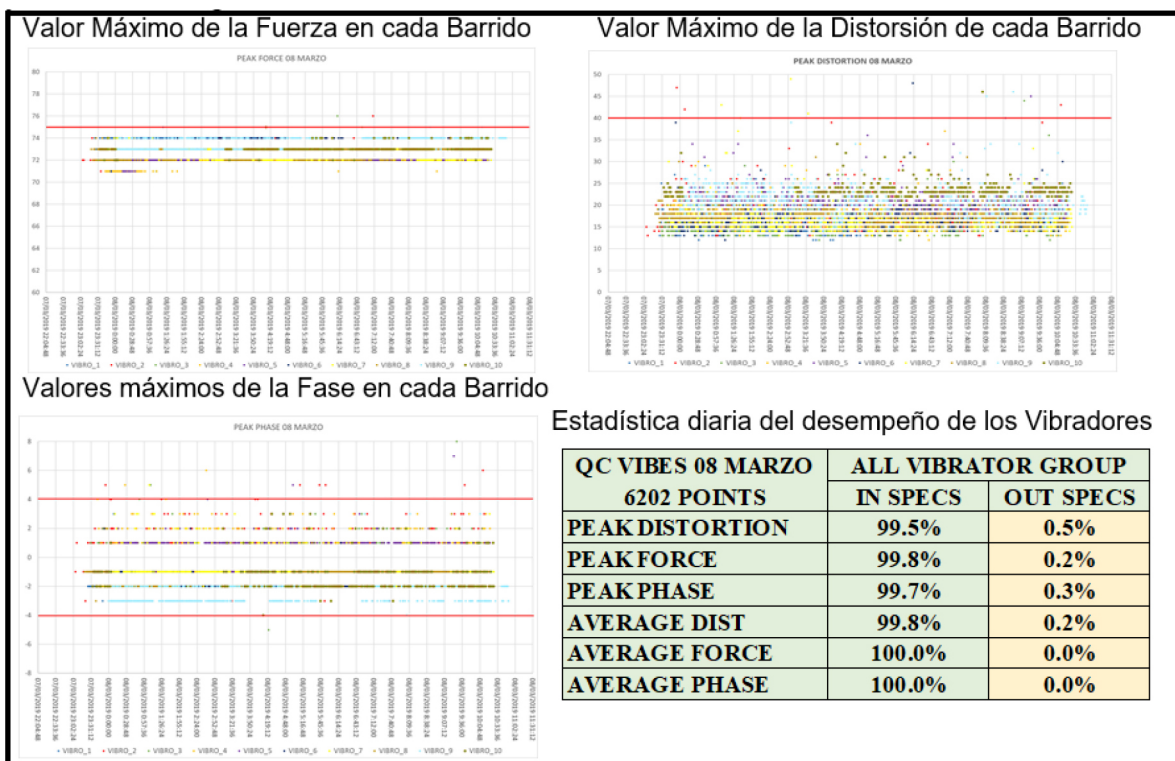


Figura 9. Control del desempeño técnico de los vibradores: respuestas de fuerza, fase y distorsión.

Diariamente al fin de la jornada, se leen todos los archivos VAPS recibidos y se grafica en formato de barras la estadística del desempeño de cada uno de los vibradores, para ir comparando su desempeño día a día. A modo de ejemplo, la Figura 10 muestra la estadística de los cuatro primeros vibros, para su desempeño de distorsión, fase y fuerza, con valores promedio y valores máximos. Este control se realizó diariamente para cada uno de los 10 vibradores que trabajaron en este programa sísmico.



Figura 10. Estadística diaria del desempeño del vibrador. Distorsión, Fase y Fuerza. Promedio y Máximos.

Una vez realizado todo el análisis y control, detectando y descontando los barridos fallidos que no entrarán al proceso (*VOID files*) se contabilizará la producción. En el trabajo de barridos simultáneos, los barridos rechazados igualmente deben estar definidos en el ACLog con su tiempo de inicio de barrido y su posición exacta, pues habrán generado interferencia de señal en los registros (*blending*), por lo que deberán modelarse y descontarse por inversión sísmica del registro “*pseudo blended*”. Diariamente, una vez editados los barridos fallidos y/o repetidos, se genera la carta de trabajo, para visualizar fácilmente cual ha sido la eficiencia del trabajo y los tiempos de interrupción que ha tenido cada vibro. En la Figura 11, nótese la interrupción prolongada del vibro 10 casi al inicio del día y la detención total del vibro 1 al medio de la jornada sin regreso a la operación.

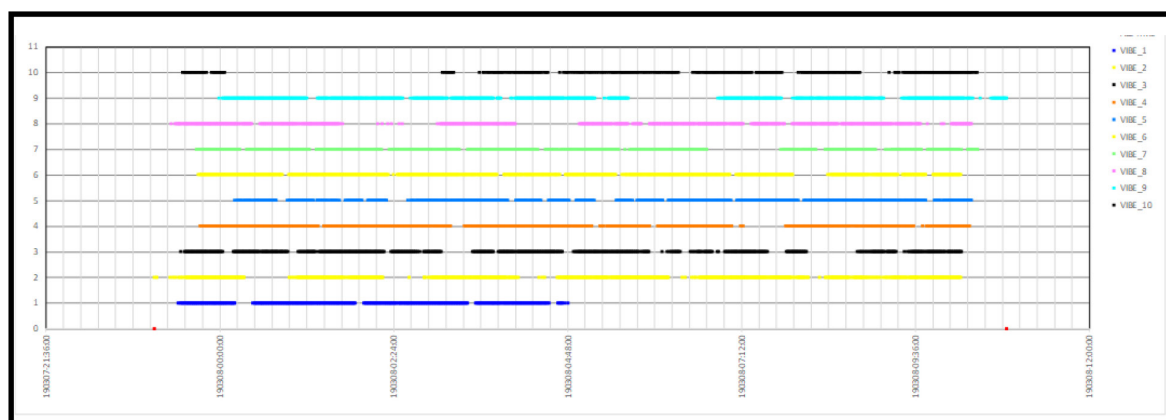


Figura 11. Carta del trabajo diario realizado por los vibradores.

Con los datos de los barridos editados, se certifica cada día la producción de puntos vibrados.

| JD067 VAPS QC |           |            | 10           | VOID FILES  |              | 26        | VAPS_records | 6228      | REPEAT VPs |  | 0 |
|---------------|-----------|------------|--------------|-------------|--------------|-----------|--------------|-----------|------------|--|---|
| FLEET #       | VIBE #    | Num of VPs | FirstVP Time | LastVP Time | Working Time | VP / hour | TB_mismatch  | REPEAT_VP |            |  |   |
| 1             | Vibe 1    | 357        | 23:25:52     | 04:48:10    | 05:22:18     | 66.5      | 19483180     |           |            |  |   |
| 2             | Vibe 2    | 613        | 23:05:42     | 10:13:31    | 11:07:49     | 55.1      | 16363124     |           |            |  |   |
| 3             | Vibe 3    | 684        | 23:27:54     | 10:14:25    | 10:46:31     | 63.5      |              |           |            |  |   |
| 4             | Vibe 4    | 755        | 23:43:46     | 10:20:55    | 10:37:09     | 71.1      |              |           |            |  |   |
| 5             | Vibe 5    | 671        | 00:12:36     | 10:22:41    | 10:10:05     | 66.0      |              |           |            |  |   |
| 6             | Vibe 6    | 807        | 23:42:03     | 10:13:35    | 10:31:32     | 76.7      |              |           |            |  |   |
| 7             | Vibe 7    | 672        | 23:40:42     | 10:27:34    | 10:46:52     | 62.3      |              |           |            |  |   |
| 8             | Vibe 8    | 600        | 23:20:11     | 10:22:31    | 11:02:20     | 54.4      |              |           |            |  |   |
| 9             | Vibe 9    | 690        | 23:59:28     | 10:51:37    | 10:52:09     | 63.5      |              |           |            |  |   |
| 10            | Vibe 10   | 353        | 23:29:30     | 10:27:16    | 10:57:46     | 32.2      |              |           |            |  |   |
|               | ALL VIBES | 6202       | 23:05:42     | 10:51:37    | 11:45:55     | 527.1     |              |           |            |  |   |

Tabla 3. Producción diaria de cada vibro.

Una vez realizado el control de calidad diario de la operación y certificada ésta, se procede con la generación del reporte diario, el que lleva un orden secuencial por el tiempo de GPS del inicio de cada barrido, indexado y acumulativo día tras día de la operación. Cada línea define el número del vibro, el punto barrido con sus tres coordenadas (X, Y, Z), el tiempo GPS de inicio y la longitud del barrido, junto a los valores de desempeño del vibro y calidad de la señal de GPS recibida por el vibro en ese momento. Con estos valores se tiene toda la información necesaria para extraer de la traza única y continua que graba cada nodo, el tramo que corresponde a la señal generada por ese vibro desde ese punto. Si el barrido es de 20 segundos, y se quiere obtener una salida correlacionada de 5 segundos, se extrae una ventana de 25 segundos de la traza del nodo. El formato de este archivo ASCII es el que se muestra parcialmente en la Figura 12.

## CONTROL DE CALIDAD DE LOS DATOS SÍSMICOS REGISTRADOS

Las trazas sísmicas registradas en forma continua por los nodos sólo son posibles de visualizar y controlar en su integridad y calidad una vez descargados los datos *raw* de esos nodos en la

|                            |                                                                            |
|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| File Number                | Columns: 001 to 008                                                        |
| Source Line                | Columns: 017 to 020                                                        |
| Source Point               | Columns: 025 to 028                                                        |
| Source ID                  | Columns: 033 to 040                                                        |
| Source Index               | Columns: 049 to 050                                                        |
| Vibe Status(99 Void)       | Columns: 057 to 059                                                        |
| Julian Day                 | Columns: 065 to 067                                                        |
| DATE                       | Columns: 073 to 082                                                        |
| UTC_Time                   | Columns: 089 to 100                                                        |
| GPS_Time                   | Columns: 105 to 120                                                        |
| VCE-464 Serial #           | Columns: 129 to 132                                                        |
| Vibe ID                    | Columns: 137 to 138                                                        |
| Stiffness                  | Columns: 145 to 148                                                        |
| Viscosity                  | Columns: 153 to 156                                                        |
| Phase Average              | Columns: 161 to 162                                                        |
| Force Average              | Columns: 169 to 170                                                        |
| THD Average                | Columns: 177 to 178                                                        |
| Easting                    | Columns: 185 to 192                                                        |
| Northing                   | Columns: 201 to 209                                                        |
| Elevation                  | Columns: 217 to 221                                                        |
| Satellites                 | Columns: 225 to 226                                                        |
| HDOP                       | Columns: 233 to 235                                                        |
| SURVEY CODE                | Columns: 241 to 243                                                        |
| Wind Average               | Columns: 249 to 251                                                        |
| Sweep Length               | Columns: 257 to 261                                                        |
| .... COLUMNAS 001 A LA 138 |                                                                            |
| 00209637                   | 1756 3150 17563150 1 1 66 2019/03/07 23:05:42.184 1236035160184000 1445 2  |
| 00209638                   | 1756 3149 17563149 1 1 66 2019/03/07 23:07:57.880 1236035295880000 1445 2  |
| 00209639                   | 1780 3147 17803147 1 99 66 2019/03/07 23:18:41.008 1236035939008000 1453 8 |
| 00209640                   | 1756 3148 17563148 1 1 66 2019/03/07 23:18:55.232 1236035953232000 1445 2  |
| .... COLUMNAS 145 A LA 261 |                                                                            |
| 0                          | 0 0 0 70 12 394646.0 4289024.8 177.7 4 1.0 ETE 35 20000                    |
| 0                          | 0 0 0 70 10 394647.9 4289014.4 177.7 4 1.0 ETE 35 20000                    |
| 0                          | 0 0 0 69 15 395368.0 4289006.1 177.7 4 1.1 ETE 35 20000                    |
| 0                          | 0 0 0 70 10 394649.2 4288998.9 177.7 4 1.1 ETE 35 20000                    |

Figura 12. Archivo ACLog de ejemplo mostrando formato y valores para la extracción de datos de los nodos.

Consola Colectora de Datos (DCC) de la central de proceso SmartSolo. La Consola Manejadora de Datos (DCM) de la central manipula los datos de acuerdo con la lectura del código de identidad del nodo que se trabaja, agregando las coordenadas de post-plot y el número de estación que el grupo de Topografía RTX registró al momento de enterrar el nodo en el terreno. Esta consola, además de agregar información de posición y tiempo, transforma los valores de muestras de 24 bits del nodo a un formato de 32 bits IEEE con la estructura del formato SEG-D 8058.

Se exporta la totalidad de los datos raw de traza continua en formato SEG-D, seccionadas en trazas de 60 segundos de longitud para su posterior proceso fuera de la brigada sísmica. Por otra parte, para un control de calidad interno en la brigada, se seleccionan parcialmente trazas con el tiempo de inicio de los barridos (desde el archivo ACLog) y la línea y estaciones receptoras que con estos forman un *Cross-Spread* (o X-Spread).

La ventaja de controlar los datos mediante un X-Spread es que se puede realizar apenas se libera una línea receptora, sin necesidad de esperar a tener las 22 líneas receptoras de un registro virtual completo en domino de fuente. Con el X-Spread se puede comprobar la integridad y buen funcionamiento de los receptores de toda una línea, la calidad de los datos registrados y observar la interferencia de los barridos competidores (*blending*).

En la Figura 13 se grafica una agrupación por receptor común del X-Spread, donde cada una de las fuentes contribuye con una traza a un mismo receptor o receptor común. Esta situación se repite para todas las receptoras del X-Spread. Habiendo un salvo de 24 VPs y 22 líneas receptoras en el patch virtual, tendremos en cada receptor un total de 528 trazas con muestreo espacial muy fino, siendo 15 m el intervalo promedio de las fuentes, con un muestreo espacial óptimo que entrega el método de adquisición CSI.

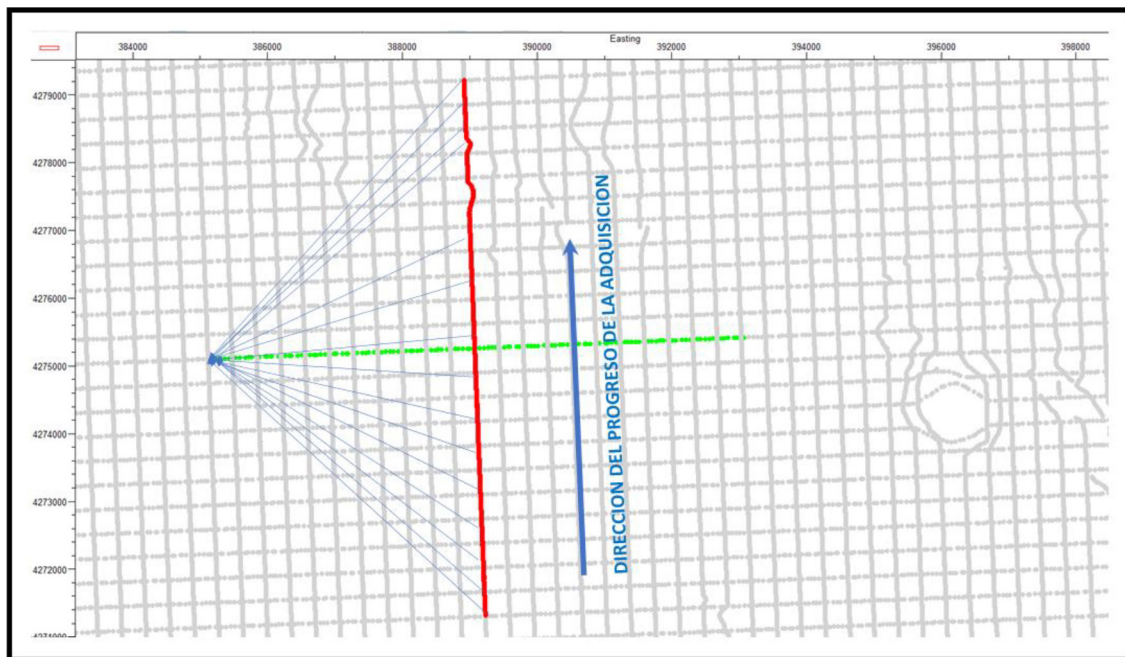


Figura 13. Geometría de agrupación por receptor común de un X-Spread.

Para el control de calidad en campo, luego de haber extraído y convertido a formato SEG-D en el DCM de SmartSolo la totalidad de trazas del X-Spread, en el grupo de Sismología se correlacionan con el barrido piloto o referencia, para luego ordenar por receptor común y también por fuente común (Figuras 13 y 14), y así poder visualizar los datos en ambos dominios. En general, el X-Spread es el orden natural de los datos para procesar el *deblending*, ya

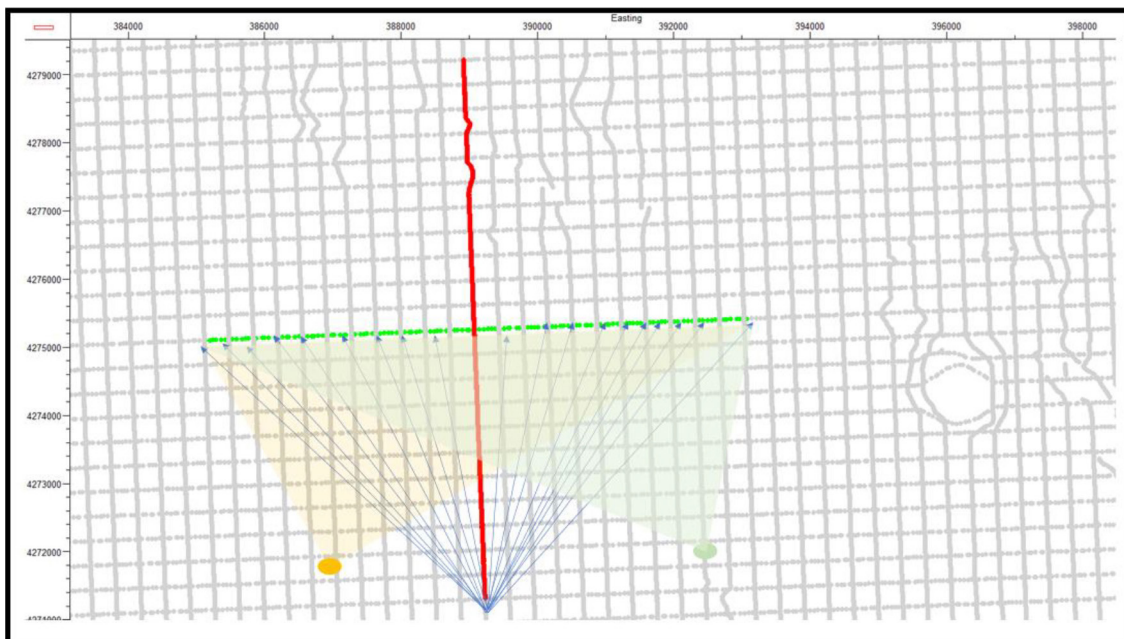


Figura 14. Geometría de agrupación por fuente común del X-Spread. Una fuente sobre todos los receptores.

sea hecho por simple atenuación de ruido aleatorio o bien por inversión sísmica, que modela la interferencia y la resta del registro “*pseudo deblending*” hasta llevar a un mínimo esta interferencia.

En el receptor común del X-Spread las interferencias de los registros competidores que están fuera de este se observan como ruido aleatorio (Figura 15), mientras que al organizar el X-Spread por fuente común, los mismos datos muestran las interferencias como coherentes (Figura 16).

En la agrupación por fuente común del X-Spread (Figura 14), las interferencias de otras fuentes que estén barriendo dentro de la misma ventana de tiempo del registro principal, aparecerán como interferencia o ruidos coherentes en el registro principal. En la Figura 16 se muestran como ejemplo dos puntos de fuentes competidoras, que estarían emitiendo su barrido dentro de la ventana en que se registra el principal seleccionado. El X-Spread es un registro acumulado de varios puntos de fuente, que puede llevar varios días en completarse, pues son varios swath en que esta línea receptora ha permanecido activa.

El ordenamiento por receptor común del X-Spread es conveniente, pues permite la revisión y QC de una línea completa apenas ésta es liberada de la plantilla nominal de registro, sin tener que esperar a tener un registro de fuente completo con sus 22 líneas receptoras del patch. Se puede además empezar a trabajar de inmediato en la separación de los registros mezclados o *deblending*, en modalidad de procesamiento paralelo.

Los puntos de la línea fuente del X-Spread se seleccionan por sus tiempos de inicio del disparo, y aquellos barridos o registros denominados competidores, son aquellos que no están en la línea fuente, pero tienen tiempos de inicio dentro de la ventana de tiempo del barrido del punto fuente seleccionado en el X-Spread.

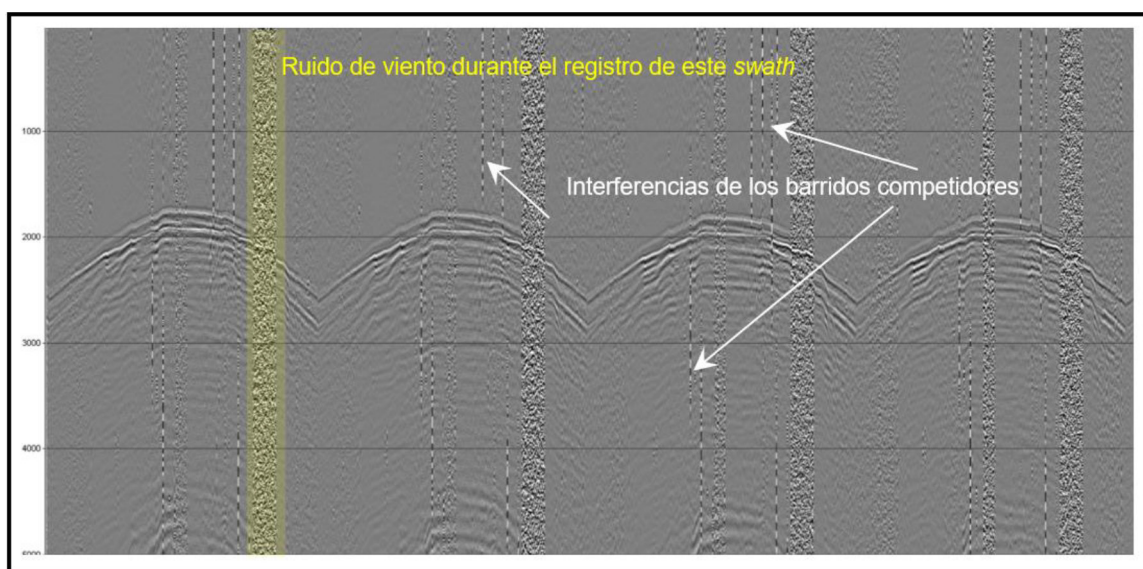


Figura 15. Registros de receptor común en X-Spread. Interferencias de barridos y nivel de ruido ambiente.

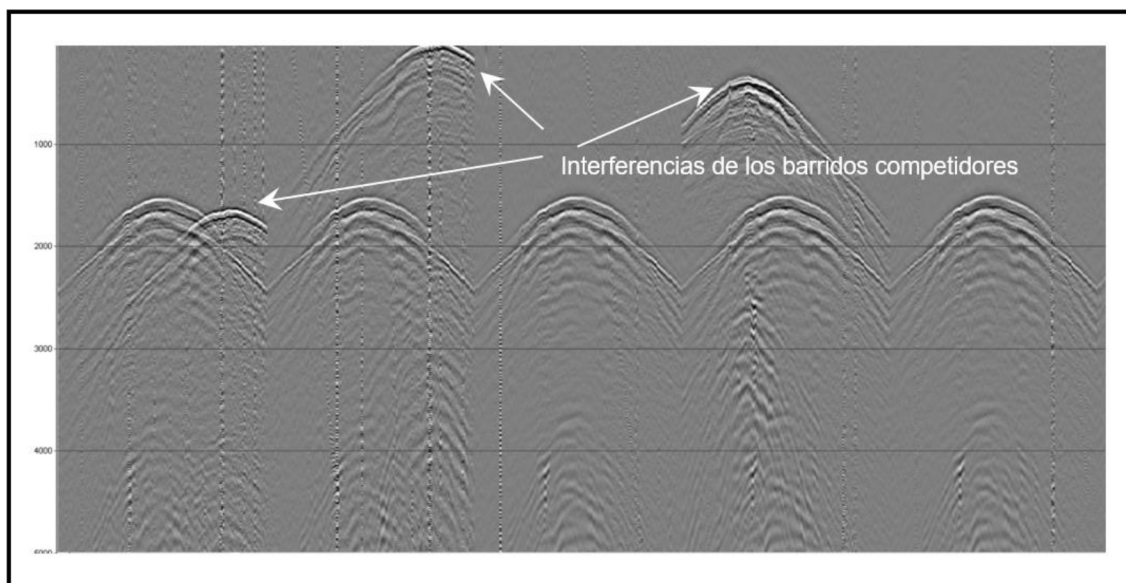


Figura 16. Registros de fuente común en X-Spread. Coherencia en interferencias de registros competidores.

Se puede establecer que, si el retardo de inicio de un registro competidor con respecto al registro seleccionado es menor al largo de salida de correlación, habrá interferencia primaria y armónicas. Si el retardo es mayor al largo del registro correlacionado, sólo habrá contaminación de armónicas, pero no contaminará con las fundamentales y finalmente no habrá interferencia si el barrido siguiente parte después de haber terminado el precedente (método flip-flop tradicional).

En el caso de exportar todos los datos continuamente adquiridos, éstos se organizan primero por línea receptora, luego por cada día de operación en que el nodo estuvo encendido y finalmente por la estación receptora. Por cada día en que una estación receptora de esa línea estuvo encendida hay un registro único SEG-D con tantas trazas como tramos de 60 segundos hay en el período de trabajo del nodo. El despacho de estos datos al centro de proceso externo en disco portátil USB se realiza por líneas receptoras completas, luego de un control de calidad de la integridad y calidad de los datos compilados. El registro no correlacionado con trazas de 60 segundos es la información bruta de todo lo captado por el nodo en un día mientras estuvo activo; su combinación en una traza continua se realizará en el centro de proceso donde se reciba. Es difícil identificar señal en ese registro por no tener coherencia entre traza y traza y no estar correlacionado. Un esquema de la estructura de los datos en formato SEG-D con todos los datos adquiridos se observa en la Figura 17.



Figura 17. Estructura de la grabación de registros brutos no correlados de 60 segundos por línea receptora.

A modo de ejemplo de la grabación de las trazas de 60 segundos, se muestra el primer día (JD064) de la primera estación receptora (RP 1002) de la línea receptora descargada (RL3304) (Figura 18). Las 755 trazas vienen de las 12,5 horas en que estuvo encendido el nodo ese día (entero de 12,5 x 60).

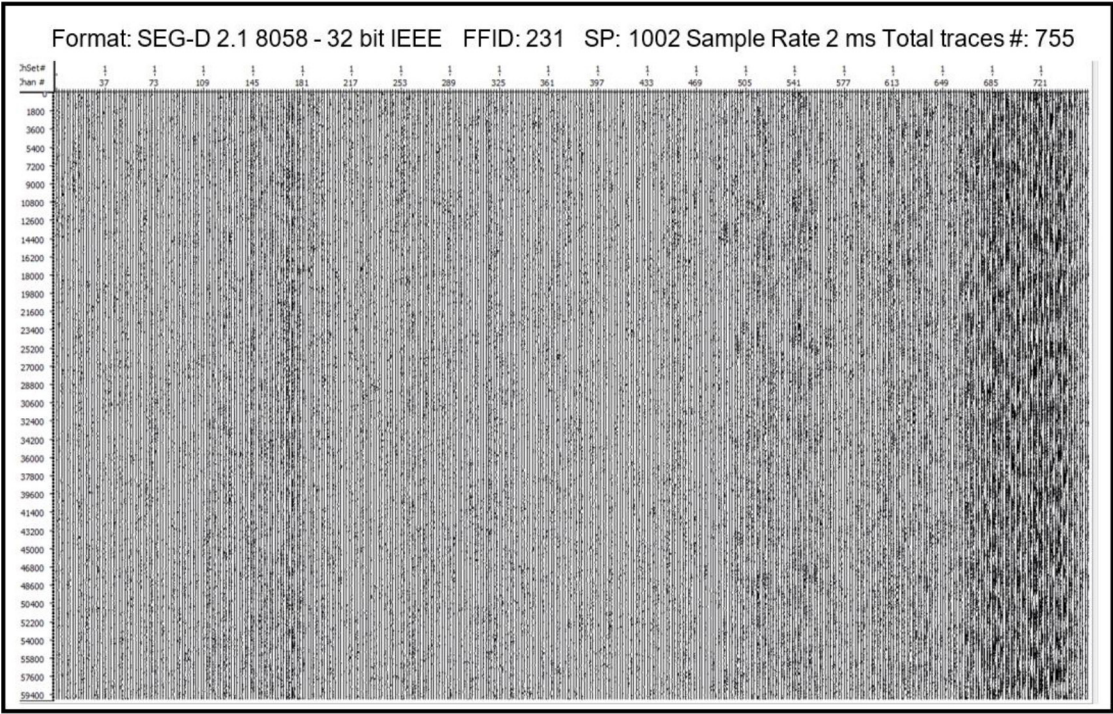


Figura 18. Trazas continuas cortadas en tramos de 60 segundos de lo registrado en un día por un nodo.

La figura anterior nos muestra que es difícil hacer un control de calidad de la traza continua cortada en tramos. Por ello, se realiza un control de calidad de la integridad del volumen total de datos de cada línea receptora enviada, a través de una lectura binaria en Excel de los encabezados de los registros SEG-D del volumen (Figura 19).

| YEAR                                                          | JDAY | FFID | MIN_RP_INT | MAX_RP_INT | AVG_RP_INT   | MIN_R_STN | MAX_R_STN   | COUNT_STNS | SKIP_STNS  |           |                  |                  |          |          |       |
|---------------------------------------------------------------|------|------|------------|------------|--------------|-----------|-------------|------------|------------|-----------|------------------|------------------|----------|----------|-------|
|                                                               |      |      | 18.9       | 99.6       | 60.1         | 1002      | 2018        | 509        | 0          |           |                  |                  |          |          |       |
| YEAR                                                          | JDAY | FFID | RCVR_LINE  | RCVR_POINT | TR_LENGTH(M) | SURF(S)   | # OF TRACES | Surf_East  | Surf_North | Surf_Elev | First GPS(m/s)   | Last GPS(m/s)    | Day/Time | RCVR_INT | KGAIN |
| 19                                                            | 63   | 231  | 3304       | 1002       | 60000        | 2000      | 755         | 371941.5   | 4290425.9  | 244.3     | 1235775331000000 | 1235820572508000 | 12.57    | 72.9     | 24    |
| 19                                                            | 63   | 233  | 3304       | 1004       | 60000        | 2000      | 755         | 372014.3   | 4290429.1  | 244.1     | 1235775331000000 | 1235820572508000 | 12.57    | 43.4     | 24    |
| 19                                                            | 63   | 198  | 3304       | 1006       | 60000        | 2000      | 755         | 372057.7   | 4290430.1  | 244.0     | 1235775355000000 | 1235820595050000 | 12.57    | 90.7     | 24    |
| 19                                                            | 63   | 198  | 3304       | 1008       | 60000        | 2000      | 754         | 372148.3   | 4290433.9  | 244.1     | 1235775379000000 | 1235820595050000 | 12.55    | 27.5     | 24    |
| 19                                                            | 63   | 235  | 3304       | 1010       | 60000        | 2000      | 755         | 372175.8   | 4290434.9  | 244.0     | 1235775331000000 | 1235820572508000 | 12.57    | 86.6     | 24    |
| 19                                                            | 63   | 237  | 3304       | 1012       | 60000        | 2000      | 755         | 372262.3   | 4290439.0  | 243.7     | 1235775331000000 | 1235820572508000 | 12.57    | 32.1     | 24    |
| 19                                                            | 63   | 239  | 3304       | 1014       | 60000        | 2000      | 755         | 372294.4   | 4290440.0  | 243.6     | 1235775307000000 | 1235820608510000 | 12.58    | 90.9     | 24    |
| 19                                                            | 63   | 241  | 3304       | 1016       | 60000        | 2000      | 754         | 372385.2   | 4290444.2  | 243.6     | 1235775379000000 | 1235820595050000 | 12.55    | 49.4     | 24    |
| 19                                                            | 63   | 243  | 3304       | 1018       | 60000        | 2000      | 755         | 372434.6   | 4290446.1  | 243.7     | 1235775355000000 | 1235820595050000 | 12.57    | 64.5     | 24    |
| 19                                                            | 63   | 245  | 3304       | 1020       | 60000        | 2000      | 755         | 372499.1   | 4290448.0  | 243.5     | 1235775331000000 | 1235820572508000 | 12.57    | 35.2     | 24    |
| 19                                                            | 63   | 247  | 3304       | 1022       | 60000        | 2000      | 755         | 372534.2   | 4290449.9  | 243.6     | 1235775355000000 | 1235820595050000 | 12.57    | 65.4     | 24    |
| 19                                                            | 63   | 249  | 3304       | 1024       | 60000        | 2000      | 755         | 372599.6   | 4290451.8  | 243.7     | 1235775307000000 | 1235820608510000 | 12.58    | 71.2     | 24    |
| 19                                                            | 63   | 251  | 3304       | 1026       | 60000        | 2000      | 754         | 372670.7   | 4290455.0  | 243.9     | 1235775401000000 | 1235820595050000 | 12.55    | 48.0     | 24    |
| 19                                                            | 63   | 253  | 3304       | 1028       | 60000        | 2000      | 755         | 372718.6   | 4290457.0  | 244.6     | 1235775331000000 | 1235820572508000 | 12.57    | 57.4     | 24    |
| Continúa hasta últimas estaciones ....                        |      |      |            |            |              |           |             |            |            |           |                  |                  |          |          |       |
| 19                                                            | 63   | 507  | 3304       | 2000       | 60000        | 2000      | 755         | 401877.8   | 4291628.2  | 168.5     | 1235775331000000 | 1235820572508000 | 12.57    | 69.9     | 24    |
| 19                                                            | 63   | 478  | 3304       | 2002       | 60000        | 2000      | 754         | 401947.6   | 4291631.0  | 168.3     | 1235775379000000 | 1235820595050000 | 12.55    | 53.8     | 24    |
| 19                                                            | 63   | 480  | 3304       | 2004       | 60000        | 2000      | 755         | 402001.3   | 4291633.0  | 168.4     | 1235775355000000 | 1235820595050000 | 12.57    | 55.2     | 24    |
| 19                                                            | 63   | 482  | 3304       | 2006       | 60000        | 2000      | 754         | 402056.5   | 4291634.9  | 168.1     | 1235775379000000 | 1235820595050000 | 12.55    | 50.9     | 24    |
| 19                                                            | 63   | 484  | 3304       | 2008       | 60000        | 2000      | 755         | 402107.3   | 4291637.1  | 168.2     | 1235775331000000 | 1235820572508000 | 12.57    | 81.0     | 24    |
| 19                                                            | 63   | 486  | 3304       | 2010       | 60000        | 2000      | 754         | 402188.2   | 4291641.0  | 168.1     | 1235775379000000 | 1235820595050000 | 12.55    | 19.0     | 24    |
| 19                                                            | 63   | 508  | 3304       | 2012       | 60000        | 2000      | 756         | 402207.2   | 4291641.0  | 168.1     | 1235775307000000 | 1235820608510000 | 12.58    | 97.1     | 24    |
| 19                                                            | 63   | 509  | 3304       | 2014       | 60000        | 2000      | 755         | 402304.2   | 4291645.1  | 168.1     | 1235775355000000 | 1235820595050000 | 12.57    | 27.4     | 24    |
| 19                                                            | 63   | 490  | 3304       | 2016       | 60000        | 2000      | 754         | 402331.6   | 4291646.1  | 168.2     | 1235775379000000 | 1235820595050000 | 12.55    | 92.9     | 24    |
| 19                                                            | 63   | 488  | 3304       | 2018       | 60000        | 2000      | 755         | 402424.4   | 4291648.9  | 168.1     | 1235775331000000 | 1235820572508000 | 12.57    |          | 24    |
| SUMMARY JD063 JD064 JD065 JD066 JD067 JD068 JD069 JD070 JD071 |      |      |            |            |              |           |             |            |            |           |                  |                  |          |          |       |

Figura 19. Control de calidad de los archivos SEG-D de cada línea receptora.

Figura 19. Control de calidad de los archivos SEG-D de cada línea receptora.

## EVALUACIÓN DEL MÉTODO CSI SEGÚN PROCESO (PSTM) DE LOS DATOS ADQUIRIDOS

El proceso de datos adquiridos continuamente sin interrupción, de trazas individuales en cada receptor y registrados con interferencias o mezclas de otros barridos en ventanas de tiempo compartidas, requiere de un pre-proceso especial antes de entrar a un flujo normal de proceso, como el que se aplica a datos registrados de manera convencional.

El primer paso en este pre-proceso es componer los tramos de trazas de 60 segundos en registros de trazas continuas, haciendo esta tarea por línea receptora completa, extrayendo las trazas sísmicas completas por cada receptor según los tiempos de inicio de los barridos definidos en el ACLog, y de largo equivalente a la longitud del barrido más el tiempo de escucha. Antes de correlacionar los datos

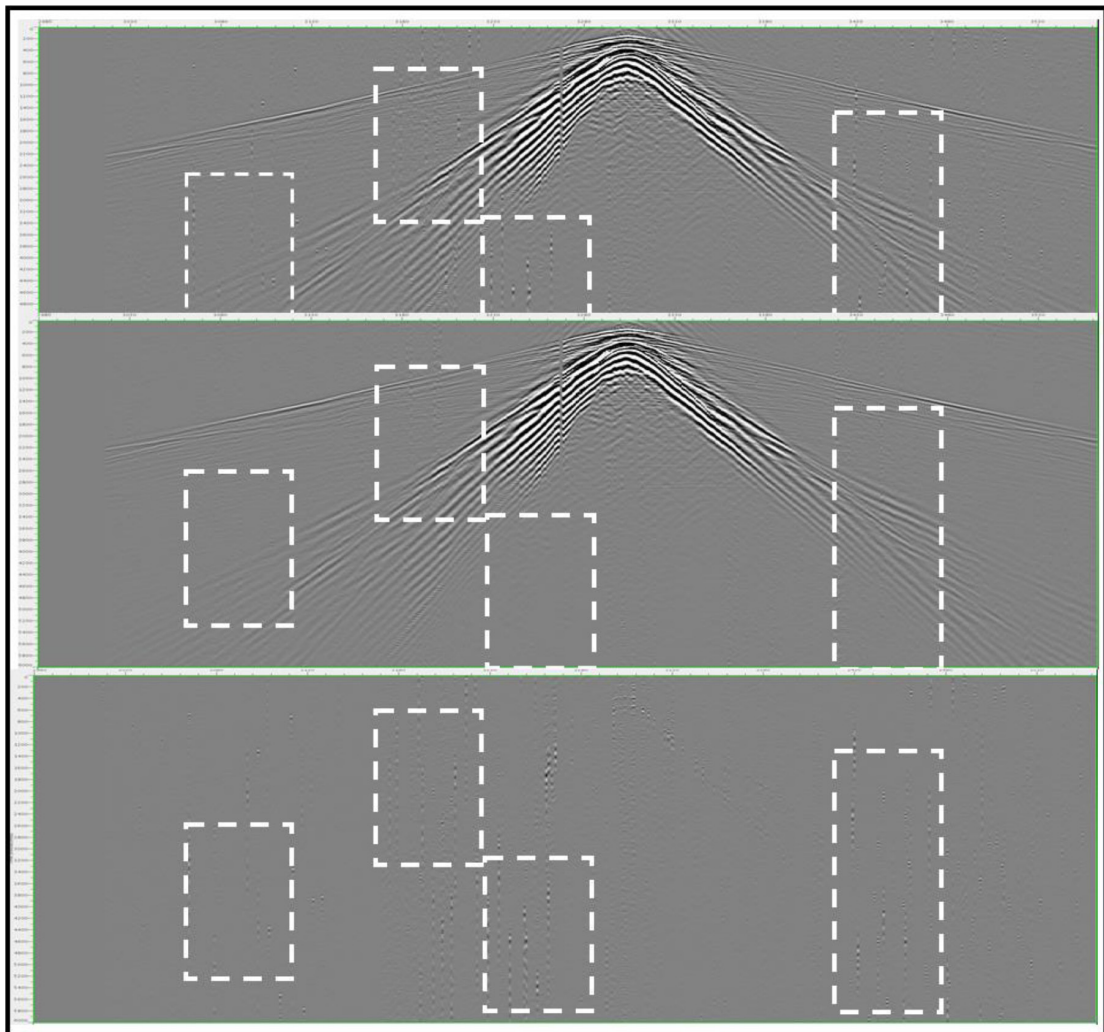


Figura 20. Arriba: Pseudo deblended receptor común del X-Spread. Centro: ADM Deblended del mismo. Abajo: Lo removido por el proceso ADM *deblending*.

con el piloto, se realiza una atenuación de las armónicas observadas en las trazas de offsets muy cortos.

Una vez correlacionados los datos con el piloto o referencia, éstos entran a una primera etapa de separación simplemente por los tiempos iniciales del barrido de las fuentes (pseudo *deblending*)

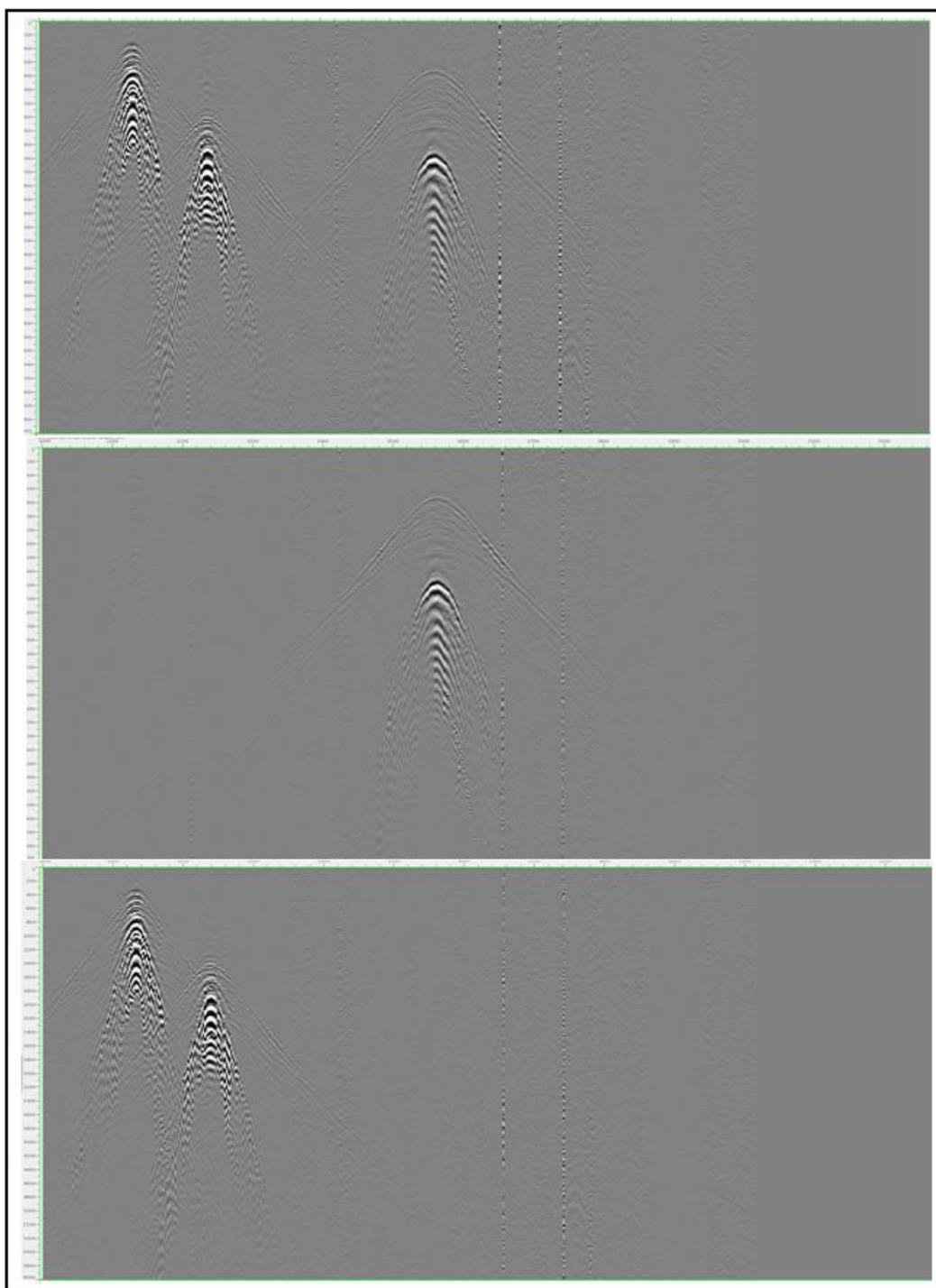


Figura 21. Arriba: Pseudo deblended fuente común del X-Spread. Centro: ADM Deblended del mismo. Abajo: Lo removido por ADM *deblending*.

(Figuras 20 y 21), para luego entrar a una segunda etapa de *deblending* realizada por inversión sísmica propia del método CSI, llamada ADM por sus siglas en inglés (Alternating Direction Method). Todo el *deblending* o separación se realiza en el dominio del X-Spread y la duración del mismo dependerá del volumen de datos y la metodología empleada. La salida del proceso ADM se remuestréa a 4 ms y longitud de 6 segundos, y así los datos quedan preparados para entrar a una secuencia normal de proceso con objetivo final PSTM.

El procesamiento de los datos después del *deblending* no se diferencia del flujo normal para

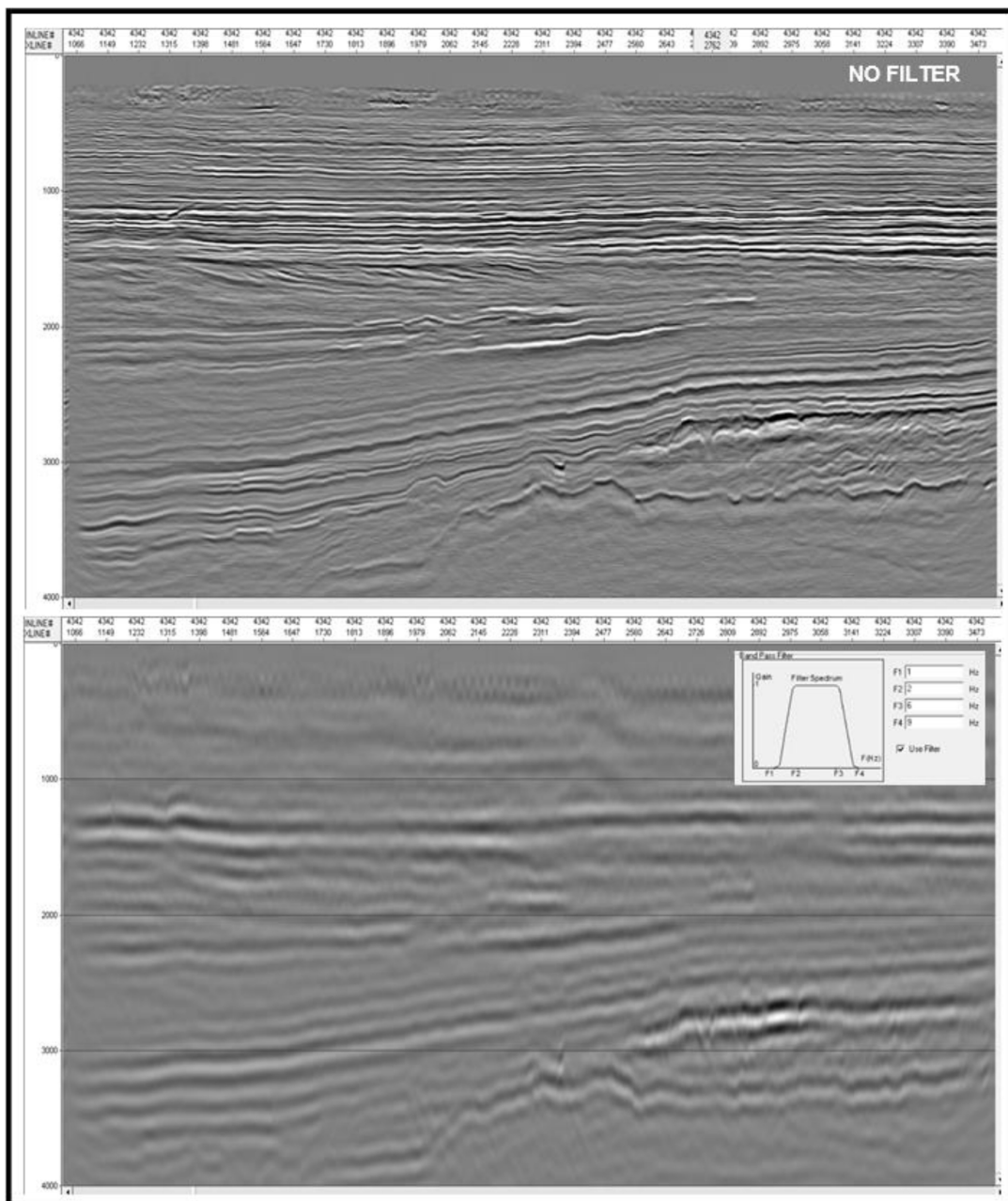


Figura 22. Arriba: IL-4342 del PSTM final del proceso. Abajo: IL-4342 con aplicación de filtro pasabanda 1-2-6-9 Hz.

una sísmica 3D convencional, por lo que sólo se muestra el resultado de una línea (*inlines*) del cubo procesado, haciendo resaltar la calidad del dato obtenido (Figura 22). Es notable la clara definición de los eventos profundos de la cuenca por la buena coherencia de las bajas frecuencias ( $\leq 5$  Hz), definición que no se había visto en datos anteriores de adquisición convencional 3D. Parte del buen resultado es efecto del método CSI, pero también es un factor importante destacar el uso de los arreglos de fuente y geófonos de frecuencia natural baja, además del empleo de vibradores capaces de aplicar mayor fuerza en las bajas frecuencias.

## EFICIENCIA DEL TRABAJO DE CAMPO CON LA NUEVA TECNOLOGÍA

El trabajo del grupo con la nueva tecnología empleada en este programa de adquisición sísmica 3D en El Turbio Este significó una experiencia totalmente nueva, tanto en el campo como en el manejo y control de calidad de los datos por Sismología en el campamento base. Para la labor de campo significó un cambio brusco para los operadores de vibradores que, viniendo de un trabajo de orientación visual por estacas, con puntos definidos y barridos iniciados por control de Observadores, debieron pasar a desplazarse por navegador GPS y ser ellos quienes, en forma independiente, inician el barrido del vibrador sin esperar comando externo alguno. En la adquisición normal convencional de 4 vibros por punto, es sólo un vibro y su operador el que comanda el grupo de cuatro, mientras que los otros tres se limitan a seguir al líder manteniendo la distancia. Muchos de esos operadores de vibros “pasivos” de cada grupo de cuatro carecían la experiencia de operar como líderes, por lo que fue lento su aprendizaje como operador independiente.

La coordinación del manejo, plantado y recogida del material de línea, tuvo que ser también aprendida, al no tener los observadores un control visual del tendido de línea activa necesaria para mantener la producción de los vibradores dispersos por distintas zonas del tendido. Las curvas de producción diaria y semanal (Figuras 23 y 24) permiten observar cómo se fue adquiriendo este aprendizaje.

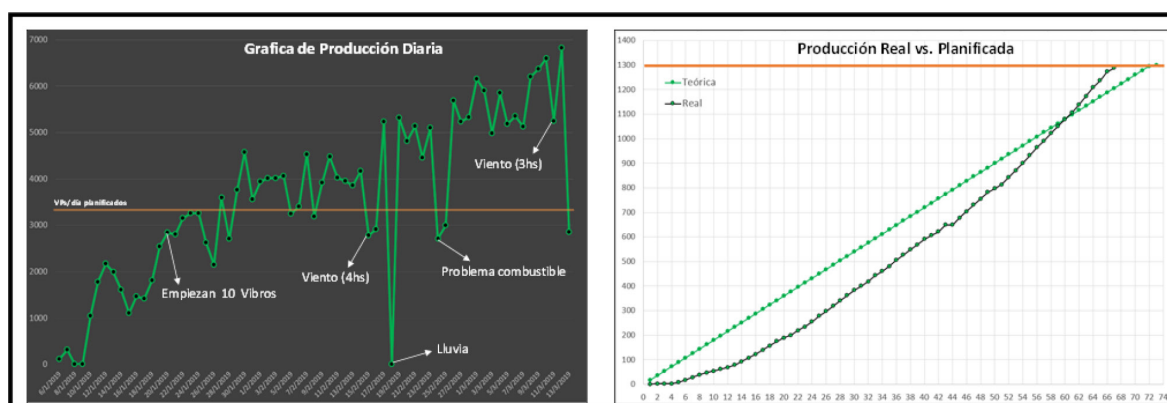


Figura 23. Gráficas de producción diaria, muestran el crecimiento de la producción diaria.

La planificación para completar el registro de 1300 km<sup>2</sup> en 73 días fue cumplida, anticipándose en 6 días su finalización. Cumplir con estos tiempos era uno de los objetivos principales del proyecto, ya que la actividad ganadera en la zona solo permitía esa ventana de tiempo para el trabajo.

Las demoras vinculadas a la falta de experiencia del grupo en este tipo de adquisición, más algunos problemas logísticos iniciales, se vieron reflejadas en el avance semanal, tardando 6 semanas para completar el 50% del registro. El 50% final del proyecto fue completado en sólo 3,5

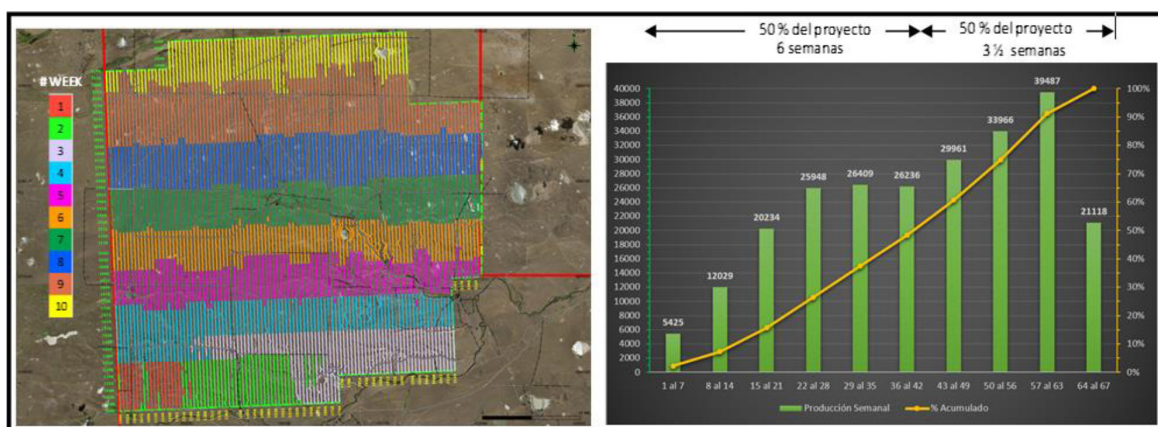


Figura 24. Gráficas de producción semanal mostrando el aprendizaje adquirido en las primeras semanas.

semanas, evidenciando el aprendizaje y acumulación de experiencia del grupo sísmico.

Siendo la adquisición sísmica en modalidad de barridos simultáneos independientes algo totalmente nuevo para la operación del grupo sísmico, luego de un período de aprendizaje se comprueba que el sistema trabajó con una buena eficiencia, alcanzando en la segunda mitad del proyecto un promedio de 4987 VPs/día.

## CONCLUSIONES

El trabajo de adquisición sísmica de 1300 km<sup>2</sup> del proyecto El Turbio Este fue abordado con la tecnología CSI (*Compressive Seismic Imaging*) que por primera vez se empleó en Argentina, sin haber precedentes ni experiencia previa de su uso. La técnica de CSI, con un muestreo aleatorio e irregular pero estudiado en su diseño, permitió conseguir una mayor densidad de trazas (trazas/km<sup>2</sup>) que una sísmica convencional, utilizando el mismo esfuerzo de energía en fuentes vibratorias.

La registración con nodos autónomos y sensor único, con un peso de material de línea notoriamente menor que el empleado en una sísmica convencional (1:6 o más), requirió un menor uso de vehículos y personal de línea, con una menor exposición al riesgo en la operación y dejando una huella mucho menor en el terreno.

El uso de un solo vibro por punto y la eliminación de arreglos de receptores, junto a la

capacidad de los elementos empleados para emitir y recibir bajas frecuencias, permitió registrar un mayor ancho de banda, limitado en la sísmica convencional por el efecto de filtro espacial de los arreglos y correcciones estáticas intra-arreglos.

El uso de barridos simultáneos independientes como parte inherente del método, demostró que es posible separar los registros mezclados, sin percibirse diferencias con los registros obtenidos de manera individual, separados en el tiempo total del registro. La calidad del producto final procesado ha demostrado esta afirmación.

Si bien la necesidad de separar los registros mezclados significa agregar una etapa adicional en el procesamiento de los datos, lo que consume tiempo y recursos, el haber realizado una adquisición de mayor superficie en menor tiempo, menor costo y menores riesgos operativos, justifica el mayor tiempo necesario para el proceso de los datos.

Las ventajas de estas nuevas técnicas de adquisición sísmica han llegado para quedarse y reemplazar a la sísmica de reflexión convencional, como lo ha demostrado este proyecto. El uso progresivo de estas técnicas hará que los grupos sísmicos vayan adquiriendo mayor experiencia, y así lograr mejores rendimientos, aumentando el *fold* de mezcla.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecen a las autoridades de ENAP Sipetrol Argentina, a ConocoPhillips y al Instituto de Energía de Santa Cruz por permitir esta publicación. A todo el personal de campo del contratista de servicios sísmicos UGA S.A. por haberse enfrentado con resolución y éxito a este nuevo trabajo, aprendiendo y empleando técnicas nuevas, desconocidas para ellos hasta ese entonces. Se agradece también a ENAP Sipetrol Argentina por la organización que supo prestar para la supervisión técnica del control de calidad y eficiencia de la operación, y a la supervisión de HSE y de Relaciones con la Comunidad de ENAP Sipetrol Argentina durante toda la operación de este proyecto sísmico.

## REFERENCIAS

- Felix J. Herrmann, Randomized sampling and sparsity. Getting more information from fewer samples. *Geophysics*, Washington, 75, February 2010.
- Haneet, W. and J. Herrmann, December 2010. Sparsity-promoting recovery from simultaneous data: a compressive sensing approach, Seismic Laboratory of Imaging & Modeling – The University of British Columbia.
- Millis Keith, SAE Exploration, Compressive Seismic Imaging and Source Driven Shooting in Land Acquisition: Aklaq 3D, An Alaskan North Slope Case Study, 2017 SEG International Exposition and 87th Annual Meeting.

Ray Abma and Mark S. Foster, Simultaneous Source Seismic Acquisition, Geophysical Development Series  
No.18, © 2020 by Society of Exploration Geophysicists.