



Congreso Mexicano del Petróleo

18 - 21 de junio, 2025 · Acapulco, Gro.

**Eficiencia, innovación y  
sostenibilidad:**

Retos y soluciones del sector petrolero

# **“Modelado, diseño y adquisición de datos sísmicos 4D-3C-HR utilizando sismómetros de última generación en un campo de producción de la Cuenca Petrolera de Veracruz México”**

Rafael Ávila-Carrera  
Luis Manuel Escobar-Soto  
Humberto Constante-Galván  
Ernesto González-Flores

René Solano-Bahena  
Marco Aurelio Téllez-Quijano  
Amine Ourabah  
Victor Villamizar



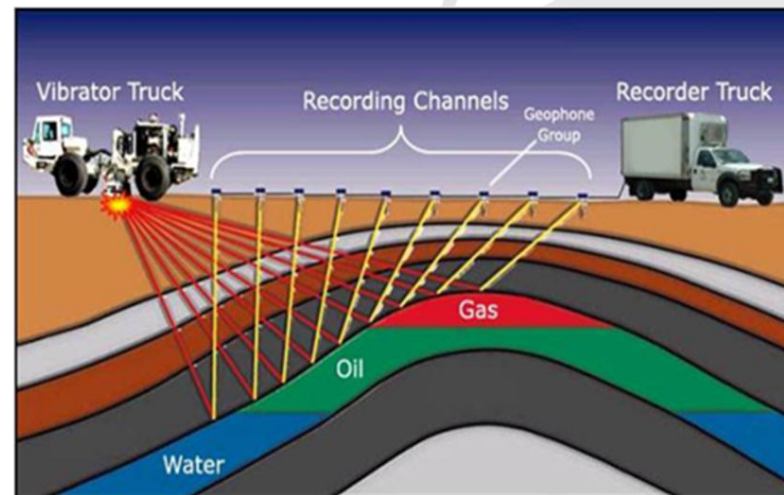
## Objetivo



**Objetivo:** Mostrar una nueva tecnología propia del IMP que considere adquisiciones sísmicas de bajo costo, procesamiento inteligente e interpretación rápida de datos sísmicos 4D-3C con bajo impacto social y ambiental, para la localización de zonas de paga no drenadas u omitidas, en yacimientos areno-arcillosos de la Cuenca de Veracruz.

### Impacto técnico:

Se ubicarán zonas en el subsuelo con aceite remanente en campos de producción o maduros, mediante una nueva tecnología sísmica 4D-3C, única en México y exclusiva del IMP.



*Adquisición de datos sísmicos 4D con sistema Vibro-Seis.*

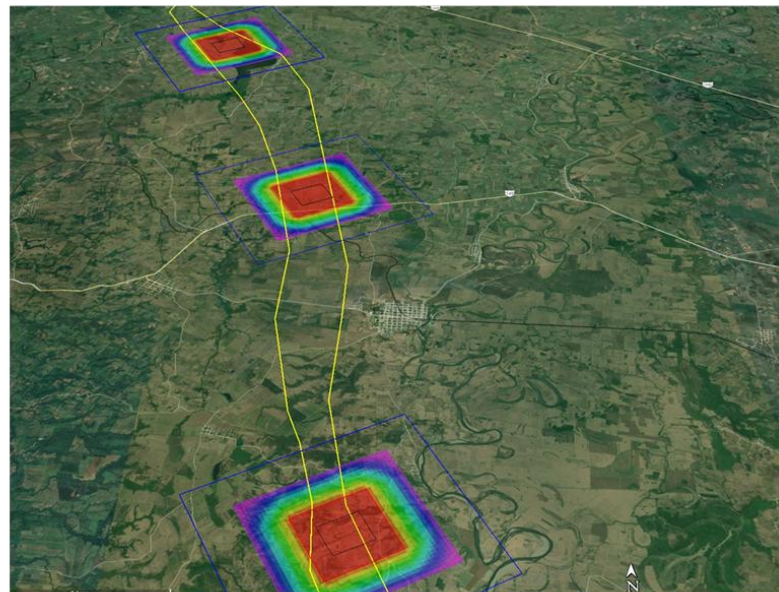
**Eficiencia, innovación y  
sostenibilidad:**

Retos y soluciones del sector petrolero

# Introducción



- Los campos petroleros no cuentan con modelos de caracterización dinámica actualizados, mismos que pueden crearse con apoyo de la imagen sísmica 3D, midiendo en periodos determinados de tiempo y monitoreando la estructura del subsuelo y sus cambios en las características geológico-petrofísicas.
- Se requiere observar cómo estas características cambian con el tiempo y verificar el modelo dinámico.
- Idealmente, se deben repetir las adquisiciones sísmicas 3D. Esto es, sísmica 4D convencional.
- Resulta ser muy costoso, requiere mucho esfuerzo logístico y organizacional en las brigadas, es lento (requiere de la repetición de una línea base sísmológica) y además, puede tener gran impacto ambiental.



*Diseño de adquisición de datos sísmicos 4D.*

## Introducción



- En este estudio, se utiliza una metodología innovadora basada en acelerómetros piezoeléctricos de una sola componente (1C) con un amplio rango dinámico y respuesta plana en un rango de 1 Hz a 125 Hz.
- Permite reducir costos, minimizar el impacto ambiental y mejorar la calidad de los datos adquiridos.
- Plantados dos veces en diferentes lapsos de tiempo para simular una adquisición 4D-3C.
- En este tipo de adquisiciones se emplean arreglos de geófonos para hacerlos de tres componentes (3C).
- Empleo de 3,540 nodos equivalente a 1,180 estaciones receptoras con 3 acelerómetros acoplados en 3C.



*Acoplamiento de geófonos 3C.*

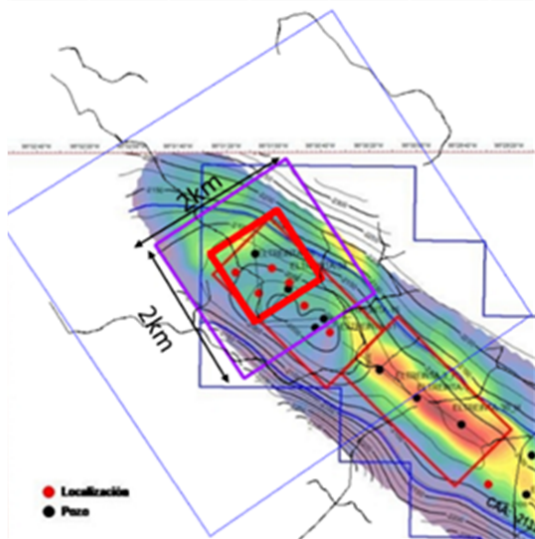


# Desarrollo de la Metodología

## Diseño inicial

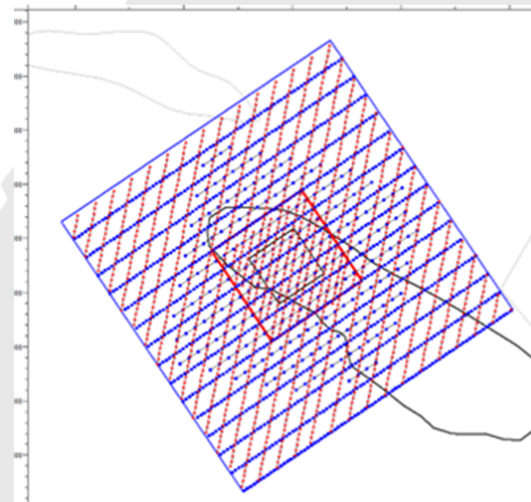


- Ubicación del estudio. Campo al sur de Estado de Veracruz, México.
- Diseño de adquisición planeado. Espaciamiento entre fuentes de 100m y entre líneas fuente 400m.
- Distancia entre estaciones receptoras de 75 y 200 m, así como el intervalo entre líneas receptoras de 200 y 400m.
- Offset máximo de 7,000m en superficie.
- 3,500m en profundidad.



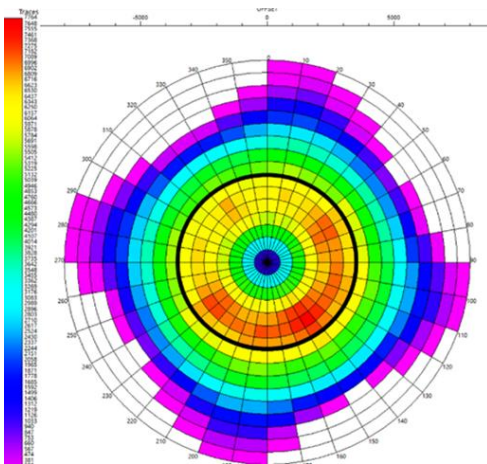
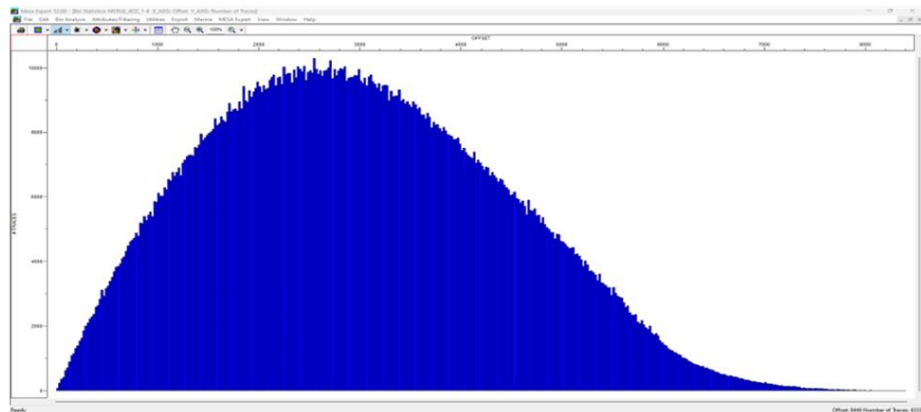
*Diseño de adquisición inicial.*

*BIN de 12.5m x 25m.  
Diseño planeado y su localización.  
Puntos fuente son de color rojo  
Puntos receptores son de color azul.*



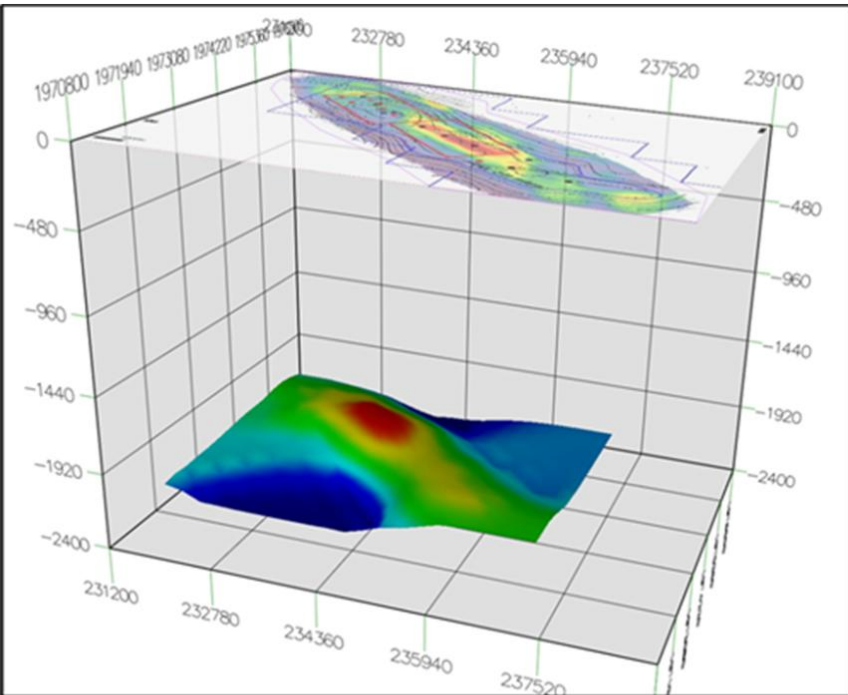
# Desarrollo de la Metodología

## Diseño inicial



- Con esta primera propuesta de diseño, el apilamiento nominal (full-fold) fue de 101 trazas por BIN.
- Se puede observar un comportamiento homogéneo de apilamiento.
- Cálculo estadístico global se realiza mediante graficas de barras (con información de cada BIN).
- Tendencia de cantidad de trazas y offsets.
- Offset óptimo está entre los 2,400 y 3,000m.
- Cálculo estadístico de relación entre sectores azimutales – offsets – cantidad de trazas.
- “Diagrama de Rosa”.
- Comportamiento de la cantidad de trazas constante hasta los 3,000m.
- Cada nivel de offset a 500m y cada Angulo a 10°
- Distribución homogénea azimutal y de offsets planteada.

# Desarrollo de la Metodología Modelado de trazado de rayos



- El trazado de rayos está enfocado a la estructura de interés.
- Estructura utilizada en el modelo para el cálculo del trazado de rayos (la escala vertical esta exagerada).
- Se define la capa de reflejo que, para este trabajo, es la estructura mostrada.
- Se definen parámetros elásticos homogéneos por arriba y por debajo de la estructura.
- Los parámetros elásticos se definieron con base en información de pozos.
- Tres factores importantes:

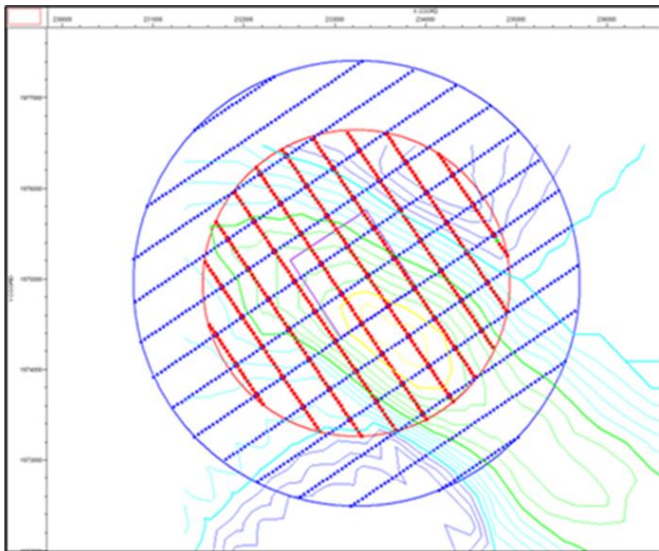
1. El modelo esta simplificado a dos capas, una sobre la estructura y otra debajo de la misma.
2. Las dos capas se consideran homogéneas e isotrópicas.
3. Se considera las velocidades de cada una para el cálculo de la onda-convertida.

# Desarrollo de la Metodología

## Diseño sísmico ajustado



- Se obtuvo el diseño de adquisición sísmica ajustado para el campo de estudio (pre-plot).



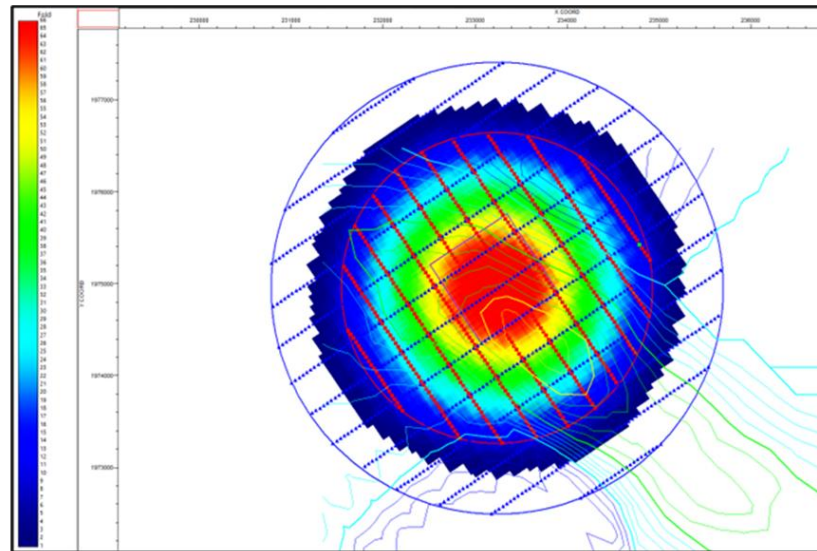
*Diseño de adquisición sísmica final.*

*La propuesta ajustada se adecuó al enfoque del objetivo entre 3 y 5 km de profundidad.*

*Azul: Zona de receptoras 19 km<sup>2</sup>.*

*Rojo: Zona de fuentes 4 km<sup>2</sup>.*

*Centro: Polígono de enfoque 1 km<sup>2</sup>.*



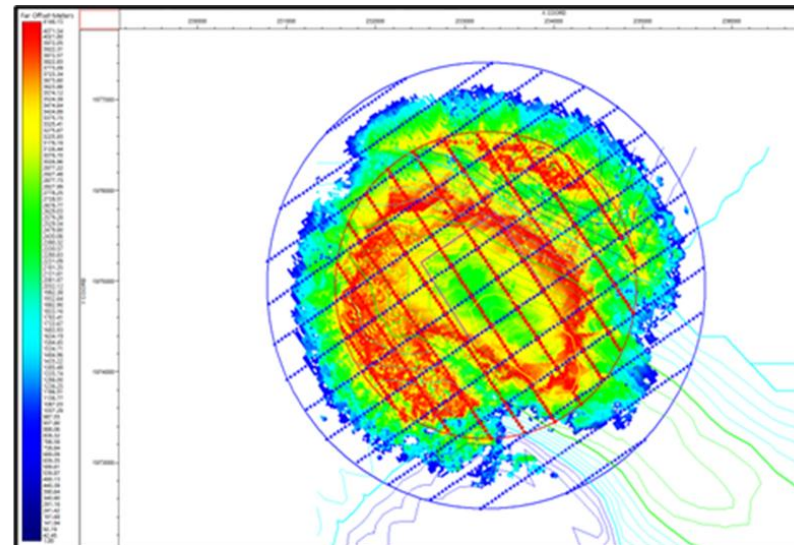
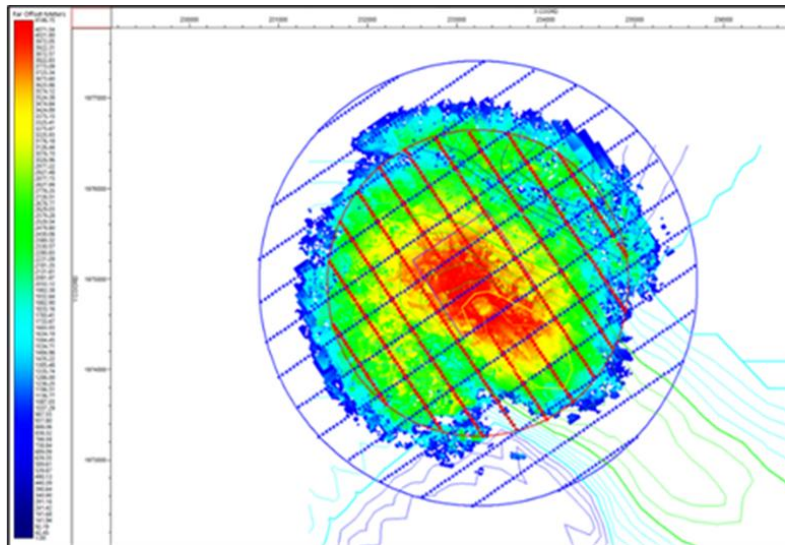
*Diagrama de Rosa. Se muestra la distribución azimutal y el buen cubrimiento para todos los offsets. Bin 25 x 25m.*

**Eficiencia, innovación y sostenibilidad:**

Retos y soluciones del sector petrolero

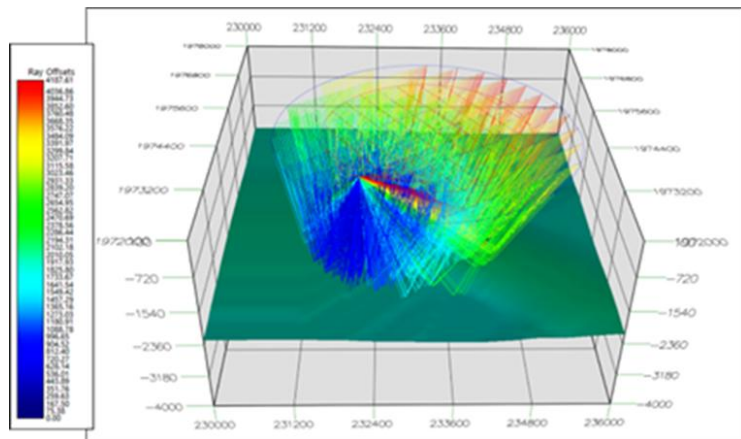
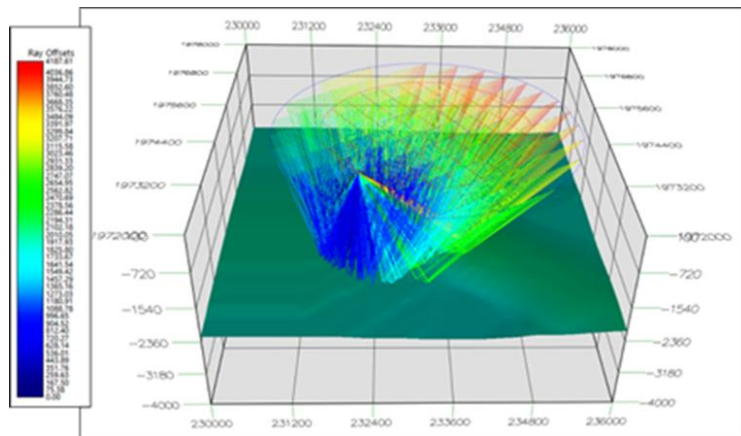


# Desarrollo de la Metodología Diseño sísmico ajustado



- Diagrama de offsets lejanos, calculado por trazado de rayos sobre la estructura de interés para la onda-P (izq.) y para la onda-convertida (der.)
- Contraste en la distribución de los offsets lejanos para los casos presentados.
- En el caso de la onda-convertida la distribución de dichos offsets se concentran mayormente sobre los flancos.
- Por el contrario, la distribución de offsets para la onda-P, se concentran al centro de la estructura

# Desarrollo de la Metodología Diseño sísmico ajustado

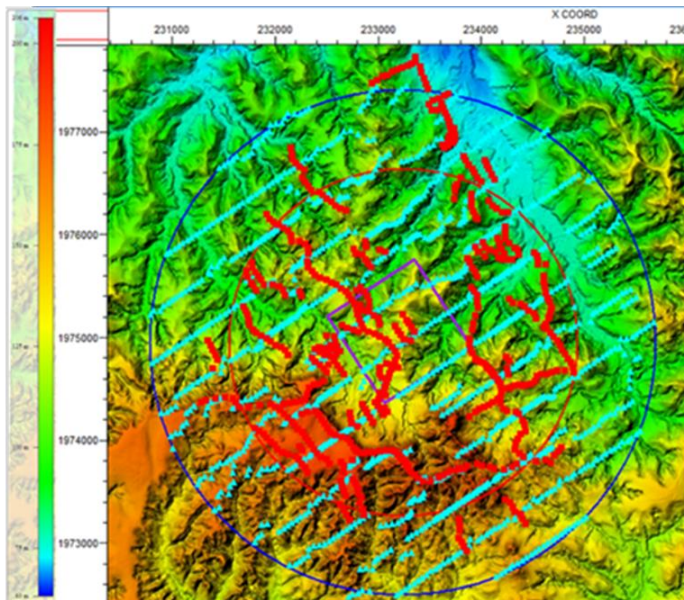


- Este efecto lo podremos observar desde otro ángulo (3D) en las imágenes del trazado de rayos.
- Se muestra el cálculo del trazado de rayos de onda-convertida (abajo) y de onda-P (arriba).
- Los colores de los rayos corresponden al offset.
- Es claro que los rayos más lejanos conciernen a los calculados con la onda-convertida.
- Comparación de las imágenes de la onda-convertida y -P, los rayos que salen de la fuente pasan la estructura para el caso de la onda-convertida, mientras que para el caso de la onda-P, no logran cruzar la estructura de interés.
- Por esta razón los rayos calculados para la onda-S son los que generan mayores offsets.

# Desarrollo de la Metodología Diseño sísmico (post-plot)

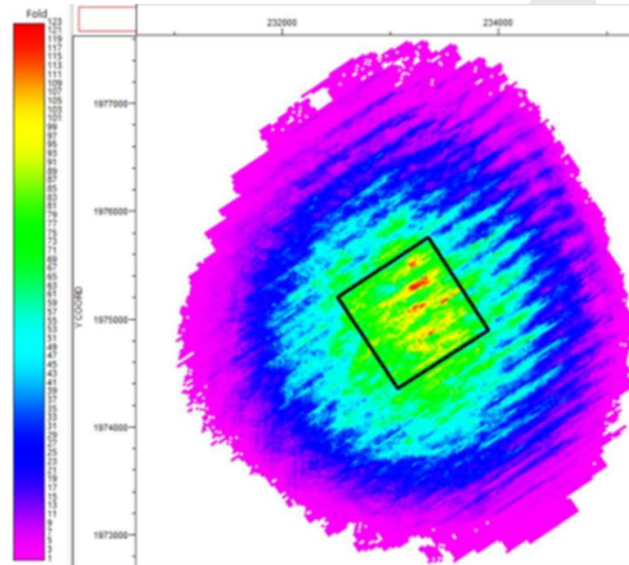


- Las condiciones del terreno, cuestiones sociales y ecológicas definen en gran medida la ubicación de fuentes y receptoras.
- Fuente de energía mini-vibros.
- Puntos fuente = color rojo; Receptoras = color azul.



*Despliegue de fuentes y receptoras (post-plot) sobre el mapa de elevaciones*

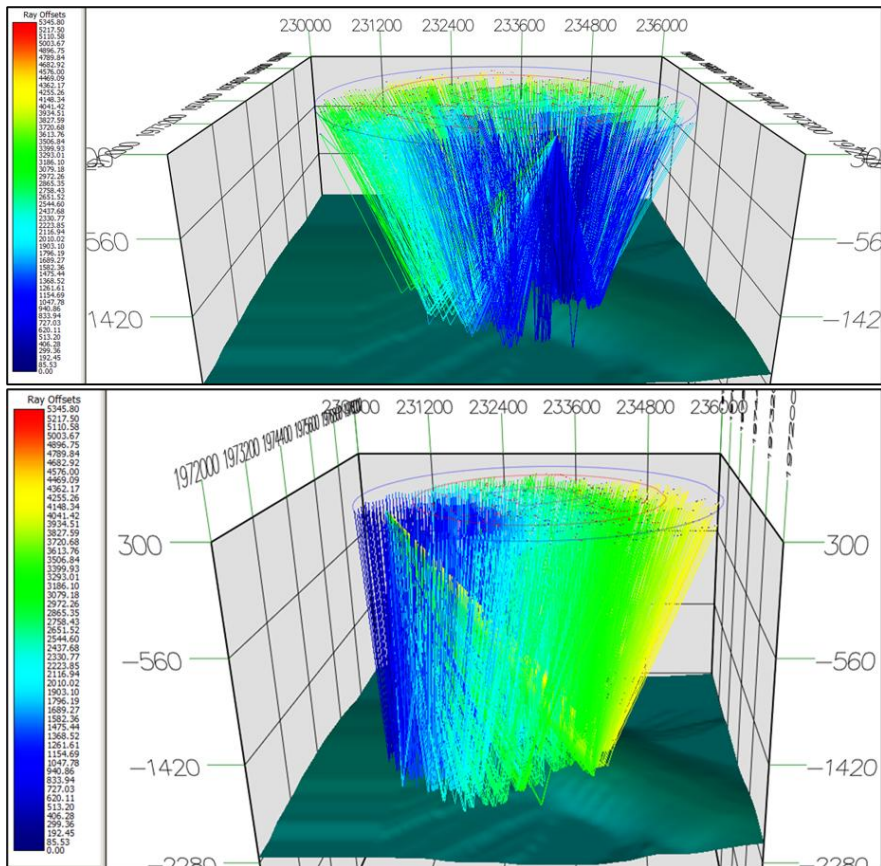
- Se observa un cubrimiento homogéneo y buena distribución azimuthal de la iluminación para el diagrama (post-plot) dado el considerable desplazamiento de fuentes.



*Diagrama de cubrimiento full-fold, para el post-plot de la adquisición.*



# Desarrollo de la Metodología Diseño sísmico (post-plot)



- Resultados para el trazado de rayos con respecto al post-plot del estudio.
- El modelo utilizado es el mismo que se utilizó y explicó para el pre-plot.
- Cálculo de la onda-P (arriba)); onda-convertida (abajo). Ejemplo con fuentes en los flancos.
- Efectos de los rayos que pueden cubrir y cruzar la estructura dependiendo de su profundidad.
- La estructura se ilumina adecuadamente.
- La onda-convertida aporta más cobertura en los flancos de la estructura, mientras que la onda-P concentra sus trayectorias al centro del diseño.
- Coincide con la parte más superficial de la zona de interés.



# Desarrollo de la Metodología Sistema de adquisición y equipo



- El STRYDE Node es un sensor sísmico nodal autónomo, compacto y resistente.
- Se basa en un acelerómetro piezoeléctrico de un solo componente.
- Ofrece un amplio rango dinámico y una respuesta instrumental plana en todo el ancho de banda de frecuencias.
- El nodo está diseñado como una unidad sellada, sin puntos de conexión eléctrica externos.
- Se comunica con otros componentes del Sistema *Nimble* de STRYDE a través de un enlace de datos óptico.
- Se carga de forma inalámbrica cuando se coloca en la unidad de carga y extracción de datos.
- Los nodos también pueden registrar ondas de corte si se instalan horizontalmente (Ourabah et al., 2021).
- En este levantamiento combinamos tres nodos por estación para formar 1,180 estaciones de tres componentes.



Nodo STRYDE



Sistema de carga y extracción de datos Nimble.

**Eficiencia, innovación y  
sostenibilidad:**  
Retos y soluciones del sector petrolero

# Desarrollo de la Metodología Adquisición de datos sísmicos



*Personal  
realizado el  
sembrado  
receptoras y  
configuración  
3C.*



*Camiones  
vibradores  
(Vibroseis)  
utilizados como  
fuente de energía  
de ondas -P y -S.*

- Las fases operativas desarrolladas en campo fueron: Gestoría; Medición topográfica de fuentes y receptoras; Prueba de campo; Plantado de nodos; Grabación de datos sísmicos; Levantado de nodos y Descarga-armado de shot-gathers.
- En el presente trabajo se mencionan los aspectos técnicos-operativos desarrollados en campo durante la adquisición.



*Posicionamiento de punto base receptor.*



**Eficiencia, innovación y  
sostenibilidad:**

Retos y soluciones del sector petrolero

# Desarrollo de la Metodología Adquisición de datos sísmicos

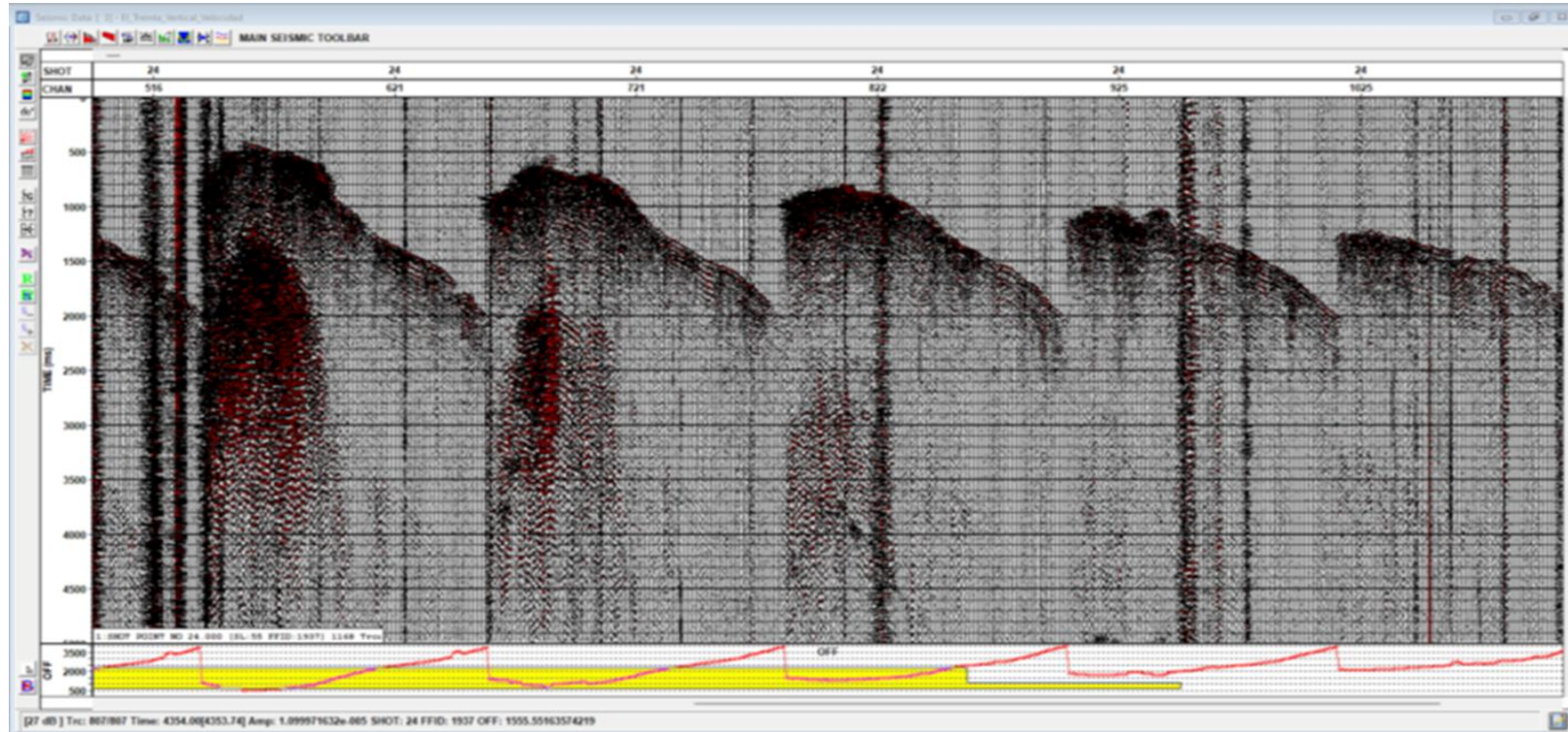


*Supervisión de maniobras para la grabación de datos sísmicos.*

- Se plantaron 3,540 nodos equivalente a 1,180 estaciones receptoras (3C).
- El programa medido fue de 1,198 receptoras.
- El faltante de nodos plantados se debe a predios en los cuales no se otorgaron los permisos de paso.
- Para iniciar la grabación se deben tener establecidos y acordados los parámetros técnicos del proyecto.



# Desarrollo de la Metodología Adquisición de datos sísmicos



*Shot-gather, componente vertical. Los datos sísmicos desplegados son velocidades. Primera adquisición 3D-3C*

**Eficiencia, innovación y sostenibilidad:**  
Retos y soluciones del sector petrolero



## Resultados y Conclusiones



- Se presentaron resultados del modelado, diseño y adquisición de datos sísmicos 4D-3C-de alta resolución (HR) utilizando sismómetros de última generación en un campo de producción de la Cuenca Petrolera de Veracruz México.
- Metodología innovadora desarrollada por el IMP, la cual se basó en el empleo de 3,540 nodos equivalente a 1,180 estaciones receptoras con 3 acelerómetros que fueron acoplados en una estructura ortogonal para simular geófonos 3C.
- La estructura 3C de los acelerómetros empleados y el plantado de estos, en dos lapsos de tiempo diferentes (4D), dieron como resultado la grabación del comportamiento elástico y dinámico del subsuelo.
- Se obtuvieron cálculos estadísticos pre-plot y post-plot del diseño de adquisición y del modelado con trazado de rayos.
- Se describió un panorama general de los aspectos operativos durante la adquisición de datos sísmicos 4D-3C-HR en campo.

## Resultados y Conclusiones



- Por su parte, el uso de los sensores STRYDE en el proyecto demostró ser un avance significativo en la adquisición sísmica de alta resolución.
- Estos sensores, con su diseño compacto y su capacidad de operación autónoma continua de hasta 28 días, permitieron reducir notablemente la logística y los costos operativos.
- Además, su implementación en el campo permitió maximizar la cobertura sísmica sin necesidad de talar la vegetación, respetando el entorno natural y las condiciones sociales de la zona.
- En términos operativos, la combinación de estos sensores con una fuente de energía de vibro-sismo en lugar de cargas sísmicas tradicionales, reforzó el enfoque de bajo impacto ambiental del proyecto.
- Se realizó la discusión de los resultados para secciones de tiros con geometría y de sus implicaciones sobre el contenido del ruido sísmico para las siguientes etapas de procesamiento e interpretación y sus posibilidades de éxito en la caracterización dinámica de zonas de producción de campos maduros.



# GRACIAS...!!