



ESTUDIO GEOFÍSICO

RADAR DE PENETRACIÓN TERRESTRE (GPR)

“MONTERREY”

SERVICIOS GEOLÓGICOS – ECONÓMICOS Y AMBIENTALES
S.A. DE C.V.
www.sgea.com.mx



1. OBJETIVOS.....	3
2. ALCANCES.....	4
3. MARCO TEÓRICO.....	4
3.1 Métodos geofísicos electromagnéticos de exploración.....	4
3.2 Radar de Penetración Terrestre (GPR).....	4
4. EQUIPO DE ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS.....	7
5. DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO.....	9
6. RESULTADO.....	9
Recorrido 2.....	9
Recorrido 3.....	10
Recorrido 4.....	13
Recorrido 6.....	14
Recorrido 7.....	14
Recorrido 12.....	14
Recorrido 14.....	15
Recorrido 15.....	15
Resumen general.....	15
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	16
8. PERFILES PROCESADOS.....	17
PEMEX 2.....	17
PEMEX 3.....	19
PEMEX 4.....	23
PEMEX 5.....	25
PEMEX 6.....	27
PEMEX 7.....	30
PEMEX 8.....	32
PEMEX 9.....	34
PEMEX 12.....	37
PEMEX 14.....	40
PEMEX 15.....	41

1. OBJETIVOS

El presente estudio tuvo como objetivo principal **localizar una tubería específica de PEMEX en el subsuelo de un área de la ciudad de Monterrey, México**, empleando tecnología de radar de penetración terrestre (GPR, por sus siglas en inglés). Este objetivo estuvo orientado a proporcionar información precisa y confiable para la planificación y ejecución de proyectos en la zona.

Los objetivos específicos incluyeron:

1. **Delimitar la ubicación exacta de la tubería:**
 - Identificar su posición en términos de profundidad y distancia desde el inicio de los perfiles levantados.
2. **Detectar posibles riesgos o interferencias en el subsuelo:**
 - Evaluar la presencia de objetos enterrados, zonas de terreno alterado o cualquier otra anomalía que pudiera afectar la integridad de la tubería o la viabilidad de trabajos relacionados.
3. **Proveer información técnica para decisiones operativas:**
 - Ofrecer datos detallados que respalden la planificación de excavaciones o inspecciones en torno a la tubería objetivo.
4. **Validar la eficacia del GPR para este tipo de estudios:**
 - Confirmar la capacidad del radar para identificar la tubería bajo las condiciones geológicas y urbanas específicas del área de Monterrey.

Estos objetivos permitieron enfocar el análisis y los resultados del estudio en la localización de la infraestructura crítica solicitada por el cliente.

2. ALCANCES

Con la finalidad de cumplir con el objetivo, se realizaron tendidos de Radar de Penetración Terrestre (GPR por sus siglas en inglés), también conocido como georadar, abarcando un mallado que cubriera la zona de estudio. Se llevaron a cabo un total de 15 levantamientos de georadar, con líneas de longitud variable que iban desde menos de 10 metros hasta más de 1 kilómetro, alcanzando una longitud total de aproximadamente 6300 metros lineales.

Cada inicio y final de línea fueron marcados en campo tras realizar los levantamientos. Los datos recolectados fueron posteriormente procesados en gabinete utilizando el software **GPRPy**, al cual se le aplicaron diversas metodologías de tratamiento de datos, como filtros y ajustes básicos, con el fin de mejorar la visualización de las anomalías y estructuras captadas durante el levantamiento.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 **Métodos geofísicos electromagnéticos de exploración**

Estos métodos consisten en diversas técnicas indirectas que permiten estimar la distribución de las variaciones de las propiedades electromagnéticas (permitividad eléctrica, permeabilidad magnética y resistividad eléctrica) en el subsuelo.

Como parte de los estudios para realizar la caracterización del subsuelo en el área ubicada en Monterrey, Nuevo León, se efectuaron una serie de mediciones geofísicas utilizando la técnica de Georadar o GPR (Radar de Penetración Terrestre). El objetivo fue caracterizar la geometría del subsuelo en los primeros 4 metros de profundidad, así como identificar elementos antropogénicos y posibles estructuras geológicas presentes en la zona de estudio.

3.2 **Radar de Penetración Terrestre (GPR)**

El GPR ha sido usado para una gran variedad de aplicaciones como son: determinar el espesor de horizontes de suelo y roca, detección de cavidades en el subsuelo, túneles, tuberías, así como para detectar plumas de contaminación, estructuras civiles, detección de objetos enterrados en estudios arqueológicos, para encontrar el espesor de hielo o permafrost y estudios del grosor de la capa de asfalto en carreteras, etc. (Parasnisi, 1996)

El Radar de Penetración Terrestre tiene sus fundamentos en la teoría electromagnética, en las ecuaciones de Maxwell.

Los parámetros electromagnéticos (permitividad dieléctrica, permeabilidad magnética y conductividad) de los materiales presentes en el subsuelo son los que controlan la propagación de la señal. Las reflexiones de estas señales son detectadas por una antena receptora (en un sistema mono-estático, una sola antena transmite y registra). Estas señales generan una serie de registros de ondas electromagnéticas reflejadas en un perfil de espacio-tiempo que definen las características estratigráficas del subsuelo y las anomalías geológicas en el mismo.

Al desplazar la antena sobre la superficie se registra el conjunto de reflexiones producidas, con lo que se obtiene una imagen bidimensional de las reflexiones bajo la línea de prospección. La penetración de la señal varía de acuerdo con las condiciones de humedad y compactación de los materiales del subsuelo Figura 1.

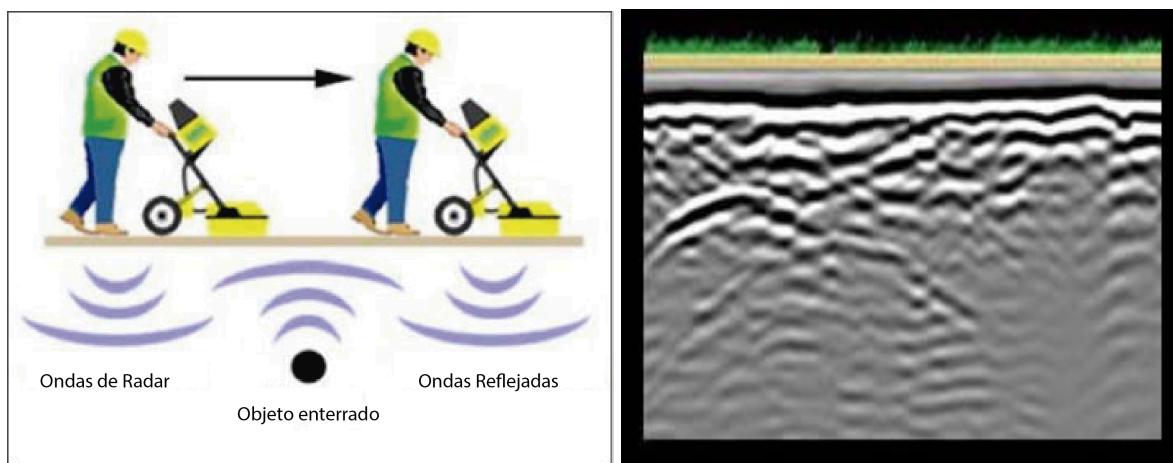


Figura 1 Esquema de la adquisición y radargrama

<i>Material</i>	<i>Atenuación dB m⁻¹</i>	<i>Rango de permitividad relativa</i>
Aire	0	1
Asfalto seco	2 – 15	2 – 4
Asfalto húmedo	2 – 20	6 – 12
Arcilla seca	10 – 50	2 – 6
Arcilla húmeda	20 – 100	5 – 40
Concreto seco	2 – 12	4 – 10
Concreto húmedo	10 – 25	10 – 20
Agua	0.01	81
Hielo	0.1 – 2	4
Caliza seca	0.5 – 10	7
Caliza húmeda	1 – 20	8
Arena seca	0.01 – 1	2 – 6
Arena húmeda	0.5 – 5	10 – 30
Arenisca seca	2 – 10	2 – 5
Arenisca húmeda	4 – 20	5 – 10
Agua salada	100	81
Suelo arenoso seco	0.1 – 2	4 – 10
Suelo arenoso húmedo	1 – 5	10 – 30

Tabla 1 Atenuación y constante dieléctrica relativa de varios materiales medidas a 100 Mhz (Daniels, 2004).

Aquí está implícito el retorno de la señal, la magnitud y carácter de la señal de retorno es controlado por la geometría y el contraste de impedancia del objeto generador de la señal de retorno.

El comportamiento físico fundamental es el retardo de propagación entre el tiempo en que la fuente emite la señal y el tiempo en el que cualquier eco regresa al detector. Este tiempo de retardo es determinado por la distancia a y desde el objetivo dividido por la velocidad a la cual las ondas se propagan a través del material circundante. La esencia del GPR (y de todos los radares) es medir el tiempo de retardo. A mayor tiempo de retardo mayor la distancia al objetivo, asumiendo condiciones de velocidad uniformes.

No importa como sean adquiridos los datos de radar, la forma más común de visualizar es mostrar la amplitud de la señal contra el tiempo de retardo. La detección presupone que la señal desde el objetivo es mayor que las señales de fondo.

4. EQUIPO DE ADQUISICIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS

Para la realización de este estudio se hizo uso del georadar de la marca **PROCEQ ®**, modelo **GS 8000**, GPR de frecuencia modulada de onda continua escalonada, con un rango de 200 a – 3440 MHz, con un ancho de banda efectivo 3200 MHz, cuenta con un receptor GNSS GPS multibanda + Glonass + Galileo + Beidou, la profundidad de penetración máxima es de 10 m esta dependerá de las condiciones del suelo (Figura 2), típicamente 8 m en condiciones de suelo promedio. Este tipo de equipo es utilizado en la prevención de daños en instalaciones públicas, ingeniería de instalaciones de subsuperficie (SUE por sus siglas en inglés), inspección de activos (puentes, cimientos, carreteras), investigaciones geofísicas, arqueológicas, forenses, etc.

Características	Descripción
Radar	GPR de onda continua de frecuencia escalonada
Ancho de banda efectivo	3200 MHz
Min. Tamaño del objeto detectable	1 cm objeto metálico enterrado a 0.3 m, en condiciones de suelo ideal
Frecuencia modulada	200 – 3440 MHz
Profundidad máx. de penetración	Hasta de 6 m (Depende del tipo de suelo)
Rango de escaneo	500 Hz
Intervalo espacial	Hasta 100 scans/m
Velocidad de escaneo	Hasta 35 km/h
Receptor GNSS	Multiband GPS + Glonass + Galileo



Figura 100

El procesamiento de datos se llevó a cabo en gabinete haciendo uso del software **GPRPy**, el cual es una herramienta especializada en el procesamiento de datos de radar de penetración terrestre (GPR). Se emplearon filtros y técnicas de procesamiento básico que permitieron visualizar anomalías posiblemente asociadas a infraestructura subterránea.

En ninguno de los casos se realizó el proceso conocido como “migración”, que es un procedimiento iterativo en el que la velocidad de fondo es ajustada para optimizar los

resultados, mostrando las anomalías de una manera más fiel geométrica y espacialmente. Sin embargo, este procedimiento requiere un conocimiento preciso de la velocidad de las estructuras en el subsuelo, algo que en muchas ocasiones es muy difícil de obtener.

5. DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO

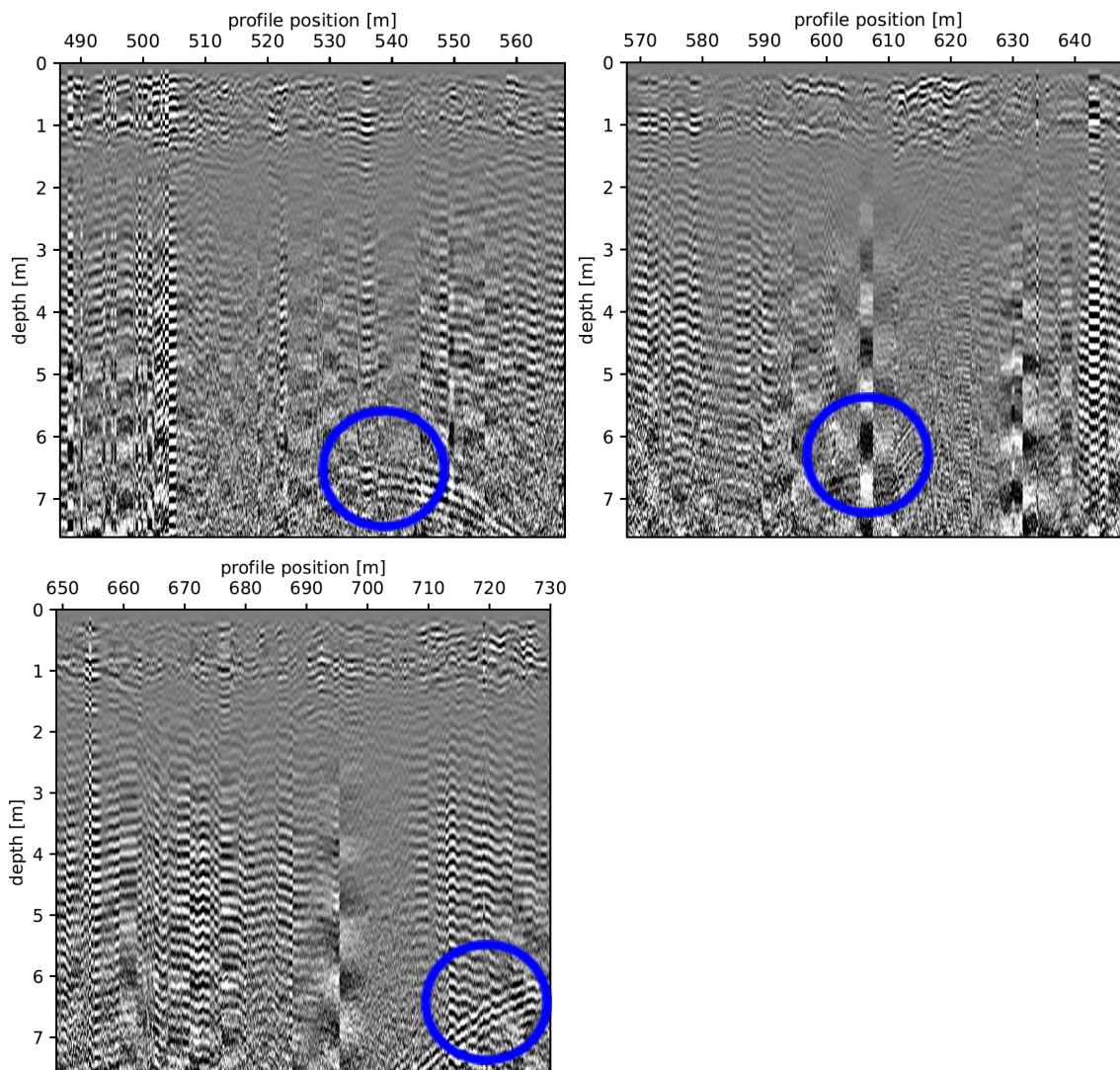
6. RESULTADO

El análisis de las **15 líneas de GPR** realizadas en el área de estudio revela una serie de **anomalías subterráneas** de interés. A lo largo de los recorridos se identificaron patrones consistentes con zonas de relleno, alteración del terreno y posibles estructuras enterradas, aunque no se pudo confirmar con certeza la presencia de la tubería buscada. A continuación, se detallan los hallazgos organizados por recorrido:

Recorrido 2

En este recorrido se detectaron **tres anomalías significativas** a una profundidad de **6 a 7 metros**:

- La primera anomalía se encuentra entre **540 y 550 metros de distancia desde el inicio**.
- La segunda se ubica entre **610 y 620 metros**.
- La tercera anomalía aparece entre **720 y 740 metros**.



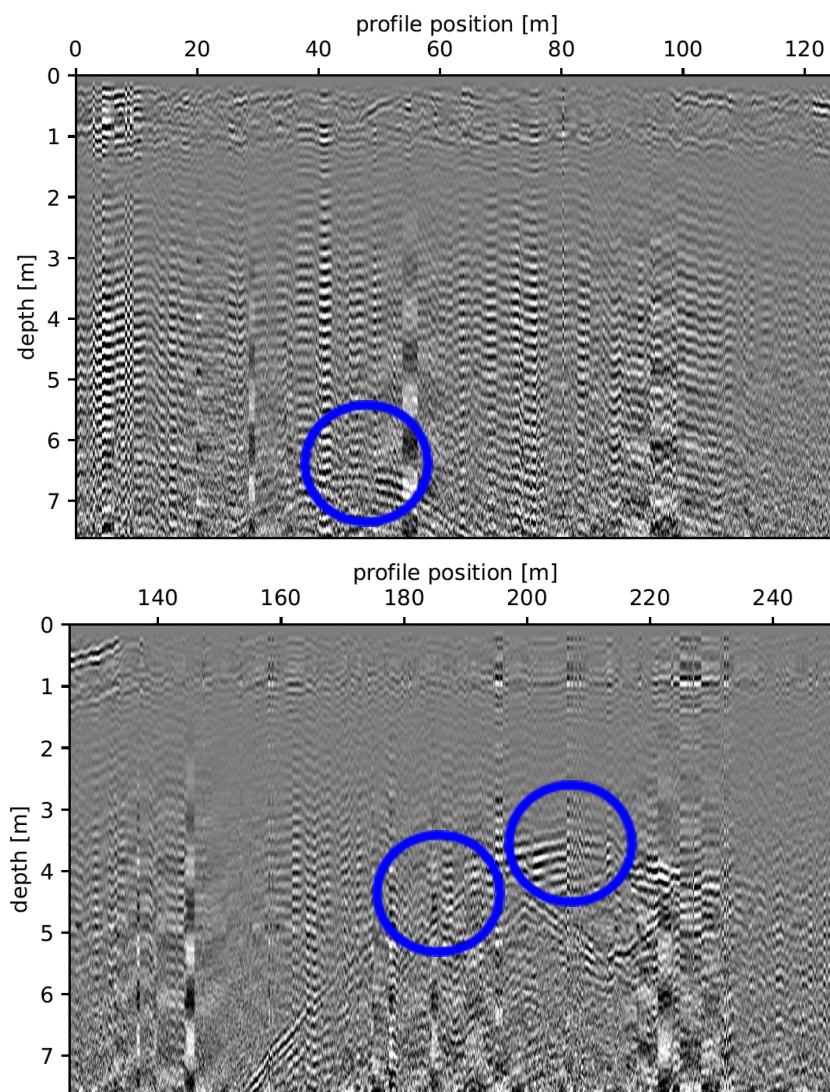
Estas reflexiones presentan características alargadas y homogéneas, sugiriendo la posible presencia de estructuras lineales, aunque no se puede confirmar su origen.

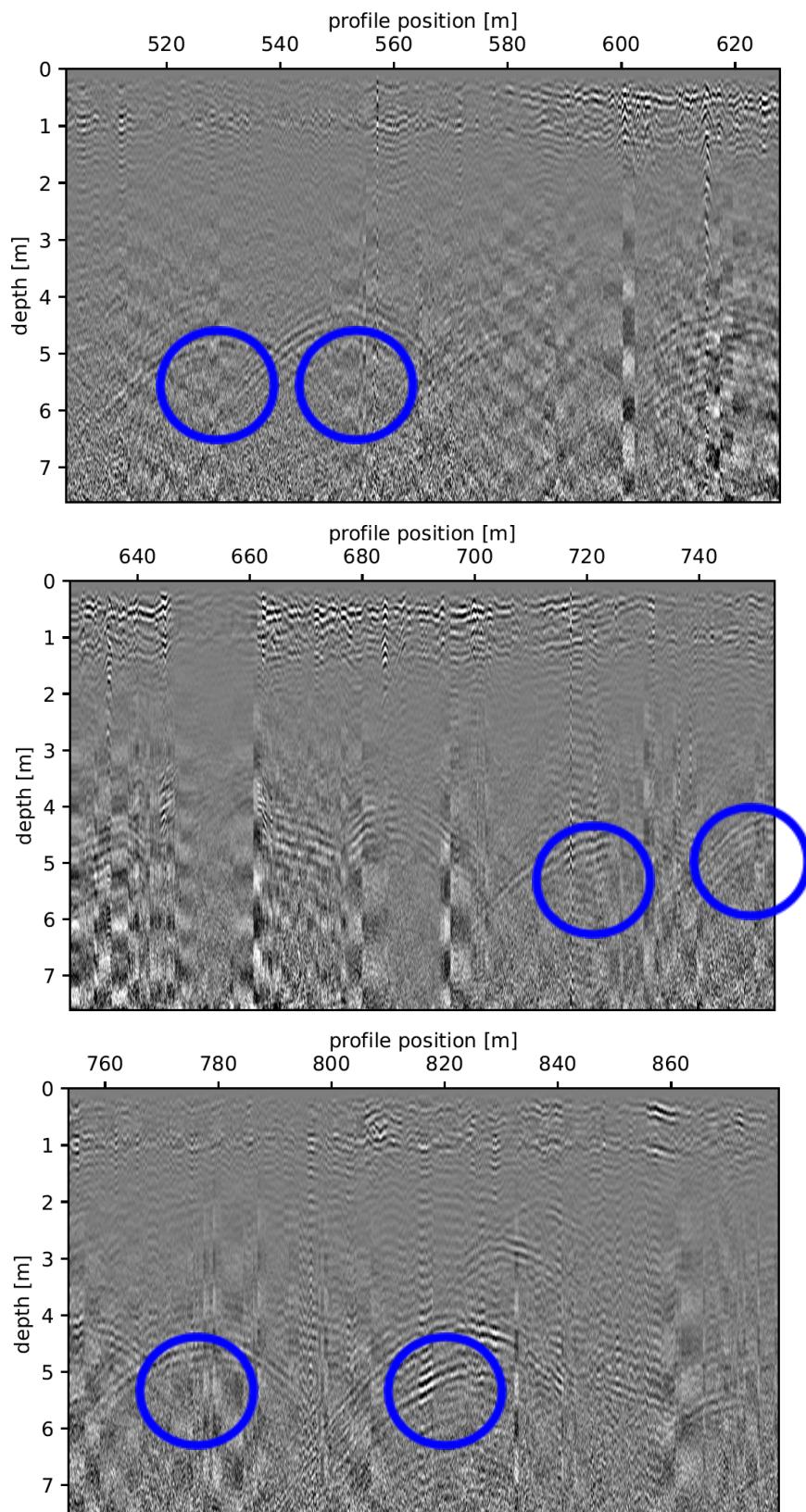
Recorrido 3

Este recorrido mostró **una mayor concentración de anomalías** distribuidas a diferentes profundidades, entre **3 y 7 metros**:

1. Entre **40 y 60 metros de distancia desde el inicio** – Reflexión profunda a **6-7 metros**.
2. Entre **180 y 200 metros** – Reflexiones poco profundas, entre **3 y 4 metros**.
3. Entre **200 y 220 metros** – Continuación de reflexiones en el mismo rango de **3 a 4 metros**.

4. Entre **360 y 380 metros** – Reflexión profunda a **6-7 metros**.
5. Entre **480 y 500 metros** – Anomalía a **4-5 metros** de profundidad.
6. Entre **520 y 540 metros** – Reflexión con características similares a **4-5 metros** de profundidad.
7. Entre **540 y 560 metros** – Continuación de las reflexiones en el mismo rango.
8. Entre **710 y 740 metros** – Reflexiones más pronunciadas con una posible estructura lineal a **4-5 metros** de profundidad.
9. Entre **740 y 760 metros** – Anomalía continua localizada a **4 metros** de profundidad.
10. Alrededor de los **780 metros**, se detecta una reflexión puntual entre **4 y 5 metros** de profundidad.
11. Finalmente, entre **810 y 820 metros**, se presenta una anomalía similar en el mismo rango de profundidad.



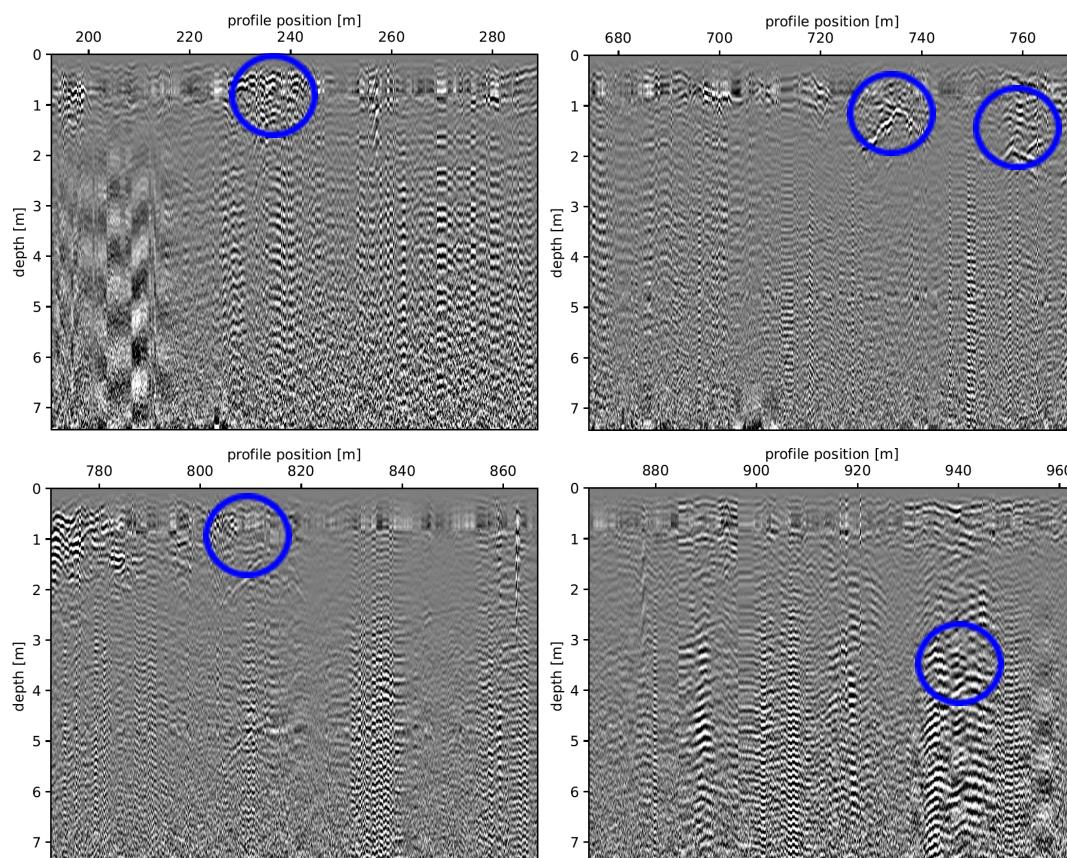


Entre los **710 y 740 metros**, se observan indicios de una **estructura tubular** o cuerpo lineal, que coincide parcialmente con las características esperadas para una tubería. No obstante, las reflexiones no permiten asegurar su naturaleza con total certeza.

Recorrido 4

Los primeros metros del recorrido presentaron **señales caóticas** y ruido, características típicas de **rellenos o terrenos alterados**. Este comportamiento se asocia comúnmente a materiales heterogéneos o a intervenciones humanas en el subsuelo. Además, se identificaron **cinco zonas de interés**:

1. Entre **220 y 240 metros de distancia desde el inicio**, aparecen reflexiones superficiales en un rango de **0 a 2 metros** de profundidad.
2. Entre **730 y 750 metros**, se detectaron **reflexiones consecutivas** a profundidades de **1 a 2 metros**, posiblemente asociadas a objetos enterrados.
3. Entre **750 y 760 metros**, se observan anomalías con características similares.
4. Entre **800 y 820 metros**, continúan las reflexiones en el mismo rango de profundidad.
5. Finalmente, entre **930 y 950 metros**, surge una anomalía más profunda, localizada entre **3 y 5 metros**.



La irregularidad en las reflexiones sugiere la presencia de estructuras fragmentadas o elementos no homogéneos en el terreno.

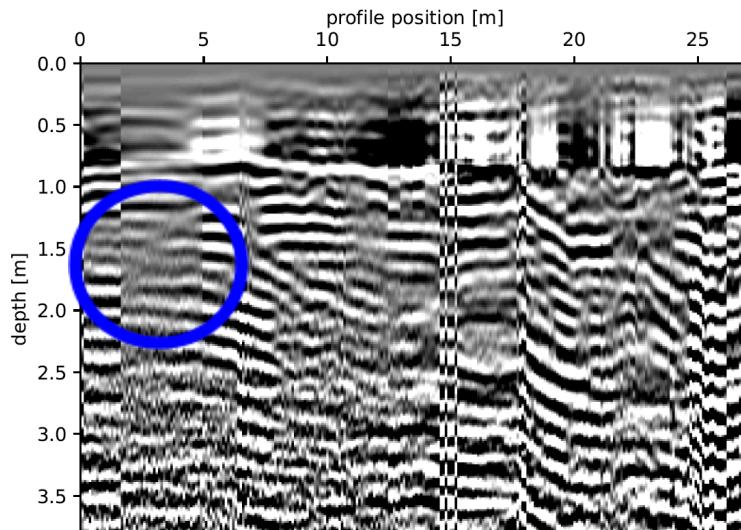
Recorrido 6

Este recorrido presentó **zonas de ruido significativo** que dificultan la interpretación de los datos. Sin embargo, se identificaron patrones compatibles con **rellenos y fragmentos de estructuras enterradas**, ubicados de manera irregular en el subsuelo. Es posible que se requiera un procesamiento adicional para mejorar la claridad de las reflexiones y obtener más información.

Recorrido 7

En el segmento denominado **SWATH 3**, se localizó una única anomalía superficial:

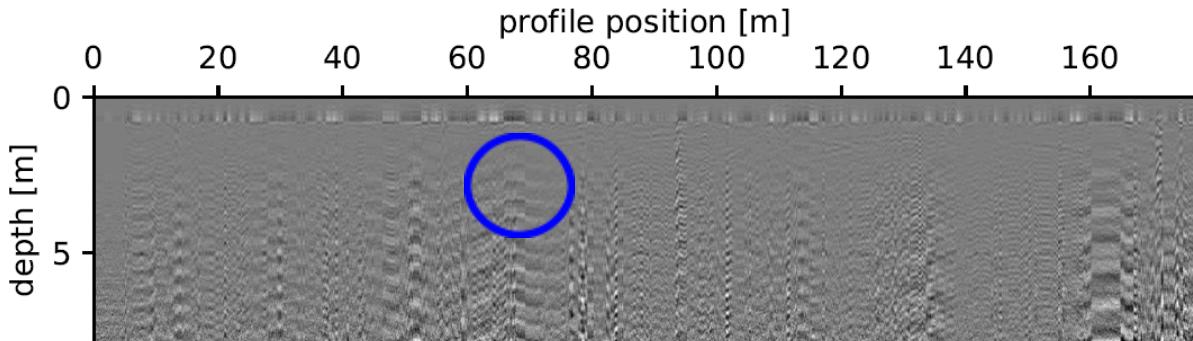
- Entre **0 y 5 metros de distancia desde el inicio**, se detectó una reflexión poco profunda a **1-1.5 metros**, que podría corresponder a un objeto pequeño o un cambio en la composición del terreno.



Recorrido 12

En este recorrido se identificó una anomalía de interés:

- Entre **60 y 80 metros de distancia desde el inicio en el SWATH 2**, se observaron reflexiones a una profundidad de **2 a 4 metros**, indicando la presencia de un posible objeto enterrado o cambio en la densidad del subsuelo.



Recorrido 14

Se observaron señales superficiales características de **rellenos o alteraciones del terreno**:

- Entre **110 y 120 metros de distancia desde el inicio**, se localizó una anomalía poco profunda a **0-1 metro**, que podría corresponder a intervenciones recientes en el área.

Recorrido 15

Este recorrido presentó **patrones de ruido y reflexiones irregulares**, similares a los observados en recorridos anteriores con zonas de relleno y fragmentos de estructuras enterradas. Las señales son caóticas y carecen de continuidad, lo que sugiere una **composición heterogénea del terreno**.

Resumen general

- Recorridos 2 y 3** muestran anomalías de mayor profundidad (6-7 metros) con características lineales que podrían estar asociadas a tuberías o estructuras enterradas.
- Recorridos 4, 6 y 15** presentan zonas de **relleno, alteración del terreno** y fragmentos de estructuras sin una forma definida.
- Recorridos 7, 12 y 14** revelan anomalías más superficiales, probablemente relacionadas con **cambios recientes en el subsuelo**.

En general, las anomalías detectadas muestran patrones de interés, aunque la presencia de ruido y la irregularidad en algunas reflexiones dificultan la interpretación definitiva. Se recomienda un **procesamiento adicional** de los datos y la correlación con información complementaria para validar los hallazgos.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El análisis de las líneas de GPR permitió identificar diversas **anomalías subterráneas** distribuidas en el área de estudio. Aunque no se confirmó de manera concluyente la presencia de la tubería buscada, los datos obtenidos proporcionan indicios relevantes para futuras investigaciones. Las principales conclusiones son las siguientes:

1. Presencia de anomalías lineales profundas:

- En los recorridos **2 y 3**, se detectaron reflexiones a profundidades de **6 a 7 metros** con características que podrían ser compatibles con una tubería u otra estructura enterrada. Destaca el tramo entre los **710 y 740 metros** en el recorrido 3, donde se observan patrones alargados y homogéneos.

2. Zonas de relleno y terreno alterado:

- En los recorridos **4, 6, y 15**, se identificaron áreas con señales caóticas y reflexiones irregulares, típicas de terrenos intervenidos o rellenos heterogéneos. Estas zonas podrían dificultar trabajos futuros debido a su composición no homogénea.

3. Anomalías superficiales de interés:

- Los recorridos **7, 12, y 14** presentan reflexiones poco profundas, posiblemente asociadas a objetos enterrados o cambios recientes en el terreno. Esto sugiere actividad humana reciente o alteraciones superficiales en el área.

4. Ruido significativo en algunos datos:

- Algunos recorridos, como el **6**, presentaron un nivel considerable de ruido, lo que dificulta la interpretación y podría requerir un procesamiento más avanzado para mejorar la calidad de las imágenes.

En general, el estudio muestra **zonas con potencial de exploración adicional**, pero también áreas donde la composición del terreno o el ruido en los datos limita las conclusiones.

Para optimizar el proceso de exploración y obtener resultados más concluyentes, se sugieren las siguientes acciones:

1. Procesamiento avanzado de los datos:

- Aplicar filtros adicionales y técnicas de migración para reducir el ruido en los recorridos más afectados, como el **6** y el **15**, y mejorar la claridad de las reflexiones en general.

2. Validación in situ:

- Realizar excavaciones o perforaciones exploratorias en las zonas donde se identificaron anomalías más relevantes, especialmente en los tramos:
 - **540 a 550 metros y 710 a 740 metros** del recorrido 3.
 - **220 a 240 metros y 930 a 950 metros** del recorrido 4.

3. Estudio complementario:

- Implementar otros métodos geofísicos, como la resistividad eléctrica o el electromagnetismo, para confirmar las características de las anomalías y complementar la información obtenida.

4. Mapeo detallado de las zonas de relleno:

- Identificar con mayor precisión las áreas con señales caóticas o terrenos alterados para evitar problemas en trabajos futuros. Esto es especialmente importante en los recorridos **4, 6, y 15**.

5. Planificación cuidadosa para obras posteriores:

- En caso de proceder con intervenciones en el área, considerar las zonas de terreno alterado y posibles obstrucciones subterráneas para evitar imprevistos durante la ejecución de los trabajos.

6. Monitoreo continuo del área:

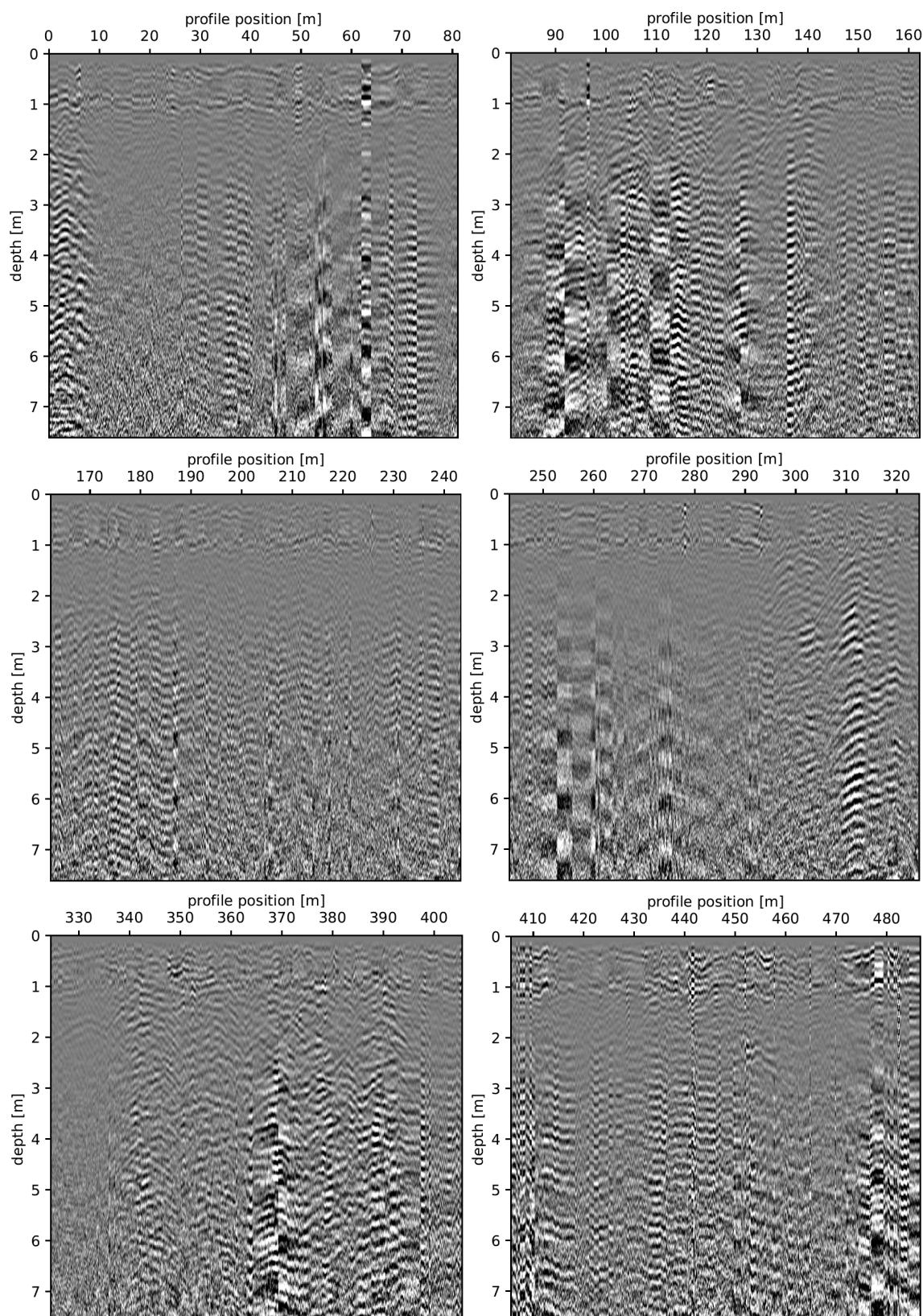
- Si se prevén cambios en la actividad del sitio, realizar monitoreos periódicos con GPR u otros métodos para evaluar modificaciones en el subsuelo y prevenir riesgos.

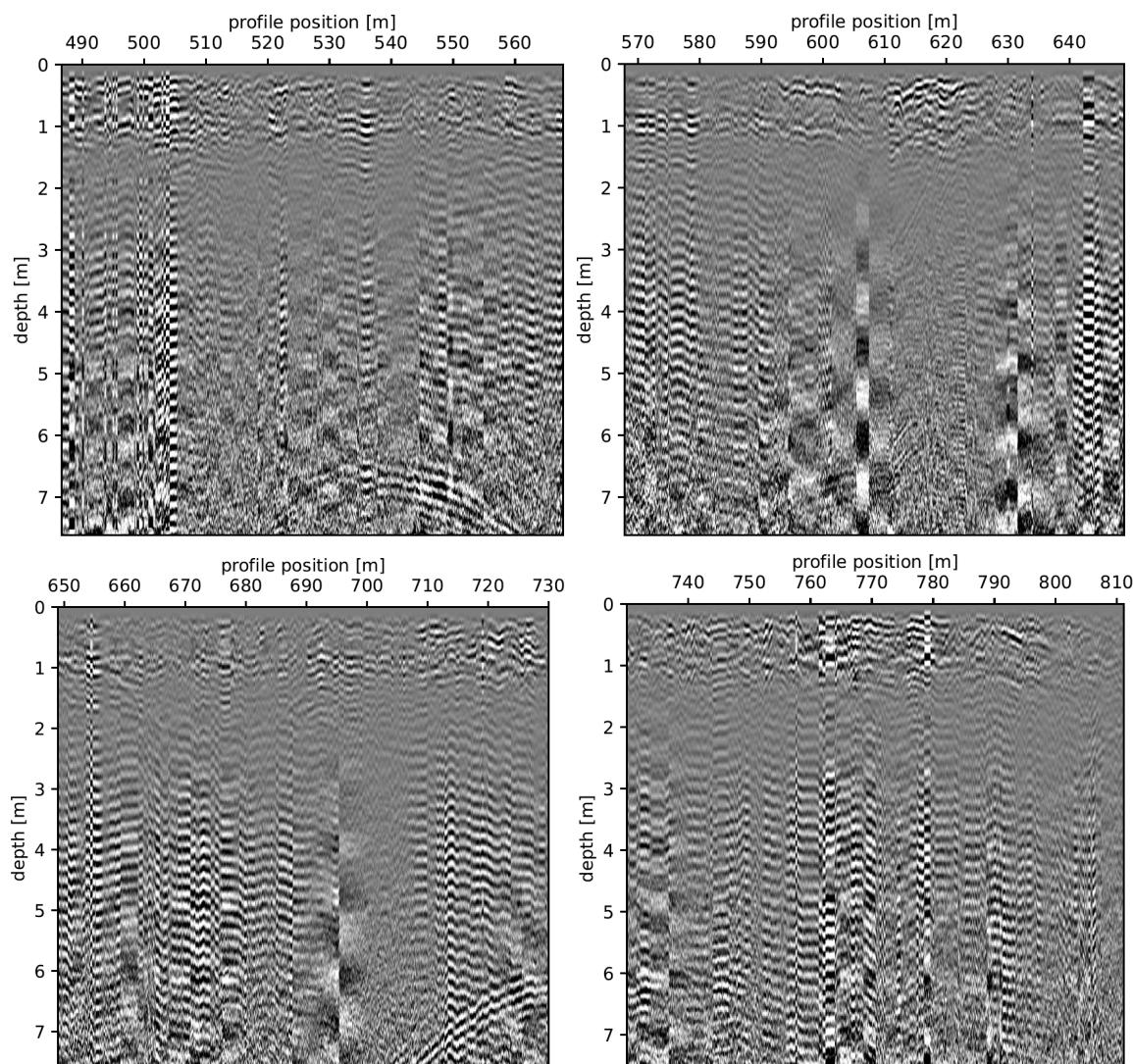
Estas conclusiones y recomendaciones proporcionan una base sólida para planificar las próximas etapas del proyecto y garantizar un enfoque eficiente en la identificación y manejo de las estructuras subterráneas en el área de estudio.

8. PERFILES PROCESADOS

PEMEX 2

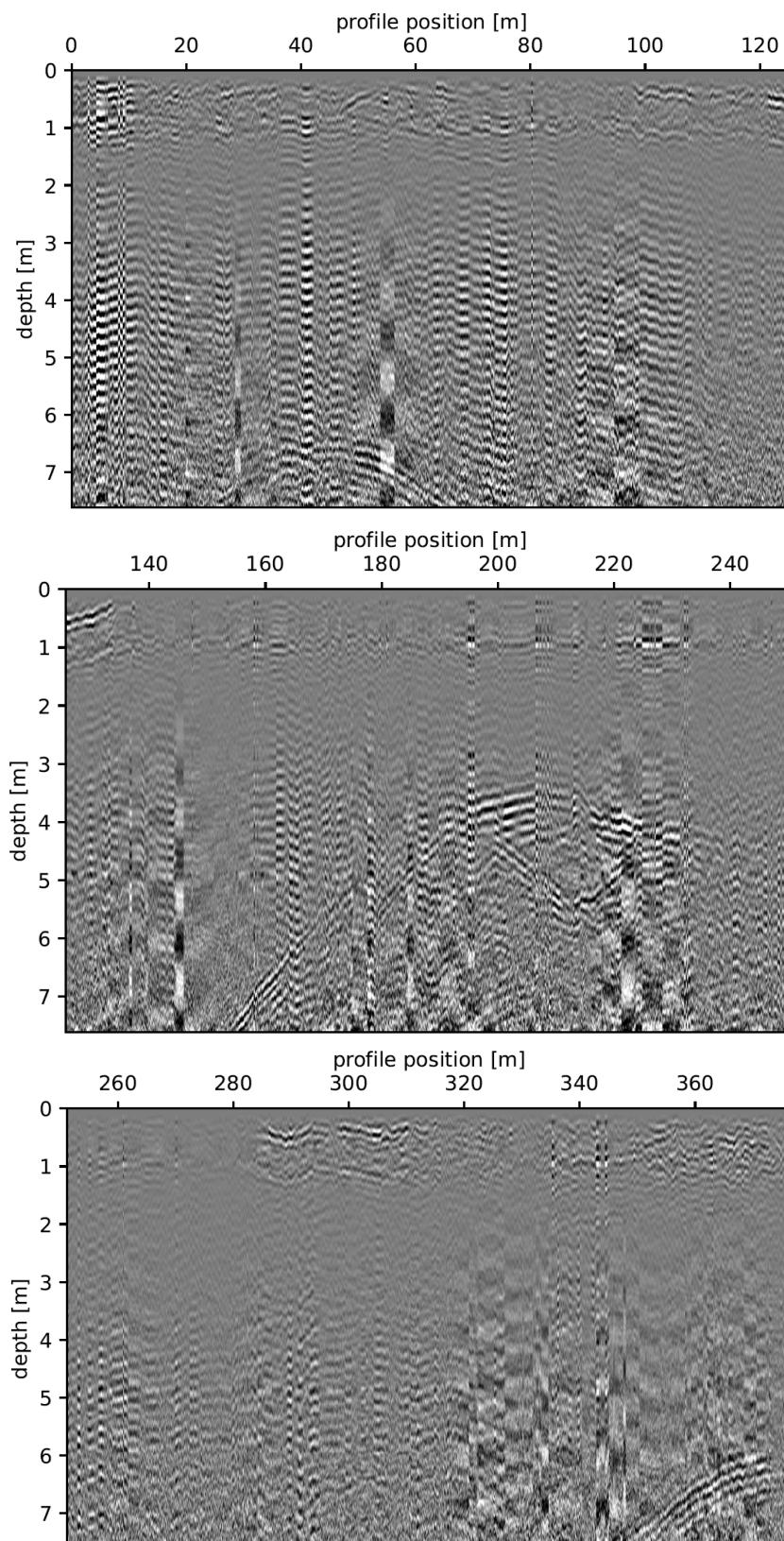
SWATH 1

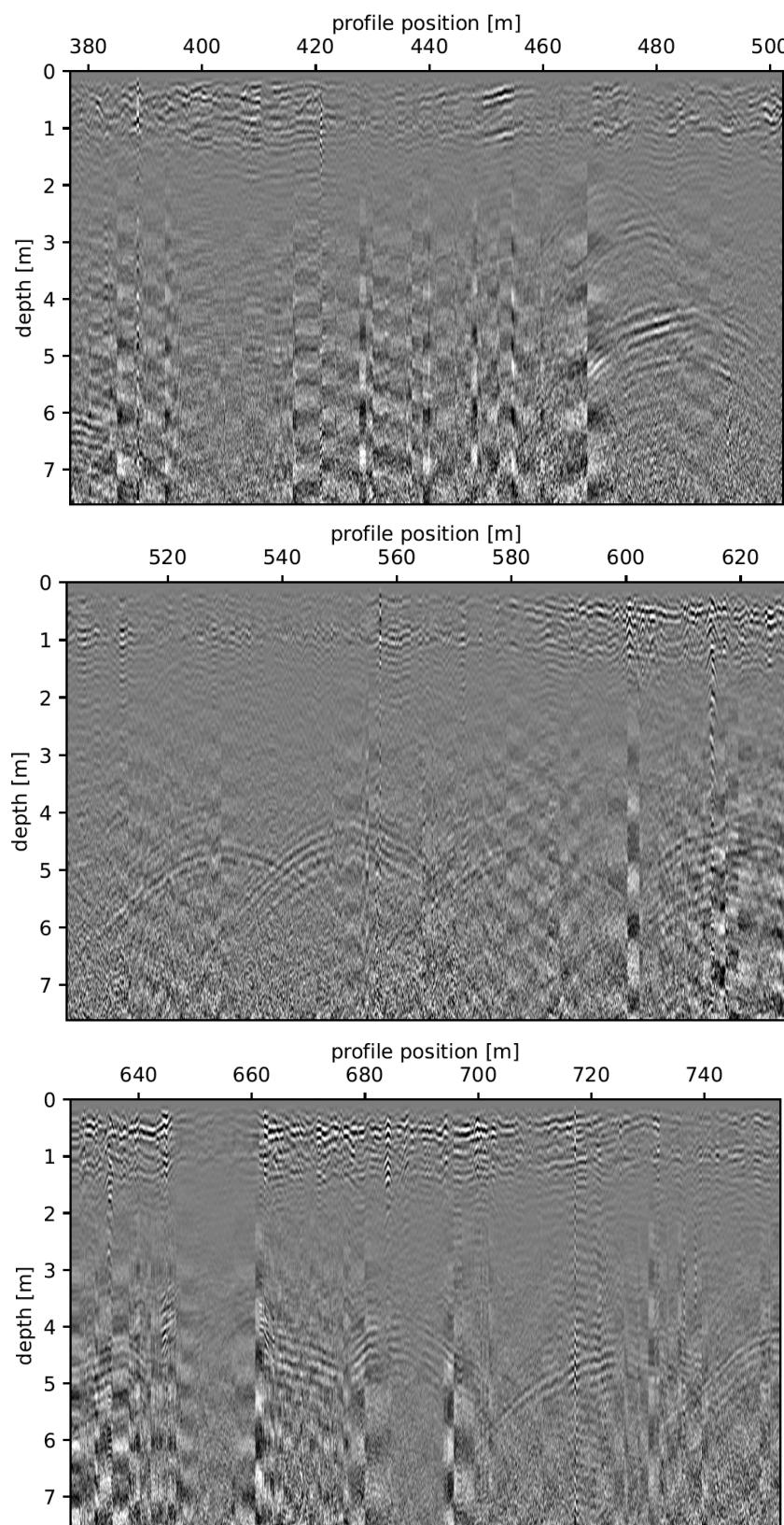


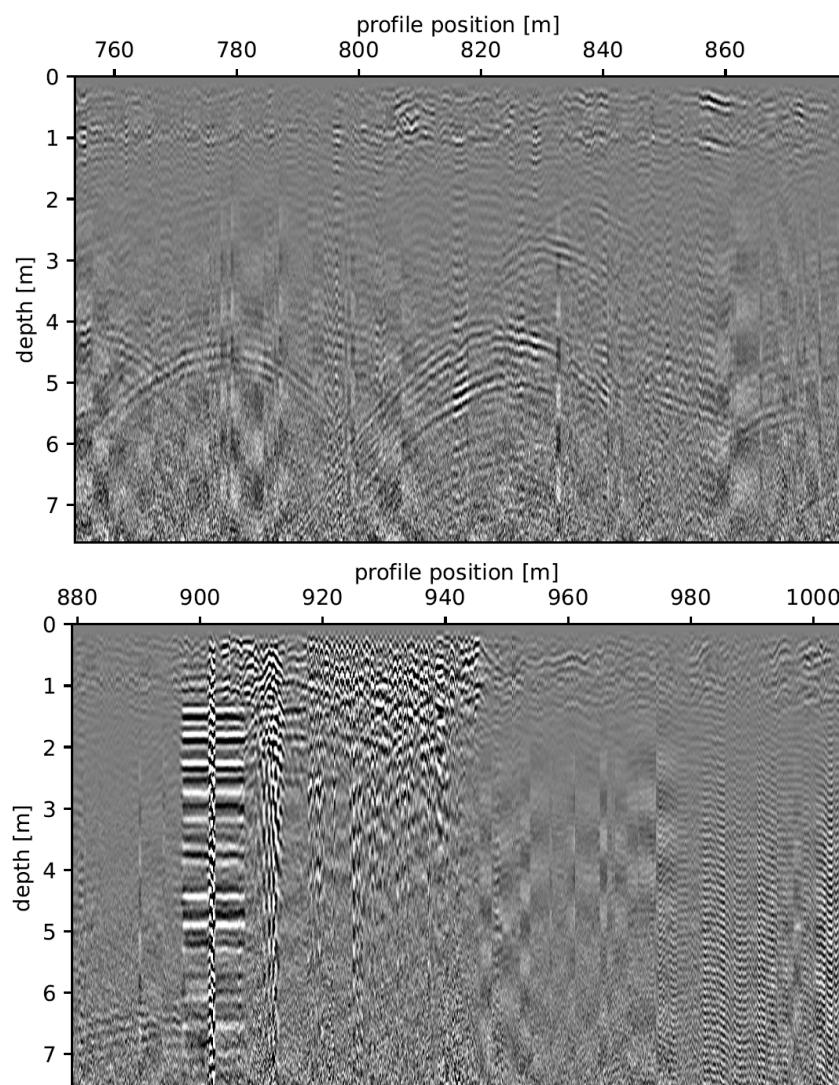


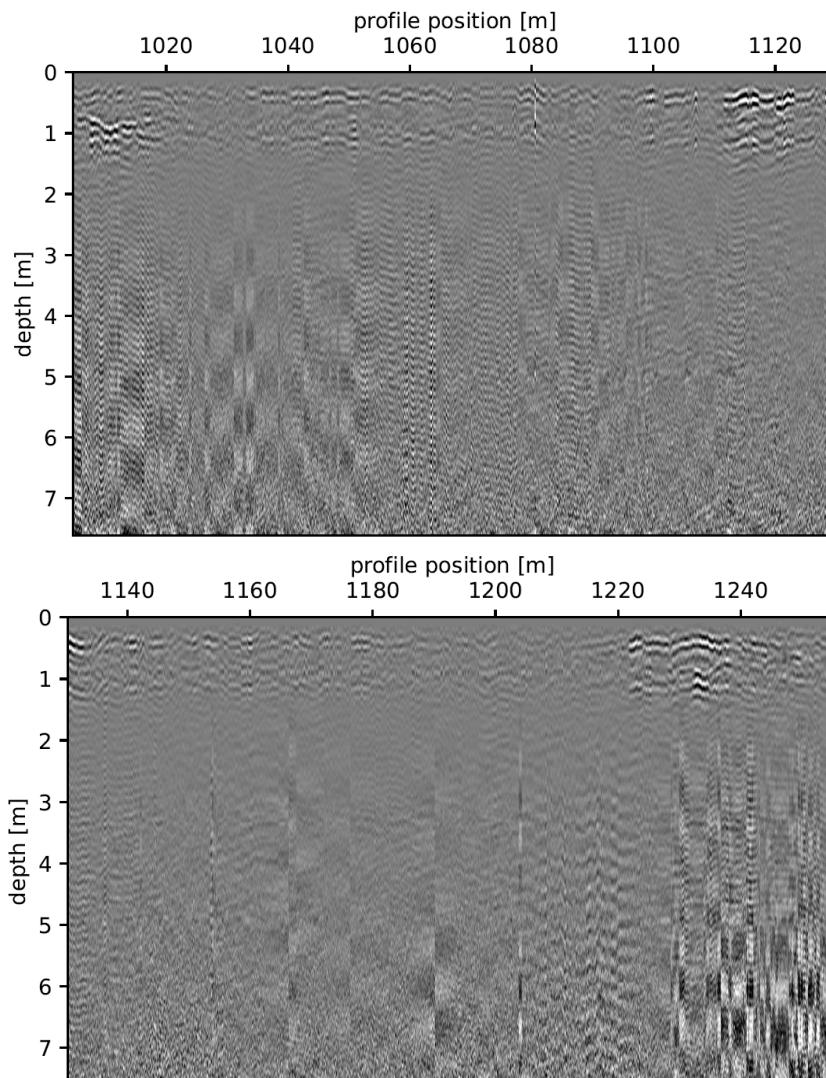
PEMEX 3

SWATH 1



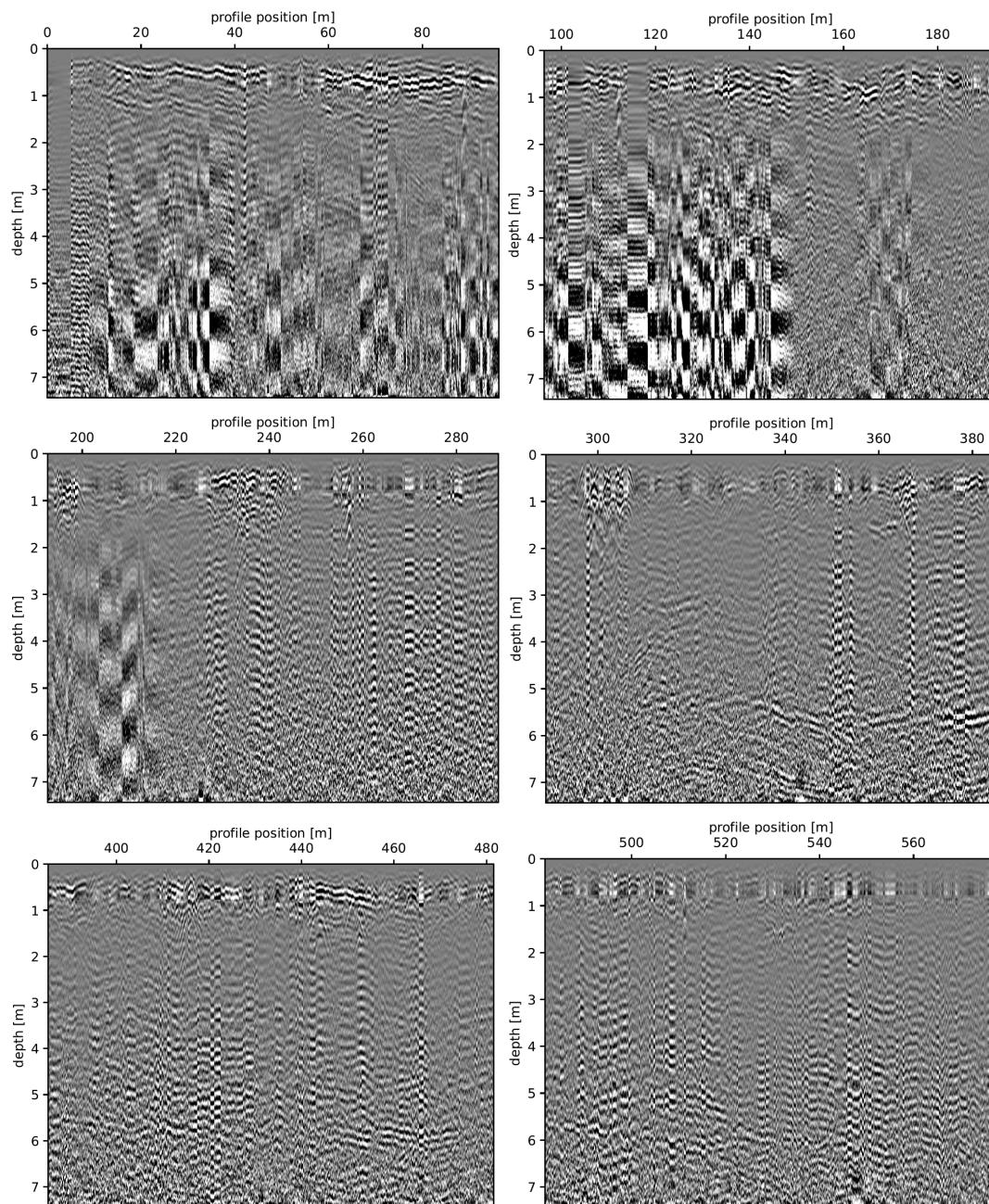


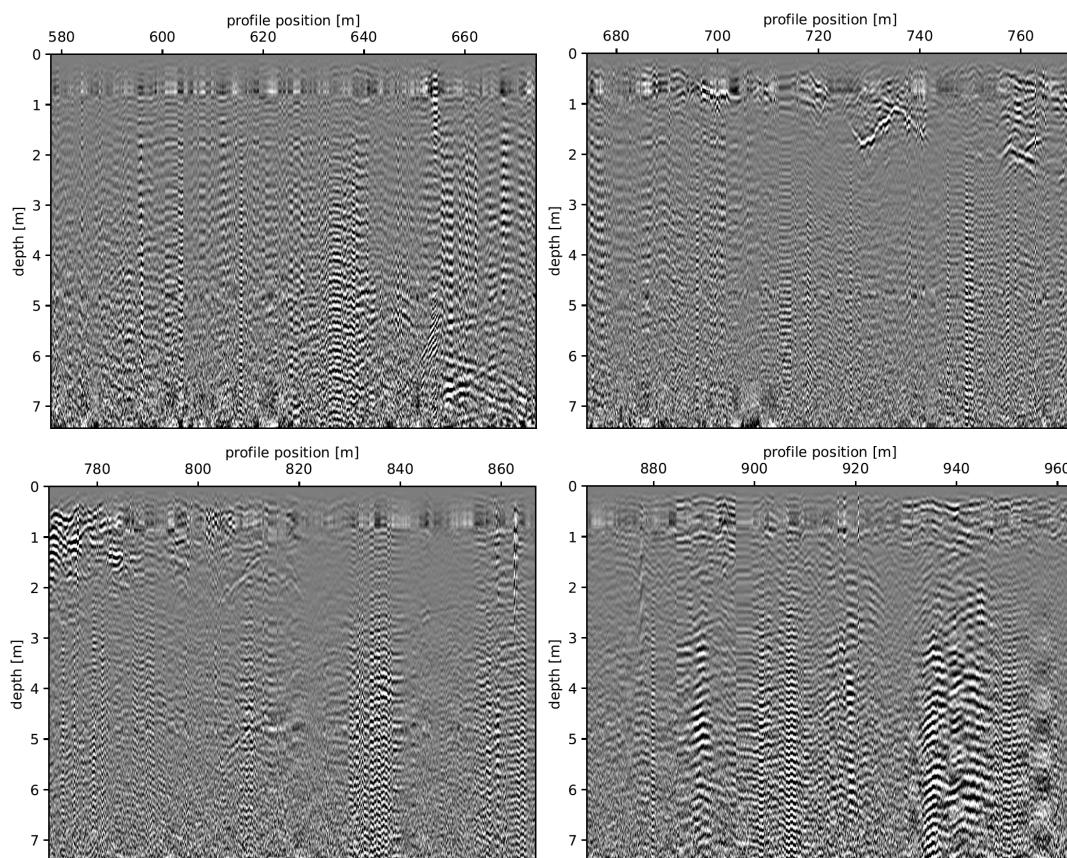




PEMEX 4

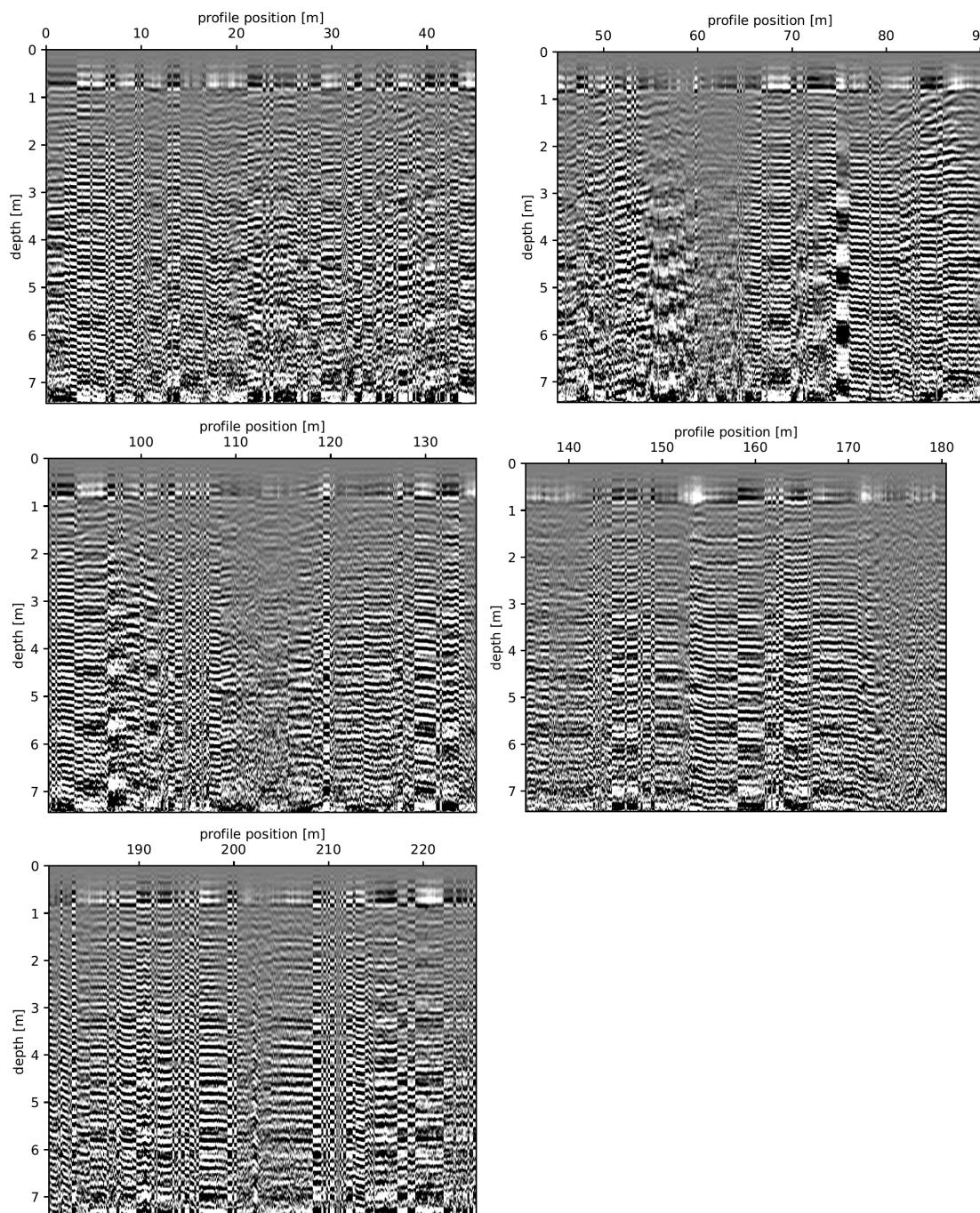
SWATH 1



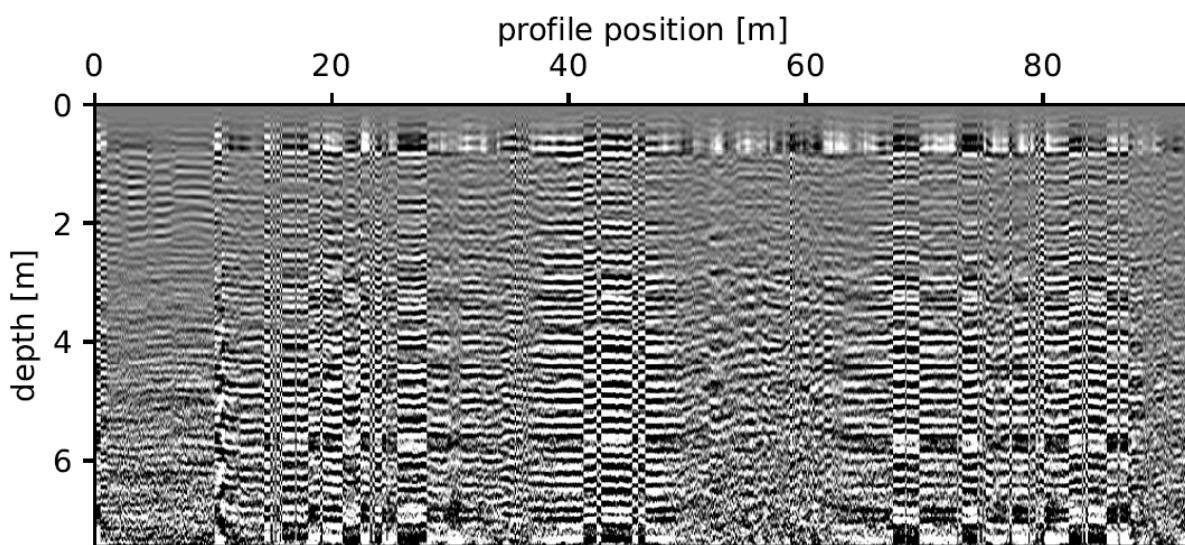


PEMEX 5

SWATH 1

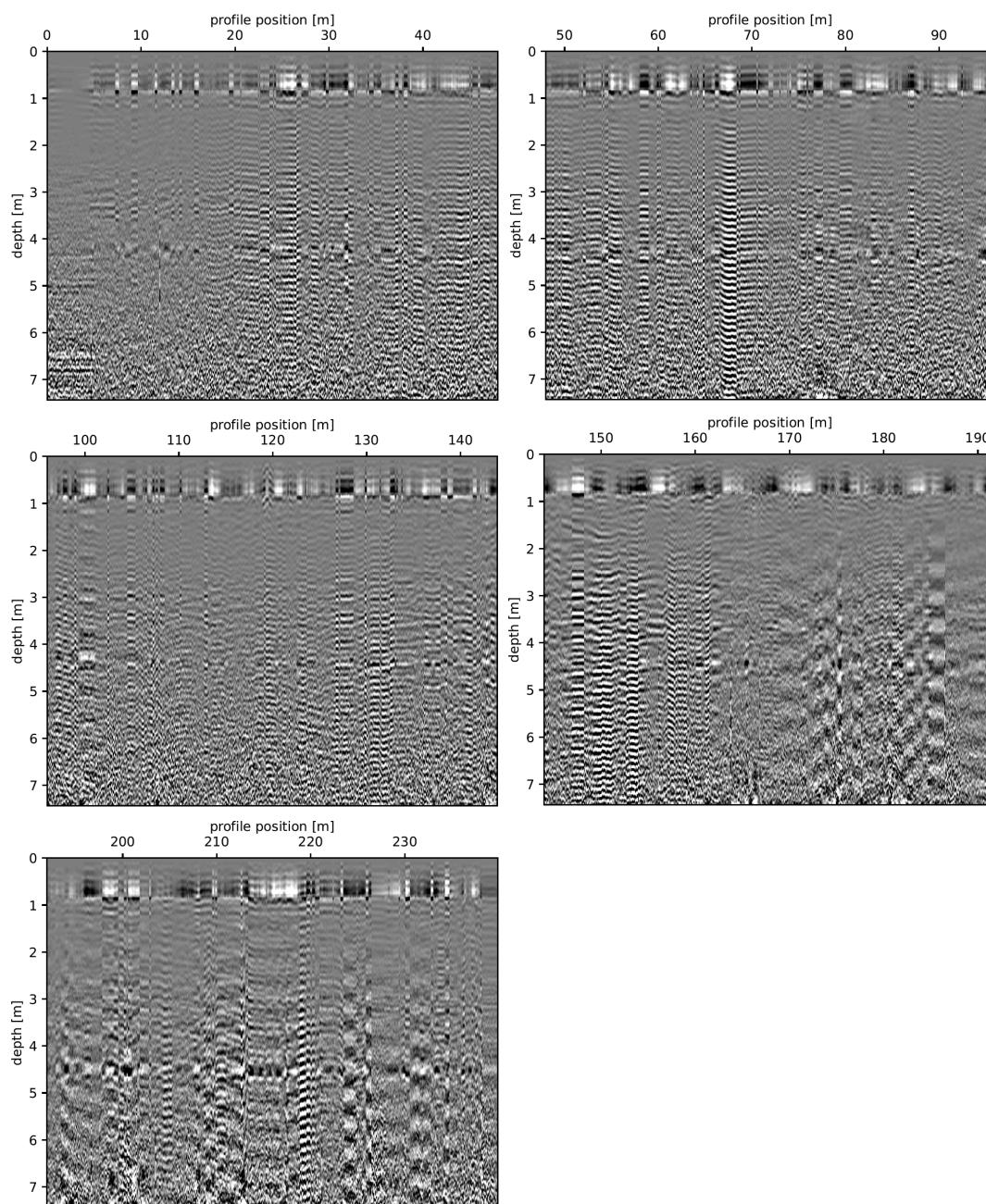


SWATH 2

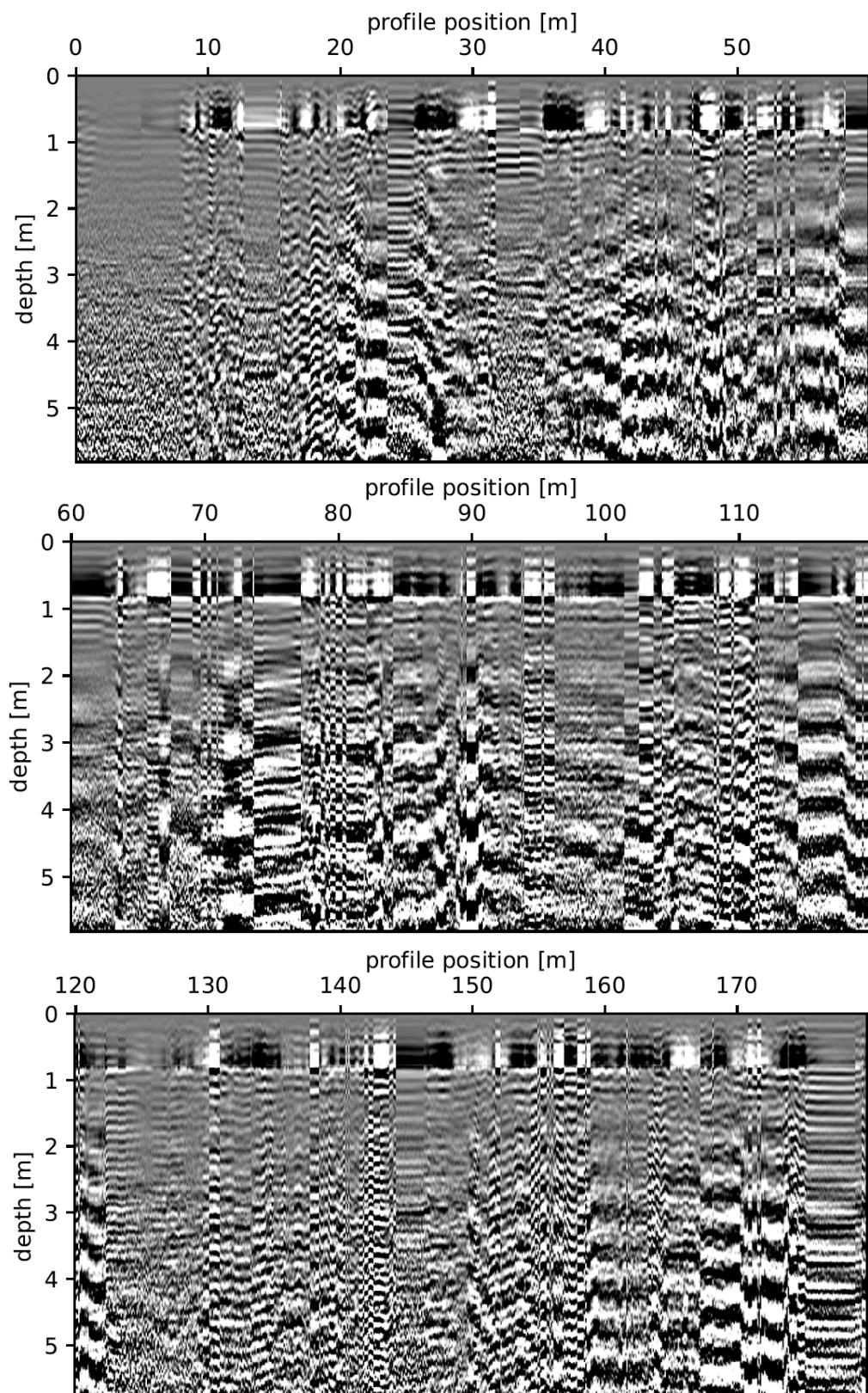


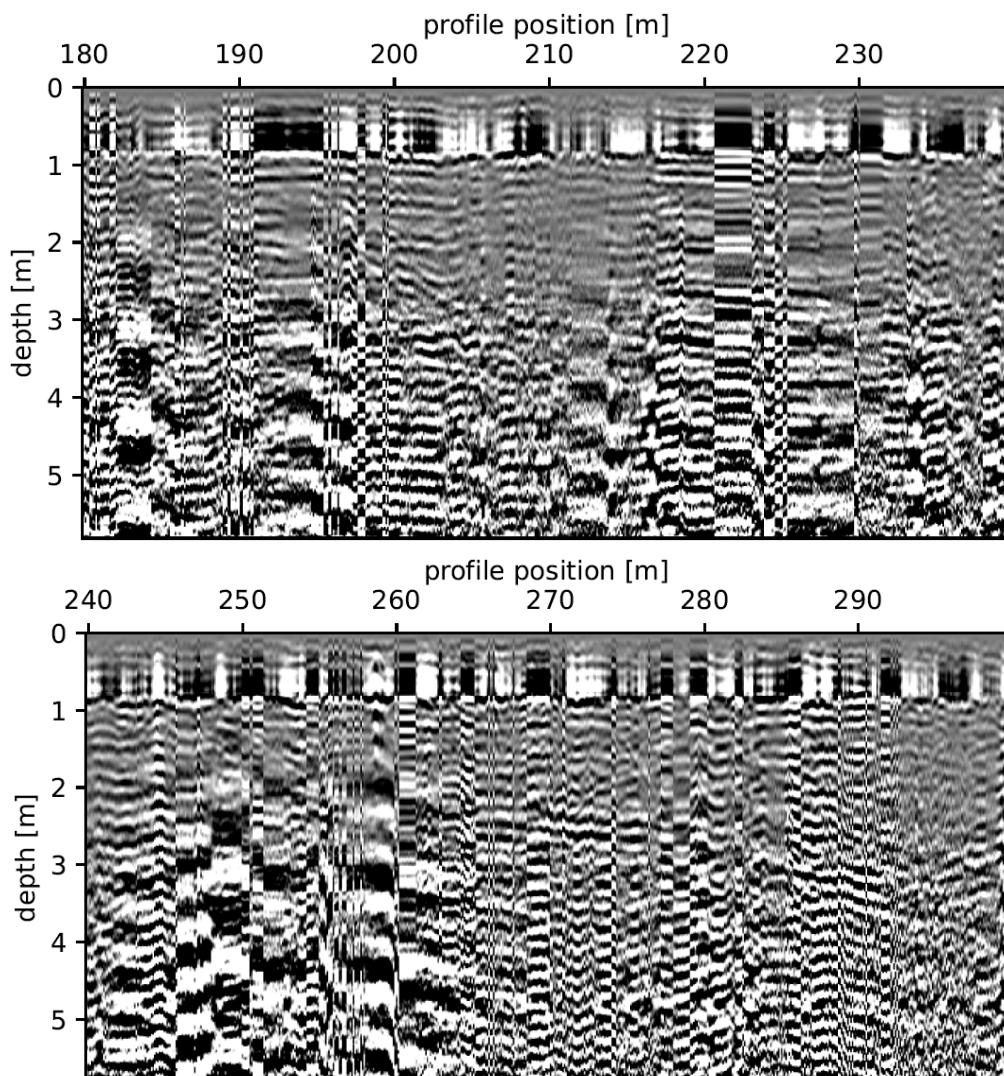
PEMEX 6

SWATH 1



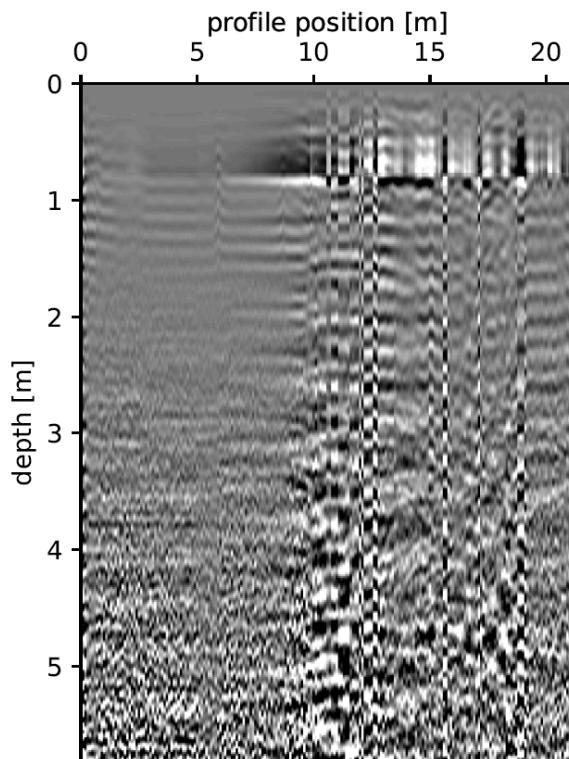
SWATH 2



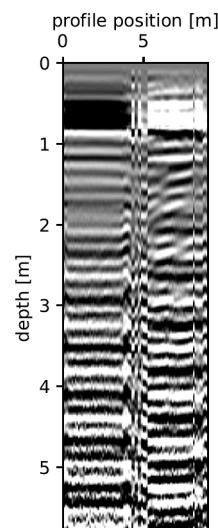


PEMEX 7

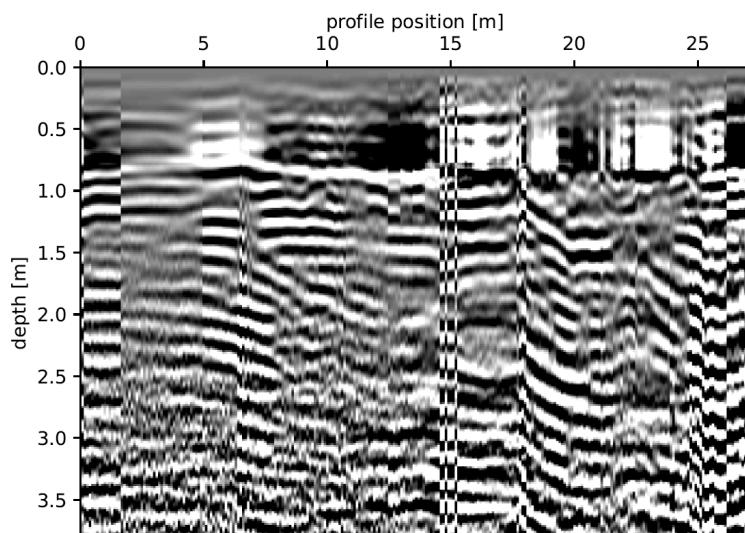
SWATH 1



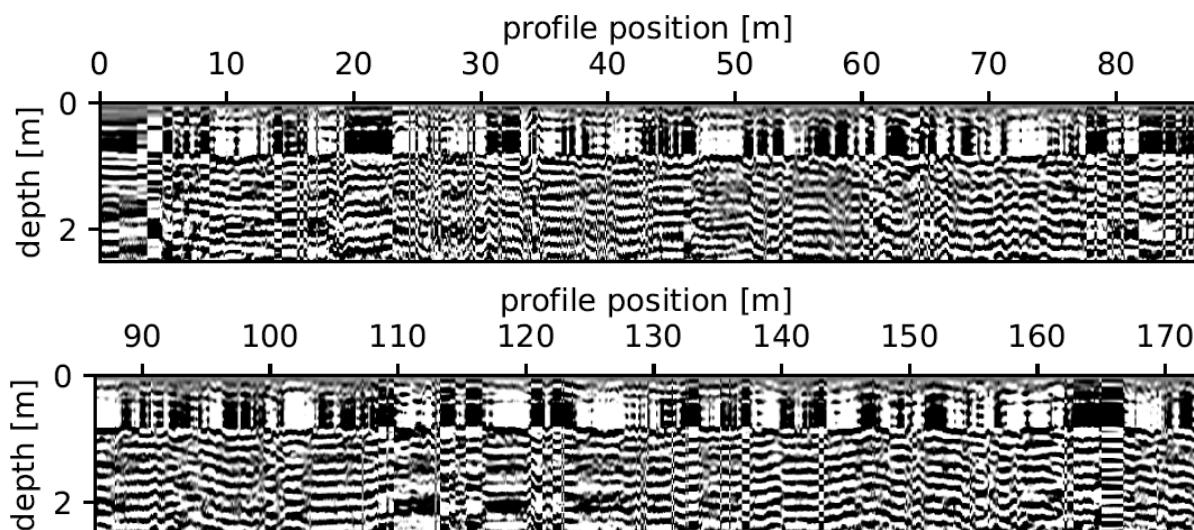
SWATH 2



SWATH 3

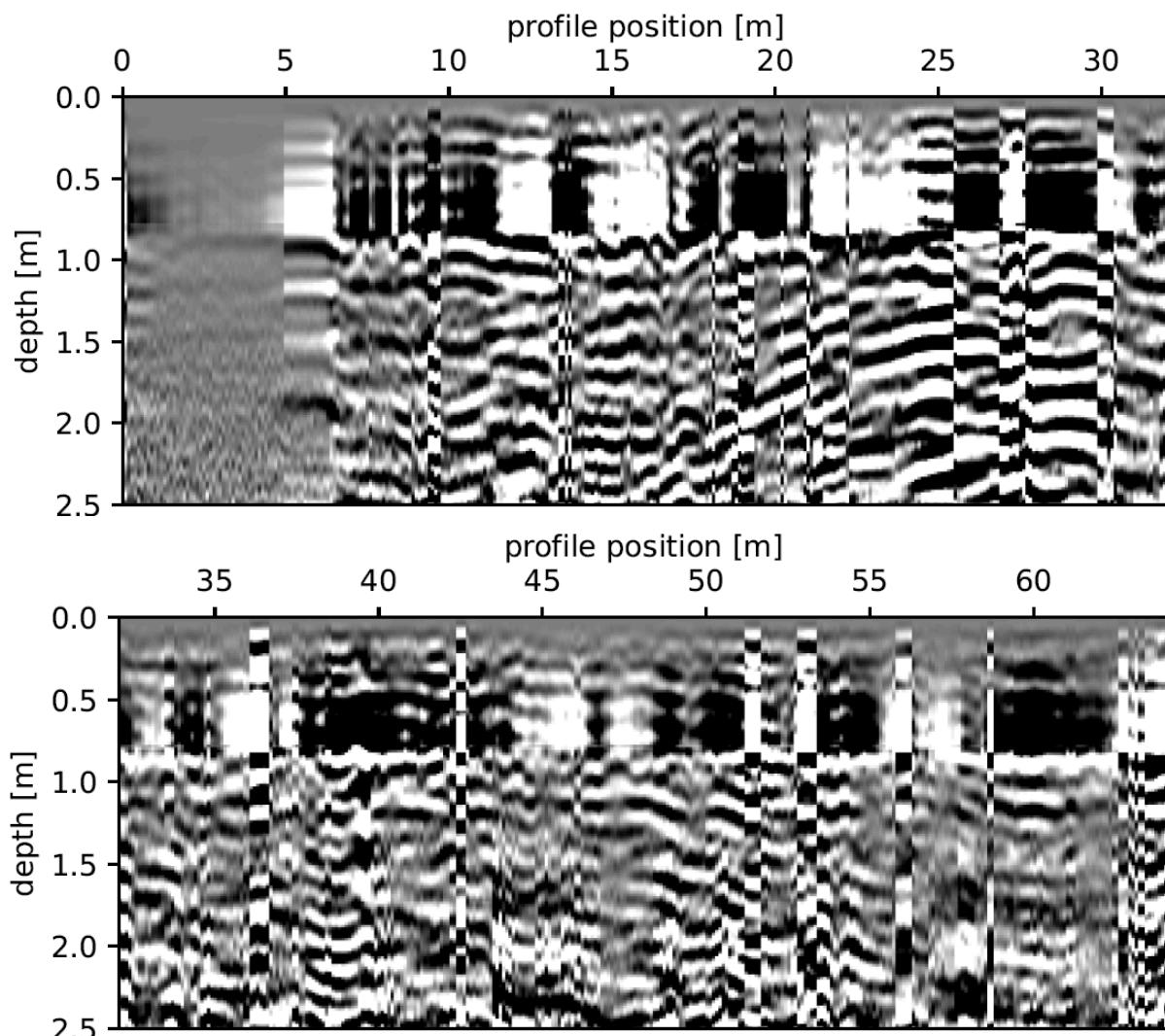


SWATH 4

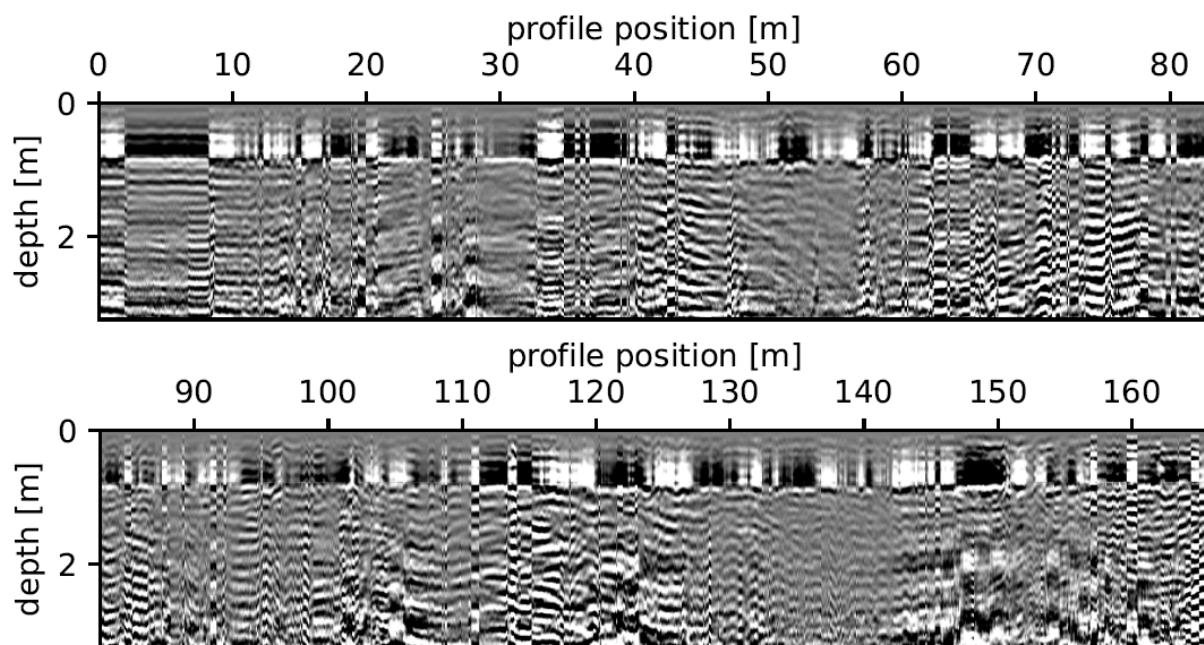


PEMEX 8

SWATH 1

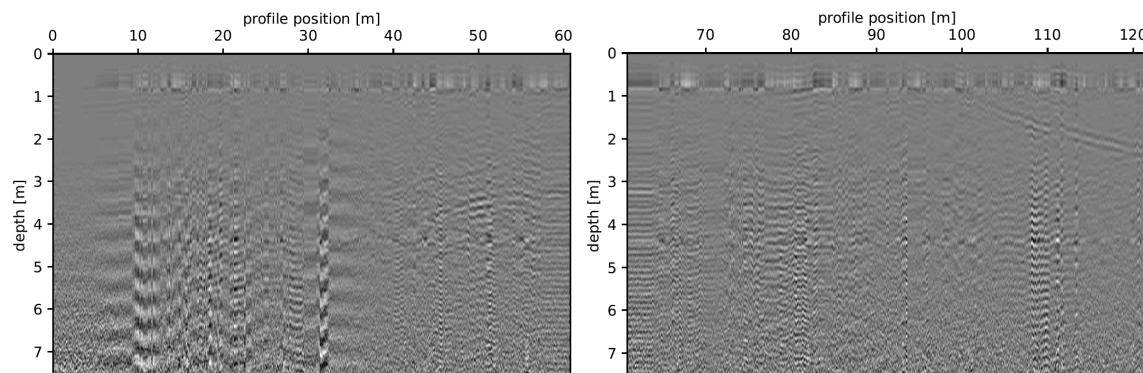


SWATH 2

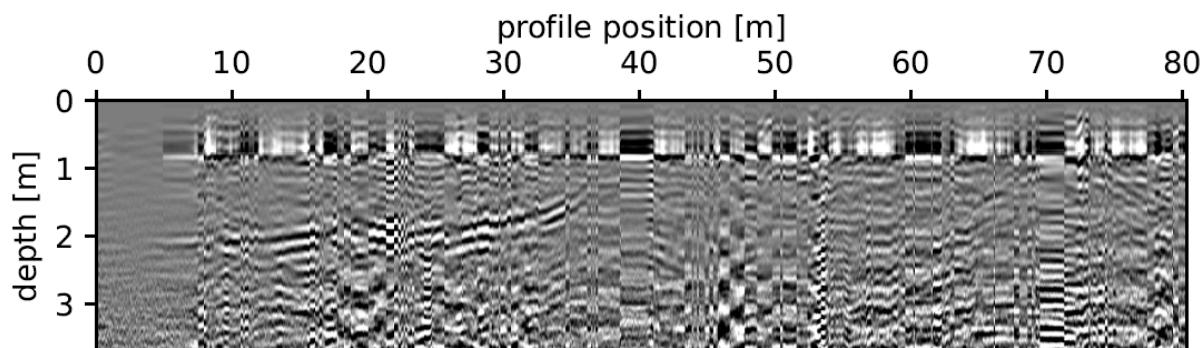


PEMEX 9

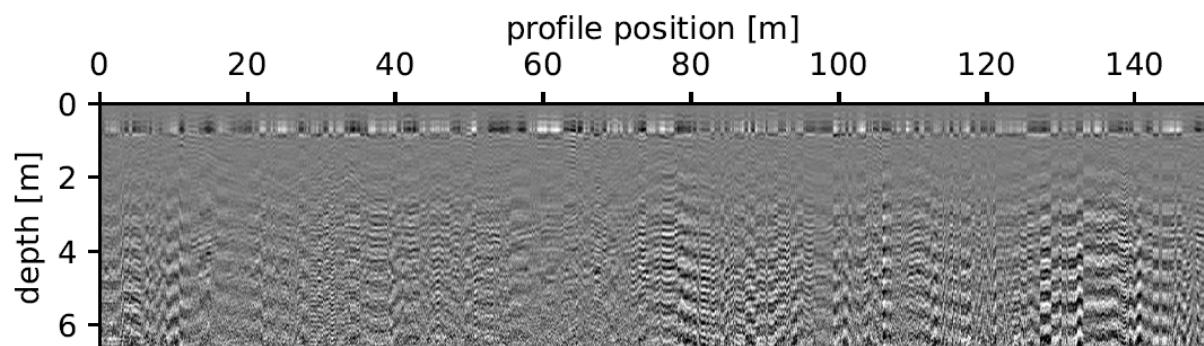
SWATH 1



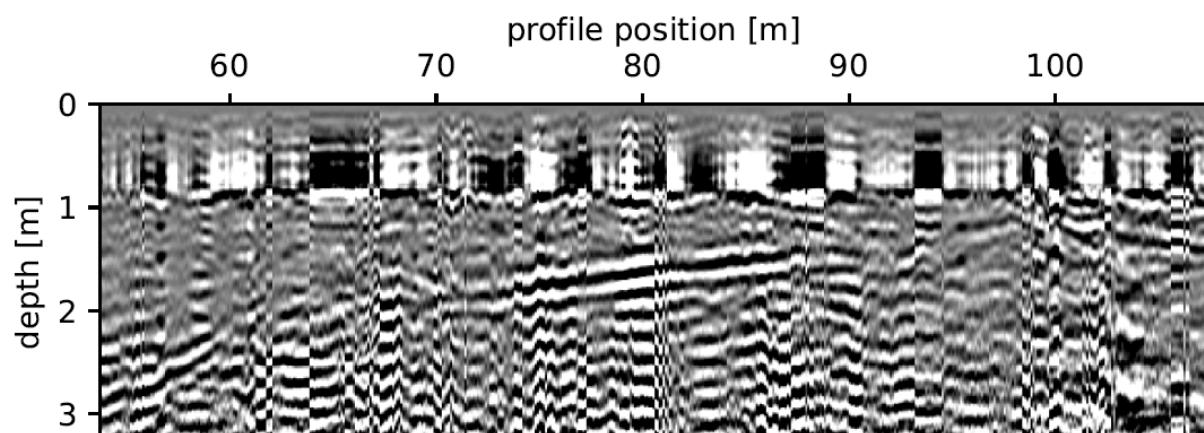
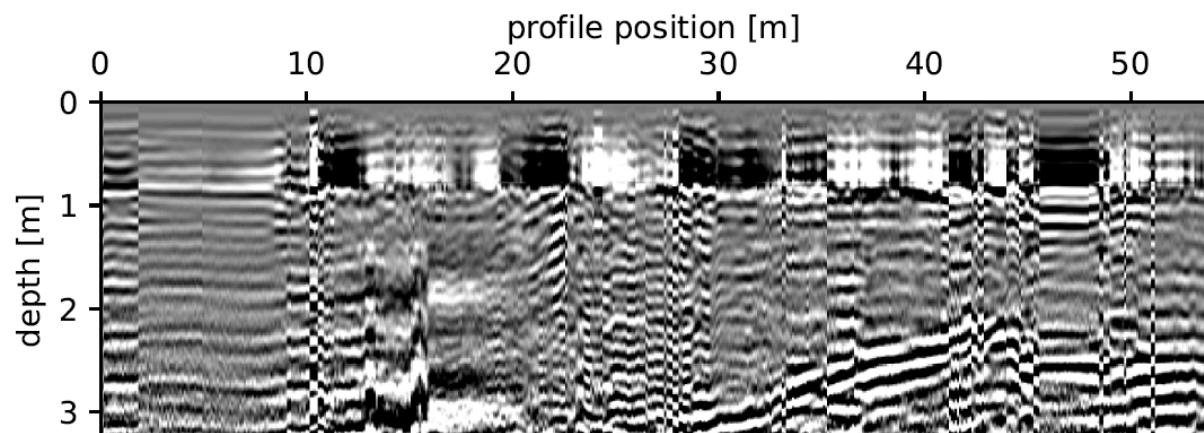
SWATH 2

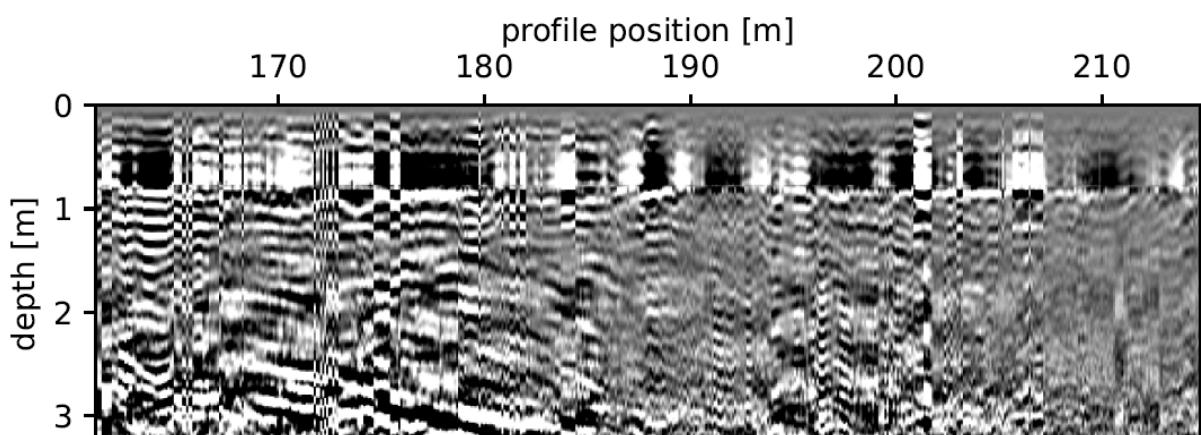
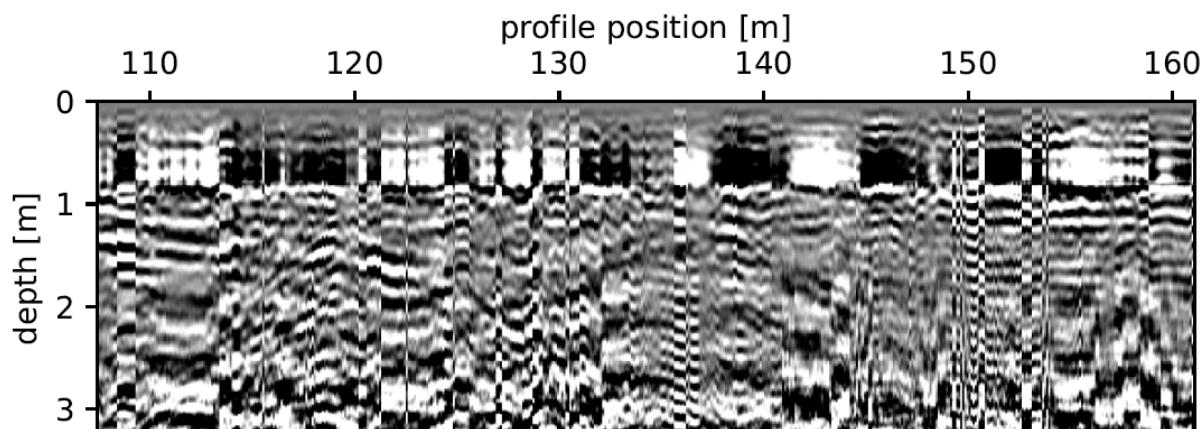


SWATH 3

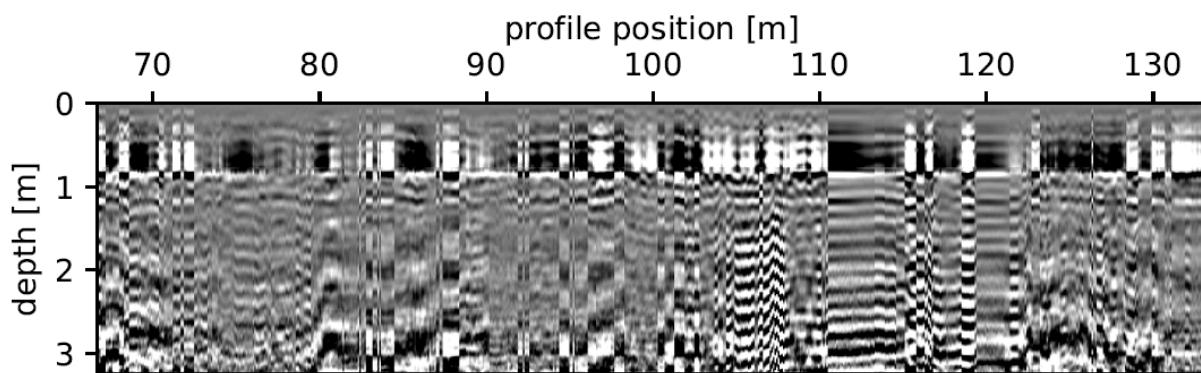
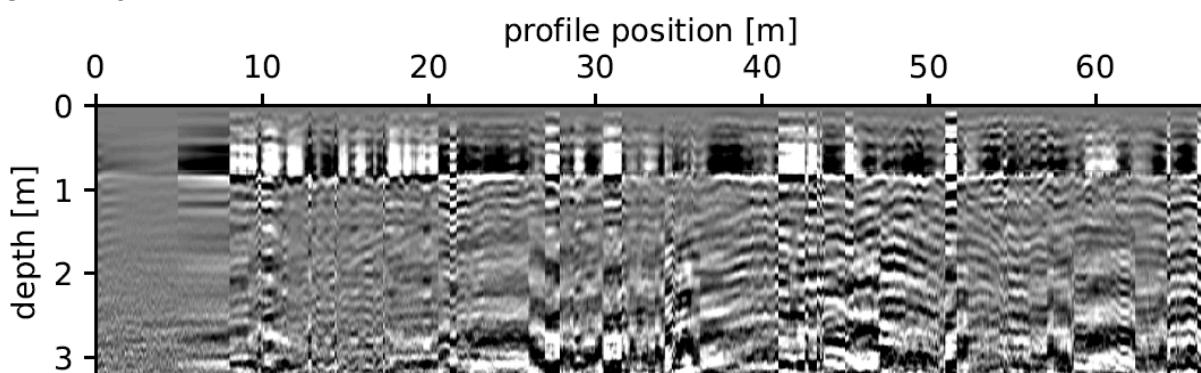


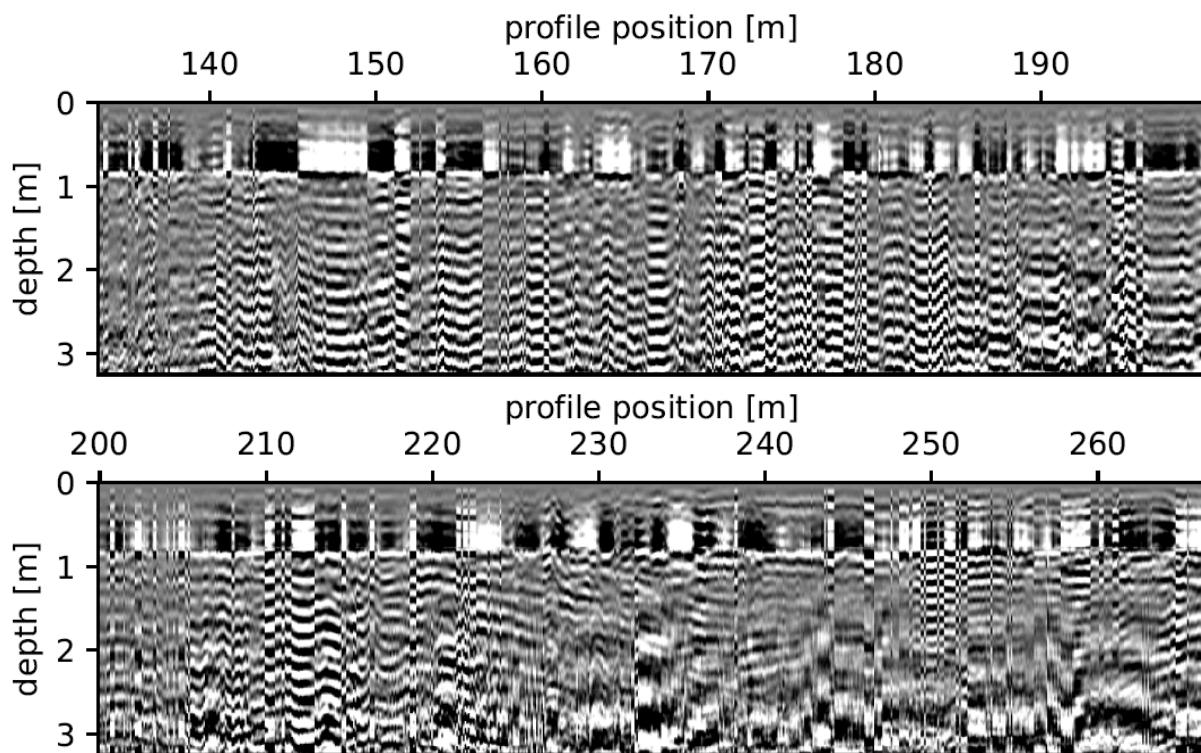
SWATH 4





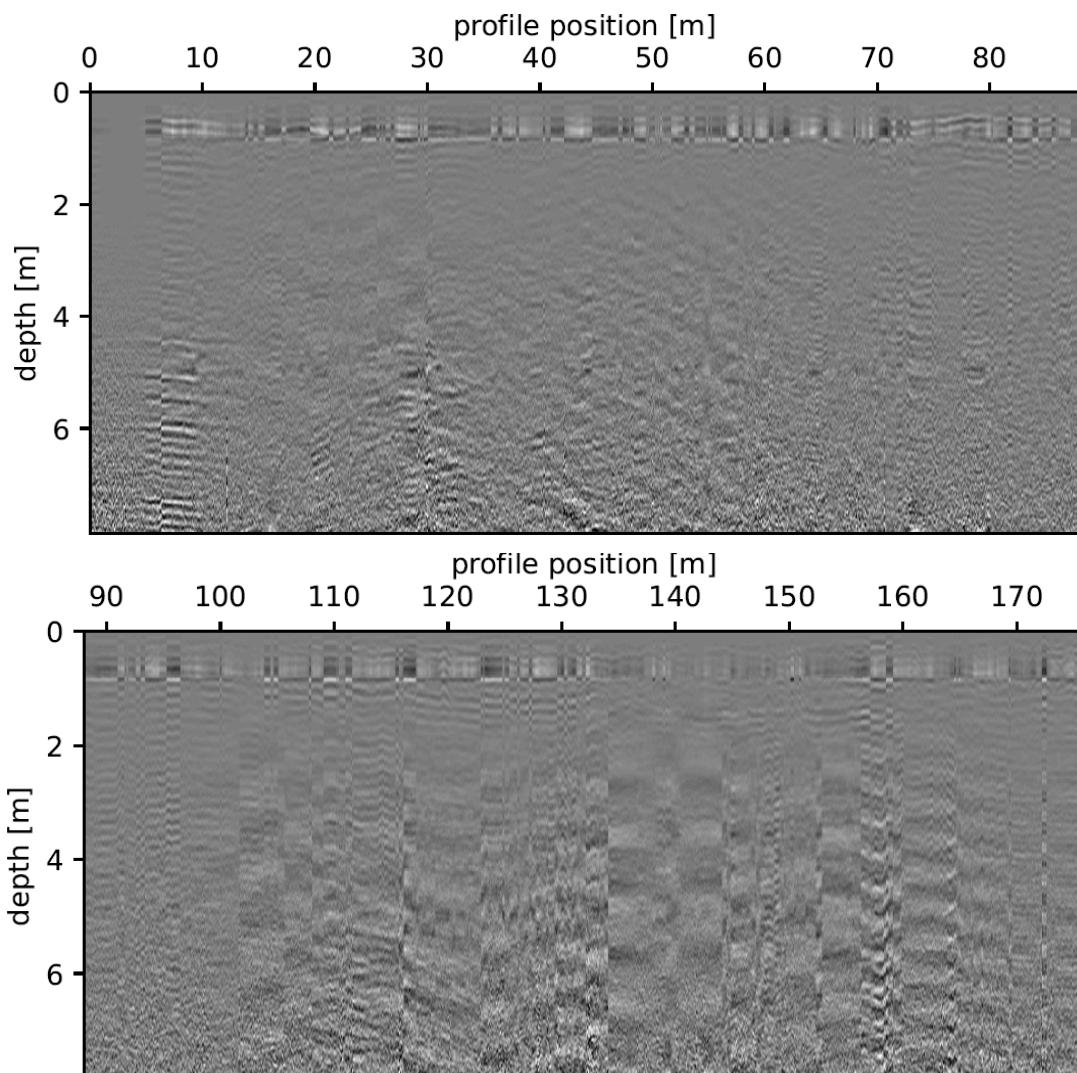
SWATH 5

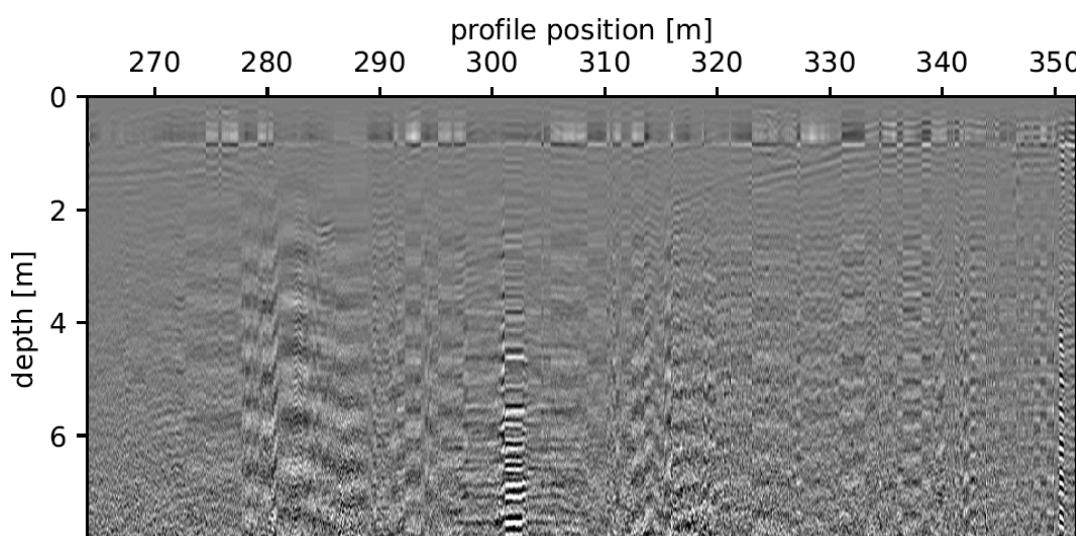
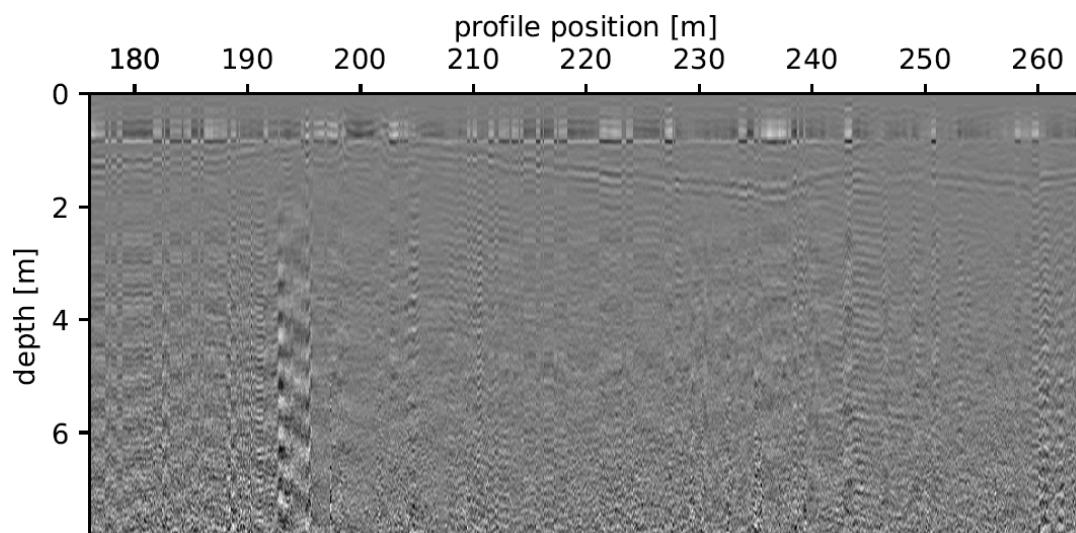




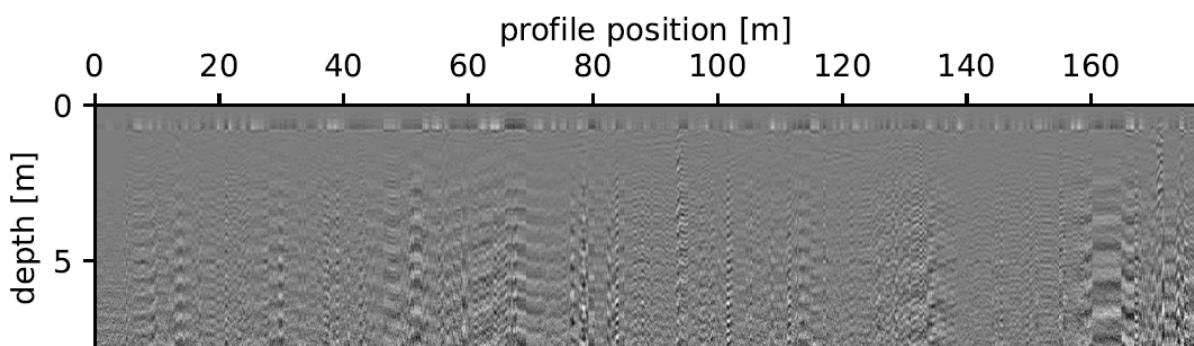
PEMEX 12

SWATH 1

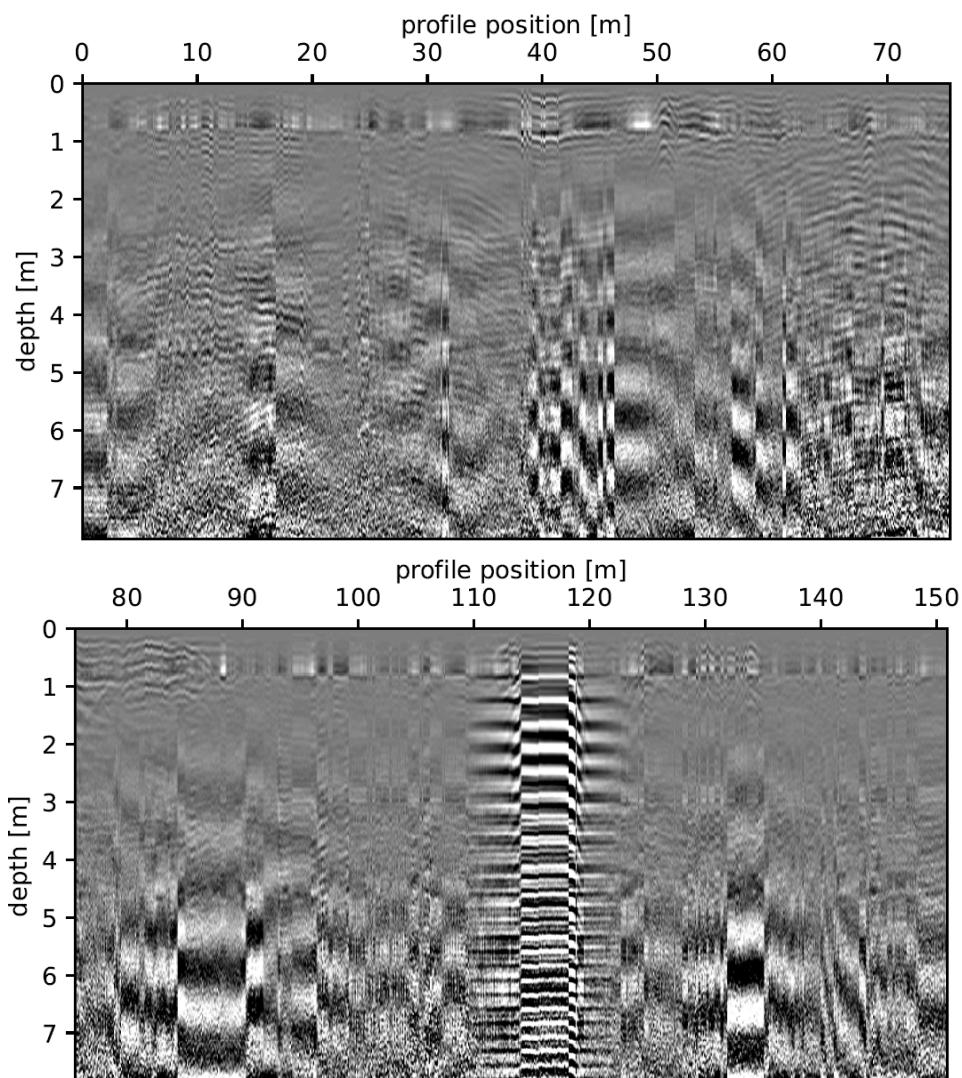


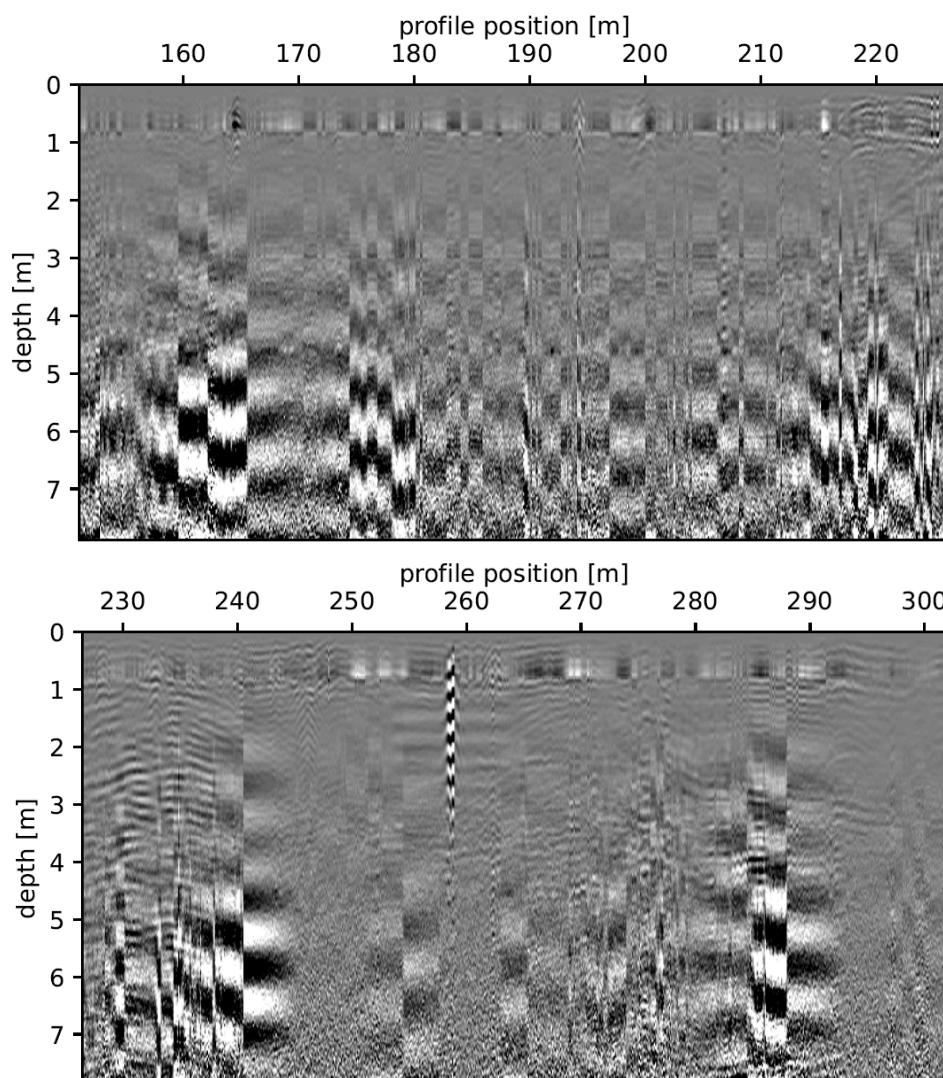


SWATH 2



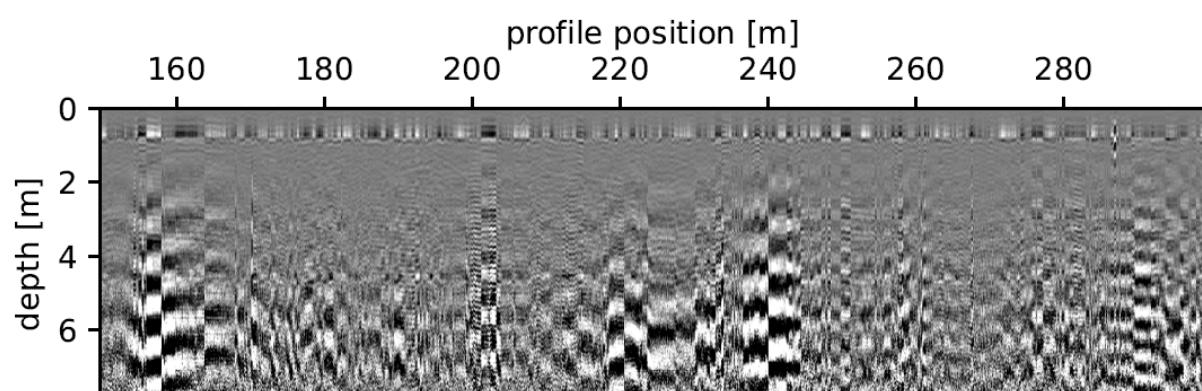
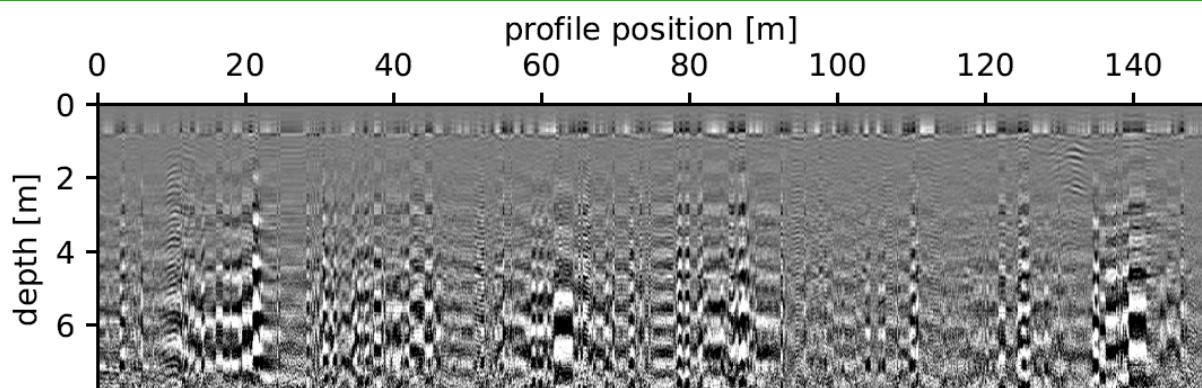
PEMEX 14





PEMEX 15

SWATH 1



SWATH 2

