

Evaluación “Rule of Thumb” para el cálculo del objetivo profundo en un diseño sísmico en tres dimensiones para exploración de hidrocarburos

“Rule of Thumb” Evaluation for calculating the deep target in a three-dimensional seismic design for hydrocarbon exploration

William Hernán Calero Navarrete¹ , Víctor Froilán Collaguazo Zhagnay² , Luis Ricardo Herrera Silva³ 

¹ Universidad Central del Ecuador, whcalero@uce.edu.ec, Quito - Ecuador

² Universidad Central del Ecuador, vfcollaguazo@uce.edu.ec, Quito - Ecuador

³ Universidad Central del Ecuador, lherrerass@uce.edu.ec, Quito - Ecuador

Autor para correspondencia: lherrerass@uce.edu.ec

RESUMEN

El propósito de esta investigación es analizar las prácticas más efectivas para el diseño de proyectos de adquisición sísmica en tres dimensiones, empleando un modelo básico como referencia para el desarrollo conceptual. La experiencia ha respaldado el uso de técnicas como la “Regla General” o “Rule of Thumb” para estimar la profundidad de un objetivo. De acuerdo a varios geofísicos, no existe una fórmula precisa para calcular las compensaciones óptimas. Por ello, se plantea como referencia que las compensaciones ideales oscilen entre 1.25 veces y 1.50 veces la profundidad del objetivo (d). Esta regla, validada en el desarrollo de múltiples proyectos, demuestra ser bastante alineada con la realidad de los objetivos planteados en proyectos sísmicos. Cabe destacar que este conocimiento no es comúnmente encontrado en fuentes convencionales y probablemente no esté documentado en la literatura especializada en geofísica, lo que refuerza la importancia de compartir estas experiencias e investigaciones. Finalmente, se debe reconocer que geológicamente cada área tiene características diferentes, por lo que es importante conocer con certeza y precisión los datos referentes al área, tales como: la profundidad del objetivo, la dirección y buzamiento de la estructura, etc., con el fin de diseñar el proyecto sísmico más adecuado, que en el futuro ayude a resolver problemas y reducir la incertidumbre a través de la toma de decisiones como la correcta ubicación y perforación de pozos nuevos.

Palabras clave: CDPs; Patch; Bin; Brick; Sísmica.

ABSTRACT

The objective of this research is to evaluate best practices for designing three-dimensional seismic acquisition projects, using a basic model or conceptual design. The experience have advocated using techniques such as the “Rule of Thumb” to determine the depth of a target. According to several geophysicists, there is no exact formula for calculating ideal offsets. Therefore, the “Rule of Thumb” states: To obtain the target depth (d), the desired offsets will be between 1.25d and 1.50d. This rule has been verified on many projects and can be assured to adhere very well to the reality of the objectives in a seismic project. This is not a common piece of information; it is difficult to find and likely does not exist in geophysical literature, so it is considered important to share experiences and research. Finally, it must be recognized that geologically each area has different characteristics, so it is important to accurately and precisely know the data related to the area, such as: the depth of the target, the direction and dip of the structure, etc., in order to design the most appropriate seismic project, which in the future will help solve problems and reduce uncertainty through decision-making such as the correct location and drilling of new wells.

Keywords: CDPs; Patch; Bin; Brick; Seismic.

Derechos de Autor

Los originales publicados en las ediciones electrónicas bajo derechos de primera publicación de la revista son del Instituto Superior Tecnológico Universitario Rumiñahui, por ello, es necesario citar la procedencia en cualquier reproducción parcial o total. Todos los contenidos de la revista electrónica se distribuyen bajo una [licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-4.0 Internacional](#).



Citar como:

Calero Navarrete, W. H., Collaguazo Zhagnay, V. F., & Herrera Silva, L. R. (2026). Evaluación “Rule of Thumb” para el cálculo del objetivo profundo en un diseño sísmico en tres dimensiones para exploración de hidrocarburos. *CONECTIVIDAD*, 7(2), e419. <https://doi.org/10.37431/conectividad.v7i2.419>

1. INTRODUCCIÓN

Los proyectos de adquisición sísmica se basan en la generación de ondas sísmicas mediante una fuente externa y su registro a través de sensores conocidos como geófonos, los cuales se distribuyen de manera geométrica sobre la superficie del área de estudio. A partir del análisis de las formas de onda y los tiempos que tardan en propagarse, es posible obtener imágenes del subsuelo que permiten interpretar las diferentes capas geológicas (generando productos como secciones sísmicas y modelos de velocidad) (Monclou Salcedo y Vargas Escobar, 2017).

El diseño sísmico más utilizado a nivel mundial es el arreglo ortogonal, aunque también existen otras configuraciones, como el diseño tipo “brick” o ladrillo doble, así como arreglos diagonales (Lara Bautista, 2015). Para llevar a cabo estos estudios, es necesario emplear fuentes artificiales que generen las ondas sísmicas, siendo las más comunes los explosivos y los sistemas de vibración (Soler Llorens, 2019).

Entre los distintos métodos, la sísmica de reflexión destaca por su capacidad para obtener imágenes detalladas del subsuelo. Esto permite identificar estructuras geológicas como fallas, pliegues (anticlinales y sinclinales), domos y otras discontinuidades, que generalmente coinciden con límites estratigráficos importantes (Hunter et al., 2022). En este sentido, el presente estudio se fundamenta en este método sísmico, el cual constituye la base para el diseño de adquisición sísmica tridimensional.

En la exploración de hidrocarburos se utilizan principalmente los métodos de reflexión y refracción. El primero es el más empleado en la industria petrolera, ya que permite explorar a mayores profundidades y proporcionar información de alta resolución. Por otro lado, el método de refracción se enfoca en determinar la velocidad de propagación de las ondas sísmicas en las distintas formaciones geológicas, lo cual es clave durante las etapas iniciales de exploración (Scivetti et al., 2021).

En sísmica bidimensional (2D), la unidad básica de adquisición es el CDP (Common Depth Point). Los datos registrados en cada disparo cubren una porción del subsuelo a lo largo de una línea en el plano, y posteriormente se agrupan y apilan en puntos comunes para formar una sección sísmica continua (Miró Pagés et al., 2019). Por su parte, en la sísmica tridimensional (3D), los datos se organizan en unidades llamadas “bins”, definidas dentro del diseño en

superficie. Cada disparo se registra mediante un tendido compuesto por varias líneas de receptores (spread), lo que permite obtener información del subsuelo desde distintas direcciones. Para que los resultados sean confiables, es fundamental lograr una cobertura continua del área. En este caso, se consideran dos dimensiones espaciales (la distribución de fuentes y receptores) y una temporal. El diseño de adquisición busca optimizar estos parámetros para obtener datos que puedan ser interpretados de manera adecuada (Duarte Castro, 2010).

Finalmente, en la adquisición 3D, la unidad básica se conoce como “patch”, que corresponde a un arreglo de múltiples líneas de receptores junto con el número mínimo de disparos necesarios para cubrir de forma continua el área de estudio.

En este contexto, la presente investigación se enmarca en un enfoque cuantitativo, con un alcance analítico-comparativo, y tiene como objetivo evaluar la validez de la “Rule of Thumb” utilizada para el cálculo del objetivo profundo en el diseño sísmico tridimensional aplicado a la exploración de hidrocarburos. Para ello, se emplea una metodología basada en el análisis y comparación de parámetros de diseño sísmico, considerando variables como la profundidad del objetivo, la geometría de adquisición y la cobertura resultante. El propósito es determinar el grado de confiabilidad de esta regla empírica y su impacto en la calidad del diseño sísmico, aportando criterios técnicos que permitan optimizar la planificación de proyectos de exploración.

2. METODOLOGÍA

La investigación se efectuó mediante un enfoque cuantitativo con un análisis comparativo, cuyo objetivo fue la evaluación de la aplicabilidad de la Rule of Thumb como una herramienta que permite determinar la profundidad del objetivo en un diseño de adquisición sísmica 3D en la exploración de hidrocarburos.

Se realizó un modelo conceptual utilizando una geometría ortogonal, ya que es una de las configuraciones más utilizadas en proyectos de exploración, debido a su eficiencia en la distribución espacial de fuentes y receptoras, así como también por la buena calidad de la cobertura sísmica que proporciona.

El diseño fue realizado usando un software especializado en adquisición sísmica; los parámetros fueron definidos con anterioridad. Se estableció un espaciamiento de 60 m entre receptores y 60 m entre fuentes, una separación entre líneas receptoras y líneas fuente de 480 m, que fueron

registradas o disparadas usando ocho (8) líneas receptoras activas, 64 estaciones receptoras por línea con un total de 512 canales de registro por disparo.

Una vez definidos los parámetros para la adquisición sísmica, se generó la malla y se establecieron los elementos fundamentales del diseño, entre ellos la geometría del patch, la distribución de los offsets, la cobertura sísmica (fold) y el tamaño de bin. Luego, se calcularon los principales parámetros geométricos mediante las ecuaciones convencionales utilizadas en el diseño de levantamientos sísmicos 3D, obteniéndose la multiplicidad In-Line Fold (ILF), Cross-Line Fold (CLF), el fold total, la apertura de migración y las dimensiones del bin.

El principal objetivo de la investigación consistió en la aplicación de la Rule of Thumb, criterio empírico o regla de dedo, que establece que la compensación máxima (maximum offset) debe encontrarse entre 1.25 y 1.50 veces la profundidad del objetivo geológico. A partir de esta relación se estimó la profundidad máxima que podría ser investigada con la geometría propuesta y posteriormente se comparó con la profundidad obtenida mediante el diseño geométrico convencional. Esta comparación permitió evaluar la influencia de dicho criterio sobre parámetros fundamentales del proyecto, tales como la extensión del patch, el número de líneas receptoras necesarias, la cobertura sísmica y la distribución de los offsets.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados fueron analizados de manera integral mediante la comparación entre los parámetros geométricos obtenidos y los valores estimados a partir de la Rule of Thumb. Este análisis permitió valorar la influencia de este criterio en la iluminación del subsuelo, la calidad de la cobertura sísmica y la capacidad del diseño para alcanzar el objetivo geológico propuesto. Además, se identificó el potencial de la metodología como una herramienta práctica para los diseños de adquisición sísmica 3D, contribuyendo a reducir la incertidumbre y a optimizar la planificación de proyectos geofísicos. En la Tabla 1 se pueden observar los parámetros establecidos para el proyecto de adquisición sísmica 3D.

La sísmica de reflexión es una herramienta fundamental (basada en el principio de impedancia acústica y el medio elástico por el cual se propagan las ondas sísmicas en el subsuelo) en la exploración de hidrocarburos por su capacidad de generar imágenes detalladas del subsuelo a grandes profundidades, facilitando la identificación de estructuras potencialmente productivas.

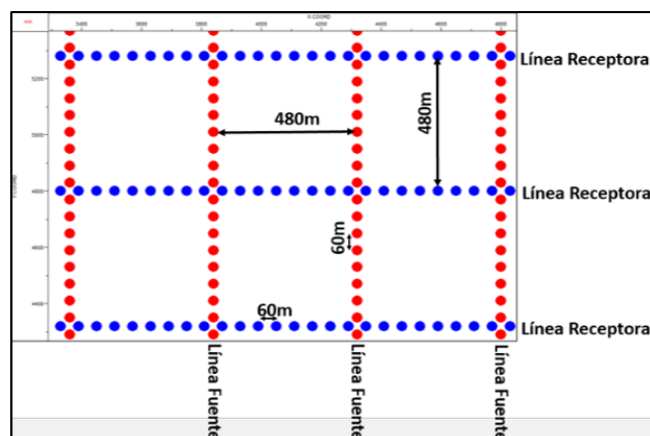
Sin embargo, su efectividad depende de la calidad del diseño de adquisición, la estimación de velocidad y el procesamiento de los datos (Yilmaz, 2001). La calidad de los datos obtenidos está directamente relacionada con la disposición geométrica de fuentes y receptores. Mapear de manera más eficiente la información del subsuelo.

Tabla 1. Parámetros técnicos para el proyecto sísmico conceptual.

Parámetros	Unidades (m.)
Intervalo de receptoras	60
Intervalo de disparos	60
Intervalo de líneas receptoras	480
Intervalo de líneas fuentes	480
Número de líneas receptoras activas	8
Número de receptoras activas/línea	64
Total, de canales grabados/disparo	512

Con base en estos parámetros, se procede a generar el diseño sísmico 3D mediante el uso de un software especializado, como se puede observar en la Figura 1, la dirección Norte-Sur de las líneas fuente (rojo), mientras que la dirección Este-Oeste de las líneas receptoras (azul).

Figura 1. Malla de proyecto sísmico 3D con parámetros de adquisición.



Fuente: Elaboración propia 2025.

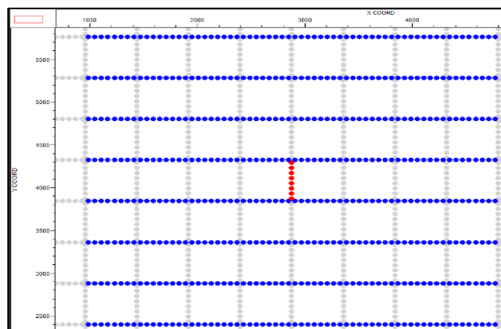
En la sísmica 3D, la unidad básica de adquisición es el “Patch” (Figura 2), definido como un tendido de receptoras en varias líneas en combinación con un número mínimo de disparos para hacer un área de cobertura continua desde el área de estudio; la definición de estos parámetros depende directamente de la profundidad del objetivo (target) más profundo.

El conocimiento de la profundidad objetivo es fundamental en el diseño sísmico 3D, ya que permite determinar la cantidad de líneas receptoras activas (spread), el número de puntos receptores y el número de fuentes por patch. Esto asegura una adecuada iluminación del área de

interés y que no queden relativamente cortos (Haque, 2018).

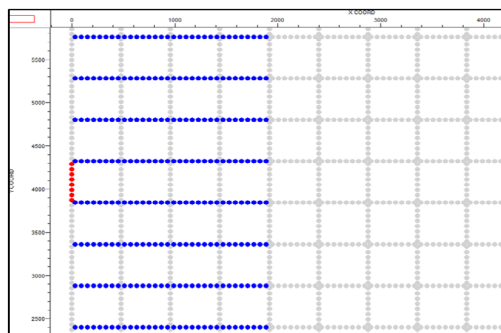
Cabe destacar que los proyectos sísmicos 3D no comienzan con un tendido completo, sino mediante un proceso conocido como Roll-Off, en el cual los efectos de los extremos de las líneas influyen en el incremento progresivo de la cobertura. Asimismo, aunque existen diversos tipos de diseño (ortogonal, diagonal, tipo ladrillo, entre otros), en esta investigación se emplea un diseño ortogonal, como se observa en la Figura 3.

Figura 2. Un patch (8 pozos) disparado con 8 líneas sísmicas.



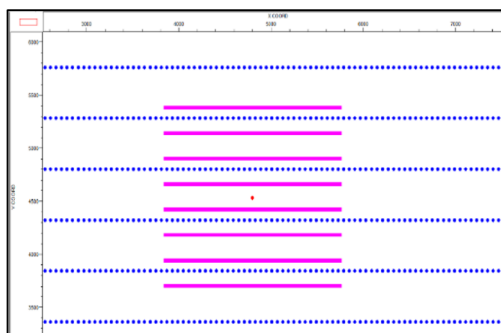
Fuente: Elaboración propia 2025.

Figura 3. Un patch disparado en un extremo del Proyecto y su respectivo tendido o spread.



Fuente: Elaboración propia 2025.

Figura 4. Disparo un solo pozo con su respectivo spread (full Spread).



Fuente: Elaboración propia, 2025.

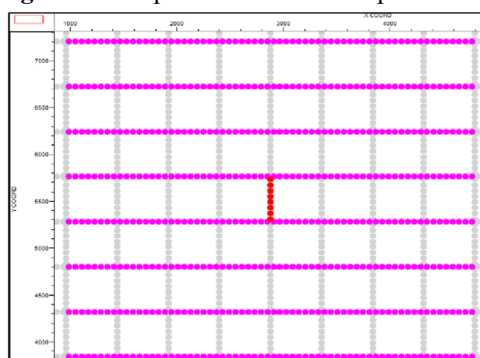
Es importante considerar que un proyecto sísmico se lleva a cabo únicamente una vez, lo que implica que los parámetros técnicos deben establecerse con máxima precisión para evitar inconvenientes al finalizar. Debido a que estos proyectos representan una inversión económica

muy elevada. La cobertura o fold es el muestreo en un bin en el punto medio entre una fuente y una receptora, como muestra la Figura 4, donde observamos un solo disparo y la cobertura obtenida de 1 fold.

Template: Patrón definido previamente antes de la adquisición y que corresponde al número de líneas receptoras usadas en cada disparo, como podemos observar en la Figura 5.

Salvo: Corresponde al grupo de puntos de disparo (fuentes) que se encuentra entre dos receptoras, como se observa en la Figura 5 (Stone, 1994).

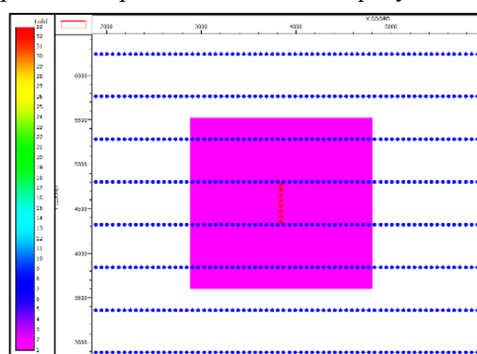
Figura 5. Template usado en un disparo de un salvo.



Fuente: Elaboración propia, 2025.

En la Figura 6 se muestra un *patch* ubicado en el extremo del área del proyecto, correspondiente a un arreglo de 8 puntos de disparo. Este fue adquirido mediante un *spread* centrado, compuesto por 8 líneas receptoras y un total de 32 canales activos en el borde del proyecto, lo que resulta en una cobertura de 1 fold.

Figura 6. Disparo de un patch al inicio del bloque y su cobertura (1 fold).



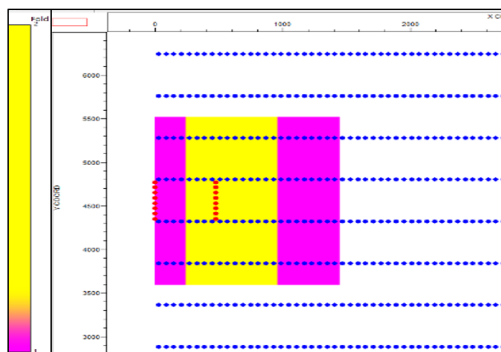
Fuente: Elaboración propia, 2025.

Este comportamiento es característico de los diseños con disparos centrados, donde idealmente se dispone de 32 receptores a cada lado del punto de disparo. Sin embargo, en este caso particular, al encontrarse las fuentes en el límite del área de estudio, no se cuenta con receptoras hacia uno de los lados (izquierdo), lo que genera una asimetría en la geometría de adquisición

y, en consecuencia, una reducción en la cobertura.

El disparo de 2 patch al costado del proyecto: su cobertura o fold va incrementando de acuerdo con el número de patch disparados. En este caso tenemos una cobertura máxima de 2 fold (área de color amarillo), como se observa en la Figura 7.

Figura 7. Disparo de dos patch al inicio del bloque (roll off).



Fuente: Elaboración propia, 2025.

La orientación en un diseño sísmico 3D constituye un factor fundamental para la adecuada adquisición de datos. Generalmente, las líneas receptoras se disponen de manera perpendicular a la dirección predominante de las estructuras geológicas, lo que permite mejorar su iluminación sísmica y, en consecuencia, optimizar la calidad de la imagen del subsuelo.

El bin utilizado es de 30 x 30 m; este dato se obtiene de acuerdo con las características del diseño, es decir, si tenemos una separación de receptoras de 60 m y de fuente de 60 m, en superficie, entonces el bin en subsuelo corresponde a 30 x 30 m.

Se puede observar el concepto de multiplicidad en la dirección de las receptoras “in line fold” (ILF) (Figura 8). Esta multiplicidad es muy similar a la de una línea 2D y puede calcularse con la siguiente fórmula:

$$ILF = \frac{\text{\#de canales vivos por línea de receptores}}{2 \times (\text{\#de receptores entre líneas de disparo})} \quad \text{ec. (1)}$$

El número de receptoras nuevas que aparecen en el tendido con el cambio de patch se llama “receiver roll-along”, el cual es igual al número de receptores entre líneas; la fórmula también se puede escribir así:

$$ILF = \frac{\text{\# de canales vivos por línea de receptores}}{2 \times (\text{receiver roll - along})} \quad \text{ec. (2)}$$

Remplazando tenemos:

$$ILF = \frac{64}{2 \times 8} = 4$$

Dirección de Receptoras (Cross-Line)

La multiplicidad Cross-Line (CLF) se calcula con la siguiente fórmula:

$$CLF = \frac{(\# \text{ de disparos/patch}) \times (\# \text{ de líneas activas})}{2 \times (\text{disparos entre líneas recep}) \times (\# \text{ líneas nuevas/swath})} \quad \text{ec. (3)}$$

En el caso de nuestro ejemplo:

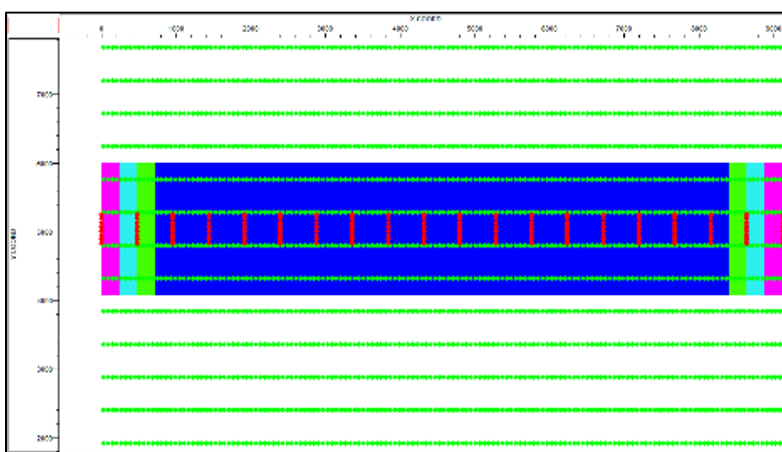
$$CLF = \frac{8 \times 8}{2 \times 8 \times 1} = 4$$

El número de disparos por patch es igual al número de disparos entre líneas de disparo y el número de líneas nuevas por swath es siempre uno, por lo que la fórmula se reduce a la siguiente:

$$CLF = \frac{1}{2} \times (\text{número de líneas activas}) \quad \text{ec. (4)}$$

$$CLF = \frac{1}{2} \times (8) = 4$$

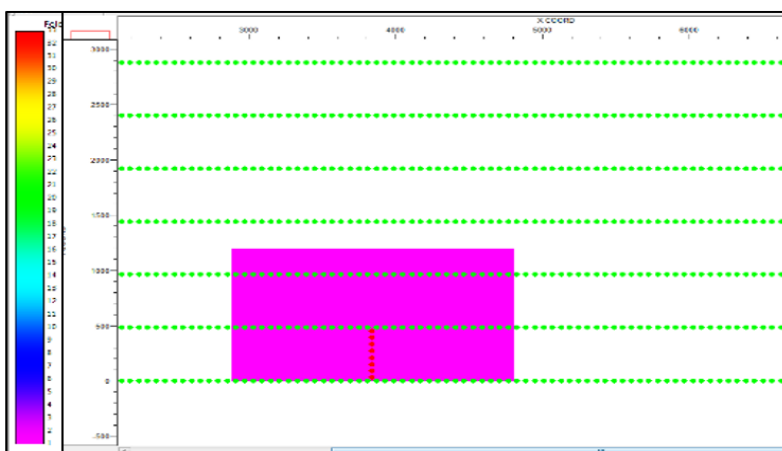
Figura 8. Swath completo con su cobertura correspondiente (fold = 4).



Fuente: Elaboración propia, 2025.

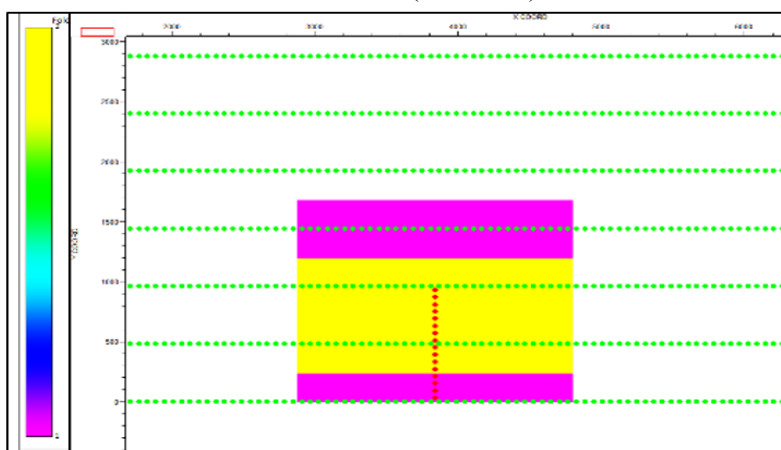
Para la adquisición que hemos descrito (swath centrado), esta fórmula es válida (Figura 9 y Figura 10), pero hay otros diseños de adquisición a los que esta fórmula no les sirve.

Figura 9. Disparo de un patch al inicio del bloque y su cobertura (1 fold) (Cross-Line).



Fuente: Elaboración propia, 2025.

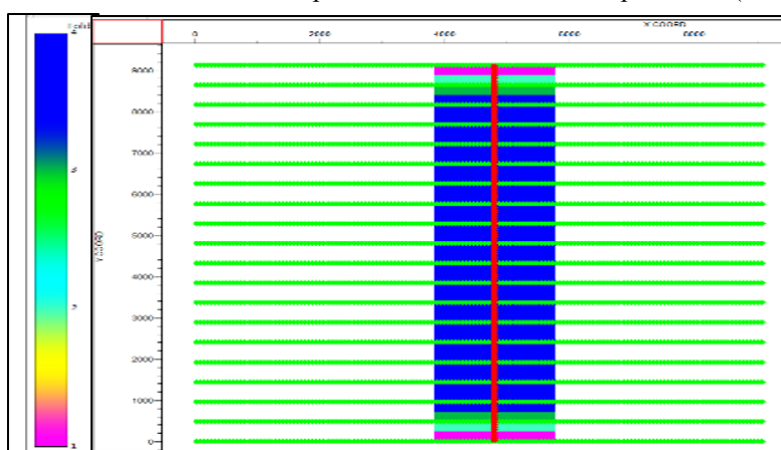
Figura 10. Disparo de dos patch al inicio del bloque (roll off) y su cobertura acumulada (2 fold), color amarillo (Cross-line).



Fuente: Elaboración propia, 2025.

En la Figura 11, podemos apreciar una línea de puntos de disparo formada por varios salvos (fuentes entre 2 receptoras), en sentido cross-line, donde tenemos una cobertura máxima de 4 fold.

Figura 11. Swath Cross-line completo con su cobertura correspondiente (fold = 4).



Fuente: Elaboración propia, 2025.

3.1. Cobertura en el Proyecto

Cada posición de la fuente produce una cierta cantidad de cobertura del subsuelo. Para capas planas, el punto muestreado está a la mitad de la distancia entre la fuente y el receptor. El muestreo del subsuelo es la mitad del intervalo de cobertura de la superficie; la cobertura se define como el número de veces que un punto de muestreo del subsuelo en particular está cubierto por diferentes ubicaciones de fuentes y receptores (Mahroug, 2005).

Si empezamos en la dirección in-line y la dirección cross-line, el resultado es el mismo. La cobertura completa es el producto de la cobertura Cross-line (CLF) multiplicado por la cobertura in-line (ILF) (Salas, 2013).

$$\text{Fold} = \text{CLF} * \text{ILF}$$

ec. (5)

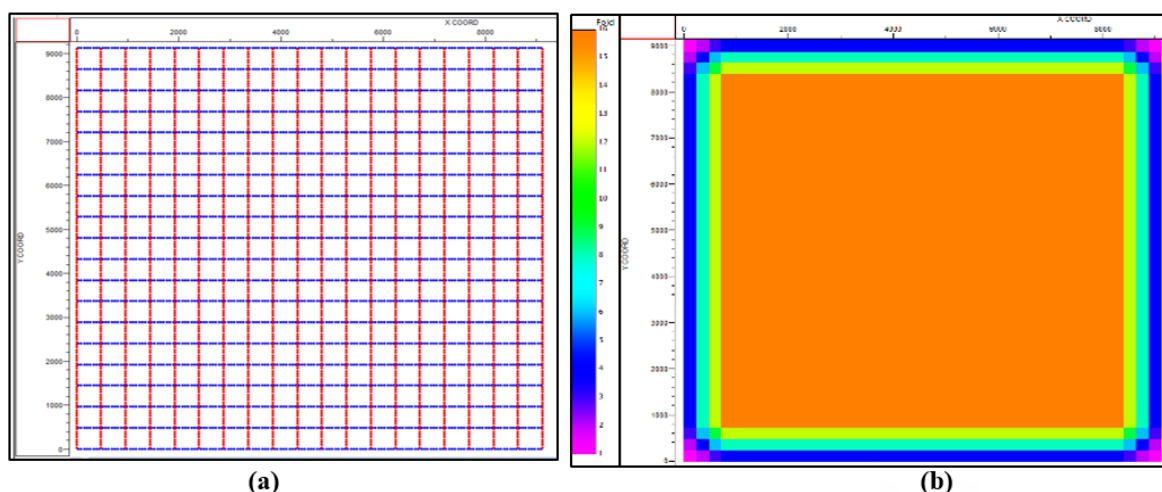
Para nuestro estudio

$$\text{Fold} = 4 \times 4 = 16$$

El diseño completo se observa en la Figura 12a, en donde se aprecia el proyecto completo y las líneas receptoras tienen un sentido E-W, mientras que las líneas fuente están en sentido N-S. Este es un diseño ideal, el cual, al ser aplicado en campo, va a tener ciertas variaciones en el diseño debido a aspectos ambientales como la presencia de ríos, esteros, infraestructura, carreteras, entre otros.

En el fold nominal considerado ideal (Figura 12b), en esta imagen se puede observar el máximo fold obtenido en el diseño (full fold = 16), y mientras nos acercamos a los flancos (Fold Tapir). Este siempre va disminuyendo debido a que los disparos de los extremos no se disparan con geometría completa.

Figura 12. (a) Diseño sísmico 3D ortogonal y (b) cobertura total (16 Fold).



Fuente: Elaboración propia, 2025.

3.2. Apertura de Migración

Según (Albin, 2012), en los campos donde existe un buzamiento estructural en la zona de interés, se requiere realizar una corrección por efecto de migración, en forma de un área adicional al contorno del área original del proyecto. Podemos calcular la longitud de la apertura de migración utilizando la siguiente ecuación:

$$R_m = 0.8 d \tan \theta$$

ec. (6)

3.3. Tamaño del Bin

Según (Ramírez Aguirre, 2020), el tamaño del Bin siempre será la mitad del espacio entre

fuentes y receptores para nuestro proyecto; el espacio entre fuentes y receptores en superficie es de 60 m; por tanto, el tamaño del Bin en subsuelo es de 30 x 30 m. La ecuación utilizada es:

$$b = \frac{V}{4 f \sin \emptyset} \quad \text{ec. (7)}$$

Donde:

V = velocidad promedio al objetivo.

f = frecuencia máxima en los datos obtenidos.

$\emptyset$ = Ángulo máximo de buzamiento estructural.

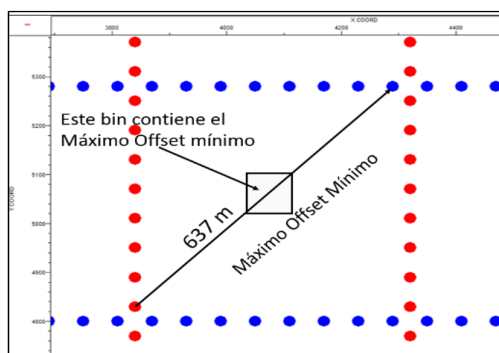
Cuando se registra un disparo, cada traza tiene su respectivo offset, que es la distancia entre el disparo y el receptor, en la cual la traza fue grabada (Carcione et al., 2002).

Según diversos autores, no hay una fórmula precisa para determinar los offsets óptimos; sin embargo, los offsets más largos son los que representan mejor la profundidad del objetivo. Por ello, una regla práctica sugiere que, para alcanzar la profundidad deseada (d), los offsets apropiados deberían situarse entre 1.25d y 1.50d.

Es importante mencionar que en la adquisición sísmica la profundidad del objetivo está determinado por la longitud y el número de las líneas receptoras en superficie.

También es importante considerar los offsets cortos, denominados máximo offset mínimo (Kastillo Estrella y Raura Salinas, 2013). En otras palabras, si sacamos el offset mínimo de cada bin y luego buscamos en estos el más grande, tendremos el máximo offset mínimo. Este número es un índice de profundidad mínima de resolución y debe ser menor que el offset mínimo que hemos calculado (637 m). En la Figura 13 se representan gráficamente el offset máximo Cross-line y el offset mínimo.

Figura 13. Máximo offset mínimo y el bin que lo contiene.

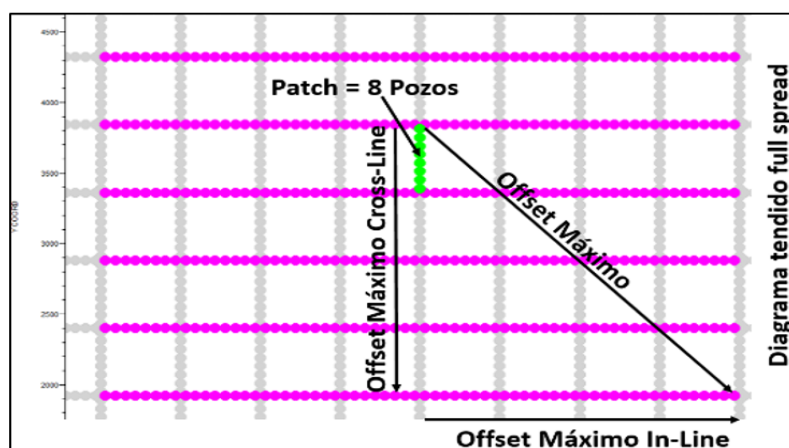


Fuente: Elaboración propia, 2025.

En la Figura 14 tenemos un diagrama con full spread o tendido completo, donde también podemos observar el offset máximo cross-line, el offset máximo in-line y, al final, el offset

máximo, que corresponde a la distancia o al offset más profundo.

Figura 14. Offset Maximo In-line y Crossline.



Fuente: Elaboración propia, 2025.

El offset máximo es muy fácil de calcular, para lo cual utilizaremos la siguiente nomenclatura:

NRPL = número de receptoras vivas por línea.

IR = intervalo de Receptores.

NLR = número de líneas receptoras vivas.

ILR = intervalo de líneas receptoras.

ID = intervalo de puntos de disparo.

$$\text{Offset Máximo} = \sqrt{\left(\frac{1}{2}NRPL * IR - \frac{1}{2}IR\right)^2 + \left(\frac{1}{2}NLR * ILR - \frac{1}{2}ID\right)^2} \quad \text{ec. (8)}$$

$$\text{Offset Máximo} = \sqrt{\left(\frac{1}{2}64 * 60 - \frac{1}{2}60\right)^2 + \left(\frac{1}{2}8 * 480 - \frac{1}{2}60\right)^2}$$

$$\text{Offset Máximo} = \sqrt{(1890)^2 + (1890)^2}$$

$$\text{Offset Máximo} = 3780 \text{ m}$$

La distancia de 3780 m corresponde a la profundidad máxima hasta donde obtendremos información sísmica utilizando el enfoque de “Rule of Thumb”. Sin embargo, para garantizar un margen de seguridad, el objetivo más profundo del estudio debería situarse ligeramente por encima de este valor, evitando así posibles limitaciones durante la adquisición sísmica y asegurando una iluminación adecuada del subsuelo.

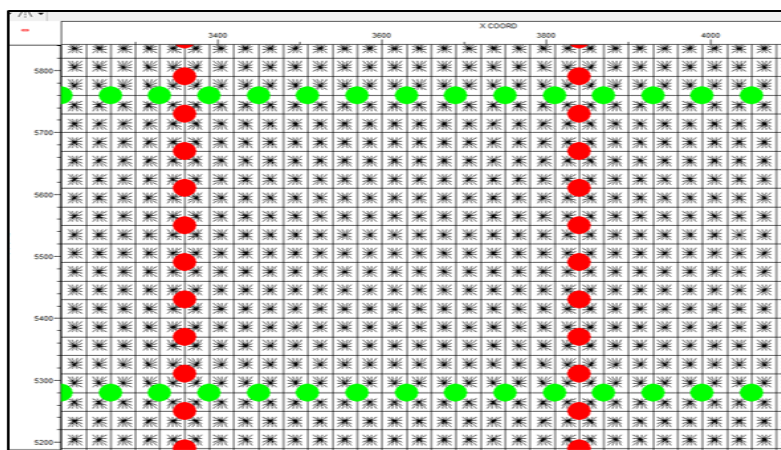
En este diseño de investigación, los 3780 m de profundidad han sido calculados aplicando la “Rule of Thumb” 1.25d. Teóricamente, sin aplicar esta regla, el objetivo más profundo se encontraría a una profundidad de 2811.5 m, lo que implica una diferencia de 968.5 m. Este

método se emplea para asegurar que el mapeo en profundidad durante la adquisición sísmica logre iluminar por completo la estructura objetivo, evitando cualquier riesgo de quedar por encima del objetivo principal.

El cálculo a través de la regla también permite definir los parámetros en terreno como son el número de líneas receptoras y el número de grupos de geófonos, ya que es conocido que el offset más largo está relacionado con la profundidad del objetivo.

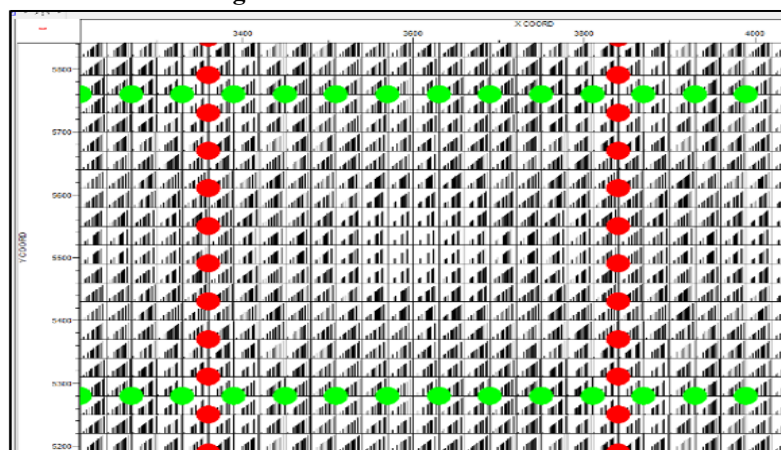
En la Figura 15 podemos apreciar la contribución de la señal en una celda o en un Bin de 30x30 m en subsuelo. Observamos también que los aportes o muestras vienen de diferentes sectores y se concentran en el centro de un bin. Esta es una ventaja que tienen los diseños sísmicos en 3 dimensiones.

Figura 15. Aporte de información o muestreo en un bin de 30x30 en el subsuelo.



Fuente: Elaboración propia, 2025.

Figura 16. Distribución de Off sets.



Fuente: Elaboración propia, 2025.

En la Figura 16 se muestra un diagrama de distribución de offsets en función de los parámetros definidos. Se puede apreciar que, en ciertos sectores, la distribución resulta homogénea, mientras que en otros esta característica no se mantiene. Este comportamiento depende principalmente del

tipo de diseño y de los parámetros configurados para cada caso. Por ejemplo, algunos diseños, como el denominado “tipo Ladrillos”, exhiben mayor homogeneidad tanto en los offsets cortos como en los largos. En contraste, el diseño ortogonal refleja los resultados específicos que se visualizan en la Figura 16.

3.4. Análisis del diseño sísmico generado

A partir de los parámetros definidos en la etapa metodológica, se obtuvo un diseño sísmico tridimensional con geometría ortogonal, el cual permitió evaluar la distribución espacial de fuentes y receptores, así como su impacto en la cobertura del subsuelo. El diseño presenta una adecuada organización de líneas in-line y cross-line, lo que garantiza una distribución homogénea de los puntos de muestreo.

El espaciamiento entre líneas y estaciones generó una malla regular de adquisición, lo que se traduce en una cobertura uniforme en la zona central del proyecto. Sin embargo, como es característico en este tipo de diseños, se observan efectos de borde en las zonas periféricas, donde la cobertura disminuye progresivamente debido al proceso de roll-off.

3.5. Evaluación de la cobertura (Fold)

Uno de los principales resultados obtenidos corresponde al análisis de la cobertura sísmica (fold), la cual alcanzó un valor máximo de 16 en la zona central del diseño. Este valor es consistente con los parámetros establecidos y se considera adecuado para estudios de exploración de hidrocarburos.

El análisis de la distribución del fold evidencia que:

- La cobertura es máxima en la zona central del área de estudio.
- Existe una disminución gradual hacia los extremos del diseño.
- La distribución es simétrica, lo que indica un buen balance entre líneas de fuentes y receptores.

La descomposición del fold en sus componentes in-line (ILF) y cross-line (CLF) permitió verificar que ambos contribuyen de manera equilibrada al valor total, lo que confirma la eficiencia del arreglo geométrico adoptado.

Sin embargo, la disminución de cobertura en los bordes evidencia una limitación inherente al diseño, lo cual podría afectar la calidad de la información en dichas zonas si no se consideran estrategias adicionales de adquisición.

3.6. Análisis del tamaño de bin y resolución espacial

El tamaño de bin obtenido (30×30 m) refleja una adecuada discretización del subsuelo, permitiendo una resolución espacial compatible con los objetivos de exploración. Este valor garantiza que los datos adquiridos pueden representar con suficiente detalle las estructuras geológicas de interés (Evans, 1997).

Además, el tamaño del bin se encuentra en concordancia con el espaciamiento de fuentes y receptores, lo que evita problemas de submuestreo o redundancia excesiva en la información adquirida.

3.7. Evaluación de la geometría de adquisición

La geometría ortogonal implementada permitió generar una distribución adecuada de offsets y acimuts, lo cual es fundamental en sismica de reflexión para asegurar una correcta iluminación del subsuelo.

El análisis de la geometría muestra que:

- Existe una buena cobertura en diferentes direcciones.
- Se garantiza la adquisición de información desde múltiples ángulos.
- Se minimizan zonas de sombra en el subsuelo.

Estos resultados indican que el diseño es robusto desde el punto de vista geométrico y adecuado para la caracterización estructural del área.

3.8. Evaluación de la Rule of Thumb para el objetivo profundo

El aspecto central de esta investigación fue la evaluación de la “Rule of Thumb” utilizada para estimar la profundidad del objetivo en el diseño sísmico 3D.

A partir de su aplicación, se definieron parámetros clave como:

- Número de líneas receptoras activas
- Extensión del patch
- Cantidad de disparos necesarios
- Cobertura esperada

Los resultados obtenidos muestran que la aplicación de esta regla empírica permite establecer un diseño inicial coherente con los requerimientos del proyecto. En particular, se observó que:

- La profundidad objetivo estimada mediante la Rule of Thumb es consistente con la cobertura

alcanzada.

- El diseño generado cumple con los criterios mínimos de iluminación del subsuelo.
- No se evidencian deficiencias significativas en la distribución de datos en la zona central.

Sin embargo, también se identificaron ciertas limitaciones:

- La regla no considera variaciones geológicas complejas.
- Puede generar sobreestimación o subestimación en zonas con alto buzamiento.
- No incorpora directamente parámetros como velocidad sísmica o anisotropía.

3.9. Impacto en la calidad del diseño sísmico

La evaluación integral del diseño permitió determinar que la aplicación de la Rule of Thumb tiene un impacto positivo en la fase inicial de planificación, ya que facilita la definición rápida de parámetros de adquisición.

No obstante, los resultados sugieren que su uso debe complementarse con análisis más detallados, especialmente en escenarios geológicos complejos. En este sentido, la regla funciona como una herramienta preliminar, pero no sustituye estudios más avanzados de modelamiento sísmico.

Los resultados obtenidos son consistentes con lo reportado en la literatura, donde se establece que los diseños ortogonales con coberturas moderadas (fold entre 12 y 24) son adecuados para la exploración de hidrocarburos.

Asimismo, se confirma que la calidad del diseño sísmico depende no solo de la geometría, sino también de una adecuada definición del objetivo profundo. En este contexto, la Rule of Thumb demuestra ser una herramienta útil, aunque limitada, para la estimación inicial de dicho parámetro.

Finalmente, el análisis evidencia que un diseño bien estructurado permite optimizar recursos y mejorar la calidad de la información adquirida, lo cual es fundamental considerando los altos costos asociados a la adquisición sísmica 3D.

4. CONCLUSIONES

La aplicación de la “Rule of Thumb” permitió establecer de manera eficiente los parámetros iniciales del diseño sísmico tridimensional, particularmente en la estimación de la profundidad objetivo y la configuración del patch, evidenciando su utilidad como herramienta práctica en etapas preliminares de planificación en exploración de hidrocarburos.

El diseño sísmico generado, basado en una geometría ortogonal, logró una cobertura adecuada del subsuelo, alcanzando valores de fold consistentes con los requerimientos de la industria. Esto demuestra que los parámetros derivados de la regla empírica son funcionales para obtener una distribución homogénea de datos en la zona central del área de estudio.

El tamaño de bin obtenido permitió una discretización adecuada del subsuelo, garantizando una resolución espacial compatible con los objetivos de exploración. No obstante, se identificó que la elección de este parámetro implica un balance entre calidad de imagen y costos operativos, lo cual debe ser considerado en el diseño.

La geometría de adquisición implementada favoreció una adecuada distribución de offsets y acimuts, lo que contribuyó a una correcta iluminación del subsuelo, aspecto fundamental en la sísmica de reflexión para la identificación de estructuras geológicas complejas.

A pesar de sus ventajas, la “Rule of Thumb” presenta limitaciones importantes, ya que no considera de manera explícita factores geológicos como variaciones en la velocidad sísmica, anisotropía o estructuras con alto buzamiento. Esto implica que su aplicación debe ser complementada con análisis más detallados para evitar posibles desviaciones en el diseño final. La evaluación realizada evidencia que la “Rule of Thumb” constituye una herramienta válida para la estimación inicial del objetivo profundo; sin embargo, su uso debe ser considerado como una aproximación preliminar y no como un criterio definitivo dentro del proceso de diseño sísmico.

Se concluye que la calidad del diseño sísmico tridimensional depende en gran medida de la correcta definición del objetivo profundo, ya que este parámetro condiciona directamente la geometría de adquisición, la cobertura y, en consecuencia, la calidad de la información obtenida. Finalmente, esta investigación aporta criterios técnicos para la evaluación del uso de reglas empíricas en el diseño sísmico, contribuyendo a mejorar la toma de decisiones en proyectos de exploración de hidrocarburos y promoviendo la integración de metodologías más robustas en etapas posteriores del diseño.

Contribución de los Autores (CRedit): WHCN: Conceptualización, Investigación, Administración del proyecto, Software, Validación, Redacción - borrador original. VFCZ: Conceptualización, Curación de datos, Análisis formal, Validación, Redacción - revisión y edición. LRHS: Conceptualización, Metodología, Administración del proyecto, Supervisión, Redacción - revisión y edición.

Conflicto de Intereses: Los autores declaran que no existen conflictos de intereses en esta publicación.

Declaración de Uso de Inteligencia Artificial: Los autores declaran que no utilizaron herramientas de inteligencia artificial (IA) en el desarrollo del artículo.

REFERENCIAS

- Albin, B. (2012). *Seismic Field Techniques: Theory and Practice*. PetroSkills-Course Houston, Texas.
- Carcione, J. M., Herman, G. C., & ten Kroode, A. P. E. (2002). Seismic modeling. *Geophysics*, 67(4), 1304–1325. <https://doi.org/10.1190/1.150039>
- Duarte Castro, M. (2010). *Análisis de sensibilidad en el diseño de parámetros de adquisición sísmica 3D3C para el Campo Tenerife* [Tesis de posgrado, Universidad EAFIT] Repositorio institucional. <https://hdl.handle.net/10784/187>
- Evans, B. J. (Ed.). (1997). Seismic Exploration. *En A Handbook for Seismic Data Acquisition in Exploration* (Vol. 7, p. 0). Society of Exploration Geophysicists. <https://doi.org/10.1190/1.9781560801863.ch1>
- Haque, N. (2018). *Seismic Exploration*. In *Petroleum Geoscience* (375-402). University of Oslo. https://www.researchgate.net/publication/226085296_Seismic_Exploration
- Hunter, J. A., Crow, H. L., Stephenson, W. J., Pugin, A. J-M., Williams, R. A., Harris, J. B., Odum, J. K., & Woolery, E. W. (2022). Seismic site characterization with shear wave (SH) reflection and refraction methods. *Journal of Seismology*, 26, 631–652. <https://doi.org/10.1007/s10950-021-10042-z>
- Kastillo Estrella, G. S. y Raura Salinas, J. L. (2013). *Adquisición e Interpretación Sísmica en el Campo LLumpak del Oriente ecuatoriano* [Tesis Pregrado, UCE. FIGEMPA] Repositorio institucional. <https://www.dspace.uce.edu.ec/entities/publication/2f21b152-791f-47a1-95ca-6c1656de36cc>
- Lara Bautista, C. A. (2015). *Descripción del proceso analógico y convencional a digital, sísmico en la exploración de hidrocarburos* [Tesis Pregrado, Instituto Politécnico Nacional] Repositorio institucional. <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/19478/ICE%2025-15%20-%2019-CD17.pdf?sequence=1>
- Mahrour, A. (2005). *2D and 3D Land Seismic Data Acquisition and Seismic Data Processing*. Department of Geophysics, College of Science and Technology, Andhra University. https://www.academia.edu/19025541/2D_and_3D_Land_Seismic_Data_Acquisition_and_Seismic_Data

Processing

- Miró Pagés, G., Escartin Sauleda, E., y Amador Longoria, H. E. (2019). Nuevas tendencias de la exploración sísmica. *RCI*, 4(2), 1-13. https://www.researchgate.net/profile/Guillermo-Pages-2/publication/323812468_Nuevas_tendencias_de_la_exploracion_sismica/links/5af5ca8eaca2720af9c6c093/Nuevas-tendencias-de-la-exploracion-sismica.pdf
- Monclou Salcedo, A. A., & Vargas Escobar, L. J. (2017). Prototipo Preliminar para el estudio de ondas Sísmicas y su aplicación en el laboratorio de ciencias básicas. *Ciencia e Ingeniería*, 38(2), 141-148. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=507555007006&utm_source=chatgpt.com
- Ramírez Aguirre, L. M. (2020). *Comprobación de los parámetros de Adquisición Sísmica 3D en una Zona de Chicontepec* [Tesis de pregrado del Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Ticomán, Ciencias de la Tierra] Repositorio institucional. https://es.scribd.com/document/346613671/Comprobacion-de-Los-Parametros-de-Adquisicion-Sismica-3D-en-Una-Zona-de-Chicontepec-1?utm_source=chatgpt.com
- Salas, X. (2013). *Estudio y Análisis del Proyecto de Prospección Sísmica “W-3D” para la Elaboración de un Cubo Sísmico en el Complejo W-I del Oriente Ecuatoriano* [Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica del Litoral] Repositorio institucional. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/24865>
- Scivetti, N., Bahia, M. E., & Spagnuolo, J. (2021). *Manual de Geofísica y Métodos Geofísicos*. Universidad Nacional del Sur. Edius. Argentina. https://ediuns.com.ar/wp-content/uploads/2021/08/Manual-de-Geofisica-y-metodos-geofisicos_web.pdf
- Soler Llorens, J. L. (2019). *Diseño, implementación y validación de sistemas de adquisición de datos sísmicos basados en Arduino* [Tesis de doctorado, Universidad de Alicante]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=260181>
- Stone, D. (1994). *Designing Seismic Surveys in Two and Three Dimensions*. Society of Exploration Geophysicists. <https://doi.org/10.1190/1.9781560802730>
- Yilmaz, O. (2001). *Seismic Data Analysis: Processing, Inversion, and Interpretation of Seismic Data*. Society of Exploration Geophysicists (SEG). <https://doi.org/10.1190/1.9781560801580>