

Adquisición de datos **SÍSMICOS** en Colombia

Jaime Checa Jiménez

*Una visión práctica e integral de la actividad
de prospección sísmica para hidrocarburos en Colombia.*



ACGGP

ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE GEÓLOGOS Y GEOFÍSICOS DEL PETRÓLEO

Adquisición de datos SÍSMICOS en Colombia

Jaime Checa Jiménez

*Una visión práctica e integral de la actividad
de prospección sísmica para hidrocarburos en Colombia.*



ACGGP
ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE GEÓLOGOS Y GEOFÍSICOS DEL PETRÓLEO



Jaime G. Checa Jiménez nació en Bogotá, Colombia. Es ingeniero civil de la Escuela Colombiana de Ingeniería, con estudios de especialización en Exploración Geofísica de Colorado School of Mines y Gerencia de Hidrocarburos de la Universidad Industrial de Santander.

Durante más de 30 años se ha desempeñado como geofísico de exploración en el área de adquisición y procesamiento de datos sísmicos en Ecopetrol, Nexen Petroleum, BP Exploration, BHP Billiton, Hocol S.A. y Sierracol Energy (antes OXY Colombia). Es miembro activo de las principales asociaciones profesionales nacionales e internacionales y se ha destacado por sus aportes a la divulgación de los métodos de prospección geofísica en variados escenarios del ámbito regional.

Es cofundador de **Pedalazos Que Construyen**, iniciativa social que gestiona viviendas prioritarias para familias en necesidad a partir de la práctica del ciclismo recreativo.



Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo

ADQUISICIÓN DE DATOS SÍSMICOS EN COLOMBIA

Primera edición, abril de 2022

ISBN 978-958-53574-1-9

Autor

Jaime Checa Jiménez

Pedagogía regional

Flover Rodríguez Portillo

Revisores de contenido

Antonio Velásquez Espejo

Gabriel Pérez Pinilla

Mauricio Otavo Franco

Carlos Ortega Galvis

Diseño y diagramación

Pedro William Velásquez García

Corrección de estilo y edición

Laura Ossa Aya

Zulma Velandia Velandia

Luisa Fernanda Montero Trigos

Gestión y planificación general

Laura Becerra Silva

Camila Blanco García

Fotografías

Stock ACGGP


Henry Melo Aguirre

Con el patrocinio de



Contenido

INTRODUCCIÓN	4
ASPECTOS TÉCNICOS	20
2.1 INTRODUCCIÓN	
2.2 TERMINOLOGÍA	22
2.3 ELEMENTOS DE DISEÑO	39
2.3.1 Parámetros geométricos	
2.3.2 Patrones de fuente y recepción	
2.4 EJEMPLO DE DISEÑO	58
2.5 NUEVAS TENDENCIAS EN ADQUISICIÓN TERRESTRE	66
2.5.1 Sistemas sin cable	
2.5.2 Vibrado simultáneo	
2.5.3 Compressive sensing	
2.5.4 Levantamientos con alta densidad de receptores	
2.6 ADQUISICIÓN DE INFORMACIÓN EXPERIMENTAL	75
2.7 CONTROL DE CALIDAD	83
3. ASPECTOS DE ENTORNO	86
3.1 PLANEACIÓN DE OPERACIONES Y REGULACIÓN APLICABLE	
3.2 ASPECTOS ADMINISTRATIVOS	89
3.3 ASPECTOS AMBIENTALES	93
3.4 ASPECTOS SOCIALES	104
3.5 GESTIÓN DE TIERRAS	112
3.6 GESTIÓN DE EXPLOSIVOS	113
3.7 CONFLICTIVIDAD SOCIAL: MITOS Y REALIDADES	119
3.8 PEDAGOGÍA REGIONAL	128
4. GESTIÓN DE COSTOS Y CONTRATACIÓN	140
4.1 ESTRUCTURA DE COSTOS	140
4.2 EJEMPLO DE CÁLCULO	144
4.3 ESTIMACIÓN DE CONTINGENCIAS	153
4.4 ESQUEMAS DE CONTRATACIÓN	154
4.5 INTERVENTORÍA	167
5. CONSIDERACIONES FINALES	169
5.1. RETOS, FUTURO Y PAPEL DE LA SÍSMICA EN EL NUEVO PANORAMA ENERGÉTICO MUNDIAL	169
6. BIBLIOGRAFÍA	172



Most of us in this demanding specialty share a common pursuit of adventure and the desire to marry many branches of science with common sense in order to achieve useful results in a practical time frame. This bond drives us to accomplish things most people cannot even imagine.

Martin Stuppel
**The seismic acquisition specialist:
where it all starts, 1998**

Introducción

El 4 de junio de 1921 tuvo lugar el primer experimento exitoso de sismica de reflexión para la exploración de petróleo y gas en los Estados Unidos (Schriever, 1952). Cincuenta años después, en 1971, la Sociedad Geofísica de Oklahoma celebró este hito erigiendo un monumento (ver figura 1) que recuerda los fundamentos de la técnica y celebra el éxito del esfuerzo extraordinario de los pioneros de este método de prospección alrededor del mundo. Desde su implementación exitosa, hace ya 100 años, el método de prospección por medio de reflexión sísmica se ha consolidado como la principal herramienta para obtener imágenes del subsuelo. Por tal razón su utilización se ha extendido a todo tipo de geografía alrededor del planeta.

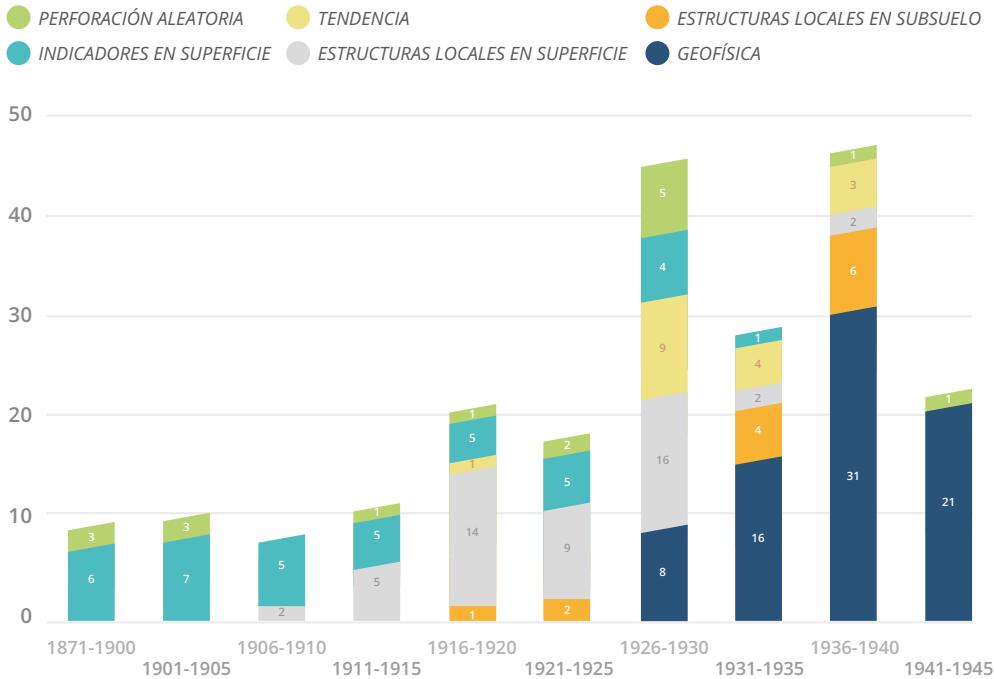


Figura 1. El 4 de junio de 1921 se conmemora en los Estados Unidos la primera utilización del método de reflexión sísmica para la exploración de hidrocarburos. Desde entonces la prospección sísmica ha venido evolucionando de manera extraordinaria y se ha convertido en elemento esencial de la cadena exploratoria. La fotografía de la izquierda corresponde al monumento levantado en Oklahoma para conmemorar esta fecha. A la derecha, la primera brigada sísmica en los Estados Unidos en 1921. (Schriever, 1952).

Keating analizó juiciosamente datos recopilados por el geólogo americano Edgar Wesley Owen (Keating, 2017), acerca del incremento del uso de las técnicas geofísicas (principalmente sísmica y gravimetría), en la exploración de hidrocarburos, durante la primera mitad del siglo XX (ver figura 2). El estudio, que contiene información de 220 campos mayores descubiertos en los Estados Unidos, desde 1871 hasta 1945, relata cómo estas tecnologías geofísicas influyeron en el drástico incremento del éxito exploratorio, reduciendo a la mitad la tasa de pozos secos perforados para la época. Este impacto se ha corroborado en el tiempo. Por ejemplo, los grandes descubrimientos, costa afuera en diferentes provincias geológicas del mundo, habrían sido im-

posibles sin información sísmica 3D. Hoy, la sísmica es una tecnología madura, siendo la principal herramienta de prospección en la identificación de nuevas oportunidades exploratorias y en la caracterización de yacimientos, jugando un papel fundamental en la reducción del riesgo exploratorio y la gerencia de campos en producción, en ámbitos geológicos diversos.

Campos de petróleo en Estados Unidos 1871-1945 según el método de su descubrimiento (220 campos)



Modificado de *How Geophysics improved success rates in the oil and gas industry* por Brendan J Keating.

Figura 2. Este interesante estudio ilustra el incremento de la participación de las técnicas geofísicas en el descubrimiento de campos petroleros en los Estados Unidos, en la primera mitad del siglo XX. Antes del advenimiento de la gravimetría y la sísmica los descubrimientos se apoyaban en información superficial y hasta en la perforación aleatoria. (Keating, 2017)

En Colombia, los primeros levantamientos sísmicos tuvieron lugar a principios de los años 60, en las cuencas del Valle Medio e Inferior del Magdalena (ver Figura 3), Putumayo y Catatumbo. Un ejemplo de estos primeros datos puede observarse en la figura 4. Se trata de una línea sísmica 2D adquirida con un arreglo simétrico de 24 canales, intervalo entre estaciones de 30 metros y fuentes(disparos) cada 360 metros. Esta configuración produce una línea de *fold* igual a 1 (o 100% como solía llamarse en esa época). Con el rápido avance en la instrumentación, el uso de mayor número de canales se fue haciendo factible y esta geometría 2D evolucionó hacia el cubrimiento múltiple con valores típicos de *fold* de 12 y 24.



Figura 3. Perforación en un grupo sísmico en el Valle Medio del Magdalena y operación con helicóptero bell 47g, muy utilizado en esa época (fotos archivo personal ing. Henry Melo).

Entre los primeros levantamientos sísmicos 3D en Colombia se cuentan Arauca -1982 y La Rompida -1982, en los Llanos Orientales y el Valle Medio del Magdalena respectivamente. Desde entonces, la sísmica 3D ha sido utilizada como herramienta clave, no solo del ciclo exploratorio sino también del desarrollo de campos descubiertos. La base de datos del Servicio Geológico Colombiano registra más de 400 levantamientos 3D terrestres en territorio colombiano que totalizan más de 50 mil kilómetros cuadrados de cubrimiento en superficie. Aún con el inmenso esfuerzo realizado por la industria en estas últimas cuatro décadas, extensas áreas de nuestra geografía, donde la exploración continúa siendo incipiente, tienen pobre o limitado cubrimiento de datos 3D.

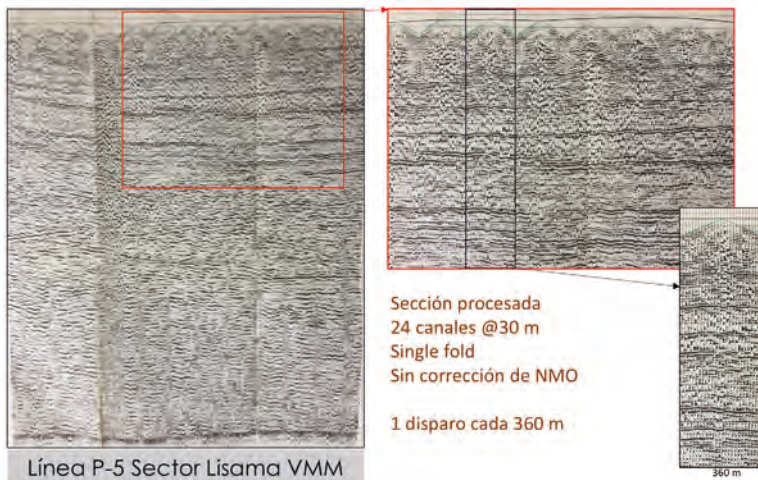



Figura 4. Una de las primeras líneas sísmicas adquiridas en Colombia en la prolífica cuenca del Valle Medio del Magdalena en 1963. Se trata de una línea adquirida con apenas 24 canales y cubrimiento en el subsuelo de 1. Como se observa, la línea se formaba uniendo disparos sucesivos sin que existiera ningún traslape entre ellos. Años más tarde comenzaría a aplicarse el método del cubrimiento múltiple. Fuente: archivo personal del autor.



La exploración es un intrincado proceso de gestión de conocimiento geológico y una tarea difícil y de alto riesgo para el inversionista. Descubrir un campo de petróleo o gas requiere surtir etapas de gran complejidad técnica que normalmente comienzan con la concepción de una idea geológica en la mente del explorador, o de los equipos de exploración, que juntan elementos razonables para postular un área prospectiva o lead, es decir una oportunidad hipotética que necesita más información para madurarse. Una vez se cuenta con información adicional de subsuelo el *lead* puede, o no, avanzar a la categoría de prospecto con lo que pasa a formar parte de una cartera de oportunidades perforables. Debido a su naturaleza de riesgo, en exploración las compañías construyen carteras de oportunidades (portafolio) que, en sanos ejercicios de análisis, compiten por el capital de riesgo que puede destinarse a la perforación en un determinado ciclo de inversión. Así, la materialización de un prospecto depende de que sea técnica y económicamente atractiva para que justifique su perforación. La perforación puede confirmar, o no, las hipótesis iniciales de manera que su resultado puede ser positivo o negativo. En el primer caso se tendrá un descubrimiento, que si posee el tamaño y la capacidad de aportar una producción estable que pueda aprovecharse comercialmente se obtiene un campo de petróleo o gas. Solo entonces es posible declarar la existencia de reservas.

El riesgo y la incertidumbre son elementos intrínsecos a lo largo de este proceso. Su mitigación se logra con una nutrida base de *leads* y prospectos con un rango amplio de tamaño y riesgo, cuya eventual perforación resulte en el descubrimiento de suficientes campos comerciales que garanticen el nivel deseado de reservas. La gran mayoría de las oportunidades que se identifican nunca llegan a convertirse en descubrimientos. De hecho, muchas de ellas nunca llegarán siquiera a perforarse.

Dentro de este contexto, la información sísmica juega un papel determinante. Primero, en la generación de *leads* y prospectos donde aporta información de subsuelo que reduce la incertidumbre sobre la presencia o no de los elementos del sistema petrolífero, que se conjugan para producir una acumulación. Segundo, en la delimitación de los descubrimientos para estudiar su comercialidad y, finalmente, en la explotación de los campos ayudando a una gestión óptima de los yacimientos.

La observación de la historia reciente de la actividad exploratoria terrestre en Colombia aporta perspectivas interesantes que vale la pena analizar. La figura 5 ilustra las reservas de petróleo adicionadas anualmente y su origen. Es notable que el aporte de nuevos descubrimientos es significativamente menor al aporte del recobro mejorado y la reevaluación de campos.

Ello refleja una exitosa gestión de los yacimientos existentes, pero advierte una debilidad en el largo plazo para contrarrestar la inevitable declinación natural de estos campos, muchos de los cuales fueron descubiertos hace varias décadas.



Figura 5. La gráfica muestra las reservas de petróleo añadidas entre 2007 y 2019 en Colombia y su procedencia. Los mayores aportes provienen de la gestión de campos existentes y solo un porcentaje menor es producto de nuevos descubrimientos. Este comportamiento puede resultar insostenible en el largo plazo dada la declinación natural de los campos existentes y plantea la necesidad imperiosa de fortalecer la exploración. Datos ANH.

Se evidencia con estas cifras que, para lograr nuevos descubrimientos se requiere perforar pozos exploratorios en gran número. Sin embargo, observando la figura 6, que muestra la cantidad de pozos exploratorios perforados anualmente en Colombia y su correlación con el precio internacional del petróleo. Se puede concluir que, aún después de la crisis de precios de 2015, el número de pozos exploratorios siguió manteniéndose en niveles extremadamente bajos. La misma figura presenta una situación aún más dramática para la adquisición sísmica en tierra donde se observa un decrecimiento pronunciado desde 2011, aún en presencia de un precio internacional óptimo. La caída del precio en 2015 parece que solo profundizó la crisis de la industria de la adquisición sísmica en el país y llevó los kilómetros equivalentes de sísmica¹ a niveles inesperadamente bajos.

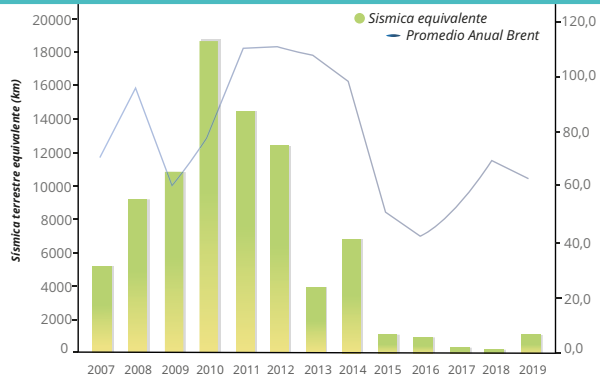
La situación descrita a partir del 2011 amerita una reflexión profunda, pues impactará la capacidad del país para reponer sus reservas de hidrocarburos en el corto y mediano plazo. A largo plazo hay esperanzas cifradas en la materialización del potencial gasífero del Caribe Offshore y en los llamados yacimientos de roca generadora, o no convencionales, que puedan suplir ese déficit en el futuro pero que presentan otros riesgos comer-

1. Los kilómetros equivalentes 2D se calculan aplicando un factor de conversión de 1.6 a los kilómetros cuadrados de sísmica 3D. Esta es una convención ampliamente utilizada en el país para generar un solo indicador que comprenda sísmica 2D y 3D.

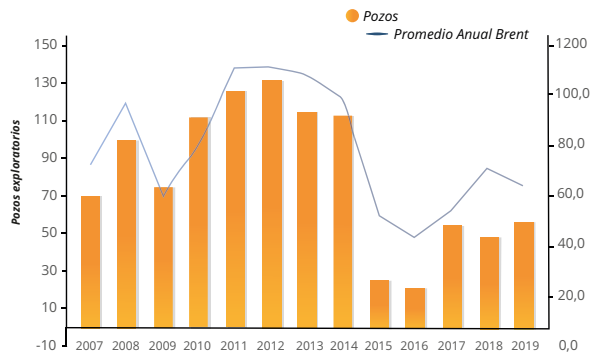
ciales y de ejecución. Esto plantea un panorama de incertidumbre ante la actual desaceleración de la exploración terrestre.

Todo lo anterior lleva a reconocer la importancia de fortalecer la actividad exploratoria en las cuencas terrestres comenzando por elevar los niveles de adquisición de información sísmica 3D mediante un esfuerzo coordinado entre todos los actores involucrados.

Colombia: Sísmica terrestre (kilómetros equivalentes)



Colombia: Pozos exploratorios perforados



Fuente: autor con datos oficiales de la ANH.

Figura 6. Evolución histórica reciente de la actividad exploratoria en Colombia representada en número de pozos exploratorios perforados (arriba) y kilómetros equivalentes de sísmica 2d (abajo). La actividad de prospección sísmica terrestre experimentó una reducción muy importante entre 2011 y 2014, aún cuando el precio internacional del petróleo se encontraba en máximos históricos. Desde 2014 la actividad exploratoria viene siendo insuficiente para mantener los niveles de reservas y producción que requiere el país.

Al mismo tiempo, no deja de sorprender, positivamente, la cantidad de información sísmica adquirida en el territorio colombiano durante 60 años de actividad, en aquellas provincias geológicas más prolíficas como los Llanos Orientales, el Valle Medio y Superior del Magdalena y la Cuenca del Putumayo. El

Servicio Geológico Colombiano posee un servicio público de información en el que puede consultarse, de manera interactiva, el cubrimiento de información de subsuelo del país, incluyendo todos los levantamientos sísmicos 2D y 3D (ver figura 7) (SGC, 2021). Al ver estos mapas es válido anotar que, si la prospección sísmica tuviera los impactos ambientales que se le endilgan, a veces, con ligereza y desconocimiento, el territorio sería poco más que piedra lunar sin asomo de vida. Otra reflexión, quizás más constructiva y convocante, lleva a pensar que hay gran cantidad de información sísmica sin restricciones de confidencialidad que podría hacerse disponible a investigadores y organizaciones, para llevar a cabo estudios de todo tipo en las diferentes ramas de las geociencias. Por ejemplo, estudios de aguas subterráneas para una adecuada caracterización, aprovechamiento y cuidado de nuestros preciados recursos hídricos.

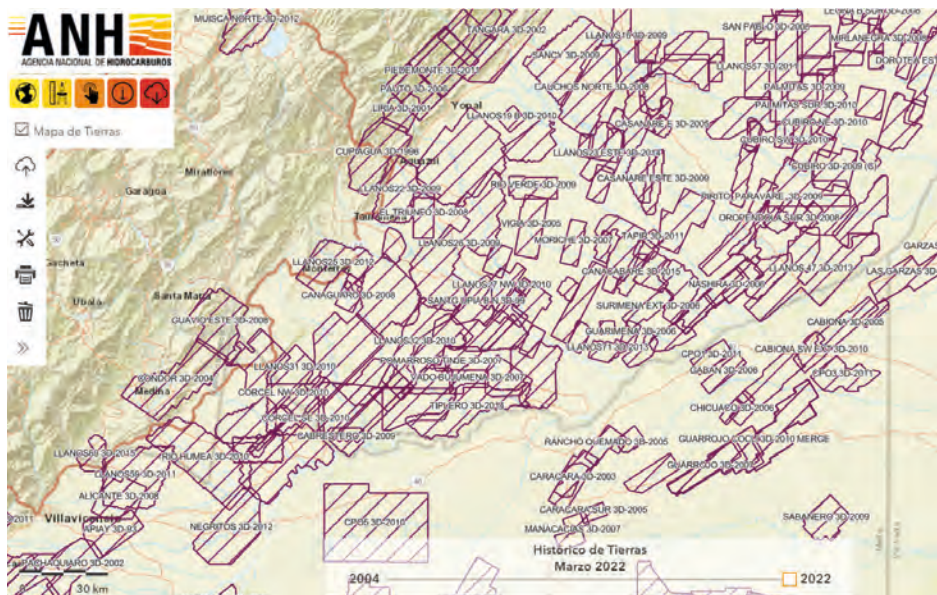



Figura 7. Detalle del cubrimiento de información sísmica en un sector de los Llanos Orientales, comprendido predominantemente en los departamentos de Meta y Casanare. El cubrimiento sísmico ha ido evolucionando desde levantamientos 2D hasta levantamientos 3D que se traslapan abriendo posibilidades de integrar información para análisis de carácter regional. Estos mapas están disponibles para consulta al público en general vía web gracias al Servicio Geológico Colombiano. La información sísmica reposa en el Banco de Información Petrolera, entidad adscrita al Servicio Geológico Colombiano.

El desarrollo tecnológico de la prospección sísmica ha venido ocurriendo de la mano del desarrollo de la electrónica y la computación. Es por eso que, hoy en día, es posible obtener imágenes de una calidad muy superior a aquellas que se lograron hace 50 años y es común que se adquiera nueva información sísmica donde ya se ha obtenido en el pasado, buscando mejorar la resolución y la calidad mediante el uso de tecnologías más modernas o simplemente mediante el ajuste de los parámetros de adquisición.



Este interesante panorama general e histórico ha motivado el presente libro con la intención de hacer una contribución al entendimiento amplio de la prospección sísmica en el contexto específico de Colombia. Sin embargo, muchas de las consideraciones aquí expuestas pueden ser también aplicables a entornos similares en países de la región. El contenido se encuentra organizado para recorrer, con cierto detalle, las diferentes etapas que involucra un proyecto de adquisición sísmica procurando ofrecer un panorama integral y práctico.

El libro aborda, con detalles y ejemplos prácticos, la relación íntima que existe entre el diseño, la planeación y la contratación de proyectos sísmicos y cómo su abordaje simultáneo permite adelantarse a un sinnúmero de situaciones posteriores que pueden resultar problemáticas, en mayor o menor medida. No es raro que estas actividades (diseño, planeación y contratación) sean adelantadas de manera sucesiva por equipos de profesionales distintos y con poco relacionamiento. El deseo original del diseñador puede resultar comprometido si las condiciones de entorno obligan a realizar modificaciones fundamentales en la geometría de adquisición. Así mismo, en situaciones donde la comunicación debe ser particularmente efectiva, los términos licitatorios o contractuales podrían no capturar los requerimientos esenciales del diseño o del entorno dando lugar a conflictos en los que se puede comprometer la calidad de los datos. Aquí radica en gran medida el éxito de un proyecto de adquisición sísmica, entendido como el logro del objetivo técnico con la oportunidad requerida, sin afectaciones al medio ambiente, con el cumplimiento legal aplicable, con buen relacionamiento social y costos dentro del presupuesto planeado.

La falta de consideración de las condiciones de entorno puede comprometer un buen diseño y generar enormes tensiones entre operador y contratista. De igual manera, un levantamiento sísmico que se realiza de manera eficiente y cumpliendo con todos los requisitos de entorno puede no ser exitoso si no logra resolver las incertidumbres geológicas que lo motivaron. En este sentido un proyecto sísmico podría ser visto como un problema de optimización en el que coexisten variables que pueden apuntar en direcciones divergentes y la virtud se encuentra en saber encontrar la solución óptima sin sacrificar las premisas fundamentales.

La gran mayoría de la literatura reciente sobre adquisición sísmica terrestre se ocupa de los impresionantes avances de la tecnología que hoy permite un número de canales prácticamente ilimitado, densidades de muestreo de decenas de millones de trazas/km² y flotas de camiones vibradores operando simultáneamente para alcanzar producciones superiores a los

20 mil VPs por día. En Colombia, sin embargo, el tamaño reducido del mercado y las condiciones particulares de nuestra geografía hacen desafiante la implementación de estos avances y se progresa con lentitud en la adopción de nuevas tecnologías. Las condiciones topográficas y de clima hacen que la fuente de energía predominante en Colombia sea el explosivo mientras que el uso de camiones vibradores se encuentra restringido a aquellas áreas donde se facilita su acceso y desplazamiento. La Figura 8 es una versión simplificada de la que se presenta en el artículo *The nimble node – million channel land recording systems have arrived* (Manning, 2019), en el que los autores ilustran la evolución histórica de los sistemas de adquisición sísmica terrestre. La tecnología utilizada en Colombia, y en muchos otros países con geografía similar, se ubica en densidades cercanas a las 100.000 trazas/km². Es decir, geometrías típicas de la década de los 90. El programa sísmico con mayor densidad adquirido en Colombia alcanza las 600.000 trazas/km², sin embargo levantamientos tan densos son aún poco frecuentes.

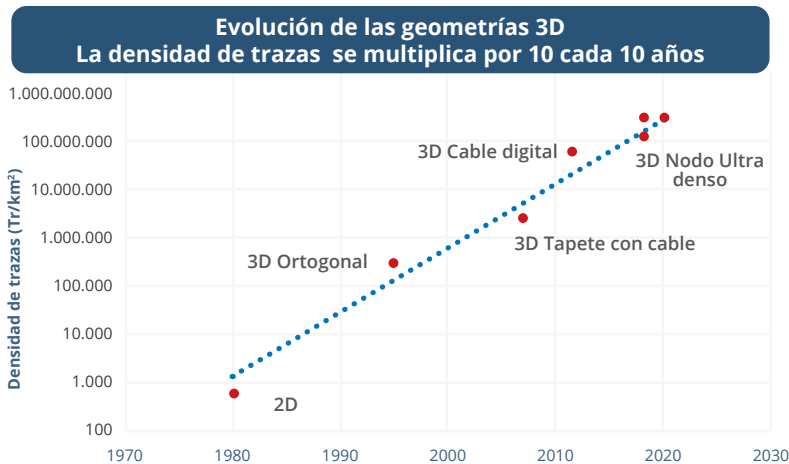


Figura 8. Evolución histórica de la densidad de trazas en proyectos sísmicos. La densidad crece exponencialmente y se multiplica por 10 cada 10 años. Sin embargo, las condiciones geográficas y de entorno de Colombia hacen retardora la implementación de estas tecnologías. Modificado de Manning, 2019.

Lejos de pretender constituirse en un manual de diseño de sísmica 3D, el capítulo 2 aborda los componentes básicos del diseño de levantamientos sísmicos terrestres ortogonales. Existen numerosas publicaciones en la literatura internacional que abordan el tema con lujo de detalles para el lector deseoso de profundizar y que irán siendo referenciadas a lo largo del texto.

Este capítulo se orienta a analizar los elementos principales de la geometría 3D ortogonal que es la más común, y quizás la única, que se utiliza en Colombia y que se adapta de mejor manera a las condiciones del territorio. Se presentan los componentes bási-


cos de este tipo de geometría y cómo se relacionan directamente con las características del objetivo exploratorio. Se plantean los dilemas tradicionales del diseñador sísmico en la búsqueda del balance óptimo entre calidad, costo y restricciones de superficie.

La discusión se enriquece al plantearse la posibilidad de incrementar significativamente la densidad del muestreo espacial para ocuparse, por fin, del muestreo adecuado del ruido generado por la fuente que en algunas áreas es un problema fundamental. Aquí, se analiza la viabilidad de utilizar geometrías tipo alfombra, a la luz del tamaño reducido de buena parte de las unidades nodales disponibles en el mercado, y sus implicaciones logísticas teniendo en cuenta que las posibilidades desde el lado de las fuentes son limitadas. Se aborda el tema de los explosivos autorizados en Colombia como fuente de energía y las alternativas que el mercado podría ofrecer para mejorar en calidad y seguridad.

El advenimiento de los equipos inalámbricos ha planteado nuevos retos al control de calidad de los datos sísmicos en campo y cada vez es más frecuente enfrentar situaciones en las que solo es posible observar los datos adquiridos días o incluso semanas después de su registro. Todo esto plantea un cambio de paradigma en la forma como se realiza el control de calidad de los datos en campo, que es necesario abordar desde la planeación del proyecto.

El capítulo incluye una discusión amplia sobre la importancia de conocer la respuesta sísmica de las áreas de trabajo mediante el análisis de la información sísmica existente o la adquisición de información experimental en cada campaña sísmica que se realice. Las complejidades de los asuntos no-técnicos han tomado tal relevancia y son tan demandantes, que el componente técnico fácilmente puede quedar relegado si no se hacen esfuerzos conscientes para reivindicar la razón de ser de la sísmica, que es la obtención de la mejor representación posible del subsuelo en un experimento que es prácticamente irreplicable. Cada programa sísmico presenta características particulares, tanto en subsuelo como en superficie, por lo que se debe ser cauteloso con la generalización, lo que funciona en ciertas áreas no necesariamente es adecuado para otras. Igualmente, siempre será valioso contar con datos experimentales para entender el impacto de variables como la profundidad y el tamaño de la carga, la distancia entre fuentes y receptores o el arreglo óptimo de geófonos, por mencionar solo algunos parámetros, en la calidad y costo final de nuestros datos sísmicos.

El capítulo 3 se dedica a analizar los requisitos legales en Colombia y las dinámicas socio ambientales que impactan la implementación de un diseño. Aquí, se plasma el propósito principal



de este libro: proveer un lugar común de entendimiento entre los diferentes actores que toman parte de un programa sísmico. En la medida en que todos empaticen con el rol de los demás y compartan un lenguaje y un conocimiento común, puede lograrse el resultado que mejor satisface todas las necesidades, protegiendo siempre el valor de la información asegurando la calidad de los datos. A pesar del rigor que esto demanda, se busca un lenguaje sencillo ofreciendo en cada paso referencias para profundizar en los detalles.

Especial mención se reserva al tema de la conflictividad social que en la última década ha venido expresándose con manifestaciones sociales en contra de las operaciones. La circulación en medios de comunicación de información imprecisa, que llega incluso a anunciar catástrofes ambientales causadas por las operaciones de adquisición sísmica, es fuente recurrente de desconfianza en las comunidades y autoridades del orden regional y municipal. Este tema requiere un análisis profundo. Allí confluyen conflictos históricos y realidades sociopolíticas de gran complejidad, cuya raíz es necesario comprender so pena de leer erróneamente las señales de los actores territoriales.

En 2016, un esfuerzo coordinado entre la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH), el Ministerio de Minas y Energía, el Ministerio del Interior, Ecopetrol y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), se ocupó de analizar sistemáticamente los episodios de conflictividad, sus causas y distribución geográfica, en un documento titulado: Diagnóstico de la conflictividad social. Entre otros datos interesantes, el documento presenta gran cantidad de eventos de bloqueo entre 2010 y 2015 (figura 9), lo cual ilustra muy bien la complejidad de la situación, el rechazo creciente a las actividades de la industria y el enorme costo que esto implica para el país. A partir de este ejercicio se generaron recomendaciones para abordar de fondo las causas de estas dificultades en el relacionamiento social y para buscar aproximaciones basadas en buenas prácticas como las sugeridas por la ACP en su documento Buenas prácticas en resolución y transformación de conflictos sociales.

Por su parte, la ANH estableció desde 2010 la obligación de implementar los llamados Planes de Beneficio Comunitario (PBC) buscando uniformizar la manera de aproximar el territorio y las líneas prioritarias de inversión social. Dentro de estos planes, los operadores de proyectos sísmicos deben realizar inversiones sociales cuyo monto y temática debe seguir los lineamientos específicos de la Guía para la gestión de los PBC con enfoque de desarrollo humano y reducción de la pobreza extrema en Colombia de la ANH.

Bloqueos a las operaciones 2010-2015

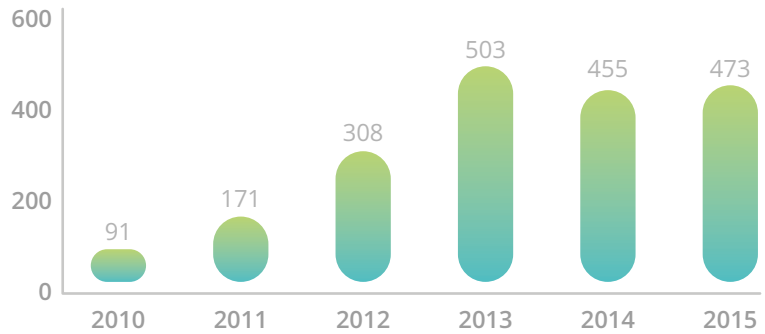


Figura 9. El conflicto social expresado en número de bloqueos a operaciones petroleras, según datos de la ACP, publicados en un documento conjunto de ANH, Ministerio de Minas y Energía, Ministerio del Interior, Ecopetrol y PNUD. Durante estos años, la sismica vivió una época de rechazo especialmente intenso que llegó a impactar el ritmo de las actividades y generar imaginarios negativos que hoy subsisten.

La sismica suele ser la primera actividad con un despliegue logístico importante en el territorio. El primer contacto de la comunidad con la industria. Por lo tanto, la manera como fluyen las relaciones con los diferentes grupos de interés puede marcar el tono del relacionamiento en etapas posteriores, como la perforación exploratoria y la construcción y operación de facilidades de producción. El relacionamiento de calidad es extremadamente importante y es aquí donde las empresas pueden implementar mejores prácticas que reporten beneficio y equidad para todas las partes, con especial énfasis en el logro de transformaciones positivas en las comunidades que habitan las áreas de influencia. Existen, también, iniciativas independientes y gremiales como la de la Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo (ACGGP), que ha jugado un papel importante en la tarea de hacer pedagogía acerca de la industria del petróleo ante comunidades y autoridades en las áreas donde se desarrollan las operaciones. Su enfoque es principalmente técnico. Con narrativas sencillas busca transmitir las bases del conocimiento geocientífico, para establecer una plataforma común de lenguaje para los procesos de socialización. Este modelo es un ejemplo que vale la pena replicar y mantener en la búsqueda de esquemas de relacionamiento constructivos y sostenibles en el tiempo y con la participación de todos.

Desde el punto de vista ambiental, la normativa ha evolucionado para hacerse más rigurosa frente al compromiso de garantizar el cuidado del entorno físico en la era del cambio climático. Sin embargo, aún hay camino por recorrer para alcanzar una uniformidad nacional de las regulaciones que rigen la planeación y ejecución de campañas de adquisición de datos sísmicos terrestres.

Por ejemplo, hay diferencias importantes en las distancias mínimas y en sus criterios de aplicación entre las diferentes autoridades locales (Corporaciones Autónomas) que exigen la presentación previa de un plan de manejo ambiental. Este y otros temas críticos se abordan en el libro y se proponen recomendaciones para evitar sorpresas desagradables.

Esta sección contiene una discusión acerca de la puesta en práctica de los planes de ejecución del programa sísmico, a la luz de la enorme cantidad de requisitos legales que impactan la operación. La contratación de mano de obra, la gestión de tierras, la construcción y gestión de campamentos, el cumplimiento de requisitos socioambientales, la contratación de bienes y servicios y la gestión de explosivos; son apenas ejemplos de temas que guardan estrecha relación con la logística de una campaña sísmica y están en la ruta crítica de la ejecución. Cualquier dificultad importante en alguno de ellos puede generar impactos significativos en los tiempos de ejecución y por tanto en costos. Una matriz normal de cumplimiento de requisitos legales para un programa sísmico puede contener alrededor de 700 ítems que requieren aseguramiento demostrable. Esto explica la necesidad de una plantilla numerosa de personal experto en temas no técnicos, tanto en la empresa contratista como en la interventoría, y por supuesto en la empresa operadora. Este capítulo, ilustra cómo poner en práctica todo lo discutido en los capítulos anteriores y la relevancia de la figura de la compañía de interventoría, que puede y debe contribuir al éxito del proyecto. Resultará sorprendente para el lector visualizar cómo es posible implementar una cantidad tan alta de requisitos en medio de condiciones de entorno desafiantes y situaciones siempre demandantes.

El capítulo 4 tiene por objeto ilustrar de manera detallada la estructura de costos de un programa sísmico y los mecanismos de contratación. A través de un ejercicio práctico de cálculo de costos de un programa sísmico hipotético se analiza el peso relativo de cada una de las actividades. El ejercicio es muy útil para identificar las razones por las cuales puede resultar difícil comparar propuestas en procesos licitatorios, pues no siempre se entiende cómo están incorporados muchos costos significativos que no pueden asociarse fácilmente a alguna de las actividades tradicionales como topografía, perforación, registro y restauración ambiental. Este capítulo permite dimensionar el impacto en costos de situaciones que puedan retrasar o incluso llegar a paralizar el normal desarrollo de las actividades.

Aquí, nuevamente, se busca proveer una base de información para que el contratante y el contratista entiendan el interés de sus contrapartes y puedan gestionar los contratos buscando





relaciones de beneficio mutuo. Se intenta evidenciar que una propuesta comercial está necesariamente atada a unas suposiciones operacionales que, de no ocurrir de acuerdo a lo planeado, pueden poner en peligro la ejecución además de ser fuente de conflictos administrativos y pueden terminar en arbitramentos legales con resultados impredecibles. En el ejercicio, se analiza el impacto de variables como salarios, turnos de rotación y de parámetros de adquisición como profundidad de la carga, se ofrecen recomendaciones para presupuestar de manera aproximada las posibles contingencias y hacer las previsiones administrativas que permitan manejar en el campo situaciones que requieran alguna flexibilidad. En resumen, este capítulo intenta reunir experiencias del autor a través de 30 años de ejercicio profesional en la adquisición sísmica, en solidaridad con aquellos que hoy se enfrentan a la ardua tarea de coordinar y ejecutar un proyecto de prospección sísmica en Colombia. La sísmica es un mundo en el que atributos como la recursividad y la mística por lograr resultados excelentes con seguridad y calidad, son una constante y se convierten en motivo de orgullo para los profesionales y técnicos que se desempeñan en este campo.

El Capítulo 5 presenta reflexiones finales que incluyen una mención acerca de los numerosos retos técnicos que persisten en la prospección sísmica en Colombia, en especial aquellos relacionados con la obtención de imágenes confiables, en escenarios geológicos complejos como las fajas plegadas en zonas de Piedemontes y en amplios sectores de la cuenca de Sinú San Jacinto. Estos ambientes geológicos pueden albergar importantes volúmenes de recursos de petróleo y gas que para ser aprovechados deben primero ser descubiertos, lo que requiere datos sísmicos de mejor calidad. La discusión se direcciona hacia la necesidad de evolucionar al uso de tecnologías más modernas de adquisición, que permitan muestreos espaciales más densos y la posibilidad de remover el ruido generado por discontinuidades someras que producen la dispersión de la energía en patrones ininteligibles que enmascaran las reflexiones útiles.

La discusión de la transición energética no escapa a la temática del libro. En efecto, se presenta una reflexión sobre el papel de la sísmica en la evolución de la matriz energética en los ámbitos local y mundial. Cien años de evolución del método sísmico encierran historias asombrosas de seres humanos de inconmensurable ingenio y carácter que han sido capaces de investigar las profundidades del subsuelo mediante la escucha de sus ecos.

Este libro es una invitación a entender esta herramienta de prospección dentro del contexto colombiano y como homenaje a todos aquellos que con orgullo gustan de llamarse a sí mismos “mochileros”.

Aspectos Técnicos

2.1 INTRODUCCIÓN

El dilema del diseñador

Con mucha frecuencia el diseñador de un proyecto sísmico 3D enfrenta un dilema complejo entre el diseño técnicamente perfecto y aquel que optimiza los recursos disponibles que siempre son limitados. Se trata de una tarea retadora pues supone la necesidad de alcanzar un punto intermedio que garantice que los datos adquiridos hagan uso eficiente de los recursos y resuelvan las incertidumbres geológicas existentes. Un diseño que va mucho más allá de “lo necesario” puede significar un uso inadecuado de recursos comprometiendo la viabilidad financiera de un proyecto o generando tensiones innecesarias por asuntos de entorno. Por ello es muy importante lograr expresar el objetivo exploratorio en términos geofísicos para establecer con claridad cuáles son las características que el diseño debe entregar y el esfuerzo en campo correspondiente. El problema puede analizarse conceptualmente con ayuda de un diagrama cartesiano (ver figura 10) donde se grafica el esfuerzo en campo requerido para implementar un determinado diseño (representado en costo, tiempo, riesgos) con el resultado del levantamiento expresado como el cumplimiento de los requisitos de calidad en términos de resolución vertical y horizontal, tamaño, y continuidad, entre otros atributos.

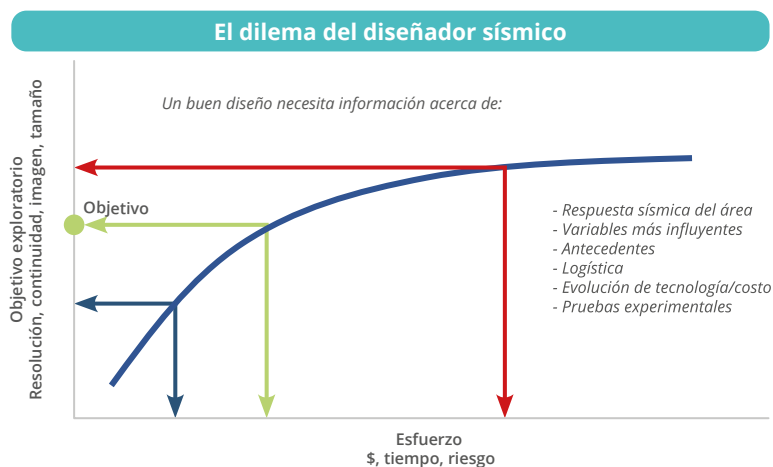




Figura 10. Representación conceptual de la relación entre el esfuerzo que representa adquirir un levantamiento 3D y su calidad en términos de cumplimiento de sus objetivos. En la medida en que se cuente con mayor conocimiento del área de trabajo (curva azul) será más factible realizar un diseño con el esfuerzo justo. Un diseño que no contemple el esfuerzo necesario puede resultar en un total desperdicio si no logra resolver las incertidumbres que lo motivaron.



En términos generales, se espera que con mayor esfuerzo mejore la calidad del levantamiento. También es previsible que, a partir de cierto nivel de madurez del conocimiento o de la tecnología disponible, cualquier mejora significativa en calidad requiera cada vez más esfuerzo o demande la implementación de nuevas tecnologías que produzcan escalones de avance. La forma de esta curva varía de una geografía a otra. Es muy importante que el diseñador sísmico posea una idea completa de esta relación en su área de trabajo. Este entendimiento se logra principalmente a partir del análisis de información histórica existente, incluyendo levantamientos anteriores y pruebas experimentales de adquisición y/o procesamiento. El análisis debe arrojar claridad sobre los elementos críticos a tener en cuenta en el diseño, como por ejemplo: las características e impacto del ruido predominante, el contenido de frecuencias típico y la geometría del objetivo (buzamientos, profundidad, complejidad), por mencionar algunos. En la sección 2.6 se abordará el tema de las pruebas experimentales.

La situación menos deseable es aquella en que se diseña y ejecuta un programa sísmico que no cumple con sus objetivos. Difícilmente, el procesamiento sísmico podrá resarcir una deficiencia fundamental del diseño y el resultado es que la incertidumbre que se pretendía resolver permanecerá aún después de realizado el proyecto. Esta situación se ilustra con la flecha azul en el gráfico de la figura 10. Este escenario tiene mayor riesgo de suceder en ambientes de estrechez presupuestal donde se busca a toda costa ajustarse a un presupuesto insuficiente. El geofísico tiene el deber de comunicar claramente a la alta dirección las consecuencias potenciales de implementar diseños que comprometan los requerimientos mínimos establecidos. En contraste, la flecha roja representa el otro lado del espectro. En este caso se diseña un levantamiento cuyo uso de recursos es mucho mayor de lo requerido. El exceso de recursos puede redundar en un incremento de calidad que podría ser útil en instancias futuras, como el desarrollo de un campo de petróleo o gas, o podría apoyar la evaluación de oportunidades exploratorias adicionales más sutiles. Puede ocurrir también que el costo extra esté representado en variables que no necesariamente añadirán calidad al levantamiento (por ejemplo, *offsets* mayores al máximo *offset* útil según se discute más adelante).

En atención a estas consideraciones, una práctica recomendada es documentar ampliamente el proceso de diseño y la toma de decisiones, la información utilizada y los factores críticos de éxito. Esta información será valiosa en la etapa de ejecución del proyecto cuando la brigada pueda verse expuesta a la necesidad de hacer cambios a la geometría original para acomodarse a situaciones del terreno o del entorno.



El componente de arte en el diseño de levantamientos sísmicos 3D radica en que la curva azul es, en buena parte de los casos, difusa, incierta o inexistente. A lo anterior, se añade que existe poca flexibilidad para hacer modificaciones fundamentales al diseño en el campo y no es fácil reaccionar para resolver un problema que solo se identifica después de que ha ocurrido la etapa de registro. Lo anterior, implica para el diseñador una importante responsabilidad y es un claro ejemplo de una situación en la que se deben tomar decisiones importantes a partir de información parcial o incompleta y buscando satisfacer, simultáneamente, diferentes requisitos que apuntan en direcciones divergentes.

De acuerdo con lo expresado, tiene sentido invertir los recursos que sean necesarios para asegurar un diseño de calidad con óptima relación costo/beneficio. Ello puede incluir la utilización de consultoría experta, compra de información existente, pruebas de procesamiento sísmico y ejercicios de modelamiento directo según sea apropiado. También, se requiere un entendimiento de las condiciones reales del terreno y de los costos que puede implicar la implementación de un diseño y sus posibles variantes.

Queda establecido entonces que, una primera tarea consiste en la definición y clara enunciación del objetivo del levantamiento sísmico 3D. Generalmente, la descripción del objetivo apunta a resolver una incertidumbre geológica cuya existencia resulta en una percepción del riesgo demasiado alta para acometer la perforación sin la información adicional aportada por el programa sísmico. Ejemplos de objetivos exploratorios pueden ser: confirmar la existencia de uno o más elementos estructurales que ayuden a sustentar la presencia de la trampa, estimar la magnitud del desplazamiento entre dos bloques fallados, definir la posición de un pinchamiento de la roca reservorio con potencial de formar una trampa estratigráfica o combinada, etc. La descripción geológica del objetivo debe acompañarse de tanta información cuantitativa como sea posible: profundidades, espesores, buzamientos, tamaño (en las tres dimensiones) de las estructuras que se persiguen y mapas estructurales, etc. Esta descripción geológica será expresada en términos con significado geofísico específico como *offset* máximo, resolución vertical y horizontal, frecuencia, apertura y multiplicidad, etc., para constituirse en la entrada al proceso de diseño.

2.2 TERMINOLOGÍA

Esta sección se dedica a establecer la terminología y definiciones fundamentales para comprender de manera general los elementos que intervienen en el diseño de una geometría de adquisición 3D ortogonal.

Traza sísmica

Entenderemos por traza sísmica el registro digital de la vibración detectada en una estación receptora por causa de la activación de una fuente durante un tiempo determinado. Dado que se conocen las coordenadas de la fuente y receptor se conoce también la distancia entre ellos (*offset*) y el azimut de la línea imaginaria que los une. También, se puede calcular la posición del punto medio entre fuente y receptor, conocido como CMP por sus siglas en inglés. Toda traza sísmica, entonces, tendrá asociado un par fuente-receptor, un *offset*, un azimut y un punto medio (figura 11).

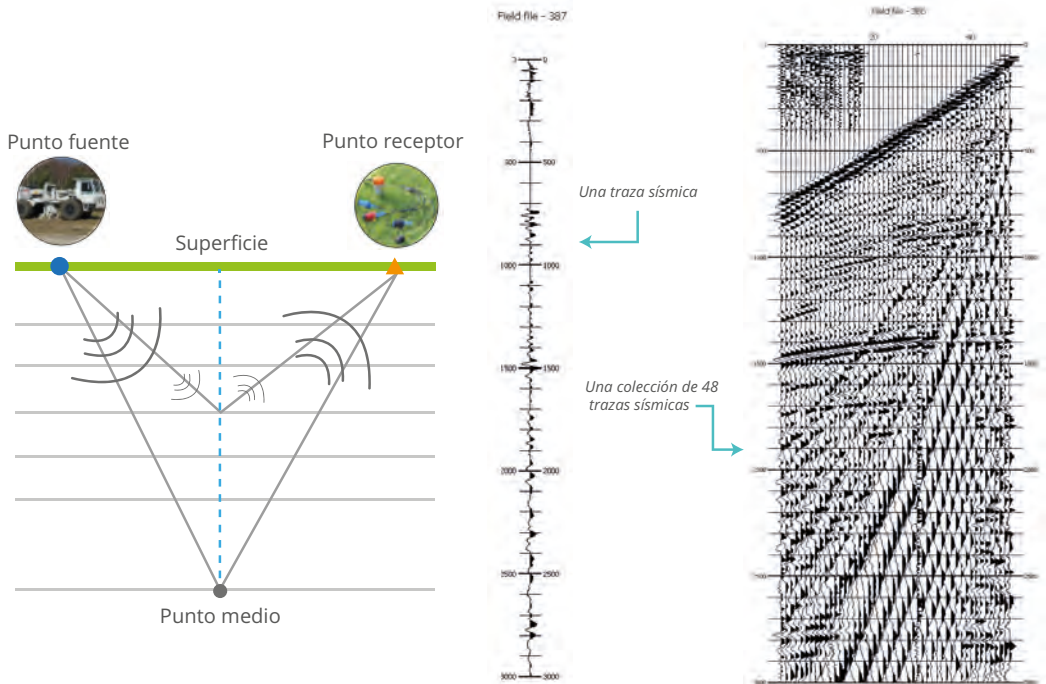


Figura 11. Una traza sísmica es el registro digital de la vibración que ocurre en un punto por causa de la activación de una fuente de energía en otro punto. La distancia entre la fuente y el receptor se denomina *offset*. A la derecha, un grupo de 48 trazas sísmicas ordenadas por *offset* decreciente.

Retícula 3D

La geometría de adquisición 3D que analizaremos se compone de una retícula de líneas ortogonales a lo largo de las cuales se ubican los receptores y los puntos fuente. En el ejemplo, ilustrado en la figura 12, las líneas de receptores se orientan en dirección E-W y están separadas 300 metros entre sí. Las líneas de fuente se orientan en dirección N-S y su separación es de 500 m. El área total del levantamiento es de 100 km². Esta área se conoce como área en superficie y es el área del polígono que ocupan fuentes y receptores en el terreno. Una mirada más cercana permite observar que, las líneas de receptores se forman por la sucesión de estaciones receptoras separadas una distan-

cia uniforme de 50 m., en este caso. De igual manera, las líneas de fuentes están formadas por una sucesión de puntos fuente que en este caso se ubican cada 100 m.

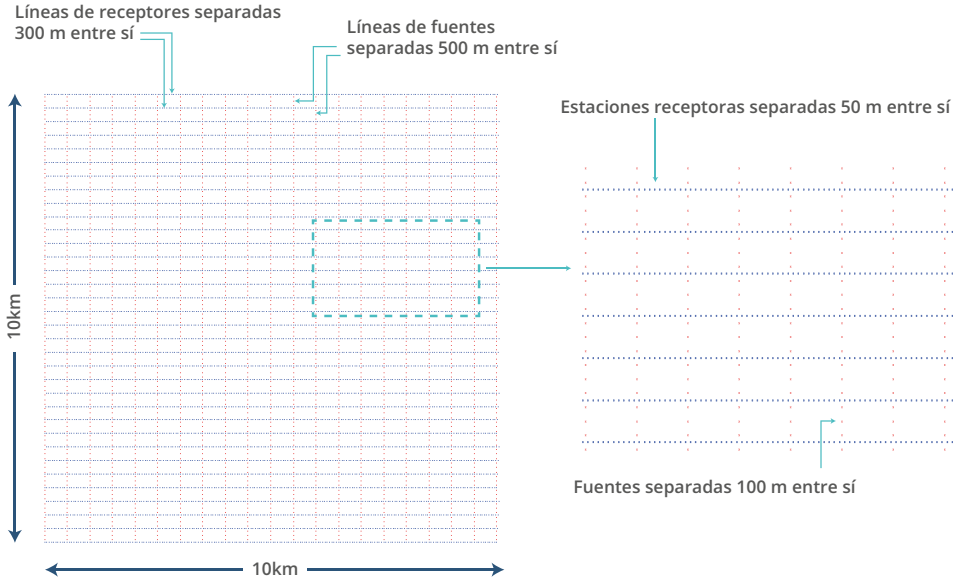


Figura 12. Una geometría 3D ortogonal está compuesta por una retícula de líneas de receptores (azul) y fuentes (rojo) con separaciones uniformes entre sí. En este ejemplo las estaciones receptoras están ubicadas cada 50 m y los puntos de fuente están separados 100 m entre sí. Líneas de receptores y fuentes están desplazadas ligeramente entre sí para evitar la coincidencia de fuentes y receptores en el mismo punto.

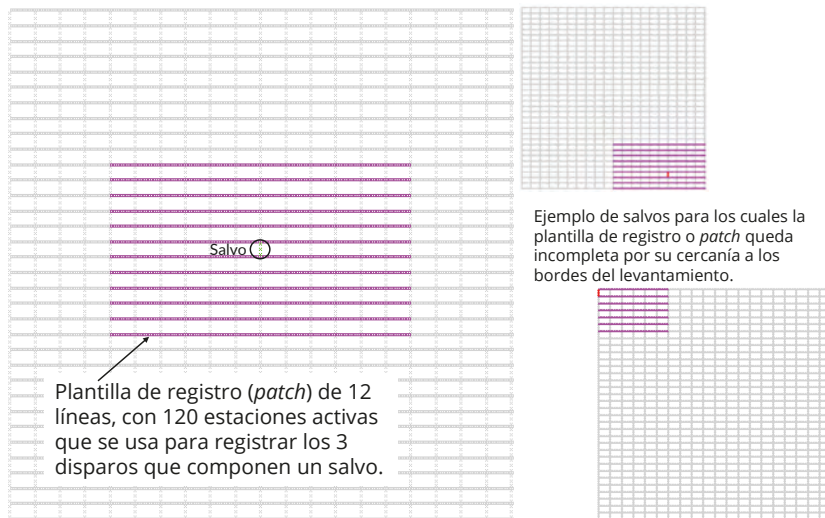


Figura 13. Cada grupo de puntos fuente que se registran con la misma plantilla de líneas de receptoras se denomina salvo. En este caso, el salvo está compuesto por 3 puntos fuente. En el ejemplo, el patch está compuesto por 12 líneas de 120 estaciones cada una, para un total de 1440 estaciones. Este número de estaciones que se encuentran activas para cada disparo se conoce como número de canales.

Patch de registro

Se llama *patch* de registro al conjunto de estaciones receptoras que se encuentran activas para registrar un determinado disparo. En la geometría que se analiza en este libro, el *patch* está formado por un número par de líneas de receptores en las cuales se activa un cierto número de estaciones. En este ejemplo, el *patch* está compuesto por 12 líneas de 120 estaciones cada una, para un total de 1440 estaciones. Este número de estaciones que se encuentran activas para cada disparo se conoce como número de canales.

Cada grupo de puntos fuente que se registran con el mismo *patch* se denomina salvo. En este caso, el salvo está compuesto por 3 puntos fuente. Cada salvo tiene su propio *patch* asociado, el cual es incompleto en los bordes del levantamiento como se ilustra en la figura 13. El registro de un salvo produce el muestreo uniforme de una superficie continua en el subsuelo. Así, un levantamiento 3D puede entenderse como la superposición de todas estas superficies unitarias.

La geometría del *patch* se encuentra totalmente definida por 6 cantidades independientes a saber:

DR: Distancia entre estaciones receptoras

DLR: Distancia entre líneas de receptores

DF: Distancia entre fuentes

DLF: Distancia entre líneas de fuentes

NL: Número de líneas activas en el *patch*

NEL: Número de estaciones activas por línea

Las propiedades del diseño y su capacidad de atender las necesidades que plantea el objetivo geológico dependen en gran medida de estos seis parámetros como se verá más adelante.

Densidad

La densidad de receptores y fuentes es la cantidad de estas por unidad de área. Es un indicador importante del esfuerzo en campo que requiere un programa sísmico y por ende de su costo. El cálculo de las densidades de fuentes y receptores se realiza de la siguiente manera:

Densidad de receptores= $1000/DR*1000/DLR$ [Receptores/km²]

Densidad de fuentes= $1000/DF*1000/DLF$ [Fuentes/km²]

Para el caso del ejemplo tenemos

Densidad de receptores=66.7 Receptores/km²

Densidad de fuentes=20 Fuentes/km²

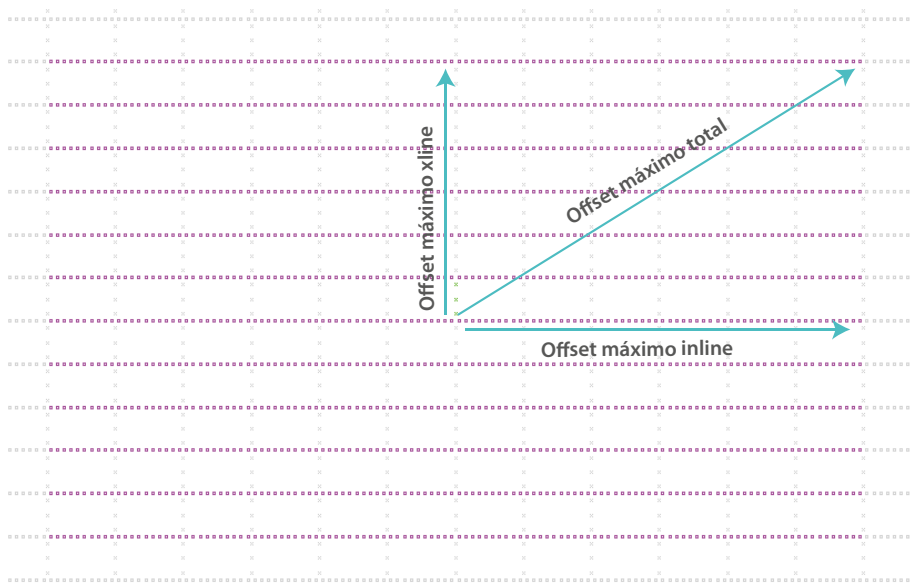


Figura 14. Offsets característicos.

Offset

Como se definió anteriormente, este término se refiere a la distancia entre fuente y receptor. La forma del *patch* define algunas dimensiones características que se ilustran en la figura 14 que son el *offset* máximo inline, el *offset* máximo *crossline* y el *offset* máximo total. El valor de estos *offsets* está relacionado principalmente con la profundidad del objetivo y con la capacidad de iluminarlo desde muchos ángulos. La relación entre el *offset* máximo inline y el *offset* máximo *crossline* se llama relación de aspecto y tiene que ver con la capacidad de la geometría para iluminar el objetivo desde un amplio rango de ángulos. Esto es importante, en escenarios geológicos en los que las estructuras son tridimensionalmente complejas o cuando es importante investigar la respuesta direccional de alguna propiedad como en el caso de los yacimientos fracturados.

Box

El rectángulo que queda definido por dos líneas de receptores y dos líneas de fuente adyacentes se llama *box*. La diagonal del *box* es el máximo *offset* mínimo y tiene impacto sobre el horizonte más somero que podrá muestrearse de manera continua. La figura 15 muestra el efecto de la diagonal del *box* en la continuidad de los datos someros. Eventos cuya profundidad sea menor que esta diagonal se verán cortados por estos vacíos en forma de "V".

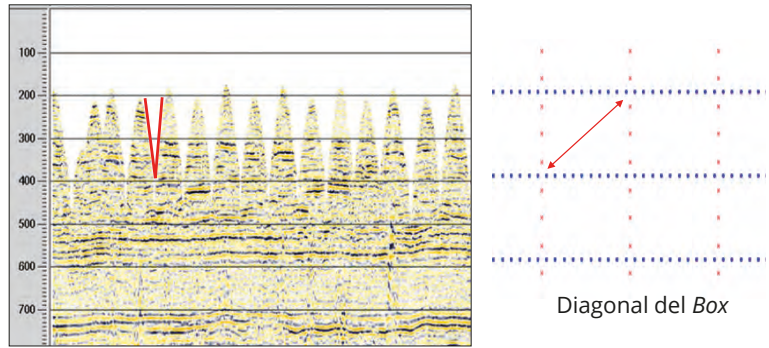


Figura 15. El tamaño del box hace que se produzcan vacíos en forma de “v” en la sección apilada.

Grid o malla en el subsuelo

La separación entre fuentes y receptores define de manera automática una malla imaginaria en el subsuelo donde se recojen y agrupan todas las trazas sísmicas del levantamiento según su punto medio. Si bien dicha malla puede modificarse a voluntad, las propiedades del 3D se analizan con referencia al tamaño nominal de la celda, cuyas dimensiones naturales son de la mitad de la distancia entre fuentes y receptores, como se aprecia en la figura 16.

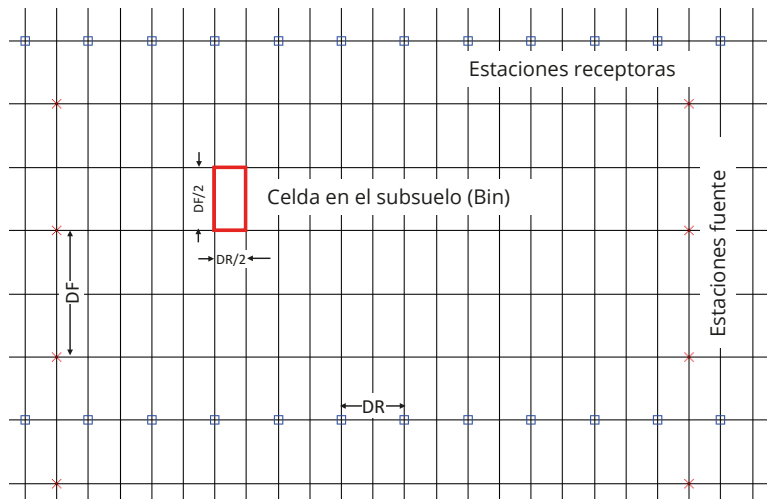
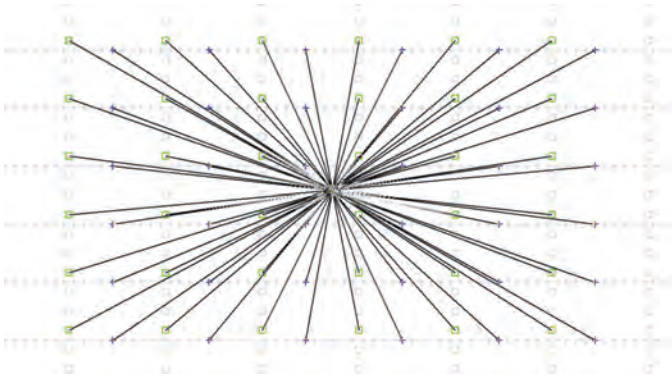


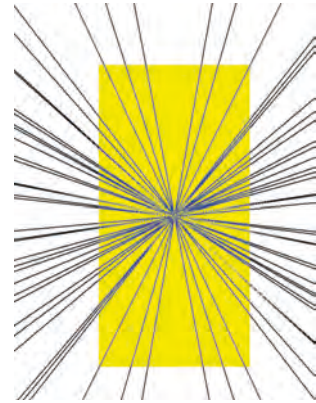
Figura 16. Malla o grid natural de un levantamiento 3D. El tamaño de la celda en subsuelo es de la mitad de la distancia entre fuentes y receptores. En este caso la celda es de 25 x 50 m.

Todas las trazas cuyo punto medio quede dentro de una misma celda se agruparán en el proceso de apilado y se convertirán en una única traza del volumen final. La diferencia entre las trazas que comparten una misma celda radica en que provienen

de distintos pares fuente-receptor y por lo tanto su *offset* y *azimut* serán distintos. El número de trazas que coinciden en una misma celda se conoce como *fold*, multiplicidad o cubrimiento en el subsuelo (figura 17).



36 combinaciones de fuente-receptor tienen en común el mismo punto medio y por lo tanto se agrupan en la misma celda. La diferencia entre ellas es su *offset* y *azimut*.



Zoom en la celda. Si esta geometría se conserva, los puntos medios de las 36 trazas coincidirán en el centro geométrico de la celda.

Figura 17. Cuando la geometría se conserva totalmente regular, los puntos medios de todas las trazas pertenecientes a una celda (rectángulo amarillo) se ubican en el centro geométrico de ella. En este ejemplo se observan 36 trayectorias fuente receptor que comparten exactamente el mismo punto medio común. Todas ellas tienen *offset* y *azimut* diferente. A través del procesamiento, estas trazas serán sumadas (apiladas) para producir una sola traza de *offset* cero.

El *fold*, multiplicidad o cubrimiento en el subsuelo aumenta desde los bordes hasta alcanzar un valor máximo que es el *fold* nominal del levantamiento. La distancia que existe entre el borde del levantamiento y el punto en donde se obtiene el *fold* completo se conoce como *roll on/roll off* (figura 18). El caso de ejemplo muestra un *fold* nominal de 36.

A mayor multiplicidad mayor es la atenuación de los ruidos aleatorios (que son diferentes entre traza y traza) y mejor es el realce de la información coherente. La cancelación del ruido aleatorio aumenta de manera proporcional a la raíz cuadrada del *fold*. El caso del ejemplo muestra un *fold* nominal de 36. Si se divide el *fold* entre el área de la celda se tendrá lo que se conoce como densidad de trazas y es un parámetro importante que guarda relación directa con la calidad del levantamiento 3D. El *fold* por sí solo no es un parámetro que resulte útil para comparar dos levantamientos sísmicos 3D, pues su valor está asociado a un tamaño de celda en particular (Lansley, 2000). La densidad de trazas, por su parte, no depende del área de la celda y, por tanto, es un parámetro más útil. No obstante, lo anterior, dos le-

vantamientos pueden tener la misma densidad de trazas y aún ser muy diferentes dependiendo de su distribución de *offsets* y azimuts como se verá más adelante.

En nuestro ejemplo la densidad de trazas es $36 / (0.025 * 0.05) = 28.800$ trazas/km². En consecuencia, este levantamiento de 100 km² tendrá aproximadamente 2´880.000 trazas antes de apilar y el volumen procesado y apilado tendrá 80.000 trazas. Los efectos de borde hacen que el número real de trazas sea un poco menor. Esto es más notorio si el levantamiento cubre poca área.

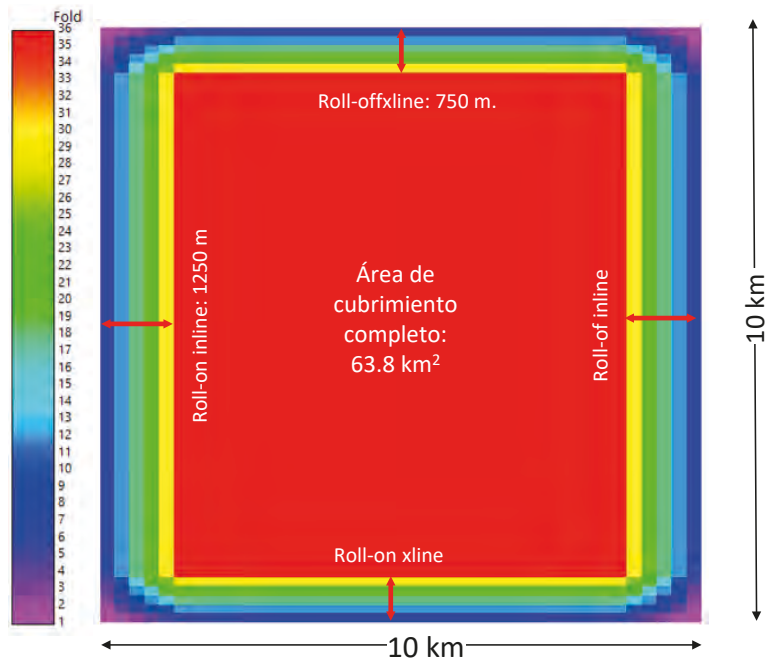


Figura 18. El *fold*, multiplicidad o cubrimiento en el subsuelo aumenta desde los bordes hasta alcanzar un valor constante que es el *fold* nominal del levantamiento. El caso de ejemplo muestra un *fold* nominal de 36.

El movimiento sucesivo del *patch* de registro en el sentido *inline* generará multiplicidad en el sentido *inline* (*fold inline*) mientras que los movimientos en el sentido *xline* construyen la multiplicidad en ese sentido (*fold xline*). El *fold* total es entonces el producto del *fold inline* y el *fold xline*.

El *fold inline* se calcula de la misma manera que se hace en 2D:

$$\text{fold inline} = \frac{\text{Número de canales por línea} * \text{Distancia entre receptores}}{2 * \text{Distancia entre líneas de fuentes}}$$

Conviene entonces que, la distancia entre líneas de fuentes sea múltiplo de la distancia entre receptores para que el *fold inline* sea un número entero. Cuando esto no ocurre se presentan bandas indeseables en la distribución areal del cubrimiento.

Por su parte, el *fold xline* se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\text{fold xline} = \frac{\text{Número de fuentes por patch} * \text{No. de líneas del patch}}{2 * \text{Número de fuentes entre líneas de receptores} * \text{No. de líneas nuevas al desplazar el patch}}$$

El número de líneas que se añaden al desplazar el *patch* en el sentido *xline* se conoce como roll-up. La práctica más común en Colombia es la de desplazar el *patch* de registro en el sentido *xline* una línea cada vez, *roll up*=1 (ver figura 19). Desplazamientos de más de una línea mejoran la eficiencia del registro pero pueden introducir problemas estáticos (Wisecup, 1994). En los casos en que el *roll-up* es 1 (la inmensa mayoría) el *fold xline* es simplemente la mitad del número de líneas en el *patch*. Por esta razón es conveniente usar un número par de líneas en el *patch* de registro.

En nuestro ejemplo de referencia el *fold inline* es de $120 / (2 * 10) = 6$ y el *fold xline* es $(3 * 12) / (2 * 3 * 1) = 6$ para un total de 36 *fold* total.

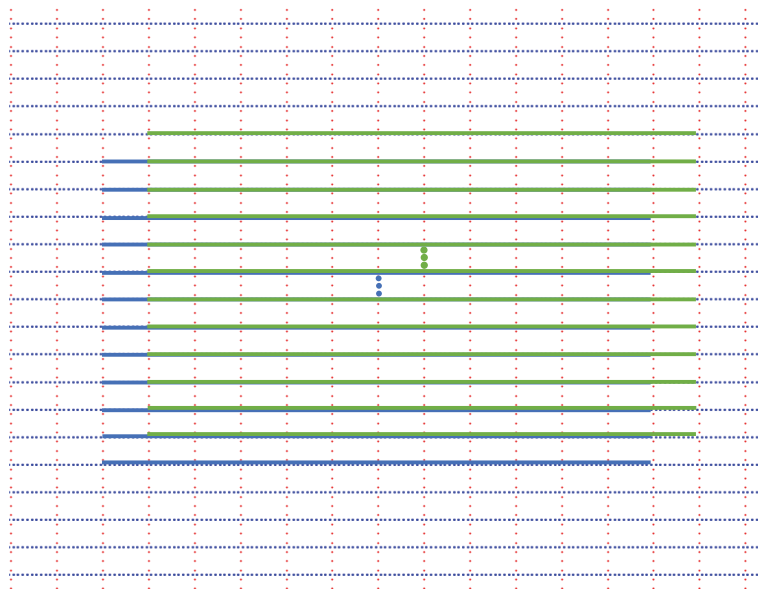


Figura 19. Ejemplo de movimiento del *patch* entre dos salvos cercanos. En este caso el *patch* se mueve una línea (*roll up*=1) en sentido *xline* y 10 estaciones en sentido *inline*.

Fold efectivo

Si reunimos y organizamos las trazas sísmicas pertenecientes a una celda en orden de *offset* creciente obtendremos lo que se conoce como un CMP *gather*. Dicho arreglo de trazas contendrá tantas trazas como sea el *fold* y se verá cómo se indica en la figura 20. En el panel (a) se aprecian las trazas sísmicas sin corrección por normal move out (NMO).

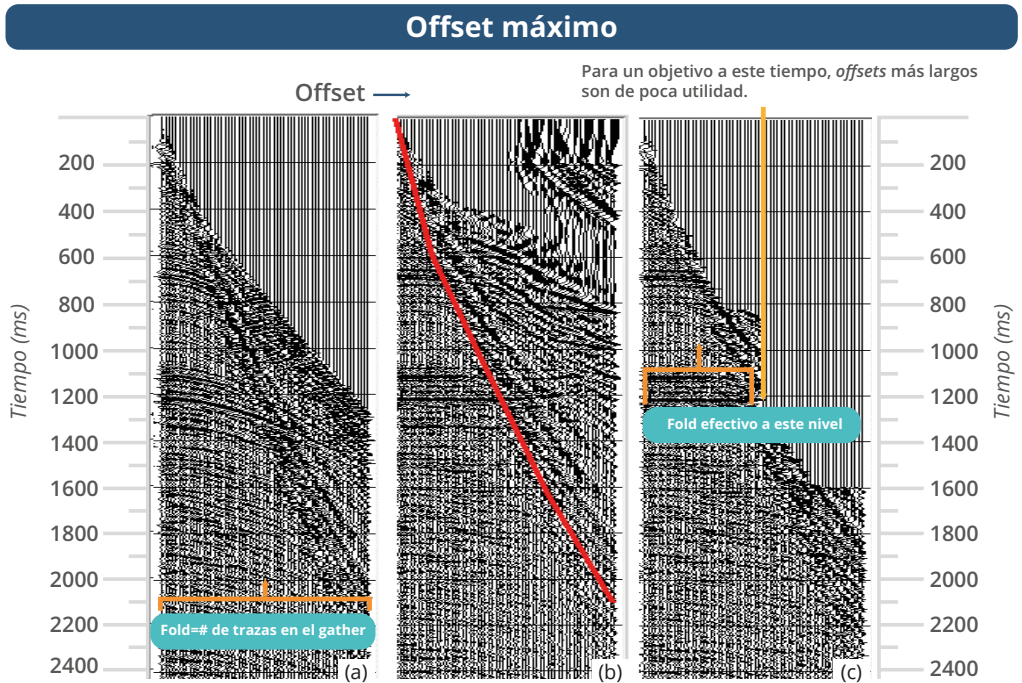


Figura 20. Un *cmp gather* es la reunión de trazas sísmicas que comparten el mismo punto medio común. Una vez realizada la corrección por curvatura (normal move out) solo una parte de las trazas aporta información útil al apilado.

En el panel (b) se observan los datos corregidos por NMO y el consiguiente efecto de NMO *stretch*, que consiste en una distorsión de la frecuencia que se incrementa en los eventos someros y *offsets* largos. Los datos afectados por esta distorsión son eliminados para evitar su interferencia destructiva en el apilado.

El panel (c) ilustra el *gather* con el patrón de enmudecimiento aplicado y es aquí donde se evidencia que el *offset* útil (y por consiguiente el *fold* real) es variable con el tiempo de tránsito (o, lo que es equivalente, con la profundidad de los eventos). Por ejemplo, a 700 ms. aproximadamente solo el 25% de las trazas contribuye con información y hacia los 1200 ms. solo un 50% lo hace.

Esta línea de tiempo doble vs *offset* efectivo es un insumo fundamental para el diseño. Su forma depende de cada área, pues tiene que ver con las velocidades de propagación y las

características de respuesta sísmica de las rocas en la zona en que se realiza el experimento. Usualmente, existe información sísmica previa 2D o 3D que sirve como referencia. Un buen diseño debe garantizar la existencia de *fold* suficiente para el objetivo principal y también para otros niveles secundarios.

También, debe reconocer que la adquisición de *offsets* excesivamente largos puede resultar en un esfuerzo impráctico y costoso en campo, si dichos *offsets* no contribuyen a la construcción de la imagen en los objetivos deseados. Otra manera de observar esta relación entre *fold* y *offset* consiste en generar gráficos de cubrimiento limitando el *offset*. En ellos se observan geometrías particulares como las de la figura 21. Aquí se ha limitado el *offset* a 400 m. (a), 600 m. (b), 1500 m. (c) y 3000 m. (d). En el caso de 400 m. se observan franjas verticales sin cubrimiento alguno. Esto ocurrirá siempre que el *offset* sea menor que la diagonal del *box*, que en este caso es de 583 m. En efecto, el caso de *offset* limitado a 600 m. ya muestra un cubrimiento continuo de al menos 1 *fold*. Para el caso (c) se observa que el *fold* es variable entre 9 y 16 aproximadamente y que existen franjas y patrones geométricos que se conocen como huella (footprint) y que pueden llegar a aparecer en las imágenes sísmicas especialmente en *time* y *horizon slices*.

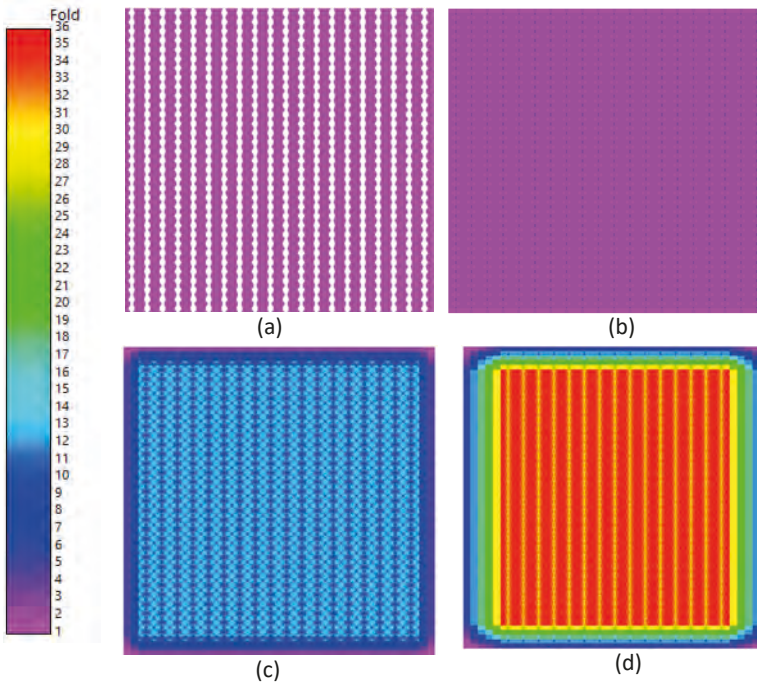


Figura 21. Diagramas de cubrimiento con *offset* limitado a (a) 400 m., (B) 600 m., (C) 1500 m. Y (d) 3000 m. El *offset* máximo total en esta geometría es de 3500 m. Obsérvese cómo para *offsets* menores de 600 m. Existirán bandas verticales sin cubrimiento y que aún para *offsets* de 3000 m. o menores podrán aparecer ligeras bandas verticales como huella de la geometría.

Finalmente, el diagrama con *offset* limitado a 3000 m (87% del *offset* máximo total que es 3452 m), muestra un *fold* máximo que varía entre 30 y 36 en franjas verticales bien definidas separadas 500 m. entre sí.

La figura 22 ilustra un ejemplo clásico de la huella que eventualmente puede producir la geometría de adquisición y su remoción a partir del uso de interpolación. (Tricket, 2010)

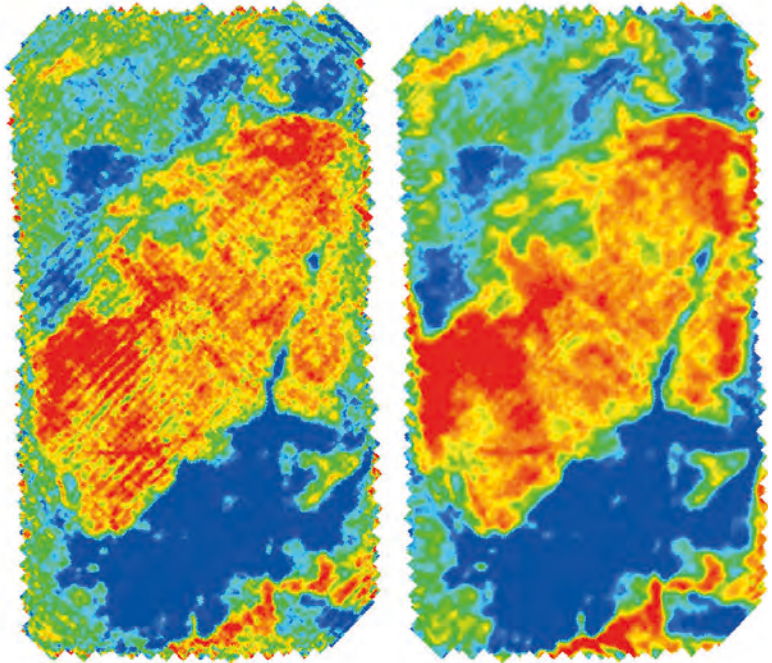


Figura 22. Comparación entre dos *time slices* donde se muestra una fuerte huella de adquisición (*footprint*) sobre las amplitudes de datos migrados (izquierda) y cómo se reduce notablemente mediante la aplicación de interpolación multidimensional. Fuente: Tricket, 2010.

Para información adicional acerca de este tema se recomienda revisar Monk, D. *Pitfalls in seismic acquisition*. *The Leading Edge*, septiembre de 1999.

Dispersión de puntos medios o *staggering*

Es común que los puntos de fuente y recepción deban ser desplazados de su posición teórica en mayor o menor medida debido a las condiciones particulares del terreno y a las restricciones ambientales o culturales que apliquen. Esto hace que los puntos medios en el subsuelo sufran una dispersión que incluso puede hacer que se desplacen a una celda diferente. La figura 23 muestra el trazado planeado para las líneas de fuente (*Preplot*) de un programa sísmico adquirido en zona montañosa del Valle Superior del Magdalena y su posición final (*Postplot*) en el terreno. Las variaciones son tales que en algunas zonas es

imposible reconocer geometría regular alguna. El caso ilustrado parece extremo, pero no es del todo inusual en Colombia. Obsérvese también que, existen áreas relativamente grandes sin fuentes en superficie lo cual impacta negativamente la uniformidad del muestreo en el subsuelo.

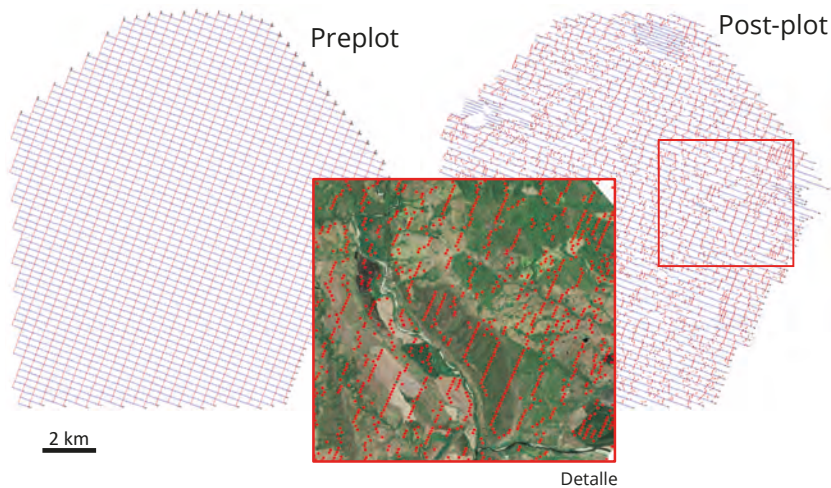


Figura 23. Comparación entre el trazado teórico (preplot) de un levantamiento sísmico y su implementación real (postplot) en una área geográficamente compleja. Cortesía Petroseismic.

Lo anterior subraya la necesidad de examinar las condiciones de terreno y revisar la información de subsuelo, para evaluar el posible impacto de estas irregularidades de superficie en la imagen final y considerar oportunamente acciones orientadas a minimizar el impacto.

Aunque se recomienda que las alteraciones a la geometría teórica se realicen formando líneas con curvatura suave (Vermeer, 2003), esto, raramente es posible en Colombia, por causa de nuestra geografía, la gran cantidad de restricciones y las complejidades logísticas que son comunes especialmente para la ubicación de los puntos de fuente.

En principio, la dispersión de los puntos medios que hemos discutido hasta ahora es aquella causada por irregularidades o restricciones superficiales. Sin embargo, buscando una mayor diversidad estadística de las trazas sísmicas que yacen dentro de una misma celda se puede optar por introducir a propósito una cierta dispersión de los puntos medios mediante desplazamientos relativos de las líneas de receptores y/o fuentes. Esta técnica se conoce en inglés como *staggering* (Cooper, 2009) y hace que se produzcan grupos de puntos medios dentro de una celda en vez de concentrarlos en el centro geométrico de la misma. Una configuración muy común en Colombia es el

stagger triple, en los dos sentidos el cual produce una dispersión del punto medio en 9 puntos mediante el desplazamiento de las líneas en distancias sucesivas de $1/3$ del bin natural. En esta geometría las líneas de fuentes y receptores están desplazadas un tercio del intervalo entre estaciones. Además, cada línea está desplazada $1/6$ del intervalo entre estaciones con respecto al grid normal, es decir que las líneas comenzarán alternativamente a distancias de $1/6$, $3/6$ y $5/6$ del intervalo entre estaciones.

Para el caso de ejemplo, los puntos de reflejo generarían una malla de 8.33×16.67 m., lo cual no quiere decir que la resolución horizontal se haya triplicado. Nótese que la distribución de *offsets* una cada una de estas subceldas será extremadamente pobre y que el *fold* en cada una de estas subceldas es apenas de 4 (ver figura 24).

La distribución final de los puntos medios resulta de la combinación de las irregularidades causadas por los obstáculos en la superficie y las alteraciones propias de la geometría de diseño. Un ejemplo de ello se aprecia en la figura 25, en la que los puntos medios de reflejo exhiben una dispersión significativa con un claro componente aleatorio.

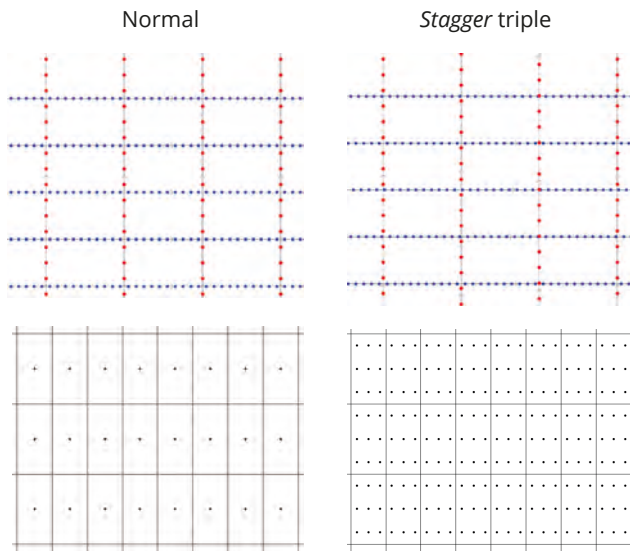
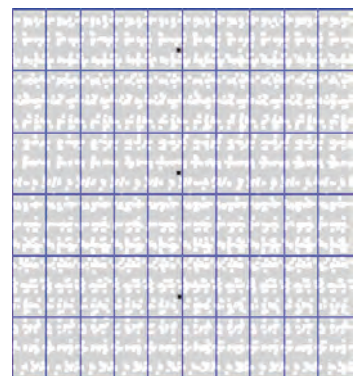


Figura 24, comparación entre geometría centrada (izquierda) y *stagger triple*. El *fold* es el mismo pero la distribución de los puntos medios de reflejo es diferente.

Figura 25. Ejemplo real de la ubicación de puntos medios en un levantamiento real en que se combinan los desplazamientos por restricciones de superficie con un arreglo de triple *stagger*. El tamaño nominal de la celda en este caso es de $25m \times 50$ m.



Distribución de offsets

La geometría del *patch* determina la distribución de *offsets* dentro de las celdas. Lo deseable es contar con una población suficiente de *offsets* cortos, medios y largos para beneficio del procesamiento de los datos y en especial para la migración pre-apilado. La figura 26 ilustra histogramas de *offsets* para cada celda. Dado que el *fold* es 36 en este ejemplo, cada histograma contiene 36 barras verticales. La altura de la barra y su posición corresponden al *offset*. Se observan variaciones importantes entre celda y celda. En algunas celdas se aprecian vacíos en rangos relativamente grandes de *offset* lo cual puede resultar problemático durante el procesamiento. Existen numerosas técnicas de interpolación que permiten rellenar los espacios de *offset* que puedan existir por causa de la geometría o de irregularidades causadas por situaciones en superficie.

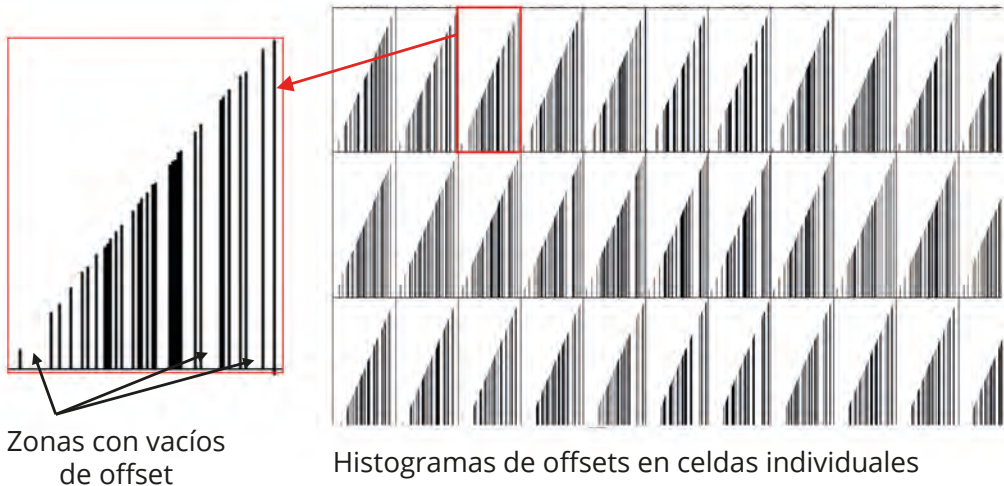


Figura 26. Ejemplo de distribución de *offsets* en un sector de celdas consecutivas. Obsérvese como el histograma varía de celda en celda. Se nota la falta de ciertos *offsets* y la redundancia de otros. La reducción de las diferencias entre celdas es un objetivo del diseñador. Una distribución completamente regular en todo el levantamiento se logra con la aplicación del criterio denominado muestreo simétrico (*Symmetric Sampling, Vermeer*), que requiere que el muestreo de las fuentes sea idéntico al de los receptores.

Un ejemplo de aplicación de estas técnicas de interpolación en zonas fuertemente afectadas por restricciones ambientales puede verse en (Roizman, Checa, 2008). La figura 27 muestra la comparación entre un plano de *offset* de 1000 m. antes (a) y después de la interpolación (b). En el ejemplo la interpolación ha permitido reducir el tamaño del vacío causado por la presencia de una restricción ambiental de gran tamaño, reduciendo la huella del obstáculo en el volumen final migrado.

Hasta este punto hemos examinado los elementos principales de una geometría ortogonal tradicional. Los 6 elementos independientes de la geometría se combinan para calcular otros parámetros importantes como puede verse en la Tabla 1. Algunas fórmulas útiles que relacionan estas variables geométricas pueden observarse en la figura 27A en un formato de Excel de fácil implementación.

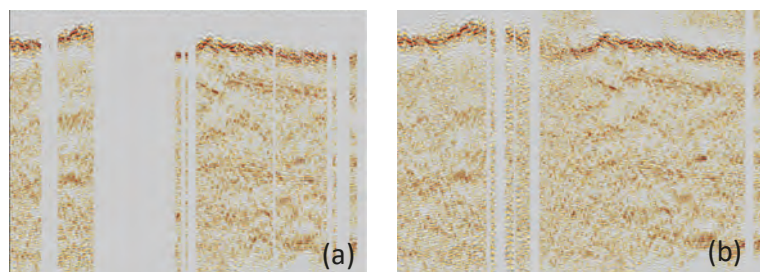


Figura 27. Ejemplo de un plano de offset de 1000 m. Afectado por varios vacíos de tamaño variable como resultado de la presencia de un obstáculo en superficie y la manera como se ha logrado reducir el tamaño de dichos vacíos mediante el uso de interpolación multi dimensional. (Roizman, 2008)

TABLA 1. RESUMEN DE LOS PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN

ITEM	VALOR	UNIDAD
Intervalo de grupo	50	m
Intervalo de fuentes	100	m
Número de estaciones vivas por línea	120	
Número de líneas en el <i>patch</i>	12	
Distancia entre líneas de disparo	500	m
Distancia entre líneas de receptores	300	m
Número de canales en el <i>patch</i>	1440	
<i>Offset</i> máximo <i>crossline</i>	1750	m
<i>Offset</i> máximo <i>inline</i>	2975	m
<i>Offset</i> máximo total	3452	m
Relación de aspecto	0.59	
Máximo <i>offset</i> mínimo	527	m
<i>Fold inline</i>	6.0	
<i>Fold crossline</i>	6.0	
<i>Fold</i> total	36.0	
<i>Roll on inline</i>	1250	m
<i>Roll on crossline</i>	750	m
Densidad de disparos	20	Disp/Km ²
Densidad de receptores	67	Est/Km ²
<i>Long</i> líneas receptores	3.3	Km/km ²
<i>Long</i> líneas fuentes	2.0	Km/km ²
Densidad de trazas	28800	Trazas/km ²
Densidad de celdas	800	Celdas/km ²

	C	D	E
3	PARÁMETRO	VALOR	UNIDADES
4	GEOMETRÍA BÁSICA		
5	Intervalo de receptores	50	m
6	Intervalo de fuentes	100	m
7	Número de canales por línea	120	
8	Número de líneas por <i>patch</i>	12	
9	Distancia líneas de disparo	500	m
10	Distancia entre líneas de receptores	300	m
11			
12	PROPIEDADES DERIVADAS		
13	Bin IL	$=+D5/2$	m
14	Bin XL	$=+D6/2$	m
15	Número de canales	$=+D7*D8$	m
16	<i>Offset</i> máximo <i>crossline</i>	$=0,5*D10*D8-0,5*D6$	m
17	<i>Offset</i> máximo <i>inline</i>	$=+D5*(D7-1)/2$	m
18	<i>Offset</i> máximo total	$=+RAIZ(D16*D16+D17*D17)$	m
19	Relación de aspecto (IL/XL)	$=+D17/D18$	
20	Máximo <i>offset</i> mínimo	$=+RAIZ((D10-0,5*D5)^2+(D9-0,5*D6)^2)$	m
21	<i>Fold inline</i>	$=+D7/2*D5/D9$	
22	<i>Fold crossline</i>	$=+D8/2$	
23	<i>Fold total</i>	$=+D21*D22$	
24	<i>Roll on inline</i>	$=+D9*(0,5*D21-0,5)$	m
25	<i>Roll on crossline</i>	$=+D10*(0,5*D22-0,5)$	m
26	Densidad de disparos	$=1000000*D23/D15/D13/D14$	Disp/Km ²
27	Densidad de receptores	$=(1000/D10)*(1000/D5)$	Rec/Km ²
28	Trocha receptores	$=1/D10*1000$	Km/Km ²
29	Trocha disparos	$=1/D9*1000$	Km/Km ²
30	Densidad de trazas	$=+D23/D13/D14*1000000$	Trazas/Km ²
31	Densidad de celdas	$=1000000/D13/D14$	Celdas/Km ²

Figura 27a. Fórmulas útiles para el cálculo de atributos geométricos con base en los seis parámetros independientes de un diseño ortogonal tradicional.

Apertura de migración

La apertura de migración es la distancia que debe ampliarse del borde del levantamiento sísmico para permitir el registro de las difracciones o eventos inclinados. La figura 28 muestra cómo los eventos a y b, en la sección apilada, se desplazan en la dirección del buzamiento para construir la imagen migrada correspondiente a los puntos a' y b'. En otras palabras, la construcción correcta de la imagen de a' y b' requiere que el límite del levantamiento se haya extendido hasta la ubicación de a y b, en este caso unos 4 km aproximadamente.

El valor aproximado de la apertura de migración puede calcularse mediante la expresión $A_p=0.8Z\tan\theta$, en la que Z es la profundidad del evento y θ el ángulo de buzamiento del evento iluminado. Esto indica que el límite del levantamiento 3D aumenta en función de la profundidad y el buzamiento de las capas o elementos geológicos de interés en el subsuelo.

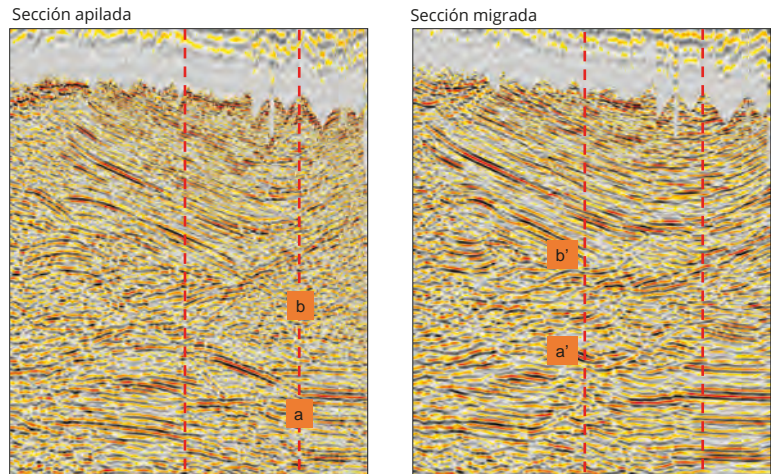


Figura 28. La distancia horizontal entre las posiciones a (sin migrar) y a' (migrada) o b y b' es llamada apertura de migración, y es la distancia extra que debe extenderse un levantamiento para permitir la correcta migración de un evento buzante.

2.3 ELEMENTOS DE DISEÑO

El objeto de esta sección es ilustrar, de manera simplificada, las consideraciones que se tienen en cuenta para escoger los valores de las seis variables independientes que configuran la geometría ortogonal y definir los patrones de fuente y recepción de la energía.

2.3.1 Parámetros geométricos

Determinación del muestreo en superficie y subsuelo

Consiste en definir las distancias entre fuentes y receptores, de tal manera que se garantice que se obtienen al menos dos muestras por cada longitud de onda de los eventos que se pretende muestrear. Bajo esta premisa la separación entre puntos de muestreo en el subsuelo se puede calcular por la expresión general (Cordsen, 2000):

$$S = \frac{DR}{2} = \frac{V}{4f\sin(\theta)} \quad [1]$$

Donde S: es el tamaño de la celda (bin) en el subsuelo.

V: Velocidad promedio al reflector objetivo

f=frecuencia dominante

θ =Buzamiento geológico

Conceptualmente, la ecuación [1] indica que objetivos con buzamientos altos necesitan un muestreo más fino (denso) para recuperar altas frecuencias. La ecuación apunta a obtener dos muestras por longitud de onda de interés, lo cual corresponde al mínimo absoluto requerido por el teorema de muestreo de Shannon. En la práctica puede optarse por perseguir la toma de al menos 3 muestras por longitud de onda, con lo cual el factor de 4 en la ecuación pasa a ser de 6 y el muestreo requerido se hace más fino consecuentemente. La Figura 29 muestra el espaciamiento mínimo que se requeriría para muestrear adecuadamente un cierto rango de frecuencias para una velocidad de 2800 m/s y buzamientos de 10 y 30 grados.

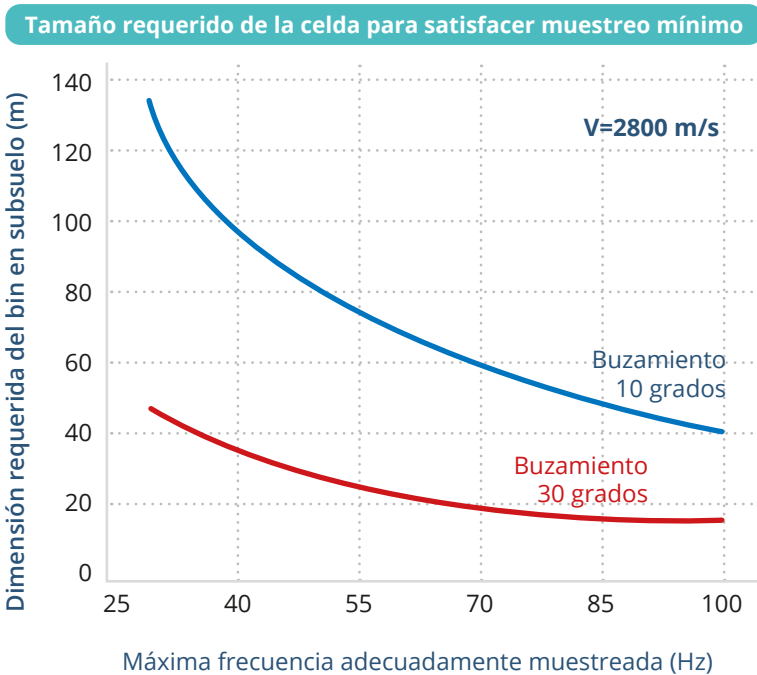


Figura 29. Tamaño requerido de la celda en el subsuelo para muestrear adecuadamente una cierta frecuencia (ecuación [1]). La presencia de buzamiento implica la necesidad de hacer más fino el muestreo. Hoy en día, la tendencia es a reducir el tamaño de celda apoyándose en la posibilidad de usar un gran número de receptores sin incrementar el costo significativamente.

Es muy importante tener claro que, no solo se deben muestrear adecuadamente las reflexiones provenientes de las capas de interés sino también las difracciones y los ruidos que puedan causar interferencia y que tengamos la intención de remover durante el procesamiento de los datos.

En las capas someras, un tren típico de *ground roll* puede ser caracterizado por velocidades relativamente bajas del orden

de 300 a 450 m/s y frecuencias en el orden de 10 a 20 Hz. Es decir, longitudes de onda de menos de 20 m. que necesitarían muestreos en celdas con tamaños entre 6 m. y 10 m. en todas las direcciones, lo que resultaría extremadamente costoso. En la práctica, entonces, el ruido coherente resulta fuertemente afectado por el efecto de *aliasing* y su completa remoción en procesamiento es imposible. En situaciones críticas, la contaminación por ruidos generados por anomalías someras oscurece por completo las reflexiones profundas produciendo secciones sísmicas caóticas, saturadas de ruido pobremente muestreado, que puede parecer ruido incoherente cuando en realidad se trata de ruido coherente de frecuencias relativamente altas que hubiese requerido un muestreo mucho más denso para su total comprensión y sustracción. Estos casos especiales pueden requerir un enfoque de diseño orientado a muestrear adecuadamente todo el campo de onda (*Full Wavefield Recording*), incluyendo todos los tipos de ruido coherente. Esto implica muestreos densos en todas las direcciones lo cual plantea al diseñador el reto de encontrar soluciones costo efectivas para conseguir mejores datos sísmicos.

Gerea (Gerea, 2011), describe mediante un ejercicio de modelamiento por diferencias finitas, el dramático deterioro de la imagen de reflexiones profundas por efecto de la dispersión causada por irregularidades someras de longitud de onda relativamente corta. El ruido generado por estas heterogeneidades es tan fuerte que oscurece por completo las reflexiones. (Figura 29A). Cualquier esfuerzo en procesamiento para remover tales patrones de ruido será infructuoso si el muestreo es insuficiente.

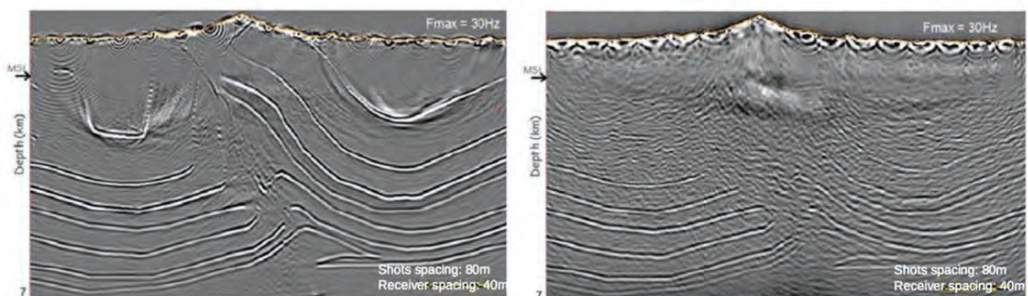


Figura 29A. Las irregularidades superficiales generan patrones complejos de dispersión de energía que afectan dramáticamente la imagen profunda y que deben ser adecuadamente muestreados para que su remoción sea factible. Gerea (2011)

En el presente libro nos ocuparemos únicamente de las geometrías ortogonales tradicionales, no sin antes recalcar la necesidad de analizar a fondo los requerimientos de muestreo en casos en que la dispersión de energía causada por anomalías someras sea un problema crítico y la adopción de una geometría menos convencional deba considerarse.

De acuerdo con las consideraciones anteriores, la celda o bin en el subsuelo será un rectángulo cuyas dimensiones estarán dadas por los tamaños de celda en el sentido del buzamiento (inclinación) y del rumbo (orientación) respectivamente. Objetivos geológicos de similar complejidad en todas direcciones necesitarán celdas cuadradas, mientras que las celdas rectangulares podrán ser convenientes si las estructuras poseen un rumbo relativamente constante.

Si bien la simetría es una propiedad deseable en la geometría de adquisición sísmica 3D (Vermeer, 2003) el costo de la perforación asociada a las adquisiciones con explosivos lleva rápidamente a la necesidad de reducir en lo posible la cantidad de disparos. Por esta razón, es frecuente en Colombia el uso de celdas rectangulares con relaciones de aspecto de 2:1 o inclusive 3:1. Bajo esta lógica, las líneas de receptores suelen orientarse paralelas a la dirección del buzamiento.

Determinación del offset máximo

La mejor forma de definir el *offset* máximo es a partir de la relación entre el *offset* efectivo y el tiempo de tránsito doble. Se analizan también los objetivos secundarios, especialmente aquellos más someros para garantizar un mínimo de cubrimiento.

El *offset* máximo debe ser suficientemente largo para:

- ✓ Garantizar el *fold* requerido a nivel de los objetivos. Proveer capacidad de discriminación de reflexiones múltiples.
- ✓ Evidenciar la presencia de curvatura residual (NMO) que pueda corregirse mediante análisis anisotrópico.
- ✓ Posibilitar un muestreo adecuado de ángulos de incidencia para evaluar comportamientos de AVO (Amplitud vs *Offset*).
- ✓ Recibir reflexiones de eventos provenientes de estructuras complejas especialmente cuando se trate de objetivos profundos.

El *offset* máximo será tal que satisfaga las consideraciones anteriores y es siempre preferible que sea un poco mayor que lo estrictamente necesario. Por otro lado, *offsets* máximos excesivamente largos implicarán un esfuerzo inútil en el campo, a menos que puedan ser utilizados para aproximaciones computacionales de onda completa (*full waveform*).

Tamaño del box

La diagonal del *box* debe ser menor que la profundidad del reflector más somero que deseamos muestrear de manera continua.

Si bien la simetría es una propiedad deseable en la geometría de adquisición sísmica 3D (Vermeer, 2003) el costo de la perforación asociada a las adquisiciones con explosivos lleva rápidamente a la necesidad de reducir en lo posible la cantidad de disparos.

Forma del *patch*

Un *patch* cuadrado posee una relación de aspecto de 1.0 y es deseable esta proporción cuando se requiere un muestreo amplio de azimuts. Sin embargo, un *patch* cuadrado puede resultar ineficiente pues tiende a incluir muchas trazas con *offset* mucho mayor del requerido. La figura 30 ayuda a analizar este tema para un cierto *patch* rectangular indicado en color púrpura: si el *offset* máximo útil es el círculo verde, el muestreo de azimuts es completo, pero todas las estaciones por fuera del círculo verde serán innecesarias lo cual compromete la eficiencia de la adquisición. Si en cambio el *offset* máximo útil es el círculo azul, la gran mayoría de las trazas serán útiles, pero habrá zonas con pobre muestreo de azimuts al norte y al sur lo cual puede resultar negativo en especial si las estructuras son complejas. En resumen, la forma de *patch* debe procurar usar eficientemente los recursos asociados a su implementación en el campo y buscará satisfacer de la mejor manera los criterios de eficiencia y muestreo de *offsets* y azimuts.

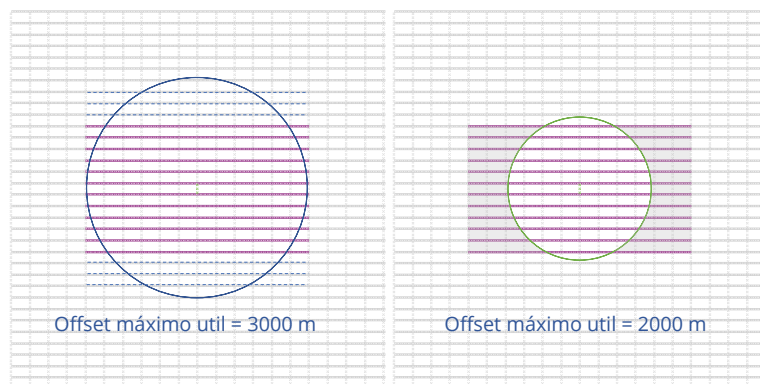


Figura 30. La forma de *patch* rectangular debe satisfacer dos condiciones: a) ser eficiente en términos de la utilidad de los *offsets* que contiene y b) optimizar su logística de implementación.

Una buena aproximación a un tamaño eficiente del *patch* se consigue siguiendo el criterio propuesto por Galbraith (2000), en *Planning Land 3-D Seismic Surveys*, conocido como la regla empírica del 85%. Según esta regla, una vez establecido el *offset* máximo, las dimensiones del *patch* se establecen bajo el siguiente criterio:

$$\begin{aligned} X_{\max} &= \text{Media diagonal del } \textit{patch} \\ X_{il} &= 0.85 X_{\max} \\ X_{cl} &= 0.72 X_{\max} \end{aligned}$$

Esto resulta en una relación de aspecto de 0.85. Cabe anotar que relaciones de aspecto inferiores a 0.5 conducen a levantamientos de azimut angosto (Cordson & Galbraith, 2000).

Fold y densidad de trazas

Si bien existen numerosas aproximaciones analíticas al cálculo del *fold* 3D necesario para un levantamiento 3D, una de ellas muy interesante en *A new methodology for 3D survey design*, Galbraith (2004), la referencia más útil es el análisis de información existente 2D o 3D. Como se ha anotado anteriormente, el uso del concepto de densidad de trazas es más conveniente, pues permite independizar el análisis del tamaño de la celda. En este sentido, Cooper (2004) sugiere algunos rangos de densidad de trazas a utilizar (ver Tabla 2) dependiendo del propósito del levantamiento y de la naturaleza del objetivo exploratorio, que constituyen una guía. Hoy en día la tecnología permite que en Colombia se usen valores entre cuatro y cinco veces mayores, sin incurrir en costos demasiado altos.

Densidad de trazas	
< 6.000	Generalmente no recomendado
6.000 – 18.000	Adecuado para <i>plays</i> simples con buena relación S/R
18.000 – 25.000	Para <i>plays</i> estratigráficos y <i>plays</i> por debajo del espesor de <i>tuning</i> con buena relación S/R.
25.000 – 100.000	Aumentando según necesidades de mejorar relación Señal/Ruido o según complejidad estructural

Por supuesto, estos números suponen una buena diversidad estadística entre las trazas que contribuyen a la densidad específica.

A manera de ejemplo, una densidad de trazas de 50.000 es equivalente a un *fold* de 63, en celda de 50x25 o a un *fold* de 31 en celda de 25x25. Cuando se compara la densidad de trazas de múltiples diseños es muy importante calcular la densidad de trazas para un mismo valor de *offset* máximo. Así, se evita considerar como válidas trazas sísmicas que podrían no ser útiles por corresponder a *offsets* mayores que el máximo *offset* útil.

El impacto del *fold* sobre la calidad de los datos depende de las características de cada área. Por ello, es muy importante contar con información de referencia. Cuando existen levantamientos 2D o 3D con muestreo relativamente denso resulta muy útil hacer ejercicios de decimación en procesamiento para evaluar el impacto de la reducción del *fold*. Este ejercicio consiste en la eliminación selectiva de fuentes o receptores para simular una adquisición con menor densidad, con lo cual se identifican opciones válidas para optimizar la operación y reducir costos sin comprometer los objetivos del levantamiento.

Como se ha comentado, un alto *fold* no necesariamente redundará en mejor calidad si las características del ruido no son aleatorias, si la distribución de *offsets* es deficiente o si la diversidad estadística de los puntos medios en subsuelo es reducida. Todas estas variables deben observarse en conjunto pues están íntimamente relacionadas.

Un ejemplo clásico que ilustra lo anterior se encuentra en Schroeder, 1998. Aquí, se observa el impacto del *fold* y el tamaño de la celda, no solo sobre la calidad de la imagen sino también sobre la resolución horizontal al realizar extracción de atributos (ver figura 31). En este artículo se comparan diferentes simulaciones donde se altera el *fold* o el tamaño de la celda. Si bien los cambios en la imagen no parecen dramáticos, los casos (b), (c) y (d) evidencian un deterioro significativo en el resultado de una predicción de porosidades calculada a partir de amplitudes calibradas con información de pozo.

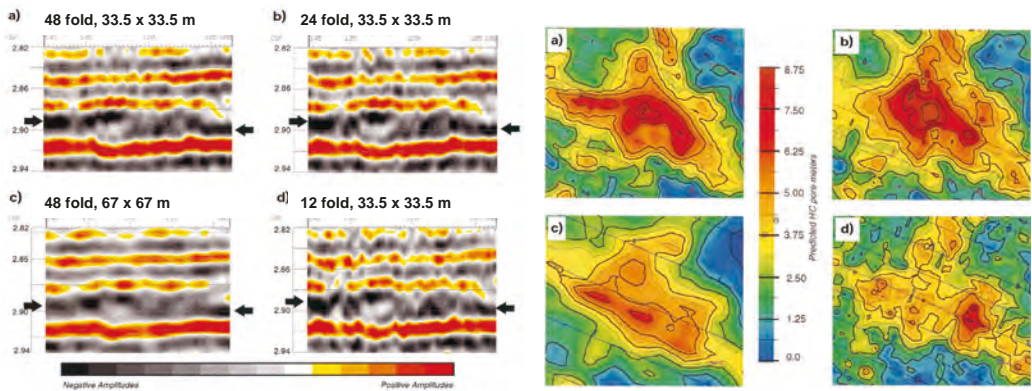


Figura 31. El ejemplo ilustra el impacto del *fold* y tamaño del bin en la imagen y en la resolución horizontal de los datos. El caso (a) representa el caso base mientras que (b) y (d) son reducciones sucesivas del *fold* a la mitad. Por su parte (c) mantiene el *fold* original pero en una celda del doble del tamaño de la inicial. El panel de la izquierda muestra las variaciones de la imagen en una inline mientras que el panel de la derecha presenta el resultado de predicciones de porosidad a partir de extracciones de amplitud en el horizonte de interés. La conclusión es que, ahorros potenciales al reducir el esfuerzo en campo en un levantamiento como este pueden acarrear un deterioro inadmisibles en la calidad del producto final y afectar negativamente la toma de decisiones de perforación exploratoria o desarrollo. Fuente: Schroeder, 1998.

Un caso relativamente reciente, y muy interesante, es el levantamiento de ultra alta densidad de Risha (Jordania), adquirido por BP en 2011, con una densidad de 41 millones de trazas/km². Se realizaron múltiples decimaciones hasta llegar a 200 mil trazas/km², para analizar el impacto de las reducciones graduales de densidad en el cálculo de atributos de AVO/AVOAz (AVO azimutal) (ver figura 32). Los resultados muestran que la densidad de trazas no afecta de la misma manera a todos los atributos y que inclusive dos geometrías con la misma densidad producen resultados diferentes (Ourabah, 2015).

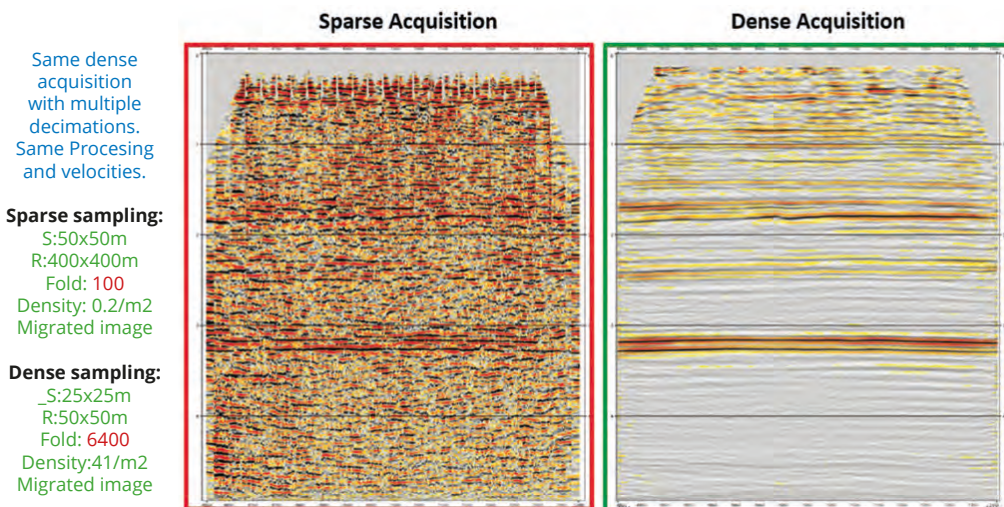


Figura 32. Ejemplos de resultados de decimaciones en un levantamiento de 41 millones de trazas por km² adquirido en Jordania en 2011. (Ourabah, 2015)

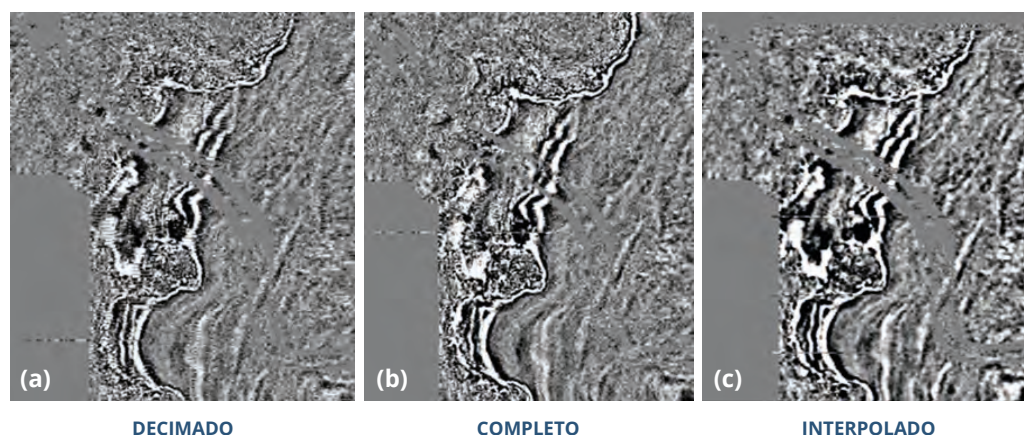


Figura 33. Ejemplo de decimación en un proyecto sísmico 3D en zona de complejidad extrema en el Valle Inferior del Magdalena. (a) datos decimados, (b) datos completos y (c) datos decimados e interpolados. Archivo del autor.

Finalmente, en un ejemplo localizado en el Valle Inferior del Magdalena se realizó la eliminación de una tercera parte de los disparos de un levantamiento 3D, adquirido en una zona de complejidad logística extrema. De un total de 2700 disparos, se eliminaron 900 y se realizó interpolación multidimensional para luego comparar con el producto procesado con datos completos. La figura 33 muestra un corte en tiempo (*time slice*) a 850 ms. El panel (a) muestra el procesamiento de los datos decimados sin interpolación. El panel (b) corresponde al volumen procesado con todos los disparos y, el (c) es el volumen decimado y luego interpolado cuya calidad resulta bastante comparable con el producto completo y exhibe apenas una pérdida leve de resolución horizontal.

2.3.2 Patrones de fuente y recepción

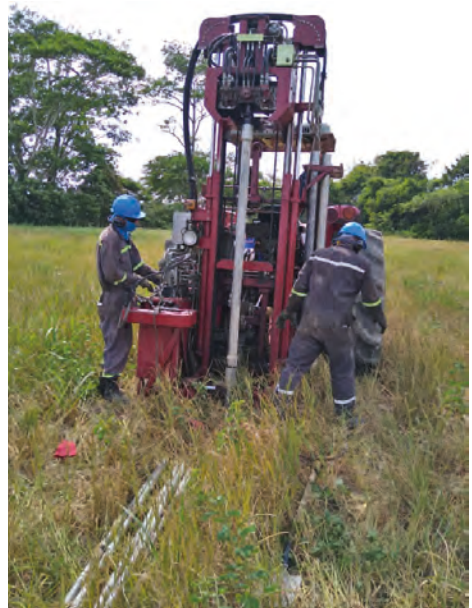
Patrón de fuente

En Colombia, para los programas con fuente impulsiva, el arreglo que se utiliza regularmente es el de un solo hueco cargado con sismigel, único explosivo permitido por la legislación vigente. La elección de patrón de fuente involucra entonces la escogencia de la profundidad del hueco y la cantidad de carga a utilizar. Se busca maximizar la penetración de energía y el ancho de banda de la señal. Una mayor profundidad favorece el alojamiento de la carga en un medio más competente (menos dispersivo) produciendo datos más limpios y de mejor calidad. Sin embargo, el costo de la perforación, especialmente en terrenos de difícil acceso, suele ser un factor operacional limitante que obliga a encontrar un punto medio costo-eficiente.

En situaciones en las que la perforación con equipos portátiles tradicionales se dificulta por la presencia de material aluvial ha sido tradicional el uso de un patrón alternativo de pozos someros múltiples, cuyo resultado suele ser deficiente por la falta de acople de la carga. En estos casos, es recomendable utilizar taladros de sistema sónico como el que se muestra en la figura 34, que permiten alcanzar la profundidad de diseño mediante el encamisado continuo del pozo y no requieren del uso de fluido de perforación.

El ancho de banda del pulso generado es directamente proporcional a la rigidez y velocidad del medio encajante, por lo cual es siempre recomendable buscar alojar la carga en un medio competente.

Figura 34. Taladro sónico siendo utilizado en los Llanos Orientales de Colombia. Esta tecnología es ideal para perforación en zonas de depósitos aluviales. Foto cortesía de Geofizika Torun.



Tamaño de la carga

Jalinoos & White, 1986, discuten en detalle un modelo matemático que describe la propagación de energía causada por la explosión de una carga puntual y describen la relación entre el tamaño de la carga y las amplitudes y frecuencias resultantes. La figura 35 muestra el espectro de amplitud de la señal, correspondiente a diferentes tamaños de carga en un experimento reportado por Sengbush en 1978. En general, el incremento en la carga generará mayores amplitudes y el corrimiento de espectro hacia las bajas frecuencias. Esto indica que si bien, una carga baja favorecerá la obtención de frecuencias más altas, sus amplitudes asociadas podrían disiparse rápidamente o incluso perderse dentro del nivel de ruido. Por ejemplo, se observa que entre cargas de 1.25 lb y 10 lb (relación de 1:8) la frecuencia dominante se reduce a la mitad y la amplitud aumenta en un factor de 4.

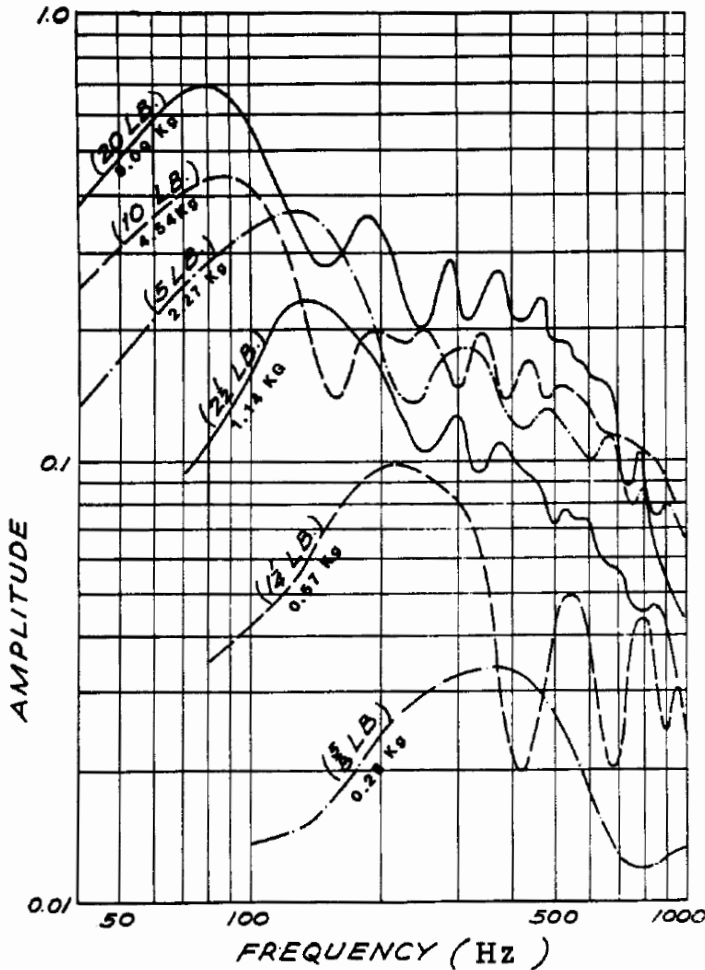


Figura 35. Comportamiento de amplitud y frecuencia con relación al tamaño de la carga. (Sengbush, 1978)

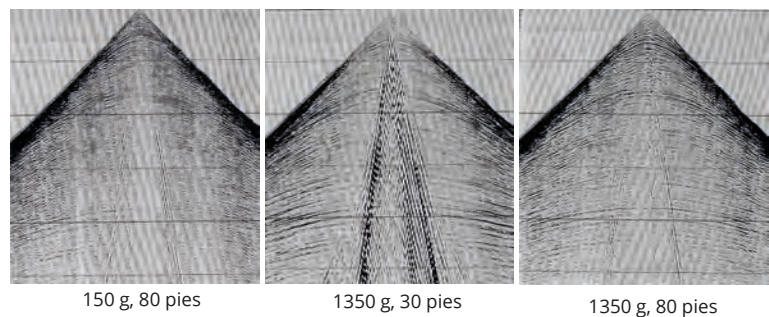
En la práctica este comportamiento depende de muchos factores adicionales de carácter local, que hacen que la mejor manera de entenderlos sea el análisis sobre datos reales experimentales o adquiridos en levantamientos anteriores. (Sengbush, 1986)

Mediciones realizadas por Nichols, en 1960, mostraban que (Nicholls, 1962) el acople de la carga tiene que ver con la relación entre la impedancia del medio encajante y la impedancia del explosivo. Estudios más recientes (Xiwei, Weimin, Hao, & Baoqing, 2010) muestran que la mayor energía se logra cuando esta relación es del orden de 1.8 a 2.0. El sismigel posee una impedancia de $6720 \text{ m/s} \cdot \text{g/cm}^3$. La impedancia de una roca competente con 2.7 g/cm^3 de densidad y 2500 m/s de velocidad, es de $6750 \text{ m/s} \cdot \text{g/cm}^3$, mientras que para un conglomerado poco consolidado podríamos tener 2.2 g/cm^3 de densidad y 1800 m/s de velocidad, para una impedancia de $3960 \text{ m/s} \cdot \text{g/cm}^3$. De allí que la roca competente (relación de impedancias de 1.0) posea un mejor acople que aquel que proporciona el conglomerado (relación de impedancias de 0.59).

Para acometer el análisis del patrón de fuente es muy importante repasar los objetivos del levantamiento y centrar la evaluación en el logro de estos. El mejor patrón de fuente será aquel que permita lograr los objetivos geofísicos expresados en relación señal/ruido, frecuencia y amplitud, y permita optimizar los costos y la eficiencia de la operación. En la figura 36 se presenta una comparación entre tres disparos realizados con distintas combinaciones de carga y profundidad. Las siguientes observaciones generales son claramente visibles:

- Los eventos profundos se observan con mayores amplitudes para la carga alta.
- Los disparos con pozo profundo están prácticamente libres de *ground roll* mientras que el cono de ruido es significativo para el pozo somero. En este caso, el cono de ruido está bien definido y su eliminación en procesamiento luce con pronóstico favorable.
- La frecuencia es mayor para la carga baja en la parte somera del registro.

Figura 36. Comparación entre tres disparos realizados en la misma localidad y con diferentes combinaciones de carga y profundidad. Obsérvese cómo varían las características del ruido generado por la fuente (*ground roll*), la amplitud de los reflectores y el contenido de frecuencias.



En Colombia, los tamaños de carga más comunes son de 900 y 1800 gramos, según indica una compilación realizada por el autor, en la que se incluyen 229 programas sísmicos 2D y 3D, adquiridos después de 2008. Cargas mayores se utilizan en áreas de piedemonte donde la geología compleja dificulta la penetración profunda de la energía.

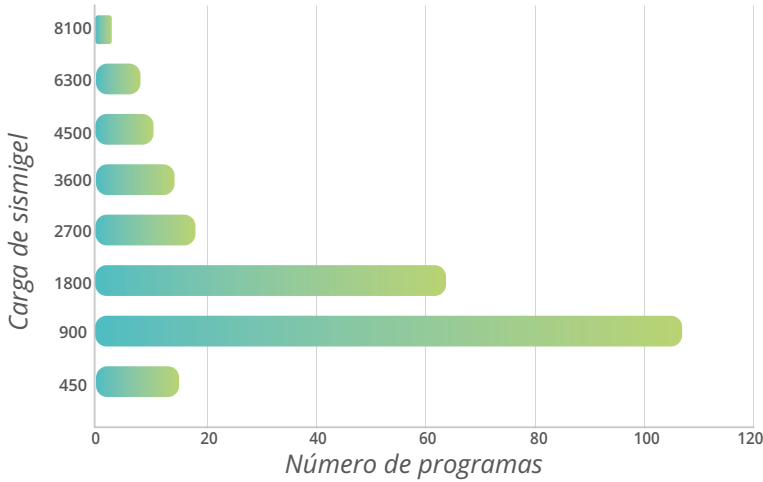


Figura 37. Histograma de tamaño de carga en una muestra de 229 programas sísmicos 2D y 3D en Colombia en un periodo de 15 años. Los tamaños más frecuentes son de 900 y 1800 gramos. Compilación del autor.

En la sección 2.6 se discutirá en mayor detalle la importancia de los datos experimentales.



Figura 38. El univib pl-236 es el vibrador más comúnmente utilizado en Colombia. En la imagen se aprecia operando sobre vía pavimentada con su plancha de 1,02 m² sin que se produzca ninguna afectación sobre la infraestructura. Foto archivo personal del autor.

Si bien el Vibroseis es la fuente sísmica más común en el mundo, en Colombia su uso se encuentra limitado por las difíciles condiciones de acceso y desplazamiento que caracterizan nuestra geografía. No obstante, los vibradores de dimensiones moderadas (16,000 a 45,000 libras) encuentran amplias posibilidades en nuestro territorio. Fueron utilizados ampliamente en la década de los ochenta y su uso vuelve a ser más y más frecuente, a veces como fuente única y en otras ocasiones en combinación con la fuente explosiva.

El vibrador más común en Colombia es el denominado Univib PLS-326, fabricado por INOVA (ver figuras 38 y 39), puede aplicar una fuerza pico de hasta 26,000 libras, con frecuencias que van entre 1 Hz y 475 Hz. Sus dimensiones (en la configuración más común) son 1.94 m. de ancho, 3 m. de altura, 6.32 m. de largo, con un radio de giro del orden de 10 m. lo cual lo hace muy flexible para operar en áreas urbanas y rurales. El área de la placa base es de 1.02 m².



Figura 39. Ejemplo de la utilización de un univib en zona urbana. Previamente se ha adelantado el proceso informativo con las comunidades lo cual permite operar sin apenas alterar la cotidianidad de los habitantes.

Los parámetros que involucra la fuente vibratoria son:

Longitud del barrido

Tiempo que dura el barrido en segundos. Suele estar entre 8 y 32 segundos.

Número de barridos

Número de veces que se repite el barrido para sumar y generar un solo registro con la intención de reducir el ruido aleatorio.

Solo si el ruido es totalmente incoherente se obtendrá una reducción equivalente a la raíz cuadrada del número de barridos, mientras que los ruidos coherentes se verán realizados en la medida en que aumenta el número de barridos. Esta variable debe abordarse con rigurosidad y claro entendimiento de la naturaleza del ruido (coherente vs incoherente) pues su impacto en costo puede ser muy significativo.

Rango de frecuencias

Valores extremos de frecuencias que se introducirán al terreno. Este rango está íntimamente relacionado con el objetivo exploratorio y con la respuesta específica del área de trabajo. Objetivos profundos de interés regional podrán favorecerse de las bajas frecuencias, mientras que objetivos en los que se requiere alta resolución necesitarán un mayor ancho de banda. Las frecuencias menores de 4 Hz pueden resultar problemáticas para el acople de la plancha con el terreno y producir distorsiones indeseables y riesgo para la integridad mecánica del vibrador.

Tipo de barrido

Un barrido lineal es aquel en el cual se vibra el mismo tiempo para cada rango de frecuencias, mientras que un barrido no lineal procura dar un mayor peso a un cierto rango de frecuencias.

Número de vibradores

Es el número de vibradores que aplicarán el barrido. En la medida en que las distancias entre puntos de fuente se han venido reduciendo, en Colombia la tendencia es usar solo 1 o 2 vibradores por punto de vibrado. Ello prácticamente elimina la expectativa de lograr la cancelación de ruido superficial mediante el uso de arreglos de vibradores. Las geometrías modernas de adquisición tienden a caracterizarse por una alta densidad y diversidad de trazas lo cual permite afrontar el reto de la reducción de ruido con otras herramientas.

Fuerza Pico aplicada

Aún cuando el vibrador podría operar al 100% de su fuerza pico de referencia (26.000 libras en el caso del UNIVIB PL-236), es recomendable operarlo en un rango entre el 70% y el 90% de la misma, para mantener baja la distorsión y garantizar un desempeño estable del equipo.

Pruebas de parámetros

La escogencia de la mejor combinación de parámetros se enfoca, por supuesto, en la obtención de la mejor calidad a nivel del objetivo exploratorio, pero también se ocupa de facilitar una operación ágil y eficiente. Como hemos señalado, cada proyecto es único y se requiere conducir pruebas específicas para determinar los parámetros óptimos de vibración. Para ello

puede adoptarse una metodología ordenada, con el fin de evaluar el impacto de cada una de las variables mientras las demás se mantienen constantes.

La tabla 3 ilustra una metodología posible en la que ya se ha definido una frecuencia mínima de barrido de 10 Hz y una fuerza del 80% del valor pico. En este ejemplo se comienza por definir la frecuencia máxima de barrido, con una variación entre 60 y 140 Hz, manteniendo fijos los demás parámetros. Una vez definida esta frecuencia máxima (F) se continúa con el número de barridos, que se varía entre 1 y 8, mientras los demás parámetros se mantienen constantes. De este análisis se escogerá el número óptimo (N) de vibradores. De la misma manera se prosigue con la longitud de barrido (L) y el número de vibradores (V).

PROGRAMA DE PRUEBAS PROPUESTO							
	ID	NÚMERO DE VIBROS	NÚMERO DE BARRIDOS	LONGITUD DE BARRIDO (Seg)	FRECUENCIA (Hz)	Comportamiento esperado	Criterio de decisión
Test frecuencias F	1	2	4	12	8-60	"Mayor detalle a medida que sube la frecuencia pero también mayor ruido. A medida que baja el ancho de banda, baja la rata de barrido y mejora la cancelación de ruido aleatorio."	Verificar que existan reflexiones reales para las frecuencias altas. Hacer Panel de filtros.
	2	2	4	12	8-90		
	3	2	4	12	8-120		
	4	2	4	12	8-140		
Test # sweeps N	5	2	1	12	F	"Relación S/R debe ir mejorando 40% cada vez. Energía debe ir mejorando. Muy alto implica más tiempo operacional."	Escoger lo más bajo posible, que muestre buena relación señal ruido. Medir valores reales de amplitudes.
	6	2	2	12	F		
	7	2	4	12	F		
	8	2	8	12	F		
Test sweep length L	9	2	N	6	F	"Relación señal/ruido aleatorio mejorando 40% cada vez. Ground roll aumentando. Muy alto implica más tiempo operacional."	Escoger lo más bajo posible, que muestre buena relación señal ruido. Medir valores reales de amplitudes.
	10	2	N	12	F		
	11	2	N	24	F		
Test # Vibros V	12	1	N	L	F	"Relación S/R mejora proporcional a # vibros. Más vibros sube costo y afectación. "	El menor que muestre buena calidad. Apoyarse en apilados si disponibles.
	13	2	N	L	F		
	14	3	N	L	F		

Tabla 3: Secuencia típica de pruebas para selección de parámetros de vibrado.

Las pruebas descritas pueden analizarse a nivel de disparo, pero en ciertas circunstancias es importante diseñarlas de manera que puedan generarse secciones sísmicas cortas, con un procesamiento básico que permita apreciar el impacto del apilamiento, a la vez que se evita el riesgo de tomar decisiones

sobre datos demasiado puntuales que podrían no ser representativos del área de trabajo. Además, debe tenerse en cuenta en la selección de los puntos de vibración para pruebas, la escogencia de zonas estables en donde no se produzcan cambios en el terreno por la operación repetida del vibrador. Los efectos de compactación del terreno, después de decenas de vibraciones, pueden producir resultados poco representativos y a veces contradictorios.

La Figura 40 muestra una comparación entre dos registros en los que se evalúa la longitud de barrido. El punto de vibración se ha adquirido con 2 vibradores, que hacen 4 barridos simultáneos con frecuencia entre 8 y 120 Hz y se compara el resultado entre longitudes de barrido de 6 s (izquierda) y 16 s (derecha). Se observa la reducción del ruido aleatorio en la medida en que se aumenta el tiempo de barrido, pero también se aprecia un incremento del ground roll. En este caso, contando con los demás registros intermedios se escogió una longitud de 12 s. La figura 41, por su parte, ilustra la comparación entre los registros obtenidos con uno y con dos vibradores que aplican 4 barridos de 12 s entre 8 y 120 Hz. El registro con 2 vibradores luce considerablemente menos afectado por ruido y exhibe mejor continuidad casi a todo nivel. Si resultara crítico por razones logísticas limitarse al uso de 1 vibrador, debería analizarse la diferencia a nivel de apilado, con foco en la zona del objetivo exploratorio, para evaluar si esta opción resulta técnicamente aceptable.

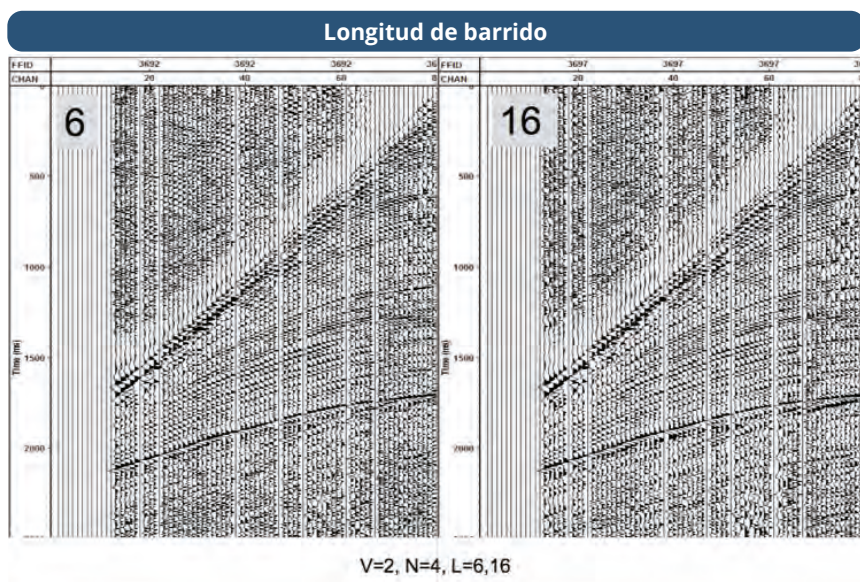
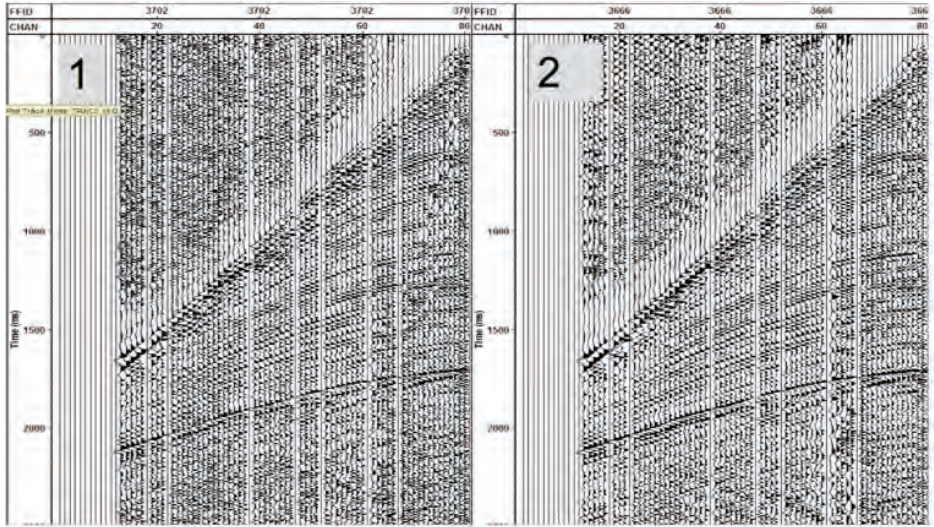


Figura 40. Comparación entre longitudes de barrido de 6 s y 16 s, mientras los demás parámetros se mantienen constantes. El registro con mayor longitud de barrido (derecha) muestra mayor contenido de ground roll, pero se observa menos afectado por ruido aleatorio en su parte profunda. En este proyecto se escogió una longitud de barrido de 12 s. Datos con deconvolución. Archivo personal del autor.

Número de vibras



N=4, L=12, V=1,2

Figura 41. Comparación de número de vibradores mientras los demás parámetros se mantienen constantes. El registro con 2 vibradores luce más limpio y continuo. En este caso una extensión del análisis con datos apilados podría ayudar a evaluar si sería factible operar con un solo vibrador, teniendo en cuenta que ello reduciría costos y huella ambiental. Datos con deconvolución. Archivo personal del autor.

¿Explosivos o Vibradores?

El uso de fuente vibratoria presenta ventajas innegables, desde la perspectiva de costos, en la medida en que elimina la perforación (la actividad más costosa) y permite la implementación de una alta densidad de fuentes. Todo ello solo si el área presenta las condiciones adecuadas para el desplazamiento eficiente y seguro de los equipos. Es muy importante reconocer que, los dos mecanismos de generación de energía son considerablemente diferentes, pueden producir resultados diferentes y no son necesariamente intercambiables. Un ejemplo de comparación directa entre explosivos y vibradores en los Llanos Orientales se presenta en la Figura 42 en la que se advierte una pequeña ventaja en penetración de energía para el registro con explosivos. Drimi (Drimi, 2004) presenta un caso en el que se comparan directamente una adquisición con fuente explosiva con 800 g, en hueco único a 48 m. de profundidad y una con vibrador de 60,000 libras, para un objetivo relativamente somero. Las características de las capas someras, en esta área en particular, hacen que la fuente explosiva permita obtener un ancho de banda mayor (10-90 Hz vs 10-75 Hz) que el que proporciona la fuente vibratoria aún con un barrido de 2.5 Hz a 105 Hz. (ver figura 43).

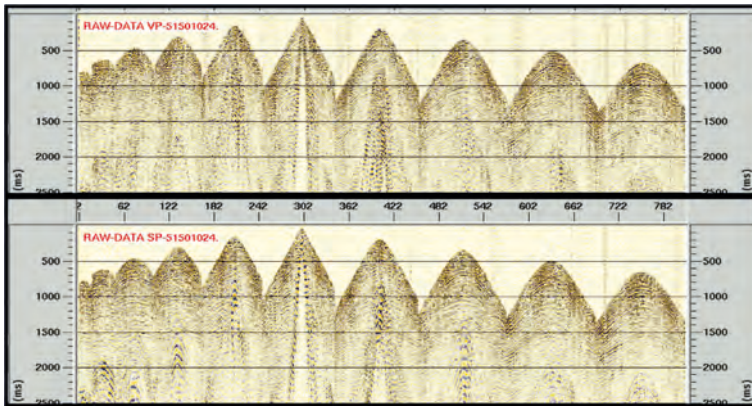


Figura 42. Comparación entre dos registros adquiridos con vibradores (arriba) y con explosivos (abajo). Aunque resultan bastante comparables, se aprecia una mayor penetración de energía para el disparo con sismigel. El tiempo máximo del display es de 2.5 S. Archivo personal del autor.

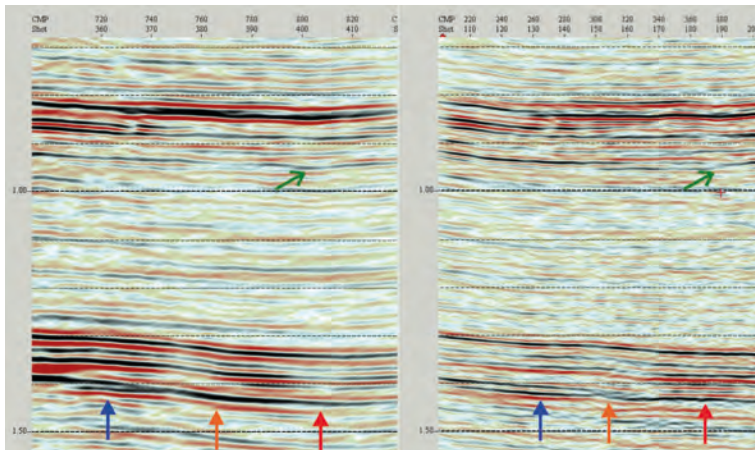


Figura 43. Comparación directa entre dos secciones adquiridas con fuente vibratoria (izquierda) y explosiva (derecha) para un objetivo relativamente somero. En este caso la sección con 800 g de explosivo exhibe un mejor contenido de frecuencias. (Drimi,2004)

Un ejemplo adicional es el publicado por Tilander y Lattimore (1991). En este caso, en un área con alta complejidad logística y geológica, se compara una adquisición de gran esfuerzo con explosivos, perforando pozos entre 25 y 40 m. de profundidad, con cargas entre 5 kg y 15 kg, con líneas de vibradores a lo largo de las precarias vías existentes con barridos de 12-60 Hz. El uso de vibradores resultó en líneas de mucha mejor calidad, con un *fold* cuatro veces mayor y a un costo del 25% del de la adquisición, con explosivos como se detalla en la Figura 44. En Colombia, existe un potencial interesante para la adquisición con vibradores en zonas de montaña, haciendo uso de la malla vial existente que, si bien es escasa y de pobres especificacio-

nes, puede ayudar a obtener imágenes regionales de aceptable calidad por una fracción del costo y tiempo que requiere la adquisición con explosivos.

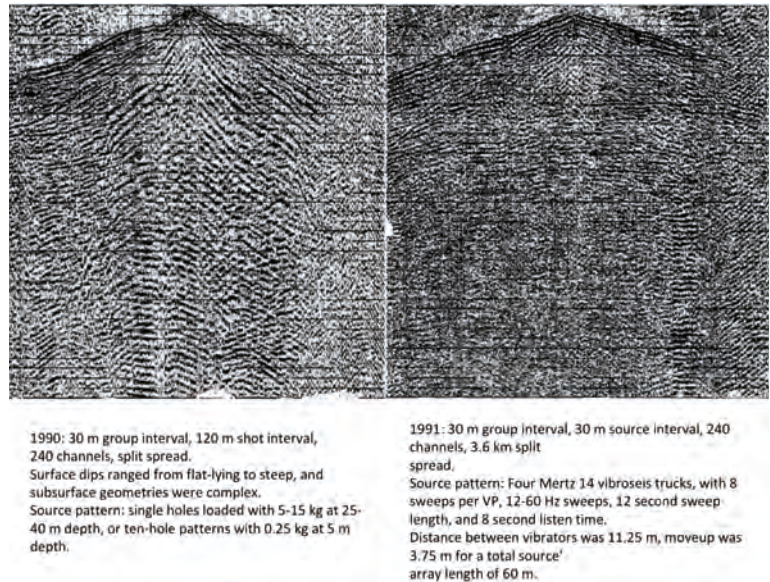


Figura 44. Comparación entre adquisición con explosivos y con vibros en una zona de gran complejidad logística y geológica. La adquisición de alto fold con vibroseis se convierte en una alternativa exitosa y costo efectiva aprovechando la poca infraestructura vial existente. (Tilander, 1991)

Como se ha resaltado a lo largo del libro, conviene desarrollar un conocimiento detallado de cada una de las áreas de trabajo, con el fin de evitar las generalizaciones y mejorar la probabilidad de adquirir los mejores datos posibles.

Patrón de recepción

Con la evolución del número de canales y la reducción del peso del equipo asociado a la recepción de los datos, la tendencia actual apunta a arreglos de receptores únicos o con un máximo de 6 elementos. Los análisis detallados de las características del ruido superficial, que antes definían la geometría del arreglo de geófonos en una estación receptora, son poco frecuentes hoy en día. La configuración más común consiste en usar 6 geófonos distribuidos linealmente en una distancia no mayor al intervalo entre estaciones o agrupados en círculo alrededor de la estación. La oferta de nodos autónomos ha hecho que sea cada vez más común el uso de arreglos puntuales, es decir, de un solo elemento, con lo cual se renuncia a toda posibilidad de cancelación de ruido por esta vía. Un estudio reciente realizado en Colombia (Cortes, Caldwell, & González, 2015), además de comparar el arreglo tradicional de 6 geófonos con el arreglo

puntual, también permite crear digitalmente otros arreglos que enriquecen el análisis. La figura 45 compara dos apilados preliminares, uno obtenido con arreglo tradicional de 6 geófonos en serie con uno de sensor único generado extrayendo el elemento #4 de un grupo de 7 elementos individuales como se indica en el panel derecho de la figura. En ambos casos la separación entre estaciones es de 30 m. Un examen cuidadoso revela diferencias, que pueden ser o no significativas, dependiendo, como siempre, del objetivo exploratorio.

Otro resultado interesante del estudio evidencia que la mejoría esperada en relación S/R al ir aumentando el número de elementos (n) en un arreglo y la cual se espera sea igual a \sqrt{n} , no se logra y es consistentemente menor a lo esperado debido probablemente a que el ruido no es completamente aleatorio y puede existir algún grado de correlación entre el ruido registrado en cada uno de los elementos individuales del arreglo.

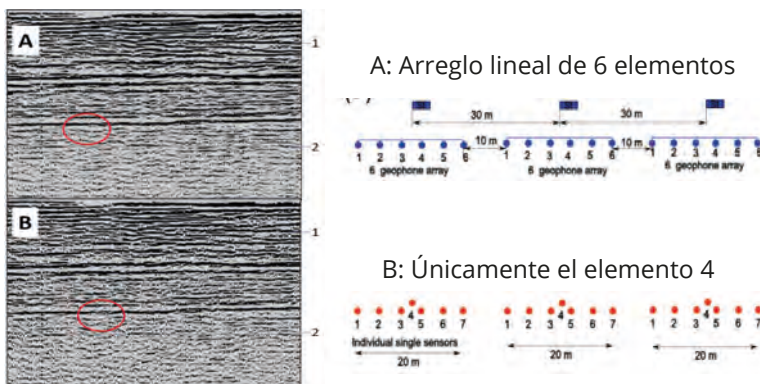


Figura 45. Comparación entre un arreglo tradicional de 6 geófonos en serie (a) y uno de sensor único (b) a nivel de apilado preliminar con un análisis de velocidad. Las diferencias son sutiles (ejemplo en el óvalo rojo) y su significancia dependerá del objetivo exploratorio. Fuente: (Cortés, Caldwell, & González, 2015).

Conviene recordar que cada proyecto es único y debe ser analizado a la luz de sus características particulares. Se debe ser cuidadoso al extrapolar información de áreas vecinas o estudios realizados en escenarios diferentes a aquel donde se llevará a cabo la nueva adquisición. La oferta comercial de unidades receptoras de todo tipo es amplia y las diferencias son cada vez menores. Es común que la escogencia del tipo de receptor esté más asociada a consideraciones comerciales (disponibilidad, oportunidad) que a criterios puramente técnicos.

2.4 EJEMPLO DE DISEÑO

El siguiente es un análisis simplificado del proceso de definición de parámetros para un levantamiento 3D con geometría ortogonal.

Objetivo geológico

Localización: *Foreland* de los Llanos Orientales

Formaciones objetivo: Reservorios terciarios y cretácicos tradicionales en la cuenca.

Tipo de trampas: cierre en tres direcciones limitado por fallas de alto ángulo.

Relieve esperado del cierre estructural del orden de 50 ms.

Información de referencia

Se dispone de la siguiente información de referencia proveniente de un levantamiento 2D antiguo dentro del área de interés.

- Disparos representativos de un levantamiento 2D en el área (figura 46).
- Espectros de amplitud antes y después de deconvolución para diferentes zonas del registro (figura 47).
- CMP *gathers* con NMO aplicado (figura 48).
- Análisis de velocidades y apilado de referencia (figura 49).

Cálculo de parámetros

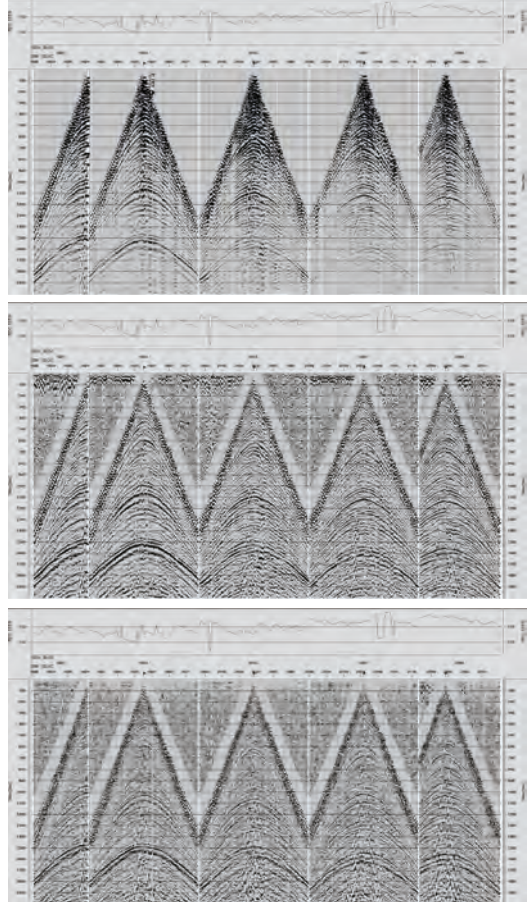


Figura 46. Disparos representativos de un levantamiento 2D en el área de interés. Se trata de registros de 96 canales con estaciones separadas 50 m entre sí, para un offset máximo de 2400 m. El panel superior contiene registros crudos, el intermedio registros con agc y el inferior con agc y deconvolución aplicada.

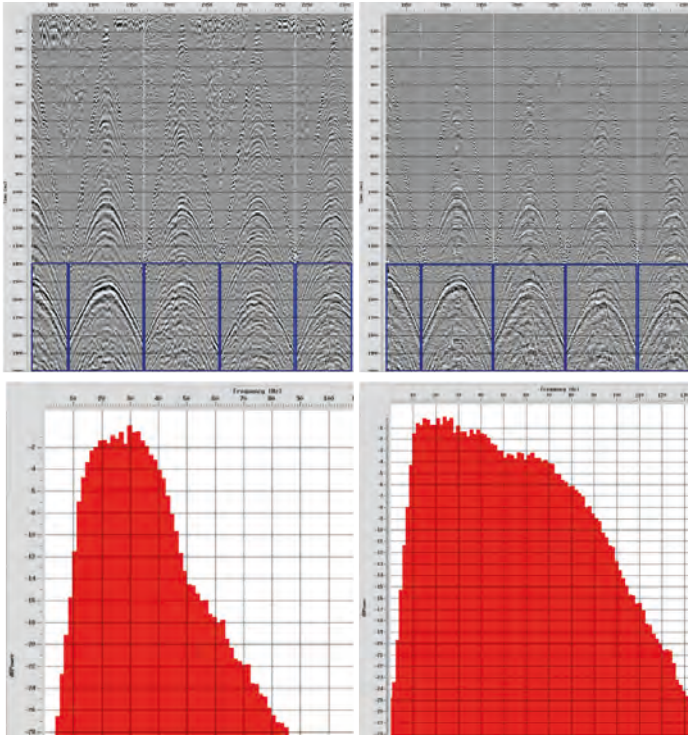


Figura 47. Los espectros de amplitud son un insumo fundamental para entender las características de los datos sísmicos en un área. El panel izquierdo muestra el contenido de frecuencias de los datos crudos, mientras que, en el lado derecho se observan los espectros después de la aplicación de una deconvolución tipo spiking. Se observa claramente el decaimiento de las frecuencias con la profundidad que es característica de cada área y que limita las posibilidades de adquirir datos de alta resolución. Para un tiempo doble de 1.5 Segundos podría obtenerse una frecuencia máxima de 50 a 60 hz.

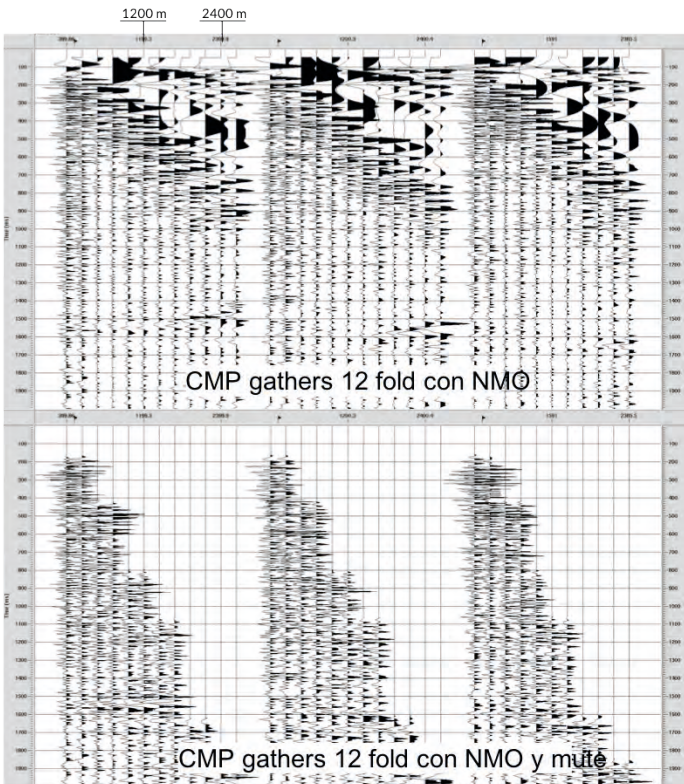


Figura 48. Cmp gathers con nmo aplicado. Arriba sin patrón de enmudecimiento aplicado y abajo con patrón aplicado.

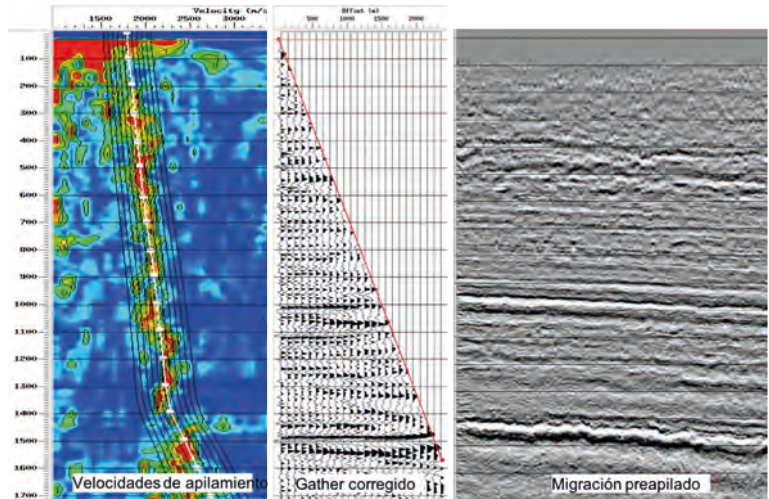


Figura 49. Línea 2D antigua dentro del área de interés. La imagen central muestra los datos preapilado corregidos por nmo y las velocidades correspondientes. A nivel del objetivo principal se observa un offset útil de al menos 2400 metros con algún moveout residual que podría corregirse con una aproximación de cuarto orden. Este tipo de información de referencia es esencial para caracterizar el objetivo. La velocidad a 1.5 S es del orden de 2500 m/s. El offset útil a 1.0 S es algo mayor a 1500 m. El reflector más somero de interés se encuentra aproximadamente a 500 ms, correspondientes a 500 m aproximadamente. El buzamiento regional es suave pero se observan eventos de corta longitud de onda. La distancia entre trazas en este caso es de 25 m.

Muestreo espacial

La figura 47 indica que un valor adecuado para la frecuencia máxima a nivel del objetivo es de 60 Hz.

Por su parte, la figura 49 muestra que la velocidad de apilamiento (aquella que corrige el NMO), para 1.5 s es de 2500 m/s. Dado que, las capas son relativamente planas, la velocidad de apilamiento puede considerarse una buena aproximación a la velocidad rms (root mean square). Ahora bien, el buzamiento regional del área de interés es extremadamente bajo, pero existen difracciones y elementos estructurales que requerirán un muestreo relativamente fino. Consideraremos, entonces, como primera aproximación un ángulo de 30 grados para el cálculo de la longitud de onda aparente. Con ello y buscando asegurar como mínimo la existencia de 2 muestras por longitud de onda, tenemos:

$$DR = \frac{V}{2f_m \sin(\theta)} = \frac{2500}{2 \cdot 60 \cdot \sin(30)} = 42m$$

Dado que las estructuras esperadas son menos complejas en el sentido del rumbo, es viable utilizar un muestreo horizontal en sentido crossline del doble de la distancia entre recepto-

res, es decir, al menos 84 metros. Con ello se aspira a reducir la densidad de disparos y con ello el costo del levantamiento sin afectar la calidad al nivel del objetivo.

$$DF=84 \text{ m}$$

Offset máximo

La figura 42 muestra que a 1.5 segundos aún se cuenta con aporte del *offset* máximo de la adquisición de referencia, que es de 2400 m., sugiriendo que valores aún mayores de *offset* pueden resultar de utilidad. Un cálculo sencillo muestra que, con un *offset* de 3000 m, el máximo ángulo de incidencia correspondiente a una reflexión a 1.5 s (aproximadamente 2000 m de profundidad) es del orden de 56 grados, más que suficiente para analizar eventuales comportamientos de AVO. El análisis de velocidades muestra poca dispersión en los valores de semblanza lo cual indica que con 3000 m de *offset* se obtiene una buena resolución en el picado. Con estas consideraciones, se puede adoptar un valor inicial de 3000 m para el *offset* máximo total.

Forma del patch

Siguiendo la regla del 85% como aproximación inicial tendríamos:

$$X_{mx \text{ inline}} = .72 * 3000 = 2160 \text{ m}$$

$$X_{m \text{ inline}} = .85 * 3000 = 2550 \text{ m}$$

Densidad de trazas y cubrimiento en el subsuelo

A partir de las consideraciones planteadas al principio de este capítulo y con base en la información de referencia se pueden hacer las siguientes observaciones:

La respuesta sísmica del área es excelente. El ruido aleatorio no es una preocupación. El ruido generado por la fuente es muy bajo. Esto sin duda está asociado con la profundidad del hueco que es al menos de 20 m. Un patrón de fuente más somero puede ser una opción válida para reducir costos, pero en este caso el ruido de *ground roll* será mayor y su muestreo y remoción requeriría mayor densidad. Con eso en mente, es razonable pensar en una densidad de trazas entre 40 y 50 mil.

Con estos valores iniciales, se puede hacer un primer cálculo con ayuda de una hoja electrónica sencilla. Una primera aproximación podría lucir como la que se muestra en la Tabla 4.

Parámetro	Valor	Objetivo	Unidad
Intervalo de grupo	42		m
Intervalo de disparos	84		m
Número de canales por línea	126		
Número de canales	1764		
Número de líneas por <i>patch</i>	14		
Distancia líneas de disparo	378		m
Distancia entre líneas de receptores	336		m
Offset máximo crossline	2310	2160	m
Offset máximo inline	2625	2550	m
Offset máximo total	3497	3000	m
Máximo offset mínimo	461	500	m
Fold inline	7,0		
Fold crossline	7,0		
Fold total	49,0	44	
Roll on inline	1134		m
Roll on crossline	1008		m
Densidad de disparos	31	30	Disp/Km ²
Densidad de receptores	71		Grupos/Km ²
Total disparos	9448	9000	
Total trazas	16.666.667		
Trocha receptores	3,0		Km/Km ²
Trocha disparos	2,6		Km/Km ²
Densidad de trazas	55556	50000	

Tabla 4. Parámetros de geometría 3D - aproximación inicial.

El diseño que se muestra en la Tabla 4 posee un *offset* máximo, un poco por encima de lo deseado. La densidad de disparos es de 31 por km², un valor razonable para un área sin gran complicación logística.

A partir de este punto, se pueden plantear múltiples opciones que arrojen resultados similares y que puedan representar mejoras costo-efectivas. Es muy frecuente que, en los procesos de contratación se soliciten precios para diferentes opciones de parámetros. Una primera opción que podría plantearse consiste en aumentar ligeramente el tamaño del box y hacerlo un cuadrado de 400 m. x 400 m. La distancia entre estaciones y fuentes se ajusta a 40 m. y 80 m. respectivamente. El número de líneas del *patch* pasa de 14 a 12 para no exceder el *offset* máximo y con ello el número de canales se reduce a 1440. Esta opción puede resultar más económica dado que el kilometraje

de línea se reduce de 5.6 a 5.0, que en este caso equivale a unos 180 km de ahorro en topografía. La densidad de trazas se reduce de 53 mil a 43 mil para *offsets* hasta 3.000 m, pero se sigue manteniendo dentro del rango deseado. Una segunda posibilidad podría contemplar una mejoría en el muestreo espacial, llevando la separación entre estaciones a 36 m y la de disparos a 72 m, para una celda en el subsuelo de 18 m. x 36 m; El box se reduce a 360 m x 396 m y el número de canales se incrementa ligeramente.

Una opción más agresiva, teniendo en cuenta que la densificación de receptoras no resulta tan costosa como la de fuentes, es duplicar el número de líneas en el *patch* reduciendo su separación a la mitad para no afectar el *offset*. Ello, por supuesto, duplicaría la cantidad de topografía y pago de afectaciones por líneas de receptores pero duplicaría la densidad de trazas. Un balance que puede ser interesante analizar.

La Tabla 5 presenta un resumen comparativo de las 4 opciones. Adicionalmente, se pueden construir curvas de densidad acumulada de trazas con respecto al *offset* como las de la Figura 50. En ellas se puede apreciar la contribución de diferentes rangos de *offset* a la densidad total. La gráfica es especialmente útil para verificar los requisitos de cubrimiento mínimo en objetivos secundarios más someros que el objetivo principal.

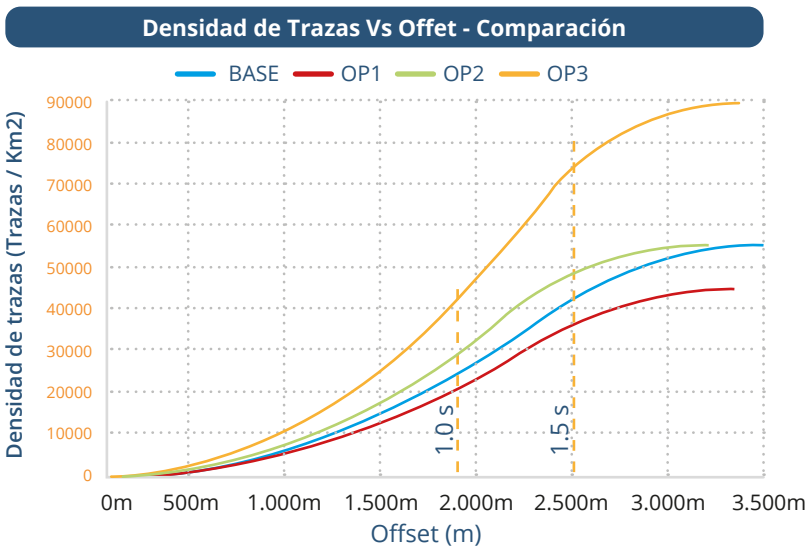


Figura 50. Comparación de densidad de trazas para los cuatro diseños calculados. Este tipo de gráfico aporta mucha información pues permite considerar la variable de *offset*. Se observa que a partir de 2750 m. de *offset* los cuatro diseños sobrepasan la densidad deseada de 40.000 Trazas/km². Sin embargo, la opción 2 aporta mayor densidad para todos los *offsets* y la opción 3 duplica la densidad para todos los *offsets* constituyéndose en una posibilidad atractiva si el costo resultare accesible.

Parámetro	BASE	OP1	OP2	OP3	Unidad
Intervalo de grupo	42	40	36	40	m
Intervalo de disparos	84	80	72	80	m
Número de canales por línea	126	120	132	120	
Número de canales	1764	1440	1584	2880	
Número de líneas por <i>patch</i>	14	12	12	24	
Distancia líneas de disparo	378	400	396	400	m
Distancia entre líneas de receptores	336	400	360	200	m
Offset máximo crossline	2310	2360	2124	2360	m
Offset máximo inline	2625	2380	2358	2380	m
Offset máximo total	3497	3352	3174	3352	m
Máximo offset mínimo	461	523	497	402	m
Fold inline	7,0	6,0	6,0	6	
Fold crossline	7,0	6,0	6,0	12	
Fold total	49	36	36	72	
Roll on inline	1134	1000	990	1000	m
Roll on crossline	1008	1000	900	1100	m
Densidad de disparos	31	31	35	31	Disp/Km ²
Densidad de receptores	71	63	77	125	Grupos/Km ²
Trocha receptores	3,0	2,5	2,8	5,0	Km/Km ²
Trocha disparos	2,6	2,5	2,5	2,5	Km/Km ²
Densidad de trazas	55556	45000	55556	90000	Tr/Km ²

Tabla 5. Comparaciones de opciones alternas de diseño.

Finalmente, con ayuda de software especializado hacemos la comparación de los diseños OP1, OP2 y OP3, desde el punto de vista areal para evaluar aspectos como el *footprint* y la distribución de propiedades importantes (ver figura 51).

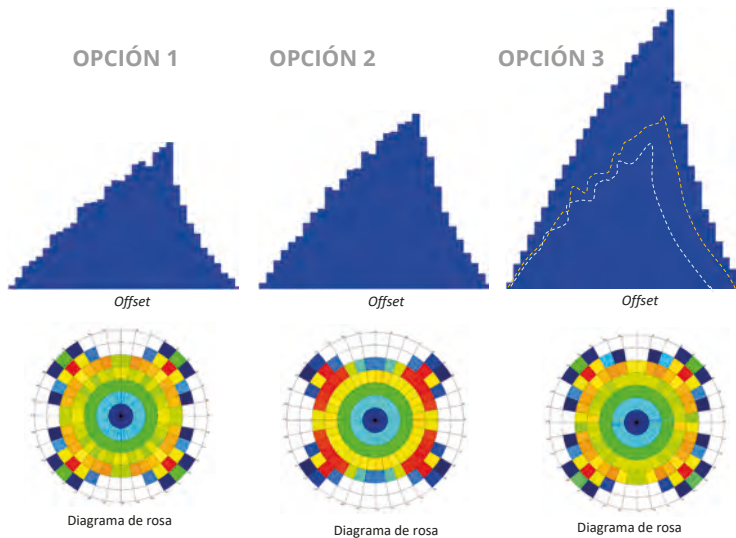


Figura 51. Comparación de los histogramas de offsets y diagramas de rosa que ayudan a evaluar las diferencias entre los diseños.

2.5 NUEVAS TENDENCIAS EN ADQUISICIÓN TERRESTRE

El desarrollo acelerado de tecnologías, cada vez más eficientes tanto para fuentes como para receptores, ha llevado a que el mercado ofrezca un rango enorme de oportunidades para atender todos los retos de la adquisición sísmica (figura 52). En especial, los equipos de registro basados en nodos autónomos han experimentado un crecimiento exponencial que podría considerarse revolucionario. En la figura 52, podemos ver algunos de los avances más significativos.

2.5.1 Sistemas sin cable

La evolución de los sistemas de adquisición de datos muestra una transición desde arquitecturas centralizadas hacia arquitecturas totalmente descentralizadas, en las que la mayoría de las funciones de registro ocurren en la propia estación receptora. Ello se ha traducido en una reducción progresiva en la cantidad y peso del equipo asociado a la labor de registro y a la vez en una disminución del nivel de control que el observador ejerce sobre los datos al momento de su adquisición. A medida que se reduce el costo de las unidades receptoras se tienden a reducir también las distancias entre estaciones y se piensa menos en la necesidad de utilizar arreglos de geófonos orientados a cancelar ruido coherente e incoherente.

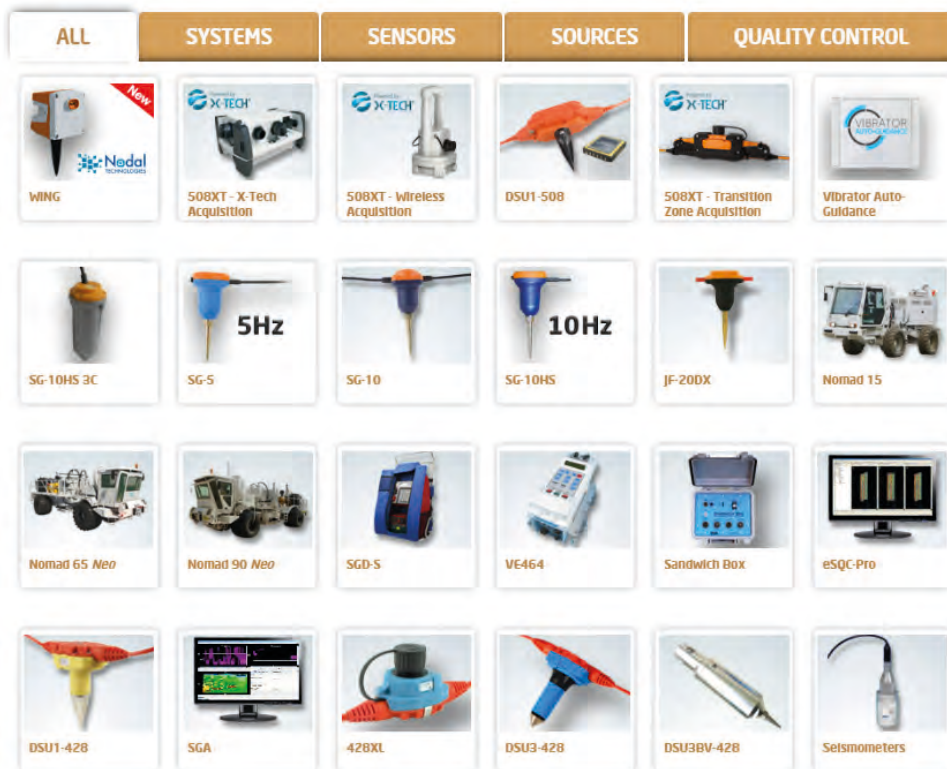


Figura 52. La oferta de tecnología de adquisición sísmica se ha enriquecido enormemente en las últimas décadas como deja evidenciar esta imagen del portafolio de la firma SERCEL.

Algunas de las ventajas de los sistemas sin cable son las siguientes (Kendall & Naghizadeh, 2015):

- ✓ Mayor flexibilidad para acomodarse a terrenos difíciles como cruces de vías, ríos, zonas sin permiso, zonas ambientalmente sensibles o congestionadas.
- ✓ Mayor productividad al reducirse el tiempo de reparación de cables.
- ✓ Menor tiempo y recursos para transporte.
- ✓ Menos mantenimiento.
- ✓ Intervalos entre estaciones independientes de la longitud de los cables.
- ✓ Reducción de riesgos de seguridad y salud en el trabajo por desplazamiento en línea.
- ✓ Escalabilidad.
- ✓ Menor tamaño y menor peso.
- ✓ Potencial de grabar tendidos múltiples y datos de *offset* extra largo.
- ✓ Posibilidad de realizar monitoreo pasivo.

Kendall & Naghizadeh (<https://csegrecorder.com/articles/view/cableless-seismic-acquisition>) ofrecen una relación y breve análisis de los equipos sin cable disponibles para 2015 (Kendall & Naghizadeh, 2015).

En Colombia, los equipos sin cable han venido ganando aceptación por sus ventajas en los aspectos logísticos. El uso del geófono único por estación continúa siendo un tema en discusión, pues los intervalos típicos entre estaciones receptoras aún son relativamente grandes (entre 30 y 60 metros) y los arreglos de 6 geófonos tienden a producir datos ligeramente más limpios. En oposición, los receptores puntuales están menos afectados por las irregularidades del terreno y pueden reportar datos de mayor contenido de frecuencias en áreas con buena respuesta sísmica. En ocasiones, el tema del ruido se pretende compensar con la adición de trazas procurando aumentar la redundancia lo cual puede resultar efectivo en la medida en que el *offset* de las trazas añadidas esté dentro del rango útil.

Los equipos sin cable presentan innegables ventajas para el manejo de situaciones complejas donde resulta imposible el uso de cables. En 2011, HOCOL adquirió un programa sísmico 3D en cuyo centro se encuentra la población de Sabanalarga, Atlántico. Esta fue la primera ocasión en que se utilizó el equipo SERCEL Unite en Colombia, en combinación con un sistema convencional de cable 428XL (Lansley M., 2012). Las estaciones recuperadas dentro del área urbana permitieron mitigar el impacto de la zona sin información y a la postre resultaron muy importantes para la construcción de la imagen final del objetivo exploratorio.

Ecopetrol y Talisman adquirieron, en 2014, un levantamiento de 214 km² para el cual se utilizó un *patch* de 8000 canales, número bastante alto para el estándar local del momento (Alfonso, 2015). Usando el equipo Autoseis (ver figura 53), los 4780 disparos del programa fueron registrados en un tiempo récord de 14 días aportando información de altísima calidad comparada con la información 2D existente. El autor reporta ventajas en todos los aspectos logísticos y en el desempeño de HSE.

La adquisición sísmica en zonas de piedemonte ha sido un reto recurrente por la dificultad logística, que encierra la movilización de grandes cantidades de equipos en zonas de topografía extremadamente abrupta, donde se requiere el uso de helicóptero. Los equipos sin cable son una opción valiosa en este tipo de escenarios, pues simplifican la operación y reducen los riesgos de seguridad industrial tal como lo reportan Muñoz et al., 2015. En estos levantamientos se multiplicó, por 4 o por 5, el número de canales y se redujo notablemente el tamaño de

la celda de manera costo efectiva. La Figura 54 muestra la comparación entre los parámetros de adquisición convencionales y aquellos implementados para los dos levantamientos nuevos basados en registro sin cable y en un esfuerzo adicional en cantidad de fuentes. En los dos casos se utilizó el geófono único tipo GS-One en vez del arreglo tradicional de 6 geófonos SM-24.

Figura 53. Ejemplo de una estación autónoma de grabación del sistema Autoseis, como las utilizadas en Colombia en 2014 según reporta Alfonso (2015).



Figura 54. El uso de equipos sin cable en zonas complejas de piedemonte permitió alcanzar densidades y desempeños operativos sin precedentes. (Muñoz, 2015)

	HUACAYA CONVENCIONAL	HUACAYA 3D BOLIVIA	SAGARI 3D - PERU
Grabación			
Sistema	Sercel 408XL	Geospace Nodal GSX	Geospace Nodal GSX
Rata de muestreo/Medio	2 ms / Transporte de cinta	2 ms / Disco duro	2 ms / Disco duro
Cantidad de ristas o nodos disponibles	5300	27000	19000
Recepción			
Patch nominal de registro	Full patch 16 líneas y 4995 canales	16 líneas x 800 can	24 líneas x 276 can
Distancia entre líneas m/receptores m	Variable entre 600 y 1000 m/62 m	600 / 20	360 / 15
Fold nominal	Promedio 200	387	144
Densidad de trazas (Tr/km ²)	Promedio 120000	1032000	425000
Bin natural m	30x 60	10 x 37.5	7.5 x 45
Geófono/elementos/resist Ω / Sensit V/in/s	SM 24/6/1000 /1.5	GS One/1/1800/2.18	GS One/1/1800/2.18
Fuente			
Distancia entre líneas m/fuentes m	Variable entre 500 y 1800/120	600 / 75	360 / 90
Huecos por pozo/Prof. m/Carga Kg	1/15/15	1/15/15	1/15/3

2.5.2 Vibrado simultáneo

El esquema tradicional cuando se trabaja con fuente vibratoria consistía en ubicarse en el punto de vibrado, para generar el barrido especificado y esperar el tiempo de escucha antes de proceder con el desplazamiento al siguiente punto de fuente. Dentro de este tiempo de vibrado y escucha no podía ocurrir desplazamiento de otros vibradores cercanos, y mucho menos realización de nuevas vibraciones, pues ello contaminaría el registro activo. La idea del vibrado simultáneo fue puesta en práctica desde 1987 (Deluchi, Marschall, & Werner, 1987) pero solo con los años comenzó a materializarse como uno de los escalones tecnológicos más notables en la historia reciente de la industria sísmica.

El concepto que marcó un cambio profundo en la implementación de esta idea es el llamado Vibrado Simultáneo Independiente (*Independent Simultaneous Sweeping - ISS*), mediante el cual varios vibros podrían accionarse simultáneamente sin necesidad de esperar para evitar la interferencia (Howe, Foster, Allen, Taylor, & Jack, 2008). Este avance permitió multiplicar la productividad de los vibradores y elevar la densidad de fuentes a niveles antes inalcanzables por su costo.

Hoy en día, es práctica común la utilización de flotas completas de vibradores que se desplazan por el proyecto, vibrando de acuerdo con su programación individual sin consideración a lo que ocurra con sus vecinos. Los registros, que lógicamente exhiben un nivel de contaminación por las fuentes vecinas, pueden ser limpiados mediante algoritmos de procesamiento que realizan la separación o "*deblending*" como se observa en la figura 55.

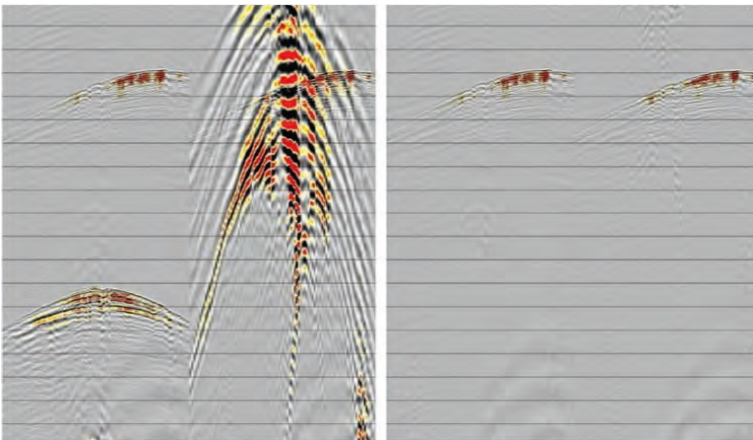


Figura 55. A la izquierda un registro con contaminación de dos fuentes ajenas a diferentes tiempos. A la derecha el registro después del proceso de "*deblending*" donde se ha removido casi completamente la interferencia. (Crook, 2018)

La implementación del concepto de Compressive Sensing a la adquisición de información sísmica terrestre en Colombia requiere una dinámica interesante, que es la integración de las tareas de diseño, planeación, ejecución y procesamiento.

La geografía colombiana hace que se vea lejana la implementación de esta tecnología a gran escala pues, son escasos los escenarios en los que pueda pensarse en el uso de un gran número de camiones vibradores. Sin embargo, en las áreas en las que sea logísticamente factible conviene progresar en su utilización, dado que permitiría obtener datos de enorme densidad en tiempo reducido. Es importante contar con las capacidades en procesamiento sísmico para garantizar la separación adecuada de los datos.

2.5.3 Compressive sensing

La técnica del *Compressive Sensing* (CS) apunta a la posibilidad de reconstruir un campo de onda, a partir de una cantidad de muestras mucho menor que aquella que se requeriría si se aplica un muestreo regular respetando el teorema de Shannon. En sísmica esto se traduciría en la posibilidad de reducir significativamente el esfuerzo en campo sin sacrificar la resolución lo cual constituye una propuesta sin duda atractiva. La figura 56 ilustra el concepto básico con base en una onda compuesta por dos sinusoides de 10 y 40 Hz, cuyo muestreo requeriría al menos 80 muestras por segundo (2 muestras por ciclo). La reconstrucción, a partir de un muestreo regular, con 20 muestras por segundo, falla por completo como puede verse en el dominio de la frecuencia en el que aparecen frecuencias alias, que se confunden con las componentes de 10 Hz y 40 Hz. En contraste, la reconstrucción mediante un muestreo irregular de solo 26 muestras por segundo permite conservar la preponderancia de las componentes de 10 Hz y 40 Hz sobre un fondo de ruido claramente identificable. El traslado de este concepto a la adquisición sísmica está rodeado de grandes retos que han venido siendo abordados y resueltos progresivamente en los últimos años. La figura 57 muestra la diferencia entre una geometría regular convencional y una que ha sido modificada para permitir un muestreo menor para luego reconstruir los datos sin perder información.

Un ejemplo reciente, que aborda la mayoría de los conceptos mencionados, es el levantamiento Aklag 3D en Alaska (Millis, 2017), en el cual se adquirieron más de 1 millón de puntos de vibrado, en 83 días, con una densidad de trazas por kilómetro cuadrado de más de 33 millones. El diseño del programa contempló la optimización de la geometría para facilitar la reconstrucción posterior de la imagen, con una densidad como si se hubiese adquirido con una celda natural cuatro veces más pequeña y sin aumentar el costo. El caso ejemplifica la combinación de nuevas tecnologías con las consideraciones logísticas propias de un área particular como Alaska, donde se cuenta con una ventana corta de operación y el uso de vibradores se facilita.

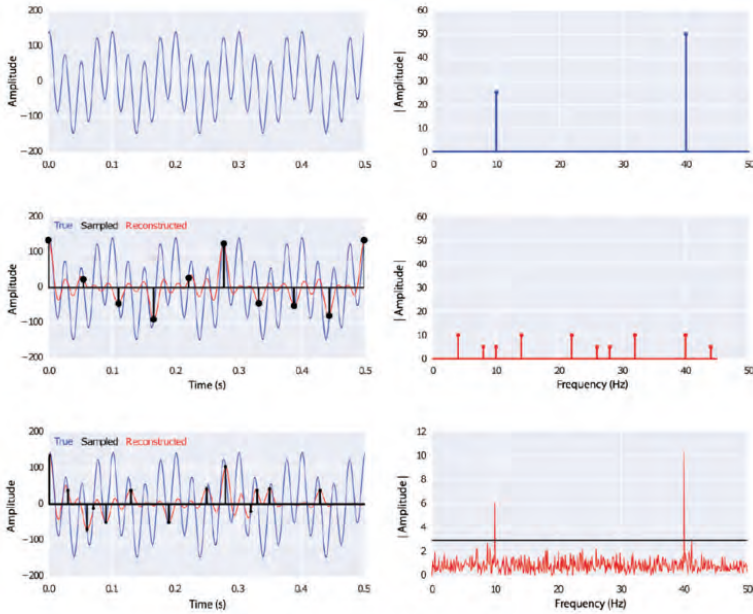


Figura 56. Ilustración del concepto de *cs* que apunta a permitir la reconstrucción de un set de datos a partir de un cierto submuestreo irregular (Ben Bougher Tle, 2015). Ver explicación en el texto principal.

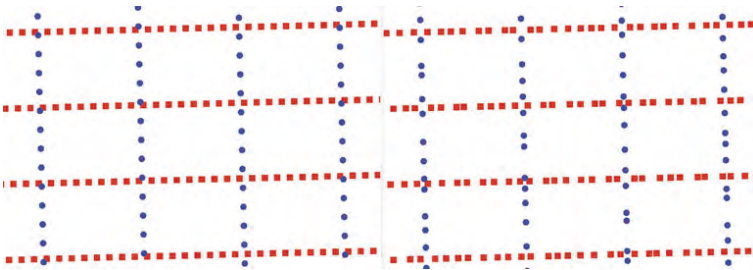


Figura 57. A la izquierda geometría regular convencional. A la derecha reubicación de fuentes y receptores usando algoritmos de proyección que van más allá de una simple randomización y que permitirán la reconstrucción del campo de onda sin pérdida de información. (Crook, 2018)

Este tipo de aproximaciones podrían ser decisivas en Colombia, donde el costo de las fuentes es una enorme limitante. Hay un incentivo claro para estudiar la implementación de geometrías intensivas en receptores y optimizadas en fuentes, con la posibilidad de reconstruir el campo de onda, con celdas mucho más pequeñas que las que se usan tradicionalmente y con el potencial adicional de generar imágenes de mejor calidad gracias a la capacidad de filtrar exitosamente el ruido coherente.

Un segundo ejemplo, que vale la pena mencionar, es un levantamiento sísmico en Omán cuya densidad permite realizar simulaciones mediante decimaciones, orientadas a evaluar la

efectividad del CS ante la reducción de los datos a una cuarta parte de su volumen original. Jiang (2019). El resultado es alentador, pues evidencia un producto bastante similar al volumen completo especialmente en la sección intermedia y profunda (ver figura 58).

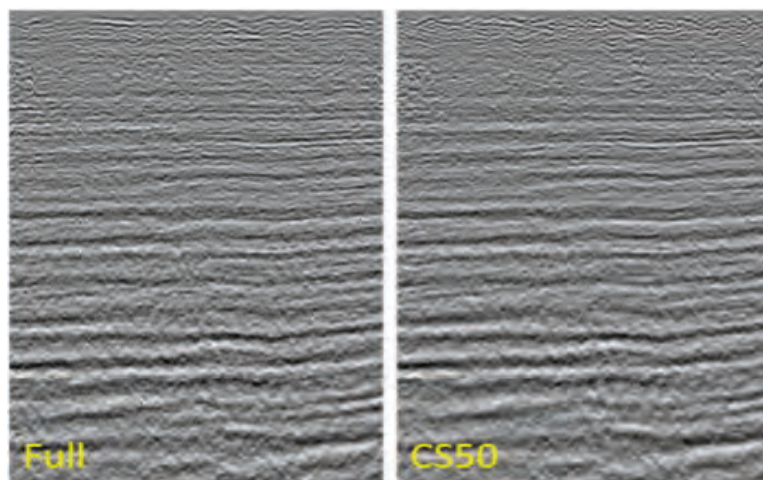


Figura 58. Aplicación de compressive sensing en un volumen de altísima densidad cuya cantidad de trazas ha sido reducida por un factor de 4 y ha sido reconstruido a la densidad original. El panel izquierdo (full) muestra el volúmen original y el de la derecha el producto reconstruido (cs50). Jiang(2019)

En Colombia, Ecopetrol, a través del Instituto Colombiano del Petróleo y la Universidad Industrial de Santander, ha venido adelantando la investigación aplicada en varias áreas de conocimiento, que son claves para la industria de hidrocarburos. Este trabajo se ha desarrollado bajo el esquema de Acuerdos de Cooperación que han materializado la necesaria interacción entre academia e industria. Uno de los temas que exhibe un avance esperanzador, tras cinco años de trabajo, es precisamente el relacionado con la implementación de los conceptos de *compressive sensing* a la adquisición de datos 3D en Colombia, buscando reducir los costos y la huella ambiental de las operaciones sísmicas al tiempo que se mejora la calidad de los datos finales (Villareal, 2019).

La implementación del concepto de CS a la adquisición de sísmica terrestre en Colombia requiere una dinámica interesante, que es la integración de las tareas de diseño, planeación, ejecución y procesamiento, con el fin de proponer una geometría sub muestreada en alguna medida, analizarla a la luz de la realidad del área con ayuda de cartografía digital de última generación, contratarla y llevarla a la práctica de manera eficiente para finalmente reconstruir el campo de onda mediante técnicas avanzadas de procesamiento según lo planeado en la concepción inicial del proyecto. Se requiere entonces, avanzar en temas de

transferencia de tecnología, a todo nivel, para finalmente generar cambios significativos en la manera en que adquirimos datos 3D en el país. Cabe hacer un llamado a mantener una visión, crítica y realista, frente a la promesa de reducción de costos que esta técnica, que involucra un muestreo menor al teóricamente requerido, pueda ofrecer en los escenarios de Colombia, muy diferentes a aquellos en los que ha venido desarrollándose a nivel mundial como Alaska y el Medio Oriente.

2.5.4 Levantamientos con alta densidad de receptores

De la misma manera que en ciertas áreas geográficas es factible densificar significativamente las fuentes de energía mediante el uso eficiente de flotas de camiones vibradores operando simultáneamente, en ambientes de topografía compleja puede resultar interesante diseñar geometrías intensivas en receptores y con menos esfuerzo en fuentes explosivas que normalmente requieren la perforación de huecos de varios metros de profundidad. Ello puede conllevar reducciones importantes en costos de operación e impacto ambiental sin que necesariamente se produzca deterioro en la calidad de la información.

Un ejemplo sencillo y completamente teórico ilustra cómo una geometría ortogonal convencional puede resultar equivalente en términos de muestreo a otra en la que la reducción de fuentes es compensada por más receptores.

La figura 58A ilustra cómo una reducción de 5:1 en fuentes se compensa con un aumento de 1:5 en receptores sin que altere la densidad de muestreo ni la distribución de *offsets* ni azimuts. Una ventaja de este tipo de diseños -también denominados "carpetas"- es que proporcionan un muestreo superficial denso y multidireccional en superficie lo cual facilita el registro y remoción de ruidos superficiales de relativa baja longitud de onda.

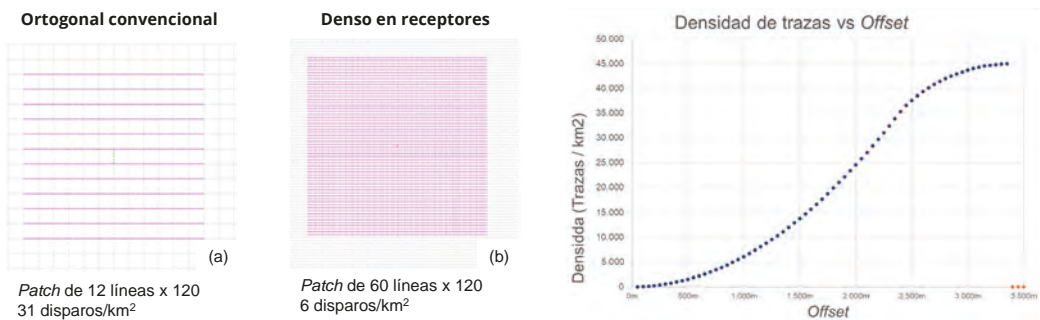


Figura 58A. Dos geometrías cuya densidad de trazas y cubrimiento en el subsuelo son equivalentes pero en las que una densificación de estaciones receptoras procura reducir en la misma magnitud la cantidad de fuentes. Esta aproximación puede ser interesante en levantamientos de baja área con objetivos someros donde se facilita la logística para manejar eficientemente decenas de miles de unidades nodales. La geometría (a) posee líneas de fuentes y receptoras cada 400 m, estaciones receptoras cada 40 m y fuentes cada 80 m, mientras que la geometría (b) presenta receptoras en una malla de 40 m x 80 m y fuentes en una malla de 400 m x 400m.

Es claro que la viabilidad de la aplicación de esta geometría depende de la posibilidad de implementar una logística eficiente para el manejo de un alto número de unidades receptoras siendo los levantamientos pequeños y de objetivo somero los mejores candidatos para ello.

2.6 ADQUISICIÓN DE INFORMACIÓN EXPERIMENTAL

Se ha visto que la calidad final de la información sísmica adquirida depende de la combinación entre los parámetros de adquisición y la respuesta sísmica local. En otras palabras, una misma geometría de adquisición aplicada a áreas diferentes arrojará resultados diferentes no siempre satisfactorios. Por esta razón, se hace muy importante conocer detalles de dicha respuesta y los retos particulares que ella puede implicar para alcanzar la calidad deseada haciendo uso eficiente de los recursos.

En ausencia de información existente, el diseñador enfrenta el reto de tomar decisiones sobre los parámetros de adquisición sin conocer su real impacto sobre la calidad, más allá de lo que dictan los conceptos generales del método de reflexión. En este sentido, es valioso adquirir datos experimentales cada vez que existe la oportunidad de hacerlo.

Si bien en el pasado era común realizar pruebas experimentales al inicio de un proyecto sísmico con el fin de definir parámetros como la cantidad de carga y la profundidad de las fuentes, esto es cada vez menos factible, entre otras razones, porque la cantidad exacta de explosivo a utilizar debe ordenarse con meses de anticipación. De igual manera, una logística eficiente implica que, para el momento del inicio de la operación de registro la perforación podría fácilmente acumular un 50% de avance, lo cual deja poca flexibilidad para realizar cambios significativos sobre la marcha. Estas consideraciones operacionales deben discutirse detalladamente, entre operador y contratista, a fin de acordar un programa de pruebas que sea realizable y relevante para el conocimiento del área. Está claro que los resultados podrían no ser aplicables al programa sísmico en el que se adquieren, pero sin duda serán de gran importancia en el diseño de nuevos levantamientos en la misma área o en una similar.

Uno de los ejercicios interesantes en cualquier área consiste en adquirir uno o más perfiles de información sísmica usando un intervalo entre receptores muy corto que garantice la ausencia de aliasing en el muestreo espacial del campo completo de onda (ver Figura 59). Con este ejercicio, es posible obtener las características de frecuencia, velocidad y longitud de onda

de varios tipos de modos de propagación y su criticidad. Puede analizarse también, la direccionalidad de los ruidos coherentes y simular arreglos digitales para su remoción. En la medida en que las condiciones lo permitan puede ser interesante adquirir ciertas geometrías tridimensionales densas con el objeto de analizar la relación entre la densidad y la eficiencia de la remoción de ruido mediante algoritmos de procesamiento.

Algunas recomendaciones generales a tener en cuenta en el análisis de las pruebas experimentales son las siguientes:

- ✓ Analizar los datos manteniendo el foco en la zona objetivo.
- ✓ Además de observar datos crudos, generar datos con algún nivel de procesamiento básico como deconvolución, ganancia y filtrado pasa banda.
- ✓ Definir previamente lo que espera observar en la prueba. ¿Son los resultados lógicos y coherentes?
- ✓ Guardar la información separada del set de datos de producción y rotularla de manera que pueda ser encontrada y utilizada en el futuro.

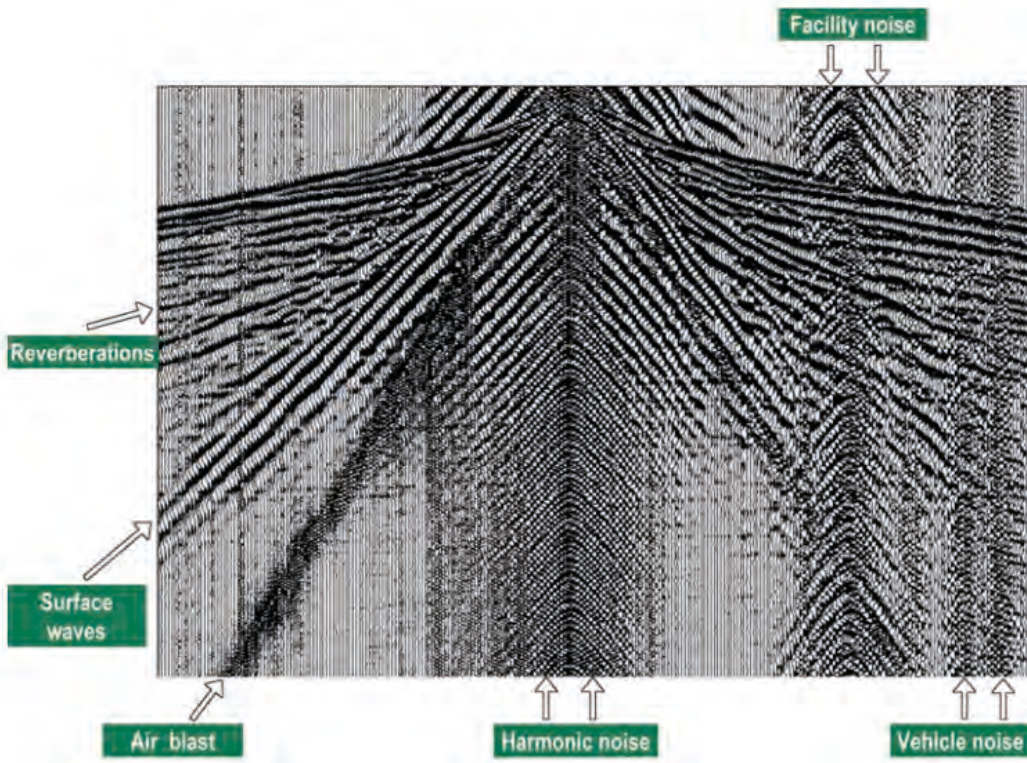


Figura 59. Ejemplo de un registro de disparo en el que se observan diversos patrones de ruido coherente y no coherente. El ruido coherente puede resultar extremadamente perjudicial y generalmente requiere un muestreo fino (costoso) para garantizar su remoción. Dragoset, 2005.

Pruebas a nivel de apilado.

En zonas en que las condiciones cambian lateralmente, las observaciones en un determinado lugar de prueba pueden no ser representativas de toda el área. Adicionalmente, ocurre que los resultados observados en un set de datos de 1 *fold* difieren significativamente de aquellos que gozan del beneficio del apilado. Por ello, en muchas circunstancias, se diseñan pruebas que permitan adquirir sets de datos con extensión lateral para comparar el efecto de una cierta variable de interés. Una configuración típica de este tipo de prueba se ilustra en la Figura 60.



Figura 60. Ejemplo de un esquema para evaluar tres patrones de fuente diferentes con base en tres secciones sísmicas de igual longitud. 240 Estaciones de receptoras separadas 20 m entre sí permiten analizar 3 apilados de 4.8 Km de largo con un *fold* máximo de 80.

Esta configuración es ideal para comparar parámetros de perforación como carga y profundidad, pues permite generar al menos 3 secciones sísmicas apiladas adquiridas donde la única diferencia es la variable de análisis.

Pruebas de carga y profundidad

En teoría, para duplicar la amplitud se requiere triplicar la carga. Por esta razón, las pruebas de carga deben considerar un amplio rango de valores para que la diferencia sea apreciable y el punto óptimo sea claramente identificable. En términos generales, las cargas de prueba deberían cambiar en escalones del doble, entre una y otra, por ejemplo 450, 900, 1800 y 3600, en las que 900 y 1800 son los valores más probables esperados.

La profundidad de la carga es un parámetro de gran importancia dada su influencia en el costo del proyecto y en la calidad de la señal. En general, entre mayor es la profundidad más competente es el terreno y se produce una señal con menos ruido y mayor contenido de frecuencias. Sin embargo, a partir de cierto punto, la calidad no aumentará lo suficiente para justificar el costo extra. En términos generales, una prueba de profundidad de pozo buscará entender la variación de la relación señal a ruido a medida que se profundiza la carga para determinar la profundidad mínima que no compromete las características deseadas de la información a nivel del objetivo exploratorio.

A continuación, se ilustran los conceptos anteriores con un ejemplo real de un sector del Valle Inferior del Magdalena en Colombia. La prueba consistió en la adquisición de 152 disparos en 300 estaciones receptoras, en las cuales se alternaron tres patrones de fuente a saber: 10 m. con 900 gramos, 10 m. con 450 g y 450 g con 5 m.

La alternancia permite generar tres apilados con igual cubrimiento en el subsuelo con lo cual se analizan las diferencias a nivel de disparo y a nivel de apilado.

La figura 61 ilustra la secuencia de comparación entre las cargas de 900 g y 450 g, mientras se mantiene fija la profundidad en 10 m. Como se podría esperar, el disparo de mayor carga exhibe consistentemente mayores amplitudes lo cual mejora la relación entre señal y ruido incoherente. Los disparos procesados no evidencian diferencias significativas en el contenido de frecuencias. La mayor carga permite observar mejor algunos reflectores tenues por debajo de 2 segundos y en términos generales se observa menor preponderancia del ruido no coherente en la carga mayor. A nivel de apilado las diferencias son prácticamente imperceptibles. El apilamiento ha reducido el ruido aleatorio y sugiere que la diferencia entre los dos tamaños de carga es despreciable para esta profundidad de pozo.

La figura 62 muestra una secuencia similar, en la que ahora se mantiene la carga fija en 450 g y se compara el impacto de un cambio en la profundidad de pozo entre 5 m (izquierda) y 10 m (derecha). En este caso, la diferencia es más notable que en el caso anterior: la mayor profundidad se evidencia por la menor amplitud del *ground roll* y mayores amplitudes de las reflexiones que compiten bien en presencia del ruido cultural. A simple vista, se observa diferencia en el contenido de frecuencia, especialmente para *offsets* largos, lo cual se confirma claramente en el apilado. En este caso, los 5 m extras de profundidad son fundamentales para garantizar la calidad de la información. En este ejemplo, estamos en presencia de datos de calidad excepcional. En zonas de alta complejidad geológica la respuesta sísmica es pobre y se dificulta la obtención de imágenes confiables. En estos escenarios, generalmente, la topografía es abrupta, la perforación representa una parte muy importante del costo del proyecto y la escogencia del patrón de fuente adecuado es un factor crítico de éxito.

La figura 63 muestra tres disparos sucesivos en zona del piedemonte de Casanare, Colombia en los que no se observa ninguna reflexión coherente aún con profundidades de pozos entre 14 y 17 metros. Claramente, el factor clave no es el tamaño de la carga y estamos en presencia de un problema de dispersión de energía (*scattering*) muy difícil de resolver. El entendimiento de estos patrones de dispersión requiere de un muestreo espacial fino preferiblemente 3D (Stork 2017).

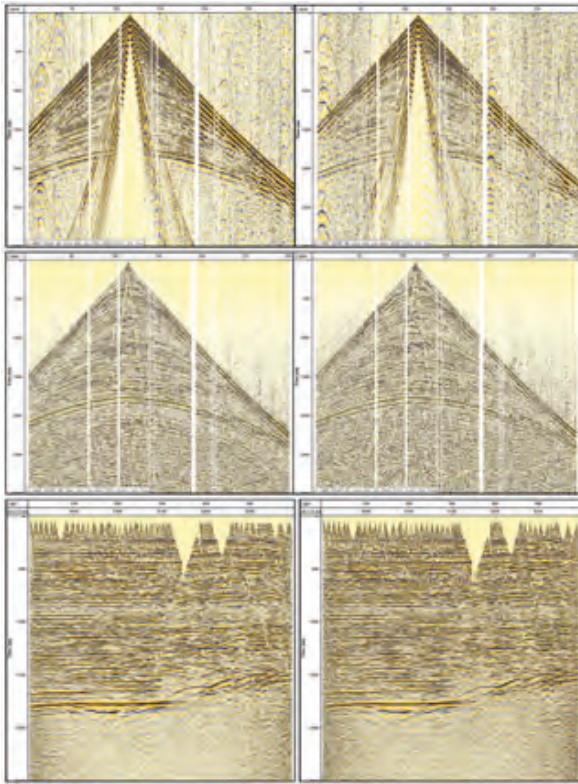


Figura 61. Comparación entre disparos con carga de 900 g (izquierda) y 450 g (derecha) mientras se mantiene fija la profundidad del pozo en 10 m.

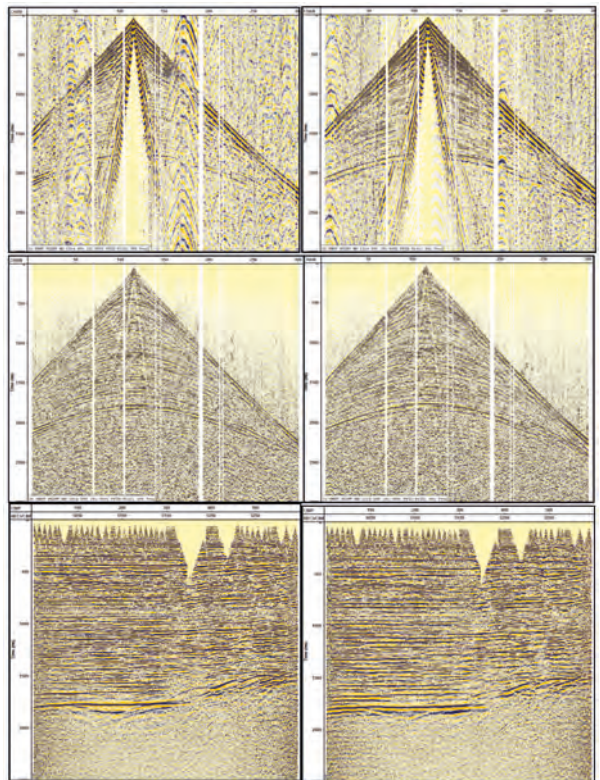


Figura 62. Comparación entre profundidades de 5 m (izquierda) y 10 m (derecha) mientras se mantiene fija la carga en 450 g. Fuente: archivo personal del autor.

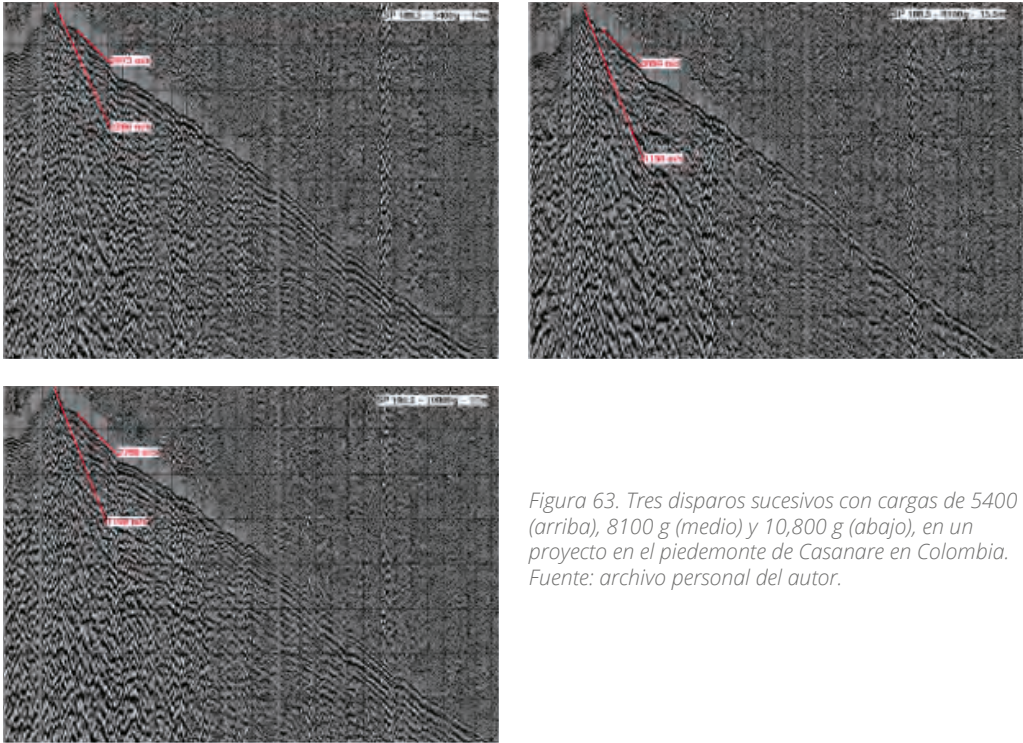


Figura 63. Tres disparos sucesivos con cargas de 5400 (arriba), 8100 g (medio) y 10,800 g (abajo), en un proyecto en el piedemonte de Casanare en Colombia. Fuente: archivo personal del autor.

Pruebas de ruido aleatorio

El advenimiento de los nodos autónomos ha supuesto un cambio importante en la manera de abordar el control de ruido ambiental en ausencia de acceso a los datos en tiempo real. En estas circunstancias, el nivel de ruido ambiental es una discusión frecuente entre cliente y contratista, pues suelen establecerse umbrales mínimos que en ocasiones pueden resultar innecesariamente restrictivos o peligrosamente laxos. Previendo este tipo de situaciones, el análisis previo basado en información existente puede arrojar luces para establecer especificaciones ajustadas a la realidad.

En el caso que se ilustra a continuación, se añadieron diferentes cantidades de ruido aleatorio a los registros en una línea sísmica existente en una zona compleja del Valle Inferior del Magdalena, en Colombia, y se evaluó su impacto a nivel de apilado. La figura 64 ilustra el caso de la adición de un fondo de ruido con una amplitud media de $40\mu\text{V}^2$, a todos los registros de la línea. La secuencia de proceso incluye la aplicación de reducción de ruido aleatorio. Se aprecia claramente un deterioro inadmisibles de la imagen en la zona de interés que demuestra que para este caso particular el control de ruido aleatorio resulta decisivo en la calidad final. Este tipo de análisis también

2. Se suele especificar un nivel permisible de ruido medido en microvoltios sin embargo este límite debería definirse para cada proyecto en términos de la relación S/R.

puede contribuir a la definición del *fold* mínimo requerido para un nuevo diseño con el fin de garantizar el logro de una relación S/R aceptable.

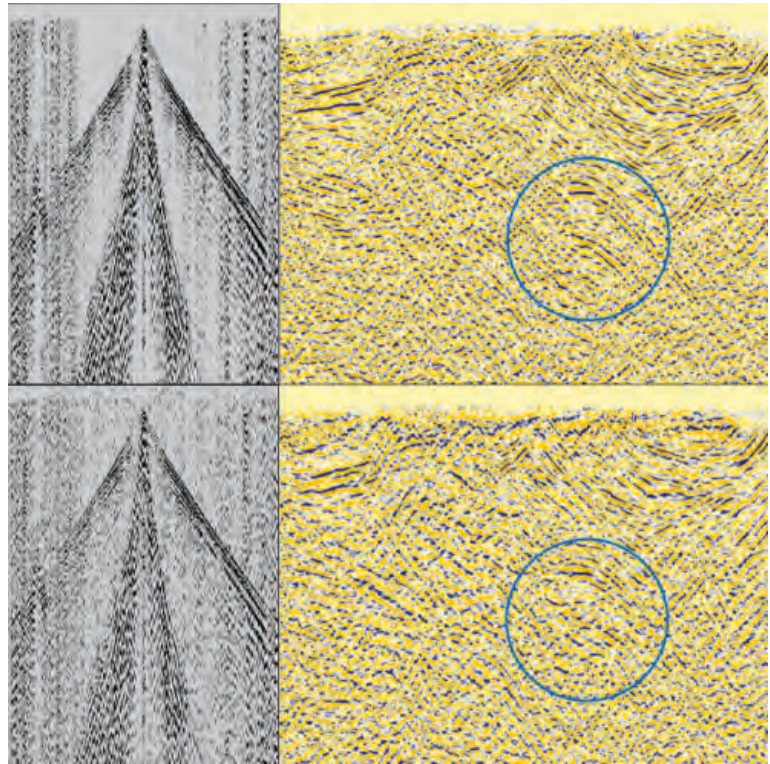


Figura 64. Prueba de adición de ruido aleatorio en una línea 2d para evaluar el impacto sobre el apilado original (arriba). En este caso, se añadió un ruido aleatorio con una media de 40 uv.
2. (Abajo) a todos los disparos de la línea y se procesó usando la misma secuencia incluyendo reducción de ruido aleatorio. En círculo el área de interés. El tiempo máximo es de 2.5 s. Fuente: archivo personal del autor.

Pruebas de muestreo espacial

La realización de pruebas de procesamiento, usando datos previamente adquiridos, es otra manera de mejorar el entendimiento de la respuesta sísmica de un área. Cuando se dispone de levantamientos 3D, de buena densidad, se pueden realizar ejercicios de decimación para cuantificar el grado de deterioro de la información. Zheng, en su publicación *Maximizing the value of sparse 3D seismic data by prestack trace interpolation*, ilustra un caso de un levantamiento ortogonal convencional con líneas de disparo cada 300 m, líneas de receptores cada 180 m, con receptores y fuentes cada 60 m para una celda natural de 30 m x 30 m. Los datos se redujeron sucesivamente en pasos de 50% cada vez para generar sets de datos con $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$ y $\frac{1}{8}$ de la información original, realizando el procesamiento con y sin interpolación 5D (ver figura 65).

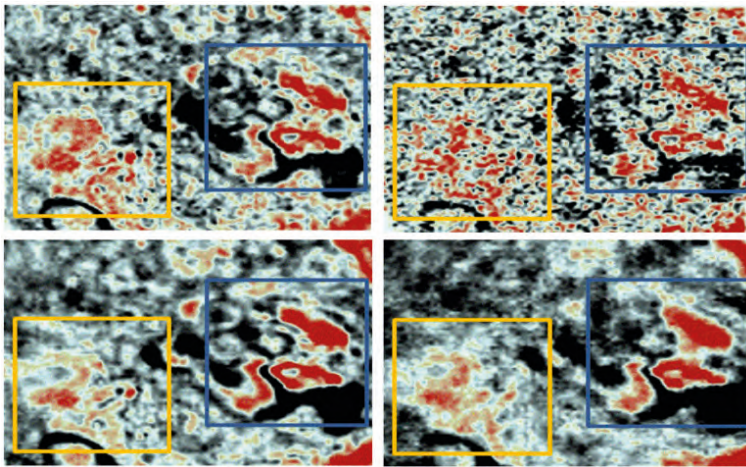


Figura 65. Time slice comparando la imagen del volumen completo (columna izquierda) con un set de datos reducido a 1/8 (columna derecha), sin interpolación 5D (fila superior) y con interpolación 5d (fila inferior). Dependiendo del objetivo exploratorio, el deterioro de la imagen puede resultar inadmisible a pesar del notable éxito de la interpolación. Fuente: Zheng, 2013.

El mismo set de datos se utilizó para evaluar el impacto del tamaño de la celda generando volúmenes con celda del doble (60x60) y la mitad (15x15) del tamaño natural (30x30). El resultado (ver figura 66) muestra que la celda de 15x15 aporta una ligerísima mejoría en resolución horizontal.

Como se ha reiterado a lo largo de este texto, estos resultados no son generalizables y dependen en gran medida de las características locales del proyecto y, también, de los parámetros de adquisición de los datos originales cuya geometría puede impactar el desempeño de las estrategias de interpolación.

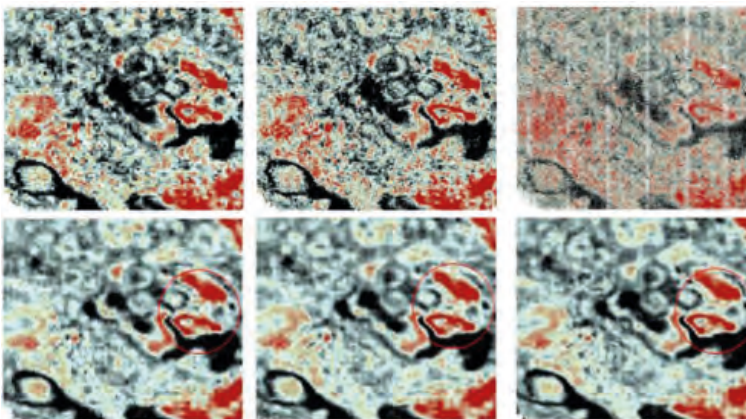


Figura 66. Arriba: time slice sin interpolación con binning de 60x60 (izquierda), natural 30x30(centro) y 15x15 (derecha). Abajo la misma secuencia con datos con interpolación 5D. Fuente: Zheng, 2013.

2.7 CONTROL DE CALIDAD

La función de control de calidad en una brigada sísmica se puede dividir en dos grandes áreas de acción:

Garantizar el cumplimiento de las especificaciones técnicas establecidas.

Caracterizar la información sísmica adquirida.

La primera es una tarea relativamente rutinaria, pero extremadamente intensa, dada la cantidad de variables que intervienen para hacer realidad la intención del diseñador. Aquí confluyen las situaciones de restricciones de superficie por razones ambientales, sociales y legales por solo nombrar algunas. El grupo de control de calidad es el puente entre la realidad de la superficie y la obtención de la información de subsuelo deseada. Por esta razón, es fundamental que los profesionales encargados de esta labor entiendan el impacto potencial de las situaciones que produzcan irregularidades en la geometría de diseño o amenacen con deteriorar la calidad final del levantamiento.

La segunda parte de la función de control de calidad ha venido perdiendo protagonismo, pues la primera es tan demandante y absorbente que, sencillamente, llena todo el tiempo de los profesionales responsables en el campo. No obstante, la caracterización de la información sísmica es una labor de una enorme importancia pues permite aportar información para construir “la curva azul” de la que se habla al principio del presente capítulo.

La caracterización de la información sísmica comprende, entre otras cosas, dar respuesta a las siguientes preguntas:

¿Se están validando las suposiciones del diseñador?

¿Hay situaciones que comprometan el logro del objetivo del levantamiento?

¿Cuáles son las características de frecuencia, amplitud y continuidad de las reflexiones del objetivo y de los ruidos predominantes?. ¿Varían lateralmente por efecto de las variaciones de la superficie?.

¿Se está logrando una distribución uniforme del cubrimiento en el subsuelo a nivel de los objetivos principales y secundarios?

¿Cuál es la distribución areal del espesor de la capa meteorizada (weathering) y la velocidad de propagación debajo de ella (subweathering), a partir de los primeros arribos?. ¿Guarda relación con la geología de superficie?


¿Cuál es la sensibilidad de los datos a parámetros claves como la profundidad de pozo, la cantidad de carga, offset máximo, etc?.

El cliente, en combinación con el equipo de control de calidad y con participación de los demás departamentos técnicos, tiene en sus manos la posibilidad de adquirir información experimental de alto valor a muy bajo costo y sin generar alteraciones significativas al plan de trabajo.

Para lograr fortalecer esta segunda faceta del rol del control de calidad se requiere:

- ✓ Personal técnico experimentado con liderazgo, autonomía y una robusta fundamentación en geofísica.
- ✓ Un cliente que entienda y valore la función, incluyéndose de manera explícita en los documentos de contratación y enunciando requisitos mínimos obligatorios.
- ✓ Una estructura y esquema de gobierno en el grupo sísmico que no subordine la función de control de calidad a la producción y que permita un diálogo equilibrado con las demás funciones operativas.
- ✓ La implementación de herramientas de tecnología (principalmente GIS) para realizar una gestión eficiente y moderna de la información permitiendo migrar de los documentos estáticos (pdf, excel, word) hacia las bases de datos cartográficas basadas en web.
- ✓ Una interventoría técnicamente robusta y propositiva.

La adquisición con equipos nodales plantea retos a los enfoques tradicionales de control de calidad durante la adquisición de datos sísmicos terrestres pues en la gran mayoría de los casos implica que el acceso a los datos adquiridos solo ocurre una vez estos han sido descargados de las unidades de grabación, es decir varios días o incluso semanas después de su registro. Ello limita la posibilidad de realizar ajustes en tiempo real durante la operación de registro buscando principalmente ejercer un control estricto sobre el ruido ambiental. A decir verdad, la dinámica de un proyecto de adquisición sísmica con fuente explosiva en Colombia deja muy poco espacio para realizar cambios sustanciales en los parámetros de adquisición a partir del



exámen de la información en tiempo real puesto que la gran mayoría de los puntos de disparo habrán sido perforados y cargados con mucha anticipación al momento de iniciar la operación de registro. La idea (otrora frecuente) de realizar pruebas experimentales extensas para determinar los parámetros de adquisición se hace cada vez menos viable por factores de costo-eficiencia. La buena noticia es que las geometrías con densidades cada vez mayores resultan efectivas en la cancelación del ruido aleatorio haciendo de este factor una preocupación cada vez menos recurrente. Todo lo anterior hace que sea muy importante el trabajo previo que se realiza para determinar los parámetros de adquisición de un programa sísmico para que el resultado obtenido se enmarque dentro de lo esperado. A ello contribuye el análisis riguroso de información 2D o 3D existente, pruebas experimentales anteriores, ejercicios de modelamiento y todo tipo de información relevante. En otras palabras, la función de control de calidad comienza desde la etapa de diseño y planeación del levantamiento. Durante la etapa de ejecución de los trabajos en el campo habrá que prestar especial atención a verificar la integridad de todos los elementos del sistema de registro, esto es, unidades de grabación, geófonos y otras piezas de software y hardware que conforman la cadena. El descubrimiento de un problema crítico en un sistema autónomo puede resultar catastrófico pues podría pasar inadvertido por varios días. Otro elemento de importancia capital en la función de control de calidad es el entrenamiento al personal de registro para asegurar la adecuada ubicación y programación de las unidades de grabación. En proyectos con varios miles de unidades autónomas en campo (a veces decenas de miles) la eficiencia y la confiabilidad de la operación son objetivos clave. Un tercer elemento que aporta al control de calidad cuando se trabaja con equipos autónomos consiste en recoger diariamente una cierta cantidad seleccionada de datos sobre los cuales examinar diferentes parámetros de calidad para verificar que los resultados se encuentran dentro de lo esperado. Checa (2017), presenta un ejemplo real de aplicación de esta estrategia de control de calidad en un programa sísmico adquirido con un sistema GSX de Geospace en el Valle Inferior del Magdalena en 2016.

Aspectos de entorno

3.1 PLANEACIÓN DE OPERACIONES Y REGULACIÓN APLICABLE

Un programa sísmico es una actividad de relativa corta duración, pero intensiva en el uso de capital y mano de obra. Con frecuencia ocurre en áreas con precaria infraestructura donde se enfrentan retos logísticos de altísima complejidad y donde la presencia institucional es limitada. En extensas zonas del país, como por ejemplo los Llanos Orientales, existe una ventana climática específica, entre los meses de noviembre y marzo, dentro de la cual los trabajos pueden realizarse aprovechando el tiempo seco. Además de ello, la prospección sísmica debe cumplir con un marco regulatorio variado y riguroso cuya implementación generalmente es retadora. Se requiere personal numeroso y altamente especializado para ejecutar un proyecto sísmico cumpliendo la normatividad existente y entregando un producto final que satisfaga los objetivos exploratorios.

Principales elementos regulatorios aplicables a la prospección sísmica en Colombia



Figura 67. Principales elementos de regulación que se aplican a la prospección sísmica y que se cumplen rigurosamente, aún en condiciones de precariedad de infraestructura y escasa presencia institucional.

La figura 67, muestra algunos de los elementos regulatorios principales aplicables a la sísmica según su temática. Todos ellos deben satisfacerse simultáneamente, dentro del breve tiempo de ejecución del proyecto y con el nivel de trazabilidad que permita demostrar su cumplimiento ante las autoridades competentes y el público en general. Puede intuirse, entonces,

que la clave para poder adelantar con éxito un programa sísmico radica en realizar una planeación detallada y oportuna que aborde la realidad integral del proyecto y defina estrategias adecuadas de implementación. Idealmente, la fase detallada de planeación del proyecto debe realizarse conjuntamente entre el operador y la empresa contratista, pues, cada parte posee conocimiento complementario necesario para el entendimiento integral del proyecto. El elemento de planeación por excelencia es el plan de manejo ambiental o documento de Medidas de Manejo Ambiental – MMA, pues este contiene la caracterización del área de influencia, así como la evaluación de impactos y sus respectivas medidas de manejo. El MMA aborda principalmente la variable ambiental y debe haberse confeccionado haciendo uso de mecanismos de participación ciudadana. El geofísico responsable del programa sísmico debe estar atento para conocer las implicaciones operativas de posibles zonas con restricciones socio-ambientales dentro del proyecto para dimensionar su impacto sobre los objetivos exploratorios del levantamiento y plantear alternativas de manejo.



Un segundo insumo que hace parte de la planeación de un proyecto sísmico es el análisis integral de riesgos. Este es un ejercicio que utiliza metodologías tradicionales de gerencia de proyectos para caracterizar los posibles riesgos en todas las temáticas relevantes para definir su criticidad, las acciones específicas que deben acometer para su control, los responsables de dichas acciones y la eficacia esperada de los controles aplicados. Si un determinado riesgo es valorado como alto según los criterios corporativos de una empresa, deben formularse medidas de manejo y control que actúen para disminuir su probabilidad e impacto, para que su valoración pase a niveles aceptables. La formulación de dichas medidas de control debe ir acompañada del respectivo cálculo de recursos que se requerirán para su implementación además de la identificación de tiempos, responsables y conceptos legales, cuando ello se requiera. La figura 68, muestra el enfoque metodológico del análisis de riesgos, que busca actuar sobre la probabilidad de ocurrencia e impacto de un evento indeseado para mantener el riesgo dentro de límites manejables.

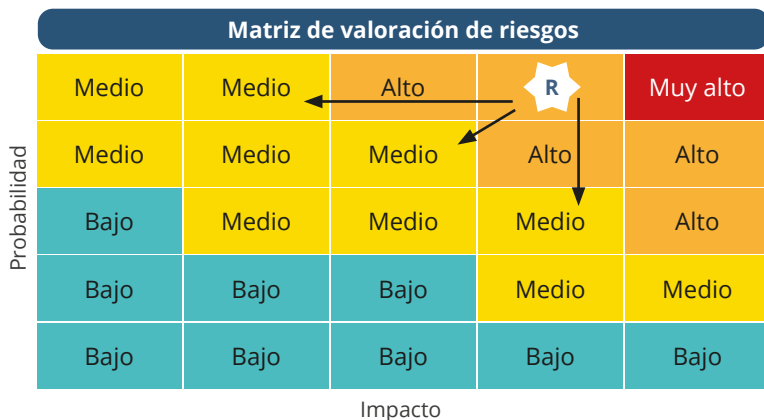


Figura 68. Los riesgos se ubican en la matriz de valoración según su impacto y probabilidad de ocurrencia. Las medidas de control actúan sobre estas dos variables con el fin de reducir el riesgo a niveles aceptables (bajo o medio). La formulación de medidas de control debe ir acompañada de la estimación de los recursos que se requerirán para su implementación.

El análisis de riesgo debe realizarse abordando como mínimo los siguientes temas que, aunque se enuncian separadamente, se encuentran íntimamente relacionados entre sí y requieren un tratamiento integral:

- **Ambiental**
- **Tierras**
- **Contratación de personal y bienes/Servicios**
- **Explosivos**
- **Relacionamiento social**
- **Seguridad física**
- **Operaciones aéreas**
- **Aspectos geofísicos**

Los ejercicios de análisis de riesgo ofrecen mejores resultados cuando se realizan en equipos interdisciplinarios y con participación de la empresa operadora, la empresa contratista y la empresa de interventoría. También permiten estimar los recursos necesarios (personal, fondos, equipos) para implementar las medidas y verificar o gestionar su disponibilidad con el tiempo suficiente. Naturalmente estas discusiones tienen lugar una vez se han adjudicado los contratos de adquisición e interventoría y es frecuente que surjan acciones extras o restricciones no contempladas originalmente en las propuestas. Es aconsejable que las partes puedan manejar un cierto grado de flexibilidad operativa y presupuestal para hacer los ajustes que sean necesarios a fin de evitar situaciones de conflicto durante la ejecución.

Los resultados de los análisis de riesgos y sus implicaciones deben ser suscritos formalmente por los participantes a nivel directo con el fin de garantizar el compromiso por su materialización.

3.2 ASPECTOS ADMINISTRATIVOS

La prospección sísmica es una actividad que demanda una gran cantidad de mano de obra durante un tiempo relativamente corto. Es por ello que se constituye en una oportunidad temporal de ingreso económico para los habitantes de las áreas de influencia. Buscando garantizar un acceso transparente a estas oportunidades de trabajo el estado colombiano estableció el llamado Servicio Público de Empleo que regula la contratación de mano de obra siguiendo el procedimiento definido por la ley. La totalidad de la mano de obra no calificada contratada para prestar sus servicios en proyectos de exploración y producción de hidrocarburos, en principio, será residente en el área de influencia del proyecto de exploración y producción de hidrocarburos. De otra parte, si la hubiere, por lo menos el treinta por ciento (30%) de la mano de obra calificada contratada para prestar sus servicios en proyectos de exploración y producción de hidrocarburos, será residente en el área de influencia del proyecto de exploración y producción de hidrocarburos. Los tiempos de implementación de este procedimiento y la capacidad real de los prestadores del servicio en las localidades donde se adelantán los proyectos son factores claves a tener en cuenta en la planeación de las actividades. La ley permite que las empresas contratistas trabajen de la mano con la institucionalidad para realizar las jornadas de registro masivo de oferentes de mano de obra en los territorios donde se desarrollen los proyectos.

La competencia de acreditar el carácter de “local” de un trabajador es de las alcaldías municipales, quienes expiden el certificado oficial de residencia.

La legislación contiene normas estrictas relativas a la cantidad máxima de días y horas continuos que un obrero puede trabajar. Ello impacta de manera directa la programación de las cuadrillas de trabajo cuyo inicio de labores debe darse en el tiempo adecuado, evitando que los descansos sean coincidentes y previniendo una interrupción de la producción.

Un ejemplo sencillo que permite ilustrar las consideraciones relativas a los turnos de trabajo se presenta a continuación: aquí se analiza la estrategia necesaria para completar una fase de topografía de 530 km lineales en unos 40 días con un rendimiento diario estimado de 2.5 km por cuadrilla. En principio, si el trabajo pudiera realizarse de manera continua, esta tarea requeriría entre 5 y 6 cuadrillas. La realidad es que existen 2 días de inducción en los cuales el trabajador no realiza producción y un día dedicado a actividades lúdicas (Ley 50) lo cual deja 20 días productivos antes de salir a descanso obligatorio por 7 días. Con ello, debe programarse la entrada de 6 cuadrillas de relevo

que ingresan como se indica en la Figura 69 para garantizar la continuidad de la producción en el nivel requerido.

El trámite administrativo que se requiere (exámenes, dotaciones, contratos, nómina, etc.) corresponde entonces a 12 cuadrillas en vez de 6 y, el momento preciso en que entran las cuadrillas de relevo toma importancia para no perjudicar el ritmo de trabajo. Podrá el lector imaginar, entonces, la complejidad que puede alcanzar el tema de gestión de personal en un programa sísmico cuando se combinan las actividades de topografía, perforación, registro y restauración, además de aquellas otras actividades de soporte asociadas como transporte y campamentos, por solo mencionar algunas. Una operación sísmica de tamaño medio, puede alcanzar a albergar cientos de trabajadores simultáneamente lo cual, por sí solo, representa un enorme reto de coordinación. Vale resaltar que para que una cuadrilla de trabajo esté lista para iniciar labores se debe surtir el proceso trazado por el Servicio Público de Empleo cuya duración estimada es del orden de 15 días.

TOPOGRAFÍA																															
	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S	D	L	M	M	J	V	S				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25						
CUAD 1	Ind	Ind	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	Ley 50					
CUAD 2	Ind	Ind	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	Ley 50					
CUAD 3	Ind	Ind	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	Ley 50					
CUAD 4	Ind	Ind	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	Ley 50					
CUAD 5	Ind	Ind	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	Ley 50					
CUAD 6								Ind	Ind	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	Ley 50	T	T	T	T	
RELEVO 1																					Ind	Ind	T	T	T	T	T				
RELEVO 2																					Ind	Ind	T	T	T	T	T				
RELEVO 3																					Ind	Ind	T	T	T	T	T				
RELEVO 4																					Ind	Ind	T	T	T	T	T				
RELEVO 5																					Ind	Ind	T	T	T	T	T				
RELEVO 6																															
En campo	0	5	5	5	5	5	5	5	5	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	5	6	6	6	6
Km acum	0	13	25	38	50	63	75	88	103	118	133	148	163	178	193	208	223	238	253	268	283	295	310	325	340	355					

Figura 69. Esquema de contratación de cuadrillas para completar una fase de topografía de 530 km en 38 días con un rendimiento de 2.5 Km por cuadrilla. Debe adelantarse el proceso de contratación de 12 cuadrillas para no interrumpir la producción por los descansos obligatorios.

de proveedores y acometer con ellos programas de fortalecimiento para ayudarlos a elevar sus estándares y facilitar su elegibilidad en los procesos de abastecimiento. Los proveedores, así capacitados y fortalecidos, pueden continuar sus emprendimientos en etapas posteriores del ciclo exploratorio y eventualmente diversificarse a otro tipo de clientes para no generar dependencia de la industria del petróleo.

Hoy en día, muchas empresas operadoras impulsan programas para el fortalecimiento de proveedores porque es evidente que aportan beneficios tangibles en términos de transparencia, eficiencia y reducción de la conflictividad en las operaciones en el mediano plazo.

La prospección sísmica es un escenario ideal para comenzar con el diseño e implementación de programas de fortalecimiento de acuerdo con el alcance y duración del proyecto, que puedan ser extendidos en la medida en que se avance en las fases siguientes del ciclo exploratorio. Ejemplo de ello son programas como el llamado Plan Mentor de Petroseismic Services, con el cual se busca vincular profesionales recién egresados, quienes no cuentan con posibilidades de empleo por falta de experiencia. En el transcurso de tres años el Plan Mentor ha vinculado setenta (70) profesionales recién egresados, participando de manera activa en la ejecución de los proyectos, haciéndolos partícipes de los procesos de formación establecidos por la compañía y dando la posibilidad de obtener su primer empleo. Las contrataciones de personal que favorecen la participación de las mujeres en todas las actividades del proyecto son también acciones que representan un avance concreto en términos de equidad de género que contribuyen al fortalecimiento de las economías familiares en las áreas de influencia (ver figura 70).



Figura 70. La participación de las mujeres en todas las actividades de un programa sísmico ha venido creciendo significativamente aportando a la equidad de género.

Adicionalmente, es muy importante generar dinámicas de fortalecimiento productivo en áreas diferentes al sector petrolero a través de las cuales se previene la dependencia y se generan espacios de crecimiento de gran sostenibilidad e interacción multipartita como la que se ilustra en la Figura 71 correspondiente al proyecto de Apicultura para Todos de Petroseismic Services, que vinculó familias vecinas de los proyectos Guacharaca 3D, Fortuna 3D y Las Mercedes 2D, realizados en los departamentos de Sucre, Córdoba y Norte de Santander. El programa consistió en apoyar los cultivos de apicultura. Se realizó asesoría técnica e instalación de apiarios base de treinta (30) colmenas, los cuales fueron ubicados en los municipios de La Unión, Sucre y Río de Oro, César. Del mismo modo, se fomentó la importancia de gestionar proyectos colectivos, con procesos administrativos y plan de compras, resaltando el manejo adecuado y transparente de los recursos. En este proceso se han beneficiado 550 personas.



Figura 71. Ejemplo de iniciativas de fortalecimiento de sectores productivos diferentes al petrolero. 550 Personas se han beneficiado del programa de apicultura para todos.

3.3 ASPECTOS AMBIENTALES

Conviene comenzar señalando que el decreto 883 de 1997 establece que la exploración sísmica terrestre, en tanto no involucre la construcción de vías, no conlleva factores de deterioro grave invocados en la ley para hacer exigible la Licencia Ambiental. Sin embargo, a fines de la década de los 90, un esfuerzo conjunto entre las autoridades competentes, la industria (compañías operadoras, compañías consultoras y empresas de servicios) y el sector académico, se orientó a realizar una evaluación detallada del impacto ambiental de las operaciones sísmicas terrestres incluyendo la formulación de las medidas de manejo ambiental que deberían adoptarse en las operaciones de campo.

El equipo de trabajo conformado para esta misión, contó con la presencia de expertos en diversas disciplinas, lo cual aportó una visión amplia y bien balanceada, que terminó con la generación del documento titulado: Guía básica ambiental para programas de exploración sísmica terrestre. Dicho documento se refiere también a la sísmica 3D, que para entonces, ya llevaba 15 años adelantándose en Colombia.

La guía se convirtió con los años en un referente y ha mantenido la vigencia gracias a la relevancia de su contenido, que no se limita a las consideraciones técnicas, sino que aborda el componente social como uno de sus aspectos fundamentales. De hecho, el Ministerio del Medio Ambiente, mediante resolución 1023 de 2005, adoptó las guías ambientales como instrumento de autorregulación, autogestión y de consulta y referencia conceptual y metodológica tanto para las autoridades ambientales como para la ejecución y el desarrollo de los proyectos.

Años más tarde, en ejercicio del principio de rigor subsidiario, algunas corporaciones autónomas optaron por establecer requisitos propios para los proyectos sísmicos a desarrollarse en su jurisdicción y expidieron sendas resoluciones de obligatorio cumplimiento así:

Corporinoquia: lineamientos ambientales para la ejecución de programas sísmicos terrestres. Marzo 18 de 2010.

Corpoboyacá: lineamientos ambientales para la ejecución de programas sísmicos terrestres.
Diciembre 20 de 2012.

Cormacarena: medidas de manejo ambiental para la ejecución de programas sísmicos en el departamento del Meta. Agosto 6 de 2013.

Es competencia de las Corporaciones Autónomas Regionales el otorgamiento de permisos de aprovechamiento de recursos naturales entre los cuales se encuentran el agua superficial y subterránea, la madera y los agregados pétreos para construcción. Actualmente existen 33 CAR que ejercen la autoridad ambiental en el ámbito regional. (Ver Figura 71A)

La materialización de las líneas sísmicas en el terreno busca minimizar el impacto sobre el medio ambiente. El ancho de la pica ecológica es tal que permite el desplazamiento seguro del personal y sus equipos portátiles. No se cortan árboles cuyo diámetro sea mayor a 10 cm a la altura del pecho. En lo posible la vegetación arbustiva se amarra temporalmente para facilitar su recuperación posterior.

En zonas boscosas se usa la llamada trocha tipo túnel, que preserva las ramas más altas, como se observa en la figura 72,



Figura 71A. Mapa de distribución de las 33 Corporaciones Autónomas Regionales existentes en Colombia. Fuente: ASOCARS.

en la que se muestra la recomendación de la Guía ambiental y un ejemplo de su aplicación práctica. La evolución de la cartografía digital basada en imágenes aéreas de gran precisión ha hecho que se reduzca dramáticamente la huella ambiental debida a los trabajos de topografía.



Figura 72. Características típicas de la llamada pica ecológica tipo túnel en un proyecto sísmico en zona boscosa. No se cortan árboles con diámetros mayores a 10 cm. Guía ambiental.

Un elemento fundamental de las regulaciones para prospección sísmica es la tabla de distancias seguras para detonación de cargas explosivas. A manera de ejemplo, la figura 73 presenta la tabla correspondiente a la regulación de Cormacarena con jurisdicción en el departamento del Meta. Otras corporaciones establecen requisitos similares en su jurisdicción y ejercen seguimiento y vigilancia de acuerdo con sus procedimientos internos. Estas tablas incluyen elementos de importancia hídrica, cultural y económica y, procesos erosivos, con lo cual se cubre el espectro de posibles impactos.

Distancias mínimas para la detonación de cargas explosivas		
LUGAR	CARGA	DISTANCIA (m)
Viviendas en concreto y/o material	Todas	100
Viviendas de bahareque o adobe; iglesias	Todas	100
Viviendas en madera	Todas	100
Cementerios	Todas	50
Pozos sépticos revestidos	Todas	100
Carreteras pavimentadas	Todas	30
Carreteras destapadas en corte y en pendiente	Todas	50
Carreteras destapadas en área plana	Todas	10
Box Couvert, puentes, túneles y presas	Todas	100
Estructuras en concreto: Canales de riego, obras de arte en carreteras	< 2 Kg	30
	2 Kg a 4 Kg	45
	4 Kg a 6 Kg	50
	6 Kg a 8 Kg	75
Remociones en masa	Todas	100
Cárcavas, reptación y barrancos	Todas	100
Baterías y tanques de almacenamiento de hidrocarburos	Todas	50
Pozos petroleros en producción y piscinas abandonadas	< 2 Kg	30
	2 Kg - 4 Kg	45
Líneas superficiales de conducción de hidrocarburos (líneas de flujo, oleoductos, gasoductos y poliductos)	Todas	25
Líneas subterráneas de conducción e hidrocarburos (líneas de flujo, oleoductos, gasoductos y poliductos)	< 2 Kg	30
	2 Kg - 4 Kg	45
	4 Kg - 6 Kg	50
	6 Kg - 8 Kg	75

Distancias mínimas para la detonación de cargas explosivas		
LUGAR	CARGA	DISTANCIA (m)
Ríos	Todas	100 después de la cota en el momento que se toma el registro
Quebradas y caños	Todas	50 después de la cota en el momento que se toma el registro
Jagüeyes, lagunas, pozos de agua, aljibes	Todas	100
Esteros	Todas	50
Nacederos	Todas	100
Estanques piscícolas y jagüeyes con peces	Todas	100
Tanques de almacenamiento de agua	Todas	70
Bocatomas con estructura en concreto	Todas	70
Bocatomas sin estructura en concreto	Todas	70
Acueductos municipales enterrados	Todas	50
Acueductos municipales superficiales	Todas	50
Acueductos veredales superficiales o enterrados	Todas	50
Escuelas o colegios	Todas	200
Cuerdas de media y alta tensión	Todas	50
Cuerdas de baja tensión	Todas	50
Torres de alta tensión	Todas	50
Subestacion eléctrica	Todas	50



*Corporación para el Desarrollo Sostenible
del Área de Manejo Especial
La Macarena "CORMACARENA".*

*Términos de referencia medidas de manejo
ambiental para la ejecución de programas sísmicos
en el departamento del Meta.*

VIGENCIA*: 09 de diciembre de 2019

Página 25 de 27

Figura 73. Distancias mínimas a elementos sensibles para proyectos en jurisdicción de Cormacarena. Estas distancias se aplican rigurosamente en todo proyecto sísmico.

En la práctica, la observancia estricta de dichas distancias mínimas hace que los puntos de fuente y de recepción deban ser desplazados de su posición teórica o eventualmente eliminados ante la imposibilidad de su reubicación. La figura 74 es un ejemplo típico de la estadística de desplazamiento de puntos de disparo por diferentes causas. Estas alteraciones pueden afectar negativamente la calidad de los datos en la medida en que la cercanía de múltiples elementos sensibles produce superposición de las zonas de exclusión, lo cual puede dar como resultado, exclusiones de gran tamaño que afectan la obtención de información somera como se ilustra en la figura 75.

PUNTOS FUENTE DESPLAZADOS

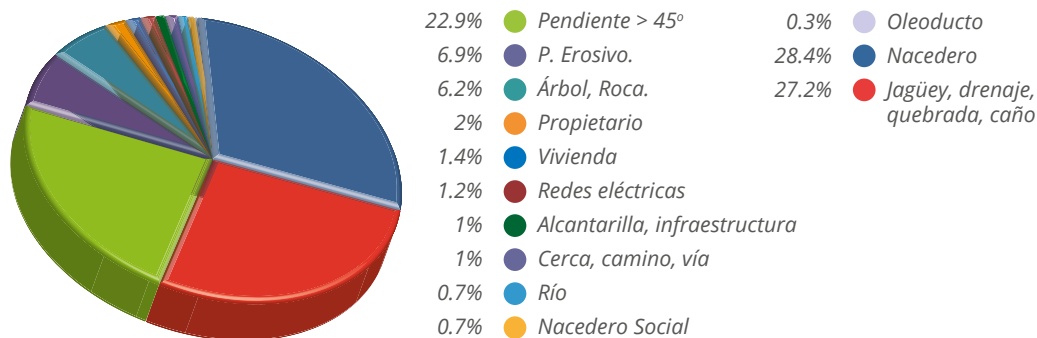


Figura 74. Ejemplo de estadística final de desplazamientos de puntos de disparo en un programa sísmico en el Valle Superior del Magdalena. En este caso el 76% de los puntos debió ser reubicado, debido principalmente, a la presencia de nacimientos, drenajes y pendientes.

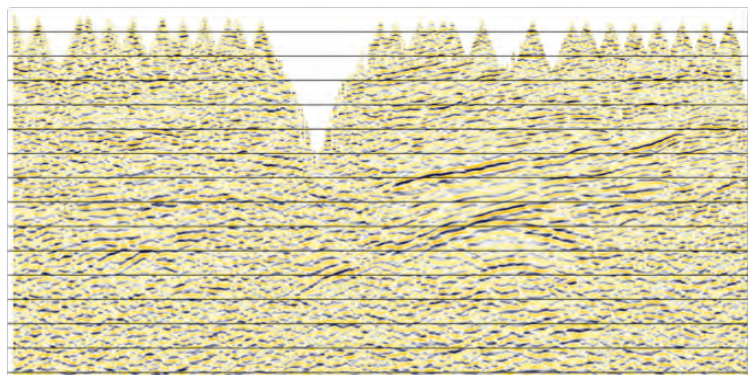



Figura 75. La ausencia continua de disparos a lo largo de una zona relativamente grande genera en la sección sísmica un vacío en forma de "v" que es más profundo en la medida en que el obstáculo crece. Ello puede llegar a impactar gravemente la obtención de información somera y deteriorar la calidad de la información profunda, tal como se observa en este ejemplo del Valle Inferior del Magdalena. Archivo personal del autor.

Tal como lo formula la Guía básica para la adquisición de programas sísmicos en tierra, todo proyecto sísmico debe realizarse con una adecuada planificación socio ambiental para lo cual, la práctica recomendada es la realización de un plan de manejo ambiental específico que aborde los siguientes apartes:

1. Descripción del proyecto y demanda de uso y aprovechamiento de recursos naturales.
2. Caracterización socioambiental del área
3. Evaluación de impactos
4. Zonificación de manejo ambiental
5. Programas de manejo ambiental



El Estudio de Impacto Ambiental se inicia con la consulta de información secundaria pero requiere la obtención de información primaria que se adquiere en territorio con la participación de las comunidades del área de influencia. La descripción del proyecto debe contener una aproximación a la logística que deberá implementarse en el proyecto a la luz de las características específicas del área de trabajo incluyendo el régimen de lluvias y la infraestructura vial existente. Los aspectos más importantes tienen que ver con la gestión de aguas para uso industrial y uso doméstico en cuanto a su disponibilidad y facilidad de transporte.

En promedio y como valor de referencia, la perforación de un pozo de 10 m, cuando el método de perforación es agua, requiere de unos cien galones (380 litros) de agua de uso industrial que se captan de puntos autorizados³. Un programa sísmico 3D de unos seis mil pozos perforados con agua, puede requerir entonces un total de 2280 m³ de agua industrial. Si la perforación se realiza en unos cien días, ello implica un caudal de unos 0.26 L/S. Por su parte, el consumo de agua doméstica dependerá principalmente de la cantidad de personas en el proyecto y de la logística implementada. Un valor conservador es de ciento setenta litros por persona al día, con lo cual el mismo proyecto de seis mil disparos ejecutado con un promedio de cuatrocientas personas en cinco meses, arrojará un consumo de unos 10.000 m³ en total.

Con base en la información reportada rutinariamente por las empresas de servicios a las autoridades ambientales, sería interesante generar indicadores de consumo y disposición de aguas residuales y domésticas en m³/punto-fuente y m³/persona respectivamente con el fin de documentar procesos de mejoramiento continuo, buscando eficiencias en el uso de los recursos.

Finalmente, sería de gran valor implementar de forma explícita los PAURA (Programas de ahorro y uso eficiente de agua), eliminando y reduciendo pérdidas por fugas con sistemas de detección, realizando inspecciones frecuentes al sistema de conducción y abastecimiento, instalando mecanismos de ahorro de agua en baterías sanitarias y duchas e implementando sistemas colectores de aguas lluvias, entre otros.

Según datos de la Asociación Colombiana del Petróleo en el año 2015, con un total de 2150 km equivalente de sísmica adquirida, se registraron los indicadores que se ilustran en la Figura 76.

3. La cantidad de agua requerida para la perforación de un pozo depende de las características del suelo y de las condiciones logísticas particulares de cada proyecto por lo cual estos valores no son generalizables.

Indicador	Unidad	Valor	Total km de Sísmica 2015	Total	Unidad
Consumo de agua industrial	m³/km de sísmica	9,587	2.150	20.612	m³
Consumo de agua doméstico	m³/km de sísmica	6,787		14.592	m³
Vertimientos	m³/km de sísmica	N/R		-	m³
Residuos sólidos no peligrosos	Ton/km de sísmica	0,031		66,65	Ton
Residuos peligrosos	Ton/km de sísmica	0,000011		0,0236	Ton

Fuente: ACP

Figura 76. Indicadores de consumo de recursos, generación de residuos y otros componentes para la actividad de sísmica terrestre en 2015. Informe de desempeño ambiental ACP, 2015.

El documento de MMA debe contener la localización y descripción de los posibles puntos de captación de agua subterránea o superficial para solicitar los respectivos permisos de aprovechamiento de conformidad con la resolución 1058 del 7 de octubre de 2021. Las medidas de manejo ambiental deben socializarse con las comunidades del área de influencia al inicio de las actividades de caracterización en campo y, nuevamente, una vez haya sido aprobada la resolución (en el caso de Corpoinoquia).

La disponibilidad de campamentos es un factor fundamental para una logística eficiente y no puede dejarse al azar. A la ubicación exacta de los campamentos debe añadirse el análisis de su viabilidad en términos ambientales, así como, la estimación de los recursos que demandará su construcción y funcionamiento. La cantidad de campamentos volantes dependerá de la disponibilidad de vías en el área. Las cuadrillas alojadas en un campamento deben poder desplazarse al lugar de trabajo, desarrollar su labor y regresar dentro del tiempo de la jornada diaria. Tiempos de viaje excesivos indican la necesidad de implementar campamentos adicionales y ello no siempre es posible si no se ha solicitado previamente su aprobación a la autoridad ambiental.

Además de las regulaciones específicas a que se ha hecho referencia, un proyecto sísmico debe cumplir con todas las disposiciones del decreto 1076 de 2015 o Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible en el cual se regulan temas como los vertimientos de aguas domésticas e industriales y monitoreos de calidad. Por tratarse de normas obligatorias, su incumplimiento genera sanciones que pueden recaer tanto sobre la operadora como sobre la empresa de servicios. Una gestión ambiental impecable es la mejor carta de presentación.

A través de los años la gestión ambiental en programas sísmicos en Colombia ha venido fortaleciéndose y hoy en día los trabajos se desarrollan con altos estándares y trazabilidad, lo cual puede evidenciarse en los informes periódicos de cumplimiento que se entregan regularmente a las autoridades ambientales.

Medición de generación de gases de efecto invernadero

Comparada con otras industrias, la prospección sísmica es una actividad con un bajo nivel de generación de gases de efecto invernadero. Lo anterior no obsta para que se realicen mediciones estructuradas que permitan establecer indicadores de mejoramiento para avanzar hacia operaciones cada vez más limpias y oportunidades para trabajar por la neutralidad. En 2017 se realizó un proceso de medición de emisiones con el fin de obtener valores reales de generación de gases de efecto invernadero en las operaciones. Se tomó como caso de estudio un programa sísmico adquirido en 2017 en el Valle Inferior del Magdalena, con una duración aproximada de 6 meses. Las emisiones totales de la operación totalizaron 721,3 tCO₂e, distribuidas de la siguiente manera (ver figura 77):

- Fuentes directas o Alcance 1: Quema de combustible en equipos y zonas de alojamiento, quema de GLP: 242,3 tCO₂e (34%).
- Fuentes indirectas o Alcance 2: Uso de energía del sistema interconectado nacional: 18,07 tCO₂e (2%).
- Fuentes Otras indirectas o Alcance 3: Transporte aéreo, transporte terrestre en camionetas, transporte en botes, fugas de gases de los sistemas de refrigeración, uso de papel, manejo y tratamiento de los residuos sólidos y generación de aguas residuales vertidas al alcantarillado: 460,9 tCO₂e (64%).

La actividad que más emisiones de GEI genera es la quema de combustible para transporte aéreo en la operación, la cual representa un 39,5% tCO₂e de las emisiones totales. Le siguen las emisiones por quema de combustible en equipos y zonas de alojamiento con un 33,6%, y en tercer lugar se ubica la quema de combustible por el transporte terrestre de camionetas con un 14,2%.

Aproximadamente, cada árbol que es sembrado puede capturar un promedio de 250 kilos de CO₂ en un término de 15 años, lo cual representa que para compensar 1 tCO₂e se deben sembrar, al menos, 4 árboles. Para la operación referida en este estudio, con la siembra de 2800 árboles se alcanzaría la neutralidad total.

El estudio invita a proponer estrategias concretas para reducir la huella de carbono de las operaciones sísmicas entre las cuales vale la pena mencionar:

- **Capacitación y concientización del personal.**
- **Uso de equipos de energías limpias. (Gas, electricidad, solar).**
- **Ahorro y uso eficiente de papel.**
- **Optimización del transporte aéreo y terrestre.**

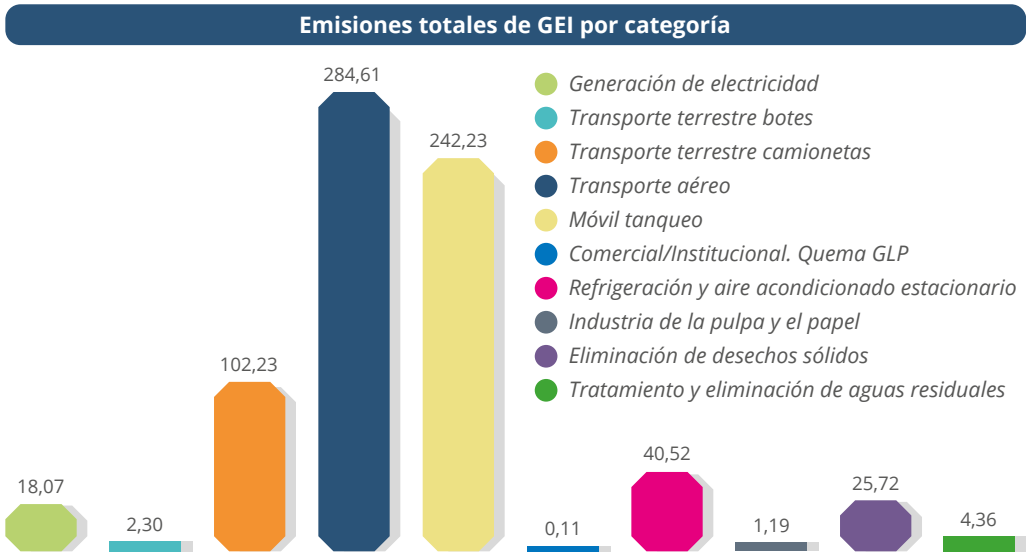


Figura 77. Elementos generadores de GEI y su importancia relativa en un programa sísmico típico.

Actas de vecindad de elementos sensibles

Un elemento efectivo para la identificación y manejo de impactos es el levantamiento de actas de vecindad de elementos sensibles, que consiste en la evaluación de las condiciones del elemento sensible antes y después de la operación sísmica con el fin de evidenciar posibles impactos atribuibles a la operación. Los elementos que generalmente son objeto de elaboración de actas son las viviendas, obras civiles de importancia social o cultural, cuerpos de agua de carácter léntico o lóxico, nacimientos de agua y procesos erosivos. Ver figura 78.

Las actas son levantadas por personal capacitado y se completan con participación del propietario o autoridad responsable del elemento sensible. Se obtienen si el elemento sensible se encuentra ubicado dentro de un radio predefinido de distancia a un punto de fuente y son georeferenciados. Las actas son instrumento valioso para la solución de posibles conflictos y contribuyen a un mayor entendimiento de las operaciones por parte de las comunidades y público interesado.

Algunos ejemplos de actas de vecindad se ilustran en la figura 78.



Figura 78. Algunos ejemplos de fotografías anexas a actas de vecindad a elementos sensibles de varios tipos como aljibes, pozos de agua, jagüeyes, nacimientos, procesos erosivos y edificaciones. Fotos de archivo personal.

López, C, (2019) en un trabajo titulado Análisis Conceptual de los Impactos de la Prospección Sísmica Sobre el Recurso Hídrico de la Microcuenca del Lago de Tota, de la Universidad Manuela Beltrán, muestra la importancia de las actas de vecindad de recursos hídricos. La autora regresa a varios de los puntos sensibles levantados en programas sísmicos en esta área adquiridos 10 años atrás, encontrando que se encuentran en igual condición que en ese entonces (ver figura 79). El estudio aborda la problemática del agua de manera integral y discute otras variables que ejercen presión sobre el recurso hídrico como la agricultura y la inadecuada disposición de aguas residuales de poblaciones vecinas.



Figura 79. Evidencia de visita a un punto sensible registrado en 2019, diez años después de la ejecución de un proyecto sísmico en el departamento de Boyacá. No se observa deterioro en sus características. La comparación puntual se logra gracias a la existencia de actas de vecindad georeferenciadas. (Lopez, 2019)

Como se verá más adelante, el uso intensivo de vías de bajas especificaciones técnicas es una de las principales preocupaciones de las comunidades y es también fuente de conflictividad social originada en la generación de material particulado y en el deterioro de la transitabilidad en puntos críticos. Las empresas contratistas de sísmica, aunque no sean usuarios exclusivos de las vías y de acuerdo con las circunstancias, realizan trabajos de mantenimiento y mitigación vial que son documentados en actas de vecindad y que contribuyen a facilitar la movilidad de vehículos de carga y pasajeros. (Figura 80)




Figura 80. Ejemplo de pasos críticos en vías públicas con pobres especificaciones de construcción. Se observan situaciones de enterramiento de vehículos y trabajos de mantenimiento y mitigación vial desarrollados ocasionalmente por el contratista sísmico en conjunto con las instituciones locales. Se realizan actas de vecindad para documentar el proceso. Fotos archivo personal.

En resumen, la trazabilidad de la gestión socio ambiental de las empresas operadoras y de servicios que desarrollan labores en territorio es muy importante para lograr que las discusiones en torno a los impactos ambientales de las actividades se mantengan libres de especulación y puedan darse en un ambiente constructivo.

3.4 ASPECTOS SOCIALES

La prospección sísmica suele ser la primera actividad de gran escala que ocurre dentro del proceso exploratorio en un territorio y es la oportunidad de establecer un relacionamiento de calidad con las comunidades y en general, con todos los grupos de interés con miras a generar lazos de confianza que sean el cimiento para relaciones de mutuo beneficio en el largo plazo.



El mundo empresarial actual ha reconocido que además del desempeño operativo y financiero, las empresas deben incorporar criterios de sostenibilidad para analizar el valor de sus inversiones. Ello se expresa en tres criterios conocidos como criterios ESG que constituyen el sello de una empresa ante grupos de interés. El factor ambiental (E), se refiere a la manera como se garantiza una operación ambientalmente responsable, el compromiso con los objetivos de desarrollo sostenible y cómo se involucra la variable ambiental en el proceso de decisiones. El factor social (S), refleja la manera en que la empresa se relaciona con sus grupos de interés y cómo se integra al entorno local produciendo una huella positiva y promoviendo la diversidad, los derechos humanos, la salud y la seguridad. Finalmente, el factor de gobierno corporativo (G), gira en torno a cómo se gestiona la compañía e incluye aspectos como la independencia de su consejo de administración, la estructura de remuneración de ejecutivos, las políticas contables que utiliza y su estrategia fiscal, entre otros.

La historia del relacionamiento de la industria extractiva con las comunidades ha estado marcada por la conflictividad y la desconfianza mutua. Es un hecho que muchas regiones cuyo subsuelo ha generado enorme riqueza a través de la explotación de los recursos naturales no han visto una clara mejoría de sus condiciones de vida y se cuestionan la efectividad de las inversiones que los estados realizan con los recursos de regalías e impuestos provenientes de esta actividad industrial. Esa conflictividad creció y se manifestó de diferentes maneras en todo el mundo y alcanzó niveles críticos durante la década de los 90 especialmente para el sector de la minería.

En 1997 se llevó a cabo una reunión con personal del Banco Mundial, en Washington D.C., en la que Jim Cooney, entonces director de Asuntos Internacionales y Públicos de la minera canadiense Placer Dome, propuso que la industria tenía que actuar de forma positiva para recuperar su reputación y obtener una “licencia social para operar” a través de un proceso que, comenzando al nivel de minas y proyectos individuales, crearía, con el tiempo, una cultura y perfil públicos para la industria minera. Así nació el concepto de la Licencia Social para Operar, que propició un análisis estructurado de esta problemática acompañado de niveles de autocrítica y propuestas de construcción encaminadas a desarrollar relaciones de confianza mutua.

Los conceptos planteados por Boutilier y Thompson, en 2011, en desarrollo de estas ideas reflejan de manera muy cercana las dinámicas que se han vivido en Colombia y son un excelente punto de partida para evolucionar hacia esquemas basados en sostenibilidad y transparencia. Estudios como el

publicado por Delhey, J. y Newton, K. 2005 analizan los niveles de diferentes tipos de confianza social de las personas en una muestra significativa de países del mundo. En este estudio se evidencia que Colombia es un país esencialmente desconfiado (no es sorpresa), lo cual indica que se requiere un gran esfuerzo en construcción de confianza personal e institucional para llegar a consolidar relaciones más eficientes, sostenibles y duraderas que impliquen menor desgaste.

Al decir de Boutilier y Thompson, “las herramientas fundamentales para construir relaciones entre proyectos mineros y comunidades son los valores que permean las acciones de la compañía que incluyen:

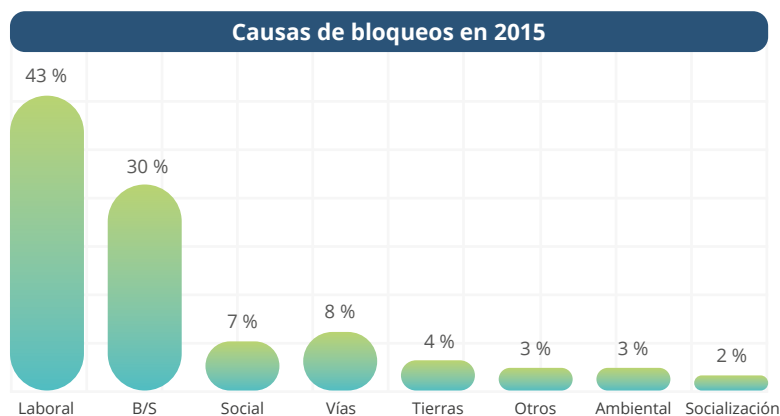
- **Respeto e inclusividad**
- **Transparencia y honestidad**
- **Voluntad de escuchar; empatía**
- **Prontas respuestas y cumplimiento de promesas**
- **Buena voluntad y cuidado – Proteger los intereses del otro**
- **Reglas claras y acciones basadas en los principios.**

Cabe resaltar que la aplicación de estos principios debe ocurrir en doble vía y se espera que tanto empresas como instituciones y comunidades asuman el compromiso de obrar de acuerdo con estos valores.

Colombia

En Colombia, el fenómeno de conflictividad social alrededor de la industria de hidrocarburos alcanzó niveles tan elevados que motivaron un esfuerzo interinstitucional de alto nivel materializado, en la suscripción del Acuerdo de Cooperación de Asistencia Técnica y Financiera 242 de 2013, entre la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), con el “objetivo de apoyar a la ANH en la estructuración e implementación de una estrategia territorial para la gestión sostenible y equitativa del sector hidrocarburos, a través del fortalecimiento de actores, la consolidación de escenarios participativos de planificación para el desarrollo humano, la superación de la pobreza y el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) en las regiones”. Así nació la Estrategia Territorial de Hidrocarburos que realizó un trabajo coordinado para llevar la institucionalidad al territorio y ejercer una importante y necesaria función integradora de los esfuerzos de los múltiples actores gubernamentales, que tienen injerencia en la ejecución de proyectos de hidrocarburos. Evidencias de los logros de la ETH se pueden consultar en sus reportes anuales (https://www.co.undp.org/content/colombia/es/home/library/democratic_governance/informe-anual-de-inversiones-para-el-desarrollo-2016-2017--estra.html), en los

que se describen gran número de “acciones demostrativas” que son ejemplo de gestiones exitosas con participación de múltiples actores.



Fuente: ACP - Ecopetrol. Información en consolidación a 31 de Dic de 2015 referente a 284 bloqueos, algunos de ellos con causas múltiples.

Figura 81. Causas reportadas para 284 bloqueos a las operaciones en 2015. Los temas de contratación de personal y bienes y servicios son, de lejos, las fuentes principales de conflictividad.

Un producto generado bajo este convenio de cooperación fue el Diagnóstico de la Conflictividad Social (2016), que permitió visibilizar las dinámicas y tendencias de la conflictividad social en el sector y aportó insumos de carácter analítico para la definición de las líneas de acción estratégicas para la prevención y atención de estas situaciones.

La figura 81 muestra las causas de 284 bloqueos ocurridos, en 2015, en los que se evidencia que entre los temas de vías, contratación de mano de obra y bienes y servicios se alcanza el 81% de la causalidad de los conflictos. Los temas ambientales apenas representan un 3% del total, pero son frecuentemente utilizados como argumento para bloquear las operaciones.

La evolución de estas situaciones, de hecho, en un ambiente de institucionalidad débil y una enorme presión sobre las empresas para minimizar los impactos económicos de los bloqueos, explica el crecimiento de esquemas de negociación (a menudo transaccionales) y resolución de conflictos en los cuales los bloqueos se han convertido en un medio de presión para conseguir beneficios en contratación de mano de obra y de bienes y servicios.

La interacción concebida como transacción, se convierte en caldo de cultivo para la ocurrencia de actos de corrupción

caracterizados por la presencia de intermediarios ilegales que buscan cobrar comisiones por la obtención de contratos según se describe en el análisis que presenta López (2021) en el portal Crudo Transparente y que se ve ampliamente confirmado a medida que se conoce la judicialización de numerosas personas implicadas en dinámicas similares en todo el territorio nacional. La ocurrencia de estos hechos indeseables aleja las posibilidades de que los beneficios de la ejecución de proyectos de hidrocarburos alcancen a los verdaderos beneficiarios y puedan producir los ansiados cambios positivos en las condiciones de vida de las áreas de influencia.

Al referirse a los temas de conflictividad territorial resulta inevitable señalar que las dinámicas del conflicto armado en Colombia, después de la firma del acuerdo de paz, han evolucionado de forma compleja hacia organizaciones disidentes con foco en actividades ilegales como el narcotráfico, la minería y la extorsión a gran escala. Estos fenómenos se han manifestado de diferentes maneras a través del territorio y, como resultado, han generado la suspensión indefinida de un número significativo de contratos de exploración y producción lo cual, a su vez retrasa, las inversiones en los planes exploratorios representadas principalmente en sísmica y perforación exploratoria.

Las cifras de cantidad de km de sísmica pendiente por adquirir a julio de 2021, según las cuales entre el 59% y el 79% de las sísmica 3D y 2D comprometida no ha podido ejecutarse por razones de fuerza mayor, ilustran claramente la gravedad de la situación en momentos en que los precios internacionales vuelven a niveles altos y el país requiere con urgencia mejorar sus ingresos fiscales para apoyar la reactivación económica (ver figura 82).

Sísmica pendiente por adquirir a julio de 2021			
	Total compromiso contractual	Dentro de los términos convenidos	Suspendidos por causas sociales y/o ambientales
2D	3592.12 km	744.78 km	2847.34 km (79%)
3D	3875.11 km ²	1581.22 km ²	2293.89 km ² (59%)

Figura 82. Kilómetros de sísmica pendientes por adquirir a julio de 2021. Fuente ANH.

Recientemente, la Fundación Panamericana para el Desarrollo (FUPAD) realizó para la ANH un estudio cuyo alcance fue la construcción de un documento diagnóstico de alteración a la seguridad pública y conflictividad social relacionada con el sector de hidrocarburos en municipios de influencia de contratos y/o convenios E&E, E&P y TEA suspendidos por esta

problemática. El estudio describe con detalle el panorama de seguridad en las regiones que concentran la actividad de hidrocarburos en el país (Cesar, Catatumbo, Santander, Llanos Orientales, Arauca, Caldas, Tolima, Cundinamarca, Boyacá, Putumayo y Caquetá) mostrando la naturaleza de la presencia de los diferentes grupos ilegales que tienen asiento en ellas y que retan las capacidades de la institucionalidad.

Dentro de este contexto, la adopción de políticas anticorrupción orientadas a prevenir el riesgo de lavado de activos y financiación del terrorismo ha venido creciendo y hoy en día se refleja claramente en la manera como se implementan los procesos de abastecimiento en el campo. Ello, sin duda, introduce alguna complejidad adicional en los procesos pero resulta imprescindible para identificar desviaciones, para proteger a las empresas y sus empleados y principalmente para garantizar la adecuada inversión de los recursos. Según la norma GTC 250 de buenas prácticas sociales para la exploración y explotación de hidrocarburos, toda organización debería desarrollar una estrategia anticorrupción que incluya como mínimo:

- a. Identificar riesgos de corrupción y extorsión en la cadena de abastecimiento.**
- b. Contar con un sistema eficaz para luchar contra la corrupción y la extorsión.**
- c. Formar a empleados, representantes, proveedores, contratistas y subcontratistas, para prevenir la corrupción y el soborno.**
- d. Informar a las autoridades sobre violaciones a la ley.**
- e. Alentar a los demás actores con los que opera a adoptar prácticas anticorrupción similares.**

La implementación del Servicio Público de Empleo (SPE) ha sido un paso importante para erradicar las prácticas ilegales como también lo han sido los decretos que establecen requisitos mínimos para la adquisición de bienes y servicios en territorio. La presencia física del SPE y de las cámaras de comercio resulta fundamental para garantizar el acompañamiento y la socialización de estos requisitos ante las comunidades y autoridades locales.

Una comunicación adecuada ha probado ser un instrumento clave en el relacionamiento social y resulta fundamental para gestionar las expectativas de parte y parte cuando está por iniciarse un proyecto sísmico. A este respecto, la guía técnica colombiana GTC 250 contiene una serie de recomendaciones muy valiosas para abordar el tema de manera integral y transparente y que se reproducen por considerarlas de gran importancia en la figura 83. La puesta en marcha de estrategias de comunicación robustas y bien soportadas por el área de entorno es un

paso que permite evitar la aparición de episodios de conflictividad que muchas veces se originan en falta de información y que pueden escalar rápidamente hasta alcanzar escenarios de no retorno como la terminación anticipada de los contratos.

Recomendaciones para una comunicación efectiva	
TEMA	RECOMENDACIONES
Relacionamiento y Socialización	<ul style="list-style-type: none"> - Mantener comunicaciones transparentes con las partes interesadas. - Ajustar los mensajes, canales y productos de comunicación a las características sociales y culturales de las partes interesadas. - Emplear herramientas participativas de comunicación.
Ingreso al área de interés	Diseñar canales de comunicación con las autoridades gubernamentales, comunidades y otras partes interesadas, con el fin de darles a conocer la gestión de la organización.
Derechos humanos	<ul style="list-style-type: none"> - Contar con estrategias de divulgación, sensibilización y capacitación sobre los derechos humanos para trabajadores, contratistas y la comunidad. - Divulgar ampliamente los mecanismos que la organización pone a disposición de las partes interesadas para presentar PQR, en materia de derechos humanos.
Inversión social y programas en beneficio de las comunidades (PBC)	<ul style="list-style-type: none"> - Explicar los conceptos de inversión social y programas en beneficio de la comunidad. - Generar espacios de diálogo que permitan identificar con gobiernos locales, comunidades beneficiarias y otras partes interesadas, las características y las problemáticas sociales, culturales, políticas, ambientales y económicas del área de influencia, así como participar en la búsqueda de soluciones y estructuración de programas de inversión social. - Divulgar a las partes interesadas los objetivos, actividades, tiempos de ejecución, beneficios y avances de la inversión social.
Gestión laboral y cadena de Abastecimiento	<ul style="list-style-type: none"> - Diseñar canales para divulgar, de manera oportuna, las necesidades de adquisición de bienes y servicios y contratación de mano de obra. - Diseñar espacios de encuentro entre oferta y demanda de bienes y servicios, como por ejemplo ruedas de negocios.
Adquisición de derechos superficiares	<ul style="list-style-type: none"> - Comunicar de manera transparente los siguientes aspectos, de acuerdo con el conocimiento de la organización y verificar que la contraparte lo entienda: <ul style="list-style-type: none"> - los daños, los perjuicios y las posibles afectaciones o perjuicios que la organización ha identificado y que deberían tenerse en cuenta como criterios de negociación de los derechos superficiares (Véase capítulo 5.2, Debida diligencia, y capítulo 6.9 Adquisición de derechos superficiares).. - los términos y las condiciones de los acuerdos firmados, y verificar que la contraparte los entienda adecuadamente, y - los derechos y los deberes de los dueños de terrenos con los que la organización interactúa. - Divulgar estos acuerdos a las diferentes áreas de la organización involucradas en el cumplimiento de los mismos.

Figura 83. Recomendaciones de la guía GTC 250 para desarrollar una comunicación efectiva en los proyectos de hidrocarburos.

Dada la importancia estratégica del tema social, la ANH estableció por medio del Acuerdo 05 de septiembre de 2011 parámetros para la realización de programas en beneficio de las comunidades ubicadas en áreas de influencia de los contratos de exploración y producción de hidrocarburos. Los 4 parámetros que enmarcan la implementación de los PBC se sintetizan de la siguiente manera:

Parámetro 1: Participación ciudadana.

Parámetro 2: Caracterización integral del entorno social, cultural y económico y coherencia con variable ambiental.

Parámetro 3: Transparencia, respeto por los Derechos Humanos y derechos de las minorías étnicas.

Parámetro 4: Armonía con planes de desarrollo local bajo conceptos de desarrollo sostenible.

Adicionalmente la ANH construyó la Guía metodológica para la gestión de los Programas en Beneficio de las Comunidades - PBC con enfoque de desarrollo humano y reducción de la pobreza extrema en Colombia en la cual se ofrece a las empresas de hidrocarburos un instrumento de apoyo, a través de nueve pasos, para orientar la gestión de dichos programas. Ver Figura 84. La secuencia descrita en estos nueve pasos requiere una enorme cantidad de trabajo social para interactuar con la institucionalidad y con las comunidades locales, que hace que la función de responsabilidad social requiera equipos de trabajo de alta competencia e interdisciplinariedad que logren implementar estrategias sostenibles en el tiempo y compatibles con las necesidades del negocio.

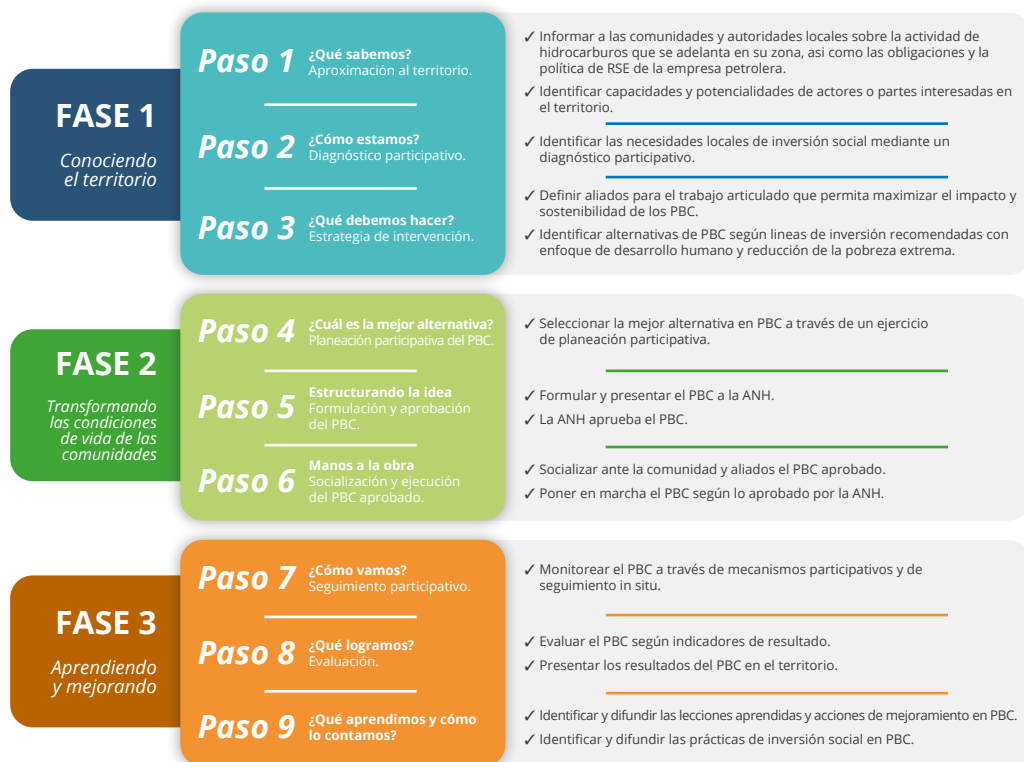



Figura 84. Los 9 pasos contenidos en la guía metodológica de la ANH para la formulación de planes de beneficio comunitario. Fuente: ANH.



El hecho de haber establecido este marco de referencia para la inversión social originada en los contratos de exploración y producción es un aporte fundamental para garantizar la relevancia, oportunidad y trazabilidad de dichas inversiones. Según datos de la ANH, las inversiones en planes de beneficio comunitario realizadas por las empresas titulares de contratos de exploración y producción entre 2005 y 2021 totalizan un monto de 941,638 millones de pesos colombianos. A nivel departamental, el Meta lidera el monto de las inversiones asociadas a planes de beneficio comunitario con un total de 432,005 millones de pesos desde 2005.

3.5 GESTIÓN DE TIERRAS

La ley 1274 de 2009 define la manera de abordar el relacionamiento formal con los propietarios de los predios a lo largo de los cuales se desarrolla un programa sísmico.

Según el artículo 1° de la ley mencionada “La industria de los hidrocarburos está declarada de utilidad pública en sus ramas de exploración, producción, transporte, refinación y distribución. Los predios deberán soportar todas las servidumbres legales que sean necesarias para realizar las actividades de exploración, producción y transporte de los hidrocarburos, salvo las excepciones establecidas por la ley. Se entenderá que la servidumbre de ocupación de terrenos comprenderá el derecho a construir la infraestructura necesaria en campo e instalar todas las obras y servicios propios para beneficio del recurso de los hidrocarburos y del ejercicio de las demás servidumbres que se requieran”.

La cuantía de la indemnización a que se refiere la regulación debe ser proporcional al uso de la parte afectada y debe determinarse de manera objetiva. Para ello, con frecuencia se hace referencias a las tablas de valores de cultivos que se encuentran en entidades agrícolas locales como las denominadas Unidades Municipales de Asistencia Técnica (Umata).

Esta es una tarea donde el apego a la ley y la trazabilidad de las actuaciones revisten una importancia capital. En regiones remotas es común que la documentación predial sea parcial y a veces inexistente lo cual plantea retos.

En todo caso, es recomendable iniciar con gran anticipación el proceso de caracterización predial para resolver completa y oportunamente situaciones problemáticas. Este proceso es también una oportunidad de establecer un diálogo temprano con propietarios y recibir sus inquietudes. Por esta razón es muy importante que las personas que adelanten el trabajo de

caracterización predial estén en capacidad de ofrecer al interesado información veraz acerca del proyecto y de sus implicaciones e impactos.

3.6 GESTIÓN DE EXPLOSIVOS

La gran mayoría de los levantamientos sísmicos en Colombia utilizan explosivos como fuente de energía. En la actualidad el explosivo utilizado de manera exclusiva en Colombia es el Sis-migel Plus fabricado por la Industria Militar Indumil y su compra se realiza a través del Departamento Control Comercio Armas, Municiones y Explosivos del Comando General de las Fuerzas Militares - DCCA.

<https://www.gov.co/ficha-tramites-y-servicios/T1736>

Las empresas de servicios de sísmica deben estar inscritas ante esta dependencia y son ellas quienes adelantan el trámite administrativo.

Lo siguientes son los requisitos que la ley establece para obtener el cupo para los explosivos o sus accesorios:

- Concepto favorable firmado por el Jefe de Estado Mayor de la Brigada encargada de la jurisdicción donde se almacenarán y utilizarán los explosivos y accesorios incluyendo la cantidad anual solicitada.
- Copia del informe de la revista de inspección, efectuada por la brigada encargada, que otorgó el concepto favorable para la utilización y manejo de explosivos en su jurisdicción.
- Solicitud dirigida al Departamento Control Comercio de Armas Municiones y Explosivos (DCCA) para la autorización, donde especifique: clase, cantidad de explosivos y accesorios que necesitan, actividad para la cual requieren el explosivo, forma y seguridad del almacenamiento, lugar y ubicación exacta donde se utilizarán los explosivos.
- Certificado de Cámara y Comercio con una vigencia no mayor a treinta (30) días. Fotocopia de la cédula de ciudadanía y pasado judicial del representante legal de la empresa.
- Fotocopia de la cédula de ciudadanía y pasado judicial del personal que manipula los explosivos y sus accesorios (almacenistas, explosivistas etc.).
- Carta de autorización para la investigación de antecedentes judiciales y disciplinarios dirigida al jefe del DCCA.
- Contrato debidamente firmado y sellado para contratistas de obras civiles, empresas de exploración sísmica o petrolera o de cañoneo de pozos.
- Certificado de idoneidad otorgado por una unidad de Ingenieros Militares al almacenista y operarios encargados (cargapozos, disparador) donde conste su experticia en el manejo de explosivos y sus accesorios.

En regiones remotas es común que la documentación predial sea parcial y a veces inexistente lo cual plantea retos.

- Plan anual de consumo, donde especifique el plan de compras, el plan de consumo de explosivos y accesorios.
- Justificación del consumo, parámetros de fuente y cantidad estimada de disparos diarios o mensuales.
- Ubicación exacta donde serán utilizados y almacenados los explosivos y accesorios (anexar en medio magnético o digital, fotos y videos de las instalaciones).
- Libro foliado para realizar el acta de apertura de control y movimientos de los explosivos y sus accesorios. Una vez inscrito ante el Departamento Control Comercio de Armas Municiones y Explosivos, debe reportarlos ante la Brigada que otorgó el concepto favorable para la utilización y manejo de explosivos en su jurisdicción, y posteriormente reportarlo los primeros cinco (5) días de cada mes.

Una vez obtenido el cupo, el trámite continúa con la autorización de compra. Dependiendo principalmente de la demanda y la disponibilidad, el trámite completo hasta que el material pueda estar disponible en el lugar de trabajo puede tomar varios meses. Es de primordial importancia comenzar los trámites con la anticipación suficiente y tener total claridad acerca de la manera en que se cumplirán los requisitos para el almacenamiento y transporte diario del material según lo requieran las autoridades militares locales.

La presentación más común del Sismigel es la de unidades de 900 gramos. Puede obtenerse en otras presentaciones pero ello requiere coordinación previa con Indumil para garantizar la fabricación del empaque en la dimensión requerida.

A agosto de 2021 los precios del Sismigel y los detonadores eran los que se indican en la tabla 6.

Item	Presentación	Valor unitario
Sismigel Plus	900 g	COL 14600
Detonador eléctrico.	12 m	USD 13.37
Detonador electrónico	15 m	USD 24.41

Tabla 6. Costo de unidades de Sismigel y detonadores. Fuente: Indumil.

A todos estos costos se añade un 42% de impuestos.

El Sismigel Plus es un explosivo tipo hidrogel aluminizado, con penritra y sustancias gelificantes que evitan la segregación de los ingredientes oxidantes y combustibles de la mezcla, sumergible en agua y sensible al detonador eléctrico sismográfico No 8. Tiene una alta velocidad de detonación, generando pulsación de una energía sísmica fuerte, aguda y de buena definición (ver tabla 7).

El envase está diseñado con dos porta-detonadores y un adaptador. Los dos porta-detonadores permiten que a criterio del usuario uno de los dos se use como *back-up* usando así dos detonadores sismográficos de manera segura. Está diseñado para operar a temperaturas entre 0 °C y 40 °C. Se puede utilizar en presencia de agua. Su manejo es muy seguro debido a su baja sensibilidad al roce y al impacto. No contiene nitroglicerina.

Los hidrogeles son compuestos que en su constitución no llevan ningún producto que por sí mismo sea explosivo sino que reaccionan de forma explosiva en el momento que se inician con el detonador. El conjunto del explosivo va en una masa acuosa que le da estas características. (Guía técnica para el uso y manejo de explosivos en voladuras bajo tierra y a cielo abierto, Mintrabajo, 2019).

El almacenamiento y transporte de los explosivos debe cumplir con los requisitos contenidos en el decreto 1886 de 2015 y debe, además, regirse por las regulaciones de las instituciones militares competentes.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL SISMIGEL PLUS	
Característica	Valor nominal
Densidad (g/cm ³)	1.2
Velocidad de detonación (m/s) (*)	5,600
Potencia absoluta en volumen, ABS (cal/cm ³)	1006
Potencia absoluta en peso, AWS (cal/g)	838
Potencia relativa en volumen, RBS (**)	133


Tabla 7. Especificaciones técnicas del Sismigel.

Figura 85. Arriba, caja de 16 unidades de 900 g de 53 cm x 23 cm x 23 cm. Abajo: unidad individual de 900 g de sismigel plus empacada en pvc roscado de 26 cm de largo y 4 cm de diámetro.



Otros explosivos comunes en sísmica

Internacionalmente se usan otros tipos de explosivos para operaciones sísmicas entre los cuales se destacan aquellos basados en pentolita, mezcla de TNT y Pentrita en proporciones variables. Este material exhibe una densidad y velocidad de detonación considerablemente mayores a las del Sismigel Plus. Dos ejemplos de explosivos sísmicos a base de pentolita son el OSX8 (Orica) y el *Geoprime* (Dyno Nobel) cuyas propiedades se muestran en la Figura 86.



OSX8 (Orica)

Technical Properties

Average Velocity of Detonation	24,490 ft/s (7464 m/s)
Gas generation *	630 l/kg
Energy *	6.19 MJ/kg
Detonating Pressure *	238
K bar	1.7 g/cc nominal
Hazardous shipping description	Boosters without detonators UN 0042 Packaging Group II

* Gas generation, detonating pressure and energy values are calculated using the IDex™ computer code owned by Orica for the exclusive use of its companies. Energy values are based on a cut-off pressure of 100 MPa. Other computer codes may give different values.

Geoprime
(Dyno Nobel)



Properties		SDS #1145
Energy ^a	(cal/g)	1,500
Gas Volume ^a	(moles/kg)	27.9
Velocity ^b	(m/sec)	7,500
	(ft/sec)	24,600
Detonation Pressure ^b	(Kbars)	230
Density	(g/cc)	1.63
Water Resistance	Excellent (up to 250 psi)	

^a All Dyno Nobel Inc. energy and gas volume values are calculated using PRODET™, the computer code developed by Dyno Nobel Inc. for its exclusive use. Other computer codes may give different values.

^b Unconfined 57 mm diameter x 2 kg charge.

Figura 86. Propiedades de explosivos basados en pentrita. Datos reproducidos de los catálogos del respectivo fabricante.

Un ejemplo práctico publicado en Achem (2011) ilustra las diferencias que puede representar el uso de un determinado explosivo. El caso describe un experimento de YPBF, Western y Dyno Nobel en la provincia de Neuquén, en Argentina (ver figura 87).

En el experimento se pueden apreciar las diferencias que produce el cambio en la proporción entre PETN y TNT en dos explosivos basados en pentolita.

“Las pentolitas con mejores resultados para la sísmica son las pentolitas puras y de proporción 62 PETN/ 38 TNT (CTF). Esta fórmula es la mejor pero también la más costosa (El TNT es más barato que el PETN y de menor velocidad que este). Al momento en que introducimos compuestos diferentes o diluimos esta proporción, se cambian las características de sensibilidad, velocidad de detonación, densidad, volumen de gases a generar y presión de detonación”.

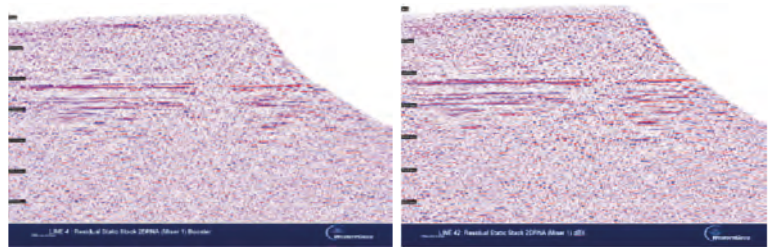


Figura 87. A la izquierda, apilado con Booster I-1000 y a la derecha un apilado obtenido con dbx. Los parámetros de adquisición se han mantenido constantes. El dbx produce una sección con mayor continuidad y mejor relación s/r. Achem(2011)

Biodegradación

La capacidad del explosivo para degradarse con el tiempo es un tema que ha sido objeto de considerable especulación. El mercado internacional ofrece dos tipos de mecanismos de degradación del material explosivo que buscan por diferentes vías que este pierda sus propiedades explosivas. Los dos tipos de mecanismos de degradación se describen a continuación con base en la información publicada por sus fabricantes:

Química

Consiste en el uso de una sustancia química que se activa al cabo de un tiempo específico con humedad y calor y que se encuentra separada y/o aislada del explosivo. En el momento en que se unen, el agente químico rompe los enlaces moleculares del explosivo volviéndolo inerte. El fabricante Orica maneja 2 productos de este estilo: el OSX 8 pentolita degradable que inicia su proceso a los 18 meses y las emulsiones degradables OSX 5 con inicio del proceso de degradación entre 3 y 12 meses.

Biológica

Esta técnica usa bacterias o microorganismos que se combinan con el explosivo y que se activan con la humedad y calor para desintegrar el explosivo una vez se activan. El inicio del proceso de biodegradación dependerá de la temperatura y cantidad de agua del pozo lo cual lo hace impredecible.

Según la información del fabricante *Dyno Nobel*, la compañía *Ensign-Bickford* desarrolló y patentó la tecnología de biorremediación que implica verter millones de microorganismos liofilizados (junto con nutrientes para esos microorganismos) directamente en el cartucho del producto *Geoprime Trojan* durante la producción. Cuando estos organismos naturales se sumergen en el agua, se activan, tal como se diseñaron, y comienzan a biotransformar lentamente el *Geoprime* sin detonar. Cuando se completa la biotransformación, los compuestos dejan de ser explosivos. Se requiere una inmersión completa y continua en agua para sostener el proceso de biorremediación. Además, el proceso depende de varios otros factores y condiciones ambientales. Por estas razones, *Dyno Nobel* no garantiza la efectividad del proceso de biotransformación o la duración del tiempo requerido para completarlo.

Detonadores

El detonador es el elemento que permite iniciar el proceso de liberación de energía. Existen dos tipos de detonador en el mercado:

Detonador eléctrico: Su inflamador obedece a una débil corriente para su iniciación, es utilizado en trabajos sísmicos y de geología, se debe manipular con cuidado, es sensible a la corriente estática que se puede producir por el operador e inyectarla al detonador al efectuar una mala manipulación, terminando en un accidente. De acuerdo a la casa fabricante las corrientes continuas necesarias para iniciarlos varían, pero, estos se pueden trabajar con una constante de 0.8 amperios para su iniciación.

Detonador electrónico: es un accesorio de voladura de última generación, conformado por un alambre dúplex y una cápsula metálica cerrada por un extremo. En su interior posee un circuito electrónico que permite programar el retardo de cada detonador que conforma la malla de voladura y la secuencia de disparo (parámetros usados en minería) un iniciador y un explosivo base. Para su iniciación requiere de un equipo para programar la voladura, y un iniciador que envía un impulso eléctrico para la detonación.



Figura 87A. Detonador sísmico.

Aunque el uso de detonadores electrónicos está ampliamente extendido internacionalmente, en Colombia se ha venido utilizando apenas en los últimos años. Estos detonadores aportan considerables ventajas a la seguridad y trazabilidad de las operaciones con explosivos. Su uso reduce drásticamente las posibilidades de detonación accidental y los fallos en el proceso de iniciación.

En Colombia, entre 2018 y 2019 se habían utilizado detonadores electrónicos en 4 proyectos sísmicos en los cuales se detonaron cerca de 20.000 puntos de disparo sin fallos y eliminando la práctica del doble detonador.

Indumil programa los volúmenes anuales de fabricación de acuerdo con los pronósticos de actividad que pueden ser obtenidos a través del análisis de las tendencias históricas recientes o por información directa que recibe de las empresas de adquisición sísmica. Resulta conveniente, a todas luces, mantener a Indumil al tanto de las variaciones de la actividad y de las novedades con respecto a posibles incrementos de demanda con el fin de que la oferta evolucione armónicamente y los tiempos de ejecución de los proyectos sísmicos no se vean afectados por falta de disponibilidad de material.

3.7 CONFLICTIVIDAD SOCIAL: MITOS Y REALIDADES

El método sísmico se aplica en todo el mundo desde hace más de 100 años y en Colombia ha sido utilizado por más de 60 años. Su aplicación práctica ha venido elevando sus estándares a través de la historia de la misma manera que lo han hecho todas las actividades industriales y, especialmente, aquellas relacionadas con la industria extractiva. No obstante lo anterior, en los últimos 20 años han venido creciendo campañas de desinformación que han pretendido asignar a la prospección sísmica efectos ambientales catastróficos señalándola como una amenaza para la vida. Este fenómeno ocurre hoy en día y fue observado y descrito por Sarria en 1996 de la siguiente manera:

“En Colombia a la detonación de las cargas empleadas para la exploración sísmica se les ha intentado asignar propiedades destructivas casi mágicas que van en contra de las leyes naturales y así surgen confusiones que a un funcionario público mal informado y siempre ocupado, le restan capacidad de acción y le estimulan la toma de decisiones equivocadas que perjudican en el corto plazo a los exploradores y desalientan a la industria petrolera, con el agravante de que en el largo plazo perjudican al país porque si por agotamiento de los yacimientos actuales Colombia debe importar combustibles, el nivel de vida de los colombianos decaerá porque el producto per cápita se reducirá apreciablemente.

Se escucha que los disparos de investigación acaban con las fuentes de agua, que afectan las construcciones de manera grave, que reducen la producción lechera de los hatos, que afectan la frecuencia con que ponen huevos las gallinas, que matan los peces de estanques a cien o más metros de distancia y que pueden producir deslizamientos de ladera. Es demasiado difícil que en condiciones de ocurrencia tan puntual y corta en el tiempo ocurran estos efectos de manera que afecten regiones enteras”.

En efecto, la prospección sísmica es una actividad cuyos impactos ambientales son leves y de naturaleza transitoria. Son claramente identificables y se controlan mediante la aplicación de las medidas de manejo ya descritas. Sin embargo, la difusión masiva de información inexacta a nivel nacional ha posicionado en el imaginario popular numerosos mitos que han crecido con el tiempo y que dificultan las dinámicas de relacionamiento cuando las empresas petroleras y las comunidades y sus representantes se encuentran en el territorio para acometer un proyecto exploratorio. Algunos de estos mitos se explican a continuación:

No existe regulación para sísmica 3D

A lo largo de este capítulo se ha hecho referencia a la extensa lista de regulaciones que aplican a la prospección sísmica y que hacen de ella una actividad que transcurre dentro de un riguroso marco regulatorio. Todos los instrumentos legales descritos propenden por garantizar una adecuada planeación y ejecución socio ambiental y contemplan el seguimiento por parte de las autoridades competentes y la presentación de informes técnicos periódicos que son documentos disponibles para el público en general.

La sísmica seca el agua

Los acuíferos son cuerpos de roca con capacidad de almacenar agua en sus espacios porosos o en sus grietas y fracturas. Generalmente poseen una gran extensión y pueden o no estar en comunicación con la superficie. La detonación de una o más cargas explosivas de un proyecto sísmico difícilmente puede causar afectación sobre un acuífero pues su impacto es localizado y no modifica las características hidrodinámicas de la roca en un radio superior a un metro. El nivel del fluido dentro del acuífero está controlado por la presencia de capas impermeables profundas que actúan como sello, por esta razón la detonación, que ocurre generalmente a una profundidad cercana a los 10 metros, no produce efecto sobre el nivel de las aguas dentro del acuífero.

Por su parte, un manantial es un punto donde el agua subterránea aflora a superficie. La regulación establece que no se

En efecto, la prospección sísmica es una actividad cuyos impactos ambientales son leves y de naturaleza transitoria.

pueden hacer detonaciones de fuentes sísmicas dentro de un radio menor a cien metros del manantial, lo cual previene la ocurrencia de cualquier afectación.

El profesor Carlos Molano (2011), actual vicepresidente para América Latina y el Caribe de la Asociación Internacional de Hidrogeología, se ha ocupado en repetidas ocasiones del tema y en sus publicaciones describe con detalle las diversas situaciones en las que interactúan los cuerpos de agua con las detonaciones sísmicas y explica algunas pocas situaciones específicas en las que puede ocurrir afectación sobre cierto tipo de nacimientos de no observarse las distancias mínimas.

Existen casos bien documentados de prospección sísmica con explosivos en cultivos de arroz en los Llanos Orientales y en el Valle Superior del Magdalena donde fue posible adelantar las operaciones de manera coordinada con los agricultores sin producir afectaciones ni pérdida de la productividad ni mucho menos del recurso hídrico. Esto es especialmente significativo teniendo en cuenta que este tipo de cultivo requiere la preservación del sello arcilloso que posibilita la inundación del terreno.

Los estudios existentes concluyen consistentemente que el potencial de afectación del recurso hídrico por efecto de la actividad de prospección sísmica es extremadamente bajo y podría llegar a ocurrir en condiciones poco comunes. No obstante lo anterior, es importante realizar una evaluación hidrogeológica previa e incorporar el conocimiento local de los habitantes del área de influencia del proyecto para identificar situaciones particulares de riesgo como la posible presencia de acuíferos confinados o semi-confinados cuyo sello se encuentre a profundidades menores a 10 m.

La sísmica produce terremotos, tumba las casas y genera deslizamientos

Los terremotos son causados por la liberación abrupta de energía que ocurre a profundidades de decenas de kilómetros o más, por el movimiento relativo entre placas tectónicas que interactúan entre sí y pueden acumular energía por largo tiempo. Comparar este fenómeno con la sísmica es totalmente desproporcionado y fuera de lugar. Sin embargo, en un esfuerzo por ilustrar órdenes de magnitud, la literatura aporta comparaciones que indican que un terremoto de magnitud 2, es decir, uno que apenas podría ser advertido por un ser humano, puede liberar energía equivalente a aquella producida por 600 kg de explosivos y que un sismo de magnitud 4 podría compararse con la explosión de 60 toneladas de TNT. Queda claro entonces que es imposible que la sísmica pueda producir o siquiera inducir un movimiento telúrico de gran escala.

En el ámbito local el tema fue abordado por la Universidad de los Andes en 1996 en el estudio realizado por Alberto Sarría, donde se hace un paralelo entre las magnitudes de sismos regionales y las vibraciones de detonaciones sísmicas llegando a la conclusión de que incluso a una distancia de 10 m una detonación de 10 kg de explosivo no debería producir daño a un nacimiento de agua.

Ahora bien, es claro que las fuentes sísmicas producen vibraciones que se transmiten en el subsuelo por distancias considerables. Registrar estas vibraciones e interpretar su significado es el objeto de la sismica y requiere instrumentos de enorme sensibilidad. Dichas vibraciones pueden llegar a ser tan débiles que el viento, la lluvia o las actividades culturales de una región pueden llegar a dificultar su identificación. Por esta razón se busca realizar la actividad de registro cuando las condiciones atmosféricas son favorables y el ruido ambiental es mínimo.


Para caracterizar la magnitud de la vibración que se produce por la activación de una fuente sísmica y su posible impacto sobre la infraestructura se utiliza universalmente la medición de la Velocidad Pico de Partículas. En Checa (2015) se presenta una discusión detallada del fundamento teórico del uso de la medición de velocidad pico de partículas en operaciones que generan vibraciones. Este es el fundamento objetivo para la determinación de distancias seguras a elementos sensibles y se trata de un tópico ampliamente validado e incorporado en las regulaciones internacionales desde hace décadas.

Un ejemplo de medición objetiva de las vibraciones ocasionadas por la sismica es el publicado por Camargo y Cuellar, (1992) -mucho antes de la promulgación de las guías ambientales- donde se describen los resultados de la evaluación realizada por la Universidad Surcolombiana por encargo de la Oficina de Prevención y Atención de Emergencias de Neiva atendiendo la solicitud de la comunidad y de diferentes entidades, con motivo de la adquisición del programa sísmico Neiva 3D .

El estudio señala entre sus conclusiones:

“Los valores de velocidad de partícula registrados en los pozos de producción sísmica (60 pies de profundidad y 300 g de Sismigel) fueron en promedio menores a 1 mm/seg y sus frecuencias dominantes fueron superiores a 19 ciclos/seg. Estos valores permiten concluir que las vibraciones del suelo originadas en el área urbana de Neiva, durante el estudio sísmico del campo Tello, son inocuas para las obras civiles e imperceptibles para las personas”.

Finalmente, en el tema de la estabilidad de los terrenos vale reafirmar que las detonaciones sísmicas por sí mismas no tie-



nen el potencial de producir derrumbes o procesos de desplazamiento en masa. Sin embargo, cuando existen procesos erosivos activos o situaciones de inestabilidad, estos pueden ser afectados o inducidos localmente por las detonaciones sísmicas o por cualquier otro tipo de intervención u obra civil. En múltiples ocasiones se han documentado con poco rigor -y publicitado profusamente en medios- situaciones en las que procesos activos de inestabilidad geológica han sido atribuidos a la actividad de prospección sísmica. Si bien es claro que la sísmica no puede originar tales impactos, también es claro que resulta totalmente inconveniente realizar actividades de prospección en cercanía de terrenos en condición inestable. Ello resalta, nuevamente, la importancia de contar con estudios de caracterización geotécnica del suelo que aborden de manera rigurosa este componente y documenten la condición de inestabilidad del terreno para establecer las exclusiones a las que haya lugar.

Giraldo, (2002) presenta un trabajo práctico enfocado al análisis de la vulnerabilidad de los suelos frente a las ondas generadas en la actividad sísmica a lo largo de líneas sísmicas en las que se utilizó una carga de 8 kg en pozos de 16 m de profundidad. El análisis técnico incorpora la medición de propiedades del suelo antes y después de la detonación de las cargas y además discute los aspectos sociales que necesariamente deben tenerse en cuenta para atender las inquietudes de las comunidades en el territorio.

Como parte de las conclusiones del estudio el autor anota:

“Después de analizar los resultados obtenidos a partir de los diferentes ensayos realizados en cada una de las muestras para los pozos de prueba, antes y después de la detonación, se concluye que las condiciones físico mecánicas de los materiales no presentan variaciones que se puedan relacionar a la detonación de la carga y que lleven a pensar en alteraciones de las estructuras internas de los materiales o que impliquen la generación de procesos de remoción en masa. Las cohesiones y ángulos de fricción obtenidas a partir de los ensayos de corte directo presentan valores similares antes y después del momento de la detonación, sin observarse cambios como resultado de la onda sísmica generada”.

En el mismo estudio, se subraya la importancia del papel de la cobertura vegetal en la estabilidad de los terrenos. La deforestación y el mal uso del suelo inciden de manera determinante sobre la competencia de los suelos y los hace susceptibles a la erosión con impactos especialmente graves en las estaciones lluviosas.

Además de lo anterior, ciertas edificaciones con especificaciones precarias de construcción (ejemplo: falta de vigas de

amarre de cimentación) suelen sufrir agrietamientos producidos por estos procesos de inestabilidad geológica o inclusive por cambios estacionales de humedad que producen expansión y contracción del terreno como lo describen Ruiz, Otorla, & Rodríguez (2007)

“... es importante diferenciar los daños inducidos por las vibraciones de las voladuras de aquellos inducidos por otros fenómenos como los cambios de temperatura o de humedad, gradientes de temperatura entre la noche y el día, asentamientos diferenciales, sobrecargas estructurales, cambios químicos en los materiales, durabilidad de los materiales, entre otros aspectos. Esto es particularmente importante si se tiene en cuenta que en Dowding y McKenna (2005) se menciona que movimientos del terreno con velocidades pico de 1.5 mm/s originados en voladuras generan un movimiento de grietas 10 veces menor que el asociado con fenómenos atmosféricos. El primer autor (Ruiz Valencia) coordinó un estudio en el que aparecieron fisuras y grietas en edificaciones de un piso que la comunidad asociaba con las voladuras en una mina cercana. Después de una exhaustiva investigación se logró demostrar que estos daños en realidad se debían a fenómenos expansivos del suelo de cimentación de las viviendas, los cuales generaban una serie de esfuerzos en los muros que superaban ampliamente la resistencia a tensión de la mampostería.”

En todas las circunstancias descritas, la recomendación es realizar evaluaciones geotécnicas rigurosas como parte del Plan de Manejo Ambiental en todas aquellas áreas donde se evidencien potenciales problemas de estabilidad de suelos, discutir la problemática con las comunidades y autoridades locales, establecer las medidas de manejo adecuadas para la gestión de riesgos y realizar el levantamiento exhaustivo de Actas de Vecindad de elementos potencialmente sensibles como edificaciones y obras civiles para añadir trazabilidad a los procesos y garantizar discusiones objetivas en caso de reclamación.

La sísmica es obsoleta. Existe la sísmica satelital

La mal llamada sísmica satelital hace referencia principalmente a un método conocido como *Electromagnetic Depth Sounding Technology* - EDST el cual combina técnicas de geoeléctrica con sensores remotos tal como lo describen Yakymchuk, Levashev, & Korchagin (2012).

La estrategia de mercadeo de este tipo de métodos en América Latina, una de cuyas formas adoptó el nombre de *In Ground Asset Mapping and Virtual Drilling*, se basó en la promesa de poder determinar con precisión, no solo la presencia, sino también, el volumen y propiedades de acumulaciones de hidrocarburos a gran profundidad y con resolución prácticamente ilimitada.

La manera como se difundió esta herramienta tenía como mensaje central la supuesta obsolescencia de la sísmica (Ver figura 88) y la atractiva opción de obviar los trámites ambientales, la gestión de tierras e inclusive la perforación exploratoria. Las empresas promotoras de estas técnicas lograron adelantar algunos proyectos en Ecuador y Colombia y desaparecieron de la escena tan rápido como llegaron.

La idea de la existencia de la “sísmica satelital” fue promovida intensamente entre las comunidades a lo largo de todo el territorio nacional por agentes interesados en su venta y llegó a generar una buena dosis de confusión entre el público en general. Naturalmente, esta herramienta exploratoria está lejos de lograr los resultados que postula y así lo han manifestado técnicos expertos que tuvieron acceso a los resultados de algunos de los pocos levantamientos realizados en Colombia.

La sísmica de reflexión con todas sus imperfecciones, continúa siendo el método por excelencia para el entendimiento de las complejidades del subsuelo y se utiliza alrededor del mundo en combinación con otras herramientas geológicas y geofísicas en el proceso de búsqueda de recursos naturales en el subsuelo.

LIMITACIONES DE TECNOLOGÍAS PREVIAS

- El único método, hasta fechas recientes, para investigar y explorar el petróleo y gas, era el **SISTEMA SÍSMICO** – que es inferior y técnicamente obsoleto, porque no es confiable, tiene capacidades limitadas y es más caro que el **Sistema de Mapeo de Activos en Terreno y Perforación Virtual™**;
- El sistema sísmico busca trampas, pero no puede determinar la presencia de hidrocarburos o minerales.
- Los costos del sistema sísmico 2D SEISMIC, que solo tiene el 30% de precisión, son más elevados. La tecnología 3D es todavía más cara y no prueba la existencia de petróleo o minerales.


SEA & LAND

Porcentaje medio global de los pozos productivos detectados por medio de aerodisizadores sísmicos es de alrededor del 30% de los pozos perforados.

Figura 88. Ejemplo de material promocional de la mal llamada “Sísmica Satelital” que plantea la supuesta superioridad de este método sobre la prospección sísmica.

No existen estudios acerca de los impactos de la sísmica

En 1997, La Universidad de Los Andes recibió el encargo de realizar un estudio para estimar las distancias mínimas de las detonaciones sísmicas a elementos sensibles como cuerpos de agua, nacimientos, pozos de agua y otras obras de infraestructura. El estudio, liderado por el ingeniero Alberto Sarria, realizó



un análisis teórico que abordó el cálculo de los esfuerzos producidos por la detonación de una carga, así quedó registrado en las Bases de normas para evitar daños producidos por efectos de explosiones de Exploración geofísica en fuentes de agua y edificaciones cercanas, Sarria (1998). El objetivo de dicho análisis fue el de proveer valores de referencia que pudieran incorporarse a las distancias mínimas que se venía discutiendo para las guías ambientales.

Las consideraciones teóricas de Sarria fueron complementadas con mediciones de campo en proyectos donde se realizaron pruebas experimentales donde se midieron las propiedades fisicoquímicas del agua antes y después de la detonación. Ver Martínez (2002). Este estudio sirvió en las importantes discusiones subsiguientes que llevaron a la expedición de las Guías Ambientales.

Existe un gran número de estudios, nacionales e internacionales, que se han ocupado de documentar el impacto de las actividades de prospección sísmica sobre los elementos ambientalmente sensibles. La Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia - UPTC realizó un extenso análisis bibliográfico comparativo que reúne una muestra de más de 90 estudios y regulaciones, publicadas entre 1967 y 2014, que abordan el tema de manera rigurosa. El estudio confirma que los impactos producidos por la actividad son insignificantes. El mismo estudio realiza una comparación entre las distancias mínimas que especifican diferentes regulaciones internacionales.

Un referente importante es el estudio multidisciplinario adelantado por la Universidad Nacional Autónoma de México en el estado de Veracruz, que comprendió 395 aprovechamientos de agua subterránea, 120 terrenos de cultivos (1,934 has), 207 análisis de muestras de agua y 118 viviendas, en una superficie total de 2,167Km². Los resultados confirman que los impactos son leves y transitorios y que de ninguna manera alcanzan una escala regional.

El estudio también hace visible que las malas prácticas agrícolas, la mala disposición de aguas residuales y la sobreexplotación del agua subterránea, entre otros muchos factores, hacen que se presente un deterioro continuo de los indicadores ambientales y que agudizan los conflictos locales por el uso de recursos. Estudios como este, permitieron avanzar en la formulación de una regulación para las operaciones de sísmica terrestre en México, que en efecto se produjo con la promulgación de la **Norma Oficial Mexicana NOM-026-SESH-2007, Lineamientos para los trabajos de prospección sísmológica petrolera y especificaciones de los niveles máximos de energía**. La

Existe abundante información técnica local e internacional acerca del tema de los impactos de la sísmica, pero, quizás dicho conocimiento no ha sido suficientemente socializado.

Norma 026 es un ejemplo de relacionamiento interinstitucional multidisciplinario, pues, en su momento intervinieron en su construcción las siguientes entidades:

- Secretaría de Energía, Dirección General de Exploración y Explotación de Hidrocarburos.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Dirección General de Energía y Actividades Extractivas.
- Secretaría de Marina, Dirección General Adjunta de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología.
- Pemex Exploración y Producción, Subdirección de la Coordinación Técnica de Exploración y la Subdirección de Distribución y Comercialización.
- Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería.
- Instituto Mexicano del Petróleo, Dirección de Exploración y Producción.
- Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, A.C.
- Asociación Mexicana de Geofísicos de Exploración, A.C.

Esta regulación puede considerarse un referente válido para el ámbito colombiano pues las condiciones socio ambientales del entorno mexicano son similares. En adición a los estudios formales que se han referido, existen innumerables informes de cumplimiento ambiental y reportes finales de operaciones de programas sísmicos que son entregados rutinariamente a las autoridades competentes y que también proveen información objetiva que contribuye al entendimiento de los impactos reales y sus medidas de manejo.

Puede advertirse entonces, que existe abundante información técnica local e internacional acerca del tema, pero, quizás dicho conocimiento no ha sido suficientemente socializado entre los grupos de interés en Colombia. Las asociaciones profesionales como la ACGGP, la ACIPET y la Sociedad Colombiana de Geología han desarrollado programas de difusión técnica que han llegado a todo tipo de públicos interesados, buscando que las discusiones en torno a este y otros temas relacionados con la energía se den dentro de un marco rigurosamente técnico, libre de especulación.

La malla 3D es rígida

Se dice que la malla de diseño de un levantamiento 3D es rígida y que es imposible evitar la afectación sobre viviendas y cuerpos de agua. Esta afirmación desconoce qué tanto la posición de estaciones fuente, como receptoras, es completamente flexible para respetar las distancias mínimas. De hecho, como se discutió en el capítulo 2, rara vez la geometría de diseño se conserva inalterada. La disponibilidad de equipos totalmente inalámbricos añade considerable flexibilidad. No obstante, la exis-

tencia de grandes zonas de exclusión impacta negativamente la calidad de los datos y puede llegar a comprometerlos seriamente, en especial cuando los objetivos son relativamente someros, dado que el impacto de una exclusión se hace más profundo en la medida en que crece el tamaño de la misma.

Un subproducto de un proyecto de adquisición sísmica es el inventario de elementos sensibles que han sido debidamente georreferenciados y que permite evidenciar el cumplimiento de las distancias mínimas establecidas por la regulación aplicable.

3.8 PEDAGOGÍA REGIONAL

Las circunstancias de conflictividad social vividas a partir del año 2010, agravadas por la desinformación reinante en todos los ámbitos de la vida nacional, afectaron de manera grave la viabilidad social de múltiples proyectos de exploración y producción de petróleo y gas. Las discusiones mediáticas, en torno a los impactos ambientales de las actividades de la industria petrolera, ocuparon la agenda informativa del país. Al tiempo se hizo evidente el requerimiento de un esfuerzo pedagógico sin precedentes, para garantizar un debate equilibrado y riguroso de los temas. Las brechas en el lenguaje hacían difícil la transmisión del conocimiento entre actores disímiles, que se esforzaban por expresar sus preocupaciones y puntos de vista cada uno desde su propia perspectiva. La vías de hecho, materializadas en paros y bloqueos, se convirtieron en una constante, planteando un enorme reto al relacionamiento entre industria, gobierno y comunidades. La prospección sísmica fue una de las actividades que sufrió de manera especialmente crítica este escenario que alcanzó dimensiones dramáticas en algunos casos. Dentro de este contexto, la Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo (ACGGP) asumió la tarea de abandonar su zona de comodidad y emprendió la tarea de llenar los vacíos de información técnica, llegando a todo tipo de público y con resultados extraordinarios que constituyen un referente de enorme valor. Profesionales experimentados y jóvenes profesionales interdisciplinarios conformaron una fuerza de trabajo que rápidamente se distribuyó por todo el país con la consigna de divulgar las geociencias con todo rigor. El geólogo Flover Rodríguez Portillo, director ejecutivo de la ACGGP, ha escrito, desde su propia experiencia, esta sección en la que se describe la filosofía del programa y sus extraordinarios logros:

¿Qué es el Programa de Pedagogía Regional?

El Programa de Pedagogía Regional es una iniciativa centrada en la difusión de la geología, como conocimiento esencial para todos los habitantes de Colombia. Con este programa se busca, desde la interdisciplinariedad, acercar el conocimiento

técnico de la geología a todas las personas que habitan nuestro territorio, basados en el diálogo de saberes, el respeto por el conocimiento de los otros, la adaptación del lenguaje y la necesidad de escuchar a la sociedad en áreas de influencia de proyectos de desarrollo.

Comunicación de la ciencia

Una de las principales dificultades que ha enfrentado la comunidad científica tiene que ver con la complejidad de abrir su campo de investigación al público general, debido a lo enorme, diverso y especializado que puede ser.

Las publicaciones científicas generalmente son incomprensibles para el público no científico, lo que genera una barrera entre lo que sucede en el mundo de la ciencia y el impacto que tienen sus adelantos. Una buena forma de contribuir a hacer visible la importancia de la ciencia para una sociedad es haciendo una correcta y amplia **divulgación** de la misma.

En este sentido es primordial aclarar algunos términos que se utilizan comúnmente en estos espacios: cuando la transferencia de conocimiento se da entre especialistas, por ejemplo cuando se publican los resultados de una investigación, suele usarse la palabra **difusión** del conocimiento, como la presentación de trabajos en un congreso científico.

Por otro lado, cuando se quiere presentar el conocimiento científico al público general, normalmente se usa la palabra **divulgación**. Estas labores involucran entre sus destinatarios a diferentes públicos: científicos, empleados de instituciones de gobierno, docentes, estudiantes y público general. Es claro, entonces, que tanto la difusión como la divulgación del conocimiento son actividades que hacen parte de la comunicación, aunque normalmente los públicos destinatarios se comportan de manera pasiva. Entonces, cuando en la participación del conocimiento científico uno de los objetivos es buscar el diálogo, el intercambio de saberes o experiencias, se debe emplear el término **comunicación** de la ciencia.

La comunicación de la ciencia comprende factores clave para desarrollarse de manera correcta y constructiva, Estrada (1992). En primer lugar, está la claridad del mensaje que llamaremos adaptación del mensaje de acuerdo al público objetivo, que debe conservar la rigurosidad científica del concepto, enfrentando el reto de lo especializado que puede ser el lenguaje científico y el contexto en que dicho conocimiento fue concebido. En este escenario, siempre es recomendable recurrir a la cotidianidad del público objetivo para utilizar elementos geológicos comunes a ellos, como análogos, o ejemplos para desa-



rollar las temáticas a divulgar. En segundo lugar, es prudente compartir con el público la rigurosidad con que se elabora dicho conocimiento y el continuo proceso de construcción y renovación a que está expuesto.

El último elemento, que debe permanecer en cualquier escenario de divulgación, es que el público se apropie del conocimiento y lo integre a su realidad cultural y social. Entendiendo el concepto de apropiación social del conocimiento como un proceso que implica la disposición de los conocimientos científicos y tecnológicos en un escenario y lenguaje comunes para la sociedad. Marín, Agudelo (2012).

La divulgación de la ciencia debe contemplar la estrecha relación entre el conocimiento aplicado, su impacto en la vida de las personas y el desarrollo de la sociedad. Esta característica es clave para lograr resultados positivos y que el conocimiento, finalmente, sea de utilidad para la toma de decisiones, en escenarios como la planificación de los territorios, la gestión de los mismos y la implementación de proyectos minero-energéticos y de infraestructura, entre otros.

Involucrar estos tres elementos en cualquier proyecto que contemple la divulgación del conocimiento es recomendable y estratégico para lograr el entendimiento de la ciencia como un elemento esencial y útil para la sociedad.

Desarrollo sostenible

Un objeto principal de estudio de la geología es la relación entre el ser humano y el medio ambiente, lo que comprende riesgos naturales, recursos minero-energéticos e influencia antrópica en los procesos geológicos Tarbuck, E. J., & Lutgens, F. K. (2005).

Desde hace algunas décadas se viene insistiendo, cada vez con mayor fuerza, en la generación de capacidades de producción y desarrollo científico-tecnológico como el modo más seguro hacia la auto-sostenibilidad y el progreso. Marín Agudelo (2012). Por esta razón, en los últimos años se han desarrollado en distintos ámbitos una serie de prácticas para el mejor aprovechamiento de los recursos, tanto, que la "sociedad postindustrial se caracteriza por haber pasado de la industria productora de objetos, a la producción de servicios y a una economía basada en el conocimiento", (Moreiro, 2001, p. xix). Las ciencias de la Tierra tienen la posibilidad de impactar la consecución de los objetivos de desarrollo sostenible planteados por la ONU en el sentido de que el conocimiento científico fundamenta el avance de muchos de los desarrollos tecnológicos, de gestión y ordenamiento, necesarios para avanzar en la construcción de estrategias de Sostenibilidad.

La divulgación de la ciencia debe contemplar la estrecha relación entre el conocimiento aplicado, su impacto en la vida de las personas y el desarrollo de la sociedad.

Reconocimiento y defensa de la profesión G&G

En Colombia la profesión del geólogo existe desde el año 1965 con la creación del primer departamento de geociencias en la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Dicho programa fue concebido en su momento para atender la creciente necesidad de profesionales en ciencias de la Tierra que atendieran los retos que afrontaba la exploración de recursos minero-energéticos. Pasaron cerca de 25 años para que se creara el segundo programa en el país, posteriormente la carrera floreció en su crecimiento y dispersión geográfica. Para 2021, Colombia contaba con 7 programas de Geología, 4 programas de Ingeniería Geológica, 1 programa de Geociencias y 1 recién creado programa de Ciencias del Sistema Tierra.

Según datos del Consejo Profesional de Geología, encargado de regular la profesión del geólogo en el país, a diciembre de 2019 se habían matriculado 5300 geólogos en Colombia. De acuerdo al COPNIA, organismo que regula la profesión de la ingeniería, se han matriculado cerca de 2500 ingenieros geólogos en el país. En términos generales, estas carreras han respondido históricamente a aportar en la exploración y explotación de recursos minero-energéticos, exploración de aguas subterráneas, gestión del riesgo y geotecnia, de acuerdo la descripción curricular de cada uno.

La profesión de geofísico no se ha creado en el país curricularmente, la mayoría de profesionales considerados geofísicos son geólogos u otras profesiones afines con estudios de posgrado en dicha rama. Existen programas de maestría y doctorado en Geofísica en los principales departamentos y escuelas de geología como los de la Universidad Nacional de Colombia y la Universidad Industrial de Santander.

La mezcla de conocimiento geológico junto con los principios de la física ha permitido el desarrollo de técnicas y tecnologías que nos permiten explorar el subsuelo en búsqueda de recursos naturales como petróleo, minerales y agua. Métodos geofísicos como la geoeléctrica y la gravimetría, el uso de sensores remotos y la adquisición sísmica, permiten identificar propiedades particulares de las rocas a partir de su respuesta a estímulos generados por ondas de diferentes tipos, lo que ha permitido construir modelos de reconocimiento de características tan particulares como el tipo de roca, su densidad y contenido de fluidos, entre otros.

¿Por qué surgió el Programa de Pedagogía Regional?

Crisis de precios 2014: a finales del año 2014 se dieron los primeros reportes de lo que se convirtió en un descalabro de los precios de petróleo en el mundo, producto de una agresiva

estrategia de la OPEP (Organización de Países Productores de Petróleo) por mantener el control ante la creciente adquisición de nuevas reservas por parte de Estados Unidos y el desarrollo de los yacimientos no convencionales.

Las medidas de recorte en OPEX y CAPEX de las empresas petroleras no se hicieron esperar y el país experimentó una de las más recias crisis, no solo por las pérdidas a nivel de exportación, sino por el impacto profundo que vivió toda la cadena de valor asociada a esta actividad: comunidades aledañas a proyectos de exploración vieron cómo se retiraron y se cancelaron proyectos de inversión social en sus territorios, proveedores de bienes y servicios locales, regionales y nacionales -que seguramente habían hecho inversiones importantes a escala de uno para atender la creciente actividad que se avecinaba- vieron cómo sus negocios tuvieron que cerrar por la nula actividad que perduró durante el 2015 y hasta el 2018, aproximadamente.

Y por supuesto, carreras afines como la Ingeniería de Petróleo y la Geología se vieron profundamente afectadas en la cantidad de profesionales requeridos por esta industria para atender las necesidades exploratorias y cumplir con los compromisos de producción de petróleo en Colombia.

Crisis comunicativa 2015 en adelante: importantes medios de comunicación nacionales iniciaron una campaña de información sobre los impactos que la industria O&G producía en el país. Periodistas reconocidos, con alto nivel de desconocimiento, ejercían una influencia negativa en la percepción del público sobre las actividades de exploración y producción de hidrocarburos en Colombia.

Lamentablemente, ante esta situación, la respuesta de la industria petrolera se tomó más tiempo del que debía antes de empezar con tímidas acciones, a mejorar sus ejercicios de relacionamiento. La industria y el país han carecido de una estrategia nacional de comunicación efectiva sobre las actividades que realizan y cómo se hacen, que transmita la información de manera transparente, honesta y oportuna. Hacerlo permitiría generar espacios pedagógicos que redunden en la construcción de estrategias con objetivos comunes a todos los actores involucrados.

Importancia de las geociencias para el país: El progreso de la sociedad y la calidad de vida de las personas ha sido posible en buena medida gracias a la explotación y uso de recursos naturales, especialmente de aquellos que tienen la capacidad de generar energía.



Durante centenas de años el uso de recursos como la madera, el carbón y posteriormente el petróleo y el gas le permitió a los habitantes de distintos países del mundo consolidar su economía y mejorar en términos de infraestructura, acceso a la energía y condiciones de vida.

El ordenamiento territorial es un instrumento de planificación y de gestión de las entidades territoriales y un proceso de construcción colectiva de país, que se da de manera progresiva, gradual y flexible, con responsabilidad fiscal, tendiente a lograr una adecuada organización político-administrativa del Estado en el territorio, para facilitar el desarrollo institucional, el fortalecimiento de la identidad cultural y el desarrollo territorial; entendido este, como desarrollo económicamente competitivo, socialmente justo, ambiental y fiscalmente sostenible, regionalmente armónico y culturalmente pertinente en concordancia con la diversidad cultural y físico-geográfica de Colombia (Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial. Colombia, 2011). Dicho ordenamiento requiere, entre muchos factores, considerar los elementos geológicos de los territorios sobre los cuales se deben integrar factores complementarios.

Metodologías

La Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo - ACGGP, comprometida con el objetivo de brindar información en un lenguaje adaptado a la comunidad en general, ha venido implementando, desde el año 2017, un Programa de Pedagogía Regional en diferentes regiones y áreas de influencia de proyectos de exploración y desarrollo de hidrocarburos en Colombia. La filosofía fundamental que sustenta el Programa es el “diálogo de saberes”. Una propuesta responsable, veraz y empática, que propicia escenarios en los cuales se intercambian conocimientos, opiniones y dudas.

El Programa utiliza diversos mecanismos comunicativos y pedagógicos para conversar con las comunidades como foros, conversatorios, talleres, conferencias, diplomados y otros; adicionalmente, construye material técnico-informativo. Esta propuesta hace parte esencial de la misión de la ACGGP, pues se establece como una de las más importantes herramientas para contribuir a la apropiación social del conocimiento geocientífico.

Los procesos de pedagogía regional se fundamentan en la formación de formadores, una apuesta que se basa en capacitaciones, foros, cursos y demás escenarios para brindar herramientas pedagógicas y comunicativas a nuestros asociados y asociadas desde un trabajo interdisciplinar, con el objetivo de crear nuevas dinámicas de relacionamiento asertivo entre los profesionales de las ciencias de la Tierra y públicos múltiples en-

tre los que sobresalen públicos escolares, infantiles, familiares, profesionales no afines o pertenecientes a comunidades que habitan los territorios en donde se adelanta trabajo de campo.

Resultados

Desde el 2017, La Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo (ACGGP) ha implementado un programa de Pedagogía Regional en diferentes regiones y áreas de influencia de proyectos de exploración y desarrollo de hidrocarburos, así como en ciudades, municipios, corregimientos y diversos escenarios en el país, con el objetivo de divulgar el conocimiento geocientífico en un lenguaje adaptado a la comunidad, mediante diversos mecanismos comunicativos y pedagógicos, construyendo confianza y gestionando relaciones entre las comunidades y los actores de la industria de hidrocarburos (ACGGP, 2019).

Siguiendo con esta línea, la ACGGP junto a diferentes compañías de exploración y producción de hidrocarburos en el país como Canacol Energy y Gran Tierra Energy, han desarrollado talleres de pedagogía regional en dieciocho (18) departamentos del país, trabajando con más de 10000 personas (Figura 89), con el objetivo de construir una relación entre los geólogos y la comunidad, unos y otros expresan sus saberes frente a frente y conforman una red de aportes cognitivos entre lo académico y lo comunitario (Pérez, E., & Alfonzo, N., 2008).

Esto crea un diálogo de saberes cuya finalidad es divulgar el conocimiento geocientífico, específicamente los conceptos relacionados a la adquisición sísmica y su interacción con el ciclo del agua en el territorio.

En el año 2021 la ACGGP estableció una alianza estratégica con dos de las compañías más importantes del sector para el país, Ecopetrol y Parex Resources, con quienes inició una titánica labor para diseminar el conocimiento geológico entre las comunidades de las áreas de influencia de importantes proyectos de Exploración en Colombia, buscando generar un reconocimiento de la labor profesional que realizan los geólogos y geofísicos, velando por la defensa del ejercicio de su profesión y aportando en la viabilización de las actividades de la industria.

A través de esta alianza, la ACGGP se afianzó como un actor neutral, en el que la sociedad confía y al cual se acerca para comprender temas relacionados con la adquisición sísmica, la perforación exploratoria, la transición energética y el desarrollo sostenible teniendo como pilar el conocimiento geológico de los territorios. Durante este año, se trabajó con más de 1500 personas en diferentes lugares del país, llegando a ocho depar-



Figura 89. Alcance del programa de pedagogía regional en el territorio colombiano. Fuente: ACGGP

tamentos y más de veinte municipios en la labor de posicionar el conocimiento geológico en el día a día de las comunidades.

Lo que busca la ACGGP es que, a través de metodologías que integren el conocimiento técnico geológico, con la pedagogía y la comunicación, se haga posible brindar herramientas y espacios que permitan la apropiación social del conocimiento de una manera efectiva. Se parte de un diagnóstico social para conocer de primera mano las características de las comunidades con las que se establecerá contacto, sus conflictos internos, líneas invisibles, herencias culturales, factores históricos, entre otros, que permitan dinámicas empáticas al momento de interactuar. Posteriormente, se realiza una identificación de los elementos geológicos cotidianos alrededor de la ubicación de la comuni-

dad, con el propósito de utilizarlos como análogos. Durante los talleres, se busca que reconozcan la geología en su región y la importancia del conocimiento geológico para el desarrollo.

Finalmente, se implementan las metodologías y constantemente se evalúa su efectividad a través de procesos de reorientación con los grupos de interés. Se ha visto con satisfacción, que la implementación de estas metodologías tiene un impacto positivo en el conocimiento adquirido y apropiado por los grupos de interés, como se aprecia en la (Figura 90).

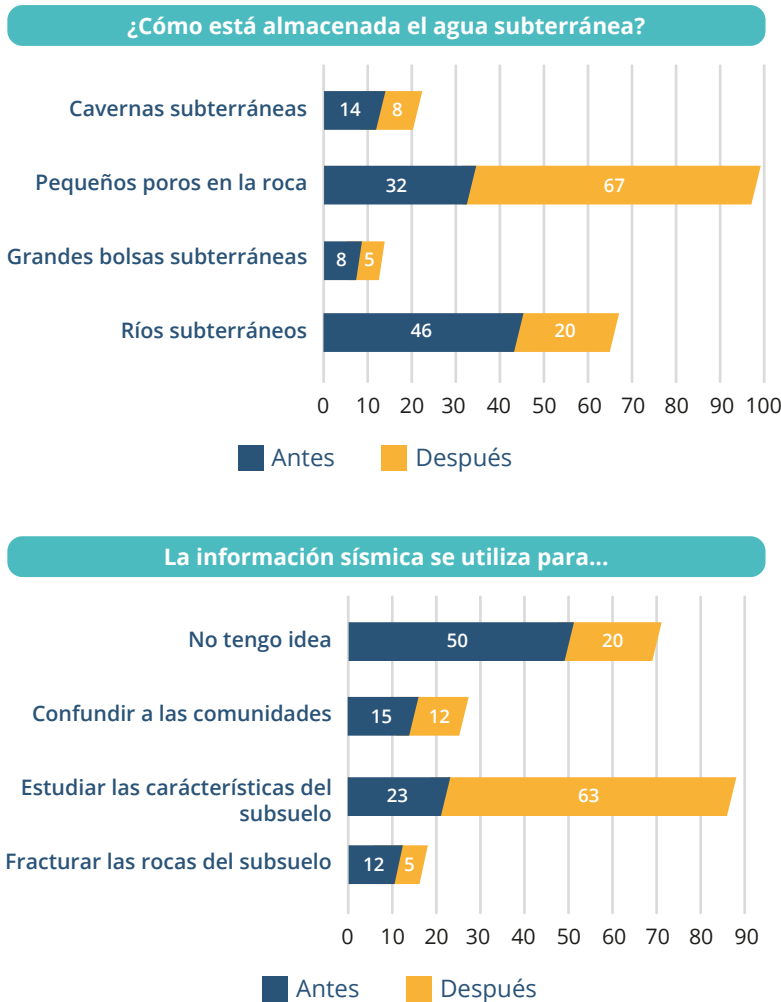


Figura 90. Percepción social de la sismicidad y el agua antes y después de una jornada de pedagogía en Sahagún, Córdoba y La Unión, Sucre. ACGGP, entre noviembre de 2018 y enero de 2019. Muestra de 850 personas de veredas del área de influencia del proyecto. Este ejercicio permite verificar el nivel de apropiación del conocimiento.

Es prudente resaltar que, la ACGGP como una entidad sin ánimo de lucro, ha venido fortaleciendo y afianzando su Programa de Pedagogía Regional a través de inversiones propias para llegar a diferentes públicos de la sociedad, por lo que se han aprovechado espacios cotidianos como la ciclovía de Bogotá, bibliotecas, colegios públicos y privados y se ha tenido el apoyo de capítulos estudiantiles de diferentes universidades y ciudades del país, para diseminar el conocimiento geológico entre la sociedad.

En el año 2020, solo un mes antes de que la cuarentena por la COVID - 19 iniciara, y con ella el auge de las actividades virtuales, la ACGGP logró trabajar con cerca de 1300 estudiantes de 6 localidades diferentes en la ciudad de Bogotá y 2 municipios aledaños. (Ver figura 91). Posteriormente, el programa aprovechó el escenario virtual, para que de manera remota, se trabajara con cerca de 600 estudiantes de 22 colegios del Distrito de Bogotá.

Programa de Pedagogía Regional Campaña Ciudad Geológica 2020 I-II

TALLERES PRESENCIALES

+1300 estudiantes
6 localidades de Bogotá
2 Municipios

TALLERES VIRTUALES


22 colegios
600 estudiantes
8 localidades de Bogotá



Figura 91. Campaña ciudad geológica, Programa de Pedagogía Regional.

Lecciones aprendidas

Como parte de su estrategia de transferencia de conocimiento y en pro de construir una política de responsabilidad social útil para los procesos que tengan que ver con relacionamiento entre grupos de interés y actores relacionados con las geociencias, la ACGGP ha mapeado una serie de lecciones aprendidas y buenas prácticas que sugieren una evolución de los modelos de relacionamiento, basadas en la pedagogía como eje fundamental y reconociendo la necesidad de elevar los niveles educativos en las regiones de nuestro país.



El reconocimiento comunitario: es fundamental identificar la situación particular que vive cada comunidad o grupo de interés y reconocer, especialmente, los conflictos históricos o presentes que puedan estar afrontando. No podemos ignorar que los más de 60 años de conflicto armado que nuestro país ha vivido, han dejado huellas y cicatrices en el tejido social especialmente de nuestras comunidades, por lo que debemos respetar dichas situaciones y procurar un enfoque empático en el relacionamiento social.

La veeduría ciudadana: la ley 850 de 2003 de la Constitución Política de Colombia define este ejercicio como “el mecanismo democrático de representación que le permite a los ciudadanos o a las diferentes organizaciones comunitarias, ejercer vigilancia sobre la gestión pública, respecto a las autoridades administrativas, políticas, judiciales, electorales, legislativas y órganos de control, así como de las entidades públicas o privadas, organizaciones no gubernamentales de carácter nacional o internacional que operen en el país, encargadas de la ejecución de un programa, proyecto, contrato o de la prestación de un servicio público”. Es clave reconocer que dicha vigilancia ciudadana debe partir o fundamentarse, para el caso de la industria minero-energética, de un conocimiento básico de los conceptos que atañen las actividades y procesos que se realizan, con el propósito de fortalecer los grupos veedores para que tengan la capacidad de ejercer prácticas responsables, no solo a nivel local, ya que sus decisiones pueden llegar a tener repercusiones a nivel nacional.

El fortalecimiento institucional: la ACGGP concibe a la sociedad como el grupo de actores que se relacionan entre sí, por lo que las instituciones públicas, organismos de control, autoridades ambientales y administradores de los recursos; son grupos clave a quienes debemos fortalecer a través de la transferencia de conocimiento útil, para la toma de decisiones y la adecuada, y responsable, gestión de políticas públicas. Somos conscientes de la responsabilidad de contar con conocimiento geológico y geofísico, cuando se trata de velar por la correcta realización de actividades y proyectos, salvaguardando los componentes sociales y ambientales de nuestros territorios.



Figura 91A. El programa de pedagogía regional llega a las regiones apartadas y entrega un mensaje rigurosamente técnico, relevante para la audiencia y con un lenguaje sencillo que favorece el diálogo intercultural. Foto ACGGP.

Gestión de costos y contratación

4.1 ESTRUCTURA DE COSTOS

Para comenzar a analizar la estructura de costos de una brigada sísmica de altos estándares de calidad conviene dividirlos en tres grandes grupos a saber:

- ✓ **Costos directos**
- ✓ **Costos asociados**
- ✓ **Costos de soporte operacional**

Costos directos

Son aquellas actividades que hacen parte de la actividad de prospección sísmica como tal y van desde la socialización hasta la restauración. El costo de estas actividades depende principalmente de la logística requerida y de los rendimientos reales que se obtengan en el campo.

Los costos totales de cada actividad se encuentran íntimamente ligados al cronograma de actividades y al plan de operaciones concebido para el proyecto. Cambios significativos en la planeación logística tendrán, sin duda, impacto en los costos de las actividades individuales y por ende en el costo total del proyecto.

Una aproximación que resulta conveniente es realizar el cálculo de los costos en términos unitarios (diarios o semanales) para luego determinar el costo total del proyecto mediante la combinación de los costos unitarios con el cronograma estimado del proyecto. Con fines de ilustración, usaremos en la discusión subsiguiente las actividades que se relacionan a continuación y que comprenden buena parte de la operación:

1. Scouting, preparación inicial
2. Socialización
3. Movilización y construcción de campamentos
4. Gestión de tierras
5. Red geodésica
6. Topografía
7. Perforación y carga
8. Registro
9. Restauración
10. Campamento base
11. Campamentos volantes
12. Desmovilización
13. Soporte central

Los costos de cada actividad están ligados al cronograma de actividades y al plan de operaciones. Cambios significativos en la planeación logística tendrán impacto en el costo total del proyecto.

Todas las actividades hacen uso intensivo de mano de obra calificada y no calificada por lo cual los salarios y prestaciones constituyen un porcentaje importante del valor total del proyecto sísmico.

Costos asociados

Corresponden a actividades conexas con la operación sísmica que frecuentemente son conducidas por el contratista sísmico bajo la modalidad de gastos reembolsables. Se pueden incluir en esta categoría los pagos de servidumbres y afectaciones, estudios técnicos complementarios y mantenimiento de vías por citar algunos ejemplos.

Dependiendo de las características particulares del área de influencia del proyecto estos costos pueden variar significativamente. El pago de afecciones es un aspecto que debe supervisarse rigurosamente con el fin de garantizar una adecuada trazabilidad de todo el proceso de gestión inmobiliaria y para mantener los pagos dentro de la proporcionalidad y razonabilidad que los valores de mercado indiquen.

Costos de soporte operacional

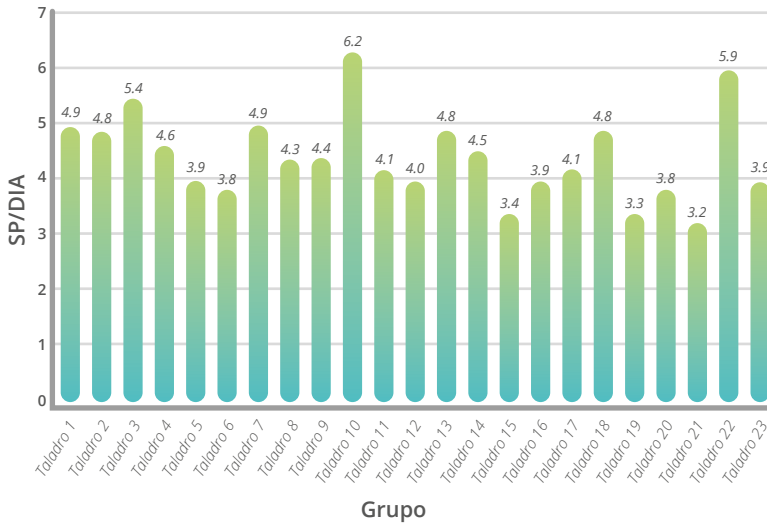
Son aquellos en que incurre el operador para asegurar el cumplimiento de regulación obligatoria y/o estándares propios. Entre ellos se cuentan la interventoría, el plan de manejo ambiental y los planes de inversión social voluntaria, entre otros.

La correcta estimación del rendimiento de las actividades operativas es de la máxima importancia para realizar un buen costeo. Una fuente de información que siempre debe consultarse es aquella de levantamientos sísmicos anteriores en la zona o en su vecindad. Los reportes finales de operaciones sísmicas han sido, y siguen siendo, documentos muy completos que contienen detalles valiosos como rendimientos operativos, dificultades particulares, costos de bienes y servicios, alertas socio ambientales, etc. (Figura 92).

La razonabilidad de los rendimientos siempre debe ser analizada por el operador al momento de estudiar una propuesta técnico-económica dentro de un proceso de licitación. Rendimientos demasiado optimistas pueden dar lugar a precios anormalmente bajos.

La realización de reconocimientos de campo es otra fuente importante de información. En ellos se pueden evidenciar las condiciones de acceso e infraestructura general. En ocasiones es viable la realización de ensayos de perforación para definir con precisión la tecnología más adecuada para el tipo de terreno.

Estadística de rendimiento de cuadrillas de perforación en un programa sísmico.



Estadística de tiempos de perforación en un programa sísmico.

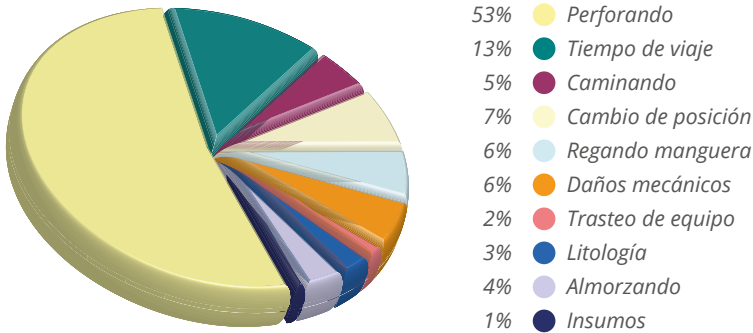


Figura 92. Ejemplo del tipo de estadísticas de producción que pueden encontrarse en un reporte final de operaciones sísmicas. En este caso puede observarse que un promedio razonable para la cantidad de pozos perforados en esta área sería 4 y que únicamente la mitad del tiempo operativo se usó perforando.

Rendimientos promedio para topografía y perforación en algunas cuencas de Colombia.

	VSM	LLANOS	VIM	PIEDEMONTE
TOPOGRAFÍA Km por cuadrilla	0.6	3	1.4	0.5
PERFORACIÓN Pozos/día	3	7	6	2.5

Figura 93. Rendimientos promedio en topografía y registro en cuatro cuencas colombianas. Las diferencias reflejan las implicaciones logísticas propias de cada entorno. Fuente: archivo personal del autor.

Las características geográficas de cada proyecto determinan los rendimientos y deben analizarse cuidadosamente. La figura 93 indica algunos rendimientos promedio en topografía y perforación que muestran el impacto del entorno geográfico.

Los rendimientos y las cantidades de obra a ejecutar permiten estimar la duración de los trabajos y comenzar a definir el cronograma del proyecto.

La combinación del cronograma con el costo unitario de las actividades del proyecto da como resultado un flujo de caja, es decir, un estimado de las necesidades de recursos en el tiempo. Las necesidades de recursos son relativamente bajas en la etapa preoperativa pero crecen rápidamente con el inicio de la topografía y las demás actividades operativas.

En la medida en que los tiempos de facturación y pago sean prolongados, el contratista debe disponer de un flujo de caja muy importante (30 a 40% del valor del proyecto) para garantizar la continuidad de la operación y el pago puntual de las obligaciones contraídas. Esto requiere del contratista sísmico una gran solidez financiera representada en recursos propios o en acceso garantizado a financiación bancaria. La figura 94 explica estos conceptos con base en un proyecto hipotético que se ejecuta en 8 meses y para el cual se ha pactado facturación mensual con pago a 30 días.

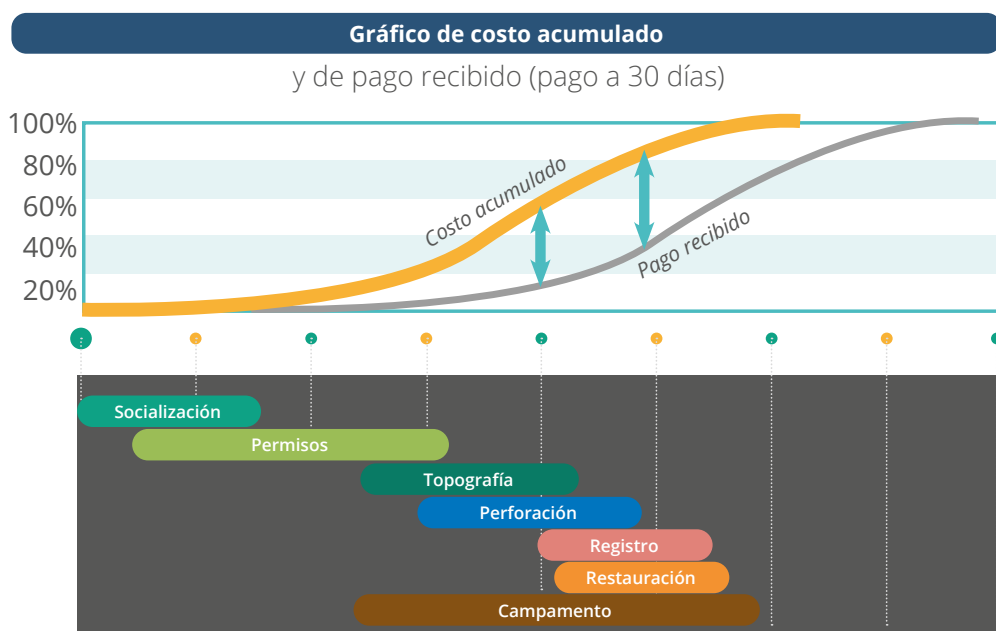



Figura 94. Costo acumulado de un proyecto sísmico y su relación con el cronograma. Las flechas verticales indican la brecha entre la causación de los costos y el pago recibido en un escenario de facturación mensual con pago a 30 días.



Las flechas verticales indican la brecha entre la causación del gasto y la recepción del pago por la obra ejecutada a cierre de cada mes. La magnitud de esta brecha puede alcanzar el 40% del valor del proyecto y parte de ella deberá ser financiada por el contratista, a menudo haciendo uso de instrumentos como el *factoring* por cuya utilización debe pagar comisiones que pueden alcanzar el 3% o más. Aquí yace la importancia de implementar un sistema de pago ágil y claro que minimice las demoras y re-trabajos en el proceso de recepción y aprobación de facturas. El otorgamiento de anticipos cuantiosos es -por supuesto- otra opción válida, aunque su implementación se dificulta, dada la necesidad de que se garantice el buen uso del mismo mediante la constitución de pólizas que no siempre es posible conseguir en el mercado de seguros.

La construcción de este flujo de caja hipotético, es la base para entender las necesidades de financiación de cada proyecto y constituye un insumo objetivo para la discusión de la forma de pago que favorezca el proyecto y que logre un balance razonable entre la capacidad financiera del contratista y la exposición al riesgo del contratante.

La eventual incapacidad del contratista de contar con el flujo de caja necesario, independientemente de las razones por las que ello pueda ocurrir, pone en riesgo la ejecución del proyecto y se refleja de inmediato en el incumplimiento de obligaciones en el campo que a su vez origina protestas y acciones de hecho que pueden escalar rápidamente.

Para abordar adecuadamente esta problemática resulta conveniente que contratista y contratante discutan y acuerden el esquema de pago que mejor satisfaga las necesidades de las partes, pero que sobre todo, garantice la atención oportuna de los requerimientos del proyecto. Como puede verse, la solución no es necesariamente el pago anticipado, sino el pago en el menor tiempo posible de las actividades que se vayan realizando.

4.2 EJEMPLO DE CÁLCULO

Para ilustrar de manera práctica los conceptos anteriores se calculará el costo de la opción 1 del programa sísmico diseñado en el capítulo 2. Valga decir que este cálculo dista de ser una versión exhaustiva final y que un ejercicio real contendrá muchas más actividades y consideraciones particulares. Las cifras presentadas no deben usarse como valores recomendados; su única intención es ilustrar la importancia relativa de los diferentes componentes de costo.

Todo análisis de costos comienza por entender integralmente el área del proyecto y su entorno socio ambiental. El Plan de

Manejo Ambiental o PMA es una excelente fuente de información que, además, incorpora información clave acerca de restricciones o condiciones que puedan afectar los costos.

Para el ejemplo que trataremos, el proyecto se encuentra en zona relativamente llana (ver figura 95). Hay una vía pavimentada y vías secundarias con obras de arte precarias y en temporada de lluvia se produce deterioro en puntos clave. La temporada seca comprende desde noviembre hasta marzo, aproximadamente, por lo cual se plantea iniciar en agosto con las etapas preoperativas. Las vías secundarias permiten el paso de vehículos de doble tracción. Existen cincuenta unidades territoriales que deben ser socializadas. Se espera que exista el orden de 600 predios. Los propietarios no se encuentran normalmente en el predio y deben ser ubicados en ciudades principales donde residen.

PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN	
Area total	300
Intervalo de grupo	40
Intervalo de fuente	80
Número de canales por línea	120
Número de canales por disparo	1440
Número de líneas por patch	12
Distancia líneas de disparo	400
Distancia entre líneas de receptores	400
Offset máximo <i>crossline</i>	2360
Offset máximo <i>inline</i>	2380
Offset máximo total	3352
Máximo <i>offset</i> mínimo	523
Roll on <i>inline</i>	1000
Roll on <i>crossline</i>	1000
Densidad de disparos	31
Densidad de receptores	63
Total disparos	9375
Total trazas	13500000
Trocha receptores	750,0
Trocha disparos	750,0
Densidad de trazas	45000



Figura 95. Los parámetros de adquisición y la descripción del área, son los insumos primarios para la construcción del plan operativo.

El insumo fundamental es la determinación de los rendimientos esperados para las actividades operativas. Con ellos se pueden estimar los tiempos de ejecución y se comienza a definir el cronograma. La figura 96 indica las cantidades de obra, los rendimientos esperados y los tiempos estimados para completar los trabajos.

Debe encontrarse el equilibrio ideal entre el número de cuadrillas y el tiempo para completar la actividad. Un número demasiado alto de cuadrillas puede desbordar el costo, ser impracticable desde el punto de vista de transporte y alojamiento y no necesariamente resulta más eficiente. Aquí resulta invaluable la experiencia de un jefe de grupo o profesional experto en logística de operaciones sísmicas familiarizado con el área. Como se vio en la sección 3.2, el número de cuadrillas que realmente deben ocuparse es mucho mayor que el que arroja en cálculo teórico, con el fin de garantizar los turnos de descanso señalados por la regulación. Las entradas clave son los rendimientos esperados en cada una de las cinco actividades fundamentales. (Ver figura 96). Aquí se incorporan los riesgos de contingencias que puedan implicar interrupciones o limitaciones a la operatividad normal.

	Rendimiento por cuadrilla	Número de cuadrillas	Cantidad obra	Días de operación	Cronograma	Semanas
Socialización	1	2	50	25	30	4
Topografía	2,1	12	1500	60	66	9
Perforación	6	21	9375	74	89	13
Registro	190	1	9375	49	60	9
Restauración	20	10	9375	47	50	7

Topografía: 8 grupos convencional 2.0 km/grupo/día, 4 grupos RTK 3.0 km/grupo/día
Perforación portátil 15 grupos a 5 sps/grupo/día, 6 mecanizados a 9 sps/día/grupo
Registro 3500 GSX+3500 GSONE, 5 shooters, 190 sps/día

Figura 96. Estimación de tiempos de operación con base en los rendimientos esperados. Esta es la columna vertebral del cronograma.

A estas cinco actividades se añaden otras que deben ocurrir paralelamente para garantizar la continuidad de la operación como son: la gestión de tierras, la construcción y habilitación de campamentos, la contratación de personal y la compra y movilización de explosivos, entre otras.

El cronograma es la expresión de la logística concebida (ver figura 97). Obsérvese que la movilización solo ocurre cuando la socialización ya se ha cumplido en sus tres cuartas partes. La topografía no inicia labores hasta que el área de tierras asegure un avance suficiente que minimice el riesgo de tener que parar

por falta de permisos. Este tiempo puede ser mucho mayor si se prevé dificultad en la gestión de tierras e inclusive hay proyectos en que solo se inicia la fase de topografía cuando el avance de tierras es del 100%.

Para el ejemplo se contempla un tiempo de seis semanas para consolidar esta ventaja. Perforación y carga inician labores tres semanas después de que haya iniciado topografía. Para cumplir con estos propósitos se requiere que los procesos de contratación de personal siguiendo los requerimientos del Servicio Público de Empleo ocurran de manera eficiente y con la anticipación requerida. A medida que los trabajos de topografía avanzan se debe garantizar la disponibilidad de los campamentos volantes para mantener los tiempos de desplazamiento de las cuadrillas dentro de los límites requeridos. El campamento base se mantiene activo y totalmente equipado durante la mayor parte del proyecto, así como el soporte de las oficinas centrales. Un proyecto de esta magnitud puede ejecutarse en un lapso total de ocho meses, tres de los cuales corresponden a actividades previas a la topografía. Esta proporción puede cambiar según las características específicas del área y la complejidad que revistan los procesos de socialización y gestión de tierras.

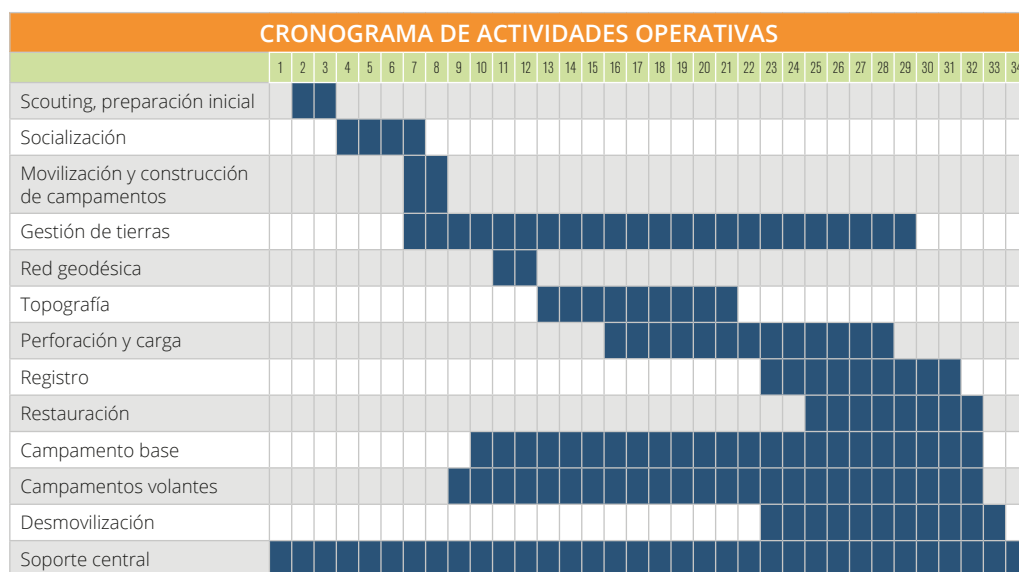


Figura 97. Cronograma del proyecto.

El cálculo del costo diario de cualquier actividad implica el desglose detallado de todos los factores de costos asociados a ella, que en términos generales pueden dividirse en tres categorías: personal, equipos e insumos y transporte.

A manera de ejemplo, se muestra en la figura 98 un desglose relativamente completo de los ítems que componen el costo de la actividad de perforación. Añadiendo la información de salarios y costos de insumos, equipos y vehículos se obtiene el costo total de la actividad que dividida por la duración en días es el costo diario promedio.

PERFORACIÓN		
Duración estimada: 89 días		
Personal		
Cargo	Base	Con rotación
Coordinador de perforación	1	2
Asistente perforación	1	2
Mecánico <i>staff</i>	2	3
Coord. de explosivos	2	3
Ayudante de explosivos	2	3
Supervisor de línea	10	14
Capataz de taladro	21	28
Carga pozo	21	28
Ayudante carga pozo	21	28
Obrero	110	146
Técnico HSE	10	13
Mecánico/Compresorista	10	13
Cocinero	3	4
Aux. cocina	6	8
Patiero	1	2
		297

EQUIPOS E INSUMOS	
Item	Cantidad
Equipos de perforación portátiles	15
Taladros mecanizados	6
Repuestos	5
Combustible equipos de perforación	
Material de tacado	
Mangueras	500
Dotación	297
Alimentación y servicios	297
Radios de comunicación	60
Lavado de ropa	
Explosivos, detonadores (Unid 900 g)	19000
Transporte y escoltas	
Almacenamiento. Gestión con ISP	

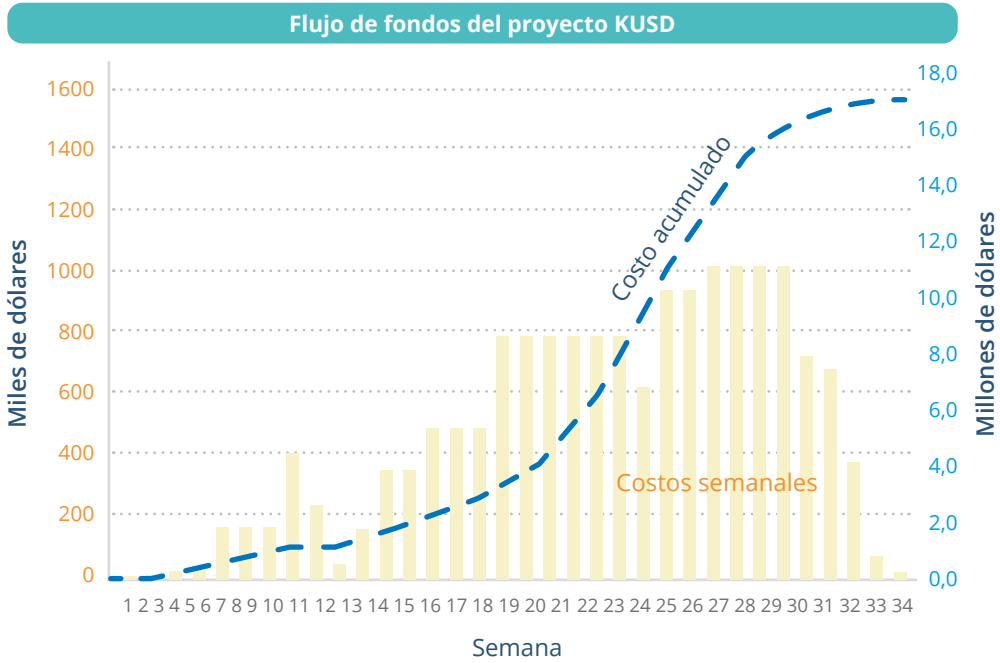


Figura 100. Curva "S" del proyecto mostrando los costos causados semanalmente y los momentos críticos durante el proyecto.

La aproximación matricial permite totalizar los costos estimados por actividad. Aquí puede observarse la gran participación del ítem de campamentos en el costo total (ver figura 101).

DESGLOSE DE COSTO (KUSD)		
ACTIVIDAD	TOTAL	%
Scouting, preparación inicial	28	0,2%
Socialización	616	3,7%
Movilización y construcción de campamentos	364	2,2%
Gestión de tierras	966	5,7%
Red geodésica	56	0,3%
Topografía	1386	8,2%
Perforación y carga	3640	21,6%
Registro	2646	15,7%
Restauración	448	2,7%
Campamento base	3388	20,1%
Campamentos volantes	2415	14,3%
Desmovilización	189	1,1%
Soporte central	714	4,2%
	16856	

FIGURA 101. Distribución de costos de las diferentes actividades del programa sísmico y su participación en el costo total.

En procesos de licitación es común solicitarle a las empresas de servicios, precios discriminados según una cierta lista de ítems que frecuentemente incluye únicamente socialización, movilización y construcción de campamentos, topografía, perforación, registro, restauración y desmovilización.

En estos casos, las empresas distribuyen cada una a su manera, los costos de las demás actividades dentro de estos 7 ítems. El resultado es que las propuestas dejan de ser comparables al examinarlas ítem por ítem y se dificulta la evaluación. (Figura 102).

DESGLOSE DE COSTO (KUSD)		
ACTIVIDAD	TOTAL	%
Scouting, preparación inicial	28	0,2%
Socialización	616	3,7%
Movilización y construcción de campamentos	364	2,2%
Gestión de tierras	966	5,7%
Red geodésica	56	0,3%
Topografía	1386	8,2%
Perforación y carga	3640	21,6%
Registro	2646	15,7%
Restauración	448	2,7%
Campamento base	3388	20,1%
Campamentos volantes	2415	14,3%
Desmovilización	189	1,1%
Soporte central	714	4,2%
	16856	

DESGLOSE PARA LICITACIÓN (KUSD)		
ACTIVIDAD	TOTAL	%
Socialización	644	3,8%
Movilización y construcción de campamentos	364	2,2%
Topografía	3473	20,6%
Perforación y carga	5671	33,6%
Registro	4677	27,7%
Restauración	1125	6,7%
Desmovilización	903	5,4%
	16856	

Figura 102. Distribución real de costos (izquierda) y una opción de desglose para licitación con 7 elementos (derecha).

La figura 103 muestra la curva "S" para el proyecto y la comparación con los pagos que recibiría el contratista en el caso de presentar facturación mensual pagadera a 30 días. En este caso, el contratista recibe el pago en un promedio de seis semanas después de haber realizado la labor, lo cual da una idea de las necesidades de financiamiento de corto plazo que demanda un proyecto sísmico. Se observa que se requiere una caja de 3 a 4 millones de dólares para atender la totalidad de los compromisos. El requerimiento puede ser menor en la medida en que el contratista pueda diferir u optimizar costos de equipos de perforación y registro, pero sin duda requerirá liquidez inmediata para pago de salarios, bienes y servicios.

COSTOS ACUMULADOS VS PAGOS

Facturación mensual con pago a 30 días

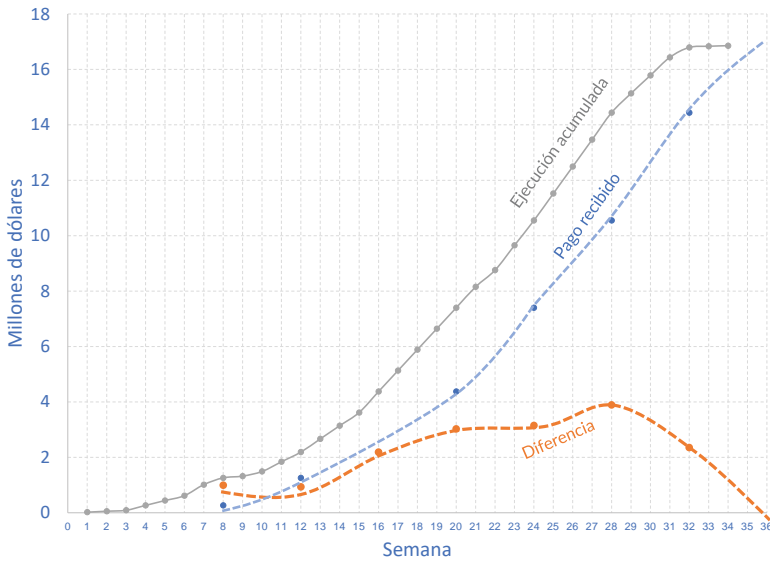


Figura 103. Curva "S" del proyecto y curva de pagos recibidos. El desfase entre las dos genera una diferencia que el contratista debe financiar.

Las demoras con respecto al cronograma teórico pueden ocurrir por fallas en la estimación de los rendimientos promedio, insuficiencia de los equipos o ineficiencias en la logística implementada. Sin embargo, también pueden ocurrir (y de hecho ocurren con frecuencia) debido a bloqueos o situaciones de hecho que paralizan total o parcialmente los trabajos. Estos hechos generan enorme presión pues la economía de la brigada tendrá capacidad para mantenerse detenida o a media marcha por unos pocos días antes de que se produzca su descalabro económico. En oposición a lo anterior, un rendimiento mayor al inicialmente presupuestado, redundará en ahorros importantes de costos que mejoran ostensiblemente la utilidad del contratista, siendo este caso menos frecuente.

El flujo de fondos de un proyecto también permite analizar el impacto económico que pueden representar eventos de suspensiones, restricciones o accidentes naturales que puedan alterar gravemente la ejecución de un proyecto sísmico. Ante un hecho sobreviniente de afectación total o parcial del proyecto sísmico es factible reducir los costos de algunas actividades, pero el campamento base y los campamentos volantes deberán seguir operando y las obligaciones por rentas de instalaciones o equipos continuarán en vigor aunque las actividades principales se encuentren suspendidas.

La decisión de liquidar o no al personal de labor también debe analizarse cuidadosamente pues un eventual reinicio supondrá volver a surtir el proceso de contratación, a menos que los contratos puedan ser suspendidos temporalmente. El impacto de este tipo de eventos es frecuentemente subestimado o poco entendido por las empresas contratantes. El ejercicio de construcción de flujo de fondos, el cálculo detallado de los costos reales de las diferentes actividades y el análisis de riesgos que se describió en la sección 3.1 son elementos que facilitan un entendimiento de la vulnerabilidad de un proyecto ante posibles eventos de fuerza mayor y permiten un diálogo informado entre las partes contratantes para resolver los conflictos resultantes y mantener el equilibrio contractual en los términos que hayan sido pactados.

4.3 ESTIMACIÓN DE CONTINGENCIAS

La complejidad del entorno colombiano hace que existan múltiples agentes que pueden impactar los tiempos y costos del proyecto. Una buena planeación (Ver análisis de riesgo en sección 3.1) permite adoptar medidas preventivas para mitigar su impacto y debe también estimar de manera objetiva sus posibles costos. En este sentido es clave diferenciar entre contingencias e imprevistos. Las primeras son situaciones indeseables que generan una desviación con respecto al plan original pero que han sido contempladas en el análisis de riesgo y existen previsiones para mitigar su impacto. Las segundas son situaciones que no fueron anticipadas en el análisis de riesgo y ocurren de manera inesperada y sorpresiva.

La complejidad del entorno colombiano hace que existan múltiples agentes que pueden impactar los tiempos y costos del proyecto.

En la medida en que las curvas de aprendizaje mejoran, los imprevistos deberían ir reduciéndose para convertirse en contingencias que los equipos de trabajo procurarán neutralizar a través de acciones específicas de naturaleza más preventiva que remedial. No se recomienda la práctica, por demás común, de asignar un porcentaje arbitrario a la estimación de las contingencias pues ello no contribuye al ejercicio primordial que debe ser la planeación rigurosa de cada proyecto con ajuste a la realidad de su propio entorno.

Una lista no exhaustiva de situaciones de ocurrencia frecuente que pueden impactar los tiempos y costos de un programa sísmico se presenta a continuación:

- ✓ Restricciones ambientales inesperadas no contempladas en el Plan de Manejo Ambiental o con problemas de implementación en campo.
- ✓ Aparición de comunidades étnicas no identificadas previamente sobre las cuales pudiera existir afectación directa.

- ✓ Dificultades de acceso a predios de tamaño importante por ausencia de permiso por cualquier razón.
- ✓ Dificultades para llevar a feliz término el proceso de socialización.
- ✓ Situaciones de hecho por conflicto social por temas de contratación de personal, compra de bienes y servicios o aspectos ambientales.
- ✓ Alteración de orden público que afecte directa o indirectamente la ejecución del proyecto.
- ✓ Deterioro grave de vías y/o pasos críticos.
- ✓ Niveles de ruido ambiental demasiado altos o calidad de información muy inferior a la esperada.
- ✓ Imposibilidad de lograr la profundidad especificada de los pozos o rendimientos reales demasiado bajos comparados con el plan.
- ✓ Insolvencia del contratista y conflictos por retrasos en pagos o compromisos.
- ✓ Exposición mediática por desinformación que ponga en riesgo la ejecución del proyecto.
- ✓ Condiciones extraordinarias de exposición a riesgos de HSE.
- ✓ Dificultades en la compra y transporte del material fuente de energía que amenacen su disponibilidad en la fecha esperada.

Las características particulares de cada proyecto harán que algunos de estos riesgos presenten una alta probabilidad de ocurrencia y, entonces, es procedente para las empresas contratantes estimar su impacto y hacer las provisiones internas necesarias en el presupuesto. Por su parte, las empresas contratistas tenderán a no incluir estos costos contingentes en sus propuestas para no hacerlas menos competitivas esperando que los riesgos no se materialicen.

4.4 ESQUEMAS DE CONTRATACIÓN

A finales de los 90 la industria vivió una fuerte crisis de precios que impactó profundamente en todos los sectores de la cadena del petróleo. Ello motivó a Petroleum Development Oman

y Arthur D. Little Management Consultants a realizar un estudio comparativo para identificar las mejores prácticas en la contratación de sísmica 3-D en todo el Oriente Medio y el Norte de África. El estudio recopiló datos técnicos, de costos y tiempos de 29 compañías petroleras (grandes empresas, independientes, NOC) y cinco contratistas sísmicos que habían operado en la región durante los últimos cuatro años. Las conclusiones, resumidas en el gráfico que se reproduce en la figura 104 (sin traducción), son suficientemente generales para ser aplicables al medio colombiano y generar algunas reflexiones (McMahon, Ruitenbeek, Wams, & Slawson, 1999) que apuntan a la conveniencia de construir relaciones gana-gana entre las partes, con visiones de largo plazo, basadas en la confianza y haciendo un esfuerzo conjunto por mejorar la calidad y los costos.

QUALITY	<i>Object/Asset Goal Driven</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Surveys meet clients objectives but do not optimise cost • Standardised geometries - not fit for purpose • Stringent equipment specifications • Time spent administrating contract 	<ul style="list-style-type: none"> • Objective driven, but costs controlled through innovation and trust • Tapping both contractor and external company experience • Flexibility in operations to meet key survey objectives • Simple, non-complex incentives based on survey objectives, not just production <p style="text-align: center;">BEST PRACTICE</p>	
	<i>Production Driven</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Performance driven only by production targets • Adversarial relationship with contractors • Contracts awarded mainly on lowest price • Do not trust professionalism of contractors • Manage crews, not the results 	<ul style="list-style-type: none"> • Both operator/contractor satisfied with operations and productions • Production based approach allows easy target setting • Simple and visible production related bonuses 	
		<i>Them and Us</i>	CONTRACTUAL RELATIONSHIPS	<i>Win - Win</i>

Figura 104. Escenarios de relacionamiento entre las partes cuando se contratan servicios de prospección sísmica. (MacMahon, 1999).

Como en todo contrato, conviene reflexionar acerca de los objetivos de las partes al momento de suscribir el contrato o durante su ejecución. Si dichos objetivos son dispares o contradictorios, la relación se torna tensa y conflictiva. Por ejemplo: si un proyecto ha sido cotizado por un valor extremadamente bajo y comienza a ser evidente para el contratista que su utilidad está en peligro, su interés principal será el de reducir costos. Si al mismo tiempo el contratante tiene como prioridad desarrollar el proyecto con la mejor calidad y un excelente relacionamiento con los grupos de interés, situaciones como una socialización más prolongada de lo esperado o una dificultad inesperada en la perforación, tenderán a crear grandes tensiones contractuales entre las partes.

El mejor contrato es aquel que logra alinear los objetivos de las partes, lo cual implica hacer el ejercicio de que estas se ubiquen en el papel de la contraparte para entender claramente sus expectativas y necesidades y buscar acuerdos de tipo gana-gana.

En términos generales podríamos plantear que algunos de los intereses de un operador que desea adquirir un proyecto sísmico son:

- ✓ Obtener la información a tiempo. Minimizar interrupciones y demoras por aspectos sociales/ambientales.
- ✓ Mantener altos estándares de seguridad industrial y cumplimiento ambiental.
- ✓ Asegurar un precio competitivo y minimizar los sobrecostos.
- ✓ Garantizar la calidad de la información y tecnología apropiada para los objetivos exploratorios.
- ✓ Sentar las bases de un buen relacionamiento para la operación subsiguiente.
- ✓ Avanzar en el desarrollo de tecnologías clave que le permitan resolver incertidumbres en subsuelo.

Por su parte, al contratista generalmente le interesa:

- ✓ Asegurar la creación de valor para sus inversionistas (rentabilidad, flujo de caja, imagen).
- ✓ Hacer el trabajo en el menor tiempo posible. Lograr una operación continua.
- ✓ Asegurar un nivel de trabajo sostenido durante el año.
- ✓ Conservar personal clave.
- ✓ Generar ventajas competitivas e identidad empresarial.

Si bien el operador desea aplicar nuevas tecnologías y contar con personal clave que garantice un buen relacionamiento y calidad de los trabajos, el contratista encuentra difícil satisfacer esta necesidad porque los contratos son cortos y esporádicos y existe incertidumbre acerca de si habrá operación en el futuro cercano. Tampoco le resulta atractivo invertir en tecnología si ello implica mayores costos de implementación que pueden hacerlo menos competitivo en comparación con otras empresas.

Esta aproximación conceptual al tema de cómo contratar, si ocurre en la etapa precontractual, ayuda a diseñar factores de evaluación de procesos licitatorios que permitan identificar la mejor propuesta de valor, la cual no necesariamente es aquella de menor precio.

Por ejemplo, si para el operador es de vital importancia lograr perforar a 15 metros en zonas donde tradicionalmente ha sido imposible con equipos portátiles, la evaluación de las propuestas deberá asignar un valor importante a aquellas empresas que planteen el uso de equipo mecanizado soportado con un plan integral de implementación que aborde su viabilidad socioambiental. Solo de esta manera el contratista tendrá un incentivo para proponerlo y ser más competitivo en comparación con aquel que ofrece un 100% de equipo portátil y asume

que se le permitirá cambiar el patrón de pozo único por uno de “mini-holes”.

En la gran mayoría de los casos, la selección de un contratista de servicios sísmicos se realiza mediante algún proceso competitivo en el cual se solicitan propuestas técnicas y económicas a un número plural de oferentes con el objeto de realizar una evaluación objetiva que lleve a la adjudicación y suscripción de un contrato.

Como se vió anteriormente, el costo de un proyecto sísmico depende en gran manera de su concepción logística, de los rendimientos esperados y de las provisiones que se hagan para manejar los riesgos no técnicos. Estas consideraciones pueden variar apreciablemente entre contratista y contratista sin que ello sea evidente para la persona que evalúa una licitación. Ello se refleja en los procesos licitatorios como una dispersión, a veces desconcertante entre los diferentes precios ofertados. Al intentar entender las diferencias en los precios, se suelen examinar los componentes individuales de las propuestas lo cual no resuelve el problema pues los proponentes dividen, cada uno a su manera, el costo total entre los componentes que hayan sido estipulados en la licitación.

La Tabla 8 es un ejemplo construido a partir de datos reales de un sondeo de mercado para un programa sísmico en una zona compleja de Colombia donde se invitó a 5 compañías a presentar su propuesta, dividida en 5 componentes a saber, movilización, desmovilización, topografía, perforación y registro.

PROPONENTE	COSTO DEL PROYECTO	DURACIÓN (Días)
EMPRESA 1	21300	260
EMPRESA 2	12240	200
EMPRESA 3	6850	120
EMPRESA 4	8500	180
EMPRESA 5	12750	80
OPERADOR	13800	240

Tabla 8. Costo total cotizado para el proyecto en miles de dólares.

La primera observación que salta a la vista es la enorme dispersión de los valores que muestra una relación de 3:1 entre los valores extremos. La segunda observación es que los tiempos de ejecución propuestos lucen completamente incoherentes pues no guardan relación directa con el costo total. La Empresa 5 contempla un cronograma de 80 días el cual, muy seguramente, es erróneo. Es evidente que hay diferencias sustanciales en

el entendimiento y concepción del proyecto entre los diferentes proponentes lo cual a su vez puede ser diagnóstico de una o más de las siguientes situaciones:

- ✓ Recibieron información ambigua o poco precisa por parte del operador.
- ✓ No cuentan con información confiable de rendimientos.
- ✓ Valoran de manera muy diferente los riesgos del entorno.
- ✓ Han cometido errores en sus supuestos básicos.
- ✓ Tienen la intención de cobrar deliberadamente bajo o alto por alguna razón estratégica.

Al examinar los costos por actividad se encuentran incoherencias que dificultan aún más la selección de la propuesta más favorable como se observa en la Tabla 9.

PROPONENTE	MOV	DESMOV	TOPOGRAFÍA	PERFORACIÓN	REGISTRO	TOTAL
EMPRESA 1	1300	700	2500	10800	6000	21300
EMPRESA 2	1200	40	3400	5000	2600	12240
EMPRESA 3	180	70	2200	3400	1000	6850
EMPRESA 4	400	200	1100	4000	2800	8500
EMPRESA 5	1300	650	1800	2800	6200	12750
OPERADOR	1100	500	2100	5600	4500	13800

Tabla 9. Precios desglosados presentados por los proponentes.

Con excepción de la número cinco, todas las empresas consideran la perforación como la actividad más costosa. Los costos de movilización presentan una dispersión de 7:1 que difícilmente puede explicarse a menos que los valores altos persigan la generación de una especie de pago anticipado que favorezca el flujo de caja del inicio del proyecto.

Si la forma de pago pactada en los documentos del proceso licitatorio prevé el pago por tarifas unitarias de topografía, perforación y registro, es esperable que el contratista pondere los costos de manera que topografía y perforación generen un flujo temprano de fondos. Todas estas situaciones se presentan, entre otras razones, porque las empresas contratistas participantes han dividido el precio total de su propuesta en las cinco actividades solicitadas, cada una a su manera y sin que ello sea evidente para el evaluador que a menudo carece de un conocimiento de los pormenores de las operaciones sísmicas y además debe desenvolverse en un ambiente de extrema rigidez que le impide el diálogo fluido con los proponentes para evitar generar situaciones que puedan calificarse como violatorias del principio de igualdad.

En ocasiones los comités evaluadores aplican técnicas estadísticas para intentar manejar objetivamente la dispersión de

los valores, pero, ninguno de estos procedimientos elimina el vicio fundamental del proceso que es la falta de comparabilidad de las propuestas. Una salida alternativa es la negociación directa con uno o más proponentes que puede ayudar a converger hacia un resultado final adecuado siempre y cuando las partes entiendan a cabalidad las implicaciones del resultado de la negociación para el proyecto.

En regiones donde se requiere la aplicación rigurosa de un plan de manejo ambiental previamente aprobado por la autoridad competente es de gran importancia que los proponentes conozcan el texto final del mismo pues pueden existir condiciones que limiten significativamente la logística del proyecto. La ubicación de campamentos y puntos de captación de agua industrial es determinante en el establecimiento de un plan logístico y, por lo tanto, es un factor primordial de la propuesta. De igual manera, los acuerdos de consulta previa o particularidades de índole social específicos para el proyecto, deben ser de conocimiento previo de los proponentes para ser incorporados en la preparación de la propuesta.

Cuando los valores cotizados se encuentran dentro de rangos razonables, se procede entonces a la asignación de puntajes a las propuestas económicas para definir un orden de elegibilidad. La forma tradicional de asignar puntajes en procesos competitivos consiste en otorgar el máximo puntaje (por ejemplo cien) a la propuesta con el menor costo y reducir el puntaje en la medida en que las propuestas sean más costosas de acuerdo con la relación:

$$p=100 \frac{P_{min}}{p}$$

Esto representa una hipérbola (no una recta como se cree muchas veces) con la característica de que asignará cincuenta puntos a una propuesta cuyo valor duplique a aquella de valor mínimo.

Alternativamente, la expresión que produce una línea recta se calcula con la siguiente ecuación:

$$p=150-50 \frac{P}{P_{min}}$$

La figura 105 ilustra la comparación entre los dos esquemas donde se advierte que la curva castiga más fuerte el puntaje que la recta, mientras que, el rango de precios no exceda el 200% con respecto a la propuesta mínima.

ESQUEMAS DE PONDERACIÓN DE PUNTAJE

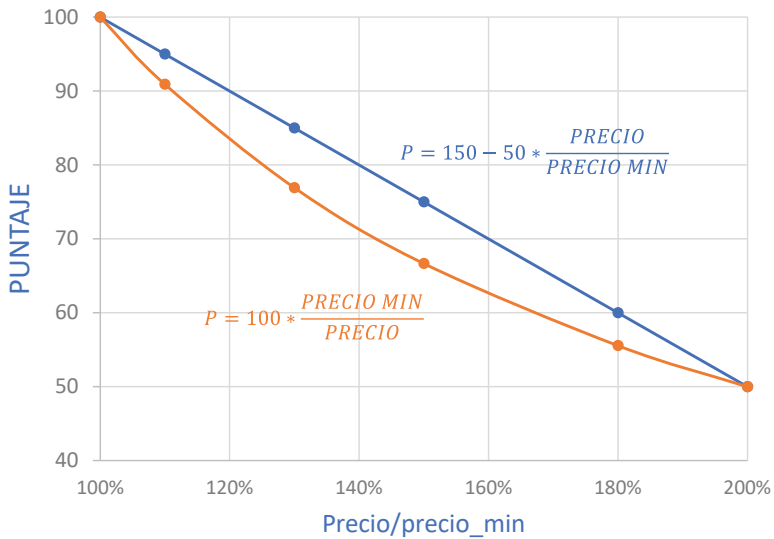


Figura 105. Dos formas de ponderación de puntajes en las que la propuesta de menor costo recibe 100 puntos y 50 puntos a aquella que sea el doble de costosa. La más común es la representada por la línea naranja.

Por supuesto, pueden aplicarse otros sistemas como el escalonado u otros basados en criterios estadísticos involucrando desviación estándar pero nunca debe perderse de vista la razonabilidad del proceso y el grado de comparabilidad de los precios de la muestra.

Aunque parezca obvio, es importante definir y especificar claramente lo que se entiende por valor total de la propuesta para efectos de evaluación. En principio este valor no debería incluir posibles gastos reembolsables si se prevé su uso, aunque sí podría incluir un estimado de contingencia expresado (por ejemplo) en días de *standby* según las tarifas de cada proponente.

En ambientes de competencia perfecta, donde existe un gran número de oferentes cuyo producto es muy similar, resulta sencillo dejar que sea el precio el que regule la selección en procesos licitatorios para contratos tipo llave en mano. Sin embargo, en mercados imperfectos como el de la sismica en Colombia, no siempre puede decirse que el producto ofrecido sea igual o al menos comparable. En estos escenarios la adjudicación al precio más bajo reviste un cierto peligro de que situaciones no previstas o mal gestionadas precipiten situaciones de crisis para el proyecto. En atención a lo anterior, puede ser conveniente la construcción de criterios para identificar la propuesta de mejor valor (que no es lo mismo que la propuesta más barata), es de-

cir, aquella que combina factores adicionales como tecnología, plan de trabajo, estrategias de relacionamiento social, disponibilidad o experiencia del personal, por ejemplo.

Evaluación de aspectos no económicos

Cuando se trata de evaluar aspectos no económicos, el contratante debe plantearse claramente si procede establecer requisitos mínimos tipo **Pasa - No pasa** o si encuentra importante otorgar puntaje a características distintivas de la propuesta que puedan redundar en un mejor valor. Si bien, no se requiere que los proponentes conozcan los detalles del sistema de evaluación, sí es conveniente que sepan aquello que es importante para el contratante. La Tabla 10 contiene una relación de criterios diferentes al económico que pueden hacer parte de la evaluación integral de las propuestas. El lleno de requisitos legales o especificaciones mínimas obligatorias, en principio, no debería ser objeto de calificación pues se parte del supuesto de que todos los participantes están obligados a cumplir y así lo harán. Los elementos que aportan valor agregado son aquellos diferenciadores que merecerían especial consideración en la calificación, en especial cuando apuntan a satisfacer un interés específico del contratante.

criterio	Requisito mínimo	Valor agregado
Financiero	Requisitos legales y mínimos especificados por el operador. Indicadores financieros. Respaldo bancario.	Liquidez extra para afrontar el proyecto
Experiencia	Evidencia en el desarrollo de operaciones similares a las que se pretende contratar.	Experiencia relevante por encima del mínimo requerido.
Desempeño en HSE	Certificaciones y cumplimiento de requisitos de ley. Indicadores históricos de desempeño.	Evidencia de compromiso gerencial en HSE. Resultado de auditoría específica realizada por contratante. Plan específico de HSE para el proyecto.
Personal	Cumplimiento de perfiles mínimos de educación y experiencia relevante.	Refuerzo de equipos claves. Contenido local por encima del mínimo.
Equipos y tecnología	Cumplimiento de requisitos mínimos especificados en los pliegos de licitación.	Aplicación de tecnologías u ofrecimiento de equipos por encima de lo mínimo y que sean del interés del contratante. Ejemplo: pruebas experimentales, densificación de receptores, perforación con sistema Sonic en zonas de relleno aluvial, esquemas novedosos de control de calidad con equipo nodal, Lidar, etc.
Entorno	Cumplimiento de requisitos de ley y de los pliegos de licitación.	Plan específico de entorno para el proyecto. Experiencia específica en gestión de entorno en proyectos en el área o con problemáticas similares. Inversión social propia.

Tabla 10. Factores no económicos susceptibles de evaluación.

En el afán de remover toda subjetividad en el proceso de calificación de estos criterios no técnicos se incurre a veces en la construcción de esquemas con complicadas tablas o fórmulas de asignación de puntos que dificultan innecesariamente el proceso de evaluación sin capturar el verdadero valor. El autor considera que siempre existirá un cierto grado de subjetividad en estos ejercicios y que en la medida en que primen el buen juicio, la transparencia y el conocimiento, este interesante proceso de evaluación de propuestas podrá llevarse a buen término.

Una forma de minimizar el impacto de la subjetividad es contar con un número plural de evaluadores independientes. La comparación de las evaluaciones individuales muy probablemente aportará también información valiosa y la decisión final podrá derivarse de algún tipo de acuerdo, consenso o promedio.

A manera de ejemplo se pueden plantear criterios como los que se muestran en la figura 106 donde se asigna puntaje al Plan Operativo de acuerdo con unos descriptores que guían el otorgamiento de los puntos. Este esquema conserva algún grado de subjetividad pero se enfoca en temas substanciales y verificables que un experto puede evaluar y documentar adecuadamente.

Aspecto a evaluar	Criterio de evaluación			
	100%	75%	50%	25%
Plan operativo: Descripción de la manera como el licitante planea desarrollar la operación.	<ul style="list-style-type: none"> -Plan completo, bien estructurado, presentado de manera lógica y ordenada. -Demuestra conocimiento del área. -Aborda los principales aspectos logísticos como acceso/manejo de agua industrial, manejo de residuos, campamentos y rotaciones de personal entre otros. -Evidencia conocimiento del MMA y de sus implicaciones. -El cronograma es realista y completamente consistente con el resto de documentos de la propuesta. 	<ul style="list-style-type: none"> Plan completo y estructurado, con algunas falencias subsanables. - Estrategia de implementación del diseño no aporta elementos novedosos. - Aborda implicaciones del MMA. -Buena alineación con el resto de documentos de la propuesta. 	<ul style="list-style-type: none"> Plan general con falencias y vacíos críticos en su aplicabilidad. -Cronograma con inconsistencias. - Ausencia de análisis de implicaciones del MMA. 	<ul style="list-style-type: none"> El plan es inconsistente o vago. Es irrealizable o poco practicable.

Figura 106. Ejemplo de un esquema de asignación de puntos para calificar aspectos no económicos.

Al final, una práctica común y recomendada es ponderar la calificación de los componentes económicos y no económicos de manera que su combinación refleje el concepto de mejor valor en oposición al de menor costo. Los porcentajes de ponderación dependen de las características del proyecto y en cier-

ta medida su escogencia busca responder a la pregunta ¿Qué monto, por encima del mínimo ofertado en el proceso, estoy dispuesto a pagar por recibir un extra en el servicio que añade valor al producto contratado?

Habiendo expuesto estas consideraciones se puede pasar a hablar de dos modelos contractuales con características muy diferentes así:

Contrato “Llave en mano”


Se pacta un valor global o tarifa unitaria fija que incluye todos los factores de costo. El contratista es responsable de todas las actividades del proyecto y asume todos los riesgos. Los parámetros de adquisición, alcance del proyecto, restricciones ambientales, condiciones sociales, etc., están bien definidas y no se espera que cambien significativamente.

El operador evita involucrarse en la resolución de conflictos entre contratista y terceros pues no asume responsabilidad alguna. El operador requiere del establecimiento de una interventoría fuerte que vigile el cumplimiento de los requisitos contractuales. El manejo de aspectos críticos del proyecto como la gestión de tierras, la contratación de bienes y servicios y la inversión social son delegados al contratista quien tenderá a resolverlos con una visión de corto plazo y sin mayor intervención del operador.

Planeación	Contratación	Fase preoperativa
Operador		Contratista
Diseño	Docs de licitación	Alineación con contratista
Scouting	Licitación	Taller de planeación
Análisis de riesgos	Evaluación	Plan de ingreso
MMA/PMA	Negociación y adjudicación	
Consulta Previa	Suscripción de contrato	Movilización

Figura 107. Esquema de trabajo en modalidad llave en mano. El contratista solo aparece una vez le ha sido adjudicado el contrato.

En un esquema “llave en mano”, lo común es que la fase de planeación sea adelantada por el operador. El contratista solo entra en escena una vez adjudicado el proceso de licitación. Solo en este momento se produce un análisis detallado y conjunto de las características del proyecto y de su impacto en la logística. No es raro que en este proceso se evidencien situaciones de conflicto entre las partes, cuya solución no es fácil, dado que las condiciones del proceso de licitación se suponen en principio fijas e inamovibles.



En este esquema de trabajo el contratista asume la mayor parte de los riesgos y solo excepcionalmente podrá reclamar algún tipo de compensación por situaciones de fuerza mayor. Dada la vulnerabilidad de la operación sísmica a múltiples situaciones de riesgo que pueden afectar la normal operación de un proyecto lo que parece más sano y razonable es plantear escenarios de riesgo compartido en que las partes acuerdan previamente los términos en que entrarán a cubrir posibles sobrecostos por situaciones de fuerza mayor.

Contrato de alianza estratégica

En este esquema, el operador y el contratista (y eventualmente la interventoría) funcionan como un equipo integrado, con metas compartidas que no necesariamente se limitan a costos o producción. Los costos son discutidos y acordados de manera conjunta y son administrados bajo el esquema de libros abiertos. Los riesgos están claramente identificados y existen planes conjuntos para mitigarlos.

Las partes se responsabilizan solidariamente por la solución de problemas según roles y responsabilidades claramente definidas con anterioridad y por escrito. Este tipo de contrato es recomendable para áreas con entornos cambiantes, condiciones logísticas retadoras con riesgo para la calidad de la información y necesidad de establecer relacionamientos de largo plazo. Puede resultar más costoso en el corto plazo, pero en el mediano plazo permite fijar metas conjuntas de ahorro basadas en el uso de tecnología y optimización de operaciones. Contratos de este estilo en Colombia permitieron en su momento la implementación de tecnologías de perforación en roca con martillos de percusión, equipos de registro de bajo peso (Sercel 368 Ultralight) o desarrollo de cultura robusta de HSE (programas sísmicos de Shell en el Valle Superior en los años 80).

Este enfoque es altamente recomendable entre operadoras relativamente grandes con un programa de trabajo multianual y empresas contratistas organizacionalmente sólidas. El elemento fundamental para que esta estrategia funcione es la confianza entre las partes, complementada con organismos de gobierno que faciliten el diálogo transparente y la solución de conflictos. Dentro de este ambiente, la figura de una interventoría correctiva, pierde sentido.

La implementación de un contrato tipo alianza implica un esfuerzo real y efectivo de las partes para salir de su zona de confort y moverse en la dirección del interés de la contraparte; en otras palabras se trata de “ponerse en el lugar del otro” para construir estrategias de beneficio mutuo o gana-gana. A continuación se describen cuatro ejemplos en los que una de las

partes diseña acciones para apoyar el logro de un objetivo específico de su contraparte y cómo este concepto funciona cuando se aplica en las dos vías:

Ejemplo 1 **Interés del operador**

- Obtener la información a tiempo. Minimizar interrupciones y demoras por aspectos sociales/ ambientales.

Acciones del contratista para compartir ese interés

- Se involucra en la etapa de planeación y dedica recurso humano sin costo adicional.
- Se familiariza con el esquema de relacionamiento del operador y se integra de manera óptima para agilizar la toma de decisiones.
- Desarrolla material socioambiental estándar de acuerdo con el operador.
- Dedicar un staff estable y experimentado al operador.
- Hace acuerdos de desempeño a mediano plazo. Mejora sus procesos internos

Ejemplo 2 **Interés del contratista**

- Asegurar la creación de valor para sus inversionistas (rentabilidad, flujo de caja, imagen).

Acciones del operador para compartir ese interés

- Diseña una forma de pago ágil de acuerdo con el flujo de caja.
- Procura garantizar una rentabilidad mínima para el contratista.
- Desarrolla herramientas para determinar el valor base de un proyecto y reduce incertidumbres.
- Analiza conjuntamente con el contratista las contingencias, acuerda medidas con anticipación y toma las provisiones contractuales que se requieran.

Ejemplo 3 **Interés del contratista**

- Asegurar un nivel de trabajo estable.

Acciones del operador para compartir ese interés

- Procura agregar demanda para mantener un flujo de trabajo estable.
- Cuantifica y demuestra a la organización el beneficio tangible de la estrategia y gestiona la aprobación de nuevos proyectos con base en sus ventajas competitivas.

Ejemplo 4

Interés del Operador

- Avanzar en el desarrollo de tecnologías claves distintivas.

Acciones del contratista

- Facilita la realización de pruebas de campo con nuevas tecnologías en zonas clave con problemas de respuesta.
- Facilita el uso de equipos no disponibles en Colombia.
- Incluye pruebas con herramientas no sísmicas. Prueba diseños alternativos 3D para entender su impacto sobre la calidad de los datos.

Todo lo anterior lo hace minimizando costos y tomando ventaja de la logística de los proyectos.

En este tipo de esquema contractual la selección objetiva del aliado es uno de los elementos clave para tener éxito, pues, se trata de una decisión que puede abarcar varios proyectos a lo largo de un periodo multianual. Como en todo contrato deben preverse situaciones de incumplimiento y terminación anticipada que permitan la resolución de conflictos y aporten seguridad legal a las partes.

Cuando se trabaja bajo el esquema de alianza toda la cadena de planeación, concepción logística, presupuesto y preparación de fase preoperativa se realiza en conjunto y con mayor atención al detalle. Ello permite una mejor preparación para el ingreso al área de trabajo.

Planeación	Contratación	Fase preoperativa
Contratista		
Operador		
Diseño	Plan operativo específico	Movilización
Scouting conjunto	Análisis de costos	
Análisis de riesgos	Acuerdos de desempeño	
MMA/PMA	Orden de Trabajo asociada a contrato marco	
Consulta previa		

Figura 108. Esquema de trabajo en modalidad de alianza. El contratista participa desde la concepción del proyecto gracias a la existencia de un acuerdo marco y ello permite una planeación robusta que a su vez agiliza el inicio de la operación.

En la práctica, los contratos de servicios sísmicos suelen situarse en algún punto intermedio entre los dos esquemas descritos dependiendo de las preferencias del operador.

Un modelo internacional de contrato de servicios sísmicos, que puede resultar útil como referencia, puede encontrarse en la página de la Asociación Internacional de Negociadores Petroleros - AIPN, por sus siglas en inglés.

El contrato es la herramienta formal mediante la cual se materializa el acuerdo entre las partes para la ejecución del proyecto. El contratista debe asegurarse de entender a cabalidad las implicaciones del clausulado, especialmente aquellas que describen el manejo de posibles situaciones irregulares en las que pueda verse afectado el equilibrio contractual.

Consideraciones de mercado


En Colombia el mercado actual está cubierto por un número relativamente pequeño de empresas contratistas entre las cuales se destacan:

*Petroseismic
Vector Geophysical
SAExploration
Geofizika Torun
BGP*

Después de la crisis de precios de 2014/2015, los niveles de actividad se han mantenido bajos, con un promedio anual que no alcanza los 2000 kilómetros equivalentes, lo cual se asocia al nivel internacional de precios y a las problemáticas de la pandemia del COVID-19 que limitó las posibilidades de operar, especialmente durante el año 2020. No obstante, lo anterior, los compromisos de adquisición de datos sísmicos son considerables lo cual hace pensar que, si las condiciones son propicias en los próximos años, la actividad debería repuntar de manera significativa.

4.5 INTERVENTORÍA

Desde un esquema sencillo y tradicional de interventoría que imperó durante el siglo XX, con una figura unipersonal especialmente enfocada a temas operacionales, esta función ha venido mutando hacia esquemas de organización más complejos y especializados para poder garantizar el cumplimiento de los requisitos legales vigentes aplicables a la prospección sísmica. Como hemos explicado, los esquemas contractuales tipo “Llave en mano” requieren un nivel de aseguramiento significativo para garantizar el cumplimiento de requisitos y evitar riesgos en los que el operador deba responder solidariamente o pueda verse afectado en su imagen. Ello justifica la presencia de un equipo multidisciplinario de interventoría con presencia permanente en campo, actuando como puente entre el operador y la empresa contratista.



En la medida de lo posible el equipo de interventoría debe involucrarse tempranamente participando en la etapa de planeación y adquiriendo un contexto amplio del proyecto. En compañía del operador debe aportar su conocimiento y experiencia para identificar las situaciones retadoras y abordar oportunamente su manejo.

La conformación de un equipo de interventoría en Colombia generalmente comprende el siguiente personal:

- ✓ Coordinador técnico
- ✓ Topografía
- ✓ Salud ocupacional y seguridad industrial
- ✓ Ambiental
- ✓ Social
- ✓ Administrativo
- ✓ Tierras

Con sus respectivos relevos, este grupo de profesionales puede sobrepasar las 15 personas y requiere todos los recursos de lugar de trabajo y alojamiento, transporte, equipos y soporte administrativo. Con los años, se han venido consolidando empresas de servicios con gran experiencia en este tipo de tarea, aunque sin niveles interesantes de innovación o aporte de valor agregado.

Una interventoría con experiencia y conocimiento se convierte en un instrumento valioso para el proyecto cuando adopta un enfoque preventivo y propositivo, que facilita el abordaje de los problemas y colabora en la búsqueda de soluciones sin abandonar la rigurosidad necesaria. Por el contrario, un equipo interventor con falencias técnicas o dificultades de relacionamiento, añadirá conflicto a una operación que es compleja por naturaleza.

Consideraciones Finales

5.1. RETOS, FUTURO Y PAPEL DE LA SÍSMICA EN EL NUEVO PANORAMA ENERGÉTICO MUNDIAL

La transición energética avanza con rapidez en el mundo y en Colombia se están asumiendo compromisos de gran magnitud que ya están transformando nuestras vidas. De acuerdo con la Unidad de Planeación Minero Energética, del Ministerio de Minas de Colombia, las expectativas a 2050 pueden sintetizarse así:

- La electricidad y el gas natural serán los energéticos con mayor participación en el incremento de la oferta, representando un 72% de su crecimiento.
- Los energéticos de mayor consumo serán la electricidad y el gas natural, con un 46% de participación en la matriz energética del país, en contraste con los energéticos predominantes en la actualidad, las mezclas de diésel y gasolina con el 48%.
- La electricidad, y con ello las energías renovables, serán el energético de mayor crecimiento en los próximos treinta años.
- Las mezclas de diésel y gasolina alcanzarán un pico de consumo en 2040, y continuarán participando en más de la tercera parte de la oferta de energía del país.

Lo anterior indica que, aún en los escenarios más agresivos y optimistas, la participación de los hidrocarburos en la matriz energética nacional seguirá siendo importante por décadas. Los ingresos fiscales que aporta el sector de hidrocarburos seguirán siendo pilar fundamental de desarrollo y apalancarán la implementación de energías alternativas, como ya lo están haciendo.

La sísmica, entonces, jugará un papel importante en dos frentes. En primer lugar, aportará información de subsuelo necesaria para garantizar el crecimiento de las reservas de gas y petróleo que el país necesita. En segundo lugar, ampliará su ámbito de acción para incorporar conocimiento de subsuelo para la implementación de otros tipos de energías como la geotérmica y será fundamental para el avance de iniciativas de captura y disposición de CO₂ en el subsuelo.

En el primer aspecto, el reto es mejorar la calidad de los datos de subsuelo en áreas complejas como el Cinturón Plegado de San Jacinto o el piedemonte de los Llanos Orientales, donde existe un potencial enorme de yacimientos de gas con presencia de infraestructura cercana y mercados desarrollados, para reducir el riesgo exploratorio y promover recursos prospectivos a reservas en el menor tiempo posible. Se requiere una gran cantidad de información sísmica 3D para seguir desarrollando el potencial gasífero local.

La figura 109 muestra los problemas de imagen sísmica que se observan en amplios sectores de la cuenca de Sinú, San Jacinto, que deben abordarse de manera sistemática y rigurosa para reducir el riesgo exploratorio. Esfuerzos integrados entre industria y academia pueden ser la vía para avanzar.

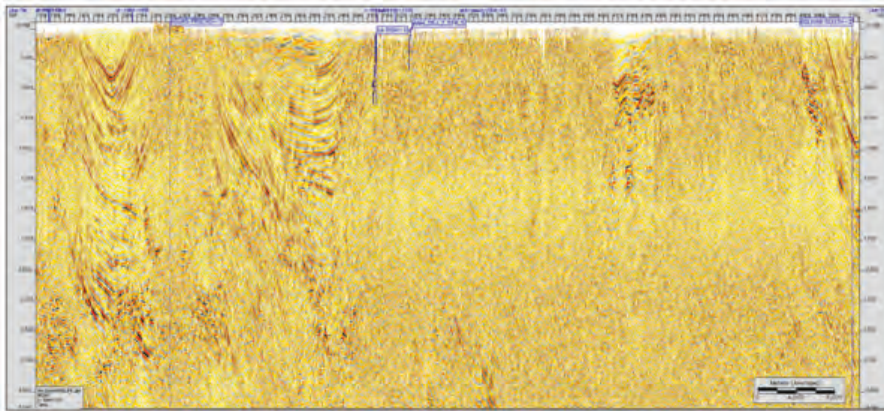


Figura 109. Ejemplo de discontinuidad de la imagen sísmica en grandes sectores de la cuenca de Sinú-San Jacinto, que dificultan el entendimiento del subsuelo.

En el segundo aspecto, el mercado internacional de la sísmica se ha movido rápidamente para ocupar su lugar en las numerosas oportunidades que se abren para proyectos de energías alternativas y cambio climático. (Figura 110).

En Colombia comienza a revelarse el potencial de la energía geotérmica. Empresas petroleras como Ecopetrol y Parex ya han dado pasos concretos poniendo en operación proyectos de generación en departamentos como Meta y Casanare. Según reporta la Asociación Colombiana del Petróleo "Parex Resources Colombia, con el acompañamiento del Ministerio de Minas y Energía, se sumó en marzo de 2021, a la hoja de ruta del Gobierno Nacional que le apuesta a un sistema energético más competitivo, eficiente y resiliente, mediante la masificación de energías renovables no convencionales con la inclusión de nuevos modelos de negocio y nuevas tecnologías que aporten a la transición energética del país.

TGS Sells Seismic Data for Use in Carbon Capture Project

PROJECT & TENDERS

December 5, 2019, by Subsea World News

TGS has completed the sale of one of its seismic datasets to OGCI Climate Investments' Net Zero Teesside project, a carbon capture, utilization and storage (CCUS) initiative planned for the North East of England.

Seismic sensor nodes to enable faster geothermal exploration



© Getty Images/istockphoto, field work source: Stryde

CGG Multi-Client Data

Home | Industry Applications | Energy Transition | Carbon Capture, Utilization & Sequestration

Carbon Capture, Utilization & Sequestration

Accelerate the deployment of CCUS with a unique range of geoscience expertise

We offer integrated geoscience solutions to identify and de-risk storage sites and optimize their development for safe and effective injection and storage of CO₂. Our wide expertise in geological, geophysical, reservoir modeling, and geochemical sciences and satellite mapping technology provides insight throughout the CCS cycle.

TGS insights
CARBON CAPTURE

Sensores sísmicos para geotermia, entrevista con CEO de STRYDE



© Getty Images/istockphoto, field work source: Stryde



En esta entrevista con Mike Popham, CEO de la start-up STRYDE, hablamos sobre el papel de los estudios sísmicos para la exploración geotérmica y la tecnología de su empresa.

Figura 110. Algunos recortes que dan cuenta de la participación de la prospección sísmica en el nuevo mercado de energías alternativas e iniciativas de mitigación del cambio climático. Fuente: recortes de noticias en la web

La compañía en articulación con la Universidad Nacional de Colombia (UNAL) Sede Medellín, desarrolló un proyecto piloto de coproducción de hidrocarburos y energía eléctrica a partir de recursos geotérmicos en el Bloque Los Ocarros, Campo Maracas, en el municipio de San Luis de Palenque (Casanare).

Este proyecto innovador busca principalmente: (i) aprovechar las altas temperaturas y volúmenes de agua producidos en la extracción de hidrocarburos, para generar energía eléctrica por medio de equipos especializados instalados en superficie; (ii) producir aproximadamente 100 kW efectivos, reemplazando el 5% de la energía generada de combustibles fósiles por energía geotérmica, logrando reducir hasta 550 Ton CO₂e anuales. De esta manera, el sistema podrá generar una cantidad de energía de hasta 72.000 kWh, equivalente a la cantidad de energía que consumirán 480 familias en un mes."

En resumen, el conocimiento del subsuelo a través de la prospección sísmica seguirá siendo un componente de la gestión del territorio, hoy, más que nunca, cuando necesitamos armonizar el uso de los recursos naturales y entregar un futuro sostenible a las próximas generaciones.

Bibliografía

Achem, Pelayes, Ramos, Lorenzo, La Vecchia, Concetti, Espósito, Cariz, Flores. (2011). Prueba de explosivos empleados en prospección sísmica. Repsol YPF - Western Geco - Dyno Nobel). VI Congreso de Exploración y desarrollo de Hidrocarburos, Argentina.

ACGGP. (2019). *Revista Energía y Geociencias. La Asociación soy yo, ¡Las manos son de todos!*.(No. 29),p.24-41

Agencia Nacional de Hidrocarburos, Ministerio de Minas y Energía, Ministerio del Interior, Ecopetrol; Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (2016). Diagnóstico de la Conflictividad Social. <https://www.undp.org/content/dam/colombia/docs/DesarrolloHumano/Diagn%C3%B3stico%20de%20la%20conflictividad%20social.pdf>: PNDU.

Alfonso, H. A. (2015). *The advantages of applying cableless technology: A case study in Colombia. Recorder* , Vol. 40, Issue No. 04, 24-27.

Asociación Colombiana del Petróleo. (2013). *Buenas Prácticas en Resolución y Transformación de Conflictos Sociales*. Bogotá, Colombia: Acp.

Bender, W. (1988). *Peak Particle Velocity vs. the Richter Scale. SSA Annual Meeting Program and Abstracts* , 59 (1), 1-52.

Camargo , J., & Cuellar, J. (1992). *Análisis sismológico de las vibraciones en Neiva, Huila. Santafé de Bogotá*, Bogotá.

Checa, J, Sánchez, M, González, Z, (2015) *Cálculo de distancias seguras para operaciones sísmicas. Revista Geopetróleo, Vol 23, 6-9.*

Checa, J., Sánchez, M., Fonseca, J., Quintero, G., Pineda, M., Mora, W., Caldwell, J., (2017). *Overcoming the fear: Nodal seismic acquisition in Colombia*.SEG Technical Program Expanded Abstracts.

Cooper, N. (2004). *A world of reality-Designing land 3D programs for signal, noise, and prestack migration-Part 2. The Leading Edge* , Volume 23, Issue 12, 1209-1320.

Cordsen, A., & Galbraith, M. (202). *Narrow- versus wide-azimuth land 3D seismic surveys. The Leading Edge. Volume 21, Issue 8* , 764.

Cortes, D. M., Caldwell, J., & González, C. (2015). *Single Geophone versus Geophone Array: A field study performed in Colombia. SEG Annual Meeting*, 18-23.

Deluchi, L., Marschall, R., & Werner, H. (1987). *3-D Seismic Survey of the Gaggiano Oil Field With Quaternary Encoding Dual-source Vibroseis Technique. SEG Annual Meeting* .

Estrada, L. A. (1992). La divulgación de la ciencia. Ciencias.

Galbraith, M. (2004). A new methodology for 3D survey design. SEG Technical Program Expanded Abstracts .

Girard, M., Faure, P., & Paulet, C. (2010). Onshore Seismic Acquisition: Updating an Efficient QC on Increasing Seismic Data Volume. Conference Proceedings, EAGE workshop on Developments in Land Seismic Acquisition for Exploration .

Howe , D., Foster, M., Allen, T., Taylor, B., & Jack, I. (2008). In-dependent simultaneous sweeping a method to increase the productivity of land seismic crews. SEG Technical Program Expanded Abstracts .

Jalinoos, F., & White, J. (1986). Wave propagation from an explosive source. GEOPHYSICS , Volume 51, Issue 3, 533-879.

Jiang, T., Eick, P., Jiang, Y., Li, T., Hao H., Chu W., Holt, R., Blymyer D., Koster K., and Enns D., (2019), "Compressive sensing seismic processing tests on a high density blended land data set," SEG Technical Program Expanded Abstracts : 4505-4509.

Keating, B. J. (December 12th 2017). OPC. Obtenido de <https://opc.co.uk/technical-feature/geophysics-history/>

Kendall, R., & Naghizadeh, M. (2015). Cableless Seismic Acquisition. Recorder, Vol. 40, Issue No. 10.

Lacreu, H. L. (2017). El paisaje geológico en la enseñanza de las geociencias: ¿Es un recurso didáctico, es un objetivo de estudio o ambas cosas a la vez?. Enseñanza de las ciencias de la Tierra, 25(3), 310-310.

Lansley, M. (2000). 3D seismic survey design : a solution : 3D Seismic surveys : design, tests and experience. First Break , 162-166.

Lansley, M. (2012). Cabled versus cable-less acquisition: making the best of both worlds in difficult operational environments. First break , 30, 92-102.

Manning, T., Abyazina, D., & Quigley, J. (Sep 2019). The nimble node - Million-channel land recording systems have arrived. The Leading Edge. Special Section: Acquisition and sensing , Volume 38, Issue 9.

Marín Agudelo, S. A. (2012). Apropiación social del conocimiento: una nueva dimensión de los archivos. Revista Interamericana de Bibliotecología, 35(1), 55-62.

Martinez, C. A. (2002). Evaluación del impacto producido en medios porosos por efecto de los métodos de exploración sísmica. Tesis de Magister MIC-2002-1-26, Facultad de Ingeniería. Universidad de los Andes, Bogotá.D.C.

McMahon, N., Ruitenbeek, K., Wams, J., & Slawson, S. (1999). Cost effective acquisition in a low oil price environment. *The Leading Edge*, Volume 18 Issue 10, 1162-1168.

Millis, K. (2017). Compressive seismic imaging and source driven shooting in land acquisition: Aklaq 3D, an Alaskan North Slope case study. *SEG Technical Program Expanded Abstract*.

Ministerio del Interior y de Justicia. (2011). *Ley orgánica de ordenamiento territorial*. Bogotá: Ministerio del Interior y de Justicia.

Moreiro González, J. A. (1998). *Introducción al estudio de la información y la documentación*. Medellín, Editorial Universidad de Antioquia, 27.

Muñoz, P., Rodríguez, L., Parrado, R., Uribe, J., Polanco, M., Bullon, J., y otros. (2015). *Operational Challenges of Nodal 3D Seismic Acquisition in the Sub Andean Environments*. 77th EAGE Conference and Exhibition.

Nicholls, H. R. (1962). *Coupling explosive energy to rock physics*, Volume 27 Issue 3, 305-406.

Ourabah, A., J. Bradley, T. Hance, M. Kowalczyk-Kedzierska, M. Grimshaw, and E. Murray, (2015), *Impact of acquisition geometry on AVO/AVOA attributes quality — A decimation study onshore Jordan: 77th Conference and Exhibition, EAGE*

Pérez Luna, Enrique; Alfonso Moya, Norys (2008). *Diálogo de saberes y proyectos de investigación en la escuela Educere*, vol. 12, núm. 42, julio-septiembre, pp. 455-460

Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo; Agencia Nacional de Hidrocarburos. (2016). *Guía metodológica para la gestión de los Programas en Beneficio de las Comunidades - PBC con enfoque de desarrollo humano y reducción de la pobreza extrema en Colombia*. Colombia: PNUD.

Reyna Ugarriza, C. D. (2021). *Fórmula de la licencia social para operar*.

Roizman, M., Checa, J. (2008). *Interpolación sísmica pre-stack en un área compleja de piedemonte*. Asociación Colombiana de Geólogos y Geofísicos del Petróleo (ACGGP).

Ruiz, D., Otorala, C., & Rodríguez, J. (2007). *Efecto de las vibraciones generadas por voladuras en minas en Colombia*. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, vol. 7 (2-3), 259-272.

Sarria, A. (1996). *Estudio de posibles efectos de cargas de dinamita para exploración geofísica, sobre nacederos de agua cercanos a las explosiones en la región de Palermo, Huila (Colombia)*. HOCOL (Nimir Petroleum Company) - Centro de Investigaciones de la facultad de Ingeniería - Universidad de los Andes, Bogotá.

Sarria, A. (1998). Bases de normas para evitar daños producidos por efectos de explosiones de exploración geofísica en fuentes de agua y edificaciones cercanas. Universidad de Los Andes, Departamento de Ingeniería Civil, Bogotá D.C.

Schriever, W. (1952). Reflection seismograph prospecting: How it started. *GEOPHYSICS*, 17(4):936.

Schroeder, F., Farrington, T., Balon, S., & Rapp, C. (1998). How *fold* and bin size impact data interpretability. *The Leading Edge*, Volume 17, Issue 9, 1177-1328.

Sengbush, R. (1986). *Petroleum Exploration: A quantitative Introduction*. IHRDC.

SGC. (03 de Julio de 2021). Geovisor BIP. Obtenido de Geovisor Web del Banco de Información Petrolera (BIP): http://srvags.sgc.gov.co/JSViewer/Geovisor_BIP/

Stork, C. (2017) Removing complex land noise with modern pattern recognition using Machine Learning, *SEG Technical Program Expanded Abstracts* : 6089-6093.

Stupel M., (1998), "The seismic acquisition specialist: Where it all starts," *The Leading Edge* 17: 787-787.

Tarback, E. J.; Lutgens, F. K., y Tasa, D (2005). *Ciencias de la Tierra*. Pearson Educación S. A., Madrid

Trickett, S., Burroughs, L., Milton, A., Walton, L. & Dack, R. Rank-reduction-based trace interpolation. *SEG Denver 2010 Annual Meeting*.

Vermeer, G. J. (2003). A comparison of two different approaches to 3D seismic survey design. *SEG Technical Program Expanded Abstracts* .

Villarreal, León-López, Espinosa, Agudelo, Arguello, (2019). Seismic source reconstruction in an orthogonal geometry based on local and non-local information in the time slice domain. *Journal of Applied Geophysics*, Volume 170.

Wisecup, R. D. (1994). The relationship between 3D acquisition geometry and 3D static corrections . Paper presented at the 1994 *SEG Annual Meeting* .

Xiwei, C., Weimin, S., Hao, X., & Baoqing, H. (2010). Further understanding of the characteristic impedance coupling of explosives to rock. *SEG Technical Program Expanded Abstracts* , 1052-3812.

Yakymchuk, N., Levashov, S., & Korchagin , I. (2012). Application of geoelectric and remote sensing methods for oil and gas prospecting and exploration in Siberian region. *SEG Technical Program Expanded Abstracts* , 1949-4645.



Jaime Checa Jiménez



ASOCIACIÓN COLOMBIANA DE GEÓLOGOS Y GEOFÍSICOS DEL PETRÓLEO