

EXPLORACIÓN GEOFÍSICA Y MEDIO AMBIENTE

Alberto Sarria*

Abstract

Seismic surveying for hydrocarbon detection is done in several ways; perhaps the most extended procedure is the reflection method where small charges of seimigel are detonated and reflections are gathered in geophones. The analysis of the records allow the geophysicist to estimate the spatial position of geologic formations that may accumulate hydrocarbons. There is the concern if detonations have some environmental impact. This paper explores it and concludes that if some minimum distances from the explosion to constructions and the like are maintained, there is no possibility to affect the environment.

Palabras Clave

Geofísica, impacto ambiental, propagación, elasticidad, daño, nacedero de agua, construcción, amortiguamiento

INTRODUCCIÓN

La industria de los hidrocarburos no solo es una de las mayores en el contexto internacional sino que hace parte del bienestar de la sociedad moderna y podría decirse que el mundo regresaría a las cavernas de ocurrir una súbita desaparición del petróleo y el gas natural. Colombia no es un país petrolero aunque tiene petróleo en yacimientos de buena calidad pero relativamente pequeños en cuanto a lo conocido. Si Colombia no continúa buscando afanosamente su petróleo necesariamente se convertirá en importador lo cual representará un demoledor efecto sobre su débil economía.

La exploración geofísica hace uso de la detonación de cargas de un explosivo especial denominado sismigel; a estas explosiones también se las llama disparos en la industria. Las ondas generadas en la perturbación viajan por el interior terrestre y se reflejan y refractan en los cambios de rigidez del medio recorrido. También se difractan en objetos o formaciones con cambios geométricos significativos. Las ondas se registran en instrumentos denominados geófonos y de allí se llevan al sismógrafo. Un intrincado y laborioso procesamiento

numérico sobre las ondas registradas permite al geofísico hacer estimaciones sobre yacimientos de hidrocarburos de manera similar a las que hace un médico que ausculta a un paciente con rayos X, ultrasonido y otros procedimientos de imágenes médicas.

En la industria petrolera se emplean las ondas reflejadas porque lo que podría denominarse la apertura entre geófonos extremos tendría que ser muy grande e inconveniente si se empleara la refracción de ondas para investigar formaciones profundas. Por otra parte, las compañías de exploración han hecho ingentes inversiones en mejorar el software de investigación por reflexión lo cual, estiman ellos, les confiere ventajas sobre sus competidores.

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 para 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

* Profesor Titular (Emérito) Universidad de los Andes

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 mas metros de distancia y que pueden producir deslizamientos de ladera. Tan complicados efectos ambientales serían causados por explosiones que ocurren en una zona y después de muy corto tiempo ya están ocurriendo a tan gran distancia que ninguno de los habitantes locales se percata de ellas. Es demasiado difícil que en condiciones de ocurrencia tan puntual y tan corta en el tiempo ocurran estos efectos de manera que afecten regiones enteras.

Hay, entonces, un problema cuya trascendencia no puede soslayarse y sobre el cual hay que hacer claridad para evitarle grandes males al país. Ese es el objeto de este escrito.

DETONACIÓN Y PROPAGACIÓN DE LA PERTURBACIÓN

La teoría de la elasticidad le da una solución a la propagación de una perturbación en función del tiempo de viaje por el medio continuo; para ello se apoya en la denominada función de Green [1] que permite establecer un campo de esfuerzos y deformaciones en el cual se puede determinar la amplitud en función del tiempo en una región (observador) del dominio cuando se ha producido una perturbación (origen) tomando en cuenta cualquier dirección. En general si las dimensiones de la perturbación son pequeñas en comparación con las del dominio el tratamiento matemático del problema se simplifica notoriamente porque no es necesario considerar las fuerzas de volumen sino únicamente las de superficie.

Este es el caso de la exploración geofísica en la cual los pocos kilogramos de sismigel ocupan un volumen ínfimo comparado con la distancia a los objetos que pueden resultar afectados por la detonación, localizados a distancias mínimas de varios metros. Por otra parte, este no es el caso de los sismos en los cuales el campo de esfuerzos que se rompe es de grandes dimensiones y las construcciones afectadas pueden estar dentro del mismo campo de esfuerzos o a distancias del mismo orden de magnitud.

a) Cargas

La carga de sismigel que se emplea como fuente de perturbación rara vez llega a 5 kg, con valores más frecuentes en el orden de los 3.5 kg. En ocasiones muy particulares las cargas detonadas pueden llegar hasta cerca de los 10 kg, pero esto es muy raro y solo unos pocos de los millones de detonaciones que se han producido en la exploración geofísica petrolera internacional han llegado a tan altos pesos. Estos datos son muy importantes pues dan una idea de que tan pequeñas cargas detonadas en perforaciones con profundidades similares a 10 m no pueden producir daños como los que se mencionan en algunos ambientes críticos del tema porque simplemente no disponen de la energía para ello.

Aunque muchas veces poco indica se anota que un kilogramo de dinamita puede liberar una energía de unos 4.2×10^{13} ergios. Regiones del país han sido afectadas por sismos que liberan miles de millones de veces la energía anotada. Tales sismos han producido enormes efectos regionales y locales pero no se conocen datos que describan daños generalizados a los sistemas hídricos locales o regionales.

La carga se coloca en el sitio en forma de cilindros que se acomodan a la perforación, aunque para efectos del análisis se estima que forman una esfera de aproximadamente 10 cm de radio. Desde luego que esta suposición introduce errores en una estimación de los efectos, pero estos no pueden superar a los cometidos al suponer un medio homogéneo e isotrópico. De no tomar decisiones de esta clase, la modelación resultaría imposible o tan compleja que habría que abandonarla y en ciencias e ingeniería no podría trabajarse pues las simplificaciones que debe hacer el investigador son frecuentes. Puesta la carga en su sitio el hueco se tapa con el mismo material extraído para evitar el fenómeno de soplado.

La carga de sismigel accionada por el detonador entra en un proceso de combustión de muy alta velocidad que transforma en gas la masa sólida en unas pocas decenas de microsegundo. Este proceso genera una elevada temperatura en el terreno circundante muy cercano al explosivo acompañada de una elevadísima presión que pulveriza y calcina el material en un volumen con radio inferior a unos 100 cm para cargas hasta de unos 10 kg.

b) Dominios

Para el análisis de la propagación de la perturbación desde el punto de disparo hay que tomar en cuenta las

posibles relaciones esfuerzo contra deformación del medio recorrido por la perturbación. Se considera un medio homogéneo e isotrópico, que como se ha anotado casi nunca se da en la realidad. Sin embargo numerosas modelaciones de diversos problemas en geofísica indican que los errores derivados de tal hipótesis a veces son menores.

Se postulan tres dominios en la propagación de la perturbación generada por la explosión del sismigel. El primer dominio se supone esférico e inmediatamente cercano a la carga; en este dominio no rige una relación esfuerzo-deformación del medio que queda calcinado y pulverizado. El segundo dominio corresponde a un casquete esférico que se inicia donde termina el primer dominio y se extiende hasta varios metros de distancia del punto de explosión. En este dominio la relación esfuerzo-deformación del medio es no lineal y es tanto más no lineal en cuanto más cerca se ubique del primer dominio. El tercer dominio es exterior al segundo y en él se estima que la relación esfuerzo contra deformación es lineal.

En el dominio interior no rigen relaciones esfuerzo-deformación y los efectos sobre lo que haya allí son devastadores pues la combinación temperatura-presión es muy dañina. De acuerdo con la referencia², la transferencia de la detonación al medio circundante depende de la impedancia relativa entre el explosivo y el medio en el cual ocurre la explosión. Esta relación se expresa mediante la ecuación siguiente:

$$\sigma_t = 2\sigma_1 \rho_2 c_2 / (\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1) \quad (1)$$

En esta ecuación σ_t es el esfuerzo transmitido al medio, ρ_1 es la presión desarrollada por el gas de la detonación, c_1 y ρ_1 corresponden a la velocidad de la onda de presión de la detonación misma y a la densidad de masa del explosivo empleado; ρ_2 y c_2 son la densidad de masa y la velocidad de la onda de esfuerzo compresivo en la roca.

Hacia afuera del dominio interior hay otro dominio en el cual las relaciones esfuerzo-deformación no son lineales. Allí ocurren deformaciones residuales manifestadas en términos de fracturas del medio. En este segundo dominio podría haber efectos dañinos pero muy localizados sobre tuberías enterradas, nacederos de agua o construcciones. Es natural que la intensidad del posible daño se reduzca con la distancia al límite interior del segundo dominio. Aunque es difícil definir un rango para el segundo dominio se estima que algo simi-

lar a un casquete esférico que se extienda entre 100 cm y 600 cm del disparo podría ser razonable como una idea para el caso general.

Hacia afuera del segundo dominio se presenta el tercer dominio en el cual las relaciones esfuerzo-deformación tienden a ser lineales y o no hay daños apreciables sobre nacederos de agua, tuberías, construcciones o laderas o si los hubiera son menores y de ocurrencia muy remota. De nuevo se anota que la esfericidad de los dominios se apoya en medios homogéneos e isotrópicos, que prácticamente no ocurren en la naturaleza. Aún así, los resultados de los análisis son robustos y bastante confiables.

c) Amortiguamiento de la perturbación

La muy elevada temperatura generada por la explosión queda confinada casi totalmente dentro del primer dominio. En consecuencia, el posible daño sobre un objeto queda reducido al efecto de la onda de presión y es necesario analizar qué sucede cuando sale desde el disparo de la carga de sismigel hacia afuera pasando por los dominios segundo y tercero antes propuestos.

Lo primero que debe decirse sobre la perturbación que se desplaza hacia afuera desde el límite entre los dominios uno y dos es que corresponde a una función impulsiva dado que la combustión del explosivo ocurre en fracciones de segundo. El elevado esfuerzo presente multiplicado por el área da una magnitud de fuerza cuya duración es de milisegundos. Es conocido que funciones de esta naturaleza al viajar sufren un proceso de convolución con las propiedades del medio que las va degenerando; a una cierta distancia tienen la amplitud que les corresponde según el amortiguamiento que las ha afectado. Su forma ya no es rectangular y la duración aumenta. En su viaje la función impulsiva saca de su punto de equilibrio las partículas del medio. La rigidez de este, conforma un proceso de intercambio entre energías potencial y cinética que pone a oscilar el medio, aunque por el amortiguamiento las oscilaciones no duran.

El lector puede imaginar que toda la energía se liberó en un punto y que su efecto se propaga hacia afuera en frentes de onda esféricos. Si el volumen ocupado por el explosivo corresponde a una pequeña esfera de 10 cm de radio, se puede calcular la presión en su superficie mediante algunas modificaciones de la ecuación (1) y pensar que la intensidad de energía disminuye en proporción inversa de la distancia r desde el centro de detonación, elevada al cuadrado porque en el supuesto de no disipación de energía por fricción, la que se pro-

paga hacia afuera ocupa áreas cada vez mayores dado que el área de la esfera es proporcional a r^2 . Imagínense ángulos sólidos que salen del centro de la detonación por los cuales fluye la energía. Este sería el fenómeno de absorción geométrica o disipación geométrica que disminuye drásticamente la amplitud de la perturbación.

Además de la disipación geométrica, la función impulsiva que se desplaza hacia afuera desde el límite de los dominios uno y dos genera un intenso proceso de fricción intergranular que disipa energía al medio circundante en forma de calor (este calor nada tiene que ver con la alta temperatura de la ignición del explosivo). La fricción intergranular va disminuyendo a medida que la función impulsiva viaja por el dominio dos y es aún menor dentro del tercer dominio. La fricción disminuye de manera muy intensa la amplitud de la perturbación que se desplaza hacia fuera del disparo.

En su desplazamiento la perturbación va perdiendo amplitud, o lo que es lo mismo, la presión va perdiendo intensidad. Este proceso ocurre en términos de un exponente negativo para la distancia medida desde el punto de disparo, conformado por la suma de las acciones geométrica y de fricción. El valor del coeficiente puede ser similar a 4 en las puras vecindades de la explosión y comienza a disminuir con la distancia. Solo estudios de campo muy bien controlados permiten estimar por regresión una ley de variación del amortiguamiento combinado. El problema es que el amortiguamiento puede variar de un suelo a otro y la distribución del exponente de la distancia r al disparo también puede variar. Esto significa que en algunos suelos en el dominio dos puede pesar más el amortiguamiento, en otros la disipación geométrica puede ser más significativa.

Como estimación tentativa puede suponerse que el amortiguamiento varía aproximadamente con un promedio de r^{-3} hasta una distancia aproximada de 6 m. No hay mucho argumento para defender este valor, pero parece razonable. La presión P a 6 m de la explosión puede comenzar a disminuir en términos de $r^{-2.5}$ y a partir de unos 15 m de distancia la presión tendería a disminuir con algo similar a r^{-2} . Los exponentes mencionados consultan algunos datos sismológicos.

d) Esfuerzos producidos por la perturbación en su desplazamiento

A partir de las consideraciones anteriores se puede pensar que dentro del campo de interés de la discusión, correspondiente al posible daño causado por explosiones de sismigel para exploración geofísica, la función

impulsiva viaja desde el límite de los dominios uno y dos (en dominio uno no rigen relaciones esfuerzo-deformación) punto donde tiene un enorme valor. Aplicando la ecuación (1) con una velocidad de combustión de 6.000 m/s y suponiendo que la detonación ocurre en suelo $\rho_2 \approx 0.16 \text{ ton}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$ la presión en el contacto sismigel-medio circundante sería $\sigma \approx 181.000 \text{ kg}/\text{cm}^2$ ($\sigma \approx 347.000 \text{ kg}/\text{cm}^2$ (18.100 MP) En roca se podría llegar a $\sigma \approx 347.000 \text{ kg}/\text{cm}^2$ ($\approx 34.700 \text{ MP}$).

Estos valores dan una idea de la violencia del fenómeno en la superficie de contacto entre el explosivo y el medio circundante, para el caso en la superficie de la esfera de 10 cm de radio dentro de la cual se supone yace el explosivo. De aquí en adelante este valor se denomina P_0 y como compromiso evaluativo se toma un valor $\sigma \approx 200.000 \text{ kg}/\text{cm}^2$ (20.000 MP) dado que la perforación en roca dificulta las operaciones de campo.

Al aplicar una hipótesis de variación de la presión P en términos de $r^{2.7}$ a 6 m de distancia el esfuerzo en el medio resulta similar a $4 \text{ kg}/\text{cm}^2$ (0.4 MP) mientras que si el exponente es igual a 3, tal vez el más apropiado dentro del campo verdaderamente cercano que corresponde a la distancia anotada, P resulta aproximadamente igual a $0.8 \text{ kg}/\text{cm}^2$ (0.08 MP). Estos valores permiten postular que a distancias mayores que 6 m la relación esfuerzo-deformación del medio afectado por la función impulsiva propagada tiende a ser lineal. Tómese en cuenta que el módulo de elasticidad del medio es mayor frente a una carga impulsiva que frente a una de larga duración. Con una relación esfuerzo-deformación lineal las deformaciones residuales serían mínimas, de haberlas, y no se podría producir daño a un nacadero de agua o a una construcción.

PRÁCTICAS DE CAMPO Y RIESGO DE DESLIZAMIENTO EN LADERAS

Las magnitudes de los esfuerzo de compresión determinadas a partir de una hipótesis de variación con r^3 indican que a unos 6 m del punto de explosión de cargas de sismigel inferiores a 10 kg la posibilidad de daño es remota. No se puede decir que no existe posibilidad de daño dada la extraordinaria variabilidad de las condiciones mecánicas de los suelos en los cuales ocurren los disparos. Por ello, las recomendaciones internacionales que también se aplican en Colombia indican que la perforación para la detonación debe ser preferiblemente igual o superior a 10 m y la distancia horizontal mínima a un nacadero de agua o construcción igual o mayor que 40 m.

Las compañías de exploración llevan la seguridad aún más allá de los valores mencionados y emplean distancias horizontales entre la boca de la perforación y el nacadero o construcción que rondan los 100 m. En estas condiciones las posibilidades de daño definitivamente resultan imposibles.

Han surgido inquietudes sobre el efecto de los disparos de exploración en la estabilidad local de laderas empinadas. Se sabe que suelos mal consolidados y muy húmedos en condiciones estáticas tienen un coeficiente de seguridad al deslizamiento que resulta crítico frente a una determinada pendiente con respecto a la horizontal. Si dicho ángulo se sobrepasa hay posibilidades de desplazamientos en mas de porciones de la ladera. Laderas con ángulos similares pero inferiores al crítico son potencialmente inestables frente al sacudimiento inducido por sismos localmente intensos [3] como lo demostró el sismo de Páez de Junio de 1994 en el cual ocurrieron deslizamientos generalizados que generaron avalanchas con elevado saldo de víctimas y una impresionante destrucción.

Es posible que en condiciones de equilibrio similar al crítico una perturbación puramente local como el disparo genere un pequeño deslizamiento si se toma en cuenta que el relativamente pequeño espesor de los suelos como los anotados posiblemente no favorezca la ejecución de perforaciones con profundidad similar a 10 m. Una profundidad menor ayuda a conformar el riesgo de deslizamiento local. Lo que no puede presuponerse es que el disparo sirva de generador a un deslizamiento de grandes proporciones.

La mala información originada al asociar a los disparos la presencia de los pequeños deslizamientos que abundan en nuestras montañas, puede servir de elemento negativo para la toma de decisiones de un funcionario público que ante la duda, puede oponerse a un procedimiento inocuo como generador de impacto ambiental.

OTRAS SITUACIONES

En algunas ideas tendientes al establecimiento de los planes de ordenamiento territorial han surgido opiniones que asocian la ejecución de disparos de exploración con situaciones tan diversas como: muerte de alevinos en estanques localizados a distancias superiores a 100 del disparo. Reducción de la producción de hatos lecheros y efecto sobre la frecuencia con que usualmente ponen sus huevos las gallinas. Posiblemente en el futuro se escuche de otros efectos existentes o imaginarios.

Es comprensible que quien resulte afectado por la exploración reclame y deba ser recompensado por el daño

sufrido. Esto no lo puede cuestionar nadie y no tiene nada de raro que ocurran reclamaciones por cercos que se dañaron o efectos similares. Lo que no parece tener lógica son reclamaciones sobre situaciones indemnizables y en muchos casos situaciones que no existen. Es imposible demostrar que unos pocos disparos que alteraron el silencio tradicional de una zona durante unos minutos se conviertan en un factor que afecte por largo plazo la producción lechera. Es imposible que los peces mueran por efectos imperceptibles. Se requieren instrumentos muy sensibles para registrar el paso de la perturbación del disparo a 100 m de distancia. Su efecto en los alevinos podría ser similar al producido por un caballo que pasa al galope a varios metros del estanque.

ESTUDIOS DE CAMPO REALIZADOS EN COLOMBIA

En Colombia se han desarrollado dos estudios especializados dedicados al análisis de los efectos de la explosión de cargas de sismigel sobre acuíferos o sobre construcciones. sobre las construcciones y nacimientos de agua:

El primer estudio es el "Plan Piloto de Pozos de Monitoreo Para Programas Sísmicos" desarrollado por BP en 1996 el cual no encontró efectos sobre nacimientos de agua con disparos a unos 10 m de su posición. El incremento de turbidez del agua debido a la perturbación desapareció relativamente pronto y el acuífero retornó a la normalidad.

El segundo estudio es el "Proyecto Laguna 94, Boyacá" realizado por Occidental Inc. Grant Geophysical en 1994 que concluye que los niveles de aceleración y velocidad de las partículas del medio sacudidas por disparos de sismigel son muy pequeñas a distancias que superan 10 m de la fuente.

Desde luego que dos estudios no son suficientes para una demostración contundente de la poca capacidad de daño de un disparo que cumpla unas especificaciones mínimas y ojalá se adelantara un programa de investigación amplio y muy bien controlado sobre el tema. En el exterior también se han hecho estudios que encuentran mas o menos lo mismo que los dos nacionales.

CONCLUSIONES

La descripción del proceso de exploración geofísica de yacimientos de hidrocarburos y su posible impacto ambiental desde el punto de vista de los disparos, permite obtener las conclusiones siguientes:

1. Colombia no es un país petrolero y debe continuar explorando yacimientos de petróleo y gas. Cualquier situación que desaliente la exploración geofísica tendrá repercusiones macro económicas que conducirán sin dudas a la reducción del producto per cápita del colombiano medio con similar impacto sobre el bienestar en términos de la reducción de inversiones del Estado en educación, salud, vivienda y servicios.
2. La exploración geofísica de yacimientos de hidrocarburos mediante técnicas de reflexión debe emplear la explosión de cargas de sismigel que rara vez superan un peso de 5.000 gramos.
3. La perturbación causada por la explosión conforma tres dominios. Uno muy cercano en el cual la combinación de elevada temperatura y presión producen una alteración total del medio circundante. Este dominio esférico tiene un diámetro inferior a 100 cm. Un segundo dominio que se extiende desde donde termina el primero hasta unos 600 cm del centro de la explosión. En este dominio la relación esfuerzo-deformación del medio es no lineal. El tercer dominio es externo al segundo y en él la relación esfuerzo deformación del medio es lineal.
4. En el primer dominio el daño sería severo sobre elementos como tuberías, nacederos de agua y construcciones. En el segundo dominio puede haber daños menores a los componentes anotados. En el tercer dominio la posibilidad de daño es remota.
5. En las laderas empinadas con suelos poco consolidados y húmedos hay posibilidades de que un disparo a poca profundidad genere un pequeño deslizamiento local. Sin embargo si la profundidad de explosión es de unos 10 m, la posibilidad del deslizamiento es muy remota.
6. Resulta casi imposible que el efecto sónico de unos pocos disparos de exploración afecten la producción lechera o a las gallinas ponedoras.

RECOMENDACIONES

De acuerdo con las conclusiones presentadas se proponen las siguientes recomendaciones:

1. La exploración geofísica de yacimientos de hidrocarburos debe ser estimulada en la nación porque es un potencial generador de riqueza que da empleo a gente de la región donde se ejecuta.
2. Las compañías exploradoras deben cumplir lo establecido en una plan de manejo ambiental bien redactado en el cual la lógica se imponga, en lugar de ser condicionado por fantasmas inexistentes como opiniones aisladas que dan cuenta de daños que nadie más ha visto y que no son comprobables al visitar el sitio donde se dice que ocurrieron.
3. Es urgente que los funcionarios públicos que manejan las relaciones con los procesos de exploración geofísica se familiaricen con el tema a fin de desarrollar una posición pro activa que permita el desarrollo de planes exploratorios eficientes.
4. Se debe desarrollar una investigación seria y apropiada para aclarar algunos puntos que solo trabajos de campo bien instrumentados pueden dilucidar luego de un cuidadoso análisis de los registros.

REFERENCIAS

- [1] AKI, K; RICHARDS, Paul
"Quantitative Seismology; Theory and Methods"
Freeman Fox 1982
- [2] DOWDING, Charles
"Blast Vibration, Monitoring and Control" Prentice Hall 1985
- [3] SARRIA, Alberto
"Ingeniería Sísmica" Ediciones Uniandes-Ecoe 1995