

ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD Y WORKFLOW EN PROYECTOS DE REINYECCIÓN DE CUTTING EN ZONAS AMBIENTALMENTE SENSIBLES

Jorge Albeiro¹, Agustín Sosa Massaro², Liliana Berango³

1: Consultor en Petróleo & Gas, Kitec Energia. jorgewashingt@yahoo.com.ar

2: Agustín Sosa Massaro, Instituto Tecnológico de Buenos Aires, asosa@itba.edu.ar

3: Liliana Berango, Consultor en Impacto Ambiental. lilijuberango@gmail.com

Keywords: Cutting, perforación, medioambiente, riesgos

ABSTRACT

Feasibility Analysis and Workflow to Cutting Reinjection Projects in Environmentally Sensitive Areas

When drilling exploration or development wells in environmentally sensitive areas, it is required to take extreme care at the moment to define the final destination of the drilling cuttings when they are saturated with drilling fluids; either water or oil base.

This has been a subject of special attention, considering that the environmental regulations of each region establish standards and define chemical parameters for the disposal of these residues in appropriate places.

Among the known methods we can mention: Land Farming, Landspreading, Thermal Processes, Chemical Oxidation and De-emulsification, Solids Washing, Dewatering, Centrifuging, and Inerting, among others.

All these methods require the preparation of suitable areas for the disposal of the contaminated cuttings, while they are being treated by one of the previous methods. At the same time, it is required a work of monitoring the chemical processes as a function of time. In this sense, many of these processes are expensive and sometimes with unfavorable results. For instance, since treatment pools might be flooded by rainwater, there is a risk of percolation of the associated fluids, compromising the water table, or breakage of the dikes.

In wells drilled at the jungle, the conditions are extreme, because the cuttings must be treated at the same location where the drilling is taking place, existing similar risks that the ones mentioned above and sometimes with questionable results.

The reinjection of cutting or Cutting Re-Injection (CRI), is a safe method, but requires a complete study before its feasibility can be defined. The present work presents the workflow of tasks that must be completed, in order to carry out a successful reinjection work of cutting in formations that meet certain geological, petrophysical and geomechanical characteristics.

The technique consists of an in-situ treatment, grinding the cuttings and mixing them with water and chemical products, until achieving an adequate slurry that will be injected into formation, with auxiliary equipment existing in the market.

A CRI project can be done by converting an old exploratory well that has not been successful; by drilling a "sink" well; or even rigless (without equipment). The advantage of this method is that under the appropriate conditions the reinjection is done in the same location where the drilling is taking place, without the need of long storage periods and canceling the risks of transporting the cuttings to a final disposal site.

INTRODUCCIÓN

La perforación de pozos de exploración o desarrollo en áreas ambientalmente sensibles, donde las regulaciones para la disposición final de los recortes de perforación están cambiando dramáticamente, han obligado a las compañías operadoras a usar soluciones novedosas, para disponer en forma segura los recortes de perforación, de pozos perforados con fluidos base agua o base aceite. Esto ha hecho que esta disposición final se convierta en los últimos años, en un proyecto dentro del propio proyecto de perforación. Es sabido que las actividades petroleras y en específico la de perforación de pozos, genera grandes volúmenes de los residuos denominados recortes de perforación o cutting, cuyo manejo eficiente y responsable, requiere de transporte especializado y de la infraestructura adecuada para su disposición (Alarcón Sierra, 2014).

Hasta los años ochenta poca era la atención brindada en la eliminación de los recortes y el exceso de los fluidos de perforación y a los efectos que estos pueden ocasionar al medio ambiente. Habitualmente estos materiales eran desechados por la borda en operaciones marinas o se sepultaban en localizaciones terrestres (Alarcón Sierra, 2014).

Con posterioridad a este periodo comenzaron en el mundo trabajos tendientes a regular esta actividad y en Latinoamérica organismos internacionales como el ARPEL (Asociación Regional de Empresas de Petróleo y Gas Natural en Latinoamérica y el Caribe) han publicado documentos como “Tratamiento y eliminación de desperdicios de exploración y producción” en el cual describe el proceso para tratamiento y eliminación de los residuos generados, incluyendo recortes de perforación, lodos de perforación, cementos, desperdicios químicos y metálicos así como los que describe como “basura general” compuestos de papel, cartón, plásticos (Alarcón Sierra, 2014).

Con este avance el resto de los países miembros ha trabajado para dictar normas y reglamentos para esta disposición final, pero los avances más importantes datan de los últimos años, cuando se comenzó a regular la disposición final, cancelando así toda posibilidad de disponer estos recortes en piletas naturales (Foto 1), como se hacía regularmente, dejando hasta nuestros días un importante pasivo ambiental, con los consiguientes reclamos de los superficiarios de los terrenos afectados.

A lo largo de este tiempo han aparecido en el mercado diferentes técnicas las cuales han tenido diferente grado de aceptación, ya sea por los costos asociados, o bien por los resultados finales que no han sido aceptables, generando mayores costos. Criterios técnicos y regulaciones ambientales locales, son las que demarcan un campo de juego que requiere de medidas estrictas. La reinyección de cutting es hoy una técnica aceptada y que está en proceso de crecimiento, en especial en áreas sensibles como son las de selva.

Áreas Ambientalmente Sensibles

Una de las definiciones que más se adapta a este trabajo es la del ayuntamiento del país vasco el cual dice que “Las zonas ambientalmente sensibles son aquellas áreas del territorio que, por su especial valor ambiental y fragilidad, son susceptibles de un mayor deterioro ambiental”. En este sentido, podemos encuadrar bajo este concepto las zonas pobladas o las zonas de selva, donde la diversidad de flora y fauna, las hace zonas de particular sensibilidad y que por otra parte es donde comienzan a aplicarse estas técnicas.

ALGUNOS MÉTODOS EN USO PARA TRATAMIENTO DE LOS RECORTES DE PERFORACIÓN

Piletas Naturales

Es en muchas operaciones de perforación, el sistema más usado para disponer en forma “temporal” los recortes, los cuales están impregnados con el fluido de perforación. En las primeras épocas, estas piletas no tenían ningún recubrimiento, para aislar los recortes y fluidos asociados de la superficie del terreno y con frecuencia, luego de completar la perforación, se abandonaban, dejando un pasivo ambiental, que perduran hasta nuestros días. Una mejora sustancial ocurrió, cuando estas piletas se las comenzó a revestir con geo-membranas textiles, pero además en el caso de la selva, requieren que estén techadas para evitar que las precipitaciones pluviales colmaten la pileta y reduzcan la superficie útil o saturen los recortes con agua de lluvia (Foto 1).



Foto 1. Vista de una pileta natural en la selva, colmatada de recortes de perforación, donde se aprecian las bermas de contención y una estructura metálica que sostiene la carpa impermeable del techo (Foto J. Albeiro)

Landfarming

El proceso de Landfarming o laboreo agrícola, es una tecnología de biorremediación de los suelos contaminados, lodos, o material con características de suelo. El fundamento técnico del Landfarming se basa en la degradación de fracciones livianas de hidrocarburos, por comunidades bacterianas. Durante la operación de Landfarming los materiales contaminados son esparcidos en una superficie de suelo, o son apilados sobre una superficie impermeable para evitar contaminación de las capas de suelo o aguas que se encuentran por debajo (Foto 2). Las poblaciones de microorganismos naturales del suelo crecen en el material usando el contaminante como fuente de alimento, transformándolo en productos inocuos. La marcha del proceso se estimula, monitorea y controla. La principal ventaja es que no produce residuos y es de más bajo costo que otros métodos. Las desventajas están asociadas a que suelen llevar más tiempo y controles que otros métodos; es un proceso más lento en locaciones de clima frío; requiere de gran área y tierra fresca.



Foto 2. Vista de un área de Landfarming, en un área cubierta por geomembrana y que requiere de maquinaria pesada para airear los recorte de la perforación o suelos contaminados (Foto Internet).

Esparcido de Suelo (Landspreading)

Este método consiste en el esparcido e incorporación del lodo en base agua, en la capa arable. El esparcido se realiza mediante un sistema aspersor y luego se le da un tratamiento igual al Landfarming.

Métodos Térmicos

Incineración

Es el proceso por el cual se queman materiales peligrosos a fin de destruir contaminantes

nocivos. Es útil para componentes orgánicos primarios pero puede tratar residuos que no tengan una forma definida.

Un incinerador es un tipo de horno que quema materiales, a una temperatura controlada y lo suficientemente elevada como para destruir contaminantes. A medida que los contaminantes se calientan, se transforman en gases que se combinan con oxígeno para formar gases menos nocivos y vapor de agua (combustión). Los gases producidos en el incinerador pasan a través de un equipo de control de contaminación de aire donde se elimina cualquier metal, ácido y partícula de ceniza remanente.

La principal ventaja es la gran reducción en la cantidad de residuos y la destrucción casi completa de sustancias peligrosas orgánicas; la ceniza es generalmente inerte y se puede sepultar en un sitio de confinamiento o tratarse mediante los procesos de fijación química; los metales pesados se transforman generalmente en óxidos menos tóxicos; los compuestos combustibles carcinógenos y biológicos activos son destruidos eficientemente. Puede destruir algunos contaminantes que otros métodos no pueden. Por otra parte, toma menos tiempo que muchos otros métodos. La desventaja radica en que es un método caro; suele requerir control atmosférico a menos que el residuo destruido sea un hidrocarburo de composición uniforme. Hay residuos nocivos que deben desecharse adecuadamente en un vertedero autorizado

Oxidación/Destilación Térmica

Este sistema que consiste de una cámara con calentamiento eléctrico en la cual el residuo se expone a suficiente calor controlado, para volatilizar el aceite residual y agua. La energía requerida se provee mediante generadores en el sitio. El residuo procesado antes de su descarga es enfriado y convertido en una pasta con la adición de agua. Los vapores de hidrocarburos y agua son condensados y separados en un separador aceite/agua. Los hidrocarburos recuperados pueden ser reciclados y reusados en sistemas de Iodos de perforación. Los gases liberados de la cámara de calentamiento pueden ser tratados para alcanzar condiciones estándar de emisiones a la atmósfera. Los resultados demuestran que con esta tecnología es posible la reducción de aceite asociado a recorte y fluidos gastados de perforación a nivel de <1 % en peso.

Métodos Físicos

Sistema de Lavado de Sólidos

Es un método físico; se usa para la descontaminación del recorte de perforación generado en la perforación con fluido de emulsión inversa, en términos generales se realiza en dos etapas: En la primera, los recortes obtenidos se canalizan hacia un tanque lavador en donde se adiciona un detergente

biodegradable. En este tanque, mediante agitación rotacional se separa el aceite del recorte. El líquido filtrado por la criba proveniente de esta primera etapa contiene la solución lavadora, aceite emulsionado y sólidos finos, requiriendo por lo tanto circular la mezcla a través de un separador centrífugo de dos fases que permite eliminar sólidos hasta de 5 micras. Los sólidos libres de hidrocarburos se pueden utilizar para relleno de terrenos. El aceite en tambores se envía a plantas regeneradoras o a la corriente de hidrocarburos y la solución lavadora se continúa reutilizando en el proceso.

Ventajas: permite aprovechar los productos obtenidos en el proceso y reutilizar la solución lavadora (hay ahorro de agua).

Desventajas: con este método lo único que se logra es separar el fluido de perforación de los recortes o transferirlo a otro cuerpo receptor sin embargo la descontaminación de las partículas es parcial y se lo debe combinar con otro método, como por ejemplo Landfarming.

Dewatering

Es simplemente la separación del componente agua del cutting. Los métodos para desaguar incluyen la filtración mecánica, centrífugas (y pozos decantadores utilizando la floculación y coagulación).

Ventajas: Los líquidos recuperados pueden eliminarse en pozo sumidero profundo, ser reciclados o descargados una vez acondicionados según la normativa vigente. Es el proceso más adecuado para minimizar el volumen de la fase sólida y hacerlo más fácil de manipular.

Desventaja: El componente sólido resultante aún requiere una opción de eliminación adecuada y posiblemente un mayor tratamiento, como por ejemplo Landfarming.

Centrifugado

Es un método físico que utiliza una centrífuga para retirar los líquidos de un desecho fangoso. Como un proceso de pretratamiento, sólo se debe usar en casos de desechos que sean adecuados para relleno si se sacan los líquidos libres del fango. La práctica de centrifugar para sacar líquidos de los fluidos de perforación y de proceso es una práctica común en los equipos de perforación.

Microencapsulado de Sólidos con Tierras de Diatomeas

Es un método físico-químico-fisicoquímico con la finalidad de inmovilizar los contaminantes, lo que incluye el completo recubrimiento o aislamiento de las partículas tóxicas. Se usa un emulsificante que tiene la función de romper la tensión superficial del hidrocarburo y por movimiento mecánico convierte a éste en esferas de 2 - 4 micras, rodeadas del emulsificante. Se le agrega un silicato (tierra de diatomea) y se forma un óxido de silicio amorfo, que tiene como

características el no ser lixiviable, al tener un 80% de agua y trazas de sal (cloruro de potasio), que dan un producto final cristalino y no tóxico (propriadamente el microencapsulado). El producto final se utiliza para compactar los caminos dentro de los yacimientos.

Ventajas: se obtiene la estabilización del contaminante a una fase sólida, más fácil de manejar y con posibilidades de rehusó.

LA REINYECCIÓN DE CUTTING

Esta tecnología, también conocida como CuttingRe-Inyection o CRI por sus siglas en inglés, está en pleno uso en el mundo y ha probado ser una tecnología eficiente, tanto para pozos perforados en el mar, como los perforados en tierra, en áreas particularmente sensibles, como puede ser la selva. En una operación como la que se va a describir, los recortes se recuperan de la pileta natural, se los muele a un tamaño determinado en forma mecánica, se mezclan con agua, hasta lograr una lechada viscosa estable (Geehan *et al*, 2007), la cual se bombea al pozo sumidero, en un intervalo previamente seleccionado a través de punzados, que de conectan el pozo con la formación donde se inyectara la lechada. El bombeo a presión crea una fractura hidráulica en la formación que contiene efectivamente la lechada. Al final del proceso la zona punzada se sella convenientemente con cemento(Geehan *et al*, 2007).

Inicialmente la técnica se desarrolló a modo de prueba por Amoco (hoy BP) en el campo Valhall del Mar del Norte, en respuesta a las nuevas regulaciones ambientales del Estado Noruego, quien a través de la Agencia de Contaminación, había establecido nuevos parámetros para la disposición de recortes contaminados por vertido al mar, reduciendo el volumen de petroleo asociado a la inyección base aceite del 6% al 1% (Geehan *et al*, 2007).

Porque es aplicable en áreas sensibles

En áreas de selva remota, donde el acceso en muchos casos, es por helicóptero, es materialmente imposible retirar y transportar los recortes contaminados, a un sitio apropiado para procesarlos mediante alguno de los métodos antes enunciados. Procesos como el Landfarming han probado ser una técnica de amplia aplicación, pero que requiere luego de terminado el pozo y retirado del equipo de perforación, de un prolongado periodo de seguimiento y control de los procesos que involucran esta técnica, con los consiguientes costos asociados y resultados cuestionables.

FLUJO DE TRABAJO PARA UN PROYECTO CRI

En una operación de Reinyección de cutting (CRI), se debe seguir un flujo de trabajo ordenado para poder concluir si se puede hacer. Una lista preliminar de tareas se puede resumir en los

siguientes puntos:

- Inventarios de datos de pozos
- Selección de los intervalos de inyección
- Construcción del modelo geomecánico 1D
- Diseño del pozo de Inyección
- Contratación de los equipos y personal de campo
- Establecer un Programa de trabajo

Inventario de Datos de Pozos

En esta etapa se deben armar una base de datos con toda la información disponible:

- Información de Mudlogging y que incluye Masterlog y descripción de muestras
- Información de Registros Eléctricos: Densidad, Sónico, Resistividad, Rayos Gamma, SP, Imágenes de pared de pozo.
- Datos de presión de poro y gradiente de fractura.
- Todos los reportes disponibles de Mudlogging.
- Todos los reportes disponibles de perforación. En este punto es muy valioso hacer un análisis de los eventos, tales como: perdidas de lodo, datos de arremetidas de pozo (kick), aprisionamientos, inestabilidad de la pared de pozo, zonas fracturadas, etc.
- Datos de Integridad de Formación (FIT) y/o Leak of Test (LOT), con especial valor los Extended LOT.
- Diseños de Pozo: Es posible que se contemple convertir un pozo abandonado en un pozo para el proyecto CRI.
- Datos de profundidad de los acuíferos y los estudios hidrológicos que puedan existir.
- Secciones sísmicas de la comarca, donde se puedan identificar la presencia de fallas, que puedan conectar niveles profundos, con niveles más someros.
- Si hay información de perfiles geológicos de superficie, es muy importante considerarlo, para ver el comportamiento que pueden tener los posibles niveles donde se va a inyectar, con relación al espesor de los niveles que pueden ser sello. Si se planifica un “Field Trip” por este motivo, es importante coleccionar muestras orientadas, para ensayos de geomecánica.
- Es probable que en el área haya otros proyectos de esta naturaleza y es valioso investigar los resultados obtenidos por otros operadores.

Selección de los Intervalos de Inyección

Este es una etapa crítica del proyecto CRI. Toda la información que podemos haber colectado es muy útil y acá es donde cobran valor los registros de mudlogging, si es que hay pozos en la zona o bien los estudios sobre afloramientos que se puedan haber hecho, en especial con este objetivo, partiendo de la base del valor de la información para este proyecto (Fig 1).

En este sentido es muy valioso poder reconocer niveles permeables susceptibles a recibir el volumen de recortes que se van a generar y por otro lado que tengan un sello apropiado, tanto al tope, como hacia la base de este nivel.

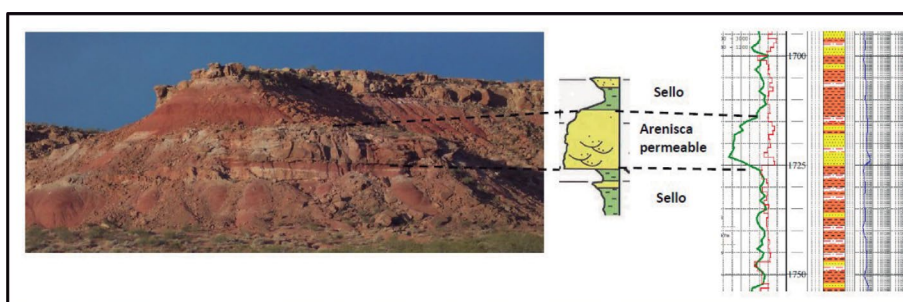


Figura 1. Estudios sobre afloramientos, donde se observa un nivel arenoso en la parte media, el cual tiene un sello arcilloso tanto a la base como en el techo (izquierda). Estas arenas confinadas (centro), son ideales y se deben considerar en el inventario de niveles permeables. Del mismo modo la información de mudlogging, nos permite reconocer niveles permeables con sellos importantes, en este caso formado por arcillas y limolitas (derecha). En ese registro de pozo se le ha agregado la curva de rayos gamma (color verde), para identificar mejor el espesor permeable. Lo importante es la continuidad lateral de estos niveles. (Foto Jorge Albeiro del Grupo Neuquén, Argentina)

Inventario de los Niveles de Inyección

Cuando se hace el inventario de los potenciales niveles que pueden ser seleccionados para el proyecto del CRI, es muy importante considerar el espesor permeable, y la calidad de la roca sello, lo cual es de una importancia extrema, para confinar la lechada con el cutting y además servir como barrera de permeabilidad e interface física, para que no se propaguen las fracturas en sentido vertical.

Por otro lado si tenemos más pozos en el área, debemos realizar trabajos de correlación, para identificar la continuidad lateral de este cuerpo y con las propiedades petrofísicas poder calcular valores de porosidad, estimar la permeabilidad y estimar que volumen de recortes pueden almacenar. De esto se desprende la importancia de conocer este tipo de cuerpos arenosos, desde todo punto de vista, incluido las propiedades geomecánica.

En la Fig 2, el espesor permeable de la arena alcanza a 10 m, el sello superior se puede estimar en unos 15 m, mientras que el inferior supera los 25 m de espesor. Con estos valores se puede considerar un nivel apto para el proyecto CRI.

Los registros de Resistividad y Sónico de este tramo del pozo, se deben considerar para calcular el espesor útil de la unidad arenosa y la porosidad “in situ”. Esto junto con la descripción geológica ayudará a tomar decisiones. Al final del proceso tendremos un inventario de niveles que luego podremos seleccionar para el proyecto CRI.

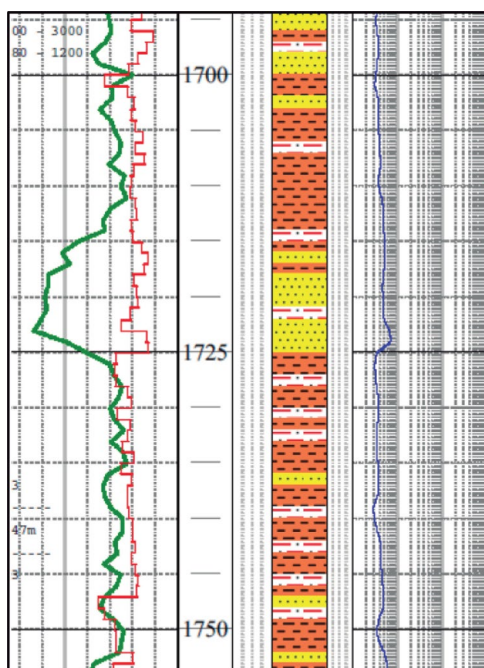


Figura 2. Registro litológico del tramo superior de un pozo donde se han perforado capas rocas. El nivel arenoso entre 1715x y 1725x, se puede considerar de buena calidad para el proyecto CRI, al estar confinado entre niveles arcillosos. La curva verde es el registro de Rayos Gamma, la curva roja la ROP y la curva azul la detección de gas.

Ejemplo de Inventario de horizontes identificados para un proyecto de CRI

Si analizamos el registro litológico de la Fig. 3, podemos concluir que en este tramo de pozo tenemos 4 niveles arenosos (en amarillo), con capacidad para actuar como reservorios de los recortes de perforación a inyectar. Cada uno de estos niveles arenosos, están confinados por capas sellantes de arcilitas y limolitas, lo cual garantiza un alto rango de seguridad, en el proceso de reinyección de cutting.

De la descripción litológica y la curva de ROP (en rojo), podemos preliminarmente decir que son niveles con una baja compactación (alta ROP), lo que en el proceso de CRI, es muy favorable y podemos decir que podremos inyectar grandes volúmenes de recortes, a presiones relativamente bajas en rangos que podemos establecer entre 1.000 a 2.500 psi en cabeza. Un asunto importante es mantener la presión de inyección, tan baja como sea posible, para evitar posible ruptura de los niveles sellos confinantes.

Para el ejemplo de la figura, tendremos en suma 39 m de niveles con capacidad de recibir

los recortes de perforación. Esto no significa que debamos abrir los 39 m de arenas, para tener éxitos en esta operación. En todo caso podemos dividir las zonas de inyección en dos zonas perfectamente separadas por un importante nivel arcilloso de 14 m de espesor. Informalmente la zona de inyección inferior comprende los horizontes arenosos 3 y 4, con 23 m de espesor total. La zona de inyección superior estará conformada por los horizontes arenosos 1 y 2, sumando 16 m.

En un proceso CRI, es muy importante tener una zona de “backups” o de respaldo, en caso que la zona seleccionada para iniciar el proceso de reinyección, presente algún problema, como podría ser taponamiento de los punzados.

A partir de la misma información, se han identificado cinco horizontes de arcillas-limolitas confinantes, ubicados en el tope y en la base de cada horizonte arenoso. Estos niveles pelíticos, por naturaleza, presentan una permeabilidad vertical o lateral muy baja o nula. Además tienen espesores adecuados, para limitar y cancelar, una migración vertical de la lechada a ser inyectada, al comportarse como excelentes horizontes sello.

Horizontes arenosos para el proyecto CRI

Horizonte 01 (+/- 948-958m):	Comprende un paquete de arena de 10 m de espesor.
Horizonte 02 (+/- 962-968m):	Comprende un paquete de arenas de 6 m de espesor
Horizonte 03 (+/- 982-993m):	Comprende un paquete de arena de 11 m de espesor.
Horizonte 04 (+/- 998-1010 m):	Comprende un paquete de arena de 12 m de espesor.

Horizontes sello identificados:

Horizonte A (+/- 943-948 m):	5 m de arcillitas y limolitas, al tope del Horizonte arenoso 01.
Horizonte B (+/- 958-962m):	4 m de arcillitas y limolitas, al tope del Horizonte arenoso 02.
Horizonte C (+/-968-982 m):	14 m de arcillitas y limolitas, al tope del Horizonte arenoso 03.
Horizonte D (+/-993-998 m):	5 m de arcillitas y limolitas, al tope del Horizonte arenoso 04.
Horizonte E (+1010 m):	+5 m de arcillitas y limolitas, a a base del horizonte arenoso 04.

Construcción del Modelo Geomecánico 1D

El cálculo del gradiente de fractura (GF) es la principal propiedad geomecánica a tener en cuenta al momento de la selección de un intervalo a punzar y fracturar, para luego proceder con la inyección del cutting. Este análisis nos brindará información sobre la ubicación de las posibles barreras horizontales al crecimiento de las fracturas hidráulicas verticales.

Para arribar al GF, es necesario crear un modelo geomecánico, para el cual, se debe seguir un flujo de trabajo de varias etapas, utilizando la información disponible proveniente de registros

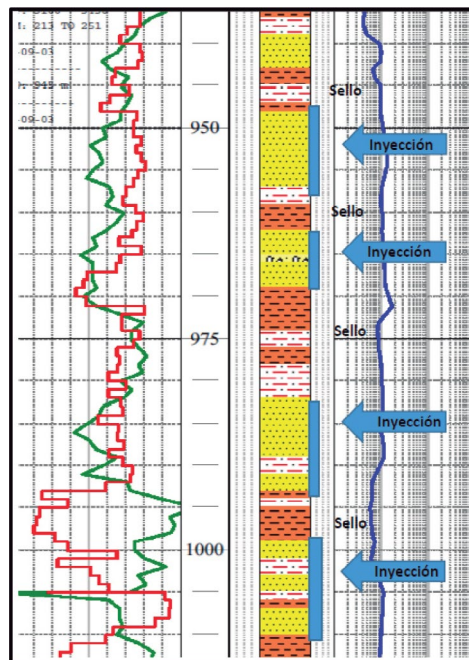


Figura 3. Registro litológico e inventario de niveles con capacidad de ser horizontes aptos para el Proyecto CRI. La curva verde representa el registro de rayos gamma, que en parte se superpone a la curva roja escalonada que es la curva de velocidad de perforación o ROP. La profundidad está indicada en el track del medio, mientras que en la parte central se observa la litología interpretada, donde el color amarillo representa areniscas, mientras que los niveles sellos de arcilitas y limolitas, aparece en color bermellón. La curva azul de la derecha, representa la detección de gas, durante la perforación.

eléctricos de pozo, y calibrando luego el modelo a partir de ensayos geomecánicos de laboratorio en coronas y testigos laterales (si están disponibles), el análisis de recortes de roca (cutting y caving), análisis de eventos de perforación, ensayos de presión dentro del pozo, etc. A continuación, se realizará una breve descripción de las etapas básicas que se deben considerar:

Etapas 1: Auditoría de Datos: En la primera etapa del flujo de trabajo se analiza la información disponible y faltante en cada pozo, en forma cualitativa y cuantitativa. Tal información será necesaria para la construcción y calibración del modelo geomecánico completo.

Etapas 2: Análisis Geológico: Aquí se analiza en forma conjunta la información concerniente al desarrollo de un modelo geológico, el cual puede ser unidimensional (ej: identificación de pasos Formacionales, descripción de coronas y recortes de roca, análisis de imágenes de pozo, etc.), bidimensional (ej: interpretación de sísmica 2D, elaboración de cortes estructurales y transectas estratigráficas), y tridimensional (ej: análisis de sísmica 3D junto a su correlación areal de pozos).

Etapas 3: Análisis de Eventos: A partir del análisis y desglose de los reportes diarios de perforación y reportes geológicos, es posible analizar el historial del pozo, e identificar los eventos de perforación ocurridos, donde se describen los inconvenientes que pudieran haber ocurrido en función del tiempo y la profundidad.

Etapas 4: Estratigrafía Mecánica: La generación de una estratigrafía mecánica apropiada para el análisis geomecánico se puede lograr mediante la discretización litológica a partir de una serie de

cut-off (valores de corte), aplicados, por ejemplo, al registro de espectroscopia de rayos gamma. De esta forma, es posible asignar correlaciones mecánicas individuales a los diferentes intervalos litológicos identificados en la columna sedimentaria.

Etapas 5: Propiedades Elásticas: El modelo de esfuerzo-deformación más simple asume una relación lineal entre los esfuerzos y las correspondientes deformaciones. Bajo ciertas condiciones, como podría ser la aplicación de un esfuerzo pequeño con deformaciones reversibles, el comportamiento de la roca puede seguir el supuesto elástico lineal (Winkler, 1998). Tal es el caso de la propagación de las ondas elásticas en las rocas ya que puede ser estudiada usando el supuesto elástico lineal (Mavko *et al.*, 1995).

Para describir el comportamiento elástico, es posible utilizar diferentes modelos con diversas direcciones de isotropía y anisotropía. Tales modelos son conocidos como el modelo isotrópico y los modelos anisotrópicos con sus subtipos: ITV (simetría Isotrópica Transversal a la Vertical), ITH (simetría Isotrópica Transversal a la Horizontal) y Ortorrómbico (Ortotrópico). Entre ellos, el modelo ITV es el más utilizado en geomecánica debido a su relativa simplicidad matemática (Thomsen, 1986). Es importante agregar que la anisotropía también se puede asociar con diferencias en las direcciones y magnitudes de los esfuerzos horizontales y verticales (Nur y Simmons, 1969, Rüger, 1996, entre otros). En forma resumida, un modelo isotrópico ofrece una visión general rápida, pero con pérdida de detalle sobre la heterogeneidad y el comportamiento anisotrópico de la roca. Además, este modelo suele subestimar las verdaderas propiedades elásticas horizontales de la formación y, en consecuencia, la magnitud de los esfuerzos horizontales (Cuervo *et al.*, 2014; Frydman *et al.*, 2016; Sosa Massaro *et al.*, 2017, entre otros). Por su parte, el modelo ITV se adapta bien a una roca heterogénea y anisotrópica. En este modelo se puede obtener un mayor detalle del comportamiento de las diversas facies litológicas identificadas, si se tiene en cuenta la estratigrafía mecánica (Sosa Massaro *et al.*, 2017; Sosa Massaro *et al.*, 2018a).

Los parámetros que se obtienen serán la relación de Poisson (ν), el módulo de Young (E), el módulo de corte (G), y el módulo de compresibilidad (K).

Etapas 6: Propiedades de Resistencia: De manera similar que para las propiedades elásticas, es posible obtener las propiedades isotrópicas o anisotrópicas de resistencia de la roca para el intervalo de interés. Los cálculos provienen de análisis geomecánicos de laboratorio, los cuales pueden ser realizados tanto en muestras de pozo (dato directo, más confiable), como en muestras de afloramiento (dato indirecto, menos confiable). Entre los parámetros de resistencia calculados, se encuentran la resistencia a la compresión sin confinamiento (UCS o C_0), la resistencia a la fractura por tensión (T_S o T_0), el ángulo de fricción, la cohesión (S_0), la tenacidad a la fractura por tensión (FT o KIc). Cabe destacar que las curvas calculadas para el pozo son obtenidas a partir de correlaciones generadas entre parámetros de mecánicos de las rocas y parámetros petrofísicos como la densidad ($RHOB$). Para un mayor detalle sobre la metodología de extrapolación de los parámetros obtenidos en laboratorio al intervalo analizado dentro del pozo, se recomienda

dirigirse al artículo de Sosa Massaro *et al.*, (2018b).

Etap 7: Cálculo de esfuerzos in-situ: Utilizando los parámetros elásticos, el coeficiente de Biot, la presión poral, y la sobrecarga litostática (estimada a partir de la integración del registro de densidad según procedimientos estándares de la industria), será posible arribar al cálculo del esfuerzo horizontal menor y mayor, estimando y recalibrando previamente las deformaciones tectónicas (ϵ_h y ϵ_H). La ecuación poroelástica para el cálculo de los esfuerzos horizontales fue desarrollada por Thiercelin y Plumb (1994). La misma, reúne todas las variables mencionadas anteriormente, y puede ser aplicada a modelos anisotrópicos.

$$\sigma_{h,min}^{Ani} = P_p \cdot \alpha_h + \left(\frac{E_h}{E_v} \right) \cdot \left(\frac{\nu_v}{1-\nu_h} \right) \cdot (\sigma_v - P_p \cdot \alpha_v) + \left(\frac{E_h}{1-\nu_h^2} \right) \cdot \epsilon_h + \left(\frac{\nu_h \cdot E_h}{1-\nu_h^2} \right) \cdot \epsilon_H \quad \text{Ecuación 1}$$

$$\sigma_{H,max}^{Ani} = P_p \cdot \alpha_h + \left(\frac{E_h}{E_v} \right) \cdot \left(\frac{\nu_v}{1-\nu_h} \right) \cdot (\sigma_v - P_p \cdot \alpha_v) + \left(\frac{E_h}{1-\nu_h^2} \right) \cdot \epsilon_H + \left(\frac{\nu_h \cdot E_h}{1-\nu_h^2} \right) \cdot \epsilon_h \quad \text{Ecuación 2}$$

donde $\sigma_{h,min}^{Ani}$ y $\sigma_{H,max}^{Ani}$ representan los esfuerzos horizontales anisotrópicos menor y mayor respectivamente, σ_v el esfuerzo vertical, P_p la presión poral, α el coeficiente de Biot, ν la relación de Poisson, E el módulo de Young, ϵ_h y ϵ_H son las deformaciones tectónicas mínima y máxima respectivamente (siendo estos los principales factores de calibración, con $\epsilon_H > \epsilon_h$), y los subíndices h y v representan las direcciones horizontal y vertical respectivamente (Economides, 2000). Para la calibración y ajuste del esfuerzo horizontal menor, se puede utilizar la medición de campo realizada durante el ensayo LOT (Leak Off Test o prueba de goteo) y su medición del ISIP (Instantaneous Shut in Pressure) o cierre instantáneo con el cese del bombeo).

Etap 8: Análisis del Gradiente de Fractura: El análisis clásico del gradiente de fractura (GF), consiste en el cálculo de la variación del esfuerzo horizontal mínimo con la profundidad, según la siguiente ecuación:

$$GF = \sigma_{h,min}^{Ani} / (MD * 3,281) \quad \text{Ecuación 3}$$

donde GF es el gradiente de fractura en PSI/ft, $\sigma_{h,min}^{Ani}$ representa el esfuerzo horizontal anisotrópico menor en PSI, TVD es la profundidad en mts, y 3,281 es la constante de conversión de mts a ft.

A partir del análisis del GF será posible identificar aquellos intervalos que funcionaran como barreras a la propagación de la fractura hidráulica en la dirección vertical. Fuera del análisis clásico, a modo de una nueva propuesta alternativa y complementaria para la identificación de barreras, se propone la utilización de las propiedades de resistencia mecánica de la roca aplicando valores de corte a la resistencia de la fractura por tensión y la tenacidad, en dirección perpendicular a la laminación de la roca (Sosa Massaro *et al.*, 2108b). Con esta metodología, es posible también detectar zonas de alta probabilidad de propagación de fracturas hidráulicas horizontales (paralela a

la laminación), las cuales podrían generarse en pozos horizontales, sobre todo en rocas altamente laminadas como las pelitas y pelitas calcáreas (Sosa Massaro *et al.*, 2108b).

Es importante mencionar que la geometría final de la red de fracturas hidráulicas generada, se obtendrá mediante la utilización de software especializado para tal fin. Estos tendrán entre sus variables, además de los parámetros obtenidos mediante el modelo geomecánico, los parámetros de inyección de la lechada que contiene el cutting, es decir, presión de bombeo, volumen inyectado, tiempo de inyección, densidad de la lechada, etc.

Perforación de un pozo para un proyecto CRI

La perforación de pozos multilaterales u horizontales de largo alcance, con seguridad va a generar un volumen importante de recortes de perforación. Este volumen debe ser calculado, teniendo en consideración el diagrama del pozo, es decir el diámetro con el que se va a perforar cada sección del pozo, pero de acuerdo al conocimiento que se tenga del área, al volumen total calculado, se le debe afectar de un factor de corrección que tenga en cuenta procesos de inestabilidad de la pared de pozo, que puedan generar un volumen de recortes mayor al calculado para un pozo de diámetro nominal. En zonas tectónicamente inestables, el volumen en superficie, puede superar el 50% en exceso del volumen teórico calculado.

Este cálculo preliminar es importante para estimar el volumen de recortes a inyectar, el tiempo necesario para inyectar todos los recortes generados y la capacidad de tanques o piletas, donde se va a almacenar el cutting en forma temporal, antes de ser procesados e inyectados a formación. El volumen a inyectar debe considerar el volumen generado por uno o más pozos de producción en el caso de tener un cluster con varios pozos, y además el volumen generado por el propio pozo inyector, al momento de ser perforado.

Un pozo de un proyecto CRI (Fig. 4) no debe ni puede tener menos atención que un pozo somero de producción, pero dada las características del proyecto, una atención particular de se debe prestar a la cañería de superficie, la que nos debe garantizar la integridad mecánica e hidráulica del pozo, considerando que los acuíferos están cerca de la superficie.

Esta garantía debe venir de una operación de cementación que debe estar certificada por el perfil del mapa de cemento. No es suficiente con el tradicional CBL, por lo que se recomienda un registro que muestre un mapa de cemento. Si la cementación presenta zonas con muy mal cemento, se deberá evaluar si se requiere un proceso de cementación correctiva, antes de iniciar el proceso de reinyección.

Además, en el programa debe estar considerando cuando se rote el zapato de esta cañería, realizar un LOT (Leak Of Test) para calibrar el modelo.

Lo recomendable es perforar el pozo CRI, antes de mover el equipo principal. Un pozo de estas características debe garantizar que todo el volumen de recortes generados en la plataforma,

por uno o más pozos, va a poder ser re-inyectado a formación, sin ningún tipo de peligro ambiental.

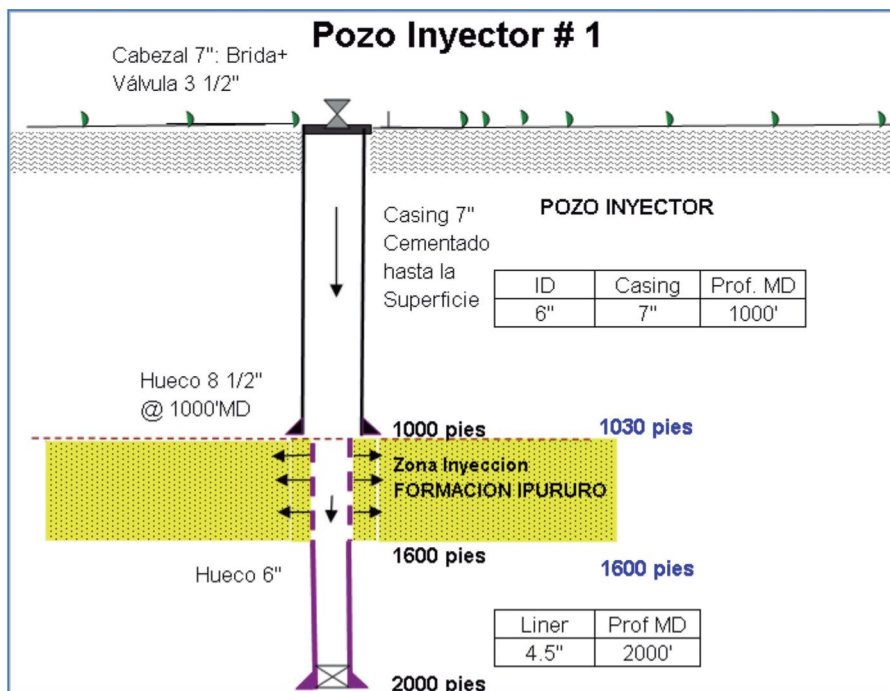


Figura 4. Esquema simplificado de un pozo preparado para la reinyección de cutting. El diseño del pozo, está relacionado con la profundidad de los acuíferos. La cañería debe garantizar la integridad mecánica e hidráulica del pozo, durante el proceso de reinyección. Nota: Las profundidades son referenciales, porque cada área tiene sus propias características geológicas y geomecánicas.

Proyecto CRI con la utilización de un Pozo Existente

En áreas con un grado extremo de cuidado ambiental, en el proceso de CRI se puede utilizar un pozo existente e incluso el mismo pozo de exploración que no ha sido exitoso y se lo debe abandonar, de acuerdo a las regulaciones locales. Esto requiere una evaluación completa del pozo candidato y que debe considerar por lo menos:

- Análisis de la Integridad Mecánica del Pozo
- Perfil y/o Mapa de Cemento de la cañería donde se va a punzar e inyectar
- Aislación hidráulica de las cañerías de superficie, las cuales cubren los acuíferos
- Abandono permanente del fondo del pozo, con un tapón mecánico y cemento. Este será el fondo del proyecto CRI.
- Selección previa de los intervalos donde se va a punzar e inyectar
- Los intervalos donde se va a inyectar, deben estar lejos de acuíferos y zonas de falla.
- No son recomendables niveles de rocas con fracturas naturales
- Tampoco es recomendable niveles con alta porosidad y permeabilidad

Con esto completado se debe bajar sondeo de sacrificio con packer y un caño de cola y que se fijará por encima de la zona a punzar. Este conjunto luego se va a abandonar en el pozo con tapones de cemento.

EVALUACION DE RIESGOS

Un proyecto CRI requiere durante la Etapa de Evaluación y Factibilidad, hacer una evaluación de cada uno de las variables involucradas y los riesgos asociados los cuales tienen diferentes componentes:

1. Se deberá hacer un estudio preliminar en la identificación de riesgos y las opciones operativas. El propósito es identificar los riesgos potenciales de los datos de evaluación y las simulaciones del fracturamiento hidráulico. Esto resulta en una potencial eliminación o disminución de los riesgos identificados dentro de un nivel aceptable por medio de la imposición y recomendación de medidas de control.

Contención de los Residuos – Debe evaluarse la capacidad de la formación(s) seleccionada (s) para recibir los recortes siguiendo los pasos siguientes:

- a. Simulación previa – Simulación matemática en base a los datos Geológicos y Geomecánicos y que determinaran la capacidad de almacenamiento de la formación seleccionada, su respectivo sello y aislación.
 - b. Fracturamiento – Se debe determinar mediante la simulación la dirección de menor esfuerzo para determinar la dirección de la propagación de la fractura. Como ejemplo Una buena altura de contención hará que la fractura se propague preferencialmente en la dirección horizontal.
 - c. Cementación aislante – Es muy importante que el intervalo o intervalos seleccionados tengan un muy buena adherencia de cemento/formación y cemento/cañería con el objeto que la lechada forzada a la formación por medio de potencia hidráulica y que genera la fractura no comprometa la integridad del wellbore.
2. Diseño de la Lechada – Las partículas sólidas de la lechada deben ser pequeñas en tamaño menor a 300 micrones, además de dúctiles y blandas, debe ser bombeada a caudales bajos, con el propósito de minimizar la potencia hidráulica del bombeo y generalmente con un alto “fluid loss” (perdida de fluido). El objetivo es minimizar el impacto a la formación con la inyección de la lechada. Los recortes antes de ser mezclados como lechada, deben ser pasados por una zaranda clasificadora que tenga mallas API 60-250 μm y API 80-175 μm , para asegurar que los sólidos presentes en la misma sean menores a 300 μm . Sus propiedades deben considerar:
 - a. Viscosidad

- b. Capacidad de acarreo
 - c. Capacidad de suspensión
3. Procedimiento Operacional – La secuencia de los baches debe ser programada en función de los volúmenes calculados y sus respectivos caudales de bombeo.
- a. Caudal de Inyección – Dependerá de la Prueba de Inyectividad (Step Rate Test/Step Down Test). Considerar entre 5-6 bpm y bombeo continuo.
 - b. Desplazamiento libre de sólidos – Es muy importante que el fluido de desplazamiento esté exento de sólidos y que garantice la limpieza del pozo y las perforaciones.
4. Capacidad del pozo para Disposición final
- a. Capacidad de almacenaje
5. Dimensionamiento de Equipo – Dependerá fundamentalmente de las simulaciones matemáticas en cuanto a las presiones de admisión o fractura y del volumen de recortes generado por la perforación del pozo. Se inyecta aproximadamente unos 1200 bbl de lechada por bache/día. 50 bbl de PAD y otros 50 de espaciador y el desplazamiento dependerá de la profundidad de las perforaciones
- a. Mantenimiento preventivo – Se debe encarar un programa de Aseguramiento de calidad en la preparación de todo el equipo de Inyección involucrado, válvulas, mezcladores, bombas, etc., para minimizar las fallas especialmente durante la operación de bombeo.
 - b. Molido – Tamaño de las partículas para la lechada
6. Monitoreo – El monitoreo y verificación de la performance de la re-inyección de recortes es parte integral de las operaciones de Aseguramiento de Calidad del proceso. El análisis de los datos operacionales es utilizado para validar los resultados del modelo y permitirá detectar cualquier anomalía o detectar señales de alarma que puedan indicar problemas con los que ocurre en sub-superficie.
- Estemonitoreo de Inyección y Análisis de Presión facilita la gestión de los equipos críticos del proyecto, mientras que el monitoreo y análisis de inyección garantiza parámetros operativos óptimos y minimiza los riesgos operacionales y ambientales. Para obtener resultados exitosos, se debe disponer de supervisores dedicados, que monitoreen todas las fases de la operación, la condición del equipo y el nivel de experiencia del personal involucrado.
7. Proceso de aseguramiento de calidad – En este proceso se debe tener un resumen de los detalles específicos del Proyecto y control de las operaciones *in-situ* para asegurar un

gerenciamiento efectivo del proceso de re-inyección de recortes. El mismo detalla, quien, que, cuando, porque y como se gerenciará este proyecto.

8. Análisis de presión Fall Off – Analiza las presiones de inyección y las presiones de declinación post cierre para identificar en detalle la respuesta de la formación a la propagación de la fractura a la operación de inyección de los recortes, también determina la identificación de la Presión de Cierre Instantánea (ISIP) y permite la evaluación de la propagación de la fractura y su comportamiento de cierre y además de la permeabilidad.

BACHES Y FLUJOS

Los diferentes baches que se bombean tienen las siguientes funciones:

1. PAD – Es un fluido de alta viscosidad que se utiliza para abrir la fractura. Debe tener un buen control de filtrado para poder permitir la propagación de la fractura hasta que se consuma. Propiedades estándares del PAD son las siguientes:

PAD		
Propiedades	Unidad	Valor
Densidad	lpg	8.4
Viscosidad Plástica	cp	6 - 8
Punto Cedente	Lbs/100 ft ²	28 - 30
pH		9.0-9.5

2. Slurry o Lechada – Es una mezcla de agua, un agente de viscosidad, aditivos para prevenir el ataque bacterial (regulador de Ph y Biocide) y los sólidos correspondientes a los cuttings debidamente suspendidos en el proceso de transporte hacia la formación. El tamaño de la molienda es crítico para el éxito. Las partículas grandes, de 200-300 micras de tamaño, típicamente llenan el área cercana al pozo porque no pueden forzarse en la formación. Luego, las formaciones requieren presiones más altas para inyectarse, creando un riesgo potencial a la integridad del zapato de la cañería. Además, cuanto más fina es la molienda, menos cantidad de producto químico se necesita y menor cantidad de lodo es requerida.

LECHADA		
Propiedades	Unidad	Valor
Densidad	lpg	9.5-11.5
Viscosidad Plástica	cp	15-18
Punto Cedente	Lbs/100 ft ²	38 - 42
Ph		9.0-9.5

3. Espaciador o Píldora viscosa – Es un fluido base agua de alta viscosidad usado para prevenir la contaminación entre la lechada y el fluido de desplazamiento, normalmente tiene la misma formulación química y propiedades que el PAD (no los mismos valores)

ESPACIADOR-PILDORA VISCOSA		
Propiedad	Unidad	Valor
Densidad	lpg	8.34
Viscosidad Plástica	cp	6 - 8
Punto Cedente	Lbs/100 ft ²	28 - 30
Ph		9.0-9.5

4. Fluido de Desplazamiento – Es un fluido base agua utilizado para sobredesplazar la lechada con el objetivo de mantener la tubería y las perforaciones limpias para la siguiente inyección. Se deben usar Inhibidores de arcilla dependiendo del contenido de las mismas en la formación.

FLUIDO DE DESPLAZAMIENTO		
Propiedad	Unidad	Valor
Densidad	lpg	8-4
Viscosidad Plástica	cp	1
Punto Cedente	Lbs/100 ft ²	1

Baches y Flujos

Durante las operaciones de campo, los diferentes baches que se bombean tienen las siguientes funciones:

1. PAD – Abrir la fractura- Control de filtrado
2. Lechada o Slurry o, es el agente de transporte de los sólidos
3. Espaciador o Píldora viscosa – Remover de la tubería y de las perforaciones residuos de la lechada precedente
4. Fluido de Desplazamiento

Riesgos Asociados

Una operación de estas características tiene riesgos asociados que se deben considerar y tener planes de contingencia, en respuesta a cada problema presentado. Entre los riesgos podemos mencionar:

- Obturación de los punzados
- Migración vertical a través de zonas mal cementadas
- Migración a través de fracturas naturales

- Taponamiento de la sarta de inyección
- Incremento anormal de la presión
- Reacción de niveles arcillosos intercalados en la zona de inyección

Beneficios de un Proyecto CRI

Un proyecto CRI tiene el beneficio inmediato, de que la inyección de cutting se puede hacer en el mismo sitio de la perforación, incluso con un programa adecuado y los equipos en la plataforma, la reinyección puede ser casi al mismo tiempo que se perfora, cuando ya dispone del pozo de reinyección. Esto va a evitar mantener el recorte de perforación por largos periodos de tiempo en superficie, lo cual va a requerir de la construcción de una piletta para los recortes.

Desde el punto de vista ambiental, los beneficios están a la vista, ya que los tiempos de exposición de los recortes de perforación en superficie son mínimos. Además, cuando se compara con otros métodos, como puede ser un Landfarming, el proceso culmina con el último barril inyectado a formación .

Un tema central en un proyecto CRI, tiene que ver con los costos asociados y que incluyen:

1. Estudio de Factibilidad
2. Renta y transporte del equipo de perforación para el pozo CRI
3. Perforación del pozo para el proyecto CRI
4. Renta y transporte del equipamiento necesario para la re-inyección
5. Operación del Equipamiento por una Cía. especializada
6. Cierre del proyecto y desmovilización de todo el equipamiento

En la selva estos costos para un solo pozo, puede alcanzar hasta 5 MU\$D, debido a los complejos procesos de logística que en algunos casos están asociados a las facilidades disponibles y ventanas climáticas.

En zonas petroleras menos sensibles o donde la logística no es un asunto de extrema consideración, los costos son en esencia más bajos, debido a otras variables que no tienen que ver con las etapas del Workflow, mencionado. En estos casos se puede considerar el uso de un pozo abandonado que mecánicamente se pueda re-convertir en pozo de reinyección.

La aplicabilidad en áreas que no sean de selva, merecen un análisis en particular considerando el costo por m³ tratado por algunos de los métodos conocidos, versus un proyecto CRI.

Opciones de un Pozo CRI

En un pozo CRI hay varias opciones para re inyectar los recortes de perforación (Fig. 5):

1. Por el espacio anular o por tubería en un pozo existente.
2. Se puede reinyectar los recortes durante la perforación del pozo de manera simultánea por el espacio anular.
3. En un pozo inyector exclusivamente perforado para ello.
4. En un pozo exploratorio que resulta seco y que puede convertirse en inyector. Opción muy recomendable. Esta es una opción muy recomendable, y sobre la cual los autores tienen bastante experiencia.

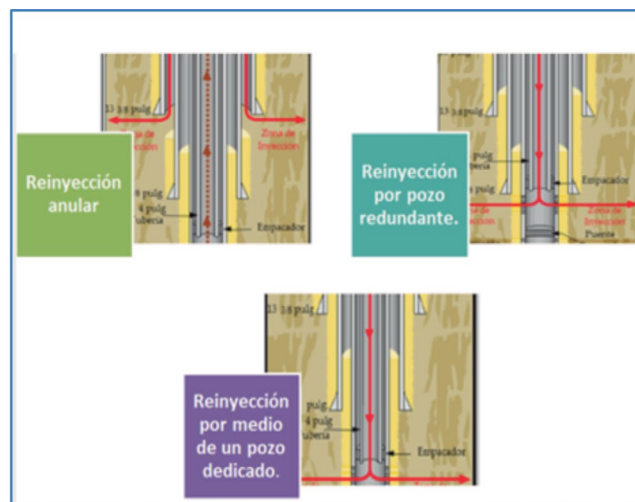


Figura 5. Modelos de Proyectos CRI, que consideran diferentes alternativas (Figura Internet)

CONCLUSIONES

1. La Reinyección de cutting es un proceso seguro para disponer en forma permanente los recortes de perforación.
2. La ventaja es que se puede hacer en la misma locación donde se está perforando, con la construcción de un pozo para este propósito, evitando el transporte a otro sitio para realizar un proceso de tratamiento e Inertización.
3. Se puede convertir en pozo inyector, un pozo que no ha sido exitoso y está en proceso de abandono.
4. Cuando las condiciones mecánicas del pozo son las óptimas, el proceso de reinyección es seguro, y los recortes de perforación quedarán confinados en fracturas que se irán creando durante el proceso de inyección.
5. Finalizado todo el proceso de reinyección, el pozo ya se puede abandonar completamente, siguiendo procedimientos seguros, como es el uso de tapones mecánicos y tapones de cemento.

6. El Proyecto CRI se puede hacer incluso rigless, es decir finalizada la perforación y con el equipo trasladado a la siguiente locación.

REFERENCIAS CITADAS

- Alarcón Sierra, J.H., 2014. Tesis: Criterios básicos para normar los recortes de perforación generados por la industria petrolera en el estado de Veracruz. Universidad Veracruzana. Facultad De Ciencias Químicas Zona Xalapa. Xalapa.
- Cuervo, S., Dolores Vallejo, M. y Crousse, L., 2014. Caracterización Integrada Petrofísica y Geomecánica de la Formación Vaca Muerta en el Área de El Trapial. 9º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos Simposio de Recursos No Convencionales. 613-629 p, Mendoza, Mendoza.
- Economides, M.J. y Nolte K.G., 2000. Reservoir Stimulation, John Wiley & Sons, Ltd., New York, 2000.
- Frydman, M., Pacheco, F., Pastor, J., Canesin, F., Caniggia, J. y Davey, H., 2016. Comprehensive Determination of the Far-field Earth Stresses for Rocks with Anisotropy in Tectonic Environment. SPE Argentina Exploration and Production of Unconventional Resources Symposium held in Buenos Aires, Argentina. SPE-180965-MS.
- Grrhan, T., Gilmour, A. y Quan Guo., 2017. Tecnología de avanzada en el manejo de residuos de perforación. M-I Swaco, Houston, Texas, EUA.
- Mavko, G., Mukerji, T. y Godfrey, N., 1995. Predicting stress-induced velocity anisotropy in rocks. Geophysics, 60: 1081–1087.
- Rüger, A. 1996. Reflection Coefficients and Azimuthal AVO Analysis in Anisotropic Media. Tesis doctoral, Center for Wave Phenomena, Colorado School of Mines.
- Sosa Massaro, A., Espinoza, N., Frydman, M., Barredo, S. y Cuervo, S., 2017. Analyzing a Suitable Elastic Geomechanical Model for Vaca Muerta Formation. Journal of South American Earth Sciences 79 (2017): 472-488.
- Sosa Massaro, A., Frydman, M., Barredo, S., 2018a. Estratigrafía Mecánica de Detalle Aplicada al Modelado Geomecánico Elástico Anisotrópico en La Formación Vaca Muerta. Revista de la Asociación Geológica Argentina (RAGA). Edición especial del Congreso Geológico Argentino en Tucumán 2017.
- Sosa Massaro, A., Espinoza, D.N., Frydman, M., Benitez, P. y Speranza, T., 2018b. Caracterización Geomecánica de Laboratorio Aplicado a la Formación Vaca Muerta. 10º Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos. Mendoza, Argentina.
- Veracierta Alfaro, L.E., 2006. Tesis: Evaluación De Las Técnicas Realizadas Por El Centro De Tratamiento Y Recuperación De Desechos En El Campo Hamaca, Estado Anzoátegui. Universidad de Oriente Núcleo de Monagas. Escuela De Ingeniería De Petróleo Maturín / Monagas / Venezuela.



**10° CONGRESO DE
EXPLORACIÓN Y
DESARROLLO DE
HIDROCARBUROS**

**Energía y Sociedad
aliados inseparables
Mendoza 2018**