

EVENTOS MICROSÍSMICOS ANÓMALOS EN EL MONITOREO DE LA ESTIMULACIÓN HIDRÁULICA DE LA FM VACA MUERTA EN LOMA LA LATA

Luis Pianelli¹, Fernando Coetsee¹, Juan La Vecchia¹, Adrián Sánchez²

1: YPF S.A. luis.pianelli@ypf.com, fernando.coetsee@ypf.com, juan.lavecchia@ypf.com

2: Schlumberger. sanches1@slb.com

Palabras clave: **microsísmica, estimulación, no convencional, fractura**

ABSTRACT

Anomalous microseismic events recorded during a hydraulic fracturing in Loma La Lata, Vaca Muerta formation

Hydraulic fracture stimulation is being used in Loma La Lata field, Neuquén, Argentina for unconventional shale oil and gas main targets in Quintuco-Vaca Muerta units. This technology is complemented frequently with microseismic monitoring in order to better understand the geometry of the resulting fractures.

In this paper a case study is discussed in which a set of anomalous microseismic events was observed after the end of the 5th stage of a hydraulic stimulation treatment.

These events show: 1) higher magnitudes than the mean for a normal stage 2) distinct and isolated clustering of the events 3) time of occurrence after the end of the pumping program.

The analysis of the available data suggests the reactivation of a previously existing fault as a possible cause of the unexpected events.

INTRODUCCIÓN

Estimulación de pozos

La estimulación de pozo es una técnica habitual en la industria petrolera y se utiliza para mejorar la producción de hidrocarburos. Consiste en distintos tipos de tratamientos que permiten mejorar la permeabilidad del reservorio en el entorno del pozo.

Uno de estos procesos es la fracturación hidráulica, que consiste en inyectar un fluido a presión dentro del pozo. Al superar un cierto límite, la presión produce fracturas en las rocas del reservorio. El control primario del proceso de fracturación se realiza monitoreando la presión y el caudal de fluido inyectado al pozo.

La rotura de las rocas en el reservorio produce la emisión de ondas elásticas de muy pequeña

amplitud, que se atenúan fuertemente al propagarse, y pueden llegar a observarse con sensores sísmicos colocados en otro pozo en las proximidades del que se encuentra en tratamiento. La detección de estas micro-señales se utiliza para el monitoreo y control del progreso del proceso de fracturación (Figura 1) y es lo que se conoce con la denominación de adquisición de eventos de microsísmica.

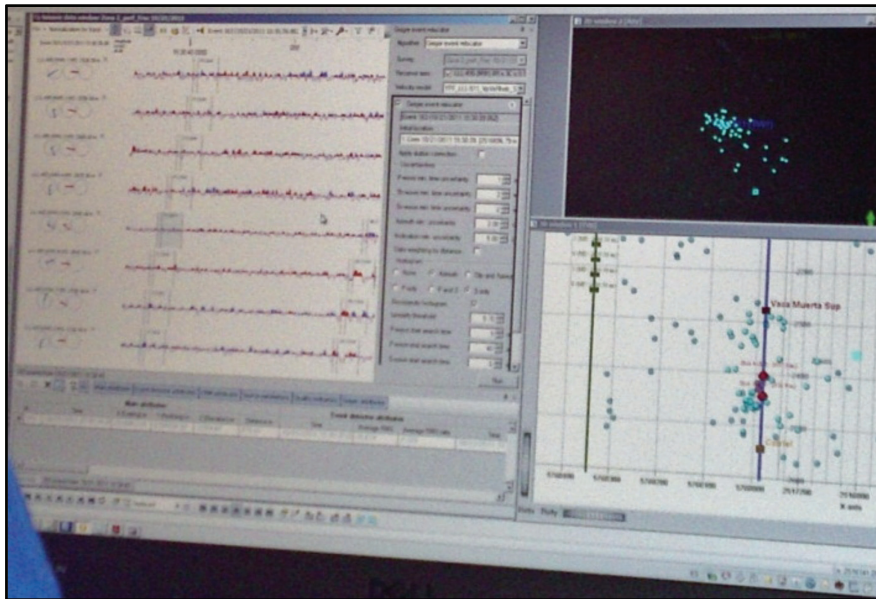


Figura 1. Monitoreo *in situ*. Se observan los sismogramas registrados mostrando los tiempos de arribo de un evento microsísmico, más todos los eventos detectados y ubicados espacialmente.



Figura 2. Herramientas que contienen los sensores para detectar las señales microsísmicas.

Detección de eventos micro-sísmicos

Entre otras cosas, la técnica de micro-sísmica permite determinar la posición de los eventos y las características geométricas de las fracturas inducidas: alto, largo, ancho y asimetría. Pero además provee información acerca de la magnitud y el tiempo de ocurrencia de cada evento detectado, lo que permite analizar más en detalle el mecanismo y progreso de la fracturación.

Los microsismos, que son producidos por los cambios en las tensiones y en la presión poral asociados con la fracturación hidráulica, se detectan con un conjunto de receptores tri-axiales (Figura 2) situados en otro pozo cercano al que se está estimulando denominado monitor. La detección en los sensores de la llegada de distintos tipos de ondas elásticas, ondas compresionales y ondas de corte, permite estimar la localización espacial de los focos de los microsismos.

Los niveles de energía liberados son muy bajos, por lo que las magnitudes de los eventos producidos son apenas detectables. Por esa razón, por un lado deben utilizarse geófonos con alta sensibilidad, y por otro lado la ubicación de los mismos no puede estar muy alejada del pozo en tratamiento de estimulación hidráulica.

Los tiempos de arribo de las ondas compresionales y de las ondas de corte generados por la estimulación hidráulica, que viajan con diferentes velocidades, permiten calcular la distancia entre el receptor y el foco del microsismo. Mientras que el movimiento de partículas de la onda compresional detectado con la herramienta tri-axial permite estimar la dirección del arribo, siendo así posible determinar la posición del foco de un evento microsísmico (Cipolla, 2011).

Una vez que los focos de todos los microsismos detectados se ubican en el espacio, se puede observar la geometría del sistema de fracturas inducidas con una adecuada aplicación de visualización tridimensional, pudiendo también utilizarse imágenes bidimensionales.

La información obtenida en tiempo real se utiliza para controlar el proceso de fracturación. Y a posteriori puede utilizarse para: determinar el espaciamiento óptimo entre pozos, optimizar el diseño de la fracturación, evaluar estrategias de perforación, etc.

Atenuación de la señal

La amplitud de la señal emitida por un evento de micro-sísmica disminuye con el aumento de la distancia de propagación. Esta disminución de la amplitud en parte se debe a la divergencia esférica: la misma energía elástica se reparte en un frente de onda más amplio, pero además es causada por la atenuación inelástica: parte de la energía elástica se convierte en calor debido a la fricción.

La atenuación inelástica de cada componente de frecuencia depende en forma inversa del factor de calidad Q del medio por donde se propaga la onda, como también de la velocidad de propagación de la onda, y es proporcional a la distancia recorrida y a la frecuencia.

Debido a la atenuación de las ondas sísmicas en función de la distancia de propagación desde su foco hace que cuanto más alejado se encuentre el foco de un evento microsísmico con respecto de los sensores, más difícil será su detección (Zimmer, 2011). La detección de un evento microsísmico depende entonces no sólo de la magnitud del mismo, sino también de la distancia del foco del evento a los sensores (Figura 3).

ADQUISICIÓN DE LOS DATOS

Datos analizados

De 2011 a la fecha de elaboración de este artículo, YPF efectuó el monitoreo microsísmico de la fracturación hidráulica de 21 Pozos. En el área de Loma La Lata-Loma Campana (Neuquén) se detectaron un total de 41954 eventos de microsísmica en 15 pozos, con un total de 114 etapas de fracturación, lo que da un promedio de unos 2800 eventos por cada pozo monitoreado y un promedio de unos 368 eventos microsísmicos por cada etapa. Las magnitudes de los eventos detectados varían entre -3,57 y 0,21 (magnitud de momento sísmico) con una media de -2,35 valor que equivale a la energía de unos 7,49 Joules, que equivale aproximadamente a la energía producida por la caída al piso, desde un metro de altura, de un cuerpo de 750 gramos (Figura 4).

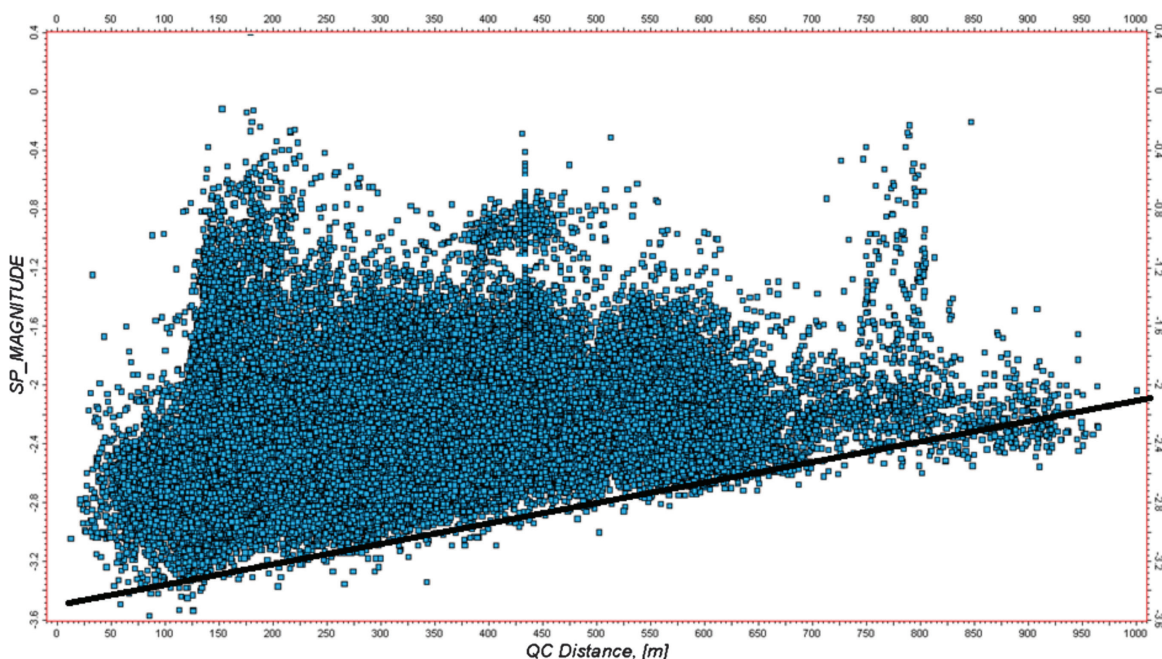


Figura 3. Ejemplo mostrando los eventos microsísmicos detectados en el área de Loma La Lata- Loma Campana (Neuquén). El gráfico muestra la magnitud de los eventos en función de la distancia a los sensores. Los eventos presentan magnitudes entre -0.1 y -3.6. A medida que aumenta la distancia los eventos detectados poseen mayores magnitudes. Los eventos más alejados del pozo monitor alcanzan hasta 900 metros.

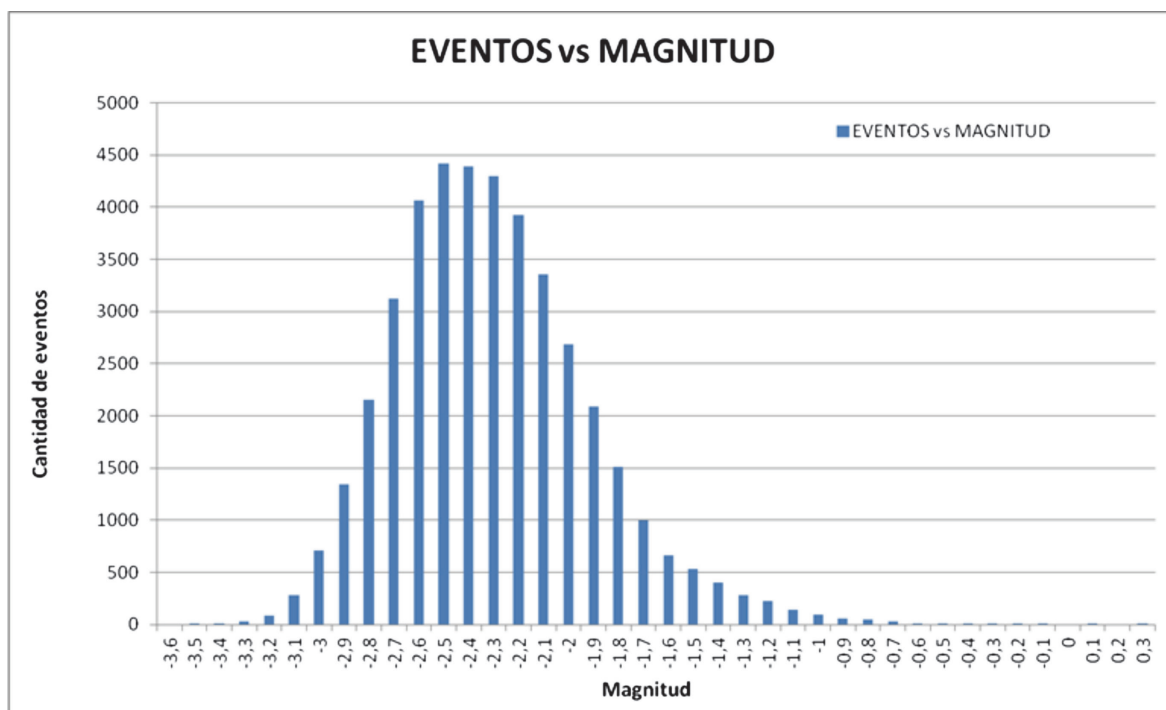


Figura 4. Magnitud de los eventos microsísmicos detectados en la fracturación de 15 pozos en el área de Loma La Lata- Loma Campana (Neuquén).

Las profundidades, máxima y mínima, de los eventos detectados fueron respectivamente 2739 y 2060 metros bajo el nivel del mar.

Estimulación hidráulica del pozo LLL-573

En enero de 2013 se llevó a cabo la fracturación hidráulica del reservorio no convencional (*shale*) de la Fm Vaca Muerta, con monitoreo microsísmico de dos pozos, en la zona de Loma La Lata (Rosemblat, 2013). El trabajo se realizó en un *cluster* de cuatro pozos desviados, con las bocas de los mismos en una misma locación para disminuir el impacto ambiental. El tratamiento de estimulación hidráulica del pozo LLL-573 se monitoreó con el pozo LLL-571, mientras que el tratamiento del pozo LLL-578 fue monitoreado desde el pozo LLL-572.

Los pozos fueron estimulados en cinco profundidades diferentes, llamadas etapas y numeradas uno a cinco de abajo hacia arriba. Hasta llegar a la etapa cinco, todo el proceso se llevó a cabo obteniéndose resultados similares a los encontrados en otros pozos del yacimiento. Al terminar con la estimulación de la etapa cinco del pozo LLL-573, los sensores ubicados en el pozo LLL-571 empezaron a captar un gran número de eventos microsísmicos, aun cuando ya se había finalizado con la inyección de fluidos en el pozo.

Este numeroso grupo de eventos posteriores a la fracturación aparecieron como separados espacialmente de la fractura generada, mostrando una geometría lineal particular, y en una

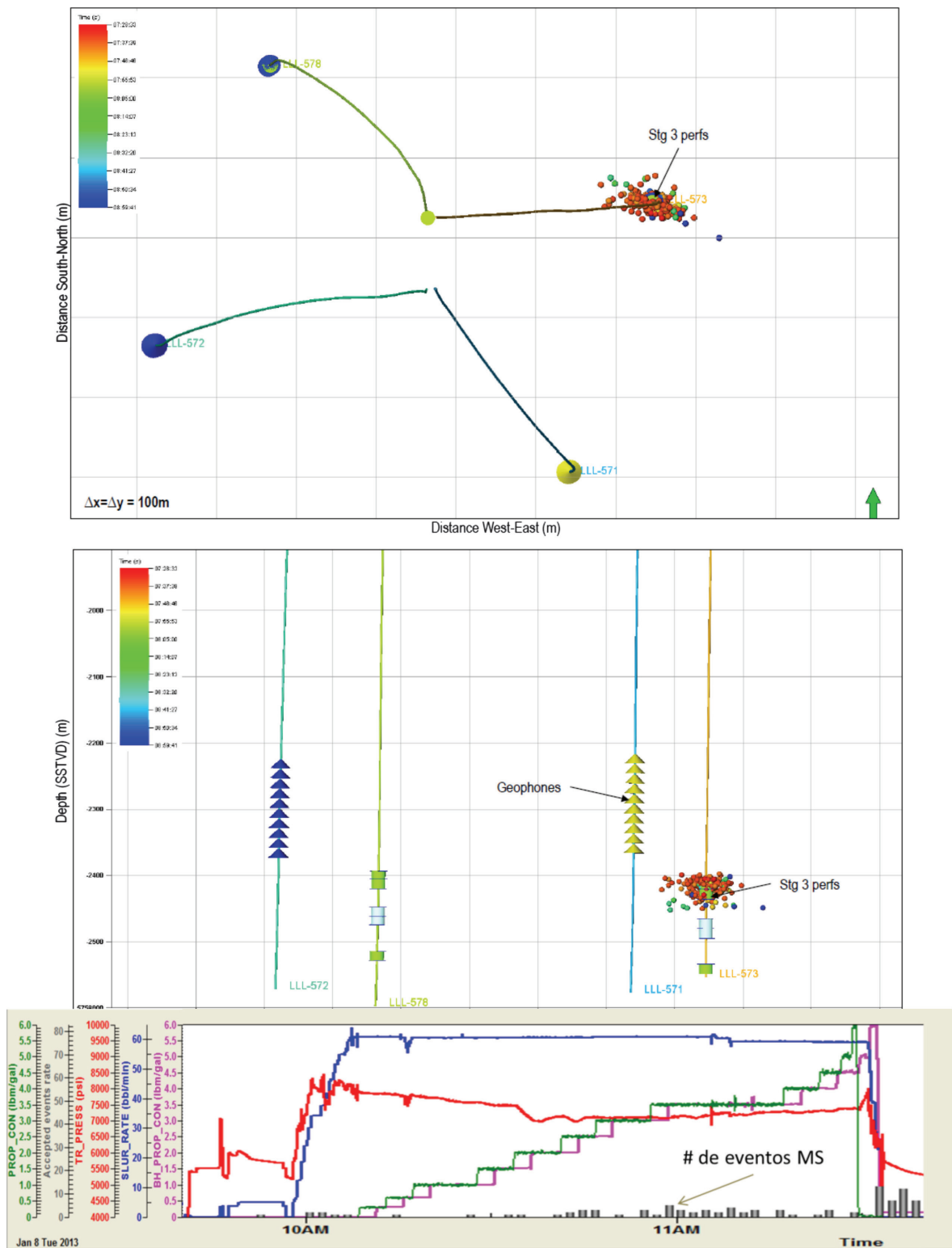


Figura 5. Visualización espacial de los eventos microsísmicos detectados en los sensores ubicados en el pozo LLL-571 durante la tercer etapa de fracturación hidráulica del pozo LLL-573. Los colores de los eventos indican el tiempo de ocurrencia de cada evento: mientras que los colores rojo, naranja y amarillo indican que los eventos fueron detectados más próximos al comienzo de la inyección de los fluidos, los colores verde y azul indican tiempos más cercanos a la finalización de dicho proceso. Esta etapa puede considerarse normal: la cantidad de eventos microsísmicos detectados es 274 y la fractura generada tiene un largo de unos 114 metros y un acimut de 104°. La cuadrícula en las dos imágenes superiores es de 100 x 100 metros.

secuencia temporal inmediatamente posterior a la finalización del proceso de fracturación. Por todas estas características se supone corresponden a la reactivación de una falla existente, muy próxima al pozo LLL-573.

ANÁLISIS DE LOS DATOS

Comparación con la etapa número tres

Para resaltar en forma más clara los eventos anómalos observados en la quinta etapa de la fracturación hidráulica del pozo LLL-573, se compara esta etapa con la etapa número tres de la estimulación del mismo pozo que muestra una respuesta se puede considerar normal para la zona.

El monitoreo de la etapa número tres detectó en los sensores del pozo LLL-571 un total de 274 eventos microsísmicos, localizados entre las profundidades de 2398 y 2451 metros bajo el nivel del mar. Las dimensiones de la fractura generada, estimadas a partir de la distribución espacial de dichos eventos son las siguientes: largo total 114 metros, ancho 47 metros, alto 53 metros y acimut 107°. Ver Figura 5.

Durante e inmediatamente después de la fracturación de la quinta etapa, los sensores detectaron en el tiempo que estuvieron activos, un total de 3935 eventos microsísmicos, pertenecientes a dos grupos claramente diferenciados como puede observarse en la Figura 6.

Uno de los dos conjuntos de eventos está centrado en el pozo y se corresponde con la fractura generada por la estimulación. Las dimensiones de dicha fractura estimadas a partir de la distribución espacial del correspondiente conjunto de eventos, son las siguientes: largo 150 metros, ancho 90 metros, alto 84 metros y acimut 110°.

El segundo conjunto de eventos está alejado del pozo en tratamiento y también presenta profundidades diferentes a las del primer grupo de eventos, con un tiempo de ocurrencia inmediatamente posterior a la finalización de la inyección de fluidos. Las evidencias encontradas en los datos sísmicos 3D pre-existentes, más el análisis estadístico de las magnitudes de los eventos, indican que se trataría de una falla ya existente reactivada por el proceso de fracturación hidráulica.

Atributos de detección de fracturas en la sísmica 3D

En la zona de Loma La Lata existen varios cubos de sísmica 3D vecinos que se registraron para YPF entre los años 1996 y 2000 con el objetivo de visualizar y estudiar la sub-superficie del área con fines exploratorios y de desarrollo de reservorios convencionales de petróleo y gas.

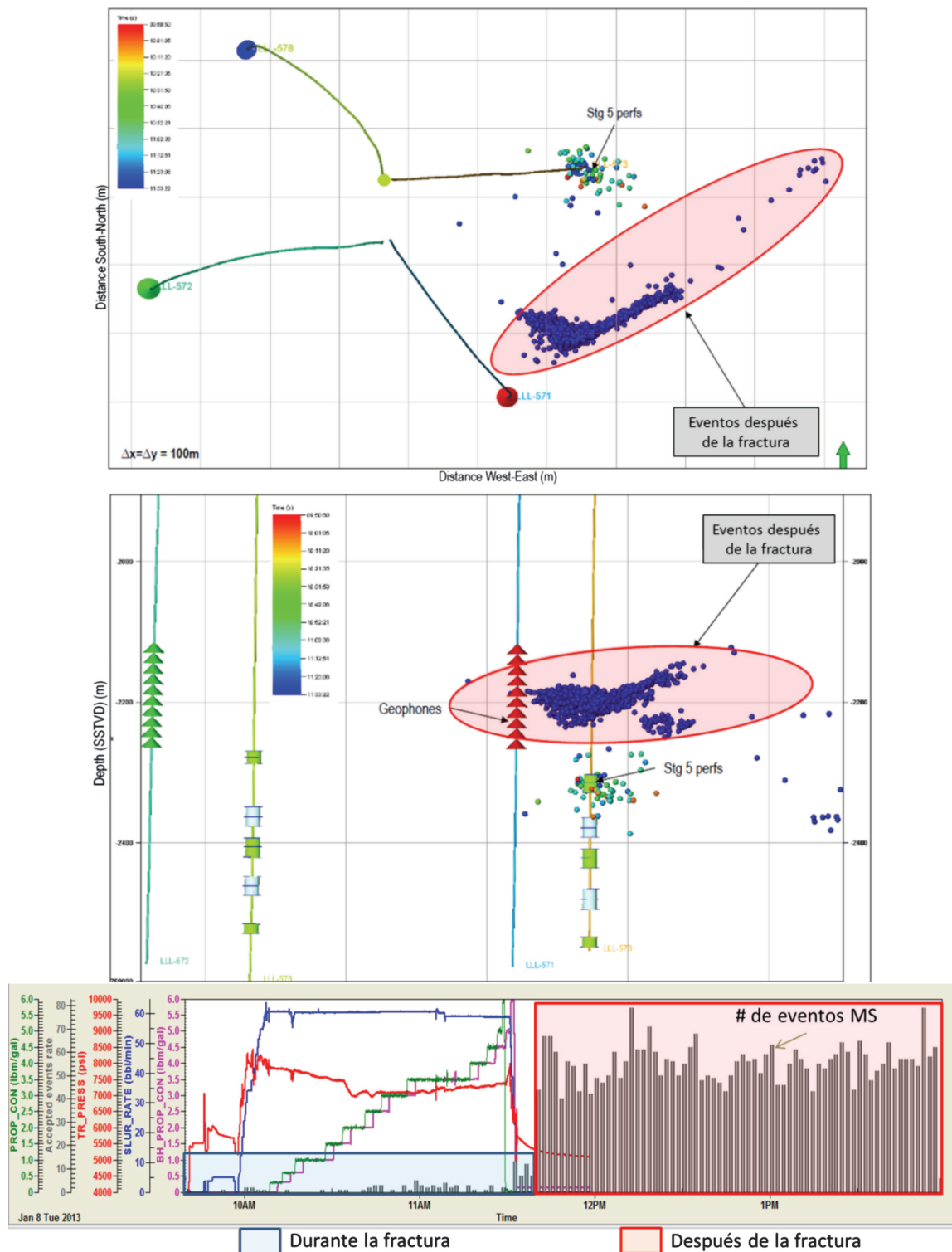


Figura 6. Visualización espacial de los eventos microsísmicos detectados en los sensores ubicados en el pozo LLL-571 durante la quinta etapa de fracturación hidráulica del pozo LLL-573. Los colores de los eventos indican el tiempo de ocurrencia de cada evento: mientras que los colores rojo, naranja y amarillo indican que los eventos fueron detectados más próximos al comienzo de la inyección de los fluidos, los colores verde y azul indican tiempos más cercanos a la finalización de dicho proceso. Claramente se observan dos grupos de eventos sísmicos bien diferenciados: uno localizado en el entorno del pozo LLL-573 con eventos más tempranos y el otro desplazado hacia el sur, con eventos más tardíos. La cuadrícula en la imagen superior es de 100 x 100 metros, mientras que en la imagen del medio es de 200 x 200 metros.

La sismica 3D fue reprocesada en el año 2010 para el análisis de los reservorios *shale* no convencionales de la Fm Loma La Lata. Entre otros estudios, se llevó a cabo la generación de un atributo sísmico para detección automática de fracturas que resalta las discontinuidades encontradas, mostrando posibles fallas y fracturas en el área.

La particular geometría del segundo conjunto de eventos microsísmicos de la quinta etapa se comparó con las discontinuidades detectadas en la sismica 3D (posible fallas y fracturas), observando una importante similitud entre ambas. Por tratarse de dos tipos de datos de diferente origen, se trata de una buena evidencia de la existencia previa de una falla reactivada por la fracturación. Ver Figura 7.

Análisis estadístico de las magnitudes de los eventos microsísmicos.

Relación de Gutenberg-Richter.

Otro análisis que se hace habitualmente sobre los datos de magnitud de los eventos microsísmicos registrados durante la fracturación hidráulica es lo que se conoce como relación de Gutenberg-Richter entre frecuencia y magnitud de los microsismos (Grob, 2011). Se trata de una relación lineal entre una magnitud dada M y el logaritmo de la cantidad de eventos N que superan dicha magnitud (Maxwell, 2010).

$$\text{Log}(N) = a - b.M$$

El valor b es la pendiente de la recta que ajusta dichos valores, y de acuerdo al valor que toma indica que tipo de proceso está generando la emisión de microsismos. Normalmente los eventos microsísmicos generados por fracturación hidráulica presentan un valor de b próximo a 2. Mientras que cuando se observa la reactivación de una falla existente b toma valores próximos a 1.

En la Figura 8 se comparan las relaciones obtenidas para la etapa 3 de la fracturación hidráulica del pozo LLL-573 y para la etapa 5 del mismo pozo. Mientras que en el primer caso, la etapa 3, el valor de b es 2, en el caso de la etapa 5, hay un comportamiento diferente con dos modalidades distintas una con valor de b igual a 2 representativa de la fracturación hidráulica y otra parte con pendiente b igual a 1 indicando la reactivación de la falla.

Con respecto a la magnitud de los eventos en la quinta etapa de fracturación del pozo LLL-573, donde queda establecido que se produjo reactivación de fallas, se debe destacar que se detectaron los cuatro eventos de mayor magnitud de todos los monitoreos microsísmicos llevados a cabo en la zona Loma La Lata – Loma Campana, todos con magnitudes positivas (+0.01, +0.06, +0.08 y +0.21) (Figura 9).

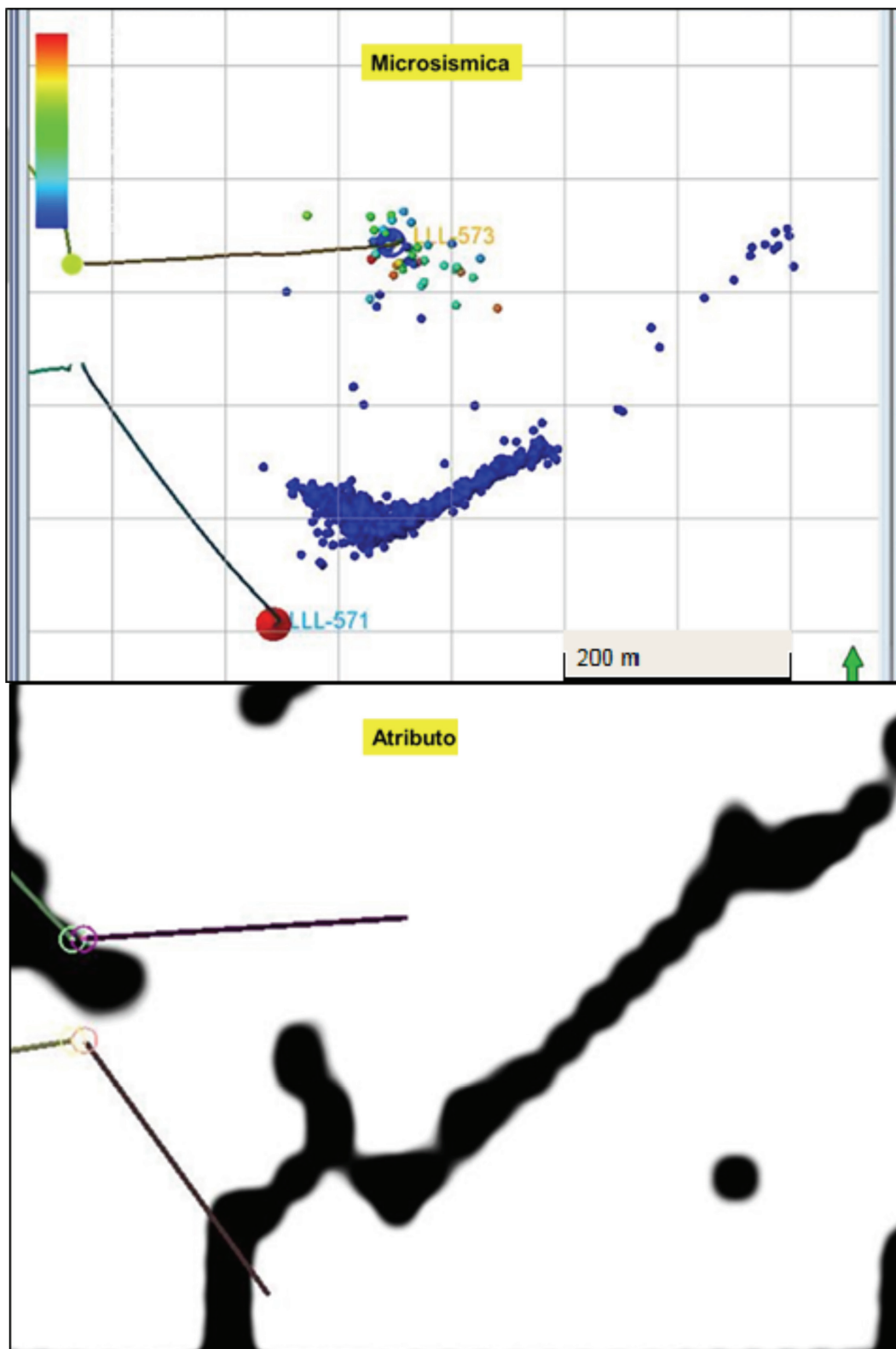


Figura 7. comparación entre los eventos microsísmicos detectados durante la quinta etapa de fracturación del pozo LLL-573 (arriba) y el atributo de detección automática de fracturas generado a partir del cubo sísmico 3D y que resalta discontinuidades posiblemente debidas a fallas o fracturas (abajo). Ambas imágenes están a la misma escala.

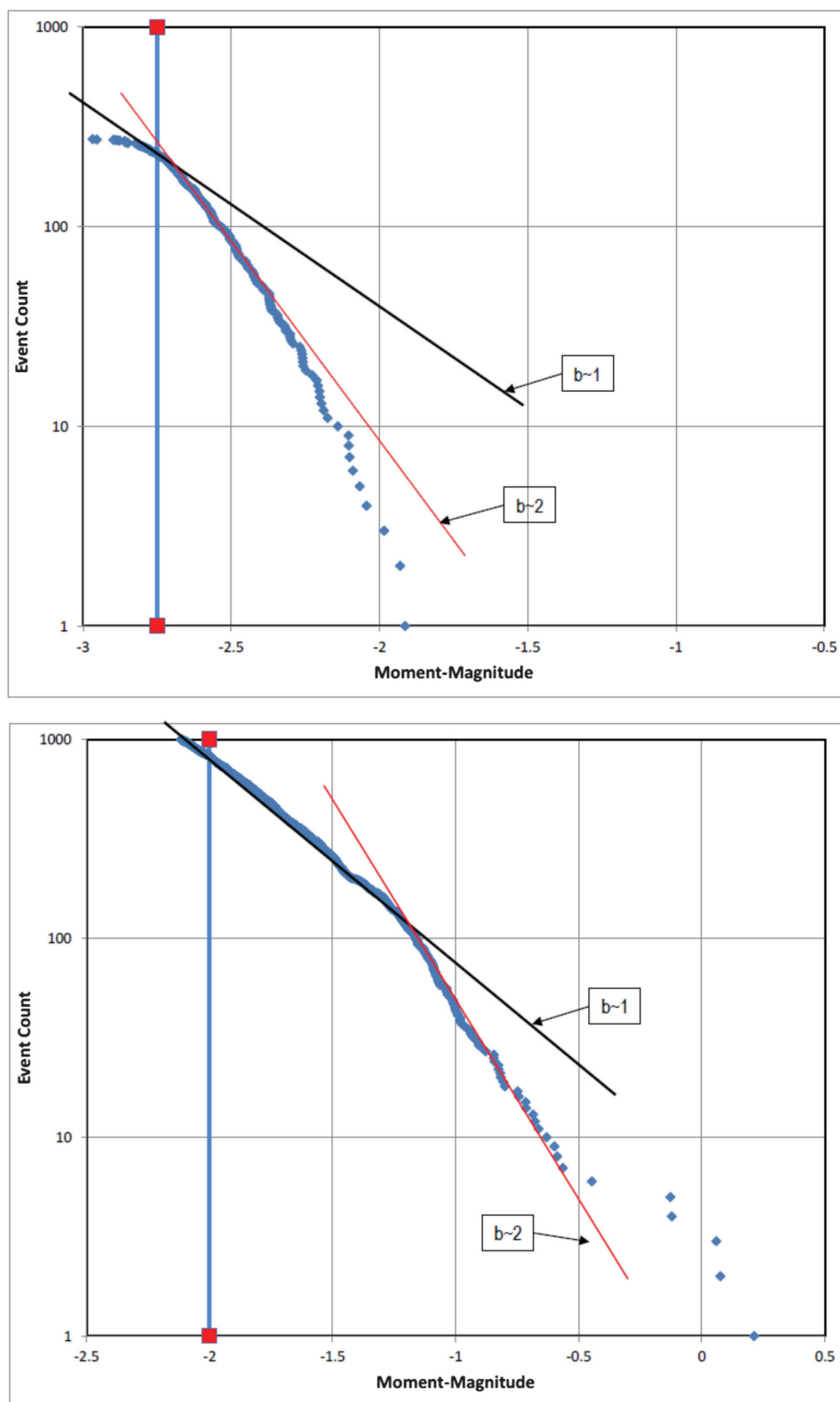


Figura 8. Relación de Gutenberg-Richter para la tercer etapa de fracturación del pozo LLL-573 (arriba) y para la quinta etapa del mismo pozo (abajo). Mientras que en el primer caso el valor b es próximo a 2 indicando una fractura hidráulica, en el segundo caso hay dos comportamientos diferentes, en donde el valor de b próximo a 1 indica la reactivación de fallas existentes.

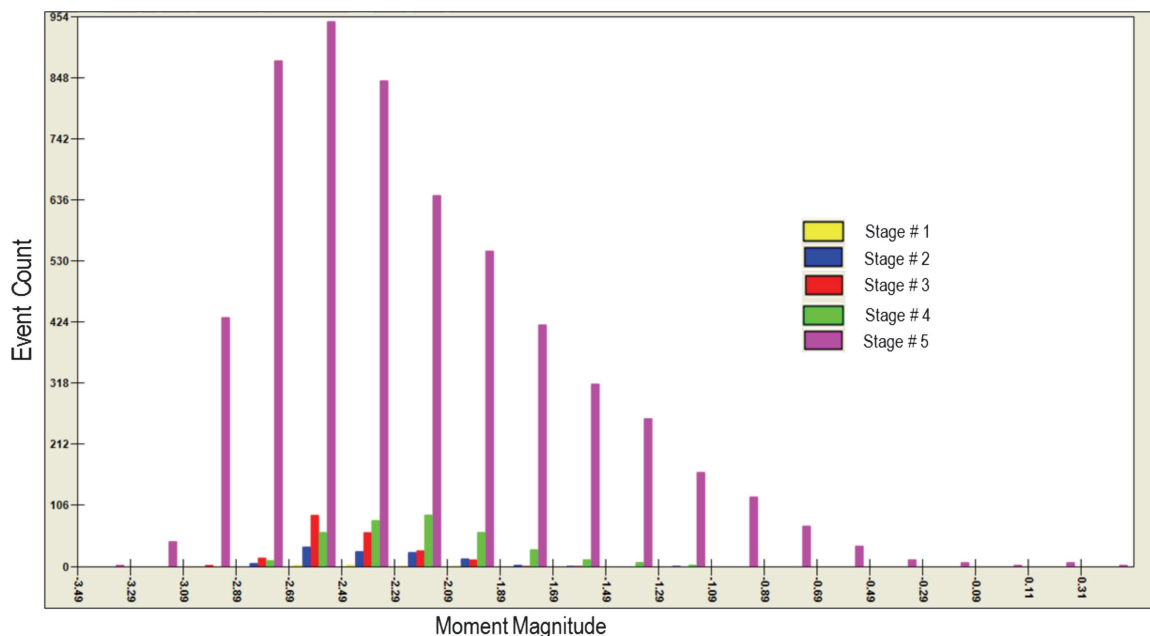


Figura 9. En este gráfico se representa la cantidad de eventos microsísmicos correspondiente a cada intervalo monitoreado con sus respectivas magnitudes. Se puede observar que para el quinto intervalo ocurren una mayor cantidad de eventos, y adicionalmente se observan magnitudes más fuertes que no se presentaron en las etapas anteriores.

CONCLUSIONES

Las evidencias encontradas en el monitoreo micro-sísmico de la quinta etapa del pozo LLL-573, tanto de la geometría que muestran en el espacio los eventos anómalos, como el comportamiento estadístico de sus magnitudes, son indicativas de la reactivación de una falla ya existente.

Pero, no está claro cuál es el mecanismo de reactivación para este caso. Una explicación posible es que parte del fluido inyectado se haya canalizado y llegado hasta la falla reactivándola. Pero otra posible explicación es que no haya habido aporte del fluido a la falla y que la reactivación de la misma se deba a sismicidad inducida; esto es que la energía sísmica irradiada por el proceso de estimulación hidráulica haya modificado el estado de tensiones pre-existente en la falla, reactivándola. Posiblemente un estudio más detallado de los eventos micro-sísmicos detectados podría permitir confirmar o descartar alguna de estas hipótesis.

AGRADECIMIENTOS

Para Aleksey Kazantsev, José Sales y Ramiro Santibáñez de Schlumberger y para Amalia Rosemblat, Damián Hryb y Luciano Monti de YPF por todos sus aportes. Y para YPF por permitir la publicación de este trabajo.

REFERENCIAS CITADAS

- Cipolla, C., S. Maxwell, M. Mack y R. Downie, 2011. A Practical Guide to interpreting Microseismic Measurements. SPE 144067, June 2011.
- Grob, M. and M. Van Der Baan, 2011. Inferring in-situ stress changes by statistical analysis of microseismic event characteristics. The Leading Edge, November 2011.
- Maxwell, S., M. Jones, R. Parker, S. Leaney, M. Mack, D. Dorval, D. D'Amico, J. Logel, E. Anderson, and K. Hammermaster, 2010. Fault Activation During Hydraulic Fracturing. GeoCanada 2010.
- Rosemblat, A. y D. Hryb, 2013. Aplicación de la microsísmica en el entendimiento de la estimulación hidráulica para pozos de *Shale* Oil. IV Jornadas de Ingeniería y Petrofísica de YPF. Mayo 2013, Buenos Aires.
- Rosemblat, A. y L. Monti, 2013. Caracterización de Reservorios *Shale* Oil Fm Vaca Muerta, Loma La Lata. Jornadas de Caracterización y Estimulación de Reservorios *Shale* en la Cuenca Neuquina. Junio 2013, Neuquén.
- Zimmer, U., 2011. Microseismic design studies. Geophysics, Vol. 76, No. 6, Nov-Dec 2011