

CARACTERIZACIÓN DE VOLÚMENES DE ROCA ESTIMULADOS (SRV) EN UN PAD MULTI-WELL *MULTI-LANDING* EN VACA MUERTA

Gabriel Chao¹, Axel Canatelli¹, Mariana Sainz-Trápaga¹, Lorenzo Parigini¹, Claudio Cardama¹,
J.C. Bonapace¹, Federico Achilli¹

1: TotalEnergies. gabriel.chao@totalenergies.com, axel.canatelli@totalenergies.com,
mariana.sainz-trapaga@totalenergies.com, lorenzo.parigini@totalenergies.com, claudio.cardama@totalenergies.com,
juan-carlos.bonapace@totalenergies.com, federico.achilli@totalenergies.com

Palabras clave: SRV, sísmica 4D, microsísmica, Aguada-Pichana Este, Vaca Muerta

ABSTRACT

In the Vaca Muerta Formation there are different stratigraphic sequences of economic interest. In this context, a common development strategy is based on the drilling and completion of multi-well and *multi-landing* horizontal well PADs. The characterization of the stimulated rock volume (SRV) associated with each individual drain is key to optimize stimulation, its associated production and to reduce costs. This work presents the results of a joint time-lapse (4D) seismic and surface microseismic monitoring. Aspects related to data acquisition and interpretation are presented in a multi-well *multi-landing* PAD with four wells targeting three different stratigraphic sequences. The study was carried out in Aguada Pichana Este (a block operated by TotalEnergies), with the objective of obtaining an image of the individual SRV of each drain and mapping potential interferences between them.

The joint interpretation of the two methodologies seeks to optimize the characterization of the SRVs. Microseismic highlights the lineaments and faults that are reactivated during stimulation, revealing potential communication pathways. The discrimination of the focal mechanisms and their statistical analysis allow studying the geomechanical response of each stratigraphic sequence to the completion job. 4D seismic provides a direct image of the fractured rock volume with unprecedented definition of lateral, but particularly vertical extension, which is key in this multi-well scenario with potential vertically stacked SRVs.

The 4D inversion allowed obtaining images of the stimulated volumes of each horizontal drain, accurately resolving their vertical thicknesses and lateral dimensions. Far from the simplified models, the SRVs reveal interesting features with a spatial distribution consistent with the inhomogeneous deployment of fracture stages. The results are specific to each sequence of interest and provide important information on the development of stimulated rock volumes for different lithologies and geomechanical properties. The average dimensions obtained from the SRVs were used in multiple history match runs (Enhanced Frac Region model of Harmony Enterprise software) to contrast their representativeness.

These results impact development strategies in many ways. Well spacing, both lateral and vertical, can be quantified and used to maximize expected ultimate recovery (EUR). The joint interpretation of the 4D and microseismic data revealed the reactivation of structures (faults / lineaments) that help to understand the dynamic behavior of the wells. At the field scale, we anticipate conducting joint 4D-microseismic acquisitions at specific PADs that will allow us improving understanding of SRV development over space and time to de-risk and optimize resource development.

INTRODUCCIÓN

La caracterización del “Volumen de roca estimulado” (comúnmente denominado SRV por sus siglas en inglés “*Stimulated Rock Volume*”) es clave para optimizar el desarrollo de yacimientos no convencionales que se basa en esquemas de estimulación hidráulica eficientes para producir hidrocarburos de formaciones con permeabilidad extremadamente baja, en el orden de los nano Darcy.

El proceso de estimulación hidráulica produce complejas interacciones físicas y mecánicas entre el fluido inyectado, el agente apuntalante (“*proppant*”) y la formación objetivo. El SRV resultante depende de los parámetros de diseño de fractura, así como de las propiedades físicas (petrofísicas y geomecánicas) de la roca objetivo.

En este artículo se presenta un estudio de monitoreo integrado de sísmica 4D y microsísmica de superficie de la estimulación hidráulica de un PAD multi-pozo/*multi-landing*. El PAD consta de 4 pozos con tres objetivos estratigráficos diferentes en Aguada Pichana Este. Dos de los pozos tuvieron como objetivo la “Cocina de Vaca Muerta”, un tercero la secuencia del Orgánico Inferior y el cuarto el Orgánico Superior. De esta forma se pudo caracterizar los principales niveles estratigráficos de interés en el área. El monitoreo provee información para cada uno de los niveles estratigráficos que se caracterizan por distintas propiedades geomecánicas y litológicas (Figura 1).

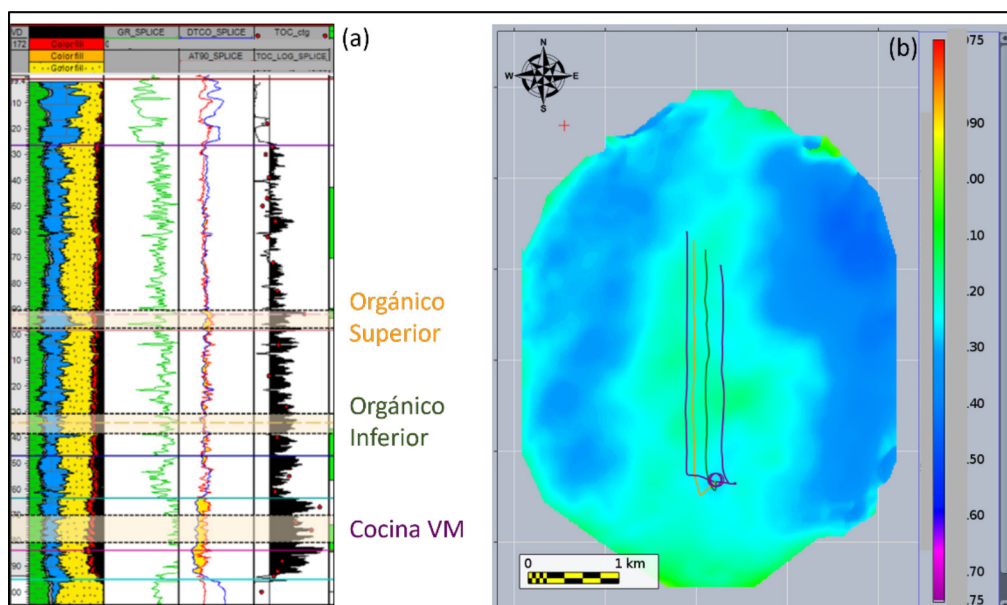


Figura 1. PAD multi-pozo multilanding con 4 pozos a tres objetivos estratigráficos diferentes. Un pozo vertical en el área se muestra como referencia (a). La ubicación y extensión de los pozos horizontales se muestra a la derecha sobre el isócrono al tope de la Formación Tordillo, base de la Formación Vaca Muerta (b). Los colores de los pozos indican el nivel estratigráfico objetivo: en violeta, la “Cocina” de Vaca Muerta; en amarillo, el Orgánico Superior y en verde, el Orgánico Inferior.

En años recientes hemos realizado dos adquisiciones conjuntas de 4D y microsísmica de superficie en Aguada Pichana Este con pozos horizontales dirigidos a dos niveles estratigráficos diferentes. El primero ubicado en la base de las facies de talud y caracterizado por un mayor contenido carbonático, más frágil, con menor contenido de carbono orgánico total (comúnmente denominado TOC por sus siglas en inglés) (Achilli *et al.* 2018). El segundo tuvo como objetivo el intervalo comúnmente conocido como la “Cocina de Vaca Muerta” que es más dúctil y con mayor contenido de TOC. La síntesis de ambos estudios nos permitió comprender el valor agregado y las limitaciones de cada técnica (Chao *et al.* 2022). Por un lado, la sísmica 4D nos permite obtener la imagen precisa del SRV gracias a su mayor resolución vertical, mientras que, por otro lado, la microsísmica mapea claramente las reactivaciones de fracturas/fallas sometidas a esfuerzos críticos. Los estudios mencionados involucraron el monitoreo de la estimulación de pozos horizontales individuales.

El esquema de desarrollo de Vaca Muerta se basa en PADs multi-pozo/*multi-landing*: pozos horizontales que comparten la locación en superficie y cada uno de ellos tiene como objetivo un nivel estratigráfico diferente o un área de drenaje distinta (Figura 1). En este contexto, es de gran importancia estimar la geometría del SRV para optimizar el espaciamiento (horizontal y vertical) entre pozos, maximizar la recuperación final esperada y evitar la superposición de los SRV individuales. La comprensión y mapeo de las reactivaciones inducidas por la estimulación hidráulica de los pozos es de gran importancia ya que estas pueden causar problemas operacionales en los pozos lindantes en el PAD o en PADs vecinos o interferencias de producción.

ADQUISICIÓN SÍSMICA 4D Y MICROSÍSMICA

En los dos estudios anteriores, la sísmica 4D se consideró una adquisición de oportunidad y la grilla de registración se limitó al diseño planificado para la microsísmica de superficie. Este consistía básicamente en una serie de estaciones de geófonos en forma de estrella. Entre las líneas receptoras, se hacían vibrar las líneas fuente para las adquisiciones sísmicas 4D.

Para el monitoreo multi-pozo/*multi-landing* se diseñó una adquisición sísmica 4D dedicada utilizando una cuadrícula ortogonal con las líneas de los receptores en la dirección S-N y las líneas de las fuentes en la dirección O-E. La cobertura sísmica de toda la longitud de los pozos horizontales mejora significativamente con este diseño sísmico “convencional” con respecto al diseño en forma de estrella utilizado previamente. La registración microsísmica también se benefició de este tendido de receptores denso, logrando una muy buena relación señal/ruido y mejorando la detección de eventos con respecto a microsísmicas de superficie realizadas anteriormente en la zona. El diseño de adquisición integrada se muestra en la Figura 2.

La secuencia de adquisiciones se detalla a continuación. Primero se adquirió una sísmica 3D, antes de la estimulación de los pozos, que sirve como línea de base para la 4D. Luego se realizaron

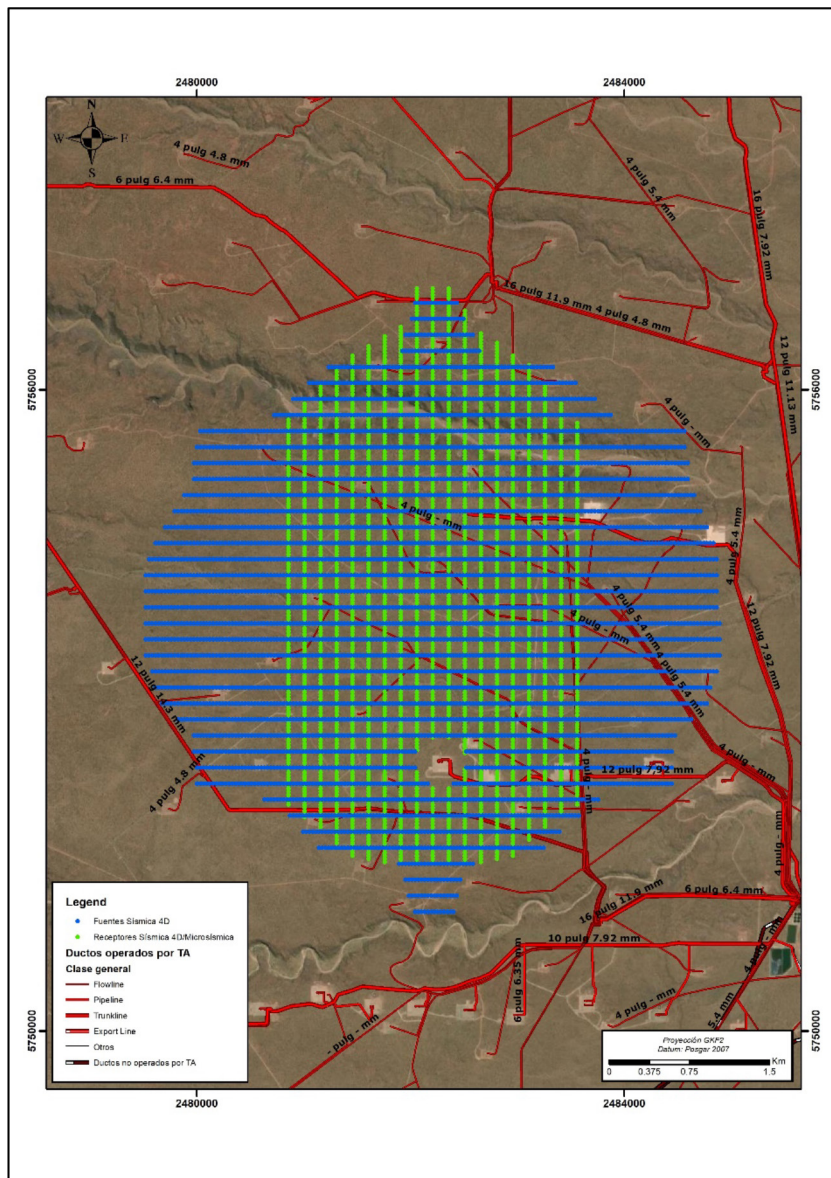


Figura 2. Adquisición sísmica. Se empleó una cuadrícula ortogonal optimizada para la adquisición sísmica 4D. Las líneas fuente se vibraron en la dirección O-E (azul). Las líneas receptoras S-N (verde) son también utilizadas para el monitoreo microsísmico.

las fracturas hidráulicas mientras se registraron los eventos microsísmicos. Una vez finalizada la estimulación, se adquirió una segunda sísmica 3D (el Monitor) con la misma geometría (puntos vibrados y ubicaciones de los receptores) que la línea de base. Esta adquisición se realizó inmediatamente después de finalizada la estimulación y previamente al inicio del *flowback*.

Dentro del área de cobertura del estudio sísmico se encuentra disponible un pozo de exploración con los registros necesarios para calibrar la sísmica y extraer una ondícula cuantitativa. En la Figura 3 se muestra una sección sísmica S-N de la línea base que intersecta el pozo. Se muestran los principales marcadores sísmicos en el intervalo de interés en el pozo y sus correspondien-

tes horizontes interpretados. La ondícula extraída se usó posteriormente en la inversión 4D. La calibración cuantitativa es de buena calidad con una ondícula de fase cero sin lóbulos laterales significativos. Un control de calidad equivalente se realizó con la sísmica Monitor con resultados satisfactorios.

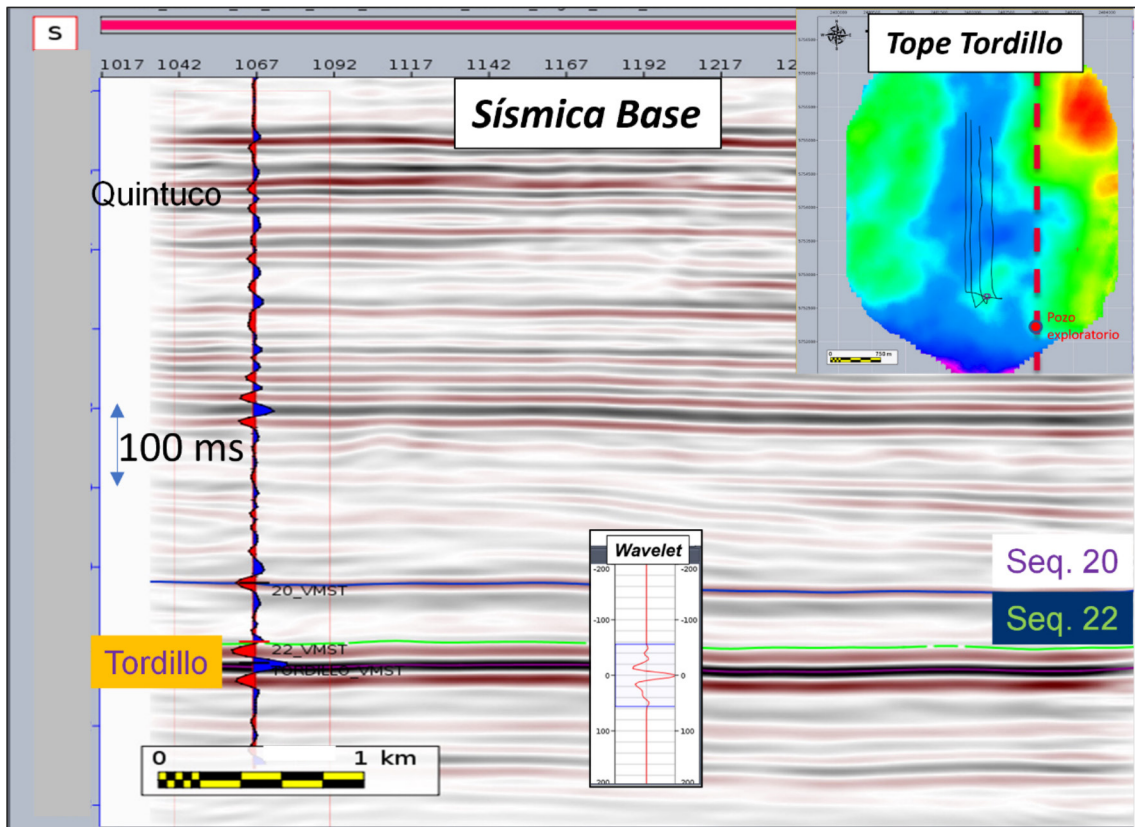


Figura 3. Sección de la sísmica Base (adquirida previamente a la estimulación de los pozos) que interseca el pozo de exploración (dirección S-N). Se muestra la ondícula extraída y la calibración cuantitativa.

MICROSÍSMICA DE SUPERFICIE. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN

Los datos microsísmicos de superficie de las líneas de receptores S-N se procesaron para determinar la ubicación y los mecanismos focales de los eventos asociados con la fractura hidráulica de cada una de las etapas de estimulación de cada pozo.

La Figura 4 muestra los eventos microsísmicos discriminados por niveles estratigráficos (eventos asociados a los pozos que tenían como objetivo los niveles estratigráficos correspondientes) y mecanismo focal: *dip-slip* y *strike-slip*. En principio, los eventos con mecanismo focal del tipo *dip-slip* están asociados a la generación de fracturas inducidas por tensión debido a la estimulación hidráulica, mientras que aquellos con mecanismo focal *strike-slip* son mayoritariamente generados por movimientos a lo largo de un plano de falla y se asocian con reactivaciones de estructuras

geológicas (Wessels *et al.* 2011; Rutledge *et al.* 2016; Rutledge 2019). En este marco, los eventos *dip-slip* pueden asociarse como contribuyentes directos del SRV mientras que los eventos *strike-slip* marcan potenciales vías de comunicación. En este sentido es similar a la interpretación de eventos “wet” and “dry” existente en la literatura.

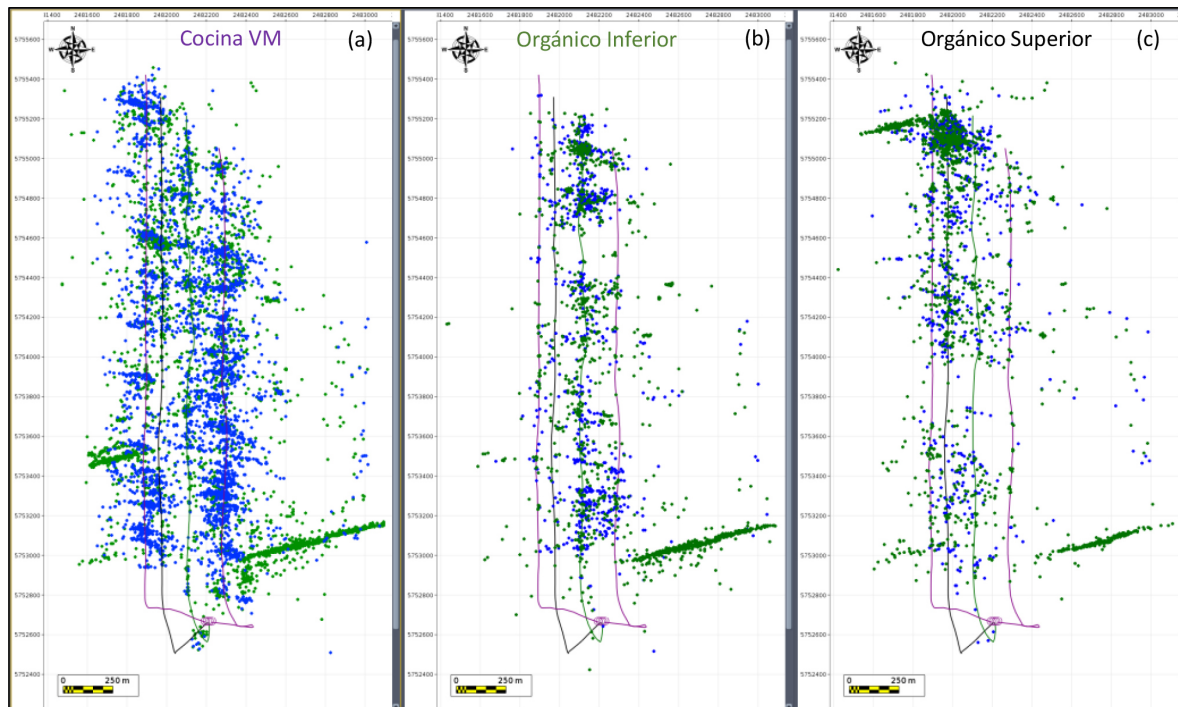


Figura 4. Eventos microsísmicos discriminados por pozo y mecanismos focales. A la izquierda (a) eventos asociados con la estimulación de los dos pozos que tienen como objetivo la Cocina de Vaca Muerta, en el centro (b) eventos asociados con el pozo que tiene como objetivo el Orgánico Inferior y a la derecha (c) eventos asociados con el pozo con objetivo Orgánico Superior. Los eventos *dip-slip* se muestran en azul, los *strike-slip* en verde.

El análisis estadístico de la cantidad de eventos por nivel estratigráfico mostrado en la Figura 5 revela información importante sobre las características geomecánicas de cada nivel estratigráfico y su respuesta a la estimulación hidráulica. En la misma se indica la cantidad de eventos microsísmicos para cada uno de los pozos, clasificados en función de la dirección de la fractura que generó el evento microsísmico: azul N110 (dirección del esfuerzo horizontal máximo de la zona), rojo N70, amarillo N135 (dirección de familias de fracturas naturales propensas a la reactivación) y en violeta los eventos complementarios. Además, la tonalidad del color indica el tipo de mecanismo focal: la tonalidad oscura indica mecanismo *dip-slip* y la clara *strike-slip*. Como se puede observar de los eventos N110, el nivel estratigráfico asociado con la Cocina de Vaca Muerta muestra una mayor cantidad de eventos *dip-slip* comparado a los otros dos niveles estratigráficos y, además, una mayor proporción de estos eventos con respecto a los eventos *strike-slip*. Otro punto para destacar es que la relación entre eventos *strike-slip* y *dip-slip* es similar para los dos pozos ubicados

en la Cocina (~85-15%), mientras que esta misma relación difiere para los dos pozos ubicados en los niveles Orgánico Inferior y Superior (~65-35%) cuyo nivel estratigráfico se caracteriza por un contenido carbonático más elevado. Estas diferencias se podrían asociar a distintas eficiencias de la estimulación hidráulica entre la Cocina y el Orgánico Superior, teniendo en cuenta un esquema de completación sin variaciones significativas entre los 4 pozos del PAD. Los eventos complementarios reafirman esta discrepancia entre los pozos de la Cocina y los del Orgánico Inferior y Superior, con una relación *strike-slip/dip-slip* ~35-65% para los de la Cocina y ~27-73% para los pozos del Orgánico Superior. Por último, se puede observar que tanto para los eventos N70 como para los N135, los relaciones *strike-slip/dip-slip* no presentan variaciones importantes entre los distintos niveles estratigráficos, donde los eventos N70 son mayoritariamente *strike-slip* mientras que los N135 mantienen una relación ~67-33%.

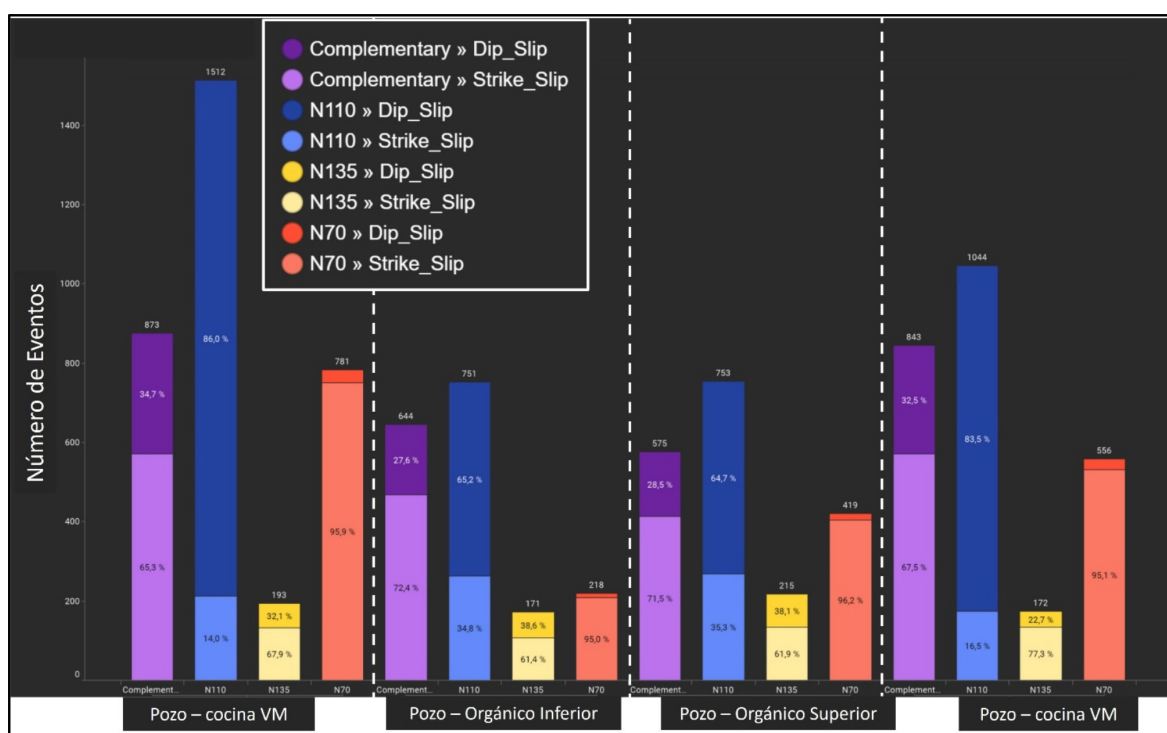


Figura 5. Análisis estadístico por pozo de los eventos microsísmicos discriminando acimut y mecanismo focal.

INVERSIÓN DE LA SÍSMICA 4D. RESULTADOS E INTERPRETACIÓN.

Los datos sísmicos 4D se invirtieron para obtener las variaciones porcentuales de la velocidad (DV/V) y los cambios en los tiempos de tránsito de las ondas P entre la base y el monitor. La diferencia en los tiempos de tránsito (*time-shift*) y la reflectividad de la base y del monitor sísmico se invierten conjuntamente (Williamson *et al.* 2007). La inversión se realiza simultáneamente con la información de Base y Monitor, no es la diferencia de dos inversiones 3D independientes. El

time-shift es un atributo acumulativo y estará presente por debajo del SRV en las áreas afectadas. Por lo tanto, este atributo se puede utilizar para mapear la extensión lateral del SRV combinado de todos los pozos horizontales, pero no brinda información sobre la extensión vertical del SRV ni la extensión lateral del SRV de cada pozo individual ya que estos se apilan verticalmente.

Las Figuras 6a-d muestran el atributo de *time-shift* en secciones a lo largo de los pozos horizontales. Las principales secuencias que pueden interpretarse en la sísmica se muestran como referencia. El nivel estratigráfico de la Cocina de Vaca Muerta se ubica entre las secuencias 22 y

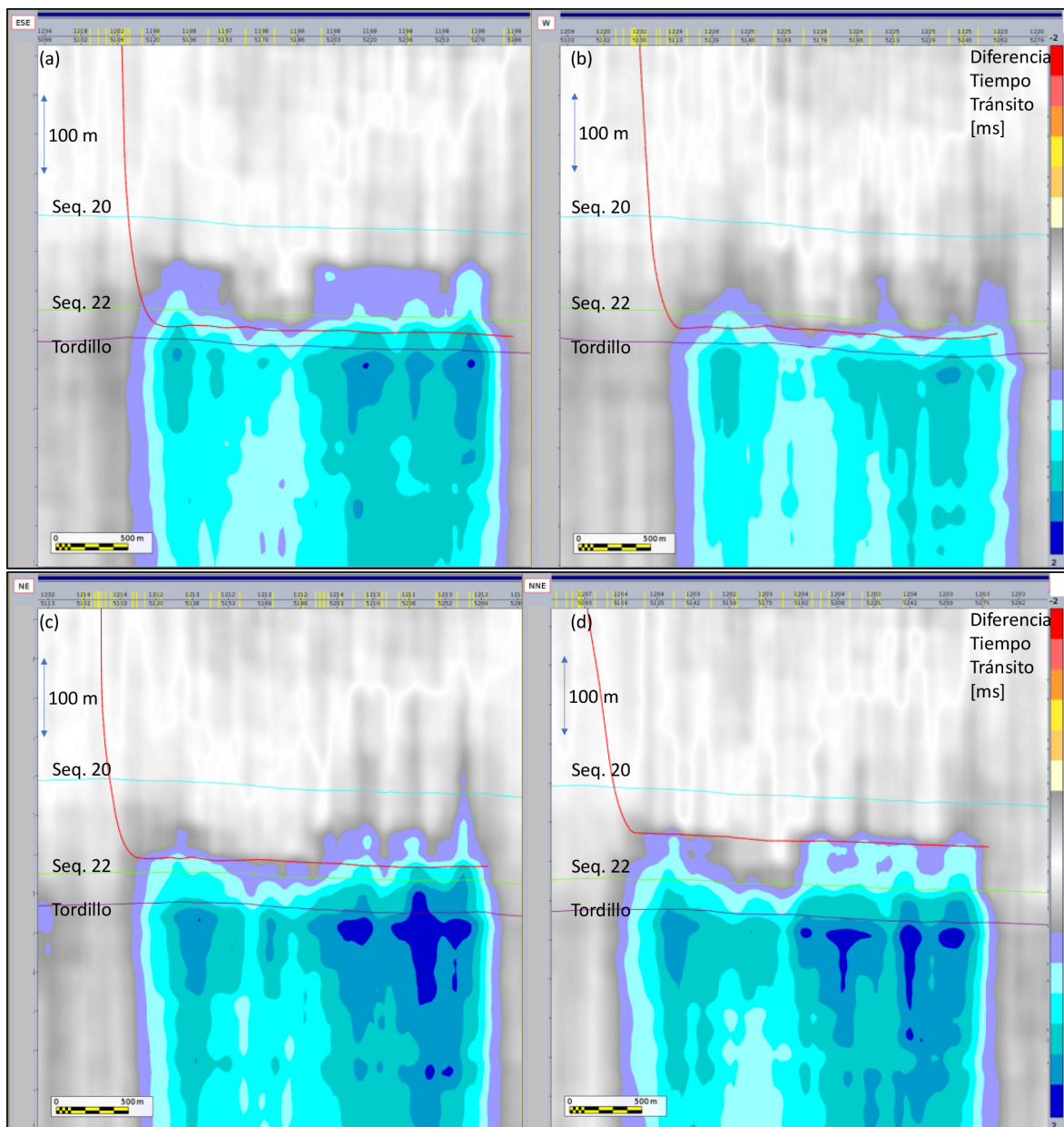


Figura 6. Atributo de diferencia en el tiempo de tránsito (*time-shift*) entre la Base y el Monitor en secciones a lo largo de los pozos horizontales. Dos pozos horizontales apuntan a la Cocina de Vaca Muerta (a) y (b). Un tercer pozo apunta al Orgánico Inferior (c) mientras que el cuarto pozo apunta al Orgánico Superior (d). Las principales superficies geológicas se muestran como referencia.

el tope de la Formación Tordillo. El Orgánico Inferior se ubica justo por encima de la secuencia 22, mientras que el Orgánico Superior se ubica hacia el punto medio entre las secuencias 20 y 22. Una clara señal 4D se observa en todos los pozos del PAD. La Figura 7 muestra la extensión lateral del área afectada por la fractura hidráulica. En el sur se observa una clara anomalía en la dirección N70°E que se interpreta como una reactivación de lineamientos/fallas y está respaldada por datos microsísmicos (Figura 4). El signo positivo de la diferencia en tiempos de tránsito corresponde a un mayor tiempo de tránsito para el Monitor y está relacionado con una disminución en la velocidad de la roca después de la estimulación hidráulica. Esto es consistente con el aumento esperado en la compresibilidad y la porosidad secundaria causada por la fracturación hidráulica. En la Figura 7, el atributo tiene valores máximos en la zona central del PAD ya que es en esta área donde se encuentran más apilados los SRV de los distintos niveles estratigráficos estimulados.

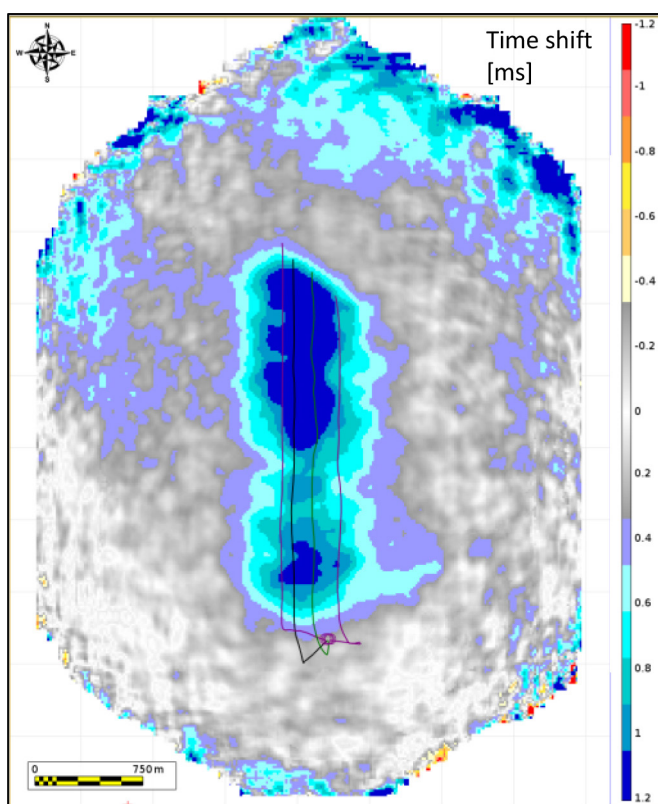


Figura 7. Diferencia en el tiempo de tránsito (*time-shift*) producido por la estimulación obtenido debajo de los pozos. El efecto acumulado muestra el área afectada por la estimulación hidráulica en alguno de los pozos. En violeta los pozos con objetivo la Cocina de Vaca Muerta, en verde el pozo con objetivo el Orgánico Inferior y en negro el pozo con objetivo el Orgánico Superior.

El análisis de las variaciones porcentuales de velocidad (DV/V) para la roca entre las situaciones pre- y post- estimulación hidráulica permite una mejor caracterización del SRV ya que nos permite estimar directamente el volumen que ha sido afectado. De esta manera, podemos estudiar cada

pozo y nivel estratigráfico objetivo de forma independiente y estudiar las posibles conectividades entre los SRV individuales, lateral y verticalmente. Las Figuras 8a-d muestran las secciones DV/V a lo largo de cada pozo horizontal. En los dos pozos ubicados en el centro del PAD (Orgánico Superior y Orgánico Inferior) se observa el SRV asociado de los pozos vecinos (Figura 8c-d).

El mayor valor agregado del atributo DV/V es lograr resolver en forma independiente los espesores verticales de los SRV individuales de cada pozo horizontal, lo que es clave en este escenario multi-pozo con SRVs potencialmente apilados verticalmente. El análisis en secciones

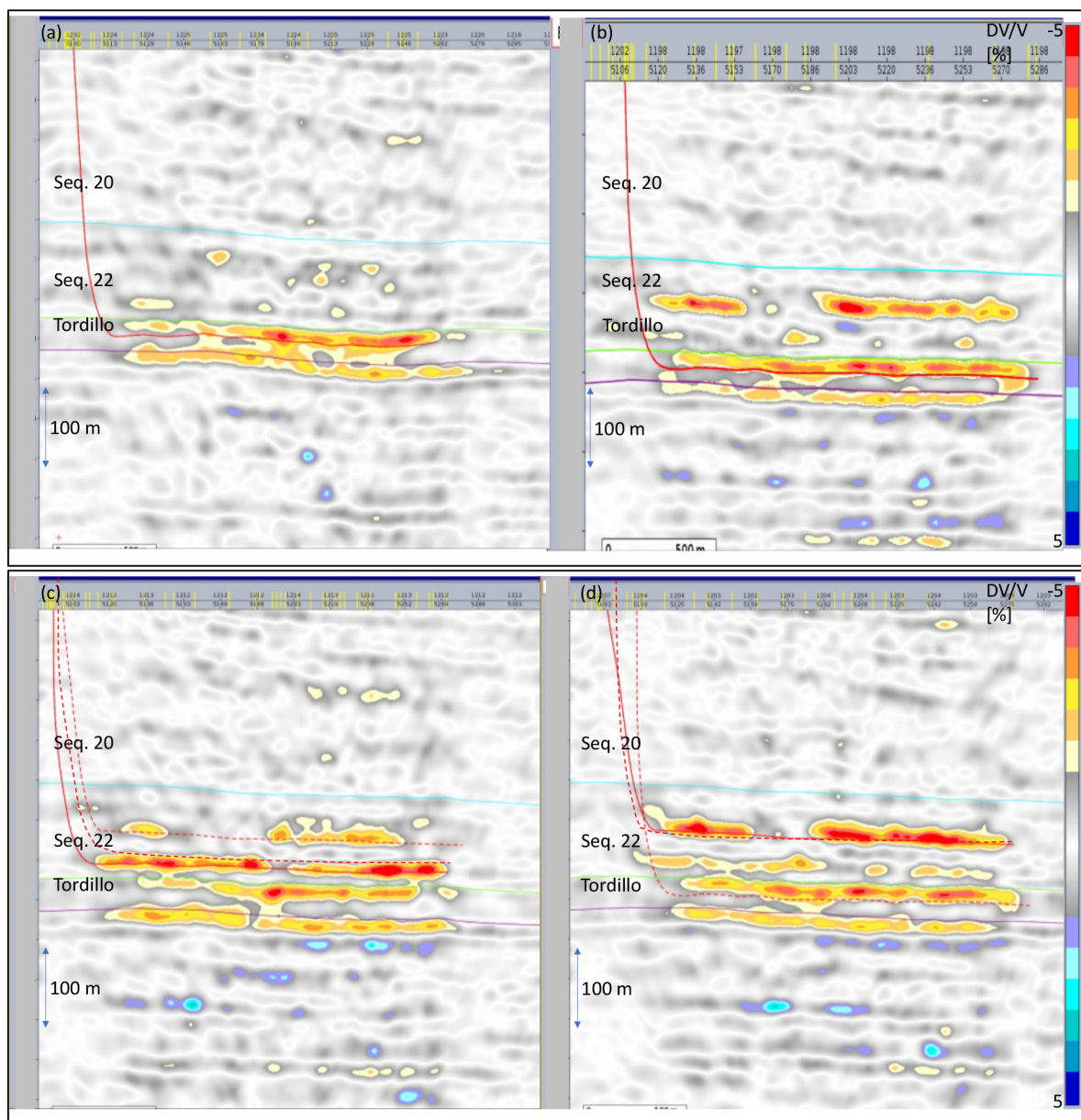


Figura 8. Variaciones porcentuales de velocidad (DV/V) después de la estimulación hidráulica en secciones a lo largo de los pozos horizontales. Dos pozos apuntan a la Cocina de VM (a) y (b). Un tercer pozo apunta al nivel VM Orgánico Inferior (c), el cuarto pozo apunta al intervalo de VM Orgánico Superior (d). Las principales superficies geológicas se muestran como referencia. En línea punteada se ilustran las proyecciones de los pozos vecinos.

muestra que el SRV estimulado en el Orgánico Superior está claramente aislado (Figura 8b-d).

Otro punto interesante para considerar es la existencia de una anomalía 4D por debajo del tope de la Formación Tordillo. El Tordillo es un claro horizonte sísmico caracterizado por un fuerte aumento de impedancia. Este carácter sísmico tan fuerte puede en principio amplificar el ruido en el dato 4D y contaminar un poco los resultados al nivel del nivel estratigráfico asociado a la Cocina de Vaca Muerta. Sin embargo, solo se observa anomalía 4D en el Tordillo en las áreas afectadas por la fractura (Figura 8a-d), abonando la hipótesis que lo observado podría ser señal y no ruido debido a problemas de repetibilidad que se agudizan a nivel Tordillo y deberían observarse en áreas alejadas de los pozos. Otra fuente de sesgo potencial es algún *time-shift* residual que no haya podido corregirse en la inversión 4D por debajo del Tordillo. Otra fuente de información independiente la proporciona la microsísmica que muestra, incluso considerando la incertidumbre en la localización vertical de los microsismos, un número no despreciable de eventos, asociados a los pozos de la Cocina, por debajo del Tordillo. Los modelos geomecánicos también indican que el Tordillo puede afectarse cuando se estimula el nivel estratigráfico de la Cocina de Vaca Muerta (Sanz-Perl *et al.* 2016).

Además, con el atributo DV/V es posible mapear la extensión lateral del SRV individual asociado con cada nivel estratigráfico. Estos mapas se muestran en las Figuras 9a-c. La volumetría del SRV también se calculó a partir de este atributo (ver sección debajo). Al igual que con los cambios de tiempo, el signo de las anomalías (negativo) es consistente con los principales mecanismos

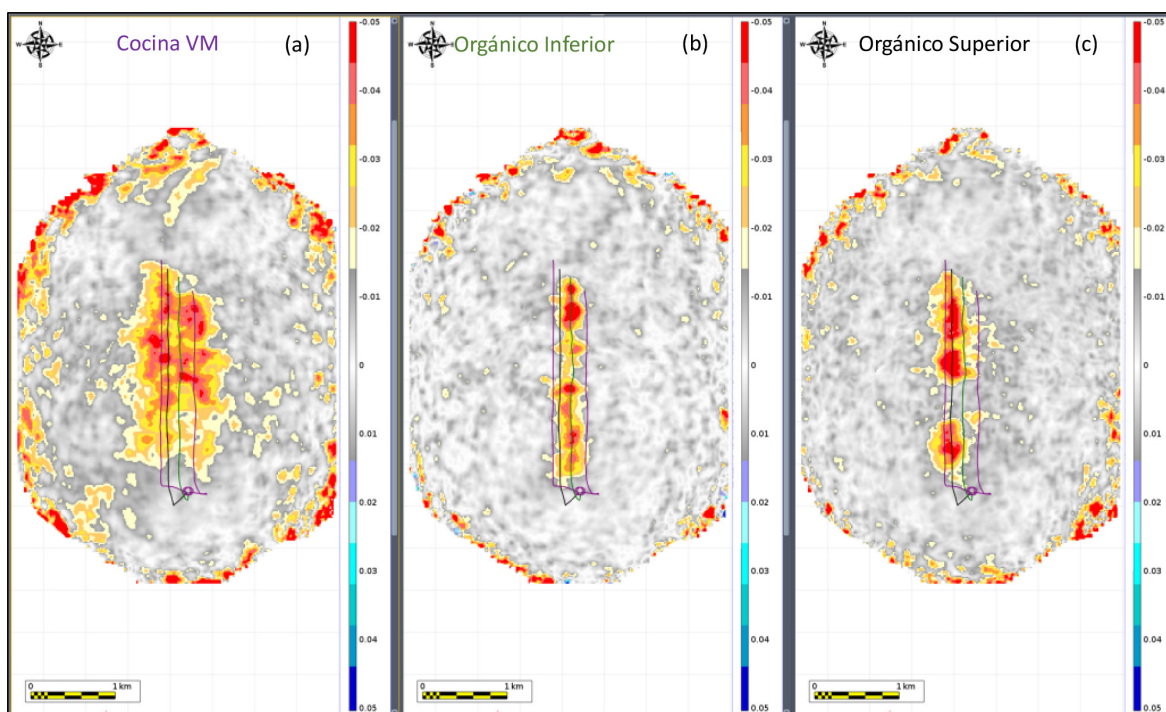


Figura 9. Extensión lateral del SRV por nivel estratigráfico. A la izquierda, el SRV generado en la Cocina de Vaca Muerta (a), en el centro el SRV generado en el Orgánico Inferior (b) y a la derecha en el Orgánico Superior (c).

físicos involucrados en la estimulación que afectan la velocidad de las ondas P: aumento de la compresibilidad de la roca y aumento de la porosidad secundaria. El análisis del mapa del SRV generado en la Cocina de Vaca Muerta indica que los SRV de cada uno de los pozos se conectan lateralmente y se observa un único volumen asociado a este nivel estratigráfico (Figura 9a).

Los mapas que caracterizan cada nivel estratigráfico en las Figuras 9a-c ponen de manifiesto dos aspectos muy relevantes. Por un lado, se observa un claro control estructural de las anomalías 4D en donde es posible observar las direcciones características en el área: N70°E, N110°E y N135°E. Este control estructural evidencia la influencia del régimen de estrés y lineamientos en el desarrollo del SRV en cada nivel estratigráfico. Por otro lado, el mapa de la anomalía de DV/V del Orgánico Superior (Figura 9c) muestra una clara discontinuidad en el centro del pozo. La operación de fractura de este pozo se vio afectada por restricciones de casing que impidieron la realización de un número de etapas. La comparación entre el área afectada por las restricciones de casing y la anomalía 4D se muestra en las Figuras 10a-b tanto en planta como en una sección a lo largo del pozo. Se puede observar que existe una muy buena correlación en las áreas afectadas por las restricciones de casing y la ausencia de señal 4D.

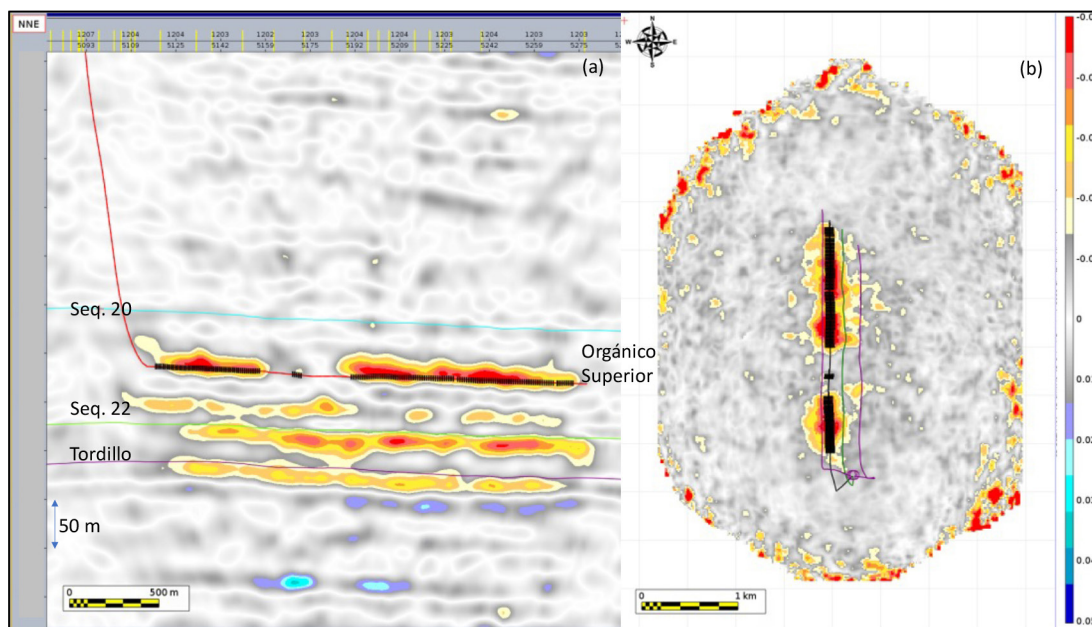


Figura 10. Comparación entre el atributo 4D DV/V y la distribución de las etapas de completación (barras negras) en el pozo afectado por restricciones de casing (nivel estratigráfico Orgánico Superior).

CARACTERIZACIÓN Y VISUALIZACIÓN DEL SRV. GEOMETRÍA Y VOLUMETRÍA

El atributo DV/V de la inversión 4D se utilizó para obtener una imagen de los SRV de cada pozo. Como fue mencionado anteriormente, los mecanismos físicos predominantes que afectan

la velocidad de las ondas P luego de la estimulación hidráulica, tienen asociadas reducciones en la velocidad, lo que se refleja en valores de DV/V negativos.

Un análisis estadístico por encima de la zona estimulada nos permite calcular un valor de *cut-off* para el DV/V de modo de distinguir robustamente señal de ruido. Este *cut-off* se aplica luego en forma tridimensional para obtener un geocuerpo o volumen asociado a cada SRV. Los geocuerpos resultantes se muestran en la Figura 11. Para la visualización de los cuerpos y el cálculo de los volúmenes, la anomalía 4D debajo del Tordillo no fue tomada en cuenta.

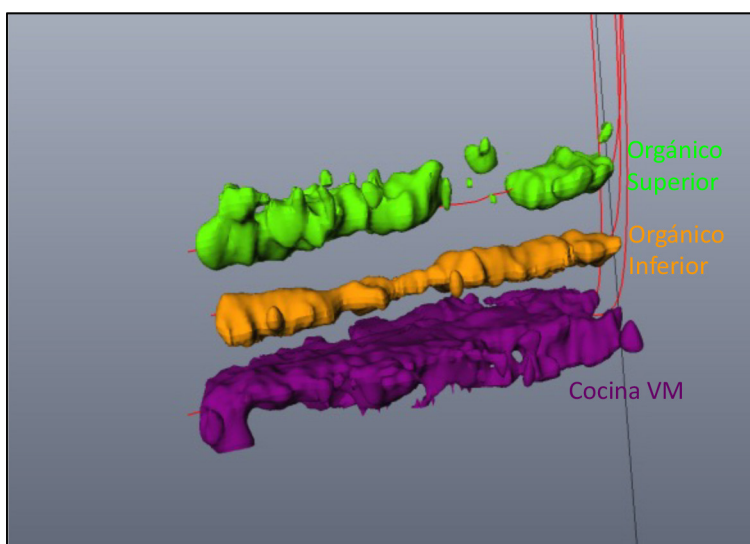


Figura 11. Imagen 3D de los cuerpos asociados a los SRV obtenidos a partir de la inversión 4D.

Como se puede observar en las secciones y mapas del atributo DV/V (Figura 8 y Figura 9), los SRV obtenidos distan de ser homogéneos y muestran variaciones importantes a lo largo de las secciones horizontales de los pozos, tanto de espesor vertical como de extensión lateral. Estos resultados interpelan los modelos dinámicos comúnmente utilizados en donde se asume una geometría del volumen de drenaje tipo caja, con valores de altura y media ala de fractura constantes a lo largo de la sección horizontal del pozo. La estimación de valores promedios de extensión lateral y espesor de los SRV resulta útil para optimizar el espaciado de pozos en los próximos PADS y como input para incorporarlos en los modelos dinámicos existentes. Los rangos de valores y los volúmenes finales obtenidos se muestran en la Tabla 1. El análisis de la heterogeneidad de los SRV es necesario para comprender las producciones de los pozos actuales y será de máxima importancia a la hora de planificar un futuro desarrollo infill.

Nivel estratigráfico	Extensión lateral (m)	Espesor (m)	Volumen (10^6m^3)
Cocina VM (SRV combinado 2 pozos)	800-1200	20-45	31
Orgánico Inferior	100-400	15-20	9
Orgánico Superior	300-500	20-30	12.5

Tabla 1. Dimensiones promedio y volúmenes asociados a cada nivel estratigráfico estimados por la 4D.

La estrategia de interpretación de los resultados se basa en un enfoque multidato. Por un lado, la caracterización estática del reservorio se realiza con la impedancia acústica obtenida mediante inversiones 3D. La impedancia acústica provee las características litológicas *in-situ* de la formación previo a la perforación y fractura del pozo. Los intervalos más ricos en contenido de carbono orgánico total y con mejores porosidades están caracterizados por valores bajos de impedancia; mientras que aquellos intervalos con mayor contenido carbonático se distinguen con impedancias más altas. Luego, la microsísmica nos permite identificar rasgos estructurales, fallas y lineamientos que se reactivan debido a la estimulación hidráulica. Finalmente, la 4D nos provee una imagen del volumen de roca fracturado que constituye la mejor aproximación al SRV. Un esquema de esta interpretación integrada se muestra en la Figura 12.

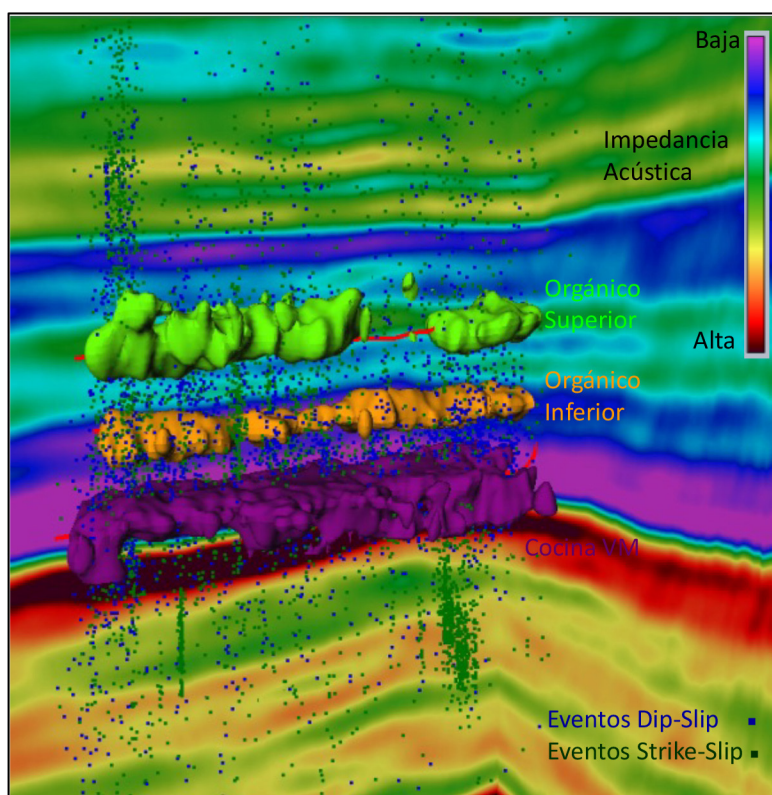


Figura 12. Interpretación integrada del SRV combinando la caracterización estática (impedancia acústica), eventos microsísmicos con tipo de mecanismos focales asociados y la visualización de los SRVs derivados de atributos 4D (DV/V).

El Orgánico Superior está caracterizado por una alta impedancia P, consecuencia de un mayor contenido carbonático. Si asociamos el contenido carbonático a mayor fragilidad, estas rocas resultan más frágiles que las de la Cocina y por ende más favorables a una estimulación hidráulica eficiente. Sin embargo, el volumen estimado por la 4D es menor que el estimado en el nivel estratigráfico de la Cocina de Vaca Muerta (Tabla 1, luego de normalizar por pozo). Esto es consistente con los resultados de la microsísmica que muestran un mayor número de eventos en este nivel estratigráfico. Además, el análisis de los mecanismos focales mostró que el Orgánico Superior tiende a generar eventos *strike-slip* que están asociados con reactivaciones de lineamientos y fallas, mientras que la estimulación en la Cocina favorece la generación de fracturas hidráulicamente conectadas al pozo caracterizadas por eventos *dip-slip*.

HISTORY MATCHING DE LA PRODUCCION.

El pozo con objetivo Orgánico Inferior fue elegido para realizar un ejercicio de match de producción y contrastar con los parámetros geométricos del SRV extraídos de la 4D. La metodología seleccionada fue utilizar el *software* especializado *Harmony Enterprise* y representar el pozo y su estimulación a través de un modelo “*Enhanced Frac Region*”. Este último, si bien resulta un modelo simplificado pseudo 3D, brinda la posibilidad tiempo-efectiva de realizar múltiples sensibilidades (Figura 13).

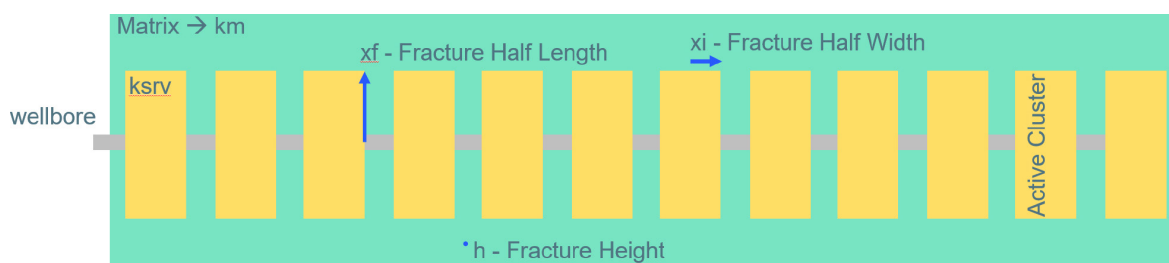


Figura 13. Esquema de modelo “*Enhanced Frac Region*” y sus parámetros.

A través de un history match multi-realización se intentó constatar estadísticamente si las dimensiones promedio obtenidas de la 4D resultan consistentes con la producción del pozo. Para ello, utilizando las propiedades petrofísicas de la formación y la distribución de dimensiones de media-ala (X_f) y altura de fractura (h) de la 4D, se corrió el *workflow* y analizó la distribución de parámetros de las realizaciones que se encontraban dentro de un rango de error del 10%.

La Figura 14 muestra el análisis estadístico, a lo largo del pozo, de la media ala (X_f) y altura de las fracturas (h) estimados de la 4D. La estimulación por fracturas hidráulicas se llevó a cabo a lo largo de 2300 m con 31 etapas de fracturas y 5 *clusters* de punzados por etapa. Los parámetros

petrofísicos utilizados fueron de 0.1 (10 %) para la porosidad total (ϕ_T) y 0.65 (65%) para la saturación de gas (S_g) y provienen del análisis petrofísico general de este nivel estratigráfico.

La Figura 15 muestra los resultados de la distribución de parámetros que permiten un match aceptable de la productividad del pozo (Figura 16). Además de las dimensiones de las fracturas (X_f y h) los siguientes parámetros del modelo: número de *clusters* (n_f), eficiencia de los *clusters*, media-ala de *clusters* (ξ) y la permeabilidad del SRV (k_{SRV}) fueron variables en la optimización. Los valores de P50 de los resultados de las distribuciones para la geometría de las fracturas mostraron consistencia con los estimados con la 4D: 95 m (P50) vs 90 m (4D) para media ala y 20 m (P50) vs 17 m (4D) para la altura. Analizando los resultados de las distribuciones estadísticas, podemos concluir que las realizaciones que convergen a dimensiones de fractura estimadas por la 4D resultan en valores realistas de los demás parámetros. En este sentido los resultados de la 4D pueden utilizarse para restringir las incertidumbres en la geometría del SRV y optimizar el resto de los parámetros en forma más robusta.

En la Figura 16 se ejemplifica uno de los match obtenidos. Como se mencionó anteriormente, el rango de error seleccionado para considerar como válida la realización fue del 10%. Con ello se intentó lograr cantidad suficiente de realizaciones válidas como para obtener un rango de incertidumbre aceptable.

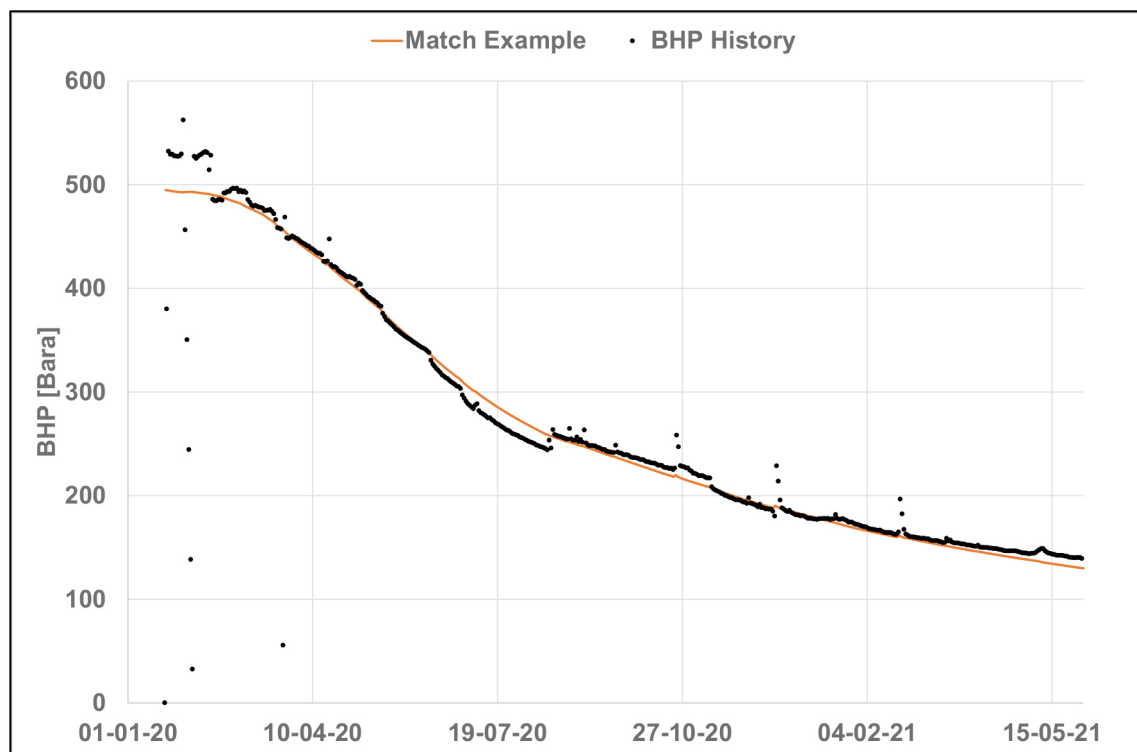


Figura 16. Ejemplo de match: en punteado negro presión fluyente de fondo y en naranja ejemplo de una de las realizaciones.

CONCLUSIONES

El estudio de monitoreo sísmico integrado de 4D y microsísmica de superficie permitió obtener datos importantes en un PAD multi-pozo/*multilanding*. La interpretación integrada de los resultados puso de manifiesto información previamente desconocida. Por un lado, reveló las diferentes respuestas geomecánicas *in situ* de cada nivel estratigráfico a la estimulación. Por el otro permitió obtener imágenes 3D de los SRV asociados a cada pozo, así como cuantificar precisamente sus dimensiones y volúmenes.

Los resultados obtenidos en términos de la respuesta geomecánica a la fractura hidráulica y del desarrollo del SRV son específicos a cada nivel estratigráfico. En este sentido esta información impacta en la ubicación y el diseño de PADs futuros en términos de elección del nivel estratigráfico objetivo y determinación del espaciado lateral y vertical entre los pozos.

El estudio de *History Matching* mostró que las dimensiones estimadas del SRV a partir de la 4D son consistentes con valores razonables de los parámetros de estimulación y petrofísicos de la formación dentro de rangos de incertidumbre aceptable.

A futuro prevemos la adquisición de un nuevo monitor sísmico pasado un tiempo de producción para analizar la evolución temporal del SRV y comparar con la situación inmediatamente después a la estimulación hidráulica.

La realización de este tipo de adquisiciones conjuntas 4D-Microsísmica en PADs específicos del campo y/o por fase de desarrollo permiten mejorar la comprensión, reducir riesgos y contribuir a la optimización de desarrollos actuales y futuros, así como el de áreas prospectivas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a TotalEnergies y a los socios en el bloque Aguada Pichana Este: PanAmerican Energy, YPF y Wintershall DEA por la autorización para presentar este trabajo. Los autores agradecen a los siguientes colegas en TotalEnergies: Jose-Luis Fachal, Manuel Fantín, Abderhaim Lafram, Diego Rojas-Arce y Matthieu Vinchon por su apoyo durante las distintas etapas del estudio y a Mauricio Bueno por sus comentarios sobre este artículo.

REFERENCIAS

- | | |
|--|--|
| <p>Achilli, F., Chao, G., Rojas, D., Sanz, Y., Hubans, C., Lafram, A., 2018. Método para calcular el volumen de roca estimulado (SRV) en la fm. Vaca muerta. Primera experiencia de sísmica 4d, X Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidro-</p> | <p>carburos, IAPG, Actas, Mendoza, Argentina.</p> <p>Chao, G., Achilli, F., Fachal, J.L., Sainz-Trápaga, M., Rojas-Arce, D., Lafram, A., Vinchon, M., Fantín, M., Bergery, G., Brosille, E., 2022. Time-lapse seismic integrated with surface microseismic for</p> |
|--|--|

- SRV characterization in the Vaca Muerta Formation. *The Leading Edge*, 41(3):166
- Rutledge, J., 2019. Is bedding-plane slip a common microseismic source during hydraulic fracturing? SEG International Exposition and 89th Annual Meeting: 3026-3030
- Rutledge, J., Weng, X., Chapman, C., Yu, X., Leaney, S., 2016. Bedding-plane slip as a microseismic source during hydraulic fracturing. SEG International Exposition and 86th Annual Meeting: 2555-2559
- Sanz-Perl, Y., Alric, F., Rodriguez, L., Estrada, S., 2016. Tordillo evaluation: the risks of initiate the hydraulic fracture in lower Vaca Muerta close of top Tordillo. TotalEnergies. Informe inédito.
- Wessels, S., De La Peña, A., Kratz, M., Williams-Stroud, S., Jbeili, T., 2011. Identifying faults and fractures in unconventional reservoirs through microseismic monitoring. *First Break*, 29(7):99-104
- Williamson, P.R., Cherrett, A.J., Sexton, P.A., 2007. A new approach to warping for quantitative time-lapse characterisation: Conference Proceedings, 69th EAGE Conference and Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2007, cp-27-00354.