

Caracterización morfológica y estructural de una megaestructura de tipo MTD (*mass-transport deposits*) de escala sísmica en el sistema Vaca Muerta - Quintuco, cuenca Neuquina

Por **Denis Marchal, Federico Sattler, Claudio Naides, Teresa De Barrio, Marcelo Menchi y Walter Romera (Pampa Energía) y Joaquín Moreno (Pampa Energía - Consultor)**

Trabajo seleccionado del tema de Geología estructural del 11° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos del IAPG.



La caracterización de los diferentes tipos de estructura, así como la estimación de la intensidad de la deformación asociada, permiten dibujar un mapa de riesgo operativo asociado a la MTD para el proyecto de perforación que tiene como objetivo la sección basal del *shale* de Vaca Muerta.

Introducción

Mass-transport deposits (MTD): definiciones y características

Un depósito de transporte masivo (MTD, por sus siglas en inglés) es una estructura sinsedimentaria caracterizada por un conjunto variado de estructuras (fallas normales, transcurrentes e inversas, pliegues) organiza-

do espacialmente (dominios distensivo, traslacional y compresivo) y limitado verticalmente (afecta un conjunto específico de capas independientemente del contexto tectónico, sin impactar las capas supra e infrayacentes) (Galloway y Hobday, 1996; Moscardelli y Wood, 2008; Bull *et al.*, 2009; Alsop y Marco, 2012; Benevenuti *et al.*, 2012; Ogata *et al.*, 2014; Kneller *et al.*, 2016; Le Goff *et al.*, 2020; Shuxin Pan *et al.*, 2020) (Figura 1). En el dominio compresivo, se habla de pliegues tipo *slump* cuando las estructuras presentan un estilo más dúctil (Farrell y Eaton, 1988; Strachan y Alsop, 2006; Alsop *et al.*, 2017; Bhatnagar *et al.*, 2019) y de estructuras tipo *thrust* o *pop-up block* cuando la deformación se manifiesta de manera más frágil (Moscardelli *et al.*, 2006; Benvenuti *et al.*, 2012; Armandita *et al.*, 2015; Nugraha *et al.*, 2020).

Un MTD se genera por inestabilidad gravitacional que se caracteriza por el deslizamiento de una masa coherente de sedimentos poco consolidados a lo largo de una pendiente (por ejemplo, Galloway y Hobday, 1996; Ogata *et al.*, 2020b). Los mecanismos (*triggers*) que generan la inestabilidad son variados: endógenos (carga sedimentaria, tormenta, etc.) o exógenos (terremotos, impacto de meteoritos, etc.) (Martín Chilver *et al.*, 2011; Owen *et al.*, 2011; Alsop y Marco, 2012; Alsop *et al.*, 2016). La geometría de los MTD puede variar sustancialmente en relación con muchos parámetros como la configuración tectónica de la cuenca, la pendiente, la presencia de irregularidades en el nivel de cizallamiento basal, los límites laterales, la reología de los sedimentos, etc. (por ejemplo, Moscardelli y Wood, 2008; Le Friant *et al.*, 2020; Ogata *et al.*, 2020a; Alves y Gamboa, 2020). Sin embargo, varios análisis morfométricos de los MTD muestran correlaciones interesantes entre parámetros, como longitud, área, volumen, etc. (Moscardelli y Wood, 2015; Gamboa *et al.*, 2020; Puga-Bernabéu *et al.*, 2020). Las estructuras pueden ser generadas por un único evento o por un apilamiento de varios eventos, donde el último puede incluir elementos de estructuras (*slumps*) subyacentes (o primario) (por ejemplo, Minisini y Trincardi, 2009; Gamboa *et al.*, 2010; Alsop y Marco, 2012; Armandita *et al.*, 2015; Gamboa *et al.*, 2020).

MTDs y *slumps* en la formación Vaca Muerta

Las deformaciones de sedimentos poco consolidados (*Soft-Sediment Deformation* o SSD por su sigla en inglés) de edad Tithoniana temprana a Cretácica temprana son relativamente frecuentes dentro de la formación Vaca Muerta (Figura 2), como las estructuras compresivas asociadas a deslizamientos gravitacionales (*slumps*) o las estructuras de licuefacción o de escape de agua (principalmente observadas en afloramientos, debido a sus tamaños métricos).

Las estructuras de tipo *slump* son generalmente más grandes, tanto arealmente como en el espesor de sedimentos afectados, en la parte noreste de la cuenca, donde el buzamiento de las capas suele ser más importante, principalmente en la zona de talud de las clinoformas que caracterizan el sistema Vaca Muerta-Quintuco (Reijnen *et al.*, 2020). Se observan, por ejemplo, en las zonas de los bloques Pampa La Yegua II - Sierra Chata (Arregui, 2014; Pose *et al.*, 2014; Marchal *et al.*, 2016) y

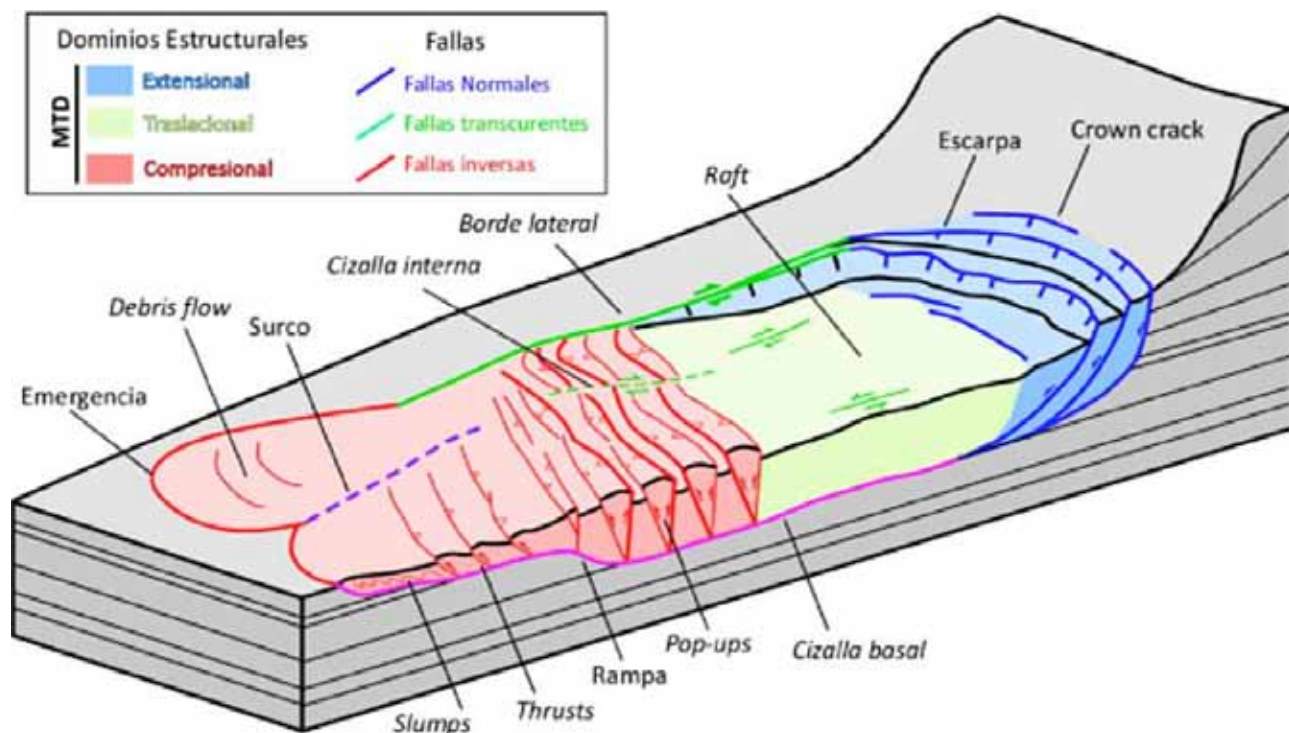


Figura 1. Esquema conceptual de un *mass-transport deposits* (MTD) que muestra los tres dominios estructurales (adaptado de Benvenuti *et al.*, 2012 y Cardona *et al.*, 2019).

de Aguada Pichana (Gangui y Grausem, 2014) o de Los Toldos I Sur (Figura 2) donde las clinoformas presentan un talud con pendientes de la más pronunciadas de la cuenca (González *et al.*, 2016). Sin embargo, este tipo de estructuras también son descritas en el sector este de la cuenca donde el sistema de clinoforma presenta ángulos más bajos (Figura 2), como en la zona de los bloques de Loma Campana-Cruz de Lorena (Notta *et al.*, 2017; Reijenstein *et al.*, 2017). Los *slumps* ocurren a diferentes niveles de la formación Vaca Muerta: justo arriba del marcador sismoestratigráfico T3 (*sensu* Desjardins *et al.*, 2016) en el este de la cuenca (Notta *et al.*, 2017; Reijenstein *et al.*, 2017), al nivel del B2 en el centro (Arregui, 2014) y entre el B2 y B3 más al norte (Marchal *et al.*, 2016).

Estructuras de tipo *slump*, de escala centimétrica a decamétrica, fueron identificadas dentro la formación Vaca Muerta en afloramientos desde el sur (Sierra de la Vaca Muerta) hasta el norte (Zona de Malargüe) de la cuenca Neuquina (Figura 2) (Leanza *et al.*, 2003; Spalletti *et al.*, 2008; Martín Chilevet *et al.*, 2011; Kietzmann y Vennari, 2013; Reijenstein *et al.*, 2017). Estas estructuras aparecen en varios niveles, desde la base hasta el tope de la formación (Figura 3).

El área Sierra Chata se encuentra en el flanco oriental del Dorso de los Chihuidos, en la zona occidental de la cuenca Neuquina (Figura 2). Esta se ubica 130 km lineales al noroeste de la ciudad de Neuquén y abarca una superficie de 864 km². En este sector de la cuenca, la formación Vaca Muerta, en ventana de gas seco y fuertemente sobrepresionada, se encuentra en facies de talud y cuenca profunda. Presenta un espesor de más de 600 m y está constituida por margas y pelitas con alto conte-

nido orgánico. En este bloque, el sistema Vaca Muerta-Quintuco presenta muy poca deformación tectónica a escala sísmica.

De todas las estructuras asociadas a SSD identificadas en la cuenca para la formación Vaca Muerta (Figura 2), la única que se puede definir como un MTD, debido al tamaño de la megaestructura y el reconocimiento de los diferentes dominios estructurales que la componen, está ubicada en el sector del área de Sierra Chata. Esta estructura fue originalmente descrita por Arregui (2014). El objetivo de este trabajo es presentar una caracterización estructural detallada basada en la interpretación de registro sísmico 3D reprocesado en 2019 y datos de los pozos perforados en el bloque que atravesaron esta sección. A partir de esta caracterización se elaboró un mapa de riesgos operacionales asociados a esta estructura.

Datos y metodología

Los datos disponibles a la fecha en el Bloque Sierra Chata para la caracterización de la formación Vaca Muerta consisten en sísmica 3D en el sector Este, sísmica 2D en el sector Oeste y recortes de perforación y perfiles eléctricos en tres pozos. Adicionalmente se cuenta con una corona de 10,28 m (de un programa original de 72 m, interrumpido por importantes problemas de acuñaamiento). El análisis de esta consta de descripción de facies, microtectónica, petrografía, diagénesis, porosidad, mineralogía, calcimetría, perfil de GR espectral, Difractometría de Rayos X (DRX), Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y Tomografía Computada (CTscan) (Blanco Ibáñez y De Barrio, 2014).

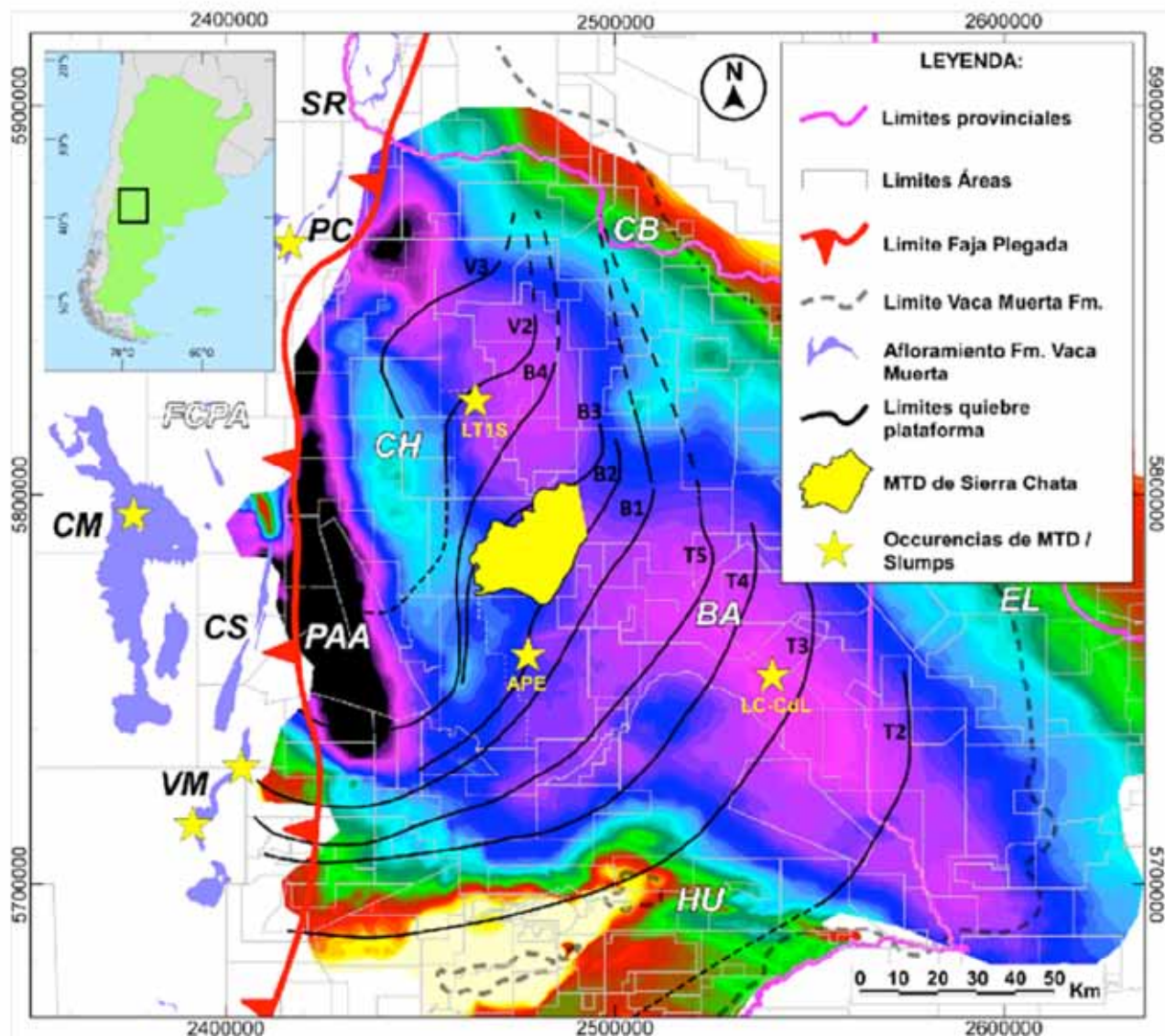


Figura 2. Mapa de ubicación de la megaestructura tipo *mass-transport deposits* (MTD) de Sierra Chata. Recuadro incrustado: posición de la cuenca Neuquina en Argentina. Estrellas amarillas: ocurrencias de MTD o slumps en sísmica (SCH, AP, LC-CdL), pozos (SCH, LT1S, LC-CdL) y afloramientos (VM, CM, PC). Límites de quiebres de plataforma según Domínguez *et al.* (2017). Slumps en datos de subsuelo: AP: Aguada Pichana, LC-CdL: Loma Campana-Cruz de Lorena, SCH: Sierra Chata, LT1S: Los Toldos I Sur. Macroelementos estructurales: FCPA - Faja Corrida y plegada del Agrio; BA - Bajo de Añelo; CB - Cerro Bayo; CH - Dorso del Chihuido; EL - Entre Lomas; HU - Dorsal de Huíncul; PAA - Pampa del Agua Amarga. Afloramientos de la formación Vaca Muerta: VM- Sierra de la Vaca Muerta; CS - Cordón del Salado; CM - Cerro Mulichinco; PC - Puerta Curaco; SR - Sierra de Reyes.

Sísmica 3D

La principal fuente de datos para la caracterización de la geometría del MTD como de sus estructuras internas fue la sísmica 3D, principalmente la de Sierra Chata. El cubo sísmico 3D original consistió en una unificación de dos registraciones sísmicas adquiridas en los años 1997 y 1998, de 253 km² y 267 km², respectivamente, que fueron procesadas en conjunto en 1999. Fueron registros de diseño ortogonal (líneas receptoras N-S, líneas emisoras E-O) cuyo procesamiento dio por resultado un volumen sísmico con dimensiones de celda de 20 x 20 m y un fold nominal de 27 trazas. En 2019 se realizó un reprocesamiento del dato sísmico con principal foco en la formación Vaca Muerta, con el objetivo de mejorar la imagen y la relación señal-ruido, como así también un correcto acondicionamiento de los *gathers* para su utilización en futuros procesamientos, como Inversión Simultánea o estimación de parámetros elásticos. La im-

plementación del proceso de interpolación y regularización 5D permitió homogeneizar las características de la geometría, e interpolar trazas en aquellas zonas de baja cobertura e incrementar el fold de 27 a 108. Se completó el *set* de datos sísmicos al integrar los volúmenes sísmicos de Aguada de la Arena, Sauzalito Sur y Bandurria para tener una visión más completa de la estructura.

En una primera fase se interpretaron los horizontes correspondientes a los límites sísmo-estratigráficos del sistema Vaca Muerta - Quintuco definidos en Desjardins *et al.* (2016) (Figura 4a). En una segunda fase de refinamiento y caracterización de la estructura se mapearon horizontes sísmicos internos. Se observó que la mayor expresión de las estructuras generadas en el MTD se da al nivel del horizonte B2 (Figura 4b), el cual se utilizó principalmente para la descripción detallada de las estructuras.

A partir del mapeo de estos horizontes, se confeccionaron varios tipos de mapas. El mapa que mejor resulta

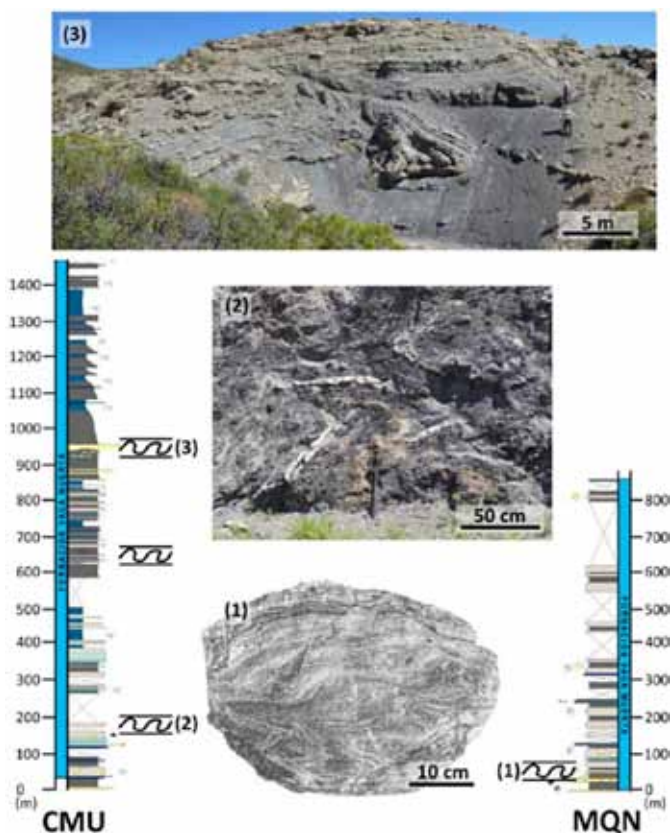


Figura 3. Estructuras tipo slump en afloramientos de la formación Vaca Muerta. Los intervalos donde se identificaron eventos de tipo slump se ubican a lo largo de las columnas estratigráficas de los perfiles de las localidades de Cerro Mulichinco (CMU) y Mallín Quemado Norte (MQN), está última ubicada en la Sierra de la Vaca Muerta (ver figura 1 para ubicación de los perfiles). Las fotos 1, 2 y 3 ilustran estas estructuras a diferentes escalas.

para presentar características y dimensiones de las estructuras es un mapa isopáquico entre la base del MTD y el horizonte B2 donde la expresión de las estructuras es máxima. Para resaltar los límites de las estructuras se uti-

lizó el atributo *Fault Thin Likelihood* (FTLH) (Harris *et al.*, 2019), el cual se superpuso al mapa isopáquico, generando un mapa compuesto óptimo para analizar las estructuras. Otro tipo de mapa que se utilizó para la caracterización estratigráfica-sedimentológica del MTD fue el de amplitudes RMS al nivel del horizonte B2. Se completó el análisis con *horizon-slices* para revelar algunos detalles más sutiles. El análisis de detalle y la caracterización de la geometría y la estructuras del MTD se realizó el cubo sísmico 3D de Sierra Chata reprocesada en 2019, donde se muestran algunos cortes sísmicos. Posteriormente, el mapeo de la estructura se extendió hacia el este (áreas de Aguada de la Arena, Bajada de Añelo) y el norte (El Orejano y Pampa de la Yegua II) para una visualización completa de la estructura.

Pozos

En todo el bloque solo cuatro pozos han atravesado total o parcialmente la formación Vaca Muerta. En estos pozos se identificaron dos intervalos de roca con potencial generador, que fueron denominados Sección Enriquecida Inferior [SEI, de la base de U1 al tope de U3] y Superior [SES, Base de la unidad U5] (Figura 5). Ambos se caracterizan por 1) alto valor de rayos gamma, 2) baja impedancia acústica, 3) cruce de Passey (Passey *et al.*, 1990) (alto tiempo de tránsito y alta resistividad), y 4) valores altos de Carbono Orgánico Total (COT). En tres de ellos se encontraron evidencia de deformación de sedimento poco-consolidados (SSD), a varias escalas.

El Pozo 1 fue el primer pozo que atravesó parcialmente el MTD. Fue perforado a mediados de 1996, teniendo como objetivo exploratorio la posible presencia de cuerpos arenosos dentro de la sección inferior de la formación Vaca Muerta, interpretados como un abanico submarino formado durante un estadio de descenso relativo del nivel del mar, que habría generado un colapso gravitacional asociado al quiebre de plataforma. El pozo

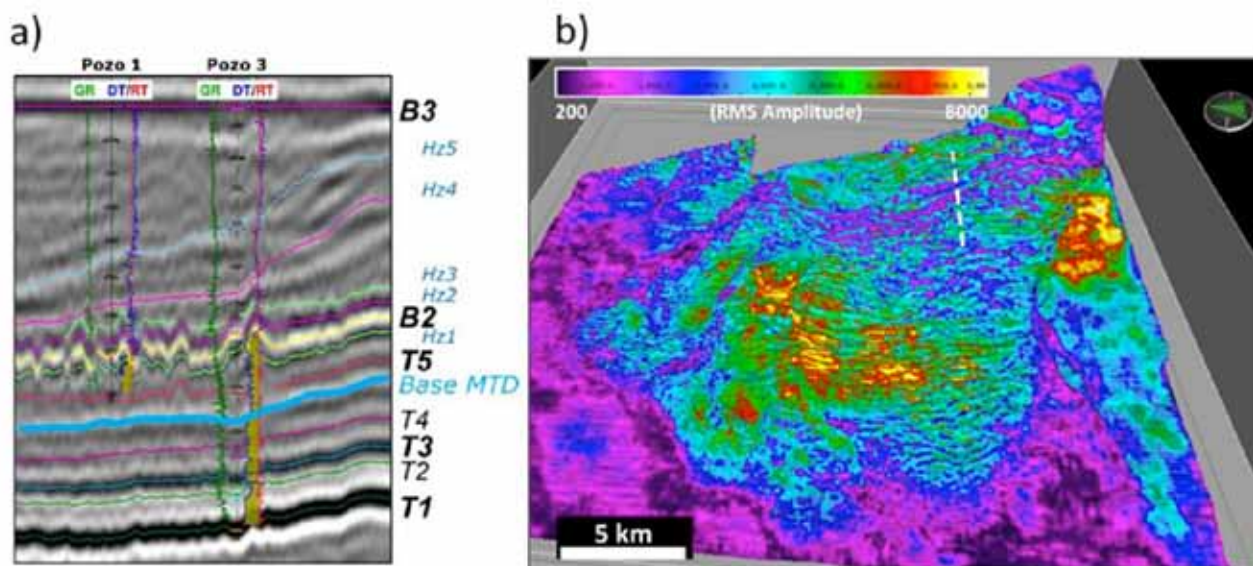


Figura 4. Mapeo de horizontes para la caracterización del MTD de Sierra Chata. a) Sección sísmica con los horizontes sísmicos mapeados (ubicación: línea punteada blanca en b). Además de los horizontes de referencia de la transecta regional de Vaca Muerta (Desjardins *et al.*, 2016), se mapearon horizontes intermedios (Base MTD, Hz1 a Hz5) para estudiar la evolución espacial del MTD. b) Vista 3D del MTD de Sierra Chata que muestra el horizonte B2 con un mapping de la amplitud RMS calculada con una ventana de 10 ms (+/- 5ms) alrededor de este.

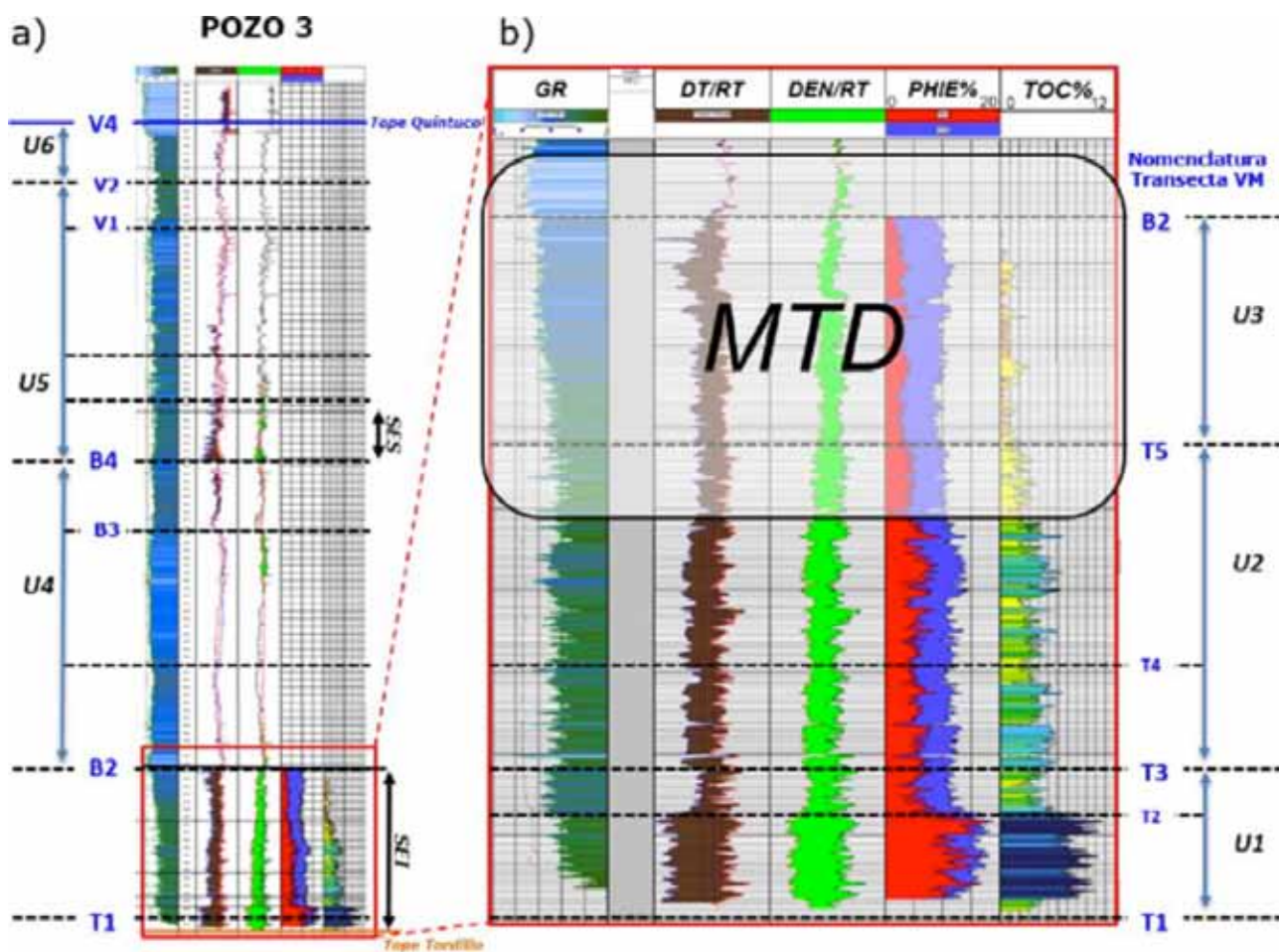


Figura 5. Subdivisión del sistema Vaca Muerta - Quintuco en la zona de Sierra Chata. a) Perfil tipo general del pozo 3. a) Detalle de la Sección Enriquecida Inferior (SEI). Se utiliza la nomenclatura de Desjardins *et al.* (2016) para los horizontes y unidades sísmo-estratigráficas. La columna sedimentaria afectada por el MTD de Sierra Chata está indicada por el recuadro negro.

ingresó unos 50 m dentro de la SEI de la FVM.

El Pozo 2 fue el primer pozo con objetivo *shale gas* de la formación Vaca Muerta. Se perforó en 2013 como pozo vertical y fue estimulado con siete fracturas hidráulicas. El mismo no llegó a perforar la sección basal de la formación Vaca Muerta (faltarían aproximadamente 90 m hasta la formación Tordillo) por inconvenientes operativos, principalmente inestabilidad durante la perforación. Por los mismos problemas, solo se pudieron sacar 11 m de corona de 72 m planificados, dentro la unidad U4 donde se observan evidencias de estructuras relacionadas a SSD.

El Pozo 3 fue perforado en 2019 como pozo piloto vertical del primer *pad*, cuyo objetivo es producir *shale gas* a partir de ramas horizontales a varios niveles de la SEI de la formación Vaca Muerta. Este pozo llegó a la base de la formación Vaca Muerta (Figura 5a). Posee un *set* completo de perfiles y se tomaron muestras de rocas. En esta zona, el pozo atravesó el MTD de Sierra Chata en su mayor expresión y abarca las unidades siguientes: Tope U2, la U3 completa y la base de U4 (Figura 5b). Desde este pozo se salió posteriormente con un *sidetrack* para realizar una rama horizontal de 2540 m, volviendo a perforar el intervalo afectado por el MTD en su parte de construcción de trayectoria para llegar al punto de aterrizaje (*landing point*).

Caracterización estructural

Un MTD corresponde a una estructura compleja con límites de diferentes naturalezas que definen distintos dominios estructurales con características muy contrastadas: dominios extensional, traslacional y compresional (Figura 6).

Dominio extensional

Es la zona de iniciación de la estructura en la parte superior del talud de la clinoforma donde se inicia el deslizamiento de los sedimentos hacia una parte más distal, en dirección al centro de cuenca. En el caso del MTD de Sierra Chata, la paleopendiente estimada del talud en la zona del MTD es de 3 a 4 grados. Esta zona de iniciación está caracterizada por escarpas, formadas por la conexión lateral de fallas normales lítricas (Figura 7). La escarpa principal (*headwall scar*) de orientación N30°E aproximadamente es continua a lo largo de la estructura y constituye el límite de la parte más proximal de la estructura (Figura 6). Cabe destacar que la orientación de las escarpas es paralela a la dirección de los quiebres de plataforma en la misma área (Figuras 2, B1 y B2). Existen estructuras aún más proximales a la escarpa principal que consiste en fallas normales incipientes (*crown cracks*,

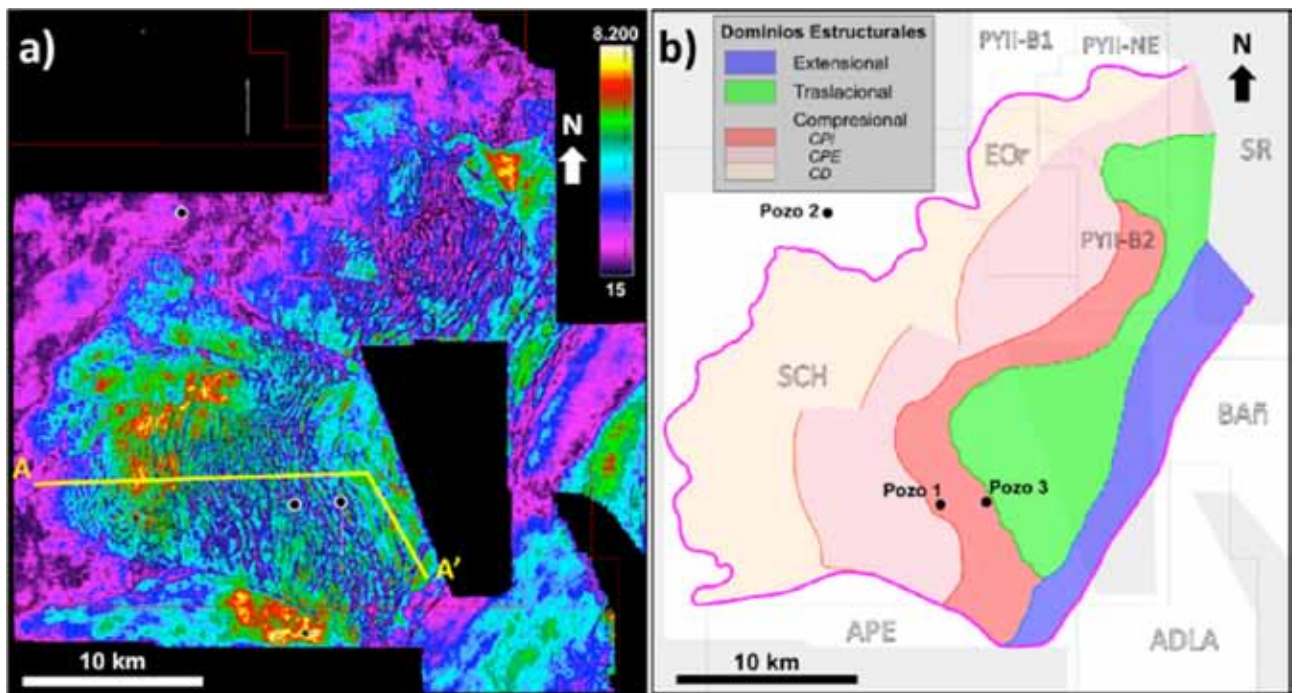


Figura 6. Extensión espacial del MTD de Sierra Chata y zonificación en dominios estructurales. a) Horizonte B2 - mapa compuesto de amplitud RMS (ventana de ± 10 ms) con FTLH realizado con la interpretación de varios cubos sísmicos y la ubicación de los pozos que atravesaron parcial o totalmente la formación Vaca Muerta. Línea amarilla A-A': corte sísmico general del MTD (ver figura 7). b) Interpretación y ubicación de los dominios extensional, traslacional y compresional (subdominios compresionales: CPI - proximal interna, CPE - proximal externa; CD: distal). Áreas: SCH (Sierra Chata), APE (Aguada Pichana Este), ADLA (Aguada de la Arena), BAñ (Bajada de Añelo), SR (San Roque), PYII-B2 (Pampa de la Yegua II - Bloque II), PYII-NE (Pampa de Yegua II Noreste), PYII-B1 (Pampa de la Yegua II, Bloque 1), EOr (El Orejano).

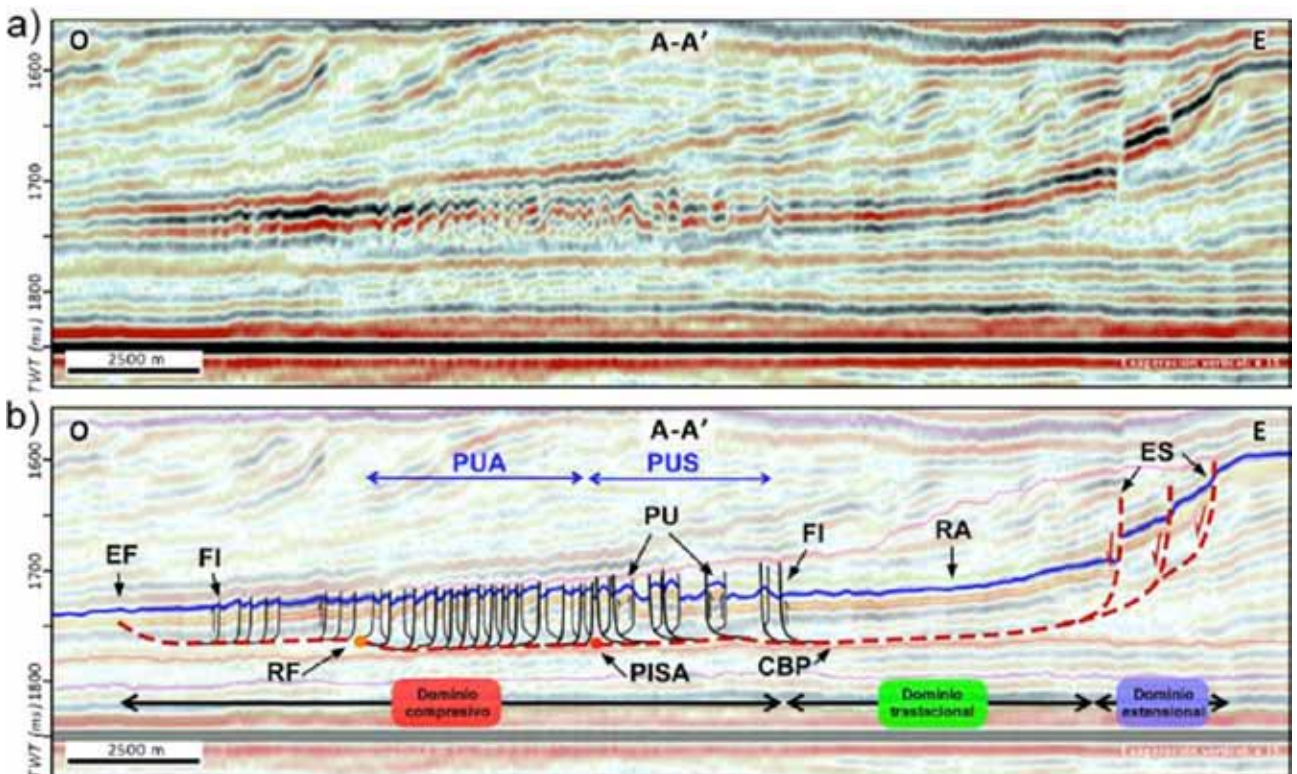


Figura 7. Corte sísmico A-A' general del MTD de Sierra Chata (ver figura 6 para ubicación). a) Corte sísmico horizontalizado al Tope de Tordillo, sin interpretar. Exageración vertical X15. b) Corte interpretado donde se destacan los dominios estructurales (extensional, traslacional y compresional) y las estructuras principales que los caracterizan: escarpas (ES), raft (RA), pop-ups (PU) y fallas inversas (FI), cizalla basal principal (CBP), rampa frontal (RF, punto naranja) y emergencia frontal (EF). Círculo rojo (PISA): punto de inflexión entre pop-ups sintéticos (PUS) y los antitéticos (PUA). Horizonte azul: B2.

ver figura 6, sur del área SR) que no llegaron a unificarse en una escarpa (se pueden observar algunas en la parte NE de la zona). Limitado al SE por la escarpa principal, el dominio extensional está conformado por una serie de escarpas secundarias a lo largo de una franja de 2 de 3 km de ancho. La unión del pie de las fallas normales listricas inician la cizalla basal principal (CBP) sobre la cual el sedimento desestabilizado se traslada y apila hacia el pie de la clinoforma. Cabe destacar que, en la parte sur, el dominio extensivo está directamente en contacto con el dominio compresivo (Figura 6b).

Dominio traslacional

Este dominio está caracterizado por bloques estructurales relativamente poco deformados (a escala sísmica) (Figura 7). Se comportan como bloques rígidos que se desplazan sobre la cizalla basal principal. Este dominio está más desarrollado en el área de Sierra Chata. Lamentablemente por la falta de sísmica 3D en el centro de la zona estudiada, una parte de su geometría se infiere. Así se puede asumir que el límite del dominio traslacional con el dominio extensional es bastante recto, de dirección N30°E. Sin embargo, su límite con el dominio compresional es bastante arqueado y convexo con su ápice hacia el NO (Figura 6). Con esta geometría, lo que parece

ser un único *raft* de grandes dimensiones (aprox. 9 x 13 km) y asimétrico actuó de indentador para las estructuras compresivas las cuales se moldean al borde del mismo. Esto se observa particularmente bien en la zona de los pozos 1 y 3 (Figura 8). El FTLH revela algunas fallas internas del *raft* de orientaciones similares al borde de la estructura (Figura 8 y 9-XS1). Más al NE, se observa otro *raft* de similar geometría, pero de dimensión más reducida al norte del área de Pampa de Yegua II- Bloque II (Figura 6). Entre estas dos estructuras, los *rafts*, de dirección general N30°E, son más alargados y el dominio traslacional se estrecha.

Dominio compresional

Este dominio es el más extenso arealmente. Se subdivide en subdominios compresional proximal (que a su vez se subdivide en proximal interno y externo) y distal en relación con el tipo de estructuras que los conforman (figuras 6 y 8).

El subdominio compresional proximal está caracterizado por la presencia de estructuras de tipo *pop-up* (Figura 7). Estos *pop-ups* son asimétricos y están formados por un conjunto de una falla inversa sintética (con buzamiento hacia el SO, en sentido opuesto a la dirección de deslizamiento del MTD) con una falla inversa antitética

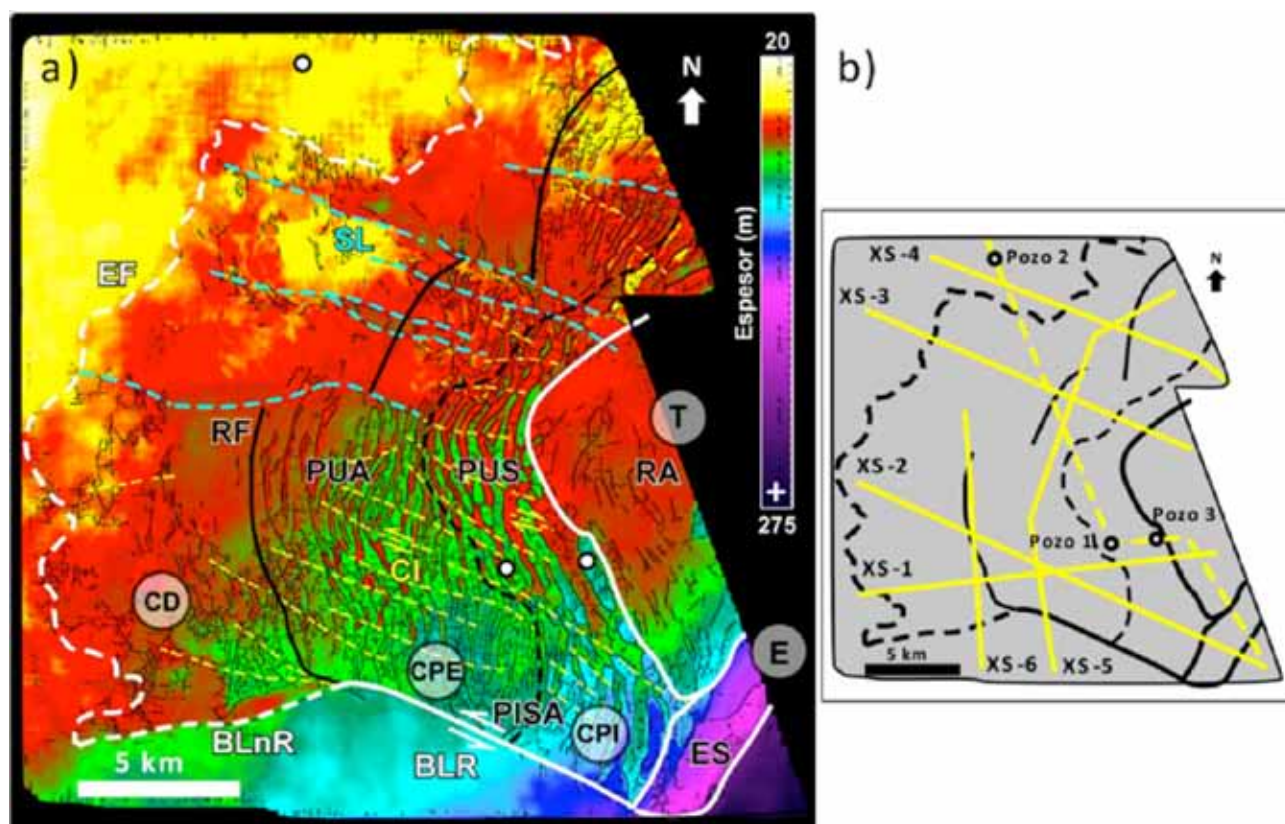


Figura 8. Detalle de las estructuras internas a cada dominio estructural. a) Mapa isopáquico entre la base del MTD (Cizalla Basal Principal) y el horizonte B2 (donde las estructuras tienen mayor expresión), con superposición del atributo estructural FTLH con un filtro de 0,08 para remover los artefactos (footprint, etc.). E: dominio extensional con las fallas normales listricas. T = dominio traslacional con el *raft* central arqueado hacia el centro de cuenca. CPE: subdominio compresional proximal interno. CPE: subdominio compresional proximal externo. CD: dominio compresional distal. ES: escarpas. RA: raft. PUS/PUA: pop-ups sintéticos y antitéticos. PISA: Punto de inflexión pop-ups sintéticos / antitéticos. RF: rampa frontal. EF: emergencia frontal. BLR: borde lateral restringido. BLnR: borde lateral no restringido. CI: Cizallas internas. SL: surcos lineales. Círculos negros: pozos. b) Mapa de ubicación de los cortes sísmicos de detalle. Líneas continuas negras: cortes sísmicos de detalle de las estructuras del MTD (XS-1 a XS-6). Línea negra punteada: corte sísmico NNO-SSE conectando los tres pozos presentados en este trabajo.

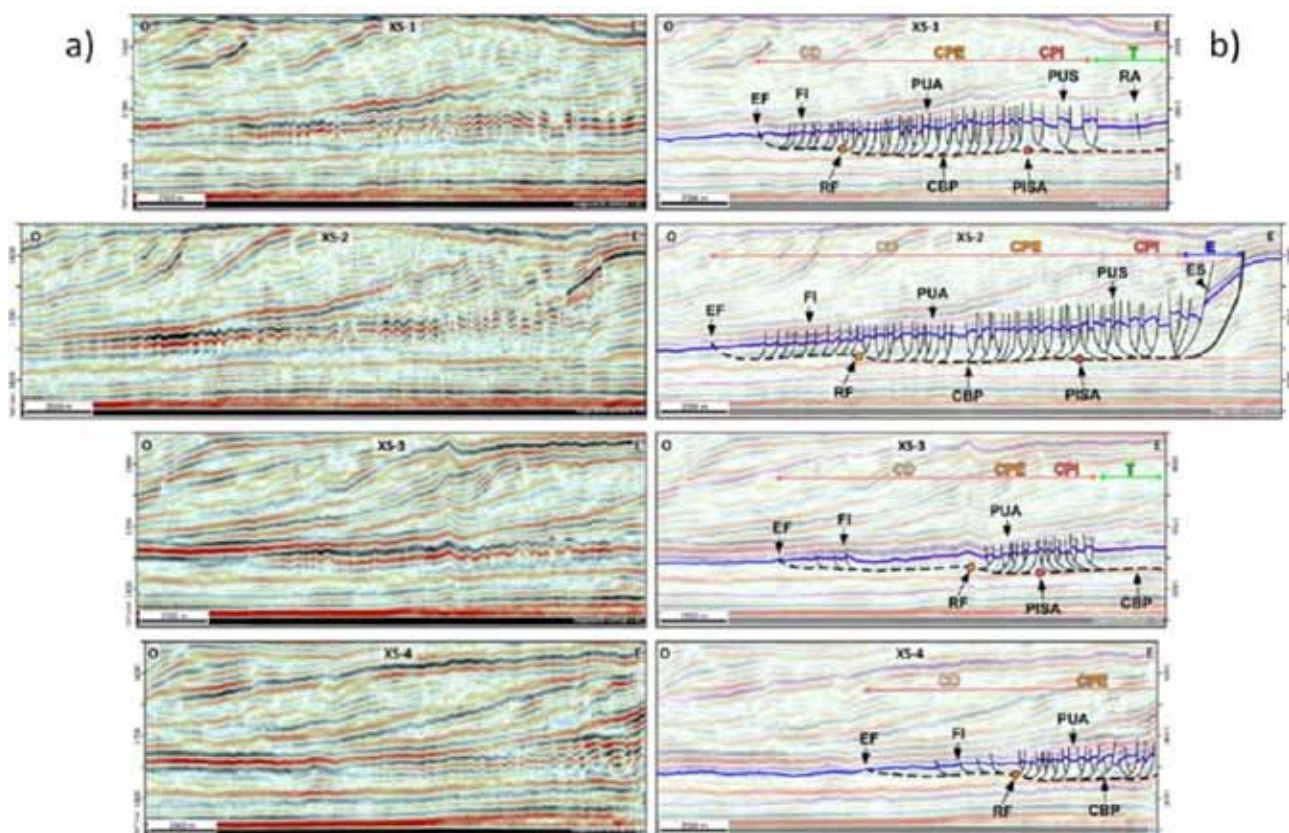


Figura 9. Cortes sísmicos de detalle E-O a lo largo del MTD de Sierra Chata (ver figura 8b para ubicación). a) Corte sísmico horizontalizado al Tope de Tordillo, sin interpretar. Exageración vertical X15). b) Corte interpretado donde se destacan las estructuras que caracterizan cada dominio y subdominio. Ver figura 8 para nomenclatura de los elementos estructurales.

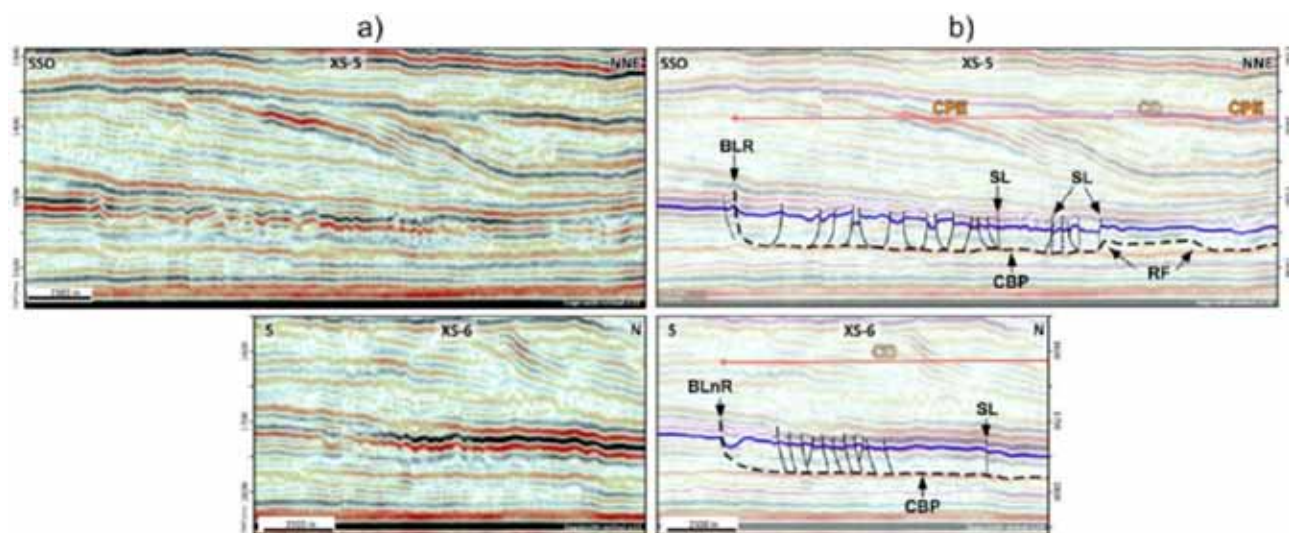


Figura 10. Cortes sísmicos de detalle N-S a lo largo del MTD de Sierra Chata (ver figura 8b para ubicación). a) Corte sísmico horizontalizado al Tope de Tordillo, sin interpretar. Exageración vertical X15). b) Corte interpretado donde se destacan las estructuras que caracterizan cada dominio y subdominio. Ver figura 8 para nomenclatura de los elementos estructurales.

(buzamiento hacia el NE). Se define el *pop-up* como sintético cuando la falla principal de la estructura es la falla inversa sintética y la vergencia de la estructura es hacia la parte distal del MTD, y el *pop-up* antitético cuando la falla principal es la antitética y la vergencia de la estructura es hacia la parte proximal del MTD. Se observa que el dominio compresional empieza exclusivamente

con los *pop-ups* sintéticos. Existe un punto de inflexión donde los *pop-ups* se convierten en la forma antitética hacia la parte distal (figuras 7 y 9). Así se discriminan los subdominios compresionales proximal interno (CPI) y externo (CPE) (figuras 6 y 8). Los *pop-ups* sintéticos suelen ser más grandes, tanto en altura (de 130 a 90 m) cómo en ancho (hasta 600 m) que los *pop-ups* antitéticos

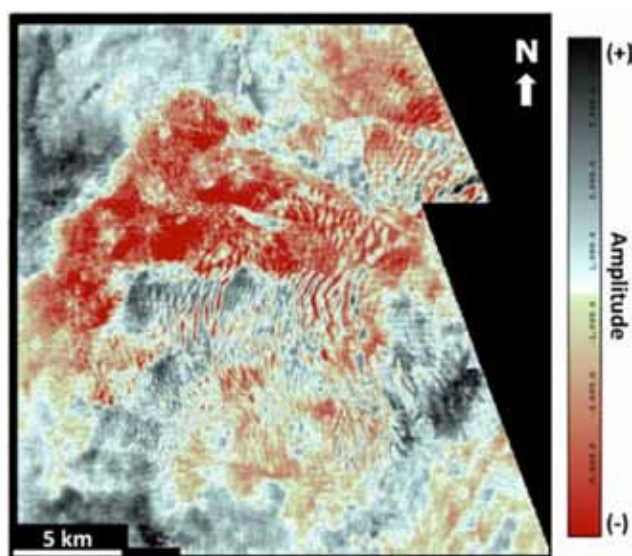


Figura 11. Horizon slice a +32 ms de la base del MTD. Los flujos de detritos se caracterizan por abanicos de amplitud más negativa.

(altura de 90 a 60 m y ancho hasta 250 m) (figuras 8 y 9). Se observa la misma diferencia de dimensiones entre las zonas *intrapop-ups* sintéticas y antitéticas. La dirección de los *pop-ups* varían de N10°E en el sur del MTD, de N160°E al nivel del ápice del *raft* sur a N30°E en la parte norte del área Sierra Chata (Figura 8). La longitud de los *pop-ups*, tanto sintéticos como antitéticos es altamente variable y depende del grado de segmentación de las fallas que los constituyen (Figura 8). Esta segmentación es debida a las numerosas zonas de cizalla internas (de dirección N115°E principalmente pero también N90°E) que afectan al subdominio compresional proximal, particularmente visible en el área de Sierra Chata (Figura 8). Estas cizallas internas al dominio compresional pueden mostrar un movimiento tanto dextral como sinistral, según cómo se van acomodando las diferentes estructuras del MTD.

El límite entre los subdominios compresional proximal y distal es materializado por la rampa frontal (*frontal ramp*). Esta rampa estructural se genera por un cambio de profundidad de la cizalla basal principal y forma una zona de confinamiento estructural sobre la cual las estructuras se apilan (figuras 7 y 9). Su mapeo muestra dos discontinuidades importantes en su continuidad lateral, define así tres zonas de sur a norte dentro del subdominio compresional proximal y marca variaciones bruscas en el ancho de esta (Figura 8).

Después de la rampa el MTD presenta menos espesor en el subdominio compresional distal. También se observa un cambio importante de estilo estructural donde las estructuras consisten principalmente en fallas inversas sintéticas y antitéticas, con un espaciado más amplio entre cada falla (figuras 7 y 9). El subdominio compresional distal, y por ende el MTD, se termina al nivel de la emergencia frontal (*frontal emergence*) donde la cizalla basal principal finaliza y corta estratigráficamente los estratos inferiores (figuras 7 y 9). Este límite es bastante irregular y se ve particularmente bien en el mapa

de amplitud RMS donde se observa la presencia al pie de la clinoforma de sedimentos con contenido calcáreo más importante (reflejado por amplitudes más altas) que proviene de la parte superior del talud de esta (Figura 6).

El dominio compresional también presenta surcos lineales (*linear grooves*) de dirección general N115°E que corresponden a cambios en la profundidad de la cizalla basal principal (que delinea un bloque alargado como se observa en las figuras 8 y 18-XS5). También están asociados a lo que se interpreta como flujos de detritos (*debris flow*) posteriores a la estructuración principal del MTD que se superpone y/o re trabajan los niveles subyacentes del MTD. Estos flujos de detritos se evidenciaron bastante bien con una serie de *horizon-slices* realizada a partir de la base del MTD (abanicos de amplitud más negativa, figura 11). En la figura 10-XS6, se observa una depresión contra el borde lateral del MTD que se puede interpretar como una canalización de un flujo de detrito posterior a la estructuración principal.

El límite lateral (*side scarp*) del MTD se observa con bastante claridad en el sur de la estructura (Figura 8) y se puede subdividir en dos partes. Una primera parte relativamente recta de dirección N115°E (perpendicular al sentido general de movimiento del MTD) es formada por un sistema de fallas transcurrentes (*lateral strike-slip fault*) con movimiento sinistral y constituye el borde lateral restringido sobre el cual las estructuras compresivas terminan en la parte proximal del dominio compresional. La segunda parte más distal, donde el límite se abre lateralmente (borde no-restringido o *lateral splay*), toma una dirección N70°E. Correlativamente, este cambio de dirección del borde de MTD corresponde a la presencia de la rampa frontal lateralmente (Figura 8). En los cortes sísmicos N-S, se observa cómo la cizalla basal principal se conecta sobre el borde lateral, el cual “encajona” el MTD (Figura 10).

Evidencias de MTD y *slumps* en pozos

En el área de Sierra Chata, tres pozos perforaron estructuras asociadas a MTD (Figura 12): (i) dos de estos vinculados al MTD principal de Sierra Chata de escala kilométrica (pozos 1 y 3), en la zona donde se encuentran los *pop-ups* más grandes de la megaestructura (Figura 8), el tercero (pozo 2) encontró estructuras de tamaño más reducido (centimétricas) en una unidad estratigráfica más joven.

Pozo 1

Fue perforado en el flanco oeste de un *pop-up*, atravesando la falla principal con vergencia sintética (regional) a la dirección de deslizamiento de los sedimentos (Figura 13). Este pozo registró admisiones parciales de fluido durante la perforación en el intervalo del MTD. Del análisis de los dos ensayos de producción que se hicieron en esta parte del pozo, se observan dos sistemas al menos con diferente permeabilidad que pueden estar asociados a sistemas de fracturas (alta K) y matriz aportando a las fisuras (baja K) o a intervalos con diferente permeabilidad aportando al pozo (U3 vs Base de U4).

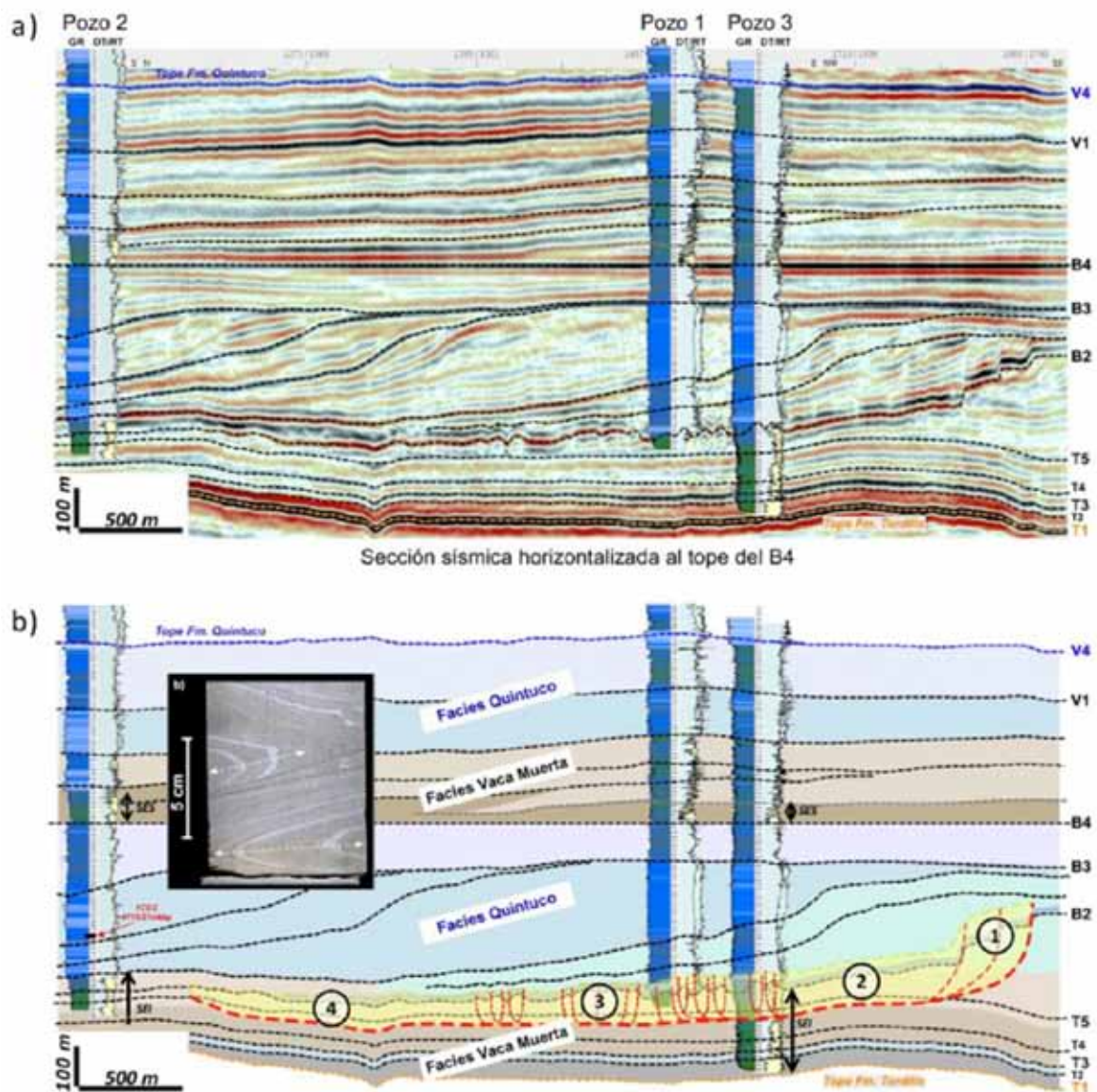


Figura 12: Sección NNO-SSE pasando por los pozos 1,2 y 3, donde se evidenciaron eventos de MTD/*Slump* (ver ubicación en figuras 6 y 8). A) Sección sísmica horizontalizada al tope del horizonte B4, con los diferentes horizontes interpretados y la información de 3 perfiles en los pozos (GR: Gamma Ray, DT: Sónico y RT: Resistividad. Nota: DT y RT son dispuesto para hacer una visualización tipo Passey). B) Sección interpretada destacando las estructuras vinculadas al MTD: (1) Escarpas, (2) *Raft*, (3) *Pop-ups*, (4) *Debris Flow*. Pozo 2: foto de estructuras centimétricas de tipo *slump* en el medio de la unidad U4.

Pozo 2

Este pozo fue perforado en una zona no afectada por el MTD principal. Sin embargo, estructuras centimétricas de tipo *slump* encontradas en una corona ubicada en el medio de la unidad U4 (Figura 12b) demuestra que estructuras asociadas a deformación de sedimentos poco consolidados (*soft-rock deformation*) ocurren en varios niveles de la columna sedimentaria de la formación Vaca Muerta en el área.

Pozo 3

Está perforado en el centro del *pop-up* más grande del MTD (Figura 13). Es el único pozo del bloque que através por completo el MTD. En su máxima expresión,

el MTD de Sierra Chata abarca las unidades siguientes: Tope U2, toda la U3 y la base de U4. Una imagen de pozo de tipo resistiva se adquirió en el pozo 3. Se interpretaron y caracterizaron sistemáticamente los *bedding* y fracturas. Estos se analizaron a través de curvas de frecuencia (Figura 14). En la figura 14a se puede observar que la frecuencia de *bedding* aumenta correlativamente con el aumento de GR/COT. Si bien la parte más calcárea de la sección superior de la formación Vaca Muerta presenta más fracturas que su base, se destaca un aumento notable de la frecuencia de fractura en la mitad superior del intervalo donde se desarrolla el MTD. La figura 14b muestra una ampliación del intervalo de MTD donde se correlaciona la frecuencia de fractura con la derivada primera y segunda de los buzamientos de *bedding* que se uti-

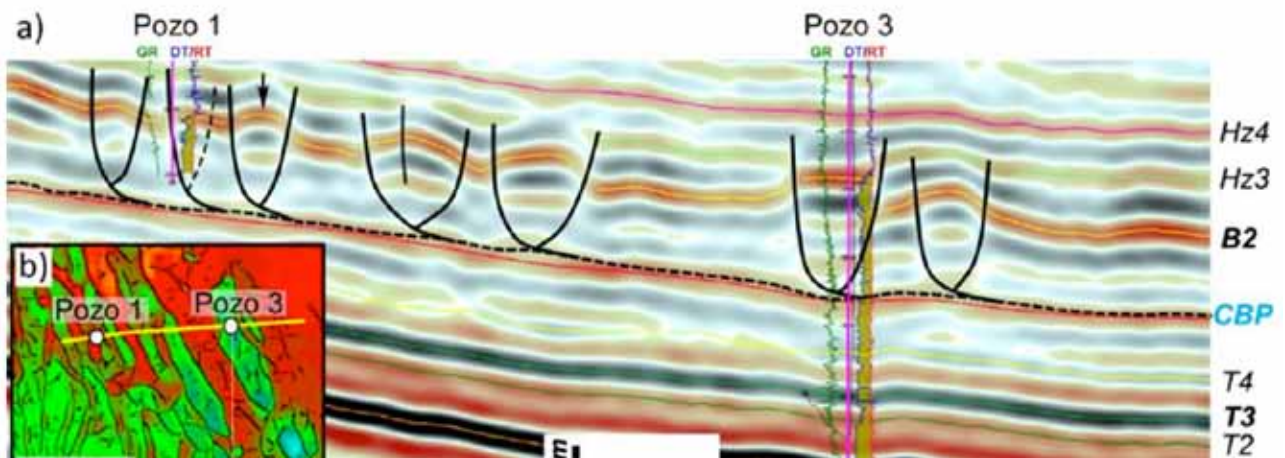


Figura 13. Detalle de los pozos 1 y 3 que perforaron el MTD. a) Sección sísmica E-O interpretada que muestra los pozos 1 y 3, respectivamente, perforado en el flanco oeste y el centro de un *pop-up*. Referencia de los horizontes en la figura 4). b) Mapa de ubicación de los pozos y del corte sísmico. (Nota: el buzamiento hacia el este de los horizontes observado en esta sección es debido al levantamiento del dorso del Chihuideo al oeste y no refleja la paleopendiente existente en los tiempos de depositación de la formación Vaca Muerta).

liza cómo detector de cambios bruscos de buzamiento de las capas, los cuales se relacionan con la estructuración y la deformación de estas. Las fracturas analizadas se discriminan en dos familias: NNE-SSO y NNO-SSE (Figura 14c). Esta última familia es típicamente la dirección de

las estructuras (*pop-ups*) de la sección atravesada por el pozo 3 (Figura 14d y Figura 9). También se destaca que la parte superior del *pop-up* presenta una deformación más frágil (debido a las fracturas inducidas por el plegamiento y el fallamiento) que la parte basal.

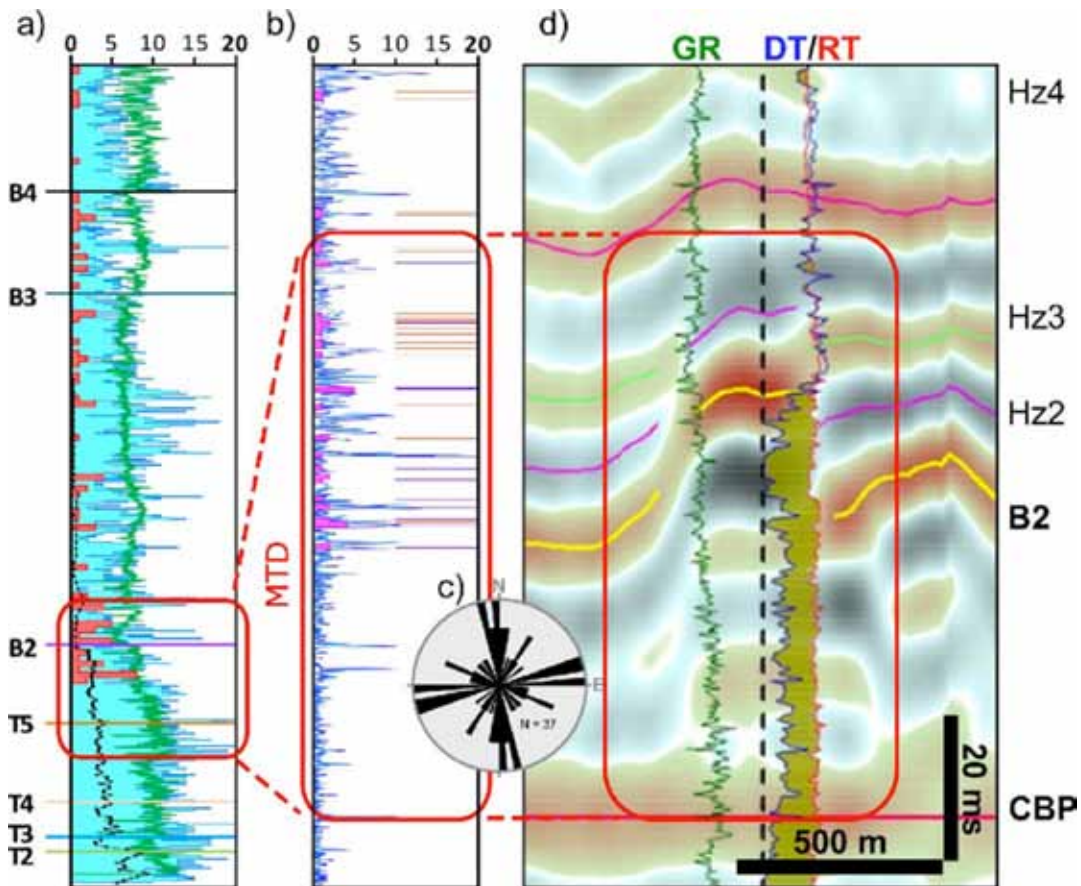


Figura 14. Análisis de la imagen resistiva del pozo 3 en la zona del MTD. a) Log 1: frecuencias, respectivamente, del bedding (curva azul, número de bedding x 5 m) y de fractura (curva roja, número de fractura x 1 m) a lo largo del pozo. Curva verde: Gamma Ray ($^{\circ}\text{API}/10$). Curva Negra: Contenido Orgánico Total (%). El recuadro rojo marca la zona donde se desarrolla el MTD. Log 2: detalle de la zona del MTD. Frecuencia de fractura (curva rosa: número de fractura x 1 m). Curvas azul claro y oscuro: derivada primera y segunda del buzamiento de las capas. Sticks: fracturas con buzamientos $>45^{\circ}$ (naranja) y $<45^{\circ}$ (violeta). c) Diagrama de rosa de las fracturas interpretadas en el intervalo del MTD. d) Corte sísmico E-O de detalle centralizado en el pozo 3 para el intervalo del MTD.

Análisis de riesgos

Los antecedentes de perforación de los pozos que atravesaron la estructura tipo MTD de Sierra Chata mostraron que los pozos perforados en la zona más estructurada del MTD (subdominio compresional proximal interno, figuras 6 y 8) encontraron problemas de influjos, que en el caso del pozo 1 provocó la detención de la perforación y en el caso del pozo 3 la colocación de una cañería adicional (contingencia) para cubrir la zona afectada por el MTD para poder seguir la perforación del *sidetrack* y llegar con seguridad al tramo horizontal de este pozo (Figura 13).

En el pozo 1, al perforar la sección superior del MTD, se registraron admisiones parciales lo que obligó a bombear material obturante y disminuir la densidad del lodo de perforación (de 2030 a 1965 g/l). Al mismo tiempo se detectaron altas lecturas de gas (430.000 ppm) con presencia y quema de gas en superficie, por lo que se decidió dar por finalizada la perforación a esa profundidad. Esta última sección del pozo fue evaluada con un ensayo a pozo abierto (DST) y posteriormente con un ensayo de terminación, que confirmó la presencia de gas combustible, pero que mostró condiciones de muy baja permeabilidad de reservorio. La litología descrita a partir de los recortes de perforación menciona porcentajes variables de areniscas y calizas. En ocasiones se describe porosidad por fracturas.

En el pozo 3, el pozo piloto atravesó el intervalo del MTD de la formación Vaca Muerta con una densidad de lodo de 1880 gr/l (ECD de 2030 g/l) sin registrar ningún evento de perforación. El *sidetrack* fue perforado con una densidad de lodo 50 g/l superior a la del pozo piloto (1930 g/l; ECD:2100 g/l) en la parte de construcción de la trayectoria para mejorar las condiciones de perforación en la última parte de la rama horizontal. Al ingresar en la sección del MTD, se registraron admisiones parcia-

les en el tope del intervalo del MTD (donde la imagen de pozo del piloto mostró un incremento sustancial de la densidad de fractura), lo que obligó a aislar esta sección con una cañería intermedia de contingencia para perforar la rama horizontal en condiciones seguras. Si bien se puede remediar el riesgo de influjos en el intervalo del MTD con una tubería adicional, eso encarece significativamente el costo de perforación de los pozos en zona de alta deformación.

Para poder visualizar el riesgo asociado al MTD en el área de Sierra Chata, se elaboró un mapa de riesgo cualitativo utilizando los tipos y dimensiones de estructuras en cada dominio para estimar la intensidad de la deformación generada por las mismas (Figura 15). Se integraron todos los elementos de la caracterización estructural y se subdividió el dominio compresivo en zonas para representar las variaciones laterales observadas de sur a norte.

Así se destaca que la zona que presenta el riesgo más alto es el subdominio compresional proximal de la zona A, al suroeste del *raft* principal. Para minimizar el riesgo en esta zona de alta deformación, se propone atravesar el MTD en la parte inter-*pop-ups* donde se estima que la deformación debería ser menor y el MTD menos espeso (Figura 13), al desviar ligeramente el pozo en la fase de construcción de la curva, antes de posicionarse para el aterrizaje del pozo para la realización de la rama horizontal. Esta estrategia está actualmente en fase de prueba.

Discusión

Límites de los dominios de deformación

Si bien el borde lateral sur del MTD de Sierra Chata se define muy bien con los datos de la sísmica 3D (en particular el *Fault Thin Likelihood* - FTLH), algunos de sus límites son más complicados de definir. El límite de la

a)

Dominio	Zona	Subdominio	Estructuras	Deformación	Riesgos Op.
Extensional			Zona de escarpa	mediana	poco probable
Traslacional			Raft	mediana a baja	poco probable
Compresional	A	Int. Prox.	Pop-up grandes	alta	muy probable
Compresional	A	Int. Dist.	Pop-ups	mediana a alta	muy probable
Compresional	A	Ext.	Debris flow	mediana a baja	poco probable
Compresional	B	Int.	Pop-ups	mediana	probable
Compresional	B	Ext.	Debris flow	mediana-baja	poco probable
Compresional	C	Int.	Pop-ups	mediana	probable
Compresional	C	Ext.	Debris flow	baja	muy poco probable
Compresional	D		Debris flow	mediana a baja	muy poco probable

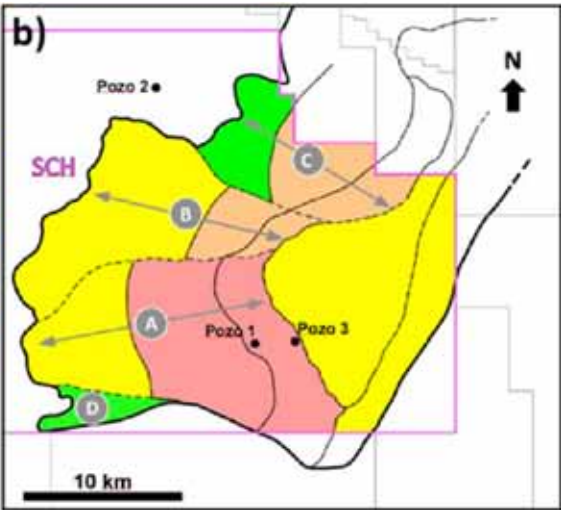


Figura 15. Mapa de riesgo operacional considerando la intensidad y el estilo de la deformación asociada al MTD de Sierra Chata. a) Matriz de evaluación. b) Mapa de riesgos operativos asociados al MTD.

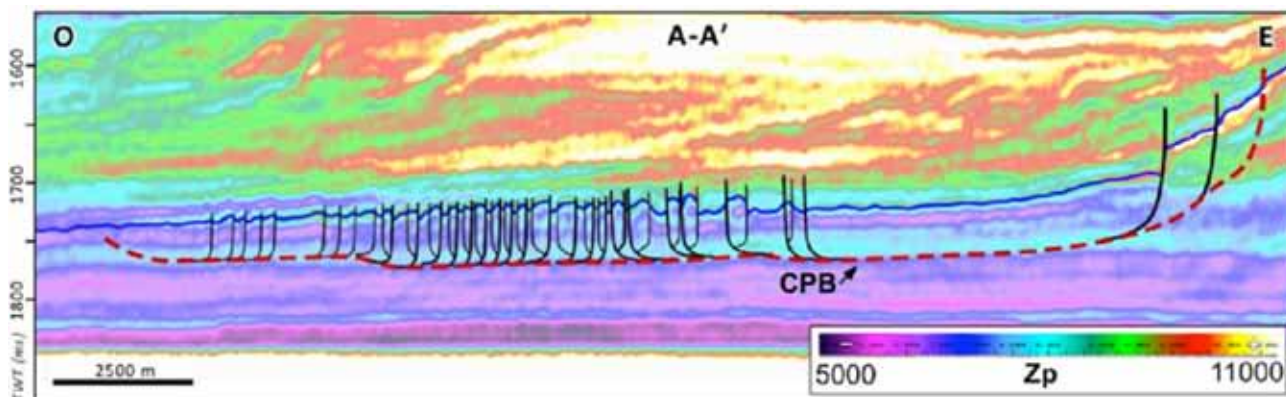


Figura 16. Relación entre la posición de la cizalla basal principal y la litología. a) Sección sísmica A-A' con Impedancia Z_p , horizontalizada a la base de la formación Vaca Muerta.

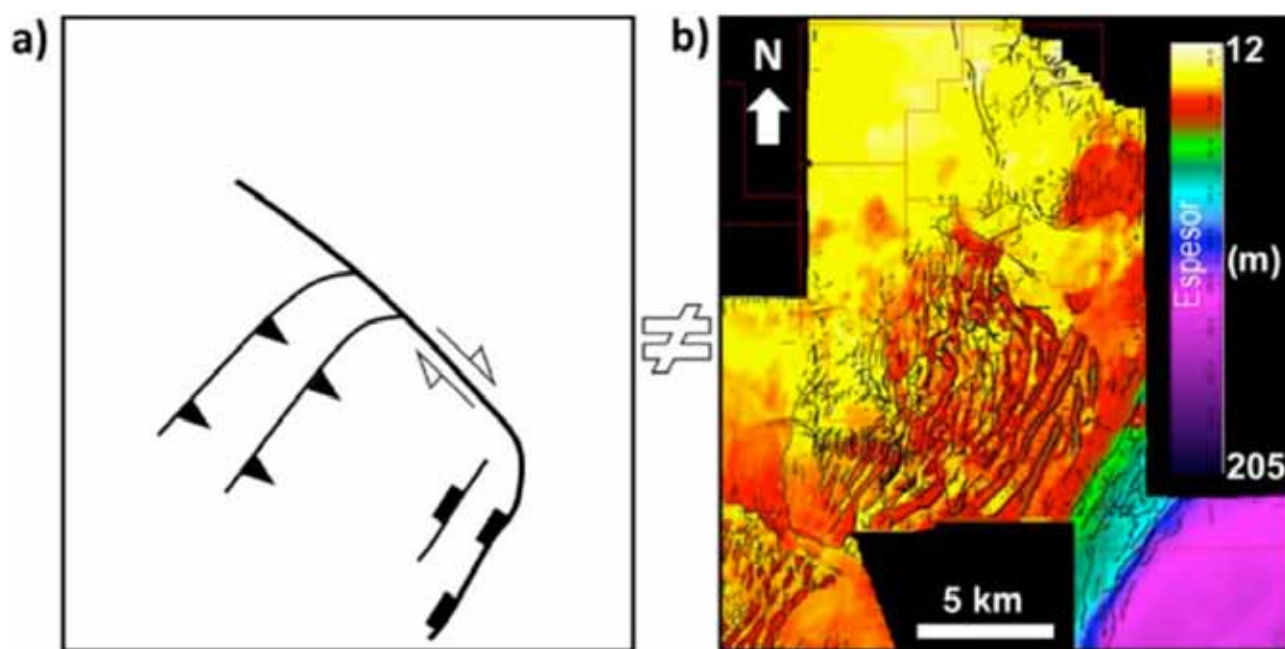


Figura 17. En búsqueda del borde lateral norte. a) Ilustración conceptual del borde lateral norte con sus características estructurales. Adaptado de Alsop y Marco (2011) y Nugraha *et al.* (2020). b) Mapa isopáquico y FTLH del raft al norte del MTD que muestra estructuras tipo pop-up arqueadas en sentido inverso al modelo conceptual presentado en a).

emergencia frontal donde termina el MTD se puede interpretar bastante bien con la combinación de los mapas de espesor, de FTLH y de amplitud RMS. En relación con la cizalla basal principal, su profundidad es más sensible de ubicar solamente con el análisis estructural de la sísmica 3D. Sin embargo, se utilizó un argumento adicional con los resultados de una inversión acústica realizada en el cubo sísmico reprocesado de Sierra Chata. En la figura 16, se puede visualizar claramente que el MTD con facies de rampa se desarrolla sobre la sección basal de la formación Vaca Muerta más orgánica y que la cizalla basal principal se ubica en la interfase. Esta transición entre el MTD y su substrato también es marcada en el pozo 3 por una deflexión del perfil sónico a la base del MTD (Figura 6).

Para intentar definir el borde lateral norte, se completó la interpretación de la sísmica 3D de Sierra Chata

con sísmica 3D adicionales al noreste (Figura 17). Inicialmente se interpretaba el límite del borde lateral norte del MTD al sur de lo que ahora se interpreta como otro *raft* con forma triangular, similar al principal ubicado en el área de Sierra Chata. Esta interpretación final se fundamenta en la geometría de estructuras tipo *pop-ups*. En caso de que fuera el borde lateral norte, estas estructuras mostrarían la geometría arqueada de los pliegues orientados pendiente abajo, impuesta por el cizallamiento diferencial en los bordes laterales de la estructura MTD limitados lateralmente por fallas transcurrentes (Alsop y Marco, 2011). Sin embargo, se observa que los *pop-ups* se arquean y se amoldan en sentido opuesto sobre la zona no deformada, de una manera muy similar a los *pop-ups* al sur del *raft* principal, ubicado en el sur del MTD. Por esta razón se interpreta que el borde lateral norte debe estar aún más al norte de la zona mapeada.

También los límites de los diferentes dominios que estructuran el MTD están sujetos a interpretación. Por ejemplo, Reijenstein *et al.* (2020) presenta un esquema del MTD de Sierra Chata con una zona extensional compuesta de *rafts* (dominio traslacional) mucho más amplia, principalmente en el sur del MTD, que interpreta como *rafts* las estructuras del dominio compresional proximal interno. En este trabajo se demuestra que estas estructuras corresponden a *pop-ups* alargados, tanto con datos de sísmica 3D (Figuras 8 y 16) como de pozo (Figura 14). De ser *rafts*, estas estructuras no podrían ser más espesas que el *raft* principal y no mostrarían un aumento de la fracturación en el ápice de la estructura. Cabe destacar que la dirección principal de las estructuras, ya sean extensivas (fallas normales) o las fallas inversas formando los *pop-ups*, es aproximadamente N30°E. En las zonas donde existe un *raft* de geometría triangular, este parece haber actuado de elemento punzante y las estructuras compresivas se amoldan a su geometría frontal curva.

Las estructuras más significativas del dominio compresional proximal son las estructuras de tipo *pop-ups*. Aunque generalmente la nomenclatura estructural reserva el nombre de *pop-ups* a estructuras vinculadas al estilo transcurrente, estas estructuras del MTD compuestas de un par de fallas inversas con un buzamiento muy pronunciado pero opuesto (sintético y antitético) se asemejan a *pop-ups* cuando se ven en corte. En oposición con los *pop-ups* “transpresivos”, los *pop-ups* del MTD presentan una extensión lateral generalmente bastante grande y algunos pueden llegar a tener una relación de aspecto (longitud *versus* ancho) de hasta 22 (Figura 8). Este tipo de *pop-ups* compresivos ya fueron descritos en relación con los MTD, generalmente asociados a un confinamiento frontal importante generados por una rampa frontal muy pronunciada (por ejemplo, Gafeira *et al.*, 2007; Bull *et al.*, 2009; Nugraha *et al.*, 2020). Eso resalta la importancia del mapeo de la rampa frontal en el mapa de riesgo (Figura 15).

Internamente el subdominio compresional proximal muestra una subdivisión areal clara entre *pop-ups* sintéticos y antitéticos (límite PISA, Figura 8). Se interpreta la formación de los *pop-ups* sintéticos como la expresión de la deformación compresiva en la zona de acumulación sin tener una zona de confinamiento importante. Por otro lado, los *pop-ups* antitéticos serían el resultado del confinamiento estructural debido a la presencia de la rampa frontal.

Las fallas inversas del subdominio compresional distal han sido interpretadas como sintéticas en la parte norte del MTD (ver figuras 9-XS-3 y XS4) y como antitéticas en la parte sur (ver figuras 9, XS-1 y XS-2). Esta interpretación se fundamenta principalmente en la orientación de los pliegues asociados a estas estructuras. Sin embargo, se reconoce que estas estructuras en el subdominio compresional distal están al límite de la resolución de la sísmica 3D de Sierra Chata. Esta interpretación podría ser modificada con datos sísmicos de mejor resolución.

Dimensiones del MTD

Si bien no se puede tener una medición completa del ancho del MTD por no tener la ubicación precisa del borde lateral norte, se conoce una medición del área mínima donde se desarrolla la mega-estructura: 600 km². En relación con la longitud, el mapeo muestra que el valor máximo está en el sur de la estructura, en la zona C (Figura 6): 24 km desde el borde de la escarpa inicial (borde exterior del dominio extensional) hasta la emergencia frontal que define el borde exterior del dominio compresional. El gráfico de la figura 18 ubica el MTD de Sierra Chata dentro la nube de puntos correspondiendo a 329 MTD medidos en diferentes partes del mundo, en diferentes contextos tectónicos y sedimentarios (Moscardelli y Woods, 2015; Gamboa *et al.*, 2020). Es remarcable la correlación obtenida entre área y longitud para todos estos MTD, por presentar un valor de 0,90 para el R². Se utiliza este resultado como una prueba de robustez y coherencia de la interpretación presentada en este trabajo.

Mecanismo disparador

Moscardelli y Woods (2015) utilizan la morfometría de los MTD para discriminar dos grandes categorías de MTD según su mecanismo disparador: (1) los *detached* MTD, controlados por inestabilidades gravitacionales localizadas (por ejemplo, inestabilidad de la parte alta del talud) y (ii) los *attached* MTD, controlados por procesos extracuencales (por ejemplo, terremotos y tectonismo) (Figura 18). Según este tipo de análisis el MTD de Sierra Chata sería originado por un proceso extracuenal. Chilet *et al.* (2011) interpreta que la deformación de sedimentos no-consolidados observadas en las microbitas de la base de la formación Vaca Muerta fue inicia-

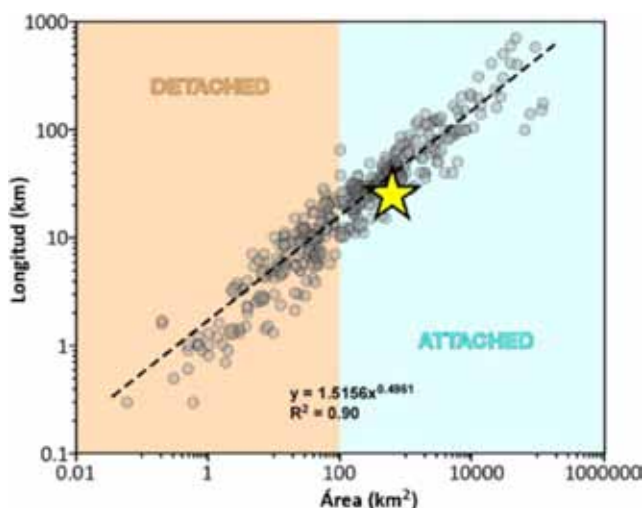


Figura 18. Dimensiones del MTD de Sierra Chata (estrella amarilla) en relación con otros MTD descritos en la literatura. Gráfico área versus longitud: círculos grises: datos de MTD de Moscardelli y Wood (2015) y de Gamboa *et al.* (2020). Áreas: dominios de ocurrencia de los *detached* MTD (naranja) y de los *attached* MTD (azul).

da por medio de terremotos. Si bien los afloramientos de la formación Vaca Muerta analizados por Chilevert *et al.* (2011) están ubicados en el extremo norte de la cuenca Neuquina, en la provincia de Mendoza, estructuras similares en tamaño y estilo fueron observadas en la misma posición estratigráfica (base de la formación, figura 3-foto 1) en el afloramiento de Mallín Quemado Norte (Sierra de la Vaca Muerta) ubicado al sur del MTD de Sierra Chata (Figura 2). Por otro lado, Reijenstein *et al.* (2020) menciona que el principal mecanismo involucrado en la generación de las estructuras de tipo *slump* en el subsuelo parece estar relacionado a flujos densos gravitacionales y a la sobrecarga de sedimentos, ya que ocurren principalmente dentro los *foresets* y *bottomsets* presentes en las zonas de talud de las clinoformas. En los afloramientos las estructuras más parecidas al MTD de Sierra Chata se observan en el Miembro Huncal, en la parte superior de la formación Vaca Muerta (Leanza *et al.*, 2003) (Figura 3). La interpretación genética de estas estructuras de tipo *slump* de escala decamétricas observadas en el Miembro Huncal varían según los autores: actividad sísmica según Spalletti *et al.* (2008). desestabilización del talud de la plataforma como consecuencia de las variaciones relativas del nivel del mar para Kietzmann y Vennari (2013). Siguiendo la metodología en tres fases propuesta por Owen *et al.* (2011) para identificar los mecanismos disparadores de las deformaciones de sedimentos poco consolidados, se infiere por los tipos de facies encontrados dentro del MTD, su posición estratigráfica dentro el sistema de clinoformas, las paleopendientes de los taludes que indican alta tasa de sedimentación, la actividad tectónica y volcánica de la cuenca durante la deposición de la formación Vaca Muerta, que el MTD se generó probablemente por una combinación de mecanismos disparadores endógenos (inestabilidad de los sedimentos en el talud) y exógenos (terremotos).

Conclusiones

Se definieron dominios estructurales dentro de la megaestructura de *mass-transport deposits* (MTD) de Sierra Chata en relación con sus características principales: (i) un dominio extensional afectado por fallas normales lítricas que se conectan entre ellas para formar escarpas; (ii) un dominio traslacional es caracterizado por estructuras de tipo *raft* y presenta geometría triangular en el sur y el norte del MTD; y (iii) un dominio compresional presenta una variedad de estructuras compresivas, como *pop-ups* asimétricos sintéticos y antitéticos (que depende de la vergencia de la estructura) y fallas inversas. Por presentar arealmente diferencias estructurales notables, el dominio compresivo fue subdividido en distal (fallas inversas antitéticas) y proximal (*pop-ups*), separado por la presencia de una rampa frontal. Este último también fue subdividido en interno y externo por presentar *pop-ups* sintéticos y antitéticos, respectivamente. Se caracteriza-

ron los rasgos estructurales de cada subdominio.

Para cada dominio, subdominio y zona, se midieron espesor, áreas y longitud. Se estimaron los riesgos operacionales asociados al MTD en el área de Sierra Chata para los proyectos *shale* con objetivos en la sección Enriquecida inferior de la formación Vaca Muerta: (i) los subdominios compresionales proximales presentan el riesgo operacional más grande por ser los más deformados; (ii) los dominios extensional y traslacional presentan un riesgo operacional moderado por presencia de fallas, al igual que los subdominios compresionales distales centrales; y (iii) los subdominios compresionales distales laterales presentan un riesgo muy reducido.

Se interpreta que la estructura de tipo MTD de Sierra Chata sería originada por una combinación de mecanismos disparadores endógenos (inestabilidad de los sedimentos en el talud) y exógenos (terremotos).

Agradecimientos

Agradecemos a las autoridades de Pampa Energía S.A. y Mobil Argentina S.A. por permitir la publicación de este trabajo. A los revisores Ricardo Fabián Domínguez y Walter Brinkworth quienes permitieron mejorar sustancialmente la calidad de este manuscrito.

Referencias bibliográficas

- Alsop, G. I., & S. Marco. (2011). Soft-sediment deformation within seismogenic slumps of the Dead Sea Basin: *Journal of Structural Geology*, 33(4), 433-457.
- Alsop, G. I. y Marco, S. (2012). Tsunami and seiche-triggered deformation within offshore sediments. *Sedimentary Geology*, 261-262, 90-107. doi:10.1016/j.sedgeo.2012.03.013
- Alsop, G. I., Marco, S., Weinberger, R., Levi, T. (2016). Sedimentary and structural controls on seismogenic *slumping* within mass transport deposits from the Dead Sea Basin. *Sedimentary Geology*, 344, 71-90. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sedgeo.2016.02.019>
- Alsop, G. I., Marco, S., Levi, T., Weinberger, R. (2017). Fold and thrust systems in Mass Transport Deposits. *Journal of Structural Geology*, 94, 98-115.
- Alves, T. M. y Gamboa D. (2020). Mass-Transport Deposits as Markers of Local Tectonism in Extensional Basins. En Ogata, K., Festa, A., Pini, G. A. (eds.). *Submarine Landslides: Subaqueous Mass Transport Deposits from Outcrops to Seismic Profiles, Geophysical Monograph*, 246, 71-90.
- Armandita, C., Morley, C. K., Rowell, P. (2015). Origin, structural geometry, and development of a giant coherent slide: The South Makassar Strait mass transport complex. *Geosphere*, 11, 2, 376-403, doi:10.1130/GES01077.1
- Arregui, C. (2014, 3-7 November). Ciclos depositacionales de las Fms Quintuco y Vaca Muerta: génesis y evolución. Área central - Cuenca Neuquina. 9° Congreso

- de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos, Trabajos Técnicos II: IAPG, Mendoza, Argentina.
- Bhatnagar, P., Verma, S., Bianco, R. (2019). Characterization of mass transport deposits using seismic attributes: Upper Leonard Formation, Permian Basin. *Interpretation*, 7, 4, 1-14. [http:// dx.doi.org/10.1190/INT-2019-0036.1](http://dx.doi.org/10.1190/INT-2019-0036.1)
- Benvenuti, A., Kombrink, H., ten Veen, J.H., Munsterman, D.K., Bardi, F. y Benvenuti, M. (2012). Late Cenozoic shelf delta development and Mass Transport Deposits in the Dutch offshore area - results of 3D seismic interpretation. *Geologie en Mijnbouw*, 91, 4, 591-608.
- Bull, S., Cartwright, J. y Huuse, M. (2009). A review of kinematic indicators from mass-transport complexes using 3D seismic data. *Marine and Petroleum Geology*, 26, 1132-1151.
- Cardona, S., Wood, L. J., Dugan, B., Jobe, Z., Strachan, L. J. (2019). Characterization of the Rapanui mass-transport deposit and the basal shear zone: Mount Messenger Formation, Taranaki Basin, New Zealand. *Sedimentology*, 67, 2111-2148. doi: 10.1111/sed.12697
- Desjardins, P., Fantín, M., González Tomassini, F., Reijenstein, H., Sattler, F., Domínguez, F., Kietzmann, D., Leanza, H., Bande, A., Benoit, S., Borgnia, M., Vittore, F., Simo, T. y Minisini, D. (2016). Estratigrafía Sísmica Regional. En G. González, Vallejo, M. D., Kietzmann, D., Marchal, D., Desjardins, P., González Tomassini, F., Gómez Rivarola, L. y Domínguez, R.F. (eds.). *Transecta Regional de la Formación Vaca Muerta. Integración de sísmica, registros de pozos, coronas y afloramientos. Publicación especial del Instituto Argentino del Petróleo y del Gas (IAPG)*.
- Domínguez, R. F., Reijenstein, H.M., Köhler, G., Sattler, F., y Borgnia, M. (2017, 7-11 August). Distribución regional de quiebres de clinoformas del Sistema Vaca Muerta Quintuco: 20° Congreso Geológico Argentino, San Miguel de Tucumán, Argentina.
- Farrell, S. G. y Eaton, S. (1988). Foliations developed during slump deformation of Miocene marine sediments, Cyprus. *Journal of Structural Geology*, 10, 6, 567-576.
- Gafeira, J., Bulat, J. y Evans, D. (2007). The southern flank of the Storegga Slide: imaging and geomorphological analysis using 3D seismic. En Lykousis, V., Sakellariou, D. y Locat, J. (eds.). *Submarine Mass Movements and Their Consequences*, 3 International Symposium, Springer, 57-65.
- Galloway, W. E. y D. K. Hobday. (1996). Terrigenous clastic depositional systems. Applications to fossil fuel and groundwater resources, 2nd ed., Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 489. DOI: 10.1007/978-3-642-61018-9.
- Gamboa, D., Alves, T., Cartwright, J., Terrinha, P. (2010). MTD distribution on a 'passive' continental margin: The Espírito Santo Basin (SE Brazil) during the Palaeogene. *Marine and Petroleum Geology*, 27, 1311-1324.
- Gamboa, D., Alves, T. M. y Omosanya, K. O. (2020). Style and Morphometry of Mass-Transport Deposits Across the Espírito Santo Basin (Offshore SE Brazil). En Ogata, K., Festa, A., Pini, G. A. (eds), *Submarine Landslides: Subaqueous Mass Transport Deposits from Outcrops to Seismic Profiles, Geophysical Monograph* 246, 227-246.
- Ganguí, A. y Grausem, M. (2014, 3-7 November). Tectonismo y estilos estructurales en el Engolfamiento Neuquino: implicancias en la interpretación de las fracturas monitoreadas por microsísmica en la formación Vaca Muerta. En Galeazzi, S., González, G., San-tiago, M., García, D., Maschio, L., González, R. y Ramírez Martínez, J. (eds.). *Simposio de Recursos No Convencionales: 9° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos: IAPG, Mendoza, Argentina*.
- González, M., Vallejo, D., Kietzmann, D., Marchal, D., Desjardins, P., González Tomassini, F., Gómez Rivarola, L., y Domínguez, R.F. (eds.). (2016). *Transecta Regional de la Formación Vaca Muerta. Integración de sísmica, registros de pozos, coronas y afloramientos. Publicación especial del Instituto Argentino del Petróleo y del Gas (IAPG)*.
- Harris, R., Bracken, K., Miller, B., Angelovich, S. y O'Toole, T. (2019). Subseismic Fault Identification Using the Fault Likelihood Attribute: Application to Geosteering in the DJ Basin. *Unconventional Resources Technology Conference (URTeC)*, Denver, Colorado, USA. DOI 10.15530/urtec-2019-602
- Kietzmann, D. A. y Vennari, V. V. (2013). Sedimentología y estratigrafía de la Formación Vaca Muerta (Tithoniano-Berriasiano) en el área del Cerro Domuyo, norte de Neuquén, Argentina, *Andean Geology*, 40, 1, 41-65.
- Kneller, B., Dykstra M., Fairweather L., y Milana, J.P. (2016). Mass-transport and slope accommodation: Implications for turbidite sandstone reservoirs. *AAPG Bulletin*, 100, 2, 215-235.
- Le Friant, A., Lebas, E., Brunet, M., Lafuerza, S., Hornbach, M., Coussens, M., Watt, S., Cassidy, M., Talling, P. J. & IODP 340 Expedition Science Party. (2020). En Ogata K., Festa, A., Pini, G. A. (eds.). *Submarine Landslides: Subaqueous Mass Transport Deposits from Outcrops to Seismic Profiles, Geophysical Monograph*, 246, 277-297.
- Le Goff, J., Slootman, A., Mulder, T., Cavailhes, T., Ducassou, E., Hanquiez, V., Jaballah, J., Reijmer, J. J. G. (2020). On the architecture of intra-formational Mass-Transport Deposits: Insights from the carbonate slopes of Great Bahama Bank and the Apulian Carbonate Platform. *Marine Geology*, 427. <https://doi.org/10.1016/j.mar-geo.2020.106205>
- Leanza, H. A., Hugo, C. A., Repol, D. y Salvarredy Aranguren, M. (2003). Miembro Huncal (Berriasiano inferior): un episodio turbidítico en la Formación Vaca Muerta, Cuenca Neuquina, Argentina: *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 58, 2, 248-254.

- Marchal, D., Sattler, F. y Köhler, G. (2016). Sierra Chata, En González, G., Vallejo, M. D., Kietzmann, D., Marchal, D., Desjardins, P., González Tomassini, F., Gómez Rivarola, L. y Domínguez, R. F. (eds.). *Transecta Regional de la Formación Vaca Muerta. Integración de sísmica, registros de pozos, coronas y afloramientos*. Publicación especial del Instituto Argentino del Petróleo y del Gas (IAPG), Buenos Aires, Argentina, 155-167.
- Martín Chilevet, J., Palma, R. M., López-Gómez, J. y Kietzmann, D. A. (2011). Earthquake-induced soft-sediment deformation structures in Upper Jurassic open-marine microbialites (Neuquén Basin, Argentina). *Sedimentary Geology*, 235, 210-221.
- Moscardelli, L. y Wood, L. (2008). New classification system for mass transport complexes in offshore Trinidad. *Basin Research*, 20, 1, 73-98. doi: 10.1111/j.1365-2117.2007.00340.x
- Moscardelli, L. y Wood, L. (2015). Morphometry of mass-transport deposits as a predictive tool: GSA Bulletin, 128, 1-2, 47-80. doi: 10.1130/B31221.1
- Moscardelli, L., Wood, L. y Mann, P. (2006). Mass-transport complexes and associated processes in the offshore area of Trinidad and Venezuela. *AAPG Bulletin*, 90, 7, 1059-1088.
- Minisini, D. y Trincardi, F. (2009). Frequent failure of the continental slope: The Gela Basin (Sicily Channel). *Journal of Geophysical Research*, 114, F03014. doi:10.1029/2008JF001037
- Notta, R., Davogusto, O., Desjardins, P. y Williams, B. (2017, 7-11 de agosto). *Slump* deposits identification in low angle carbonate ramp settings, Cruz de Lorena, Neuquén Basin, Argentina: Towards an integrated model explaining anomalous water recovery and poor well performance: Actas del 20° Congreso Geológico Argentino, San Miguel de Tucumán, Argentina, 91-96.
- Nugraha, H. D., Jackson, C. A. L., Johnson, H. D. y Hodgson, D. M. (2020). Lateral variability in strain along a mass-transport deposit (MTD) toewall: a case study from the Makassar Strait, offshore Indonesia. *Journal of the Geological Society*, 177, 1261-1279. doi: https://doi.org/10.1144/jgs2020-071
- Ogata, K., Mountjoy, J. J., Pini, G. A., Festa, A., Tinterri, R. (2014). Shear zone liquefaction in mass transport deposit emplacement: a multi-scale integration of seismic reflection and outcrop data, *Marine Geology*, 356, 50-64. Doi: 10.1016/j.margeo.2014.05.001
- Ogata, K., Festa A., Pini, G. A. (eds.). (2020a). Submarine Landslides. Subaqueous Mass Transport Deposits from Outcrops to Seismic Profiles. *Geophysical Monograph Series*. 246.
- Ogata, K., Festa, A., Pini, G. A., Alonso, J. L. (2020b). Submarine Landslide Deposits in Orogenic Belts: Olistostromes and Sedimentary Mélanges. En Ogata K., Festa, A., Pini, G. A., (eds.). *Submarine Landslides: Subaqueous Mass Transport Deposits from Outcrops to Seismic Profiles*, *Geophysical Monograph*, 246, 3-26.
- Owen, G., Moretti, M., Alfaro, P. (2011). Recognising triggers for soft-sediment deformation: Current understanding and future directions. *Sedimentary Geology*, 235, 133-140.
- Passey, Q. R., Creaney, S., Kulla, J. B., Moretti, F. J. & Stroud, J.D, 1990. A practical model for organic richness from porosity and resistivity logs. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 74, 1777- 1794.
- Pose, F., Gangui, A. y Galeazzi, S. (2014, 3-7 November). Estratigrafía secuencial del intervalo Quintuco-Vaca Muerta en el engolfamiento Neuquino, Cuenca Neuquina, Argentina. En Galeazzi, S., González, G., Santiago, M., García, D., Maschio, L., González, R. y Ramírez Martínez, J. (eds.). *Simposio de Recursos No Convencionales, 9° Congreso de Exploración y Desarrollo de Hidrocarburos: IAPG, Mendoza, Argentina*, 211-229.
- Puga-Bernabéu, A., Webster, J. M., Beaman, R. J., Thran, A., López-Cabrera, J., Hinestrosa, G. y Daniell, J. (2020). Submarine Landslides Along the Mixed Siliciclastic-Carbonate Margin of the Great Barrier Reef (Offshore Australia). En Ogata K., Festa, A., Pini, G. A. (eds.). *Submarine Landslides: Subaqueous Mass Transport Deposits from Outcrops to Seismic Profiles*, *Geophysical Monograph*, 246, 313-337.
- Reijenstein, H., Lanusse, I., Oviedo, P., Licitra, D., Sotelo, D., Vittore, F., Quiroga, J. y González Tomassini, F. (2017, 7-11 August). ¿Deslizamientos en Vaca Muerta? Observaciones e integración de datos sísmicos, pozo y coronas en el Yacimiento Loma Campana, Cuenca Neuquina, Argentina: 20° Congreso Geológico Argentino, San Miguel de Tucumán, Argentina.
- Reijenstein, H. M., Posamentier, H. W., Bande, A., Lozano, F. A., Domínguez, R. F., Wilson, R., Catuneanu, O. y Galeazzi, S. (2020). Seismic geomorphology, depositional elements, and clinoform sedimentary processes: Impact on unconventional reservoir prediction. En Minisini, D., Fantín, M., Lanusse, I., Leanza, H. (eds.). *Integrated geology of unconventional: The case of the Vaca Muerta play, Argentina*, *AAPG Memoir* 121, 237-266.
- Shuxin Pan, Liu, C., Li, X., Liang, S., Chen, Q., Zhang, W., Zhang, S. (2020). Giant sublacustrine landslide in the Cretaceous Songliao Basin, NE China. *Basin Research*, 31, 1066-1082. doi: 10.1111/bre.12357
- Spalletti, L. A., Veiga, G. D., Schwarz, E. y Franzese, J. (2008). Depósitos de flujos gravitacionales subacuáticos de sedimentos en el flanco activo de la Cuenca Neuquina durante el Cretácico temprano, *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 63, 3, 442-453.
- Strachan L. J. y Alsop, G. I. (2006). *Slump* folds as estimators of palaeoslope: a case study from the Fishers-treet *Slump* of County Clare, Ireland. *Basin Research*, 18, 451-470. doi: 10.1111/j.1365-2117.2006.00302.x