



Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas
Universidad Nacional de La Plata

Tesis de Grado en Geofísica

Detección de bordes en datos sísmicos con filtros Sobel

Autor: Angie Padrón

Director: Dr. Julián Luis Gómez

Co-director: Dr. Danilo Rubén Velis

La Plata
Agosto 2022

Agradecimientos

A mis directores, Julián y Danilo. Gracias por el apoyo, la paciencia, por estar a disposición siempre y ser excelentes guías en este tramo de mi carrera.

A la Universidad Nacional de La Plata y a la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, por brindarme una formación extraordinaria. A la universidad pública como herramienta de ascenso social y sus ejemplares medidas de bienestar universitario, que fueron contención en muchos años difíciles.

A mi familia, porque sin su apoyo permanente esto hubiera sido imposible. A mis hermanos, Robert y Sally, por ser incondicionales.

A mamá, a quien le debo todo lo que soy, mis logros pasados, presentes y futuros. Gracias a su inconmensurable esfuerzo y amor, a su carácter resiliente. Este título es suyo.

A Isi, que además de ser mi novio fue mi amigo más cercano durante toda la carrera. Gracias por tanta felicidad. *Tan pronto yo te vi...*

A todos mis amigos y amigas, gracias por hacer de este camino una experiencia hermosa. Gracias por el apoyo y la compañía de siempre.

Índice general

Resumen	1
1. Introducción	2
2. Metodología	4
2.1. Variabilidad de tamaños y orientaciones del operador Sobel 2D	7
3. Ejemplos 3D	13
3.1. Dato sintético	13
3.1.1. Detección en el dominio de Wheeler	17
3.2. Dato de campo	20
3.2.1. Penobscot	20
3.2.2. Parihaka	26
3.2.3. Método del valor umbral.	29
4. Discusión	33
5. Conclusiones	35

Resumen

Los elementos depositacionales en las cuencas sedimentarias productivas son identificados a través de bordes y discontinuidades en secciones que siguen la forma de un horizonte, provenientes del dato sísmico. Mejorar la detección de estos rasgos con atributos sísmicos apropiados es fundamental para la interpretación de la geología del subsuelo. Con el fin de resaltar rasgos de interés, en este trabajo se implementó la metodología de detección de bordes mediante el filtro Sobel. Ampliamente difundido en aplicaciones de procesamiento de imágenes, el filtro Sobel permite estimar la magnitud del gradiente espacial en imágenes. Previo a su implementación, se modificó a los operadores Sobel por medio del incremento de su tamaño convencional de 3×3 . Para mejores resultados, los filtros deben ser aplicados en el dominio de Wheeler, en el que se visualizan en cada sección tiempos de igual depositación, relativos a formaciones geológicas. Se aplicaron los filtros Sobel modificados a secciones que siguen la forma de un horizonte de un cubo sintético y dos cubos sísmicos de dominio público, provenientes de Canadá y Nueva Zelanda. El dato fue horizontalizado previamente para la obtención de estas secciones. Esta metodología asegura que los filtros de detección de bordes actúen en la dirección de las estructuras, mitigando los efectos provocados por pliegues y fallas en el dato original. Se compara el desempeño del filtro Sobel estándar y el de sus operadores modificados. Los resultados demuestran que los filtros de detección de bordes modificados producen atributos más limpios y menos ambiguos cuando el dato de entrada posee una relación señal/ruido baja. El flujo de trabajo presentado es útil para estructuras de cualquier sistema depositacional, siempre que estas puedan ser identificadas por sus bordes.

Introducción

Los datos sísmicos de prospección son de gran importancia para conocer la estructura de los primeros kilómetros de la corteza. A través de la detección de contrastes de impedancia acústica en el subsuelo, el método sísmico provee información relevante para describir la geología subyacente al área de estudio. Para obtener esta información, los datos sísmicos adquiridos deben ser procesados e interpretados. La interpretación de los datos procesados asiste en la descripción de los rasgos geológicos del subsuelo.

En la etapa de interpretación del dato sísmico existen diferentes herramientas para facilitar la labor. Dentro de las técnicas usadas, el presente trabajo se enfoca en la detección de bordes para la generación de un atributo sísmico. La detección de bordes es un procedimiento usado también en el área del procesamiento de imágenes. Se optó por el uso de filtros Sobel para la implementación de la metodología de detección de bordes, realizada sobre secciones de tiempo constante en datos 3D, es decir, secciones horizontales o *slices*.

Además de ser aplicado en dato sísmico, el filtro Sobel ha sido usado en procesamiento de imágenes [Islam et al., 2010], medicina [Wilson, 2001] y astronomía [Karachentsev et al., 2006]. El filtro Sobel está disponible en la industria petrolera desde hace años como un atributo bidimensional, siendo uno de sus usos la identificación de domos salinos [Aqrawi y Boe, 2011], variaciones de propiedades litológicas, fallas y cambios estratigráficos [Jing et al., 2007], texturas sísmicas y geomorfología [Chopra y Marfurt, 2008]..

El trabajo de interpretación sísmica consume mucho tiempo, e incorporar una técnica gráfica de detección de bordes, en comparación con otras técnicas de extracción de atributos, mejora significativamente la precisión de la identificación de fallas y otras estructuras [Wang, 2016]. En una cuenca sedimentaria productiva, optimizar la interpretación de dicho rasgo geológico conlleva a una mejor descripción de un potencial reservorio de hidrocarburos.

En el presente trabajo se aplicó un filtro Sobel sobre secciones de tiempo constante correspondientes a dos cubos sísmicos de acceso libre, enfatizando en la visualización de paleocanales. Previo a ello, se describe la metodología del filtro en el Capítulo 1, que es posteriormente aplicada sobre datos sintéticos en el Capítulo 2. Finalmente, los resultados de la aplicación del filtro sobre dato real se muestran en el Capítulo 3.

Metodología

Aplicado a una imagen, el filtro Sobel computa cambios en las amplitudes a lo largo de un borde [Barka, 2015]. Los operadores que definen al filtro Sobel se obtienen mediante cálculos entre los operadores unidimensionales de derivación h_d y promedio h_s , cuyas expresiones son

$$h_d = \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{y} \quad h_s = \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (2.1)$$

Se verifica $s_x = h_s h_d^T$ y $s_y = h_d h_s^T = s_x^T$ [Gómez et al., 2021]. Así, se obtienen

$$s_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{y} \quad s_y = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2.2)$$

Es decir, los operadores Sobel pueden ser descompuestos en un filtro que promedia y otro que deriva. Implementar el filtro Sobel es análogo a convolucionar en una dimensión por filas con un operador y en columnas con otro. Esto quiere decir que el filtro Sobel es separable. Por lo tanto, aplicados s_x y s_y en conjunto, se calcula el gradiente suavizado de una imagen. La Figura 2.1 muestra gráficamente los operadores.

El filtro involucra una derivada primera porque esta operación, para una función unidimensional, provee la ubicación y magnitud de un borde. Para

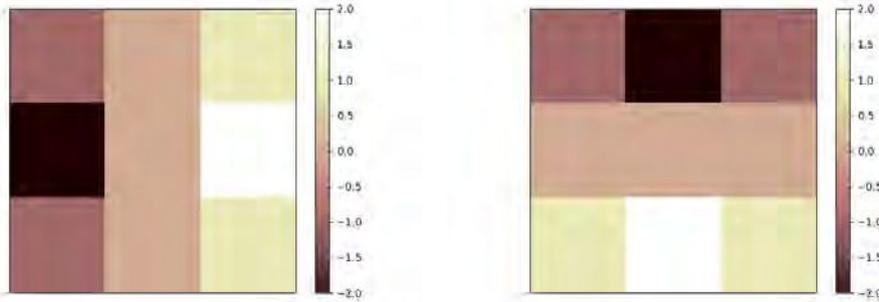


Figura 2.1: Operadores 3×3 . a) Dirección horizontal s_x . b) Dirección vertical s_y .

el caso bidimensional, la derivada parcial representa la cantidad de cambio a lo largo de cada dimensión. Definiendo una imagen por medio de una función bidimensional $I(x, y)$, denominamos intensidad a la amplitud de I en cualquier par (x, y) de la imagen. Así, el gradiente ∇I indica la dirección de mayor cambio en la intensidad:

$$\nabla I = \left(\frac{\partial I}{\partial x}, \frac{\partial I}{\partial y} \right). \quad (2.3)$$

En la Figura 2.2 se muestra gráficamente el gradiente.

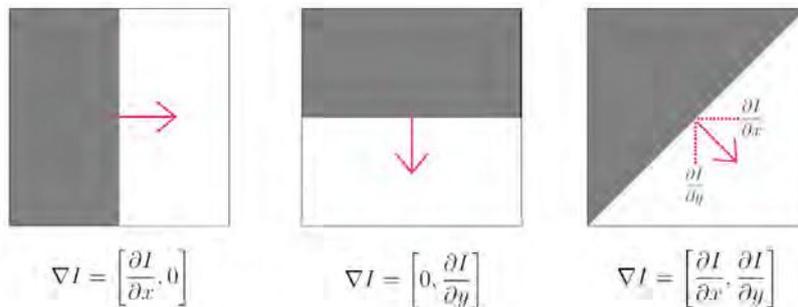


Figura 2.2: Representación gráfica del gradiente.

Además, se define la magnitud S del gradiente como:

$$S = \|\nabla I\| = \sqrt{\left(\frac{\partial I}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial I}{\partial y}\right)^2}. \quad (2.4)$$

Trasladando este concepto al operador Sobel, obtenemos la derivada horizontal y vertical para una imagen mediante la convolución entre la imagen I y los filtros s_x y s_y . Es decir,

$$\begin{aligned} S_x &= s_x * I, \\ S_y &= s_y * I, \end{aligned} \quad (2.5)$$

donde la magnitud del gradiente está dado por:

$$S = \sqrt{S_x^2 + S_y^2}. \quad (2.6)$$

En la práctica, el procedimiento implica ponderar la muestra central donde esté aplicado el filtro, basado en qué tan similares son las trazas. Si las trazas contiguas son consistentemente similares, la muestra central arroja un valor cercano a cero, ya que el filtro no está detectando variación. En contraste, si las inmediaciones de la muestra indican variación, la muestra central tendrá un valor distinto de cero.

2.1. Variabilidad de tamaños y orientaciones del operador Sobel 2D

Variar el tamaño del operador Sobel conduce a cambios en la cantidad de trazas contiguas consideradas al aplicar el filtro. Hasta ahora vimos el operador Sobel de tamaño 3×3 , sin embargo, también son usados los operadores de tamaño 5×5 o 7×7 .

Extender el tamaño del operador tiene como consecuencia el incremento del área que influencia el resultado de la convolución. Esta expansión induce la posibilidad de encontrar cambios de intensidad más fuertes en la imagen [Bogdan et al., 2019], pero va en detrimento de la resolución de los bordes, como veremos en los ejemplos sintéticos más adelante. La virtud de un operador de detección de bordes de mayor tamaño es la reducción del ruido, ya que promediar una mayor cantidad de muestras incrementa el suavizado. En contraste, el costo de esta reducción de ruido es la obtención de bordes más borrosos y con menor resolución [Nixon y Aguado, 2019].

La ecuación (2.2), que representa el operador Sobel tradicional, detecta bordes en las direcciones vertical y horizontal. Algunos autores establecen que considerar más direcciones mejora el desempeño del operador [Bora, 2017] [Al-Dossary y Al-Garni, 2013]. Otros incluso señalan que limitarse sólo a las direcciones vertical y horizontal tiene como consecuencia que el efecto de detección de bordes sea potencialmente defectuoso ante estructuras con orientaciones en múltiples ángulos [Wang, 2016]. Como solución, se presenta la posibilidad de calcular los elementos de un operador Sobel normalizado [Nixon y Aguado, 2019], de cualquier tamaño y dirección, mediante la expresión:

$$s_{i,j} = \frac{i \cos(\beta) + j \sin(\beta)}{i^2 + j^2} \quad (2.7)$$

para $i, j = -(N-1)/2, \dots, (N-1)/2$, y $N \in \mathbb{Z}$. Para $\beta = 0$ y $\pi/2$, obtenemos s_x y s_y (ecuación (2.2)) respectivamente, mientras que para $\beta = \pi/4$ y $3\pi/4$ obtenemos los operadores s_{xy} y s_{yx} [Gómez et al., 2021], que favorecen la detección de estructuras para ángulos oblicuos de 45° . Mediante la expresión 2.7 se construirá un filtro Sobel oblicuo. La Figura 2.3 muestra los operadores Sobel de tamaños 3×3 , 5×5 y 7×7 en dirección horizontal s_x , vertical s_y y oblicua s_{xy} . Considerando estos términos, la magnitud del gradiente ahora sería

$$S = \sqrt{S_x^2 + S_y^2 + S_{xy}^2 + S_{yx}^2}. \quad (2.8)$$

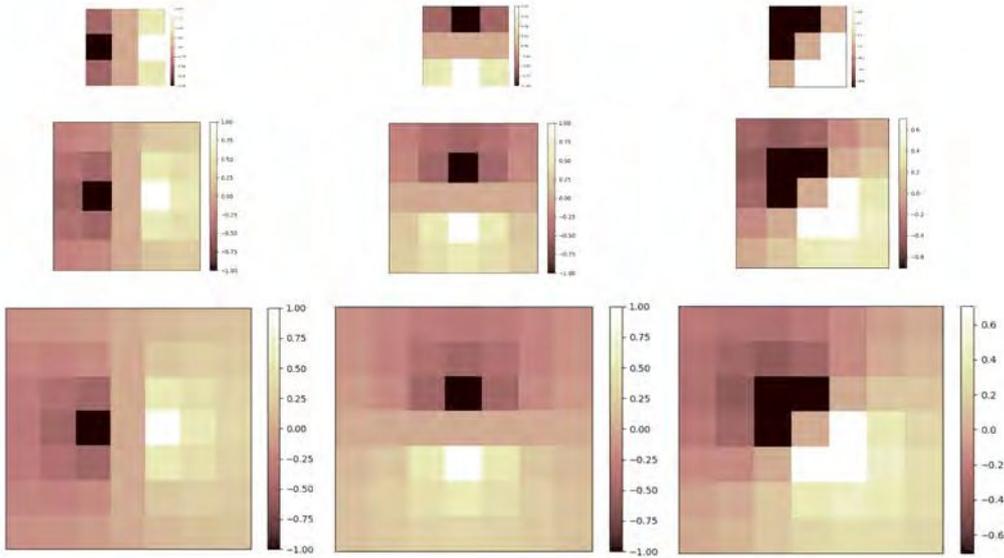


Figura 2.3: Operadores de diferentes tamaños y direcciones. Por fila (de arriba hacia abajo): 3×3 , 5×5 y 7×7 . Por columna (de izquierda a derecha): horizontal, vertical y oblicuo.

En la Figura 2.4 se considera el efecto de los operadores s_x y s_y al ser aplicados a imágenes con una franja central que va variando su tamaño. Se puede observar que el operador 3×3 consigue delimitar los bordes de la franja central con mejor resolución que sus análogos de mayor tamaño. Esto es porque los operadores de mayor tamaño involucran más muestras en su cómputo, resultando así un promediado más significativo que se refleja en un efecto de suavizado.

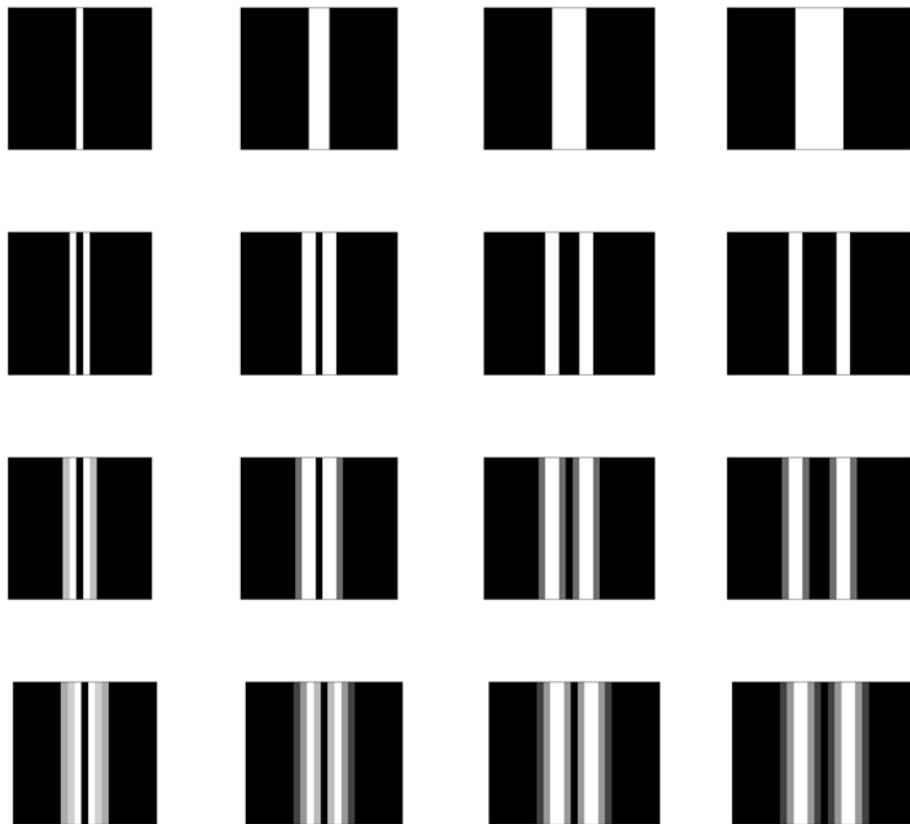


Figura 2.4: Operadores Sobel de distintos tamaños 3×3 , 5×5 y 7×7 aplicados a imágenes con franja central de ancho 1 píxel, 3 píxeles, 5 píxeles y 7 píxeles. Por fila (de arriba hacia abajo): imagen original, imagen después de aplicar Sobel 3×3 , Sobel 5×5 , Sobel 7×7 .

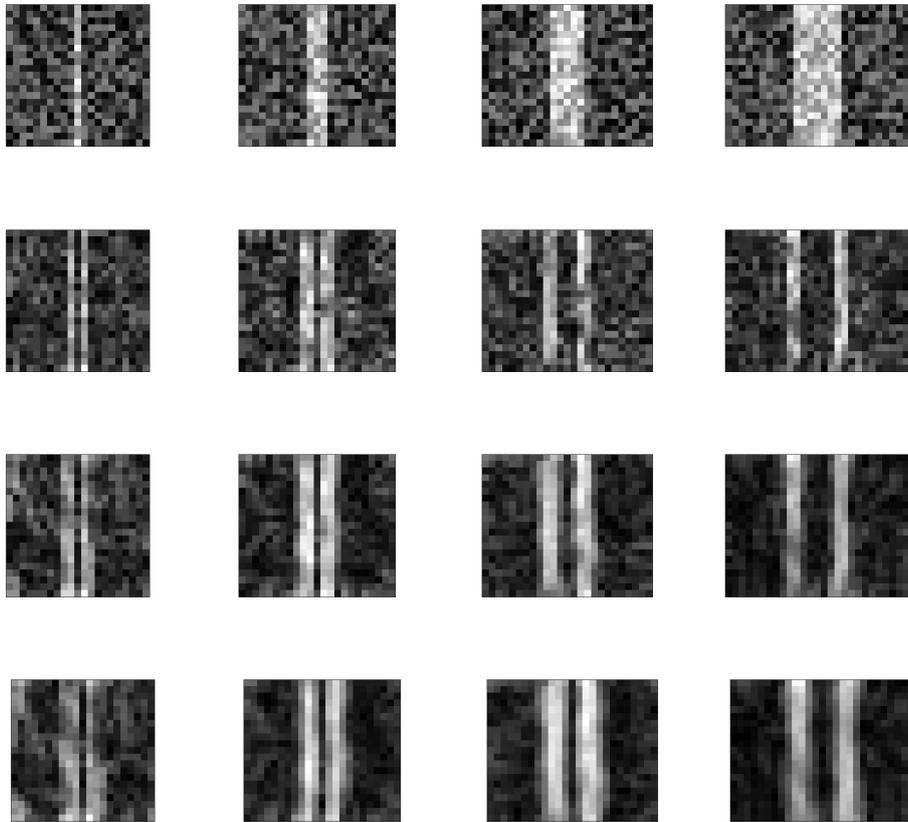


Figura 2.5: Operadores Sobel de distintos tamaños 3×3 , 5×5 y 7×7 aplicados a imágenes con franja central de ancho 1 píxel, 3 píxeles, 5 píxeles y 7 píxeles con ruido aditivo. Por fila (de arriba hacia abajo): imagen original, imagen después de aplicar Sobel 3×3 , Sobel 5×5 , Sobel 7×7 .

Considerando la misma imagen que contiene una franja central pero con la adición de ruido, (Figura 2.5), se obtienen otras conclusiones que suman al análisis. Para la franja de 1 píxel de ancho, el desempeño de los filtros es pobre en todos los casos. Los operadores de mayor tamaño toman datos ruidosos para promediar, entorpeciendo el objetivo de realzar bordes. Sin embargo, cuando la franja aumenta el tamaño de sus píxeles, los resultados obtenidos a partir de la aplicación de filtros de mayor tamaño mejora considerablemente. Los operadores 5×5 y 7×7 se destacan, en este caso, por suavizar el ruido

en la imagen final. Si bien se sigue verificando que el operador 3×3 es el que obtiene mejor resolución del borde, el mismo se ve afectado por la presencia de ruido, poniendo en riesgo la efectiva identificación del objeto.

Estos resultados no son más que una reafirmación de lo mencionado previamente: usar un operador más grande reduce el ruido a costa de la obtención de bordes con menor resolución. Esta relación de compromiso podría, potencialmente, servir de guía al momento de elegir las características del operador Sobel a implementar, siempre teniendo en mente las particularidades del objeto que se pretende visualizar.

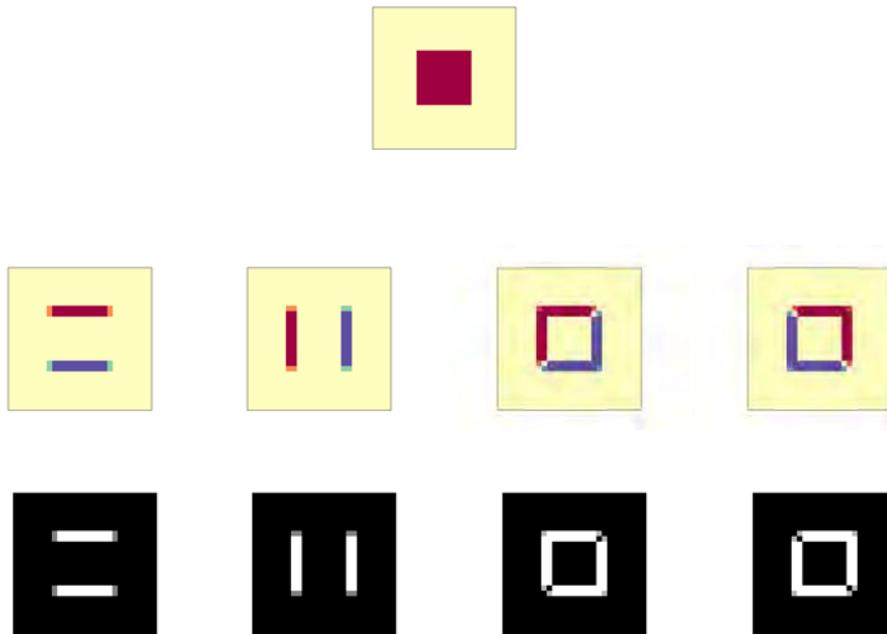


Figura 2.6: Primera fila: imagen original. Segunda fila: componentes S_x , S_y , S_{xy} y S_{yx} por separado, calculadas de la imagen original. Tercera fila: magnitud de las componentes consideradas, es decir, raíz cuadrada de componente al cuadrado.

Por otro lado, la Figura 2.6 muestra por separado las contribuciones de los



Figura 2.7: Izquierda: magnitud de la suma de las componentes horizontal y vertical. Derecha: magnitud de la suma de las cuatro componentes mostradas.

elementos del filtro Sobel aplicado a un cuadrado. El objetivo es analizar el aporte de las componentes s_{xy} y s_{yx} . El interrogante a responder es, ¿existe una diferencia considerable entre involucrar los operadores oblicuos en el proceso de detección de bordes y no hacerlo? Para esclarecer esta cuestión, en la Figura 2.7 se puede realizar una comparación entre Sobel considerando sólo s_x y s_y y Sobel con la contribución de los operadores oblicuos. El resultado que se obtiene empleando las direcciones adicionales es mejor que el que se tiene por medio de la ecuación 2.6, pero la diferencia no es muy significativa. En este caso, el filtro Sobel con sus componentes horizontal y vertical cumple con resaltar los bordes, si bien presenta leves defectos en las esquinas de la imagen. Esto es porque la orientación del borde que el filtro intenta resaltar en las esquinas es de 45° .

A pesar de que considerar el aporte de las componentes oblicuas en el filtro Sobel pueda implicar una mejora en la resolución de los bordes del dato sísmico realzados, en el presente trabajo se opta por no incluir estas contribuciones en los cálculos, ya que el aporte es poco significativo. Esto no va en detrimento de la calidad del resultado final, ya que los bordes de interés en los datos implementados en este trabajo poseen orientaciones predominantemente verticales, si bien esto podría no verificarse para otro set de datos.

Ejemplos 3D

3.1. Dato sintético

En este capítulo se analizan filtros Sobel sobre secciones de tiempo constante de un cubo sintético. El programa usado para la creación del cubo genera un modelo de reflectividad 3D que se convoluciona con una ondícula de Ricker, produciendo así el dato sísmico sintético. Este dato es además deformado con plegamiento y dos fallas, una más pronunciada que la otra (Figura 3.1). Las fallas contenidas en el dato constituyen un objetivo de detección. La metodología de generación del cubo sintético fue implementada para la interpretación de resultados en el trabajo de Gómez et al. [Gómez et al., 2021].

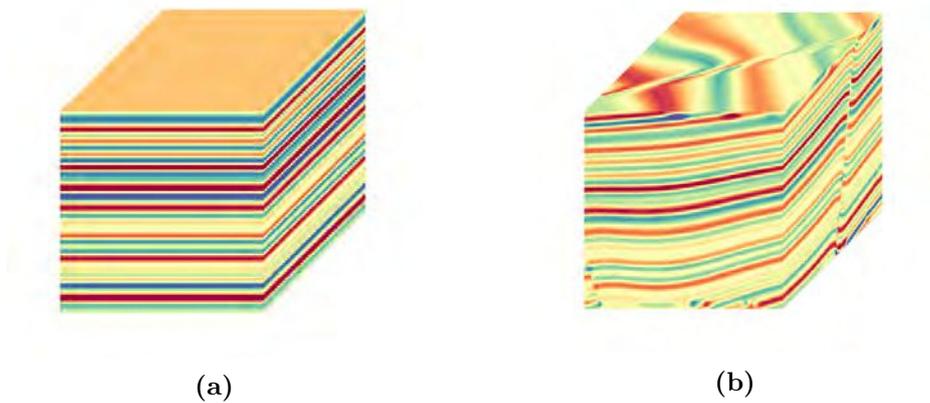


Figura 3.1: Cubo sintético ($130 \times 130 \times 130$). a) Sin deformación (reflectividades y sísmica). b) Con pliegues y fallas.

Se usa el dato sintético sin ruido en la Figura 3.2, mientras que en la Figura 3.3 es considerada la presencia de ruido aditivo. En todos los casos se utilizan

filtros Sobel de tamaños 3×3 , 5×5 y 7×7 . En la parte central de cada imagen se visualiza la sección de tiempo constante. Además, estas imágenes contienen la posición de los cortes verticales *inline* y *crossline*. Estos cortes pueden ser observados en la parte inferior y lateral izquierda de la imagen, respectivamente.

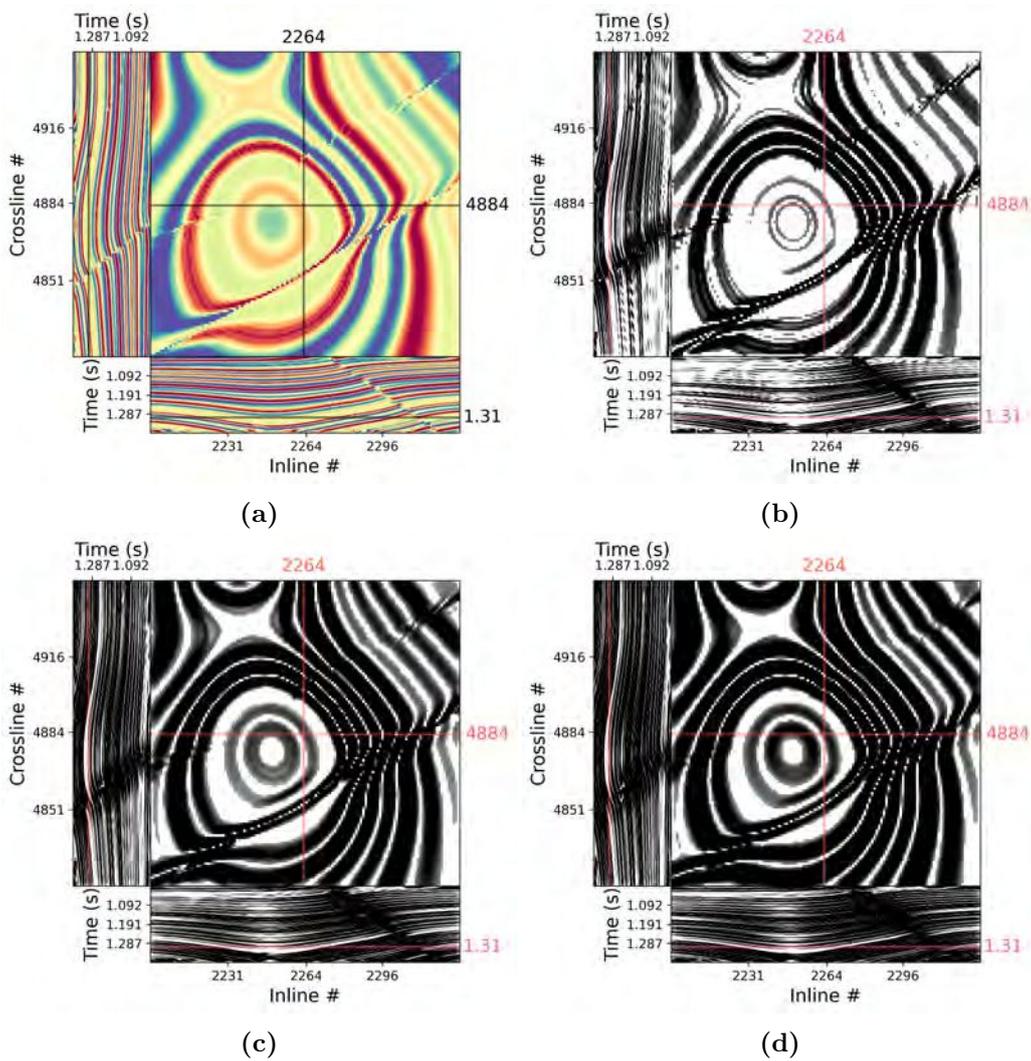


Figura 3.2: Sección de tiempo constante ($t = 31s$) del cubo sintético sin ruido. a) Dato original. b) Sobel 3×3 . c) Sobel 5×5 . d) Sobel 7×7 .

Es posible realizar la observación general, a partir de la inspección de las imágenes 3.2b, 3.2c y 3.2d, de que el filtro Sobel aplicado cumple con realzar los bordes que se pueden ver en primera instancia en la sección de tiempo constante del dato original 3.2a. Naturalmente, las diferencias entre las imágenes responden a las variantes de los tamaños del filtro Sobel aplicado.

Observando el desempeño de los diferentes operadores empleados, una de las diferencias más notables se encuentra en la visualización de fallas. La falla como discontinuidad en la imagen se representa considerablemente más suave conforme aumenta el tamaño del operador, consecuente con el efecto que fue descrito en la Sección 2.1. Así, la identificación de fallas se ve entorpecida ante el incremento del tamaño del filtro. En este caso particular, ante un dato sísmico libre de ruido, resulta conveniente el operador 3×3 , cuya resolución es superior.

Por otro lado, al considerar ruido aditivo sobre el dato (Figura 3.3), se observa que el efecto más significativo es la pérdida de poder de detección de fallas de menor magnitud. Para el dato sintético con ruido, los operadores Sobel de mayor tamaño tienen un mejor desempeño que Sobel 3×3 . Las diferencias entre los resultados obtenidos mediante operadores de distintos tamaños no parecía tan abrupta trabajando con un dato libre de ruido. En particular, resulta evidente a simple vista que el operador 7×7 produce mejores resultados, conduciendo a una imagen con mejor relación señal/ruido que es más fácil de interpretar gracias al efecto de suavizado intrínseco en el operador.

Los resultados visibles en esta instancia no son aptos para interpretación, ya que las estructuras resaltadas responden al plegamiento y no a rasgos geológicos de interés. Surge la necesidad de implementar un proceso de horizontalización (*flattening*) del dato, cuya finalidad es mitigar la influencia de

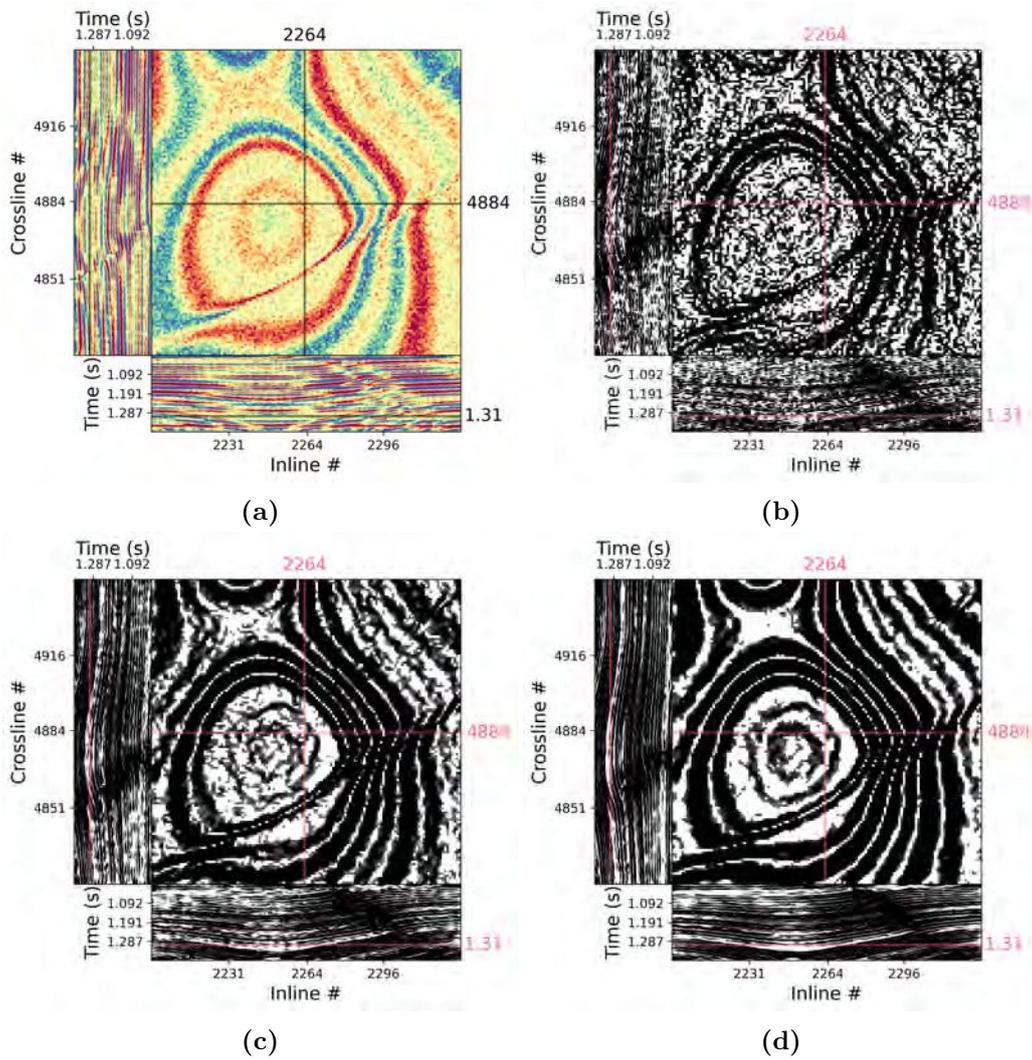


Figura 3.3: Sección de tiempo constante ($t = 31$)s del cubo sintético con ruido aditivo. a) Dato original. b) Sobel 3×3 . c) Sobel 5×5 . d) Sobel 7×7 .

las posibles deformaciones producidas por pliegues en el subsuelo. El dato horizontalizado pertenece al denominado dominio de Wheeler [Wheeler, 1958].

3.1.1. Detección en el dominio de Wheeler

El principal problema de analizar el dato sísmico por medio de una sección de tiempo constante es que no se podrían obtener conclusiones acertadas sobre la geología del subsuelo. Lo correcto sería analizar el dato en el dominio de Wheeler, donde se tienen secciones siguiendo la forma de un horizonte (*horizon slices*) en las que visualizaríamos un tiempo de igual depositación de cada formación geológica.

El proceso de obtención de una sección que sigue la forma de un horizonte es la horizontalización, método que remueve la estructura y permite al intérprete ver los rasgos geológicos previo a los estadios de deformación que podrían existir en el subsuelo por efecto de plegamiento. Por ejemplo, después de horizontalizar el dato sísmico, un intérprete sería capaz de ver en una imagen una llanura de inundación con sus respectivos canales meandrosos [Lomask, 2003]. Por lo tanto, para poder hacer una interpretación adecuada del dato sintético visto, sería necesario trabajar con el cubo previo a la incorporación de la deformación (Figura 3.1a).

El método de horizontalización aplicado calcula las pendientes de las formaciones geológicas e itera con el objetivo de cancelarlas. Anular las pendientes es análogo a establecer como requisito que los vectores normales de los estratos apunten localmente hacia arriba. Para ello, se toma una traza de referencia. Se trata de mover todas las trazas tal que se correlacionen lo más posible con la traza de referencia.

Como consecuencia de haber trabajado con el dato sintético deformado al realizar la aplicación del filtro Sobel, las secciones de tiempo constante de las Figuras 3.2 y 3.3 representan una típica estructura de silla de montar o

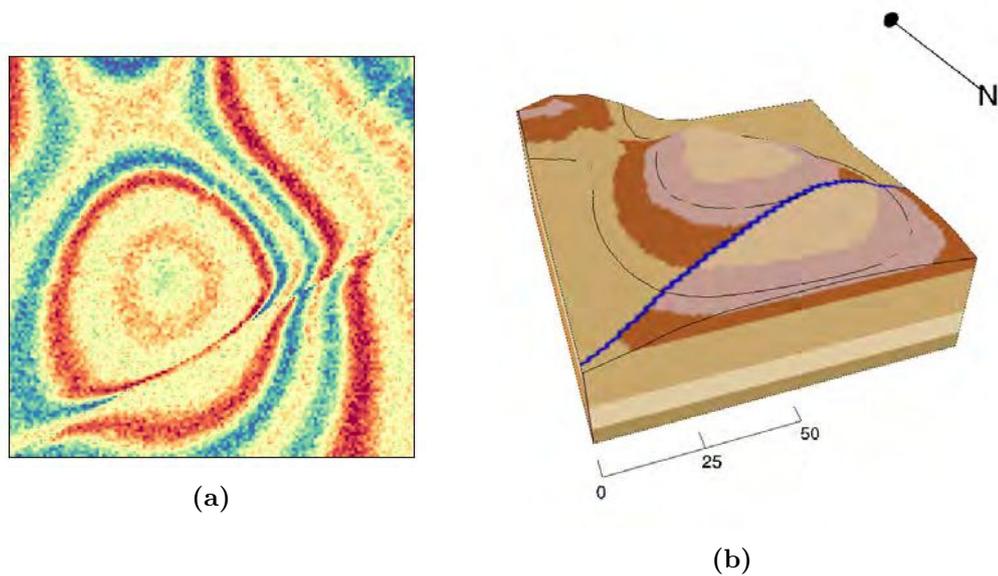


Figura 3.4: Interpretación de la estructura plegada presente en el dato sintético. a) Sección de tiempo constante a $t = 1s$ del cubo sintético. b) Representación esquemática tridimensional de la topografía asociada a la estructura vista en la sección de tiempo constante del dato sintético. Modelo disponible en tinyurl.com/saddlemodelAP.

saddle, característica del plegamiento (Figura 3.4).

Para corregir este efecto, se analiza el desempeño del filtro Sobel sobre el cubo horizontalizado 3.2a con ruido aditivo. En este caso, la horizontalización remueve las deformaciones pero no los cambios bruscos que representan las fallas, que son las estructuras de mayor interés. Comparando el dato original con las imágenes generadas por el filtro Sobel (Figura 3.5), es posible ver que la aplicación del filtro aporta significativamente a la visualización de las fallas. En las imágenes filtradas se identifica con claridad la falla de menor inclinación, que era de difícil interpretación. Análogo al caso anterior, el desempeño más óptimo en términos de detección de bordes está relacionado con el operador 7×7 .

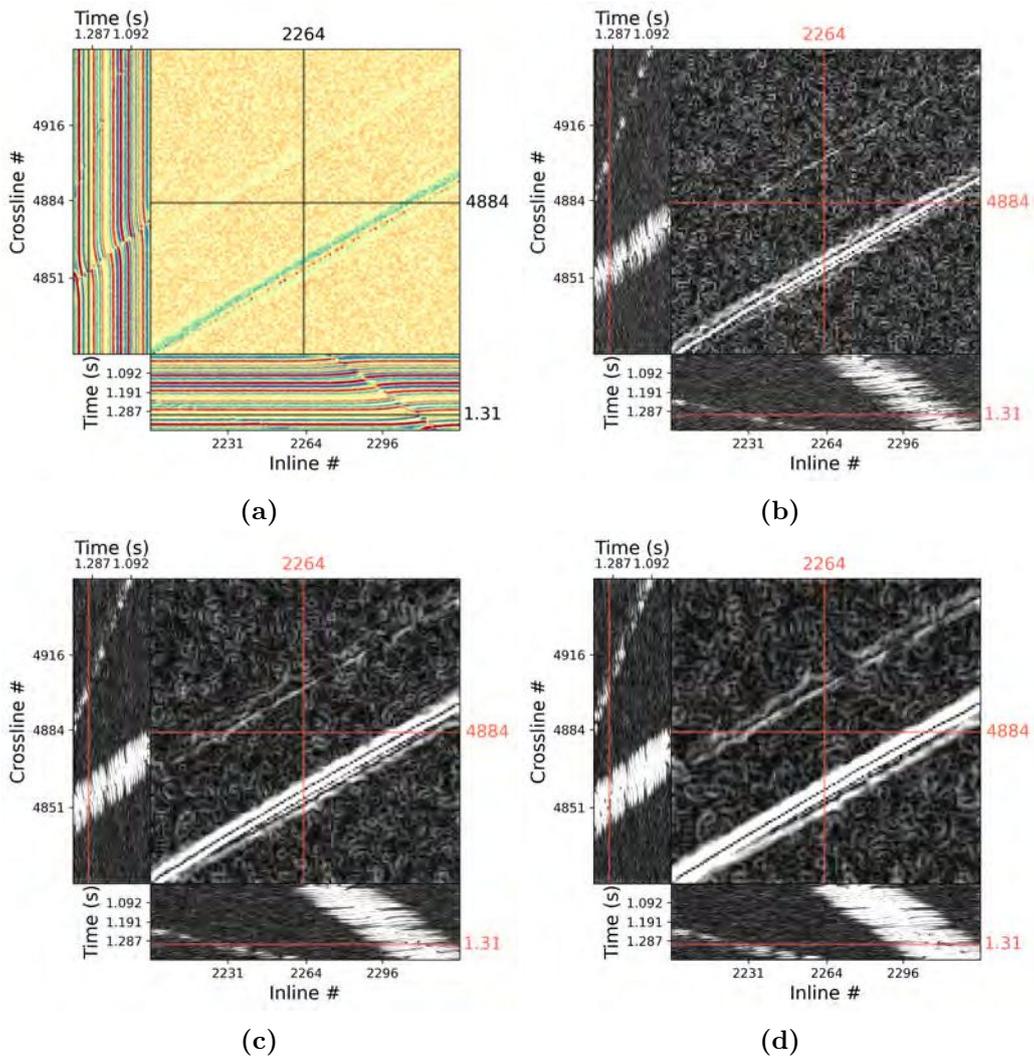


Figura 3.5: Sección de tiempo constante ($t = 31s$) del cubo sintético horizontalizado con ruido aditivo. a) Dato original. b) Sobel 3×3 . c) Sobel 5×5 . d) Sobel 7×7 .

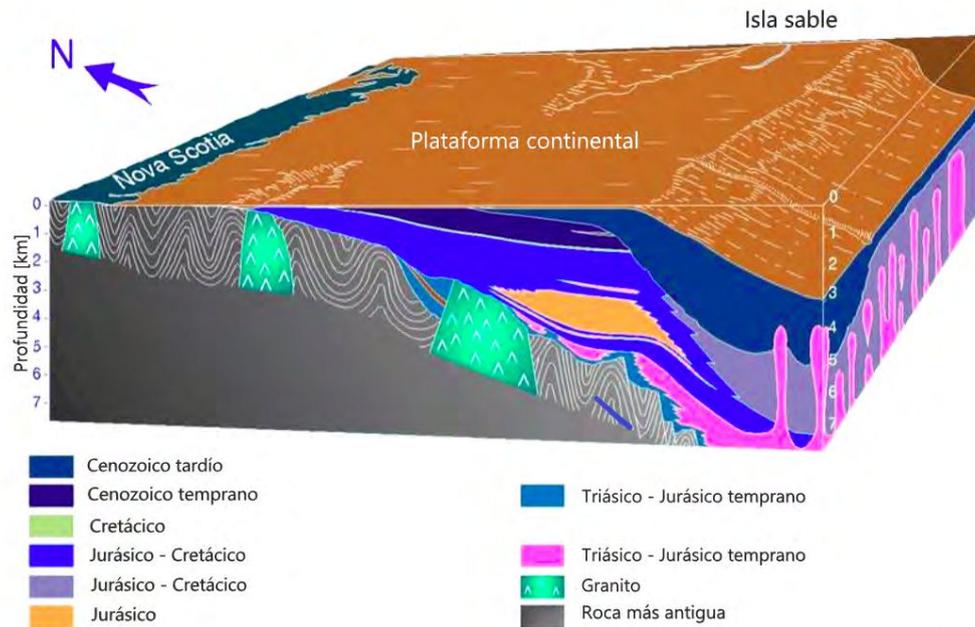
3.2. Dato de campo

3.2.1. Penobscot

El dato de campo usado para evaluar el desempeño del filtro Sobel es [Penobscot 3D](#), un cubo adquirido por el Departamento de Energía de Nova Scotia en 1992, público y de acceso libre. Es deseable conocer geológicamente el área de trabajo previo a la aplicación del filtro Sobel sobre el cubo. Sólo después de adquirir esta información se podrán identificar apropiadamente los bordes realizados por el filtro Sobel. Asociar estos bordes a estructuras en el subsuelo no tendría sentido a partir de la exclusiva examinación del dato sísmico, sin adopción de criterio geológico alguno. Los modelos geológicos de deposición y deformación estructural junto con los principios de estratigrafía y geomorfología sísmica permiten predecir cualitativamente facies geológicas [[Chopra y Marfurt, 2008](#)].

Penobscot 3D abarca un área tal que la señal sísmica tiene relación señal/ruido baja debajo de los 3s ($\approx 5\text{km}$). La porción de Penobscot que se emplea para filtrar con Sobel es somera, abarcando un rango de tiempos de 0,116s a 0,332s ($\approx 500\text{m}$).

La zona sur en la [Figura 3.6](#) consiste de una serie de sub-cuencas interconectadas, compuestas por rocas sedimentarias de gran espesor, con gran potencial para el desarrollo de reservas de petróleo y gas [[Davis et al., 1996](#)]. Las unidades litológicas involucradas en el cubo fueron caracterizadas, en términos de su paleoambiente, como sistemas fluviales y deltaicos con transgresiones y regresiones marinas [[Davis et al., 1996](#)]. Por las características de este tipo de



Cortesía de John Wade, GSC (Atlantic)

Figura 3.6: Área donde se adquirió Penobscot, en Nova Scotia, Canadá. Cortesía del Departamento de Energía de Nova Scotia.

ambientes, el mayor espesor sedimentario y los reservorios de mejor calidad se encuentran en el centro de los paleocanales, siendo estas las estructuras que se esperan resaltar mediante el filtro Sobel.

Al igual que en el ejemplo sintético, los filtros Sobel serán aplicados en el dominio de Wheeler. En la Figura 3.7 se muestra el dato original y el dato horizontalizado, sobre el que se buscará resaltar las estructuras características de ambiente sedimentario fluvial/deltaico que no se visualizan a simple vista mediante los filtros Sobel. La Figura 3.8 muestra una sección transversal de Penobscot sin horizontalizar.

Después de aplicar Sobel en sus tres variantes (Figura 3.9), es posible apreciar dos paleocanales con orientación vertical. La calidad de la imagen proveniente

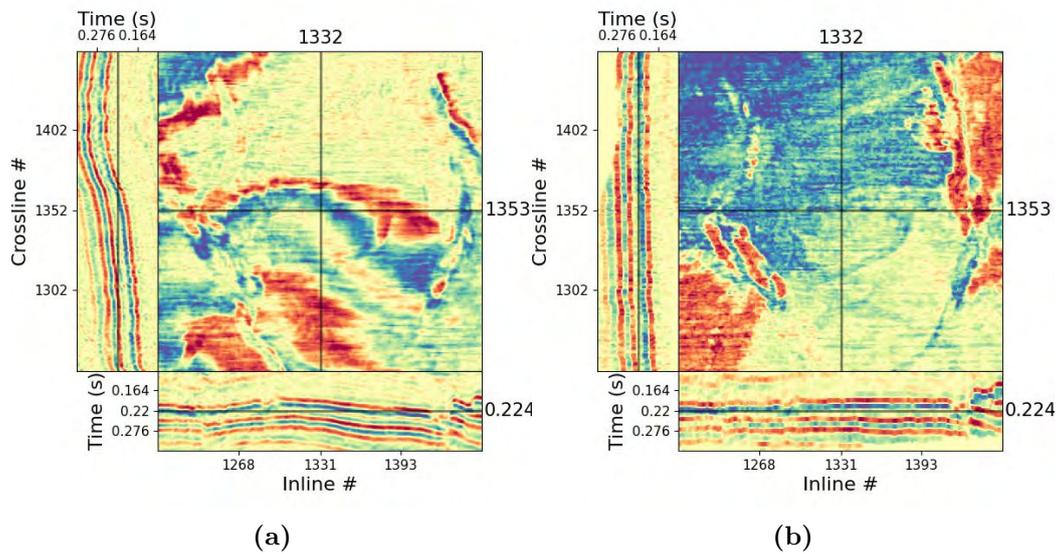


Figura 3.7: Penobscot3D ($200 \times 250 \times 55$). Relevamiento *offshore* de Nova Scotia, Canadá. a) Dato original. b) Dato horizontalizado.

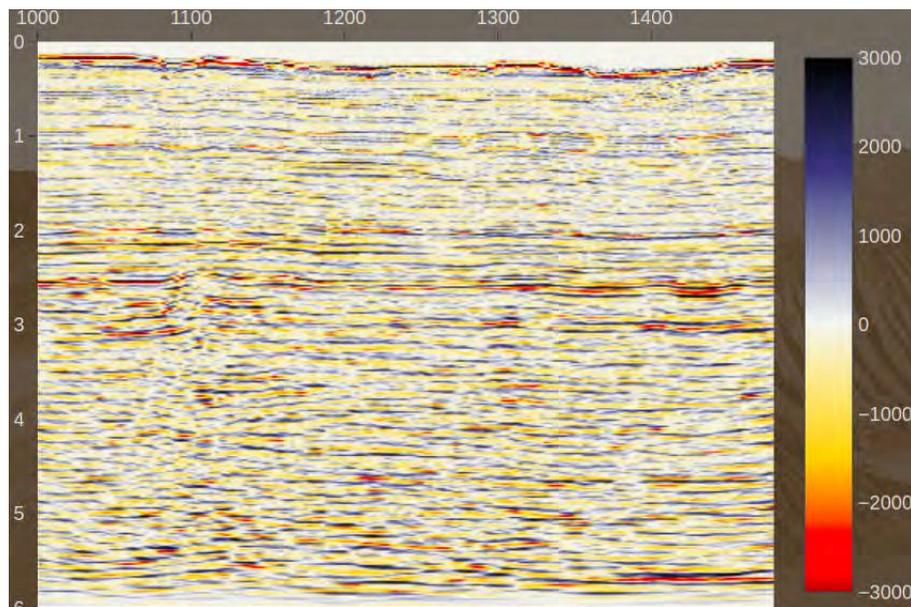


Figura 3.8: Sección transversal de Penobscot.

del filtro es, por supuesto, una consecuencia directa del tamaño del operador. Los resultados más óptimos en función de la facilidad que brindan para interpretación son los obtenidos con el filtro Sobel 7×7 , al producir una ima-

gen con mejor relación señal/ruido donde se diferencian de forma efectiva los bordes.

En Penobscot se observa un patrón de ruido coherente asociado a la huella de adquisición (*footprint*). Los patrones de ruido vistos en la imagen espejan partes de la geometría de adquisición empleada en el relevamiento sísmico del cubo. La huella de adquisición suele aparecer en secciones de tiempo constante someras, tales como las empleadas, enmascarando las anomalías de amplitud que realmente se deberían tener en cuenta para la interpretación estratigráfica [Chopra y Larsen, 2000]. Con el fin de mitigar el ruido coherente, se aplicó un suavizado como parte del preproceso. La diferencia entre incluir este paso y omitirlo puede verse en la Figura 3.10. La implementación del suavizado atenúa considerablemente la impronta del footprint.

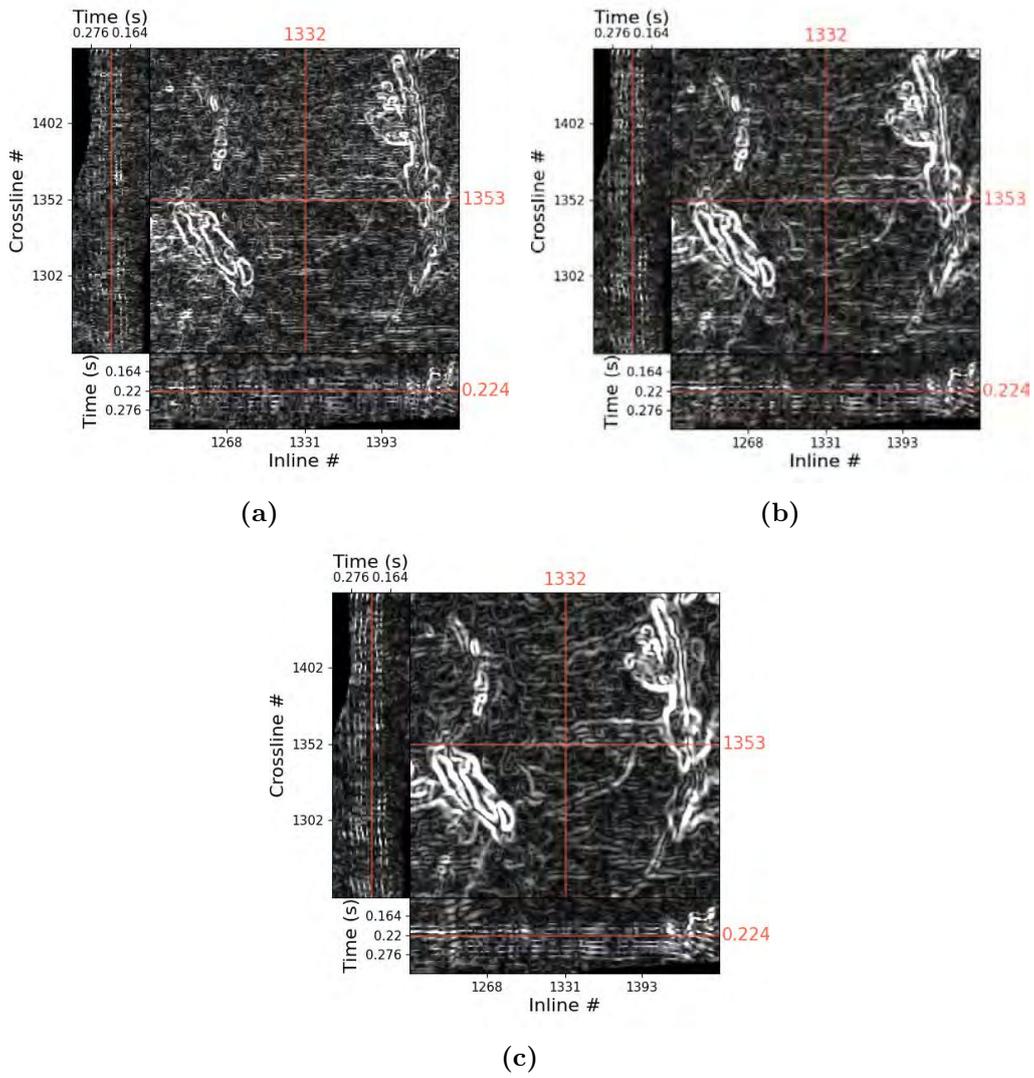


Figura 3.9: Aplicación de los filtros Sobel sobre Penobscot horizontalizado. a) Sobel 3×3 . b) Sobel 5×5 . c) Sobel 7×7 .

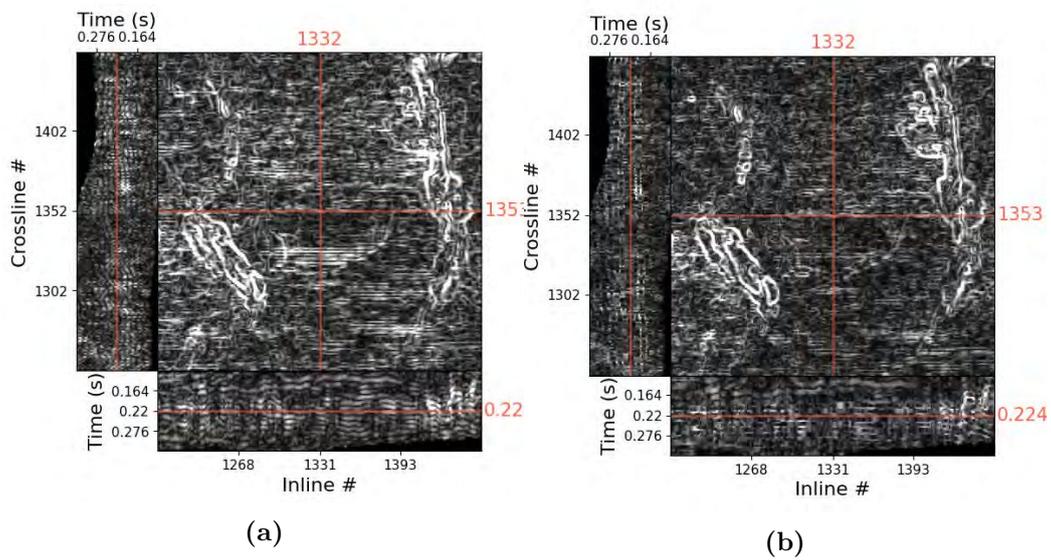


Figura 3.10: Sobel 3×3 . Resultados operando con: a) dato sin preproceso previo, b) dato suavizado previamente.

3.2.2. Parihaka

El segundo dato de campo usado es Parihaka 3D, relevamiento de sísmica marina (*offshore*) proveniente de Nueva Zelanda. Parihaka 3D provee información sobre la cuenca Taranaki, la única cuenca productiva conocida en Nueva Zelanda [Bujard* y Zhang, 2017]. Taranaki es un sistema de rift iniciado en el cretácico tardío, cuando Nueva Zelanda era parte del margen de subducción de Gondwana. La depositación en la cuenca fue predominantemente de areniscas fluviales y marinas [Cameron, 2016]. Por lo tanto, análogo al análisis relativo a Penobscot 3D, es esperable que la implementación del filtro Sobel asista en la detección de paleocanales. El procedimiento aplicado es el mismo: se horizontaliza el dato para posteriormente aplicar el filtro, considerando variantes en el tamaño del operador. Como se observa en la Figura 3.11b, la horizontalización realza, sobre la sección de tiempo de depositación, la presencia de los canales con orientación N-S. La Figura 3.12 muestra una sección transversal de Parihaka sin horizontalizar.

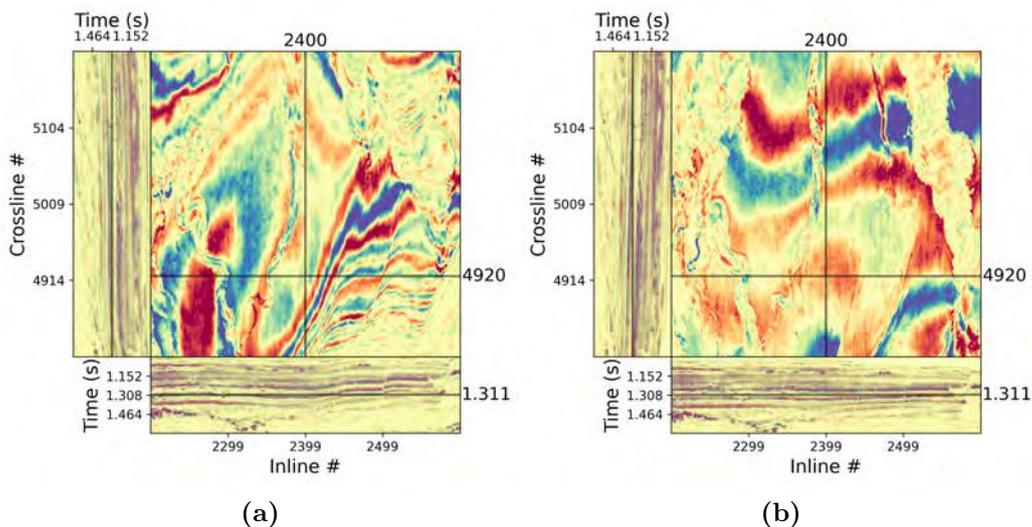


Figura 3.11: Parihaka 3D de $(381 \times 401 \times 208)$. Relevamiento *offshore* de Taranaki, Nueva Zelanda. a) Dato original. b) Dato horizontalizado.

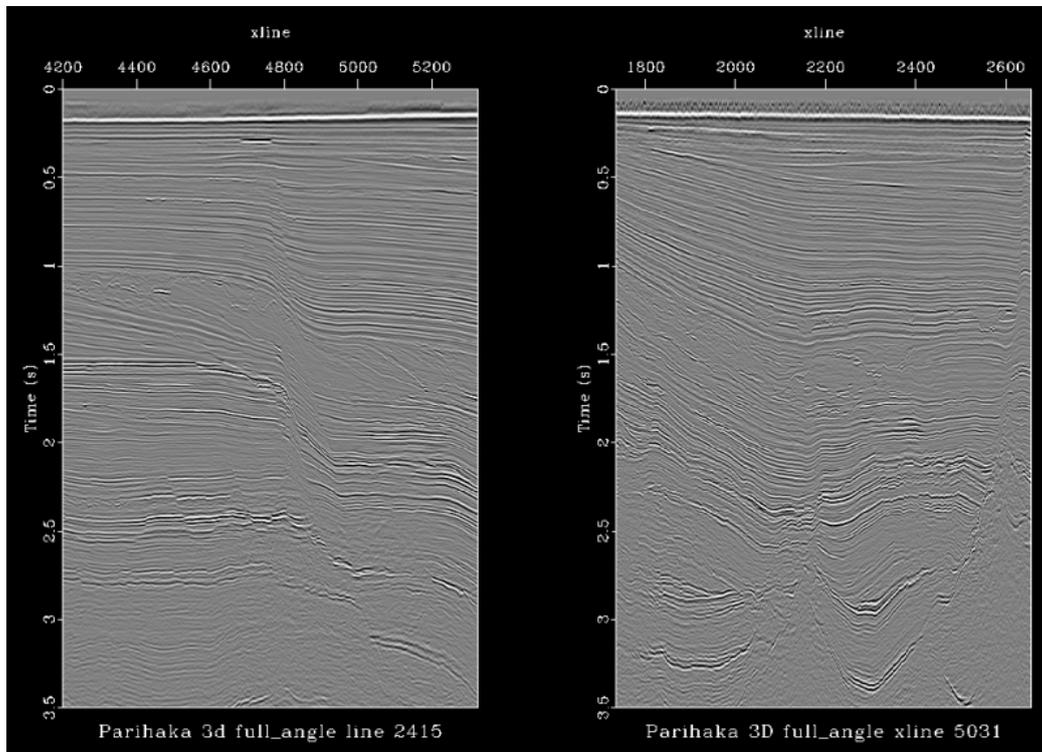


Figura 3.12: Sección transversal de Parihaka.

A diferencia de Penobscot, Parihaka es un dato con mejor relación señal/ruido donde el footprint es imperceptible. Por este motivo, no fue necesaria la implementación de suavizado como parte del preproceso del dato. Consecuentemente, resulta razonable que el mejor desempeño del filtro Sobel se corresponda con el operador asociado a mayor resolución. Este es el de tamaño 3×3 , como se deduce de la inspección visual de la Figura 3.13. Los paleocanales, de difícil interpretación en el dato original horizontalizado, aumentan críticamente su visibilidad después de aplicado el filtro.

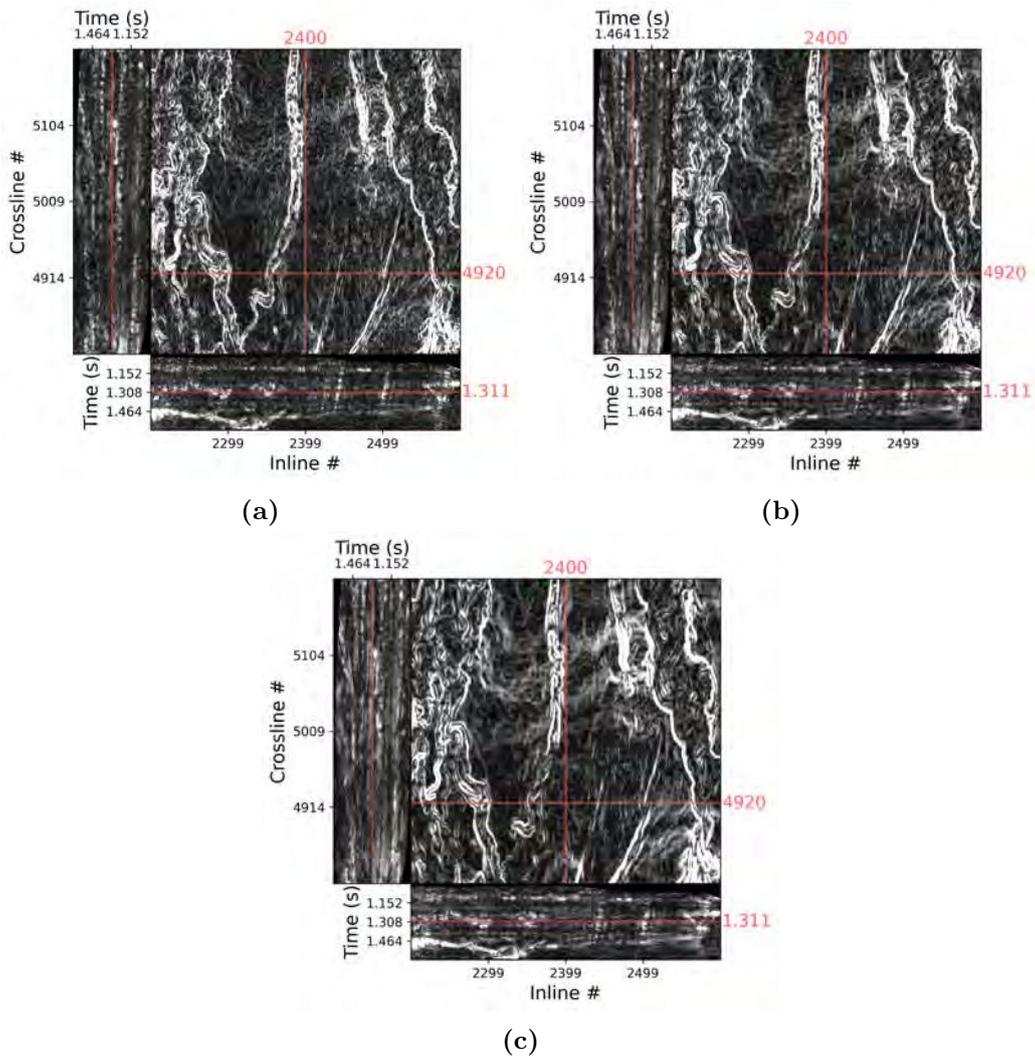


Figura 3.13: Aplicación de los filtros Sobel sobre Parihaka horizontalizado. a) Sobel 3×3 . b) Sobel 5×5 . c) Sobel 7×7 .

3.2.3. Método del valor umbral.

Para facilitar la detección de bordes, es esencial determinar cambios en la intensidad en las cercanías del objetivo. Se enfatizan los lugares donde hay un cambio significativo en los valores locales de intensidad mediante el gradiente 2.4. Sin embargo, se debe tener en cuenta que se desean resaltar áreas donde realmente haya información sobre los bordes. Esto no es trivial, dado que existen puntos en el dato con valor de gradiente no nulo que no forman parte de bordes de interés. Por lo tanto, se debe usar un método para determinar qué puntos efectivamente conforman los bordes. El método del valor umbral o *thresholding* provee un criterio usado para detección de bordes [Jain et al., 1995].

La práctica descrita es sumamente común en diversos trabajos de aplicación de Sobel en dato sísmico [Wang, 2016] [Bogdan et al., 2019]. El método consiste en definir un valor umbral (*threshold*) tal que todos los valores menores a este sean cero [Jain et al., 1995]. La elección del valor umbral se hace en base a prueba y error. Para cada caso estudiado (cubo sintético, Penobscot y Parihaka) se eligen los datos filtrados por el operador Sobel con desempeño más sobresaliente. Una vez seleccionados los datos, se busca de forma empírica el valor umbral, procurando afectar lo menos posible los bordes realzados que efectivamente contienen información de interés.

Los resultados se muestran en las Figuras 3.14, 3.15 y 3.16 para el sintético, Penobscot y Parihaka, respectivamente. En los tres casos, tras aplicar el método del valor umbral, es notoria la disminución del ruido y el realce de las estructuras de interés. En el caso particular de Penobscot, si bien se mitigaron considerablemente los patrones de huella de adquisición, también

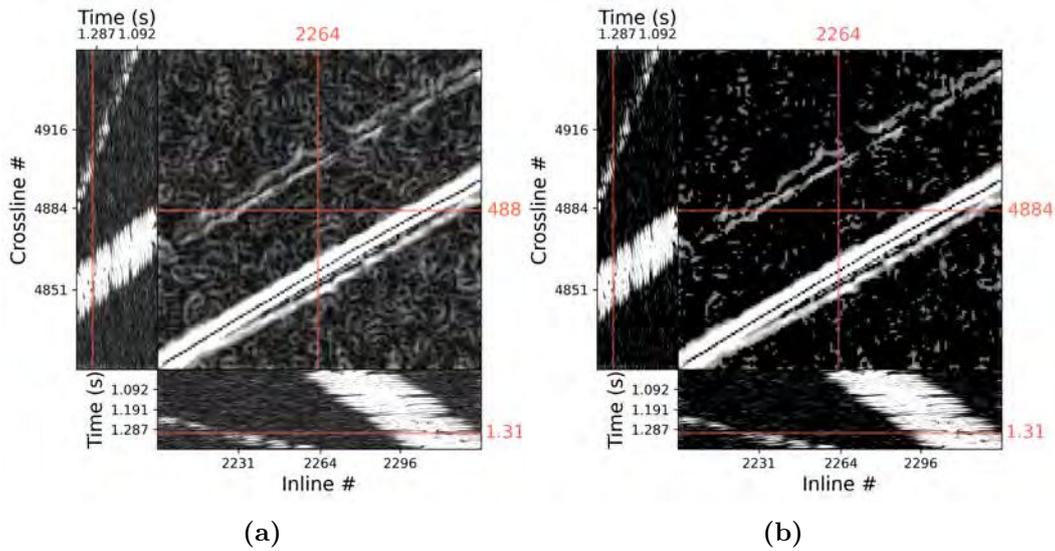


Figura 3.14: Dato sintético filtrado por Sobel 7×7 antes y después de método del valor umbral con $T = 0,25$. Rango de valores: a) $[0 - 7,32]$. b) a) $[0,25 - 7,32]$

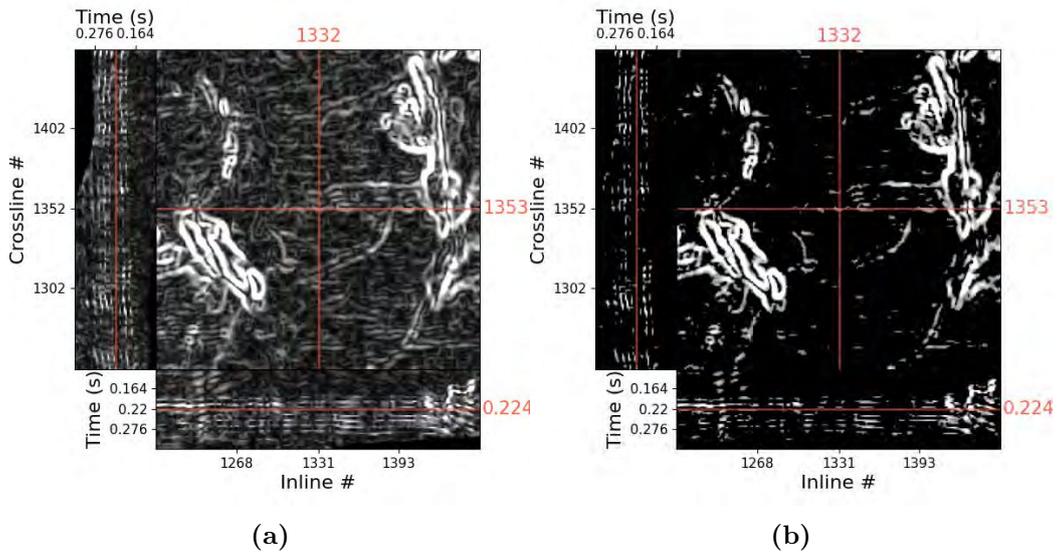


Figura 3.15: Penobscot filtrado por Sobel 7×7 antes y después de método del valor umbral $T = 1,1$. Rango de valores: a) $[0 - 5,94]$. b) a) $[1,1 - 5,94]$

se ven realizados algunos bordes perpendiculares al rumbo de los paleocanales. La Figura 3.17 muestra un modelo depositacional de paleocanales a partir del cual es posible deducir que los bordes con orientación horizontal en Penobscot

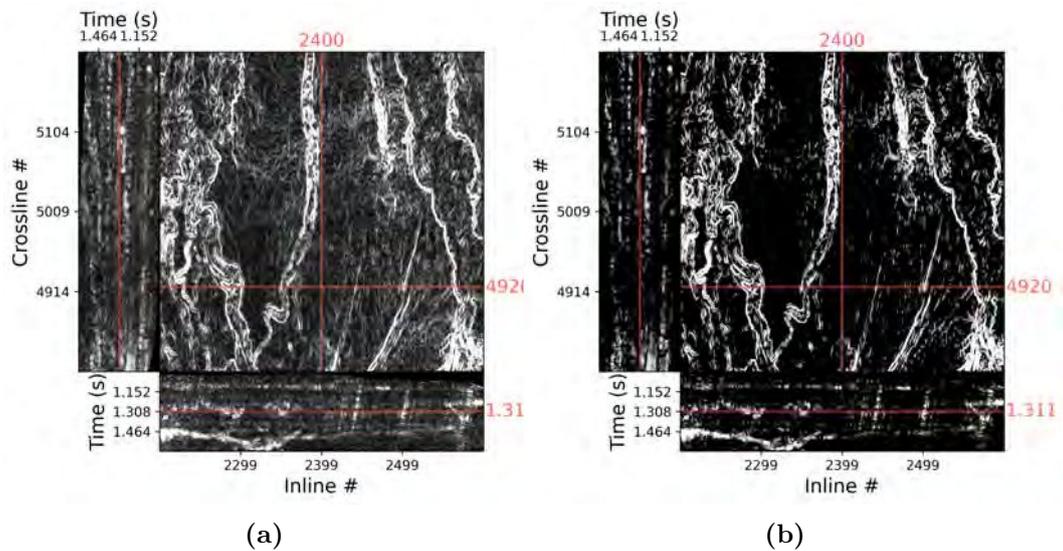


Figura 3.16: Parihaka filtrado por Sobel 3×3 antes y después de método del valor umbral $T = 0,11$. Rango de valores: a) $[0 - 2,9]$. b) a) $[0,11 - 2,9]$

no responden a una configuración real de la geología del subsuelo, ya que esto no sería posible en el ambiente deltaico que caracteriza los datos. Por lo tanto, se resalta una vez más la importancia de tener en cuenta que se debe contar con criterio geológico para interpretar los resultados.

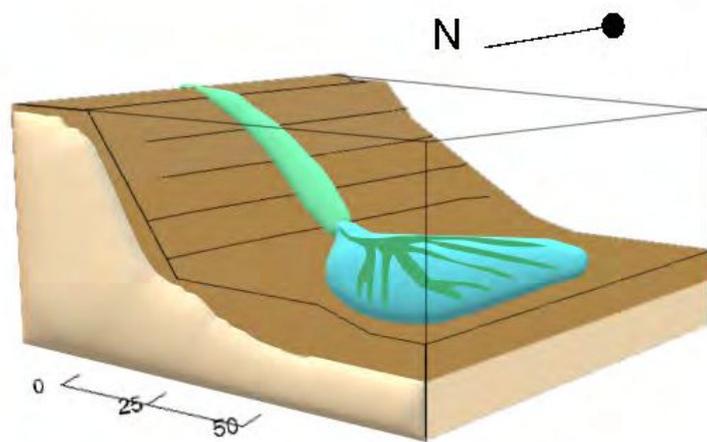


Figura 3.17: Modelo deposicional de paleocanales.

Discusión

Si bien es innegable la pérdida de resolución ante la implementación de un filtro cuyo operador es de 7×7 , resulta interesante discutir qué tanto afecta a la interpretación la potencial falta de detalles en los bordes de la sección filtrada. Aunque existe una relación de compromiso evidente entre el ruido y la resolución, para el caso de la aplicación del filtro Sobel como cómputo que asiste a la interpretación sísmica, podría ser preferible optar por variantes en las que sea priorizada la atenuación de ruido. El motivo de esto es que, aunque obtengamos bordes con un nivel óptimo de detalle por medio de un operador de menor tamaño, estos detalles no necesariamente se corresponden con una representación verídica de rasgos geológicos en subsuelo. Esto es una consecuencia de que el dato sísmico tiene una resolución horizontal y vertical que actúa como limitante a la hora de interpretar el borde de menor tamaño observable.

Por otro lado, si bien no fue realizado en el presente trabajo, se destaca la utilidad del filtro Sobel para el cálculo de espesores de los paleocanales resaltados en las secciones sísmicas, lo cual constituye una herramienta de interés para la interpretación sísmica. También se destaca que se puede realizar un control de calidad del proceso de horizontalización del dato mediante el análisis de qué tan correlacionada está el dato horizontalizado con la estructura original. En caso que esta correlación sea alta, se debe dudar de la veracidad de los resultados producidos por el algoritmo, ya que se evidencia estructura remanente.

Existen publicaciones que primero computan un cubo de coherencia para obtener bordes de fallas y canales de buena calidad, y después lo filtran con Sobel con el fin de realzar estructuras [Chopra et al., 2014]. Podría ser un tema para futuros trabajos de investigación analizar la compatibilidad de la aplicación de Sobel con la de diversos atributos, tales como el caos, la varianza, la curvatura, entre otros [Koson et al., 2013] [Aqrawi y Boe, 2011].

Además, se encuentran en la bibliografía diversas mejoras posibles a la aplicación del filtro Sobel, como la adaptación del tamaño del operador al contenido en frecuencias temporales del dato sísmico [Aqrawi, 2014]. Esta adaptación implica que el operador sea de menor tamaño para zonas de alta frecuencia del dato, y de mayor tamaño para zonas de baja frecuencia. De esta forma, en áreas de alta frecuencia se resaltarían rasgos detallados. Por otro lado, en áreas de baja frecuencia se evitaría la detección de ruido, inmiscuido en los bordes de interés.

En lugar de aplicar el filtro Sobel sobre rebanadas, sea en tiempo o en el dominio de Wheeler, se puede optar por operar sobre el volumen sísmico. Para ello, se tendría que extender el filtro Sobel a 3 dimensiones. En su versión más estándar, el filtro Sobel 3D usa tres operadores para computar derivadas parciales en cada dirección ortogonal [Al-Dossary y Al-Garni, 2013]. La incorporación de esta metodología constituye también un potencial tópico para futuros trabajos de investigación.

Conclusiones

Hemos visto que el filtro Sobel conduce a un atributo sísmico que suma valor a la detección de rasgos geológicos de interés. El filtrado es apto para interpretación si el mismo se aplica en el dominio de Wheeler, y cobra más sentido si se procesa previamente el dato para remover la ambigüedad que genera el ruido coherente, como lo es por ejemplo el de huella de adquisición.

A partir de los datos analizados se deduce que las diferencias entre los resultados derivados de usar distintos tamaños de operador Sobel son menores conforme el dato tiene mayor relación señal/ruido. Por otro lado, en datos con baja relación señal/ruido, se destacaron los operadores de tamaño 7×7 .

El interés de aplicar un filtro Sobel con el fin de asistir a la interpretación sísmica radica en su capacidad de realzar bordes en datos reales, los cuales siempre tienen una componente de ruido que, si bien será mayor o menor dependiendo el caso, no es posible despreciar. Conocer el desempeño del filtro Sobel ante datos de diferentes características es de utilidad para futuros usos de esta herramienta de detección de bordes como atributo sísmico.

Bibliografía

- [Al-Dossary y Al-Garni, 2013] Al-Dossary, S., y K. Al-Garni, 2013, Fault detection and characterization using a 3d multidirectional sobel filter: Presented at the SPE Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition, OnePetro.
- [Aqrawi, 2014] Aqrawi, A. A., 2014, Adaptive sobel based edge detection for enhanced fault segmentation: IPTC 2014: International Petroleum Technology Conference, European Association of Geoscientists & Engineers, cp-395.
- [Aqrawi y Boe, 2011] Aqrawi, A. A., y T. H. Boe, 2011, Improved fault segmentation using a dip guided and modified 3d sobel filter, *in* SEG Technical Program Expanded Abstracts 2011: Society of Exploration Geophysicists, 999–1003.
- [Barka, 2015] Barka, D., 2015, Sobel based edge detection algorithm with adaptive operator size applied to post-stack seismic data: Master's thesis, University of Stavanger, Norway.
- [Bogdan et al., 2019] Bogdan, V., C. Bonchiş, y C. Orhei, 2019, Custom extended sobel filters: arXiv preprint arXiv:1910.00138.
- [Bora, 2017] Bora, D. J., 2017, A novel approach for color image edge detection using multidirectional sobel filter on hsv color space: *Int. J. Comput. Sci. Eng*, **5**, 154–159.
- [Bujard* y Zhang, 2017] Bujard*, J., y R. Zhang, 2017, Geophysical analysis of the miocene-pliocene mangaa formation for better exploration within the parihaka 3d survey; taranaki basin, new zealand: *International Geophy-*

- sical Conference, Qingdao, China, 17-20 April 2017, Society of Exploration Geophysicists and Chinese Petroleum Society, 63–66.
- [Cameron, 2016] Cameron, H., 2016, Evolution of a normal fault system, northern graben, taranaki basin, new zealand.
- [Chopra et al., 2014] Chopra, S., R. Kumar, y K. J. Marfurt, 2014, Seismic discontinuity attributes and sobel filtering: Presented at the 2014 SEG Annual Meeting, OnePetro.
- [Chopra y Larsen, 2000] Chopra, S., y G. Larsen, 2000, Acquisition footprint—its detection and removal: CSEG Recorder, **25**, 16–20.
- [Chopra y Marfurt, 2008] Chopra, S., y K. J. Marfurt, 2008, Emerging and future trends in seismic attributes: The Leading Edge, **27**, 298–318.
- [Davis et al., 1996] Davis, D., S. Browne, et al., 1996, The natural history of nova scotia, volume 2: Theme regions: Introduction: Nova Scotia Museum.
- [Gómez et al., 2021] Gómez, J. L., L. E. Gelis, y D. R. Velis, 2021, Data-driven edge detectors for seismic data interpretation: Geophysics, **86**, O59–O68.
- [Islam et al., 2010] Islam, S. Z., S. Z. Islam, R. Jidin, y M. A. Mohd. Ali, 2010, Execution time optimization analysis on multiple algorithms performance of moving object edge detection: AIP Conference Proceedings, American Institute of Physics, 289–295.
- [Jain et al., 1995] Jain, R., R. Kasturi, B. G. Schunck, et al., 1995, Machine vision: McGraw-hill New York, **5**.
- [Jing et al., 2007] Jing, Z., Z. Yanqing, C. Zhigang, y L. Jianhua, 2007, Detecting boundary of salt dome in seismic data with edge-detection technique, *in* SEG Technical Program Expanded Abstracts 2007: Society of Exploration Geophysicists, 1392–1396.

- [Karachentsev et al., 2006] Karachentsev, I. D., R. B. Tully, A. Dolphin, M. Sharina, L. Makarova, D. Makarov, O. G. Kashibadze, V. Karachentseva, S. Sakai, E. J. Shaya, et al., 2006, The hubble flow around the cena/m83 galaxy complex: arXiv preprint astro-ph/0603091.
- [Koson et al., 2013] Koson, S., P. Chenrai, y M. Choowong, 2013, Seismic attributes and their applications in seismic geomorphology: Bulletin of Earth Sciences of Thailand, **6**, 1–9.
- [Lomask, 2003] Lomask, J., 2003, Flattening 3-d seismic cubes without picking: Presented at the 2003 SEG Annual Meeting, OnePetro.
- [Nixon y Aguado, 2019] Nixon, M., y A. Aguado, 2019, Feature extraction and image processing for computer vision: Academic press.
- [Wang, 2016] Wang, Y., 2016, A modified edge detecting operator and its application: Presented at the 2016 SEG International Exposition and Annual Meeting, OnePetro.
- [Wheeler, 1958] Wheeler, H. E., 1958, Time-stratigraphy: AAPG Bulletin, **42**, 1047–1063.
- [Wilson, 2001] Wilson, K. S., 2001, Comparing edge-detection algorithm performance under degrading signal-to-noise ratio conditions: Optical Pattern Recognition XII, SPIE, 186–191.