

Instituto Politécnico Nacional
Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura
Ciencias de la Tierra



**Procesamiento sísmico en tiempo 2D Terrestre con Seismic Unix**
**Area: Chiapas-Tabasco**

# T E S I S

Para obtener el título de :

**I n g e n i e r o G e o f í s i c o**

P r e s e n t a :

**G r i s e l d a C u r e ñ o L ó p e z**

Asesores de Tesis

Interno: **Ing. Gabriela de los Santos Cano**
Externo : **Ing. Fernando Gómez Santiago**

México, D.F. Agosto de 2009

# A G R A D E C I M I E N T O S

*Agradezco individualmente a mis padres, porque aunque vivien juntos, cada uno me apoya de distinta forma: mi madre "Doña Leo" me impulsa desde que me tuvo en su vientre y mi padre "Don Leo" forja mi carácter con su ejemplo y exigencia.*

*A mis hermanos Leonardo y Rogelio que me acompañaron de día y de noche por mucho tiempo; gracias por ser mi apoyo y respaldo, nunca saldran de mi mente y mucho menos de mi corazón.*

*A mi esposo y amigo Fernando por que juntos construimos cada día; gracias por lo que hemos logrado juntos.*

*A mis 3 águilas Jorge, Andrea y Antonio, porque su presencia es el motivo que me impulsó para lograr esta meta.*

*A mis abuelos Epifania(q.e.d.) y Raymundo (q.e.d.); a mi tía Teresa Cureño, por su apoyo incondicional a lo largo de mi preparación académica.*

*A mis suegros Sra. Dionisia y Sr. Porfirio por sus frases de superación y lucha.*

*A mis coleg@s y amig@s que han marcado huellas en éste recorrido: Alonso, Monica, Paola, Unise, Gloria, Miguel, Leobardo, Esme, Paty, Juan, Toño y Quello; gracias por alentarme a terminar este trabajo; Alonso, gracias por tus comentarios para mejorarlo.*

*Al Instituto Politécnico Nacional, ESIA-Ticomán mi segunda casa, por brindarme profesores con la capacidad de compartir sus conocimientos; a mis sinodales y asesora interna por su comentarios que ayudaron a pulir este trabajo.*

*Un agradecimiento general a mis Profesores por formar la plataforma de mi carrera profesional.*

*A la Gerencia de Geofísica PEP-PEMEX por proporcionar la información de campo para desarrollar este proyecto; Ing. Gerardo Clemente, gracias por la confianza y sus puntos de vista.*

*Del Instituto Mexicano del Petróleo, agradezco al M. en I. Luis Mario Palacios por abrime la puerta que me permitiría continuar con la secuencias de proceso propuesta; al Ing. Ramón Benítez por su apoyo en el cálculo de las estáticas de refracción y por sus comentarios para mejorar esta tesis.*

*A mi asesor externo Fernando Gómez por compatir conmigo su conocimiento y experiencia en la industria sísmica, por el apoyo técnico recibido, por darme libertad para desarrollar cada capítulo y por sus comentarios durante la revisión de este trabajo.*

"*La gratitud es la memoria del corazón*"
(Jean Baptiste Massieu).

# Índice general

**Indice de Cuadros (Scrip shell)** IV

**Indice de figuras** VI

**Resumen** IX

**Abstract** X

**1. Introducción** **1**
1.1. Generalidades . . . . . 1
1.2. Objetivos . . . . . 2

**2. Teoría** **3**
2.1. Método sísmico de reflexión . . . . . 3
2.2. Adquisición terrestre . . . . . 3
2.3. Términos más comunes usados en la industria de procesamiento de datos sísmicos . . . . . 6

**3. Plataforma de procesamiento Seismic Unix (*SU*)** **13**
3.1. Sistema Operativo Linux . . . . . 13
3.2. Software libre . . . . . 15
3.3. GMT (Generic Mapping Tools por sus siglas en inglés) . . . . 15
3.4. Seisee . . . . . 16
3.5. Seismic Unix . . . . . 18
3.5.1. Formato de los datos en Seismic Unix . . . . . 18
3.6. Ambiente del proyecto . . . . . 22

**4. Procesamiento** **24**
4.1. Secuencia de proceso . . . . . 26
4.2. Información de campo . . . . . 27
4.2.1. Reporte de observador . . . . . 27
4.2.2. Topografía de campo (archivos SPS) . . . . . 29

4.2.3. Cintas o cartuchos de campo . . . . . 30
4.2.4. Controles de calidad a la información de campo . . . . 30
4.3. Reformateo . . . . . 33
4.3.1. Formatos de grabación . . . . . 33
4.3.2. Formato SEGY . . . . . 33
4.4. Edición por reporte de observador . . . . . 37
4.5. Geometría . . . . . 38
4.5.1. Generación y actualización de la geometría . . . . . 38
4.5.2. Asignación de geometría . . . . . 44
4.5.3. Controles de calidad a la geometría asignada . . . . . 45
4.6. Remuestreo . . . . . 55
4.6.1. Control de calidad del remuestreo . . . . . 56
4.7. Edición de trazas . . . . . 60
4.7.1. Control de calidad a la edición de trazas . . . . . 63
4.8. Correcciones estáticas . . . . . 68
4.8.1. Estáticas de elevación o de campo . . . . . 68
4.8.2. Estáticas de refracción . . . . . 71
4.8.3. Métodos para calcular las estáticas de refracción . . . . 71
4.8.4. Procedimiento para cálcular las estáticas de refracción 74
4.8.5. Resultados de los método DLT y GRM . . . . . 75
4.8.6. Control de calidad a las estáticas de refracción aplicadas 78
4.9. Recuperación de amplitudes . . . . . 81
4.9.1. Corrección por divergencia esférica . . . . . 81
4.9.2. Curvas de decaimiento de amplitud . . . . . 83
4.10. Control de calidad de la divergencia esférica . . . . . 85
4.11. Atenuación de Ruidos . . . . . 88
4.11.1. Filtro en el dominio F-K . . . . . 88
4.11.2. Estimación del espectro F-K . . . . . 89
4.11.3. Control de calidad al filtro F-K . . . . . 94
4.11.4. Filtro pasa-bandas . . . . . 96
4.11.5. Control de calidad al filtro pasabandas . . . . . 99
4.12. Deconvolución . . . . . 103
4.12.1. Filtro Wiener . . . . . 103
4.12.2. Autocorrelación . . . . . 103
4.12.3. Secuencia usada para aplicar la deconvolución a los datos sísmicos . . . . . 106
4.12.4. Control de calidad de la deconvolución . . . . . 109
4.13. Análisis de velocidades . . . . . 116
4.13.1. Script-shell para realizar el análisis de velocidades . . . 119
4.13.2. Secuencia del Picado de velocidades en producción con controles de calidad . . . . . 128

4.14. Estáticas residuales . . . . . 132
4.14.1. Cálculo y asignación de las estáticas residuales . . . . . 133
4.14.2. Resultado del cálculo de las estáticas residuales . . . . 138
4.15. Apilamiento . . . . . 139
4.15.1. Gather's CMP . . . . . 139
4.15.2. Normal Move Out (NMO) . . . . . 140
4.15.3. Mute . . . . . 143
4.15.4. Apilado . . . . . 143
4.16. Migración . . . . . 147
4.16.1. Migración Post-Stack en el dominio *T-K* . . . . . 147
4.16.2. Controles de calidad de la migración . . . . . 149

**5. Resultados** **152**

**6. Conclusiones y recomendaciones** **155**

**Bibliografia** **157**

# Índice de cuadros


3.1. Lista de identificación en el encabezado de la traza SEGY/SeiSee . . . . . 17
3.2. Lista de identificación en el encabezado de la traza SEGY/SU . . . . . 21

4.1. Resumen de la adquisición de los registros . . . . . 31
4.2. Reformateo Producción y QC . . . . . 34
4.3. Escritura en segy para visualizar en Seisee (QC) . . . 35
4.4. Edición de trazas y registros por reporte de observador . . . . . 37
4.5. Programa en FORTRAN 77 para cambiar de formato al archivo SPS-x; el programa se ejecuta enviando la salida a un archivo en la terminal con el comando: program > xfile . . . . . 39
4.6. Programa en FORTRAN 77 para asignar la topografía de campo de los SPS-r y SPS-s al archivo x generado 40
4.7. Extracción de la geometría a partir del encabezado de las traza . . . . . 41
4.8. Programa en FORTRAN para calcular los CDP's . . . . . 43
4.9. Asignación de geometría . . . . . 44
4.10. QC a geometría asignada (encabezado) . . . . . 45
4.11. Estimación de la velocidad de reemplazamiento (1) . . 47
4.12. Estimación de la velocidad de reemplazamiento (2) . . 48
4.13. Estimación de la velocidad de reemplazamiento (3) . . 49
4.14. Estimación de la velocidad de reemplazamiento (4) . . 50
4.15. QC a la geometría asignada (LMO) . . . . . 52
4.16. QC a geometría asignada (cobertura) . . . . . 54
4.17. Remuestreo de 2 a 4ms . . . . . 55
4.18. Cálculo de los espectros de amplitud antes y después del remuestreo . . . . . 56
4.19. Cálculo de los espectros de amplitud en $dB$ antes y después del remuestreo . . . . . 59

4.20. Edición de trazas . . . . . 60
4.21. Mute para eliminar el ruido antes de los primeros arribos . . . . . 61
4.22. Edición por amplitud RMS de las trazas . . . . . 62
4.23. Edición desde el encabezado duse=1 (trazas de producción) y duse=2 (trazas muertas o muy ruidosas) . . 63
4.24. duse=1 (trazas de producción) y duse=2 (trazas muertas o ruidosas) . . . . . 64
4.25. Calcula y asigna el encabezado las estáticas de elevación ($wevel$ = 1825 es la velocidad de reemplazamiento en m/s). . . . . 69
4.26. Divergencia esférica . . . . . 82
4.27. Curvas decaimiento de amplitud . . . . . 85
4.28. Filtro F-K . . . . . 89
4.29. Espectros F-K . . . . . 90
4.30. Pruebas de F-K . . . . . 93
4.31. Filtros pasabandas de prueba . . . . . 97
4.32. Filtro pasabandas . . . . . 98
4.33. Autocorrelación y autocorrelograma . . . . . 105
4.34. Deconvolución a los tiros . . . . . 106
4.35. Muestra para obtener una semblanza . . . . . 117
4.36. Muestra para obtener un CVS . . . . . 118
4.37. Análisis de velocidades . . . . . 125
4.38. Muestra, grafica una función de velocidad por CDP . . 129
4.39. Calcula las estáticas residuales . . . . . 133
4.40. Asigna las estáticas residuales y apila para comparar las imagenes . . . . . 135
4.41. Apilamiento bruto . . . . . 145
4.42. Migración aplicada . . . . . 148

# Índice de figuras


2.1. Tendido bilateral simétrico de 24 canales por PT (punto de tiro) . 5
2.2. Curva de tiempo de propagación para un reflector horizontal . . . 5
2.3. Geometría de la trayectoría de la energía sísmica a través de las capas de la superficie, representada en forma de rayos. . . . . 6
2.4. Distancia entre dos puntos . . . . . 9
2.5. Modelo geométrico con capas horizontales para NMO . . . . . 11

3.1. Propuesta para organizar un proyecto . . . . . 23

4.1. Representación del volumen de datos sísmicos . . . . . 24
4.2. Gráfico hipotético del apilamiento (modificado por Claerbout 1976), el cual representa singularmente una traza con el eje del tiempo perpendicular con respecto del plano de ésta página; la superposición de coordenadas Tiros-Receptores $(s, g)$ y Puntos medio - Offsets $(y, h)$, el plano $(y, h)$, se ha rotado 45º con respecto del plano $(s, g)$, y los puntos en el área, representan la cobertura usada en el perfil de los registros sísmicos a lo largo de los puntos medios del eje $(Oy)$. . . . . 25
4.3. Muestra de una hoja del reporte de Observador . . . . . 28
4.4. Descripción de los archivos SPS (r,s y x) . . . . . 29
4.5. Posición geográfica de la línea sísmica . . . . . 32
4.6. Perfil de elevaciones de Tiros y Receptores . . . . . 32
4.7. Muestra del EBCDIC . . . . . 35
4.8. Visualización de los registros en SeiSee sin ganancia . . . . . 36
4.9. Visualización de los registros en Sei See con ganancia . . . . . 36
4.10. Visualización de algunos PT's (punto de tiro) . . . . . 46
4.11. Primer análisis de velocidades de reemplazamiento . . . . . 51
4.12. Segundo análisis de velocidades de reemplazamiento . . . . . 51
4.13. Ejemplo de corrección estática LMO (fldr=315 es recuperado) . . 52
4.14. Cobertura nominal = 48 vs CDP . . . . . 53
4.15. Espectros de amplitud del remuestreo de 2 a 4 ms . . . . . 57
4.16. Espectros de amplitud de la Figura 4.15, en dB/lineal . . . . . 58

4.17. Graficas de las amplitudes RMS . . . . . 62
4.18. Gathers PT sin edición . . . . . 65
4.19. Trazas muertas y ruidosas editadas duse=2 . . . . . 66
4.20. Gathers sin trazas ruidosas o muertas duse=1 . . . . . 67
4.21. Apilado con estáticas de elevación . . . . . 70
4.22. Estáticas de los receptores: DLT . . . . . 75
4.23. Estáticas de las fuentes: DLT . . . . . 75
4.24. Estáticas de los receptores: GRM . . . . . 76
4.25. Estáticas de las fuentes: GRM . . . . . 76
4.26. Estáticas de los receptores: cálculadas con elevación (verde), DLT (rojo) y GRM (azul) . . . . . 77
4.27. Estáticas de las fuentes: cálculadas con elevación (verde), DLT (rojo) y GRM (azul) . . . . . 77
4.28. Apilado con estáticas obtenidas con el método GRM . . . . . 79
4.29. Apilado con estáticas obtenidas con el método DLT . . . . . 80
4.30. Curvas de decaimiento de amplitud; offset=0-500m . . . . . 83
4.31. Curvas de decaimiento de amplitud; offset 1000-1500m . . . . . 84
4.32. Curvas de decaimiento de amplitud; offset 2000-2500m . . . . . 84
4.33. Gathers PT brutos . . . . . 86
4.34. Gathers PT con divergencia esférica . . . . . 86
4.35. Apilamiento con divergencia esférica . . . . . 87
4.36. Espectros F-K con los parámetros de prueba del gather PT-362 . 91
4.37. Espectros F-K con los parámetros aprobados del gather PT-362 . 91
4.38. Prueba 1 de F-K con el PT-362 slope=-1.5,-0.06,0.06,1.5 . . . . 92
4.39. F-K seleccionado con el PT-362 slope=-0.6,-0.5,0.5,0.6 . . . . . 92
4.40. QC Gathers PT con filtro F-K slope=-0.6,-0.5,0.5,0.6 . . . . . 94
4.41. Apilamiento obtenido a partir de los PT's con filtro F-K . . . . . 95
4.42. Pruebas para seleccionar el filtro pasabandas . . . . . 96
4.43. Filtro pasabandas seleccionado con el PT-362 f=6,9,90,100 . . . 98
4.44. Espectros calculados antes y después del filtro pasa bandas . . . 100
4.45. PT con filtro F-K slope=-0.6,-0.5,0.5,0.6 y filtro pasa-bandas f=6,9,90,100 . . . . . 101
4.46. Apilamiento de los datos con filtro pasabanda . . . . . 102
4.47. Autocorrelograma de una traza autocorrelacionada . . . . . 104
4.48. Autocorrelograma, apilado con divergencia esférica de 500-3000 ms 104
4.49. Autocorrelograma inicial . . . . . 107
4.50. Sin múltiples de período largo . . . . . 108
4.51. Sin múltiples de período largo y de período corto . . . . . 108
4.52. Autocorrelograma final . . . . . 109
4.53. Espectros calculados antes y después de la deconvolución . . . . 111
4.54. Gathers PT's . . . . . 113

4.55. CDP's con la secuencia de deconvolución aplicada a,b,c y d respectivamente . . . 114
4.56. Apilamiento de los datos con deconvolución . . . 115
4.57. Análisis de velocidades: semblanza, CDP central 800 y CVS . . . 126
4.58. Función de velocidades $RMS$ y gather con NMO aplicado . . . 127
4.59. Campo de velocidades RMS [m/s] . . . 130
4.60. Campo de velocidades RMS suavizados [m/s] . . . 131
4.61. Apilado con estáticas residuales . . . 136
4.62. Apilado con el nuevo campo de velocidades . . . 137
4.63. Estáticas residuales de las fuentes . . . 138
4.64. Estáticas residuales de los receptores . . . 138
4.65. PT's con Geometría . . . 139
4.66. Gathers CMP . . . 140
4.67. Corrección NMO . . . 141
4.68. Gathers CDP con NMO sin mute . . . 141
4.69. Función de velocidades del gather CDP 1020 . . . 142
4.70. Gathers CDP con NMO y con mute . . . 143
4.71. Apilado en bruto (CDP-tiempo) . . . 146
4.72. Migración con amplitudes preservadas . . . 150
4.73. Migración con amplitudes ecualizadas . . . 151

5.1. Apilado de referencia, proporcionado por el cliente . . . 153
5.2. Apilado final obtenido de la secuencia de procesamiento aplicada 154

# R E S U M E N

En este trabajo se describe una secuencia básica de procesamiento desarrollada con el software libre Seismic Unix (SU), aplicada a datos sísmicos reales que corresponden a una línea 2D en el área Chiapas-Tabasco.

El capítulo 1 describe las generalidades para el desarrollo de este trabajo, y define el objetivo principal y los subsecuentes a este. El capítulo 2, contiene una breve explicación técnica de los términos más comunes que se usan en la industria de procesamiento sísmico. En el capítulo 3, se describe el sistema operativo Linux y el software de procesamiento Seismic Unix (software desarrollado en la escuela de Minas de Colorado). En el capítulo 4, se describe y desarrolla una secuencia básica estándar de procesamiento tal como se aplica en la industria sísmica.

Cada etapa de procesamiento del capítulo 4 contiene: teoría básica, los *SCRIPTS-SHELL* conocidos en la industria sísmica como *JOBS* que se generaron con módulos de *SU*, comandos de *LINUX*, programas en lenguaje *FORTRAN 77*, programas en lenguaje *AWK* y scripts con *GMT* (Generic Mapping Tools, por sus siglas en inglés) para visualizar mapas, además se muestran los controles de calidad y la importancia que tienen estos para el éxito del proyecto a procesar (en cuanto a la calidad de la información).

Algunos script-shell están basados en los *demos* y en el manual del software, otros se desarrollaron con propósitos de Control de Calidad (QC). Un ejemplo, es el scrip-shell para adquirir el campo de velocidades, se obtuvo de los demos incluídos en el software, se modificó y adaptó a los datos. En cada cuadro de los programas y de los script-shell se explica la función que realiza cada módulo o comando.

El uso de otros software libre, como *SeiSee* para el despliegue de los datos sísmicos para la visualización de las trazas (QC amplitudes) y el análisis interactivo de sus encabezados; los scripts en *GMT* que se usaron para graficar la topografía asi como las velociades sin interpolar; y en el caso de las estáticas de refracción, que se calcularon con el software comercial *PROMAX* debido a la falta de documentacion y a la falta de experiencia con los módulos, sirvieron de apoyo para cumplir con los objetivos de este trabajo.

Finalmente, conocer y desarrollar una secuencia básica de procesamiento; obtener, probar y aprobar los parámetros solicitados por los módulos, son aspectos que contribuyeron para obtener una imagen del apilado final con mayor estructura definida y mejor señal de 0 a 4 seg., respecto al apilado de referencia proporcionado por el cliente. Sin dejar de considerar las limitantes del software, se concluye que la secuencia de procesamiento y los controles de calidad descritos en esta tesis, son aplicables a cualquier proyecto de procesamiento básico, independientemente del software a usar y puede servir de apoyo a futuras tesis.

## A B S T R A C T

This dissertation work describes the processing sequence applied to real, 2D seismic data in the Chiapas-Tabasco area using Seismic Unix (SU).

Chapter 1 defines principal and subsequent goals of this work as well as the generalities that must be considered. Chapter 2 contains a brief technical description of the most common terms that are used in seismic processing. In chapter 3, the Linux operating system and the processing software Seismic Unix -developed at the Colorado School of Mines- are described. In Chapter 4, a basic standard processing sequence is developed as it is commonly applied in the industry.

Each processing step described in Chapter 4 contains: basic theory; the shell-scripts, i.e. jobs, have been obtained using the following tools: SU modules, Linux commands, and programmes coded with *FORTRAN 77*, *GMT* (Generic Mapping Tools, for maps visualisation), and *AWK* programming languages. Also, the importance of the quality control to the data and of timing for final delivery to the client is highlighted.

Some of the script-shells used are based on the demos and on the bibliography quoted on the software itself; other scripts were developed for Quality Control (QC) purposes. As an example, the script-shell used to carry out the velocity picking was obtained from the demos included, then modified to honour our sequence. The function of every module or command for each programme and script-shell is explained.

Free Seisee software has been used for displaying purposes. This software was useful for trace visualisation (amplitudes QC) and for interactive trace-header analysis. GMT-based scripts were used to plot the topography and the non-interpolated velocities. Refraction statics were calculated using the commercial software PROMAX due to the lack of available documentation and to the limited experience using the related modules.

Finally, knowing and developing a basic processing sequence, approving and testing the requested parameters by the modules, amongst other, were proven factors that contributed to obtain an improved image of the final stack, with a clearer structural image and enhanced shallow signal (0 to 4 sec) , compared to the reference stack provided by the client. Without ignoring the limits of the software, it can be concluded that the processing sequence and quality controls applied in this dissertation can be applied to any seismic project, no matter which seismic software is used, and might be useful for further thesis on this subject.

# Capítulo 1

# Introducción

## 1.1. Generalidades

Este trabajo describe la secuencia básica de procesamiento, aplicada a los datos de una adquisición sísmica 2D terrestre en el área Chiapas-Tabasco; para obtener una sección sísmica migrada (Post-Apilamiento en Tiempo).

Para desarrollar este trabajo se requirió cuidar el aspecto de la administración del proyecto; esto es: fijar los objetivos; planificar la secuencia de proceso, los recursos de máquina y software necesarios, y sobre todo los controles de calidad necesarios para obtener la imágen sísmica que requiere el cliente.

La adquisición de los datos se realizó en Mayo de 1993 por la Compañía Mexicana de Exploraciones, S.A. de C.V. (COMESA), con un sismógrafo sercel SN 368, la línea 2D alcanzó una longitud de 20 $km$, adquirida en dirección $W - E$, con tendido bilateral asimétrico de 96 canales, separación de 100 $m$ entre PT's y de 50 $m$ entre receptores, 7 $seg.$ de registro y un intervalo de muestreo de 2 $ms$.

Los recursos de máquina son: una Laptop Acer AMD con 2 Gb de RAM y disco duro de 100 Gb con sistema operativo Linux Fedora Core 4; el software de procesamiento es Seismic Unix ($SU$) versión 39, GMT (Generic Mapping Tools, versión 4.1.4 por sus siglas en inglés) para graficar, y SeiSee versión 2.14 como complemento para la visualización de los encabezados de los datos sísmicos. Todas estas aplicaciones son libres.

Seismic Unix es el software de procesamiento con licencia libre más conocido en la red (internet), la comunidad que trabaja y la que esta interesada en trabajar con SU es a nivel mundial, gracias a Jhon W. Stockwell este software es portable bajo cualquier sistema operativo y versión, además de dar apoyo en la página web; para usarse es recomendable apoyarse en otros software y lenjuages de programación.

## 1.2. Objetivos

- Obtener una sección sísmica migrada (Post-Apilamiento en Tiempo) de datos reales 2D terrestre con una secuencia básica de procesamiento de datos sísmicos usando el software libre Seismic Unix.

- Mostrar como se realiza esta actividad en un ambiente de producción en la industria.

- Mostrar los controles de calidad que se aplican en cada etapa de la secuencia de proceso y enfatizar su importancia.

# Capítulo 2

# Teoría

## 2.1. Método sísmico de reflexión

El método sísmico de reflexión 2D es una técnica de la exploración geofísica que consiste en generar ondas y medir el tiempo de viaje desde la fuente hasta cada geófono del tendido: si se conocen los tiempos de viaje y la velocidad de las ondas, entonces se pueden reconstruir las trayectorias de las ondas sísmicas para saber donde se originó la reflexión.

La técnica de campo utilizada es conocida como la del punto de reflejo común (PRC) o registro a desplazamientos sucesivos, es decir, el perfilaje continuo mantiene a los geófonos distribuídos generalmente a lo largo de una línea orientada hacia la fuente conectados a las entradas del amplificador del camión registrador y se usa la fuente. Los cables y puntos de tiro estan distribuidos de tal modo que no hay huecos en los datos que se numeran secuencialmente a lo largo de la línea símica y no por la traza que representa en el registro sísmico. Este método consta principalmente de tres etapas: la adquisición de los datos, el procesado y la interpretación.

El resultado del procesamiento de los datos sísmicos que posteriormente se interpretará depende de la calidad de los datos adquiridos en campo, del software, los algoritmos empleados durante la secuencia, la experiencia del geofísico analista y la supervisión del cliente.

## 2.2. Adquisición terrestre

Los parámetros de adquisición varían de acuerdo al área de intéres y a las condiciones superficiales y del subsuelo; estos se establecen al tratar de

obtener el mejor resultado a menor costo. Los parámetros de diseño son factores que influyen en la calidad de los datos sísmicos adquiridos en campo y se adecúan dependiendo de los objetivos del cliente (compañía pública o privada): el área y topografía del estudio, espesor de la capa intemperizada, cobertura, dirección del echado, distancia entre CDP's, etc.

Los parámetros de diseño ideales para cualquier adquisición, dependen de las consideraciones básicas y de los resultados de las pruebas hechas:

-Tipo de fuente a usar: explosivos (cantidad de carga, profundidad y número de pozos) o vibros (número de barridos, tiempo entre barridos, etc).

- La profundidad del pozo depende del espesor de la capa intemperizada.

-Diseño del tendido: lateral o bilateral, simétrico o asimétrico.

-Distancia existente entre Tiro-Tiro (proporciona el cubrimiento), Receptor-Receptor (proporciona la resolución espacial), Tiro-Receptor (fold o cobertura), Tiro-Primer Receptor (offset mínimo), Tiro- último receptor (offset máximo).

-Longitud de registro (profundidad de la zona de intéres).

-Intervalo de muestreo.

-Filtros que permiten una mejor resolución de la información (actualmente se prefiere no filtrar).

-Ganancia, etc.

-Para estudios 2D se diseñan patrones de detección para atenuar las ondas superficiales (Ground Roll).

Considerando un dispositivo bilateral de 24 canales a intervalos iguales, fuente explosiva y profundidad de pozo calculada (ver Figura 2.1); al detonar la carga de dinamita en un punto de tiro cualquiera, cada grupo de geófonos estima la componente vertical de la velocidad, generando una señal que depende del movimiento del suelo en las cercanías del grupo. El resultado neto es la generación de señales que proporcionan información acerca del medio en que se propaga a lo largo de los 24 receptores. La señal registrada en cada receptor se suma; para incrementar una relación conocida como señal-ruido (ver Figura 2.2).

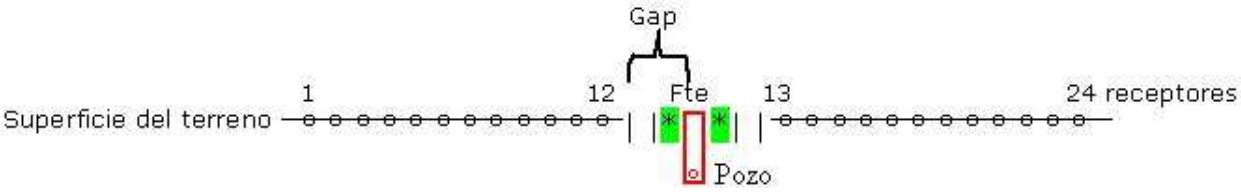



Figura 2.1: Tendido bilateral simétrico de 24 canales por PT (punto de tiro)

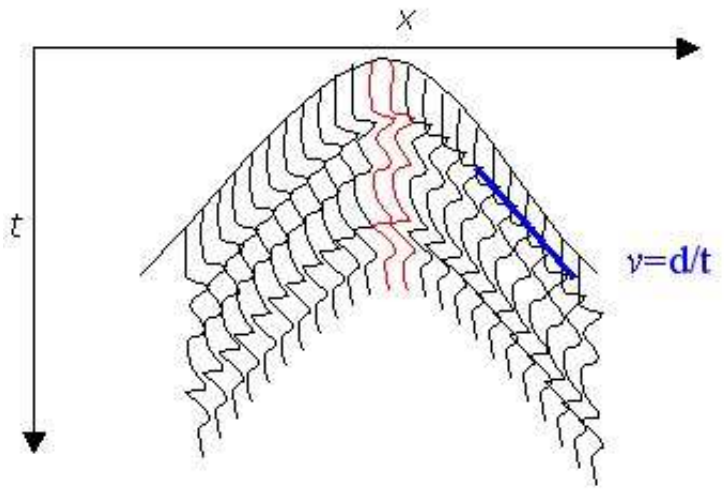



Figura 2.2: Curva de tiempo de propagación para un reflector horizontal

El cambio de las propiedades físicas en el subsuelo origina una reflexión en un registro sísmico (Gather PT -Punto de tiro-: conjunto de trazas que corresponden a un tiro), formando una hipérbola que relaciona el tiempo de llegada de cada arribo (t), la distancia para un reflector horizontal ($x$) y una velocidad constante ($v$) en un medio homogéneo e isotrópico (Figura 2.2).
El principio básico de la sísmica de reflexión lo describe la Ley de Snell:

$$\frac{V_1}{sen\alpha} = \frac{V_2}{sen\beta} \tag{2.1}$$

donde: $V_1$ = Velocidad del estrato superior
$V_2$ = Velocidad del estrato inferior
$\alpha$ = ángulo de incidencia y de reflexión
$\beta$ = ángulo de refracción o transmisión

La energía sísmica se propaga esféricamente a través de las capas de la superficie; para facilitar el estudio de los frentes de ondas estos se representan perpendicularmente como rayos de luz (ver Figura 2.3), los pulsos se deforman al pasar de un material a otro (refracción) y la distancia al reflector se calcula a partir del tiempo de arribo de la reflexión en el punto de tiro si se conoce la velocidad en un medio horizontalmente estratificado, homogéneo e isotrópico.

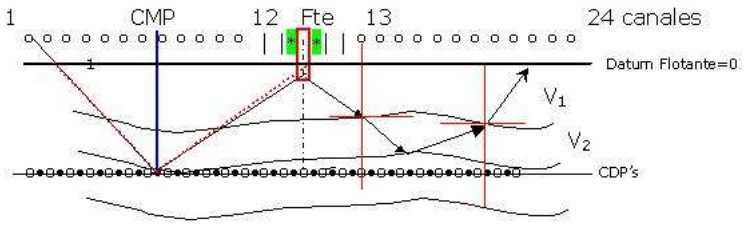



Figura 2.3: Geometría de la trayectoría de la energía sísmica a través de las capas de la superficie, representada en forma de rayos.

Principalmente las adquisiciones 2D se usan en estudios regionales y semidetalle de exploración, mientras que una adquisición 3D se aplica en estudios de detalle como localizaciones de oportunidades y caracterización de yacimientos.

## 2.3. Términos más comunes usados en la industria de procesamiento de datos sísmicos

A continuación, se describen los términos más comunes en la industria de procesamiento de datos sísmicos que se emplearon durante el desarrollo de este trabajo.

**Autocorrelación**: es un proceso que mide la similitud de una traza cuando se correlaciona consigo misma. Las funciones de autocorrelación son simétricas, debido a que el cambio de tiempo hacia la derecha es el mismo que el cambio hacia la izquierda, y se conciben como una medida de la repetitividad de la función.

**Amplitud**: en una traza sísmica el tamaño de la amplitud varia con el tiempo: las amplitudes de las ondas se debilitan conforme van alejándose de su

punto de origen: es lo que se conoce como divergencia esférica. Aunque la amplitud de las ondas decrece, su longitud de onda y su frecuencia permanecen invariables, ya que éstas dependen sólo de la fuente.

**Apilamiento**: es un proceso que consiste en sumar todas las trazas que tienen un mismo valor en su encabezado (CDP, Offset, etc) para obtener una sola traza (principio de superposición) ésta técnica por si misma también elimina ruido. Al conjunto de trazas sumadas se le conoce como **Apilado (stack)**.

**CDP (Common Depth Point**, por sus siglas en inglés**)**: es el punto de reflejo en el subsuelo donde ocurre la reflexión entre la fuente y el receptor; para el procesamiento 2D se numera a partir de la traza más cercana a la fuente del primer registro considerando la dirección de adquisición.

**CMP (Common Mid Point)**: es el punto medio en superficie entre la fuente y el receptor; para capas horizontales en el subsuelo CMP=CDP. En la industria sísmica se usan los términos como si fueran iguales.

**Cobertura (FOLD)**: representa el número de trazas pares fuente-receptor que se reflejan en un mismo CMP.

**Coherencia**: es la similitud de apariencia entre traza y traza en una ventana determinada de tiempo durante el intervalo en que la onda está arribando.

**Datum Flotante**: nivel de referencia al que se llevan los tiempos de reflexión en las posiciones fuente receptor para el cálculo de las velocidades de apilamiento.

**Energía**: la energía es representada por una fuente calculada (número de barridos ó kilogramos de dinamita, en el caso de estudios terrestres), que generará la suficiente transmisión de movimiento de partículas del suelo, originando un campo de ondas esférico.

**Espectro de amplitud**: es un gráfico que representa la parte real de la transformada de Fourier considerando una función continua $f(t)$; es decir, representa la amplitud de cada componente sinusoidal como una función de la frecuencia.

La transformada directa de Fourier de $f(t)$ es:

$$F(w) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-iwt}\, dt \tag{2.2}$$

donde: $i = \sqrt{-1}$

Entonces, la transformada inversa de Fourier de $f(t)$ esá dada por la ecuación:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(w) e^{iwt}\, dw \tag{2.3}$$

La transformada de Fourier es un proceso matemático que consiste en transformar una función del dominio del tiempo al dominio de las frecuencias. Si la función está en el dominio espacial, la transformada de Fourier transforma esta función al dominio del número de onda.

**Espectro de fase**: representa la fase de cada componente sinusoidal como una función de la frecuencia.

**Evento sísmico**: es el registro de la energía reflejada en superficie que produce aproximádamente el mismo efecto en cada geófono con variación sistemática de una traza a otra. Los eventos sísmicos se identifican o reconocen por tener coherencia, amplitud predominante, carácter, sobre-tiempo por inclinación y sobre-tiempo de distancia normal.

**Filtro**: reciben este nombre las herramientas que atenúan ruidos actuando en el dominio del tiempo por ejemplo: filtro pasa-bajas, pasa-altas y pasa-bandas o en el dominio frecuencia - número de onda (filtro F-K).

**Ganancia**: es una técnica de igualdad o normalización de las amplitudes que puede ser dependiente o independiente de los registros sísmicos; se considera a la ganacia como un escalar variante en el tiempo.

**Ganancia AGC**: está en función de la amplitud $RMS$ con un tiempo inicial específico de entrada de cada traza y consiste en multiplicar una muestra por un escalar, derivado de una ventana de datos seleccionada.

**Gap**: es la distancia que existe entre los receptores má cercanos al punto de tiro (Figura 2.1).

**Gather CDP**: conjunto de trazas que se forma al unir todas las trazas existentes con el mismo número de CDP.

**Gather PT -Punto de Tiro-**: la ubicación y la potencia de la fuente, en conjunto con la distribución de los geófonos conectados hasta el instrumento donde se graban las señales generadas por la transmision del movimiento de partículas del suelo, causado por la fuente, generan un gather PT o Tiro, comúnmente llamado sismograma.

**Ground roll**: se le conoce con este nombre al ruido (ondas de aire y ondas superficiales registradas) que se presenta en los gathers PT; este ruido es fácilmente identificable por tener frecuencias bajas y amplitudes altas.

**Intervalo de muestreo (SI por sus siglas en inglés)**: es el número de muestras grabadas en un intervalo de tiempo.

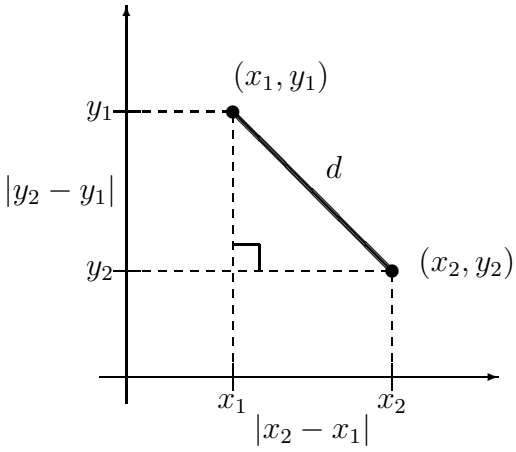
**Número de muestras (NS por sus siglas en inglés)**: es el número total de valores de amplitud registrados en una traza sísmica: $NS = RL/SI$.

**Longitud de registro (RL por sus siglas en inglés)**: es el tiempo total en que se graba una traza sísmica. $RL = (NS) * (SI)$.

**Múltiples**: son eventos sísmicos que han sufrido más de una reflexión en una misma interface.

**Mute**: corte que se realiza a los Gathers después de aplicar la corrección dinámica NMO para eliminar el ruido superficial en los offset lejanos.

**Offset**: es la distancia que existe entre el punto de tiro y un receptor, y se calcula a partir de las coordenadas respectivas.




$$offset = \sqrt{(y_2 - y_1)^2 + (x_2 - x_1)^2} \tag{2.4}$$

Figura 2.4: Distancia entre dos puntos

**Primeros arribos**: es la primera cresta de la ondícula que se registra al tiempo de llegada al receptor después de cada detonación y proporciona el criterio más importante para identificar reflexiones.

**Profundidad de pozo**: es la distancia que debe haber entre la superficie y el límite inferior donde se coloca la dinamita, y puede ser constante o variante dependiendo del espesor de la capa intemperizada, normalmente es el doble del espesor.

**Ruidos**: elementos ambientales, operacionales e instrumentales que se involucran en la perdida de energía proveniente de los reflectores, estos elementos se han clasificado en ruidos coherentes e incoherentes; es una de las razones principales del porque los datos se procesan.

**Semblanzas**: la semblanza es la respuesta del apilado en función del tiempo y de la velocidad.

**Señal**: término que se usa para identificar cualquier evento en el registro sísmico del cual se desea obtener información (onda reflejada), todo lo demás es ruido, incluyendo eventos coherentes que interfieren con la observación y

medición de las señales. La relación entre señal y ruido es la relación de la energía de señal en una porción especifica del registro y la energía total del ruido en la misma porción.

**Tiempo de arribo o tiempo de viaje**: se le conoce así al intervalo de tiempo que existe entre el instante de tiro y la llegada de la energía al grupo de geófonos, después de haberse transmitido por el subsuelo.

**Traza**: los datos registrados por un grupo de geófonos generan trazas cuando se suman, y cada una de ellas muestra la variación individual de un grupo de geófonos con respecto al tiempo posterior de cada tiro.

**Velocidad de Apilamiento**: valor de velocidad $RMS$ obtenido por el análisis de velocidad y se usa para aplicar la corrección dinámica NMO al CMP de apilamiento.

**Velocidad de Intervalo**: es la velocidad promedio en un intervalo entre dos reflectores; en una roca con cierta composición litológica varios factores como: la forma del poro, la presión del poro, la saturación de fluidos en el poro, la presión de confinamiento y la temperatura influyen en la velocidad de intervalo.

**Velocidad de la capa intemperizada o de reemplazamiento**: la capa intemperizada generalmente tiene un espesor de 4 a 50 mts en la zona de intéres y se caracteriza por tener una velocidad que varía de los 1650 a los 2000 m/s aproximadamente.

El método que se aplica para obtener esta velocidad consiste en seleccionar algunos tiros y ordenarlos por rangos de offset. Para obtener las clases de offset se aplica la siguiente ecuación:

$$CO = \frac{A - B + ICO - 1}{ICO} \tag{2.5}$$

donde: CO = clase de offset o rango de offset
A = offset máximo
B = offset mínimo
ICO = incremento entre rangos de offset

**Velocidad NMO**: para una capa horizontal con velocidad constante, la curva de tiempo de viaje como una función del offset es una hipérbola. La diferencia en tiempo entre el tiempo de viaje en un offset dado y en offset cero es llamada NMO (Normal Moveout por sus siglas en inglés). La velocidad requerida para corregir por NMO es llamada velocidad NMO.

$$t^2(x) = t^2(0) + \frac{x^2}{v^2} \tag{2.6}$$

**Velocidad RMS**: considerando un medio de capas horizontales, distintas velocidades y cada capa con cierto espesor, puede definirse en dos ejes ($offset\ cero$, $tiempo$). Las capas tienen velocidades de intervalo ($v_1,\ v_2, ....v_N$) donde: $N$ es el número de capas. Considerando que el rayo viaja desde la fuente ($S$) penetrando hasta el punto $D$ y regresa al receptor ($R$), asociado con el offset ($x$) y el medio punto ($M$).

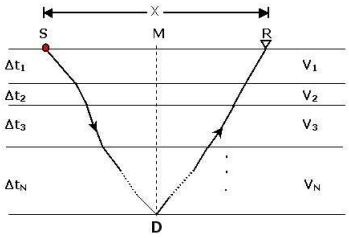



Figura 2.5: Modelo geométrico con capas horizontales para NMO

La ecuación del tiempo de viaje para este rayo se define como señala Geldart y Sheriff [2]:

$$t^2(x) = C_0 + C_1x^2 + +C_2x^4 + +C_3x^6 + ..., \tag{2.7}$$

donde: $C_0 = t^2(0)$,

$C1 = \frac{1}{v^2_{RMS}}$ y

$C_2, C_3...$ son funciones complicadas que dependen de los espesores y de las velocidades de intervalo de cada capa.

La velocidad $RMS$ ($v_{RMS}$) real para el reflector donde la profundidad del punto $D$ está situado, se define como:

$$v^2_{rms} = \frac{1}{t(0)} \sum_{i=1}^{N} v_i^2\ \Delta t_i(0), \tag{2.8}$$

donde: $\Delta t_i$ es la vertical en el tiempo.

la capa $i$th y $t(0) = \sum_{i=1} \Delta t_k$ hacen relativamente pequeño al offset comparado con la profundidad.

La serie de la primera ecuación puede resumirse a:

$$t^2(x) = t^2(0) + \frac{x^2}{v_{RMS}} \tag{2.9}$$

cuando comparamos

$$t^2(x) = t^2(0) + \tfrac{x^2}{v^2} \qquad \text{con} \qquad t^2(x) = t^2(0) + \tfrac{x^2}{v_{RMS}}$$

observamos que la velocidad requerida para la corrección NMO es igual a la velocidad $RMS$.

# Capítulo 3

# Plataforma de procesamiento Seismic Unix ($SU$)

## 3.1. Sistema Operativo Linux

La historia de Linux comenzó en 1984; en este año Richard Stallman, administrador de sistemas del MIT (Massachusetts Institute of Tecnology) comenzó a trabajar en el proyecto GNU (acrónimo recursivo que significa "No es Unix") con el objetivo de crear un sistema operativo completamente libre. El sistema GNU fue diseñado para ser totalmente compatible con el sistema operativo UNIX no libre, pero muy popular.

Para 1990, el sistema GNU basado en una arquitectura técnicamente estable (UNIX), ya tenía un editor de texto llamado EMACS, un exitoso compilador (GCC), y la mayor parte de las librerías y utilerías que componen un sistema operativo UNIX típico, como el sistema de edición de textos TeX y el sistema gráfico X Window, que pudieron ser adaptados y reutilizados; otros en cambio tuvieron que ser reescritos.

Stallman mencionó en el manifiesto GNU que existía "un núcleo inicial" pero que se necesitaba de muchos otros programas para emular "UNIX", es decir faltaba un componente clave llamado núcleo (kernel en inglés).

En 1991, Linus Torvalds un estudiante de 23 años de la Universidad de Helsinki, Finlandia empezó a escribir el núcleo del proyecto en ensamblador para posteriormente añadir el código en C; Linus con el objetivo de aprovechar los 32 Bits, la facilidad de multitarea que proporcionaba el 386 y eliminar las barreras del direccionamiento de memoria, logró incrementar

la velocidad del desarrollo de su idea y decidió distribuirlo bajo la licencia GPL (Licencia Pública General).

En Octubre de 1991, Linus anunció la primera versión ”oficial” de Linux, versión 0.02, e hizo un llamado en un foro de discusión en Internet dando a conocer la ejecución del shell *bash*, el compilador gcc de GNU, etc, bajo Linux. Desde entonces el sistema operativo Linux empezó a crecer rápidamente; múltiples programadores se unieron a Linus en el desarrollo, colaborando a través de Internet y consiguiendo paulatinamente que Linux llegase a ser un núcleo compatible con UNIX.

El núcleo Linux fue combinado con el sistema GNU, resultando un sistema operativo libre y completamente funcional; el Sistema Operativo formado por esta combinación es usualmente conocido como ”GNU/Linux”. Muchos de los componentes de Linux como drivers, protocolos o shell salieron del sistema operativo UNIX de libre distribución llamado FreeBSD, desarrollado en la Universidad de Berkeley [9].

Principales características del sistema operativo Linux:

**Shells**: Linux permite utilizar distintos tipos de shell programables; un shell es la interfaz, el modo de comunicación, entre el usuario y el sistema. es decir, es un lenguaje interpretado; los comandos o instrucciones que se introduzcan serán aceptados e interpretados uno por uno. Bash (Bourne Again Shell) es el shell más común en linux y el que normalmente se usa. Bash es la versión GNU del shell Bourne, que forma parte del Unix estándar, e incorpora características de los shell Korn (ksh) y C(csh); la principal diferencia entre estos, es la sintáxis de cada línea de comandos.

**Multi-tarea**: la multitarea no consiste en hacer que el procesador lleve a cabo más de un trabajo en el mismo instante de tiempo; un solo procesador no tiene esa capacidad; es el mismo sistema operativo el que se encarga de presentar las tareas al procesador de forma intercalada para que se ejecuten varias tareas simultáneamente, a lo largo de un determinado período de tiempo. Es decir, ejecutar un poco de esta, un poco de otra y así hasta completarlas todas. La velocidad de intercalación de los procesos es tan rápida que parece que se ejecutan en el mismo instante de tiempo. De esta forma se consigue un mayor aprovechamiento de la potencia de cálculo del procesador y de los recursos disponibles.

**Multi-usuario**: Con un sólo ordenador de gran potencia Linux permite acceder a varios usuarios al mismo tiempo a traves de terminales que distribuyen los recursos para todos los usuarios (actualización de las versiones de los programas, bases de datos, etc). En este trabajo se uso la distribución Fedora Core 4.0.

## 3.2. Software libre

Richard Stallman fundó la Free Software Foundation (FSF) para otorgar libertad a los usuarios y para restringir las posibilidades de apropiación del software con el objetivo de proveer soportes logísticos, legales y financieros al proyecto GNU.

La fundación software libre (Free Software Foundation), refiere el software libre a la libertad de los usuarios para ejecutar, copiar, distribuir, estudiar, cambiar y mejorar el software; de modo más preciso, se refiere a cuatro libertades de los usuarios del software: la libertad de usar el programa, con cualquier propósito; de estudiar el funcionamiento del programa, y adaptarlo a las necesidades; de distribuir copias, con lo cual se puede ayudar a otros, y de mejorar el programa y hacer públicas las mejoras, de modo que toda la comunidad se beneficie (para la segunda y última libertad mencionadas, el acceso al código fuente es un requisito previo) [9]. El software libre que se utilizó en este trabajo se describe a continuación:

## 3.3. GMT (Generic Mapping Tools por sus siglas en inglés)

GMT es un programa con código abierto que incluye una colección de aproximadamente 60 herramientas para manipular coordenadas geográficas y base de datos cartesianos (incluye filtrado, Gridding, proyecciones, etc) y la producción de archivos PostScript encapsulados (eps) que van desde simples ilustraciones de superficie con coordenadas XY a traves de mapas de contornos y perspectivas 3-D. GMT contiene aproximadamente 30 proyecciones cartográficas y transformaciones que incluye soporte de datos tal como GSHHS, costas, ríos y las fronteras políticas. GMT es desarrollado y mantenido por Paul Wessel y Walter HF Smith, con la ayuda de un conjunto glogal de voluntarios, cuenta con el apoyo de la Fundación Nacional de Ciencias. Es liberado bajo la licencia GNU General Public License. Este trabajo se realizó con la version 4.1.4. [6].

## 3.4. Seisee

SeiSee (antes llamado SeisView) es un programa cuyo código fuente no está disponible, pero es de descarga gratuita; visualiza los datos sísmicos en formato SEG-Y en pantalla (Windows 2000, XP, Vista, Linux + Wine) [8].

Características del programa:

- soporta estándar entero (2,4 bytes) e IBM float (4 bytes).
- muestra los formatos no-entero (1 byte), float IEEE (4 bytes).
- CGG Geovecteur disco SEG-Y format (.dat) (stg1).
- CWP/SU formato (Seismic Unix).
- muestra los datos sísmicos en diversos modos (área variable, densidad variable, color, etc).
- zoom en la imagen sísmica, control de ganancia AGC y etiquetado de configuración de ejes.
- imprime plot's.
- exporta la imagen en formato BMP y en PostScript.
- despliega el encabezado de las trazas en pantalla SEG-Y (formatos Integer * 1, * 2, * 4, IEEE flotante * 4, * 8, IBM flotante * 4 son compatibles).
- busca el valor de la traza grabado en el encabezado de la traza.
- muestra el editor texto para escribir y/o leer el EBCDIC; así como el editor binario del encabezado.
- control automático de ganancia (AGC).
- verifica la coherencia de los encabezados.
- escritura de archivos en formato SEG-Y (IBM-32).

El cuadro 3.1 contiene los principales encabezados que lee Seisee del archivo SEG-Y.

| ID | Descripción |
|---|---|
| FFID | Número de registro |
| SP | Número de PT |
| NVST | Número de canales |
| NHST | Número del receptor |
| CDP | Número de Common Depth Point |
| DU | Datos a usar: 1 - producción,<br>2 - prueba |
| WEVEL | Velocidad de reemplazamiento |
| DSREG | Offset |

Cuadro 3.1: `Lista de identificación en el encabezado de la traza SEGY/SeiSee`

## 3.5. Seismic Unix

En 1983, Jack k. Cohen y Shuki Ronen del Centro para el Fenómeno de Ondas (CWP, por sus siglas en inglés) en la Escuela de Minas de Colorado (CSM por sus siglas en inglés) pensaron en crear un software de procesamiento sísmico en sistemas de cómputo con ambiente basado en Unix escrito en lenguaje C, que podría extender el sistema operativo Unix a tareas de procesamiento e investigación; además ellos pensaron que fuera libre, con el código fuente completo disponible para todo el mundo; ellos comenzaron con el paquete SY creado por Einar Kjartansson y Shuki Ronen, mientras eran estudiantes en el Proyecto de Exploración en Stanford de Jon Claerbout. En 1985-1986 Cohen y Ronen crearon la primera versión de *SU*. Hasta Septiembre de 1992 SU fue usado primeramente en CWP. Primeras versiones de *SU* fueron instaladas en las compañías patrocinadoras de CWP. Una vez que SU fue liberado en internet, comenzó a ser utilizado por una comunidad mayor. El paquete es usado por geofísicos de exploración, sismólogos, ingenieros ambientales, desarrolladores de software y otros; *SU* es usado por científicos en compañías geotécnicas y grandes compañías de petróleo y gas y por académicos e investigadores de procesamiento de datos sísmicos y para desarrollo de software.

Jhon W. Stockwell hizo que este software fuera portable bajo cualquier sistema operativo y versión, actualmente da soporte a la página web http://www.cwp.mines.edu/cwpcodes.html del proyecto *SU*. En ella se encuentra disponible el manual [1] y el software con la licencia para descargarse de la red e instalarse en computadoras con características desde pentium III hasta la computadora más reciente y con mayor capacidad; y con cualquier versión del sistema operativo Linux.

### 3.5.1. Formato de los datos en Seismic Unix

Lista de identificación (Cuadro 3.2) de los principales campos en los encabezados de la traza SEGY/SU (al ejecutar el comando sukeyword -o) de acuerdo con los estándares de un formato SEGY:

| ID | Bytes ocupados | Descripción |
|---|---|---|
| tracl | 001-004 | Número secuencial de las trazas de toda la línea |
| tracr | 005-008 | Número secuencial de trazas dentro de la cinta |
| fldr | 009-012 | Número secuencial del registro de campo |
| tracf | 013-016 | Numeración de canales por registro de campo |
| ep | 017-020 | Número de tiro<br>-Se usa para identificar cuando más de un tiro se efectuó en el mismo punto. |
| cdp | 021-024 | Número calculado (i.e. CDP, CMP,...). |
| trid | 029-030 | Código de identificación de la traza:<br>-1 = Otra<br>0 = Desconocido<br>1 = Dato sísmico<br>2 = Muerta<br>3 = Ficticia<br>4 = Fuera de Tiempo<br>5 = Uphole<br>6 = Sweep<br>7 = Timing |
| nvs | 031-032 | Número de trazas sumadas verticalmente |

| | | |
|---|---|---|
| nhs | 033-034 | Número de trazas sumadas horizontalmente "Fold" |
| duse | 035-036 | Datos a usar:<br>1 = Producción<br>2 = Prueba |
| offset | 037-040 | Distancia medida desde la fuente al grupo de receptores (es negativo si es opuesto a la dirección en el que la línea fue tirada). |
| gelev | 041-044 | Elevación del grupo de receptores desde el nivel del mar (todas las elevaciones por arriba de la vertical del datum son positivas y por debajo son negativas). |
| selev | 045-048 | Elevación de la fuente en superficie. |
| sdepth | 049-052 | Profundidad de la fuente bajo la superficie. |
| sx | 073-076 | Coordenada de la fuente en X |
| sy | 077-080 | Coordenada de la fuente en Y |
| gx | 081-084 | Coordenada del receptor en X |
| gy | 085-088 | Coordenada del receptor en Y |

| | | |
|---|---|---|
| sstat | 099-100 | Corrección estática de la fuente en milisegundos |
| gstat | 101-102 | Corrección estática de los receptores en milisegundos. |
| tstat | 103-104 | Total de estáticas aplicadas en milisegundos. (Cero si la estática no se ha aplicado) |
| ns | 115-116 | Número de muestras |
| dt | 117-118 | Intervalo del muestreo en microsegundos |
| corr | 125-126 | Número del receptor de campo |
| year | 157-158 | Año de registro |
| day | 159-160 | Día Juliano del año |
| hour | 161-162 | Hora del día (24 horas) |
| minute | 163-164 | Minuto de la hora |
| sec | 165-166 | Segundo del minuto |

Cuadro 3.2: `Lista de identificación en el encabezado de la traza SEGY/SU`

## 3.6. Ambiente del proyecto

Mantener ordenado el proyecto ayuda a localizar fácilmente los Scripts, los datos sísmicos y/o las librerías (archivos de velocidad, estáticas, mute, etc) que se requieren durante el procesamiento o despúes de finalizado el proyecto. Es recomendable estructurar los directorios, de tal forma que sean fácilmente identificables para localizar el paso que deseamos recuperar, analizar, modificar, etc.

En la figura 3.1 se muestra una propuesta para estructurar los directorios y el contenido de cada uno de ellos, tal como se hizo en este trabajo. El directorio que contiene los scripts-shell tiene archivos con extensión *sh* (similar a EXE en windows); el directorio con los datos sísmicos tiene archivos con extensión *su* (para que los pueda leer SU) y archivos con extensión *segy* (formato estándar), y el directorio de las librerías contiene archivos que se generan para manipular encabezados, velocidades, estáticas, etc, y deben tener extensión *bin*; la geometría o atributos sísmicos tienen extensión *ascii*.

Es recomendable clasificar los scripts anteponiendo las letras (T, P ó Q) según considere el analista: producción (P), prueba (T) o control de calidad (Q), como se usa actualmente en la industria. En este trabajo el nombre de cada script (01P_segyread.sh) se asignó de la siguiente forma: número de script dentro de la secuencia, letra que clasifica, -guion bajo-, nombre del módulo principal, -.-, extension *sh*. El nombre de cada archivo con los datos sísmicos debe ser semejante al script que lo generó.

/home/name_local/NOMBRE_ESTUDIO/

- SCRIPT_SHELLS
  - REFORMATEO
    - → $01P_segyread.sh$
  - GEOMETRIA
    - → $02P_sushw_geom.sh$
    - → $03Q_sureduce_LMO.sh$
  - REMUESTREO
  - EDICION DE TRAZAS
  - ANALISIS DE VELOCIDADES
    - → $14T_suvelan.sh$
    - → $14P_suvelan.sh$
    - → $14P_suvelan_new.sh$
  - DIVERGENCIA ESFERICA
  - NMO
  - ESTATICAS DE REFRACCION
  - DECONVOLUCION
  - MIGRACION

- DATOS
  - REFORMATEO
  - GEOMETRIA
  - REMUESTREO
    - → $04P_resamp.su$
  - EDICION DE TRAZAS
  - ...
  - MIGRACION
  - SEISEE
    - → $04Q_resamp.segy$

- LIBRERIAS
  - GEOMETRIA
    - → *geometria.xls*
    - → *geometria.ascii*
    - → *geometria.bin*
  - ESTATICAS
  - VELOCIDADES

Figura 3.1: Propuesta para organizar un proyecto

# Capítulo 4

# Procesamiento

El objetivo principal del procesamiento de datos sísmicos, es obtener secciones sísmicas de buena calidad, es decir, extraer la señal útil y aumentar la relacion señal-ruido, para posteriormente proporcionar un análisis objetivo de los datos a interpretar y para auxiliar al geofísco interprete a responder las cuestiones ¿qué?, ¿dónde?, ¿qué tanto?, etc.

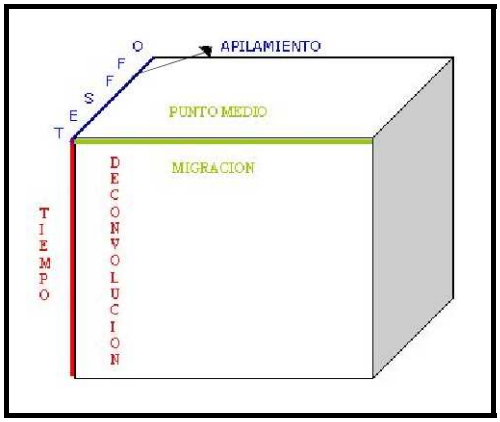



Figura 4.1: Representación del volumen de datos sísmicos

Yilmaz (1987) [7], menciona que las principales etapas del procesamiento: deconvolución, apilamiento y migración se pueden representar con una caja, como se muestra en la figura 4.1.

La ***deconvolución*** actúa a lo largo del eje del tiempo y logra incrementar la resolución de las trazas sísmicas por medio de la compresión de la ondícula sísmica básica (la fuente en función del tiempo se modifica por efectos de la tierra y sistemas de registro).

El ***apilamiento*** también es un proceso de compresión que actúa a lo largo del eje del offset. En partícular el volúmen de los datos de la figura 4.1 se reduce a un plano de punto medio - offset cero (la cara superior de la caja).

Antes de apilar, se aplica la correción dinámica NMO (Normal Moveout) a las trazas de cada CMP Gather. El resultado es una sección apilada (los términos sección apilada y apilamiento CMP a menudo se usan como sinónimos).

La ***migración*** es un proceso que consiste en mover los eventos a su posición verdadera colapsando las difracciones. Para migrar las secciones apiladas se usa la velocidad del medio.

El procesamiento de datos sísmicos inicia después de ordenar en CMP los datos sísmicos, es decir, las trazas que estan en coordenadas tiro-receptor, se transforman a punto medio-offset. Para realizar esta transformación se deben tener los tiros de campo con la geometría correcta, ver figura 4.2.

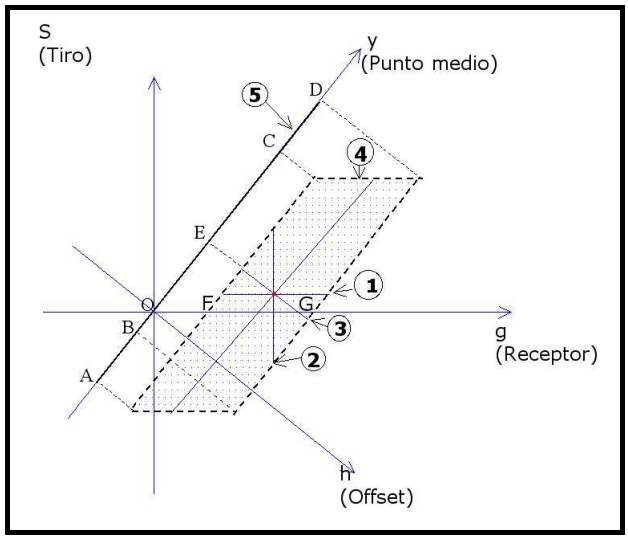



Figura 4.2: Gráfico hipotético del apilamiento (modificado por Claerbout 1976), el cual representa singularmente una traza con el eje del tiempo perpendicular con respecto del plano de ésta página; la superposición de coordenadas Tiros-Receptores $(s, g)$ y Puntos medio - Offsets $(y, h)$, el plano $(y, h)$, se ha rotado 45° con respecto del plano $(s, g)$, y los puntos en el área, representan la cobertura usada en el perfil de los registros sísmicos a lo largo de los puntos medios del eje $(Oy)$.

Los tipos de gathers identificados en la figura 4.2 son:

(1) un ghater PT común (paralelo a $g$) ,

(2) gather receptor común (paralelo a $s$),

(3) gather CMP (paralelo a $h$),

(4) una sección de offset común (paralelo a $y$) y

(5) una sección apilada CMP (línea gruesa $AD$).

Los segmentos representan:

(A-D) longitud de la línea adquirida.

(F-G) longitud del cable de registro.

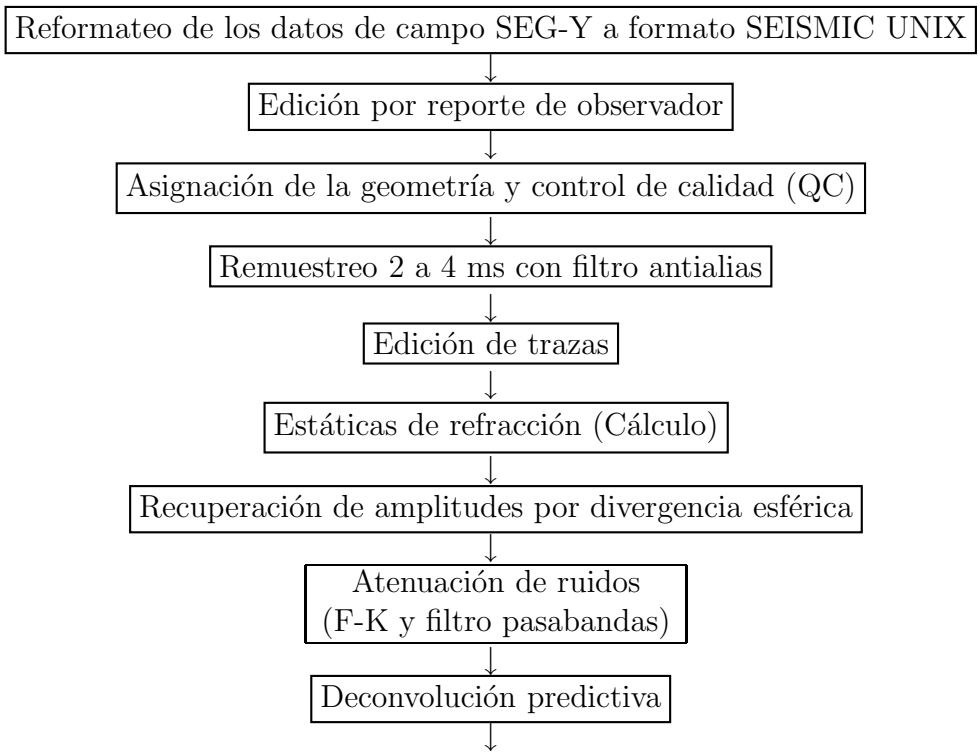
El número de puntos puestos a lo largo de los CMP gathers (cruce sección 3) es igual al fold CMP (cobertura).

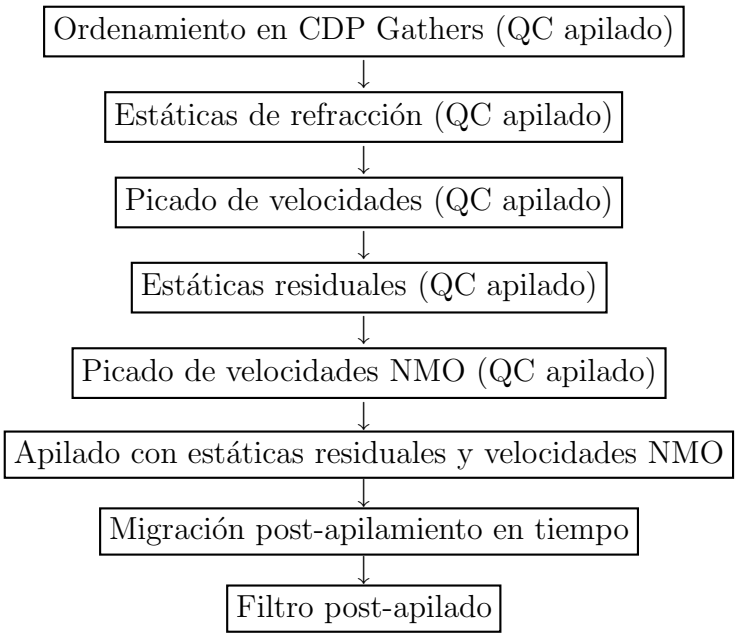
(A-B y C-D) baja cobertura grabada en los extremos del perfil sísmico.

(B-C) cobertura máxima a lo largo de puntos medios sobre este segmento.

## 4.1. Secuencia de proceso

En este proyecto se desarrolló una secuencia de procesamiento básica en tiempo que se describe en el diagrama siguiente:






En capítulos subsecuentes se da una explicación de cada proceso hasta obtener la sección sísmica representativa del subsuelo.

## 4.2. Información de campo

La información de campo consta de cintas o cartuchos de campo, reportes de observador y de tres archivos de topografia llamados SPS(r,s,x): r -receptores-, s -tiros- y x -dispositivo-. Esta información debe estar relacionada para garantizar su uso correcto.

### 4.2.1. Reporte de observador

El reporte de observador (Figura 4.3) describe y detalla los acontecimientos sucedidos en campo durante la adquisición de cada línea con la finalidad de explicar los resultados en los registros sísmicos de campo. En éste, también está descrito el dispositivo de cada tiro, secuencia en la que fueron tirados los registros (FFID), los números de receptores ocupados para cada tiro, además de incluir los cambios que se hicieron durante el levantamiento, tales como las recuperaciones, la razón por la que se tienen PT‘s repetidos, trazas muertas, trazas editadas, errores de grabación, tiros de prueba, etc. Toda esta información ayuda a determinar qué información considerar o cual desechar, cual renombrar o cual editar.

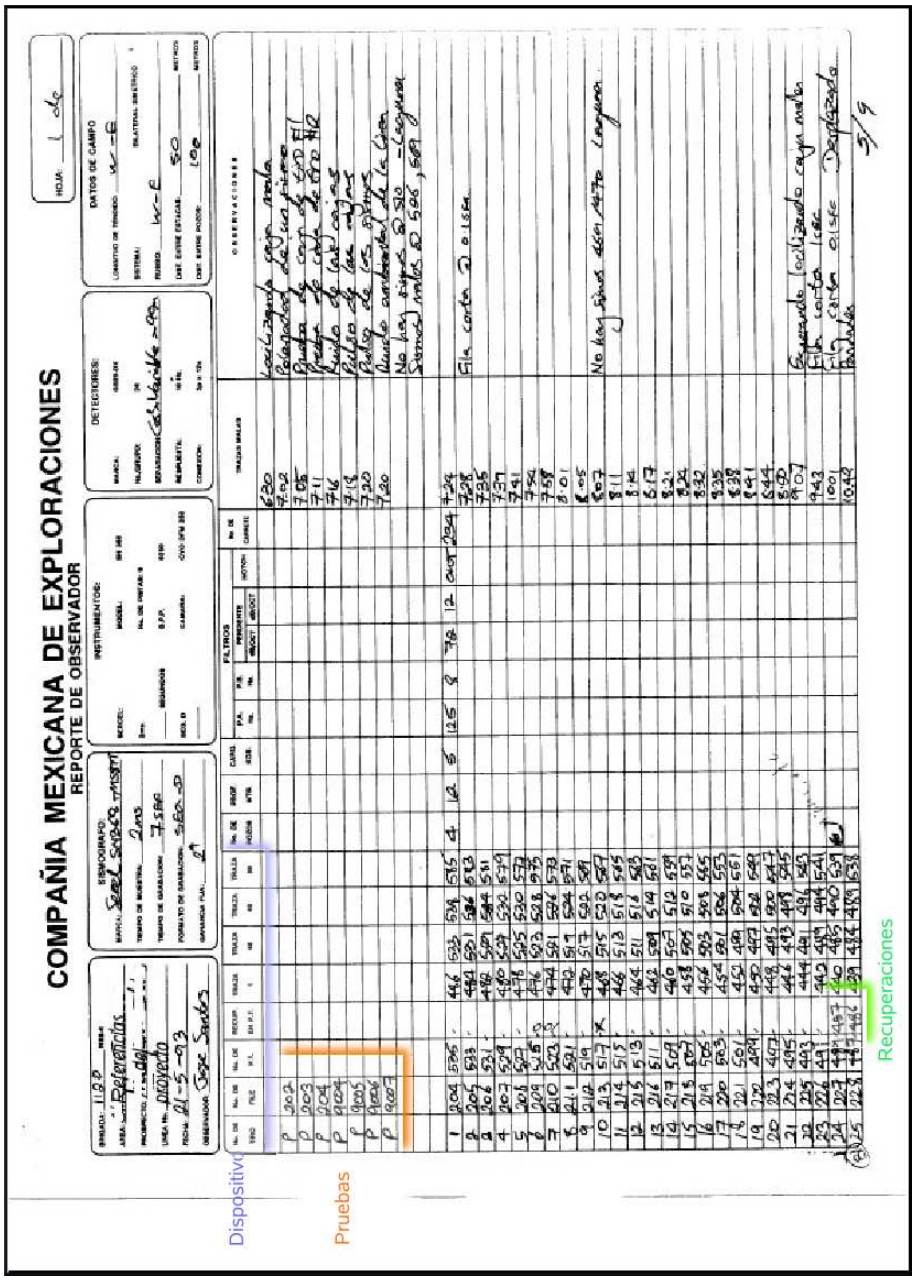



Figura 4.3: Muestra de una hoja del reporte de Observador

### 4.2.2. Topografía de campo (archivos SPS)

Los archivos SPS y el reporte de observador son archivos que contienen y describen la geometría que corresponde a los datos sísmicos de campo adquiridos en tiempo real.

En el caso de la topografía de campo existen los archivos llamados SPS (Shell Processing Support por sus siglas en inglés) que constan de 3 archivos que describen la geometría del dispositivo: posición de receptores (r), tiros (s) y dispositivo empleado respectivamente (x). Estos archivos se generan con estándares, lo que hace más fácil su lectura (Figura 4.4).

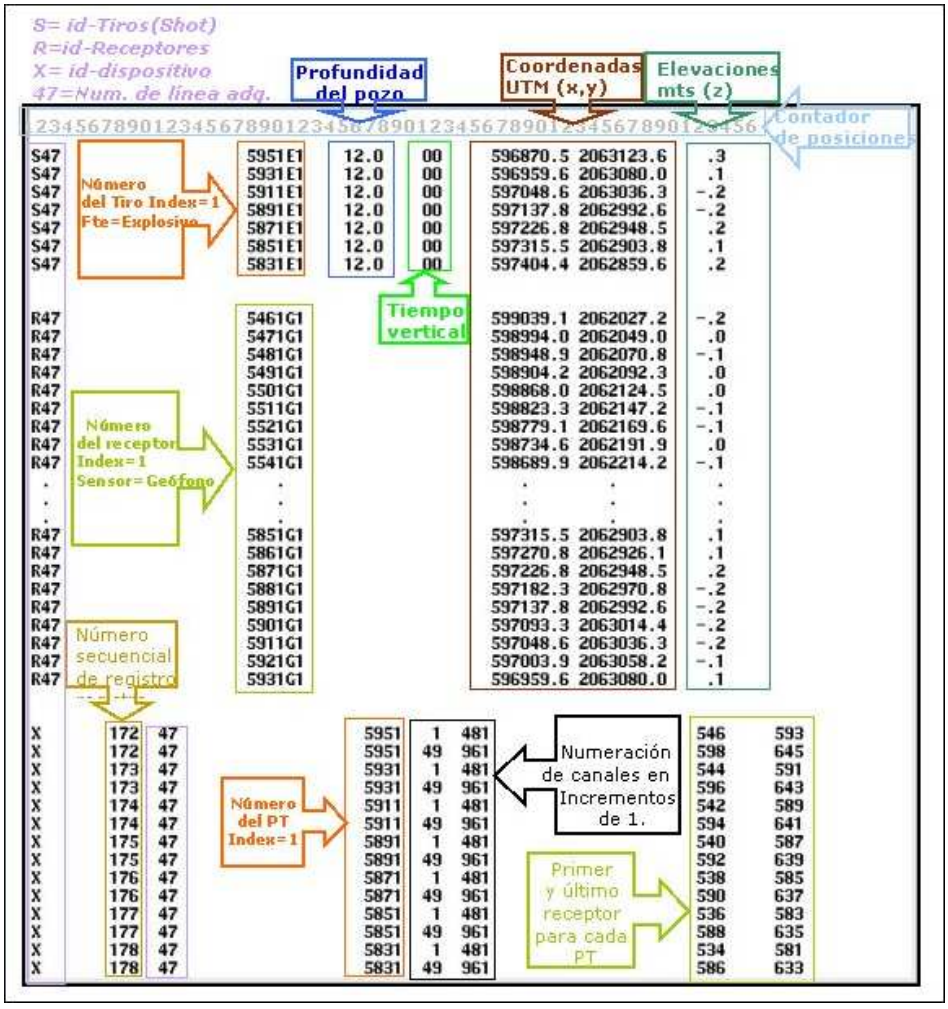



Figura 4.4: Descripción de los archivos SPS (r,s y x)

### 4.2.3. Cintas o cartuchos de campo

Los datos sísmicos de campo comúnmente se graban en cartuchos (3590); éstos contienen grabados los registros sísmicos con información relevante grabada en el encabezado de las trazas sísmica; del cual es necesario rescatar: el número secuencial de registro (fldr), número de tiro (ep), número de trazas por tiro (tracf), número secuencial de trazas grabadas (tracr), código de identificación de la traza (trid), número de muestras por trazas (nt), intervalo de muestreo (dt) y longitud de registro=$nt\ x\ dt$. El cliente proporciona copias digitales de los datos en formato SEG-Y o SEG-D.

### 4.2.4. Controles de calidad a la información de campo

Consiste en revisar el contenido de cada archivo SPS, y comparar la información que relaciona el reporte de observador con la topografía de campo (coordenadas de tiros y receptores) y con los datos sísmicos, tales como:

-Nombre del área,

-Nombre del estudio,

-Nombre de la línea adquirida

-Numeración secuencial de registro, de tiros y de receptores,

-Longitud de registro,

-Intervalo de muestreo,

-Fecha de adquisición, (cuando sea posible)

-Dispositivo (archivo $X$),

-Recuperaciones o ediciones realizadas durante la adquisición observadas en los datos sísmicos algunas veces no son especificadas en el reporte de observador.

El diseño del dispositivo y los parámetros de adquisición, se resumen en el cuadro 4.1, como parte del control de calidad.

| DESCRIPCION | UNIDADES |
|---|---|
| Fuente de energía | Dinamita |
| Tendido | Bilateral |
| Número de canales | 96 |
| Distancia entre fuentes | 100 $m$ |
| Distancia entre receptores | 50 $m$ |
| Cobertura | 48 |
| Intervalo de muestreo | 2 $mseg$ |
| Longitud de registro | 7 $seg$ |
| Número de muestras por trazas | 3500 |
| Número máximo-mínimo de tiros | 301-735 |
| Número máximo-mínimo de registros | 101-323 |
| Filtro pasa-bajas | 8 - 12 $Hz$. |
| Filtro pasa-altas | 75-125 $Hz$. |
| Filtro notch | 60 $Hz$. |
| Número total de trazas | 22200 |
| Km. lineales | 20 $km$ |

Cuadro 4.1: `Resumen de la adquisición de los registros`

La correspondencia existente entre toda la información de campo, asegura el correcto uso de esta información.

Graficar la topografía de campo (x,y,z) de tiros y receptores (Figuras 4.5 y 4.6) es la base para identificar la ubicación y dirección de la adquisición , el kilometraje levantado, el acimut, las coordenadas y/o elevaciones erróneas; en el caso del uso de explosivos se deben graficar la profundidad del pozo y el tiempo vertical.

Antes de proceder a corregir alguna anomalía encontrada en la topografía de campo, es conveniente analizar y revisar las observaciones del reporte de observador; de ser posible compararla con los datos sísmicos (tiempo de llegada) o deducir que sucedió en campo; la decisión tomada es posible verificarla durante el control de calidad de la geometría asignada.

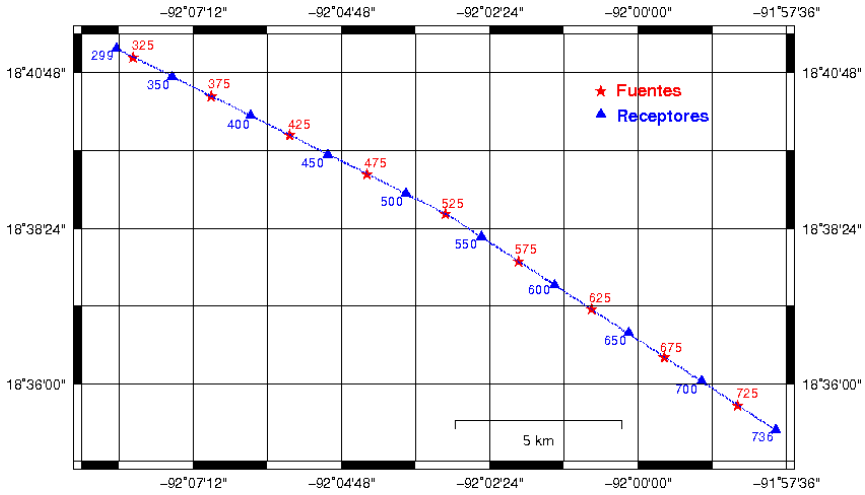



Figura 4.5: Posición geográfica de la línea sísmica

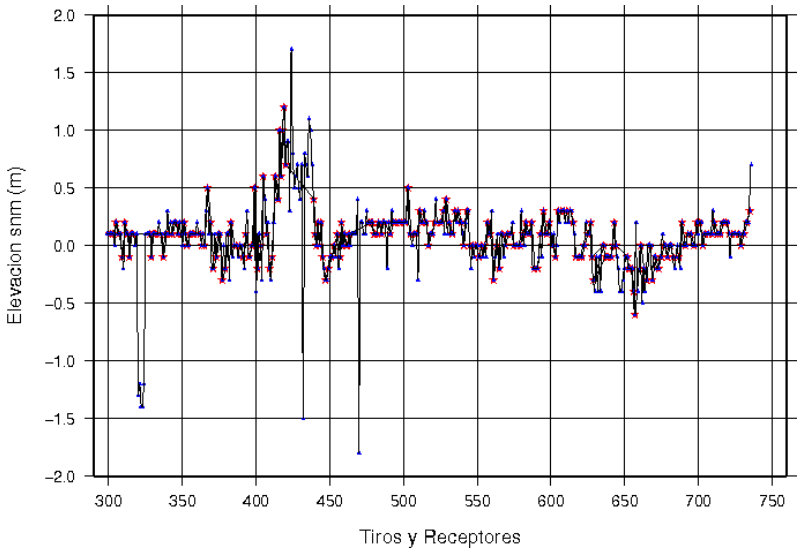



Figura 4.6: Perfil de elevaciones de Tiros y Receptores

## 4.3. Reformateo

Reformatear consiste en demultiplexar los datos sísmicos de campo, es decir cambiar de un formato secuencial por muestra a un formato secuencial por traza, proceso basado en la transpuesta de matrices. El resultado de $M^T$ puede leerse como: trazas sísmicas registradas a diferentes offsets, con un punto de tiro común en forma de conjuntos llamados registros de campo (FFID -File Field ID-, por sus siglas en inglés).

### 4.3.1. Formatos de grabación

Los datos sísmicos de campo se registran en modo demultiplexado en formato SEG-D o SEG-Y y en modo multiplexado en formato SEG-A, SEG-B o SEG-C; el formato de grabación más usual en campo es el SEG-D. Los datos sísmicos utilizados en este proyecto están grabados en formato SEG-Y.

En el encabezado de las trazas de cada registro debe grabarse el número secuencial de registro (FFID), número de PT, dispositivo o tendido usado en cada Punto de Tiro (número de canales y de receptores), y el tiempo real de grabación (año, día juliano, hora, minuto y segundo en el que fue registrado cada PT).

### 4.3.2. Formato SEGY

El formato SEG-Y es un formato de grabación estándar; en este formato se graban los diversos tipos de procesos aplicados a los datos sísmicos de campo (campo con geometría, gathers con deconvolución, gathers con NMO, etc).

La estructura de un archivo o cartucho SEG-Y está formada por 3 bloques: el primero de 3200 bytes, el segundo de 400 bytes, y el tercero describe el encabezado de las trazas sísmicas con ”N” bytes.

El bloque ***3200 bytes*** contiene el EBCDIC que consta, de 40 renglones con 80 espacios cada renglón, en este espacio se describen las referencias del estudio, el nombre del proceso, la compañía y año en el que fue procesado, la descripción de los bytes ocupados, etc.

En los ***400 bytes*** está grabado el número de muestra por traza, el intervalo de muestreo, tipo de formato (32 bytes, 16 bytes, IEEE, etc.) y el número de canales por PT.

El ***encabezado de la traza*** contiene toda la información descrita en el EBCDIC con 270 bytes disponibles para cada traza. La estructura del formato Seismic Unix es el mismo que el SEG-Y, sin los 2 primeros bloques.

En caso de tener varias cintas o archivos es suficiente con reformatear aleatoriamente una de ellas para saber como serán tratadas las otras cintas o archivos. En este caso los datos sísmicos de campo se encuentran contenidos en un CD.

El cuadro 4.2 muestra el script SU usado para reformatear los datos sísmicos, el módulo *segyread* lee el formato segy y lo escribe en formato SU, automáticamente rescata en un archivo nombrado "header", el EBCDIC (ver Figura 4.7) del archivo SEGY; para el caso contrario, el cuadro 4.3 muestra el script shell que genera un archivo SEGY a partir de un archivo SU con el módulo *segywrite*; el módulo *segyhdrs* genera el archivo "header" donde se debe escribir el EBCDIC.

Sólo para asegurar como primer control de calidad (QC) que la entrada es igual a la salida, se visualizan los datos en formato SEGY generados a partir de un archivo SU: las figuras 4.8 y 4.9 (opción AGC activada) muestran PT's de prueba y producción (FFID 9006, 9007, 204 al 209) visualizados con SeiSee.

**Scrip-Shell reformatear cualquier cinta de formato *segy* a formato *su***

```
#¡/bin/bash
#Nombre_Script: 01P_segyread.sh
 direc = /NOMBRE_ESTUDIO/DATA/REFORMATEO
#Lectura de la cinta en formato segy#
 segyread tape=$direc/300684.segy verbose=1 endian=0 conv=0
#Escritura en formato .su#
 > $direc/01P_segyread_300684.su
#Revisar el código de las trazas por tiro (QC)#
 sugethw  <$direc/01P_segyread_300684.su key=fldr,ep,trid | more
```

Cuadro 4.2: `Reformateo Producción y QC`

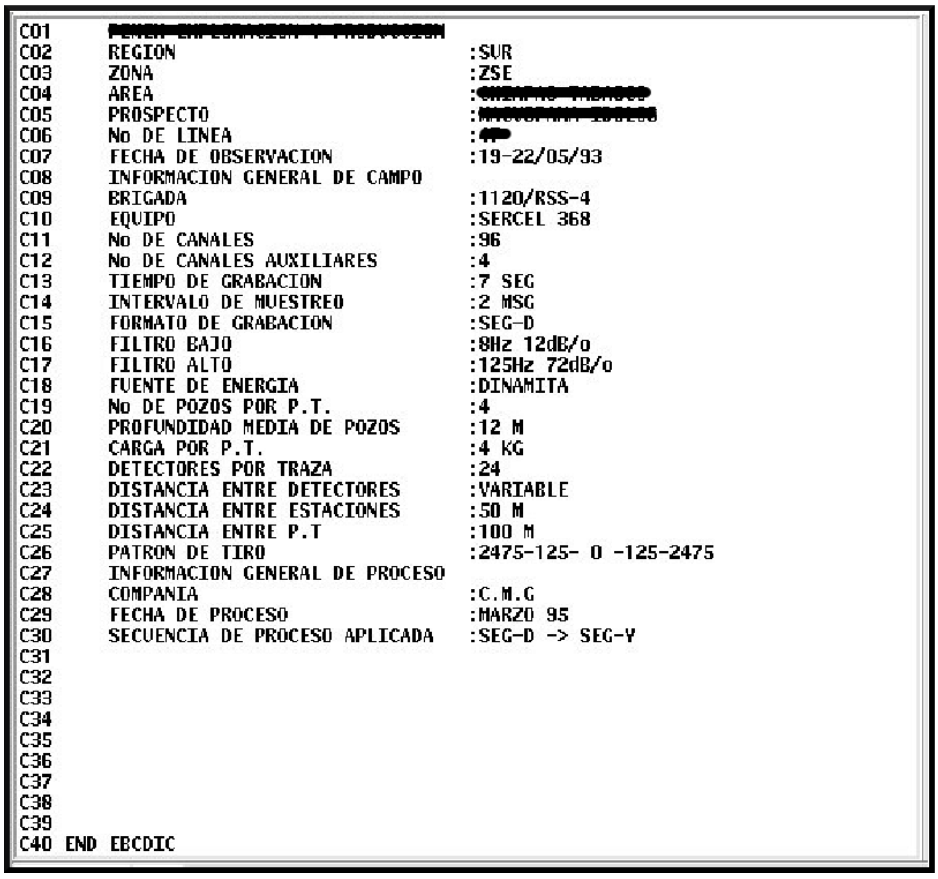



Figura 4.7: Muestra del EBCDIC

**Scrip-Shell visualizar en Seisee interactivamente los encabezados**

```
#¡/bin/bash
#Nombre_Script: 01Q_segywrite.sh
 direc = /NOMBRE_ESTUDIO/DATA/REFORMATEO
#Generar el EBCDIC de la cinta a grabar en SEGY#
 segyhdrs < $direc/01P_segyread_300684.su
#Escritura en formato segy#
 segywrite < $direc/01P_segyread_300684.su
 tape = $direc/01Q_segywrite_300684.segy verbose=1 endian=0
```

Cuadro 4.3: `Escritura en segy para visualizar en Seisee (QC)`

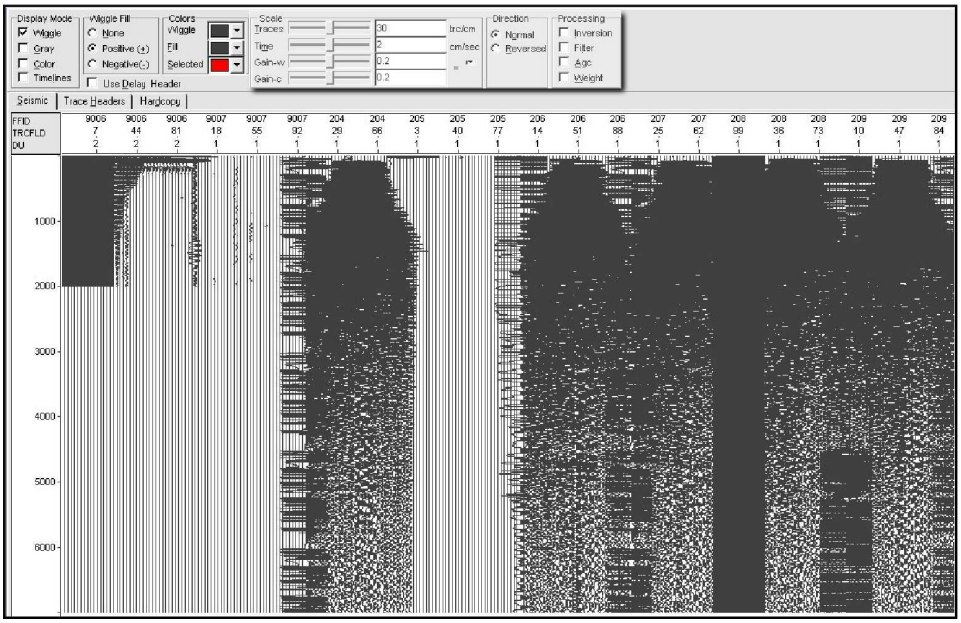



Figura 4.8: Visualización de los registros en SeiSee sin ganancia

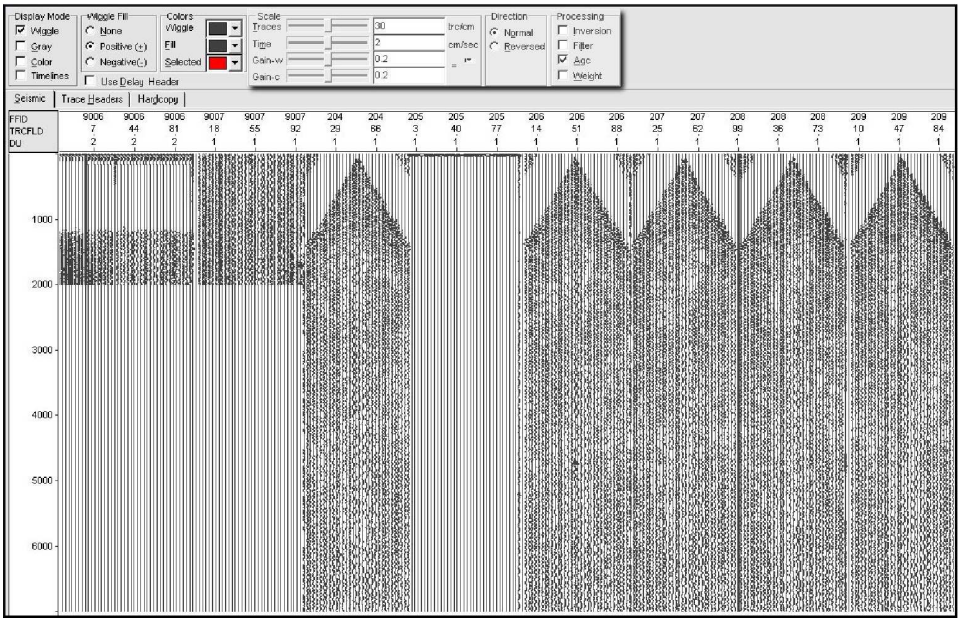



Figura 4.9: Visualización de los registros en Sei See con ganancia

## 4.4. Edición por reporte de observador

Los datos sísmicos además de contener los registros sísmicos de producción, también contienen registros de prueba $fldr \geq 9000$, trazas muertas $trid \neq 1$, trazas de prueba con $duse = 2$ o registros mal grabados mencionados en el reporte de observador; todas las trazas y registros con características de prueba o anómalas deben editarse (eliminarse) de los registros sísmicos, el script shell del cuadro 4.4 muestra la secuencia explicando la acción de cada módulo hasta obtener el número de trazas validas para obtener la geometría de los datos sísmicos de producción.

**Script-Shell Editar (eliminar) trazas y registros (FFID) invalidos de los datos sismicos por reporte de observador y encabezado de la traza**

```
#¡/bin/bash
#Nombre_Script: 01P_suwind_geom.sh
 direc =/NOMBRE_ESTUDIO/DATA/
 libre =/NOMBRE_ESTUDIO/LIBRERIA
#Editar trazas invalidos segun el encabezado de las trazas#
suwind  <$direc/REFORMATEO/01P_segyread_300684.su
 key=duse max=0 accept=1
 > $direc/EDICION/01P_segyread_duse1_300684.su
#Editar los registros invalidos segun reporte de observador #
suwind < $direc/EDICION/01P_segyread_duse1_300684.su
 key=fldr min=101 max=323 reject=205,227,231,etc
 > $direc/EDICION/01P_suwind_geom_300684.su
#Verificar nuevamente el numero de trazas y los valores minimos y
maximos de las trazas leidas#
surange < $direc/EDICION/01P_suwind_geom_300684.su
```

Cuadro 4.4: `Edición de trazas y registros por reporte de observador`

## 4.5. Geometría

La gemometría de los datos sísmicos esta contenida en la información de campo (sección 4.2). El proceso en esta etapa de procesamiento se describe en 2 pasos básicamente: generar y actualizar la geometría y asignar la geometría.

### 4.5.1. Generación y actualización de la geometría

Para generar una geometría correcta y completa es necesario tener toda la información de campo de la línea o del cubo a procesar. Los archivos SPS y el reporte de observador son los principales elementos para generar la geometría, el dispositivo grabado en el encabezado de los datos sísmicos corresponde al instante de la adquisición, por tal motivo el dispositivo del archivo SPS-x debe corresponder con el dispositivo extraído de los encabezados de las trazas sísmicas. Los tiempos de arribo en el display pueden ayudar a interpretar el dispositivo utilizado. A continuación se describe como se generó la geometría a partir de los archivos SPS y de los registros sísmicos.

Generar la geometría a partir de los archivos SPS consiste en relacionar los 3 archivos SPS (r,s,x) que contienen la información de la adquisición: a partir del dispositivo (spread) de cada tiro contenido en el archivo SPS-x se extrae de los archivos SPS-r y SPS-s la topografía de campo (coordenadas, elevaciones, profundidades de pozos y tiempos verticales); correspondientes a cada número de registro (fldr), con su respectivo número de tiro (ep), números de canales (tracr) y números de receptores (nhs) activos. Este paso se realizó con dos programas en lenguaje FORTRAN 77 (Cuadro 4.5 y 4.6) con la finalidad de generar una base de datos con la relación del dispositivo.

**Programa en FORTRAN para cambiar de formato al archivo SPS-x**

```
   integer, parameter nstore=10000
   real *8 ini(nstore),fin(nstore),a(nstore),b(nstore),
   N(nstore)
c ini= primer canal
c fin= ultimo canal
c a= primer receptor
c b= ultimo receptor
c N= incrementos en la numeracion de los receptores = 1
   integer ini,fin,a,b,N
   call leedatos(ini,fin,a,b,N)
   stop
   end
   subroutine leedatos(ini,fin,a,b,N)
   dimension ini(nstore),fin(nstore),a(nstore),b(nstore),
   N(nstore)
   open(1,file=
    *'/home/gcureno/EST_MACUSP_IDOLOS/SPS/SPS_Idolos1.x01',
   *,status='old')
   i=1
11 read (1, *,end=13, err=200)ini(i),fin(i),a(i),b(i)
   i=i+1
   goto 11
200 write(*, 12)
12 format('ERROR EN LECTURA')
13 N=i-1
   return
   end
```

Cuadro 4.5: Programa en FORTRAN 77 para cambiar de formato al archivo SPS-x; el programa se ejecuta enviando la salida a un archivo en la terminal con el comando: program > xfile

**Programa en FORTRAN que relaciona los SPS (r,s,x)**

```
  DIMENSION a(1000),b(1000),c(1000),d(1000),e(1000),f(1000),
  g(1000),h(1000)
  integer a,b,c,d,e,f,g,h,N
  open(1,file='recep',status='old')
  i=1
  N=1
11 read (1, *,end=13, err=200) a(i),b(i),c(i),d(i),e(i),f(i),
  g(i),h(i)
  write(*,14)a(i),b(i),c(i),d(i),e(i),f(i),g(i),h(i)
14 format( 'valores de a='s1,'b=',I3,'c=',I3, 'd='I3,
  'e=',I3,'f=',I3,
  g='I3,'h=',I3,'c=',I3)
  N=N+1
  i=i+1
  goto 11
200 write(*, 12)
12 format('ERROR EN LECTURA')
13 N=i-1
  do 15 i=1,N
  do 16 j=e(i),f(i)
  write(*, *)a(i),b(i),c(i),d(i),e(i),f(i),g(i),h(i),j(i)
16 continue
15 continue
  stop
  end
```

Cuadro 4.6: Programa en FORTRAN 77 para asignar la topografía de campo de los SPS-r y SPS-s al archivo x generado

Extraer la geometría a partir de los datos sísmicos consiste en extraer de los encabezados de las trazas sísmicas el dispositivo contenida en el archivo *su* generado después de la primera edición por reporte de observador (sección 4.4) con el módulo *sugethw* (Cuadro 4.7). Este paso también forma parte de la generación de la geometría.

**Script-Shell extraer la geometria a partir del encabezado de las trazas**

```
#¡/bin/bash
#Nombre_Script: 02P_sugethw_geom.sh
direc =/NOMBRE_ESTUDIO/DATA/
libre =/NOMBRE_ESTUDIO/LIBRERIA
sugethw < $direc/EDICION/01P_suwind_geom_300684.su
 key=tracl,fldr,ep,tracr,duse
 > $libre/GEOMETRIA/01P_geometria_300684.txt
```

Cuadro 4.7: `Extracción de la geometría a partir del encabezado de las traza`

Actualizar la geometría consiste en hacer coincidir la base de datos generada a partir de los archivos SPS con la lectura de la geometría del encabezado de las trazas sísmicas; con el reporte de observador a la mano se actualizan las coordenadas de los tiros recuperados, cambios de dispositivo, eliminar o renumerar algún o algunos tiros repetidos, etc y por último calcular el offset y numerar los CDP's.

En una hoja EXCEL se carga la geometría generada de los archivos SPS con la geometría extraida del encabezado de las trazas sísmicas, con el propósito de hacer coincidir ambas geometrías, comenzando con el número total de trazas de cada archivo para posteriormente actualizar la geometría.

El cálculo del offset de cada traza por fuente-receptor se hizo en la hoja de EXCEL con la ecuación 2.4 después de las actualizaciones de coordenadas en tiros recuperados, renumeración o edición de tiros repetidos, o cualquier otra modificación que haya tenido que hacerse antes de este cálculo.

Numerar los CDP de las trazas se hizo por medio de un programa en lenguaje FORTRAN que comienza a numerar los CDP's a partir de la traza más cercana a la fuente del primer registro considerando la dirección de adquisición

y la distancia media entre los receptores (Cuadro 4.8). El programa comienza con el $CDP = 100$, posteriormente suma el valor 600 a cada CDP calculado.

**Programa en FORTRAN que calcula el CDP para cada traza**

```
  parameter(nstore=30000)
  dimension sp(nstore),rec(nstore)
  character*80 inputfile
50 format(A80)
 open(1,file='009P_sugethw_gen_cdps_temp.ascii',
 status='old')
  i=1
  i=i+1
  goto 30
30 read(1,*,ERR=10,END=20)sp(i),rec(i)
10 write(*,40)
40 format('ERROR EN FORMATO')
  20 N=i-1
   write(*,*)'Numero de registros',N
   call generacdp(sp,rec,N,nstore)
   stop
  end
  subroutine generacdp(sp,rec,N,nstore)
  dimension sp(nstore),rec(nstore),rectmp(nstore),
  prom(nstore),
     *counter(nstore)
     open(2,file='salida.cdps',status='unknown')
     do 10 i=1,N
 c Numeros inicial y final del receptor
     rectmp(i)=49.-(((sp(i)-((sp(i)+rec(i))/2)-1.)*2.)+1.)
     if(rectmp(i).LE.48.)then
     else
     rectmp(i)=46+((sp(i)-((sp(i)+rec(i))/2))*(-2.))
     endif
     prom(i)=(sp(i)+rec(i))/2.
```

```
10 continue
    call minmax(prom,nstore,N,xmin,xmax)
    contador=100.0
    do 20 cdp =xmax,xmin,-0.5
    do 20 cdp =xmax,xmin,-0.5
    do 30 i=1,N
    if(prom(i).EQ.cdp)then
    counter(i)=contador
    endif
30 continue
    contador=contador+1.
20 continue
    do 40 i=1,N
    write(2,*)sp(i),rec(i),prom(i),cdp,counter(i),rectmp(i)
40 continue
    return
    end
    subroutine minmax(prom,nstore,N,xmin,xmax)
    dimension prom(nstore)
    xmin=1000000.
    xmax=0.
    do 10 i=1,N
    xmin=min(xmin,prom(i))
    xmax=max(xmax,prom(i))
    10 continue
    write(*,*)'Minimo:',xmin
    write(*,*)'Maximo:',xmax
    return
    end
```

Cuadro 4.8: `Programa en FORTRAN para calcular los CDP's`

El archivo de CDP's se agregó a la hoja EXCEL y se verificó la posición de cada CDP para cada traza; finalmente la hoja EXCEL con una columna por palabra del encabezado de toda la geometría actualizada se guardo en formato ASCII. El archivo con la geometría actualizada se cambia a formato *bin* con el módulo *a2b* para asignarla al encabezado de las trazas sísmicas.

### 4.5.2. Asignación de geometría

El "asignar la geometría", depende del software a usar, del dispositivo usado en la adquisición, y de la habilidad y experiencia del analista o del conocimiento del software con que se trabaja.

"Asignar la geometría" consiste en colocar en el encabezado de las trazas sísmicas toda la información de la adquisición: número de fuente; receptores, canales, offset, tendido (spread), elevación de fuentes y receptores, tiempo vertical, profundidad de los pozos, etc. El cuadro 4.9 muestra el script que asigna la geometría a los encabezados de los datos sísmicos.

**Script-Shell asignar la geometría**

```
#¡/bin/bash
#Nombre_Script: 02P_sushw_geom.su
 direc = /NOMBRE_ESTUDIO/DATA
 libre =/NOMBRE_ESTUDIO/LIBRERIA/GEOMETRIA
#Convierte el archivo ASCII con la geometria a formato binario#
# Total de columnas 15#
 a2b < $libre/Geometria_300684.ascii n1=15 > $libre/Geometria_300684.bin
# Asignar la geometría #
 sushw < $direc/EDICION/02P_suwind_geom_300684.su
 infile=$libre/Geometria_300684.bin
# Contenido de las 15 columnas#
 key=fldr,ep,sx,sy,selev,sdepth,nvs,nhs,gx,gy,gelev,offset,
 cdp,duse,trid > $direc/GEOMETRIA/02P_sushw_geom_300684.su
```

Cuadro 4.9: Asignación de geometría

### 4.5.3. Controles de calidad a la geometría asignada

El cuadro 4.10 muestra un script shell que lee los valores asignados para comprobar la integridad de la información.

**Script-Shell control de calidad a la geometría asignada**

```
#¡/bin/bash
#Nombre_Script: 02Q_sugethw_geom.sh
 direc =/NOMBRE_ESTUDIO/DATA
 libre =/NOMBRE_ESTUDIO/LIBRERIA/GEOMETRIA
#Extraer los mismos encabezados de las trazas sísmicas para#
# verificar los valores#
sugethw < $direc/GEOMETRIA/02P_sushw_geom_300684.su
 key=fldr,ep,tracf,tracr > $libre/02Q_sugethw_geom_300684.txt
#Verificar nuevamente el numero de trazas y los valores minimos y #
#maximos de las trazas leidas#
surange < $direc/GEOMETRIA/02P_sushw_geom_300684.su
```

Cuadro 4.10: `QC a geometría asignada (encabezado)`

a) Topografía de campo

Extraer del encabezado de la trazas las coordenadas (Figura 4.5) y elevaciones (Figura 4.6) de tiros y receptores, profundidad de pozos y tiempo vertical; graficarlos para compararlos contra la topografía de los archivos SPS. Este control de calidad garantiza que no hubo algún error al asignar la geometría.

b) Visualización de los datos sísmicos

En esta etapa del procesamiento es importante revisar algunos PT's de la línea para compobar la integridad de los datos sísmicos (ocupar bytes incorrectamente puede modificar a los datos sísmicos), así como verificar interactivamente con el software Seisee los encabezados actualizados. Ver Figura 4.10

c) LMO (Linear Moveout)

Además de comparar el total de las trazas sísmicas y de revisar el dispositivo asignado a cada PT, se requiere comprobar que las coordenadas asignadas

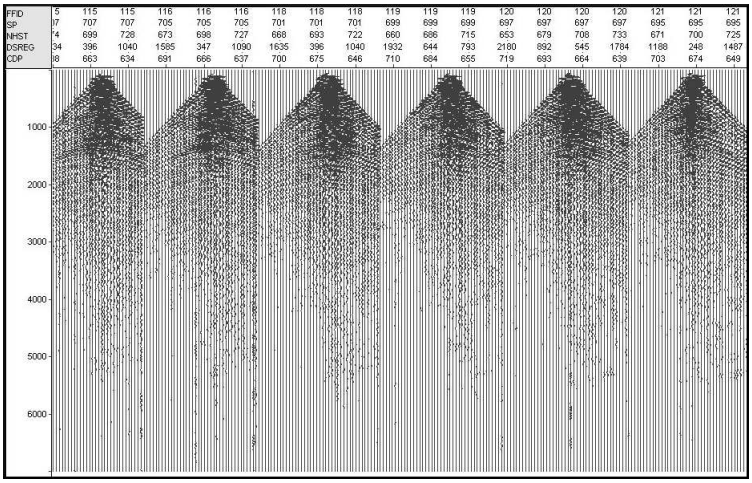



Figura 4.10: Visualización de algunos PT's (punto de tiro)

sean las correctas para cada traza. Para comprobarlo, es necesario aplicar una corrección estática llamada LMO a las trazas con offset cercanos entre 0 y 500 m (en este trabajo). El proceso consiste en calcular el tiempo de arribo $d/v$ donde $v$ es la velocidad de reemplazamiento; esta velocidad es la velocidad de la capa intemperizada y se puede estimar midiendo en los datos sísmicos la pendiente del primer arribo en los offset cercanos; sin embargo, el mejor procedimiento para estimar la velocidad de reemplazamiento consiste en generar un "SCAN" de trazas con LMO comparando varias velocidades.

El procedimiento para generar un "SCAN" es el siguiente (Cuadro 4.11):

1) Seleccionar un rango de tiros.

2) Generar 50 rangos de offset con la ecuación 2.5 sustituída en la fórmula 4.1 del módulo *suchw* de SU:

$$key1 = \frac{a + b(key2) + c(key3)}{d} \tag{4.1}$$

Se realizan varios pasos para modificar los valores de los siguientes encabezados de las trazas key1=cdp, key2=offset y key3=ep. El resultado del cálculo de los rangos de offset se asigna al encabezado cdp, es decir, los 50 rangos de offset numerados secuencialmente, por ejemplo: las trazas con offset entre 0-50 m les corresponde el valor 1, entre 50-100 m el valor 2, hasta llegar al offset máximo de las trazas; en key3=ep el valor corresponde el incremento en rango de offset igual a 50 y en key2=offset los valores no cambian.

**Script-Shell Análisis de velocidades**

**- Calcular 50 rangos de offset**

```
#!/bin/bash
#Nombre_Script: 03P_sureduce_Vel_reem.sh
 direc=/NOMBRE_ESTUDIO/DATA
#Seleccionar un rango de tiros#
suwind < $direc/GEOMETRIA/02P_sushw_geom_300684.su key=fldr
 min=303 max=308  > $direc/VSCAN/03P_suwind_pt_off.su
#Imprime en la consola de Linux los siguientes valores: #
 echo " cdp ep offset selec"
sugethw  < $direc/VSCAN/01P_suwind_pt_off.su key=cdp,ep,offset |
#Descartar cualquier letra y renglones vacios #
 sed -e 's/[a-z(=)]//g' | awk 'if (NF>0) print $0' | head
#Calcular el valor absoluto del offset #
suabshw  < $direc/VSCAN/03P_suwind_pt_off.su key=offset
 > $direc/VSCAN/03P_suwind_pt_off_abs.su
#Modificar el numero de PT y del CDP del encabezado de las trazas#
#Sustituyendo la ecuacion velocidad de reemplazamiento #
#en la ecuacion de suchw #
suchw  < 03P_suwind_pt_off_abs.su key1=ep a=50 b=0 c=0 |
suchw key1=cdp b=1 a=-99 > $direc/VSCAN/03P_suwind_suchw.su
 key2=offset c=1 key3=ep d=50
#Imprime en la consola de Linux los valores modificados: #
 echo " cdp ep offset cdp modificado"
sugethw  < $direc/VSCAN/03P_suwind_suchw.su key=cdp,ep,offset |
 sed -e 's/[a-z(=)]//g' | awk 'if (NF>0) print $0' | head
```

Cuadro 4.11: Estimación de la velocidad de reemplazamiento (1)

El procedimiento para el analisis de velocidades de reemplazamiento es el siguiente (Cuadros 4.12 y 4.13):

3) Ordenar las trazas por cdp y offset de los encabezados, esto es, por rangos de offset.

4) Aplicar un cambio estático de 1 segundo a todas las trazas con el módulo *sushift* para visualizar los resultados un segundo abajo de cero en el display.

5) Calcular los tiempos de arribo teóricos con el módulo *sureduce* usando distintas velocidades; con el offset de los encabezados el *sureduce* mueve estáticamente las trazas con respecto del tiempo de arribo calculado.

6) Asignar en el encabezado *wevel* la velocidad que corresponde a cada cálculo, en este caso la primera velocidad aplicada fue de 1400 m/s.

7) Sumar las trazas con el mismo rango de offset (cdp).

8) Guardar en un archivo *su* cada apilado con la velocidad usada por cálculo.

**- Comienza el análisis de velocidades**

###Velocidad de reemplazamiento 1400 m ###

#Aplica la correccion LMO: #

`susort` < $direc/VSCAN/03P_suwind_suchw.su `cdp offset`
> $direc/VSCAN/sort1.su

`sushift` < $direc/VSCAN/sort1.su `tmin=-1 tmax=4`
> $direc/VSCAN/shift1.su

`sureduce` < $direc/VSCAN/shift1.su `rv=1.4`
> $direc/VSCAN/reduce1.su

#Escribe wevel=1400 en el encabezado de la traza: #

`suchw` < $direc/VSCAN/reduce1.su `key1=wevel b=0 c=0 a=1400`
> $direc/VSCAN/suchw1.su

`sustack` < $direc/VSCAN/suchw1.su `cdp` > $direc/VSCAN/1400v.su

Cuadro 4.12: `Estimación de la velocidad de reemplazamiento (2)`

**-Se pueden incluir cuantas velocidades se deseen**

###Velocidad de reemplazamiento 1600 m ###

susort < $direc/VSCAN/01P_suwind_suchw.su cdp offset
> $direc/VSCAN/sort2.su

sureduce < $direc/VSCAN/sort2.su rv=1.6
> $direc/VSCAN/reduce2.su

suchw < $direc/VSCAN/reduce2.su key1=wevel b=0 c=0 a=1600
> $direc/VSCAN/suchw2.su

sustack < $direc/VSCAN/suchw2.su cdp > $direc/VSCAN/1600v.su

###Velocidad de reemplazamiento 1800 m ###

susort < $direc/VSCAN/01P_suwind_suchw.su cdp offset
> $direc/VSCAN/sort3.su

sushift < $direc/VSCAN/sort3.su tmin=-1 tmax=4
> $direc/VSCAN/shift3.su

sureduce < $direc/VSCAN/shift3.su rv=1.8
> $direc/VSCAN/reduce3.su

suchw < $direc/VSCAN/reduce3.su key1=wevel b=0 c=0 a=1800
> $direc/VSCAN/suchw3.su

sustack < $direc/VSCAN/suchw3.su cdp > $direc/VSCAN/1800v.su

###Velocidad de reemplazamiento 2000 m ###

susort < $direc/VSCAN/03P_suwind_suchw.su cdp offset
> $direc/VSCAN/sort4.su

sushift < $direc/VSCAN/sort4.su tmin=-1 tmax=4
> $direc/VSCAN/shift4.su

sureduce < $direc/VSCAN/shift4.su rv=2.0
> $direc/VSCAN/reduce4.su

suchw < $direc/VSCAN/reduce4.su key1=wevel b=0 c=0 a=2000
> $direc/VSCAN/suchw4.su

sustack < $direc/VSCAN/suchw4.su cdp > $direc/VSCAN/2000v.su

Cuadro 4.13: Estimación de la velocidad de reemplazamiento (3)

El procedimiento para determinar la velocidad de reemplazamiento es el siguiente (Cuadro 4.14):

9) Concatenar todos los archivos *su* generados con cada velocidad probada.

10) Escribir en formato SEG-Y la concatenación de los archivo *su* para visualizar los rangos de offset y su encabezado con SeiSee.

11) Seleccionar la velocidad de reemplazamiento que mejor horizontalice los primeros arribos.

**- Visualizar los rangos de offset apilados**

#Concatenar los archivos generados con las velocidades (apilados) #

`fcat` $direc/VSCAN/1400v.su $direc/VSCAN/1600v.su $direc/VSCAN/1800v.su $direc/VSCAN/2000v.su $direc/VSCAN/2200v.su

> $direc/VSCAN/03P_sureduce_Vel_reem.su

# Visualizar para seleccionar la Velocidad de reemplazamiento #

`suxwigb perc=93&`

#Cambiar de formato SU a formato SEGY para visualizan en SeiSee#

`segyhdrs` < $direc/VSCAN/03P_sureduce_Vel_reem.su

`segywrite` < $direc/VSCAN/03P_sureduce_Vel_reem.su `endian=0 tape=`$direc/SEGY/03P_sureduce_Vel_reem.segy

Cuadro 4.14: `Estimación de la velocidad de reemplazamiento (4)`

Los cuadros 4.12 y 4.13 contienen el script del primer análisis de velocidades de reemplazamiento, después de varias pruebas las velocidades que aproximaban a la horizontalidad a los rangos de offset fueron las siguientes: 1400 m/s, 1600 m/s, 1800m/s y 2000 m/s, los resultados se muestran en la figura 4.11.

Con base en la figura 4.11 (datos sísmicos resaltados) resultado del primer análisis de velocidad, se seleccionó la velocidad de 1800 m/s; para tener una velocidad de reemplazamiento más precisa, se realizó un segundo análisis alrededor de esta velocidad; con velocidades de 1775, 1800, 1825, 1875 y 1900 m/s como se muestran en la figura 4.12 (datos sísmicos resaltados), de este segundo análisis la velocidad seleccionada fue la de 1825 m/s.

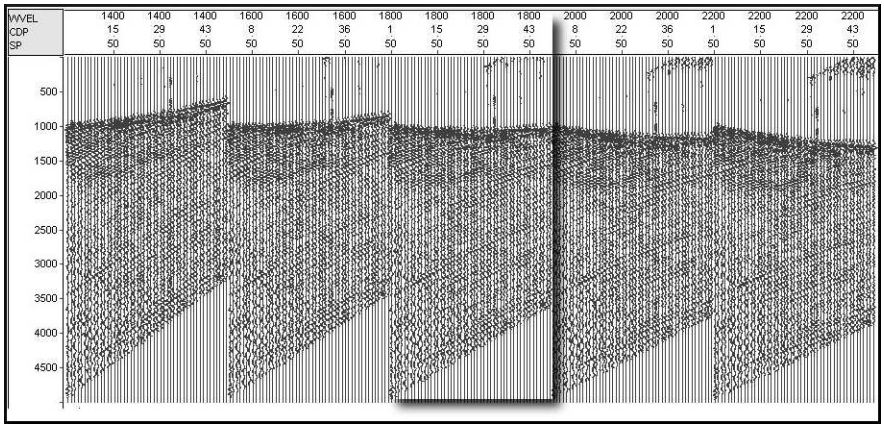



Figura 4.11: Primer análisis de velocidades de reemplazamiento

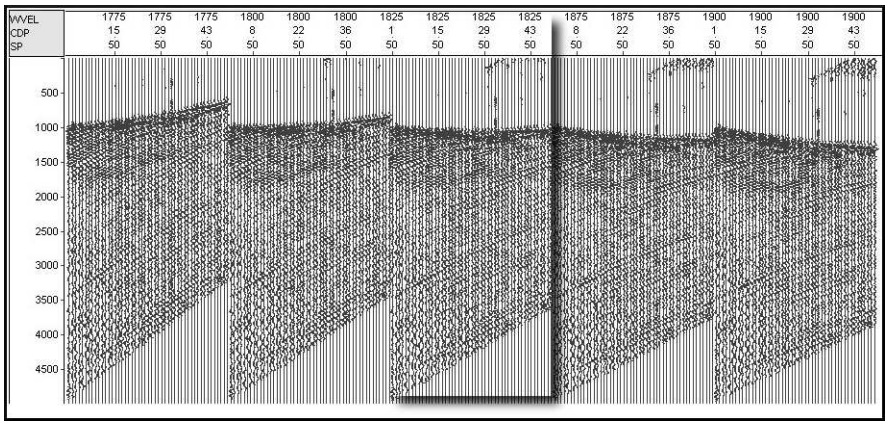



Figura 4.12: Segundo análisis de velocidades de reemplazamiento

Después de haber estimado la velocidad de reeemplazamiento; el QC' de la geometría consiste en aplicar la corrección estática LMO a TODOS los tiros (ver Cuadro 4.15), seleccionando los offset entre 0 y 500 metros que es la zona donde se horizontalizan mejor los primeros arribos.

El resultado serán PT's horizontales (Figura 4.13), cuando eso no sucede, es decir, que el PT sube o baja de 1 seg. ¡cuidado!, quiere decir que hay errores de geometría, y es necesario revisar el dispositivo (reporte de observador, SPS-x) y las coordenadas del PT. Estos errores son muy frecuente encontrarlos en PT's recuperados.

**Script-Shell Aplica la corrección estática LMO (Linear Move Out)**

```
#¡/bin/bash
#Nombre_Script: 03Q_sureduce_LMO.sh
 direc =/NOMBRE_ESTUDIO/DATA
#Seleccion por offset#
susort < $direc/GEOMETRIA/02P_sushw_geom_300684.su cdp offset
 > $direc/GEOMETRIA/temp1.su
suwind < $direc/GEOMETRIA/temp1.su key=offset min=0 max=500 |
#Ajustes para visualizar la imagen #
sugain tpow=1.5 |
sushift tmin=-1 |
# Aplicar la velocidad de reemplazamiento elegida y apilar#
sureduce rv=1.825 |
sustack key=cdp > $direc/GEOMETRIA/03Q_LMO_300684.su
suxwigb <$direc/GEOMETRIA/03Q_LMO_300684.su perc=93
windowtitle="1.825 Km/seg"&
```

Cuadro 4.15: `QC a la geometría asignada (LMO)`

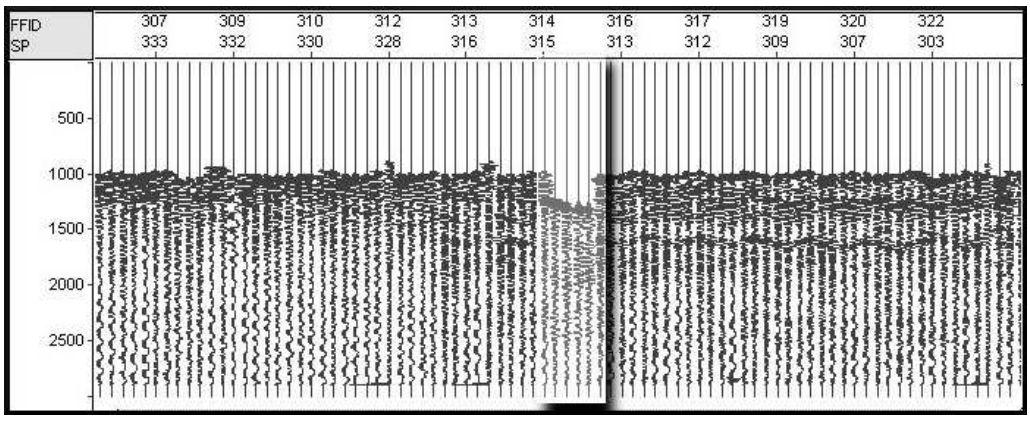



Figura 4.13: Ejemplo de corrección estática LMO (fldr=315 es recuperado)

La figura 4.13 muestra el rango de tiros (SP) 303-333 con FFID 307-322 respectivamente; en la figura se observa que el FFID 315 (trazas resaltadas) se encuentra por debajo del primer segundo, lo que podría suponerse que es un tiro recuperado, y que las coordenadas del tiro no se cambiaron a donde realmente fue disparado; esto se comprobó con el reporte de observador. Cuando esto sucede es necesario actualizar el archivo ASCII con la geometría y volver a cargarla en los encabezados.

d) Cobertura

La cobertura (Figura 4.14), representa el número de veces que en un mismo CDP se reflejan las trazas (tiro-receptor), con desplazamientos sucesivos.

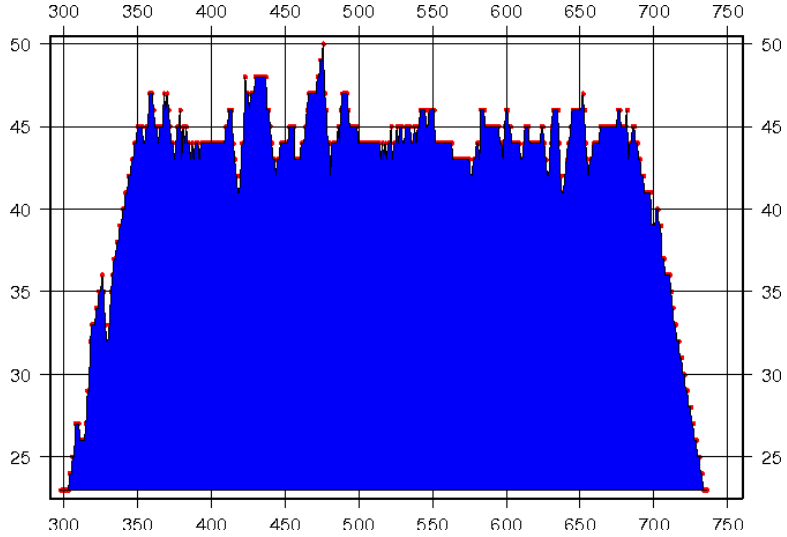



Figura 4.14: Cobertura nominal = 48 vs CDP

El gráfico de la cobertura se obtiene ordenando el archivo que contiene unicamente los números de CDP, se cuenta el número de veces que aparece cada CDP, y se grafican las dos columnas resultantes (Cuadro 4.16).

Los puntos que están por arriba de la cobertura promedio indican que fueron recuperados adelante del tiro correspondiente respecto de la dirección de la línea; por el contrario, los tiros que fueron recuperados antes de la posición del tiro estan por debajo de la cobertura promedio. Las pendientes de los extremos derecho e izquierdo corresponde a los tiros ubicados en los extremos de la línea adquirida.

**Script-Shell graficar la cobertura**

```
#¡/bin/bash
#Nombre_Script: 04Q_cobertura.sh
 direc= /NOMBRE_ESTUDIO/DATA
#Extraer la numeracion de CDP's#
sugethw < $direc/GEOMETRIA/02P_sushw_geom_300684.su key=cdp |
#Contar el numero total de veces que se utilizo cada CDP#
 sed -e 's/[a-z(=)]//g' | awk ' {if (NF >0) print $1}' |
 sort | uniq -c | awk '{print $2,$1}' > temp1
#Graficar la cobertura con GMT#
psxy -JX6i/4i -R297.5/736.5/22.5/50.5 -Ba50f50g50/a5f5g5
 -Sc0.1 -G250/0/0 -K > $direc/GEOMETRIA/04Q_cobertura.ps
psxy temp1  -JX6i/4i  -R297.5/736.5/22.5/50.5  -W0.2p  -V
 -O  >> $direc/GEOMETRIA/04Q_cobertura.ps
kghostview $direc/GEOMETRIA/04Q_cobertura.ps&
```

Cuadro 4.16: QC a geometría asignada (cobertura)

## 4.6. Remuestreo

El muestreo mínimo 2 ms permite la recuperación completa de la forma de onda, los regímenes de muestreo 2 y 4 ms permiten registrar fielmente debido a que ninguno de los espectros queda abajo de 250 y 125 $Hz$, respectivamente. Cualquier frecuencias presente en la señal, que sea mayor que la frecuencia de Nyquist, será indistinguible de la frecuencia más baja $F_N$ [3].

El intervalo de muestreo de los datos sísmicos grabados en campo es de 2 $ms$, la frecuencia de Nyquist con este intervalo de muestreo es de 250 $Hz$ y se calcula con la siguiente ecuación:

$$f_N = \frac{1}{2\Delta T}$$

al remuestrear a 4ms

$$f_N = \frac{1}{2(0{,}004)}$$

$$f_N = 125Hz;$$

de esta forma se eliminan frecuencias arriba de 125 $Hz$, ahorrando espacio en disco y tiempo al ejecutar los procesos. Antes de realizar el remuestreo de 2 a 4 $ms$ se aplica un filtro antialias; en este trabajo se aplicó un filtro pasa bandas corte bajo 2 - 6 $Hz$ y corte alto 100 - 120 $Hz$; el script se muestra en el cuadro 4.17.

**Script-Shell remuestreo de 2 a 4 ms**

```
#!/bin/bash
#Nombre_Script: 04P_suresamp.sh
 direc=/NOMBRE_ESTUDIO/DATA
#Filtro pasabandas antialias#
sufilter < $direc/GEOMETRIA/02P_sushw_geom_300684.su
 f=2,6,100,120 verbose =1 |
#Remuestreo de 2 a 4 ms#
suresamp < nt=1750 dt=0.0004 verbose=1
 > $direc/REMUESTREO/04P_suresamp_300684.su
```

Cuadro 4.17: `Remuestreo de 2 a 4ms`

### 4.6.1. Control de calidad del remuestreo

Graficar el espectro de amplitud de algunas trazas permitirá observar la nueva frecuencia de Nyquist de 125 Hz.

Con el módulo *suspecfx* se calculó el espectro de amplitud de la traza 810 antes y después del remuestreo (ver cuadro 4.18) para una visualización rápida, tal y como muestra en la figura 4.15.

**Script-Shell espectros de amplitud antes y despues del remuestreo**

```
#!/bin/bash
#Nombre_Script: 04Q_suresamp.sh
 direc=/NOMBRE_ESTUDIO/DATA
#Grafica el espectro de amplitud de un gather PT antes del
remuestreo#
 suwind < $direc/GEOMETRIA/02P_sushw_geom_300684.su
 key=tracr min=810 max=810 |
suspecfx verbose=1|
suxgraph markesize=1 title="Intervalo de muestreo=2"
 label1="Frecuencia [Hz]"
 label2="ESPECTRO DE AMPLITUD" width=300 height=600 &
#Grafica el espectro de amplitud de un gather PT despues del
remuestreo#
suwind < $direc/REMUESTREO/04P_suresamp_300684.su
 key=tracr min=810 max=810 |
suspecfx < verbose=1 |
suxgraph Title="Intervalo de muestreo = 4"
 label1="Frecuencia (Hz)"
 label2="ESPECTRO DE AMPLITUD" width=300 height=325 &
```

Cuadro 4.18: Cálculo de los espectros de amplitud antes y después del remuestreo

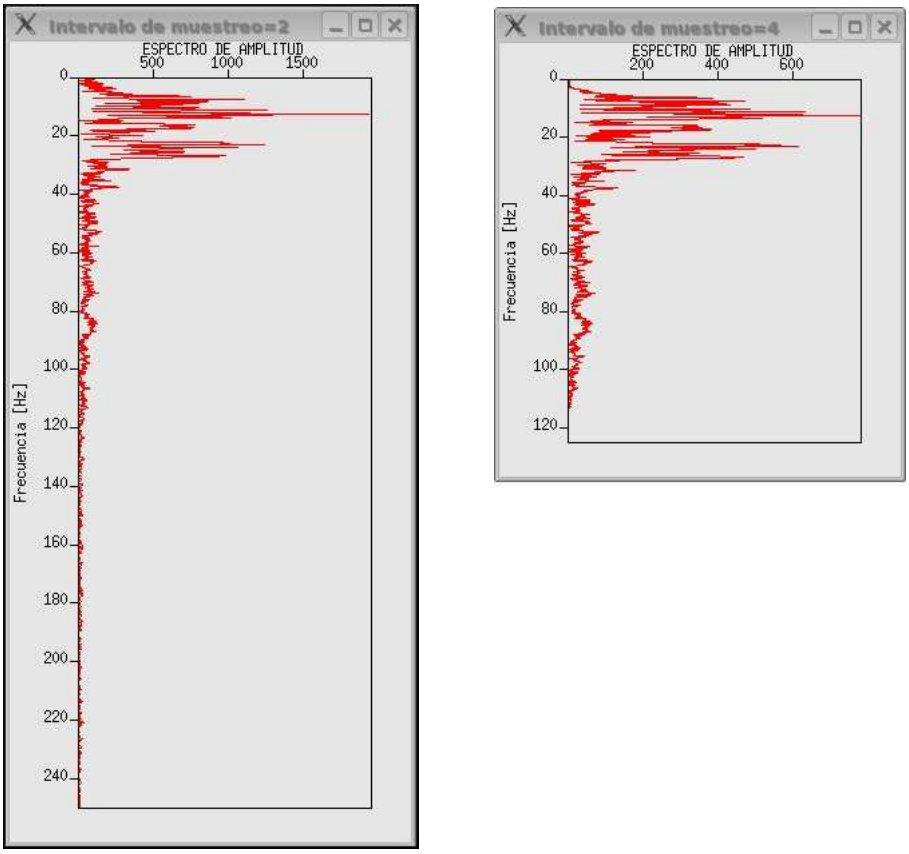



Figura 4.15: Espectros de amplitud del remuestreo de 2 a 4 ms

En la industria sísmica los espectros se verifican en amplitud (Figura 4.15), en $dB$/octava y en $dB$/lineal (ver Figura 4.16); para esto se aplican secuencialmente varios módulos, como lo muestra el script del cuadro 4.19.

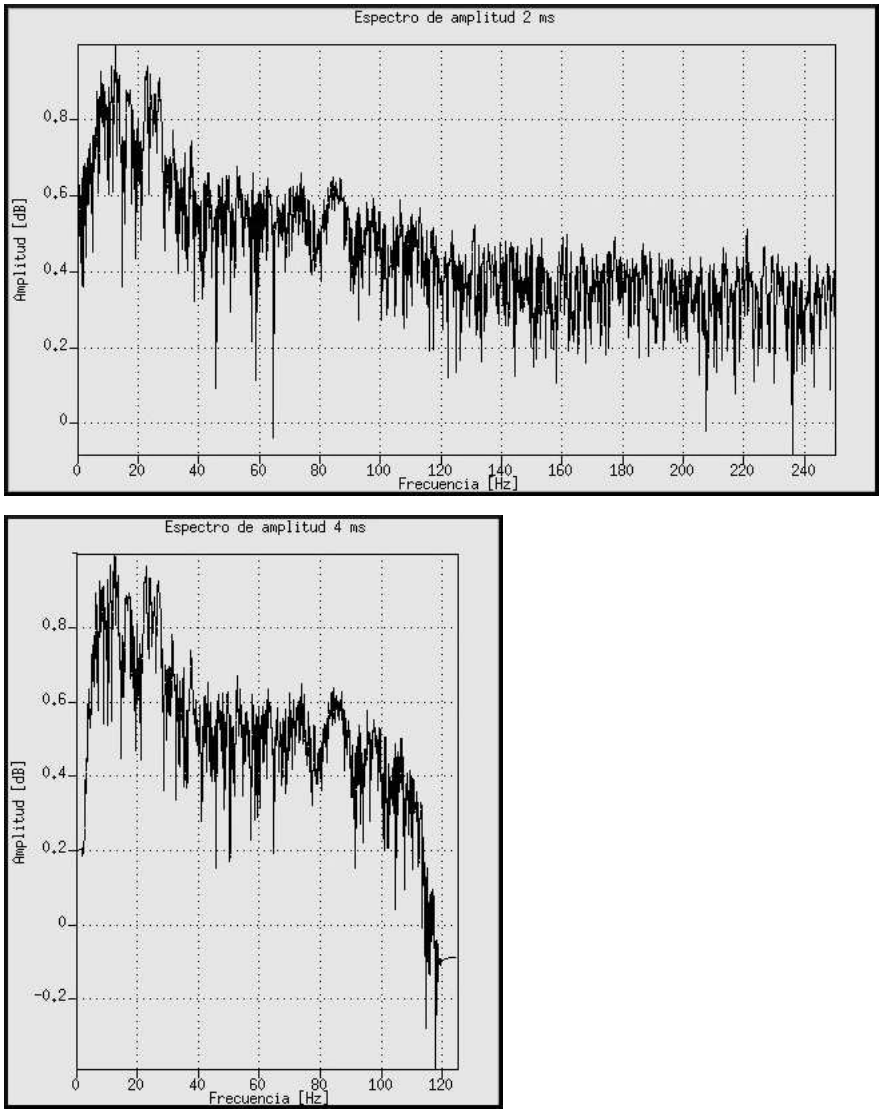



Figura 4.16: Espectros de amplitud de la Figura 4.15, en dB/lineal

**Script-Shell espectros de amplitud en $dB$/lineal antes y despues del remuestreo**

```
#!/bin/bash
#Nombre_Script: 04Q_suresamp_dB.sh
 direc=/NOMBRE_ESTUDIO/DATA
# Antes del remuestreo #
suwind < $direc/GEOMETRIA/01P_sushw_geom_300684.su key=tracr
 min=810 max=810 verbose=1 |
sufft |
suamp mode=amp |
suop op=db |
suop op=norm |
suchw key=cdp a=1 b=0 |
sustack |
suxgraph title="Espectro de amplitud 2 ms" markesize=1
 verbose=1 label1=" Frecuencia [Hz]"
 label2="Amplitud [dB]" grid1=dot grid2=dot width=560
 height=360 style=2 linecolor=0 titlesize=16&
# Despues del remuestreo #
suwind < $direc/REMUESTREO/04P_suresamp_300684.su key=tracr
 min=810 max=810 verbose=1 |
sufft |
suamp mode=amp |
suop op=db |
suop op=norm |
suchw key=cdp a=1 b=0 |
sustack |
suxgraph title="Espectro de amplitud 4 ms" markesize=1
 verbose=1 label1=" Frecuencia [Hz]" label2="Amplitud [dB]"
 grid1=dot grid2=dot width=560 height=360 style=2
 linecolor=0 titlesize=16&
```

Cuadro 4.19: Cálculo de los espectros de amplitud en $dB$ antes y después del remuestreo

## 4.7. Edición de trazas

Para eliminar o editar trazas, es necesario establecer criterios adecuados; en este trabajo se proponen principalmente las siguientes técnicas de edición:

a) Tomar como base el reporte de observador para realizar la primera edición (ver sección 4.4); en éste se reportan las trazas muertas o ruidosas, los gathers de prueba, con longitud de registro incompleto, etc. El cuadro 4.4 muestra el script que elimina los PT's con dichas características.

b) Visualizar los datos sísmicos permite identificar trazas muertas o trazas ruidosas que interfieren en los datos sísmicos; sin duda alguna estas trazas deben ser editadas o eliminadas, aunque no lo mencione el reporte de observador. Tal es el caso de los PT's mencionados en el cuadro 4.20.

**Script-Shell edición de los PT's 117,145,168,171,205,226 y 227 con tiempo de registro interrumpido**

```
#!/bin/bash
#Nombre_Script: 05P_suwind_edit.sh
 direc= /NOMBRE_ESTUDIO/DATA

#Seleccion de los gathers a editar#
suwind  < $direc/REMUESTREO/04P_suresamp_300684.su key=fldr
 min=0 reject=117,145,168,171,205,226,227 >
 $direc/EDICION/05P_suwind_edit_300684.su
```

Cuadro 4.20: `Edición de trazas`

c) Aplicar un mute (borrado) para eliminar el ruido que se encuentra antes de los primeros arribos (de 0 a 1 seg. en este trabajo); El mute se define como una función tiempo-offset. El cuadro 4.21 muestra el script con los parámetros del mute aplicado.

**Script-Shell aplicar mute a los gathers**

```
#!/bin/bash
#Nombre_Script: 05Q_sumute.sh
 direc=/NOMBRE_ESTUDIO/DATA
#Quitar el ruido que está de 0 a 1 seg#
 sumute  < $direc/EDICION/05P_suwind_edit_300684.su key=offset
xmute=-2442,0,2442 tmute=1,0,1 >
$direc/EDICION/05Q_sumute_300684.su
```

Cuadro 4.21: `Mute para eliminar el ruido antes de los primeros arribos`

d) Calcular la amplitud $RMS$ ($A_{rms}$) permite conocer el comportamiento de la amplitud en las trazas seleccionadas y así, poder limitar las amplitudes anómalas y eliminar dichas trazas.

$$A_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} A^2}{n}} \tag{4.2}$$

donde: $A$ = amplitud de cada muestra
$n$ = número de muestras por traza

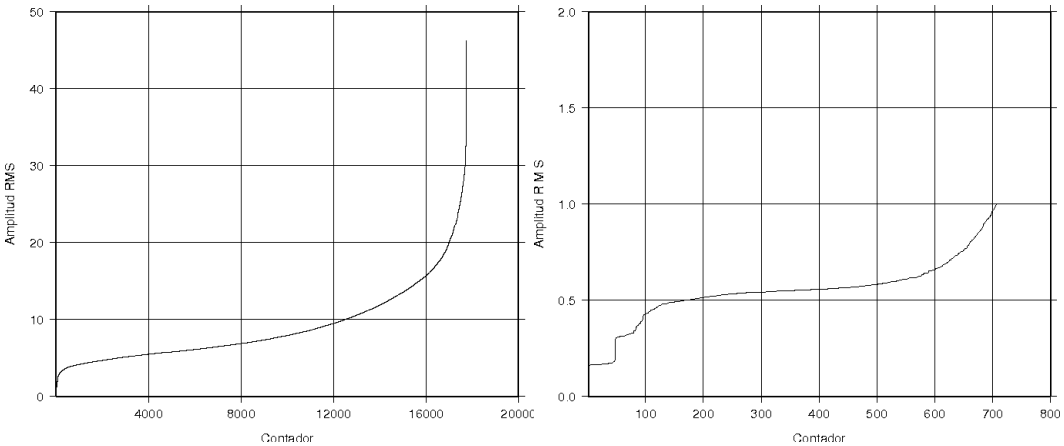
Con el módulo *sumax* de SU se calcula la amplitud $RMS$ para cada traza y sobre una ventana de tiempo; en este caso la ventana fue de 0 a 7 segundos y en todas las trazas de la línea. La salida del script que realiza el calculo (ver cuadro 4.22) es una columna en un archivo ASCII que contiene una amplitud $RMS$ para cada traza, el cual se ordena en orden creciente, se numera y se grafica (ver figura 4.17a).

Con base a la grafica (Figura 4.17a) obtenida y al análisis de amplitudes $RMS$ realizadas sobre esta figura, se editaron las trazas con amplitudes menores que 1; para hacer la selección de trazas a editar, se asignó al encabezado *duse* el valor 2. La figura 4.17b. muestra las amplitudes $RMS$ menores a 1 correspondientes a las trazas editadas. El cuadro 4.23 muestra la metodología para modificar el encabezado de las trazas.

**Script-Shell calcular y graficar la Amplitud** *RMS*

```
#!/bin/bash
#Nombre_Script: 06Q_sumax.sh
 direc=/NOMBRE_ESTUDIO/DATA
#Calcula la amplitud RMS de cada traza y genera un archivo en asccii#
sumax < $direc/EDICION/05Q_sumute_300684.su mode=rms output=ascii
 outpar=rms_amp verbose=1
#Ordenar las amplitudes en orden creciente y enumerar cada renglón#
awk '{print $2 }' rms_amp | sort -g | nl
 > sort_rms_amp.ascii
#Graficar en GMT y visualizar con Ghostview#
psxy sort_rms_amp.ascii -R1/20000/0/50 -JX6i/5i
 -Ba4000f4000g4000/a10f10g10 > 06Q_sumax_300684.ps
kghostview 06Q_sumax_300684.ps&
```

Cuadro 4.22: `Edición por amplitud RMS de las trazas`




a) duse=1 b) duse=2

Figura 4.17: Graficas de las amplitudes RMS

**Script-Shell modificar la validez de las trazas**

```
#!/bin/bash
#Nombre_Script: 06P_sushw_duse.sh
 direc=/NOMBRE_ESTUDIO/DATA
#Actualiza el archivo de amplitudes RMS con duse=1 o duse=2#
awk '{(if $1 > 1) print $1,1; else print $1,2}' rms_amp
 > $libre/RMS/rms_amp.ascii
#Condicion: si la amplitud es mayor que 1 asigna el número 1;
de lo contrario
#asigna el número 2#
a2b  < $libre/RMS/amp_rms.ascii nl=2  > $libre/RMS/amp_rms.bin
sushw < $direc/EDICION/05P_suwind_edit_300684.su
 infile=$libre/RMS/amp_rms.bin key=tracl,duse
 > $direc/EDICION/06P_sushw_duse_300684.su
```

Cuadro 4.23: `Edición desde el encabezado duse=1 (trazas de producción) y duse=2 (trazas muertas o muy ruidosas)`

### 4.7.1. Control de calidad a la edición de trazas

El principal control de calidad después de la edición de trazas consiste en visualizar los datos sísmicos (ver cuadro 4.24) de la siguiente forma: PT's sin edición de trazas (ver Figura 4.18); las trazas editadas de estos PT's con encabezado *duse* = 2 (ver Figura 4.19), y finalmente los mismos PT's con edición, encabezados *duse* = 1 (ver figura 4.20). De esta forma se corrobora que no falte alguna traza por editar.

Otro control de calidad consiste en calcular el procentaje de trazas editadas respecto al total, con el propósito de cuidar que el criterio de amplitud RMS no elimine más trazas de lo necesario. En este trabajo el procentaje de edición fue de 0.45 % respecto del total.

**Script-Shell separar los datos para visualizar los duse=1 y los duse=2**

```
#!/bin/bash
#Nombre_Script: 06Q_suwind_duse.sh
 direc=/NOMBRE_ESTUDIO/DATA
#Acepta al encabezado con duse=1 #
suwind  < $direc/EDICION/06P_sushw_duse_300684.su key=duse
 > max=0 accept=1 $direc/EDICION/06Q_suwind_duse1_300684.su
#Descarta al encabezado duse=1 y acepta a los duse=2#
suwind < $direc/EDICION/06P_sushw_duse_300684.su key=duse
 reject=1 > $direc/EDICION/06Q_suwind_duse2_300684.su
```

Cuadro 4.24: `duse=1 (trazas de producción) y duse=2 (trazas muertas o ruidosas)`

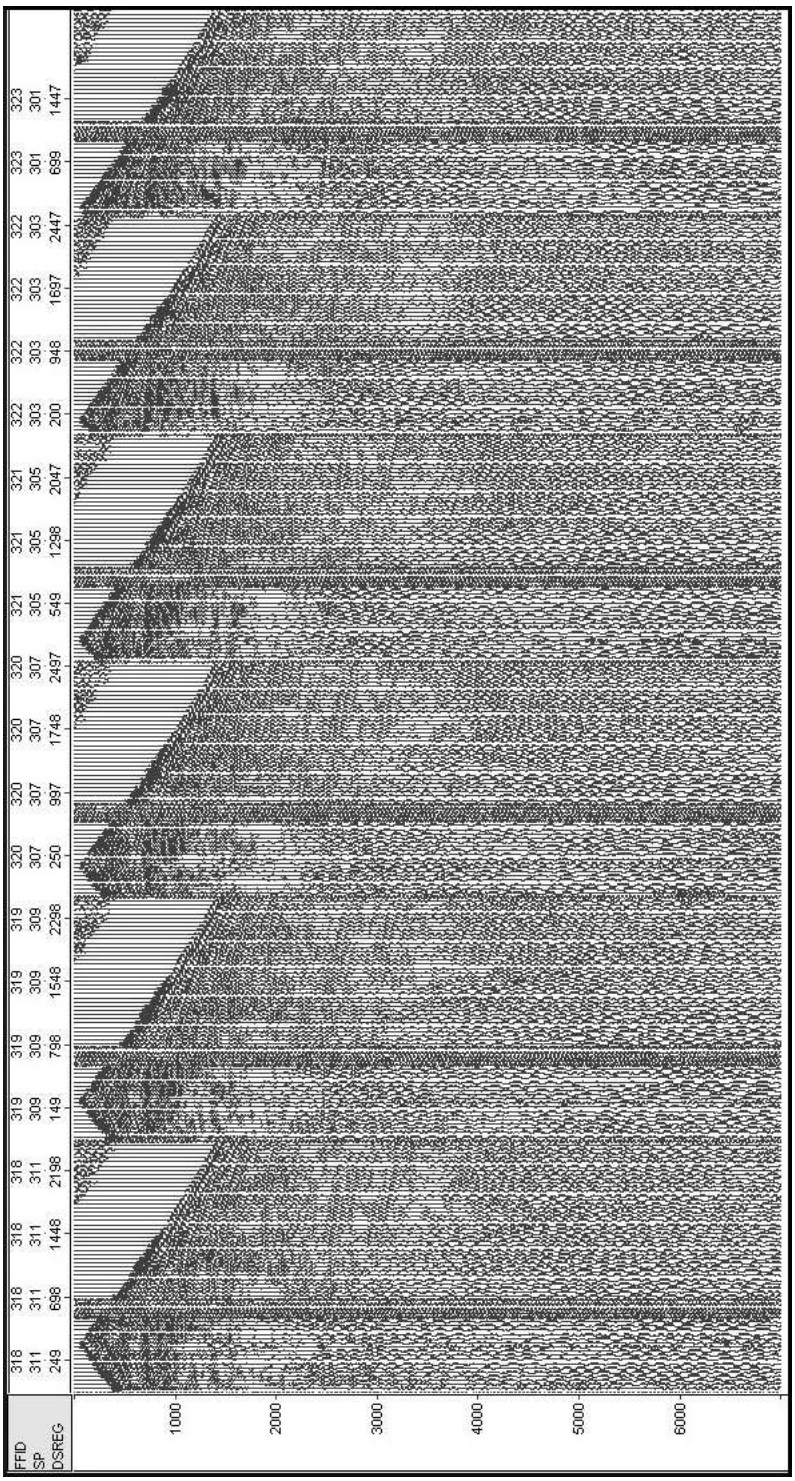



Figura 4.18: Gathers PT sin edición

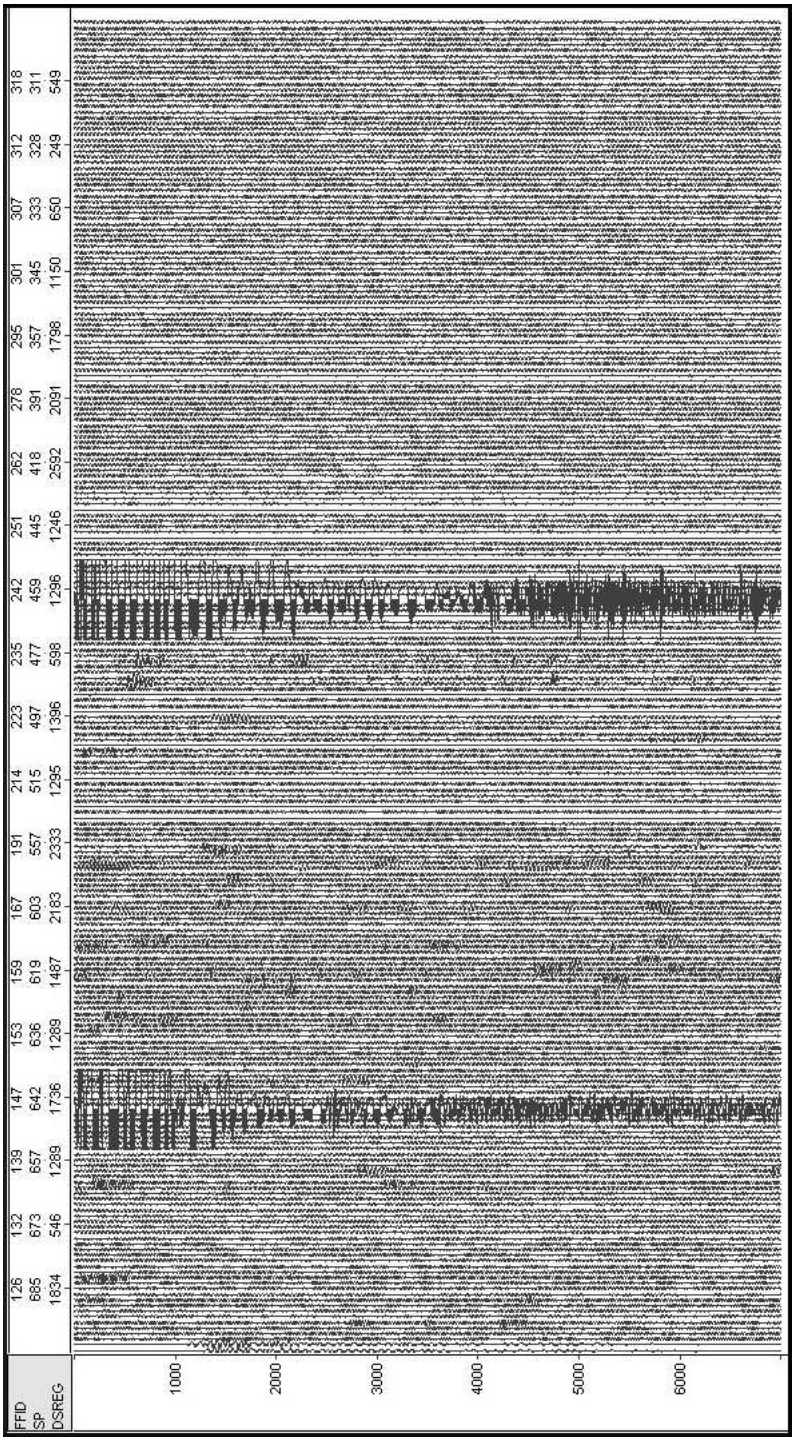



Figura 4.19: Trazas muertas y ruidosas editadas duse=2

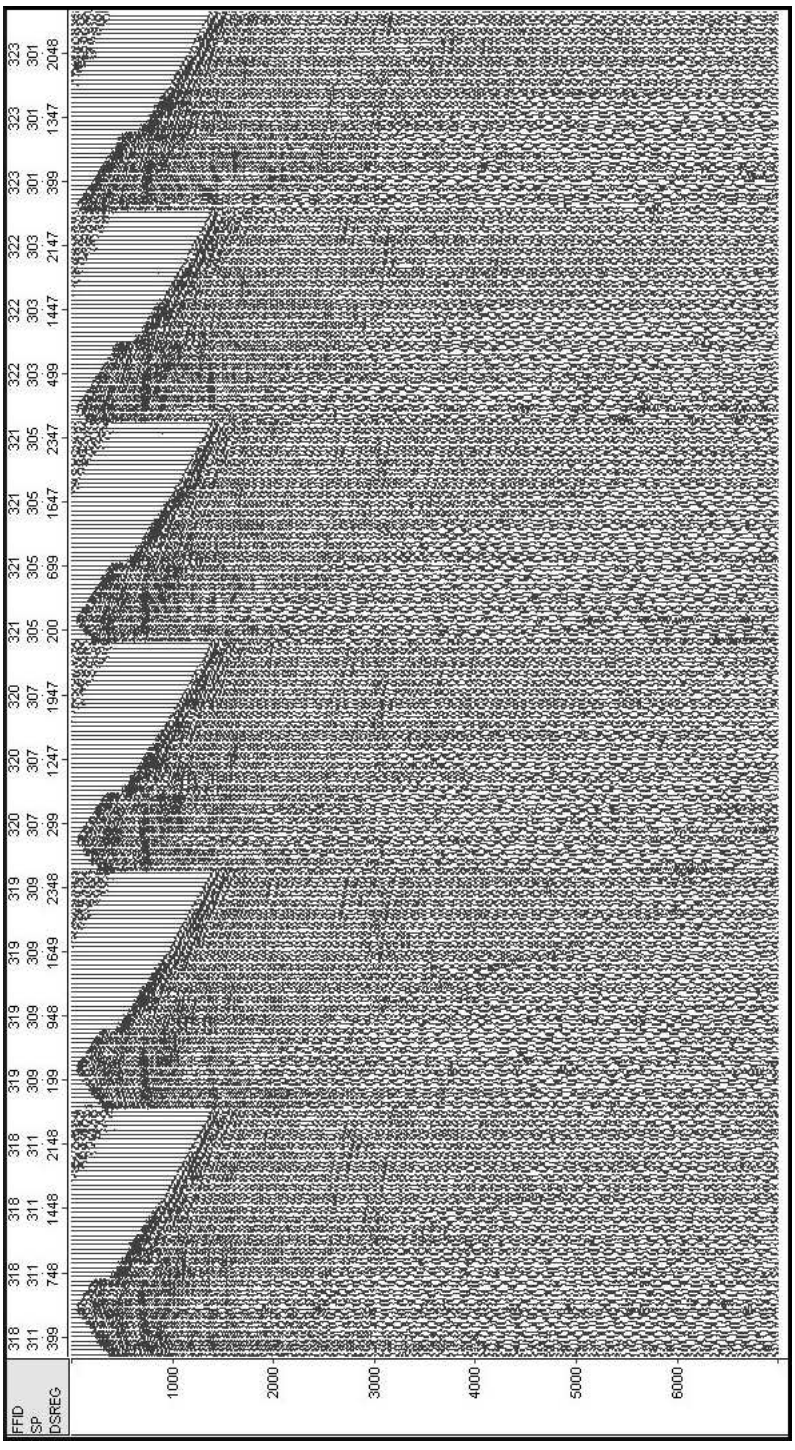



Figura 4.20: Gathers sin trazas ruidosas o muertas duse=1

## 4.8. Correcciones estáticas

Las correcciones estáticas resultan de un desplazamiento en tiempo en los datos; es decir cada traza entera se desplaza lo necesario hacia arriba o hacia abajo dependiendo de la posición del datum en relación con la fuente y el receptor. Estas correcciones se aplican para colocar fuentes y receptores sobre el mismo plano horizontal imaginario llamado *nivel de referencia* o *nivel del datum flotante*, nivel que se considera por debajo de la capa intemperizada. En nuestro caso el datum está al nivel del mar (ver Figura 2.3).

### 4.8.1. Estáticas de elevación o de campo

Las estáticas de campo se basan en el tiempo de los primeros arribos, teniendo como objetivo ajustar el tiempo de viaje que se observaría si la fuente y los receptores estubieran ubicados al mismo nivel de referencia.

Considerando que los tiros se detonan abajo de la capa intemperizada (profundidad de pozo), la corrección estática total de las trazas se asocia con el punto medio M y se calcula con la siguiente ecuación (módulo *sustatic* - SU):

$$sstat = 10\hat{}scalel + \frac{(sdel - selev + sdepth)}{swevel}$$

$$gstat = \frac{sstat - sut}{1000}$$

$$tstat = sstat + gstat + 10\hat{}scalel * \frac{selev - gelev}{wevel}$$

donde:

sstat = Estática de la fuente
gstat = Estática del receptor
tstat = Estática total
selev = Elevación en superficie de la fuente(source)
relev = Elevación en superficie del receptor
sdepth = Profundidad del pozo
sut = Tiempo vertical
sdel = Elevación del datum
scalel = 1, por default
wevel = Velocidad de la capa intemperizada
swevel = Velocidad de la capa subintemperizada

Al aplicar las estáticas de elevación se corrigen las diferencias en tiempo causadas por las elevaciones de fuentes y receptores y la profundidad de pozo, logrando remover gran parte de la distorsión del tiempo de viaje de los datos.

Para calcular las estáticas de elevación con el módulo *sustatic* se necesita que los encabezados de las trazas sísmicas contengan los valores en los bytes correspondientes. El script del cuadro 4.25 calcula las estáticas de elevación y las asigna al encabezado de los datos sísmicos. El apilado con estáticas de elevación se muestra en la figura 4.21.

**Script-Shell calcular las estáticas de elevación.**

```
#!/bin/bash
#Nombre_Script:07P_sustatic_elevC.sh
 direc=/NOMBRE_ESTUDIO/DATA
# Adecuar las palabras del encabezado para que el modulo calcule
 las estaticas de elevacion#
suchw  < $direc/EDICION/06Q_suwind_duse1_300684.su
 key1=sstat a=0 b=0 |
suchw key1=gstat a=0 b=0 |
suchw key1=tstat a=0 b=0 |
suchw key1=wevel a=1825 b=0 |
suchw key1=sut a=20 b=0 |
suchw key1=swevel a=1000 b=0
 > $direc/ESTAT_DE_REFRAC/temp1.su
sustatic < $direc/ESTAT_DE_REFRAC/temp1.su hdrs=0 sign=1
 > $direc/ESTAT_DE_REFRAC/07P_sustatic_elevC_300684.su
sugethw < $direc/ESTAT_DE_REFRAC/07P_sustatic_elevC_300684.su
 key=selev,gelev,wevel,sdepth,sstat,gstat,tstat,scalel |
 sort -u |more
```

Cuadro 4.25: Calcula y asigna el encabezado las estáticas de elevación (*wevel* = 1825 es la velocidad de reemplazamiento en m/s).

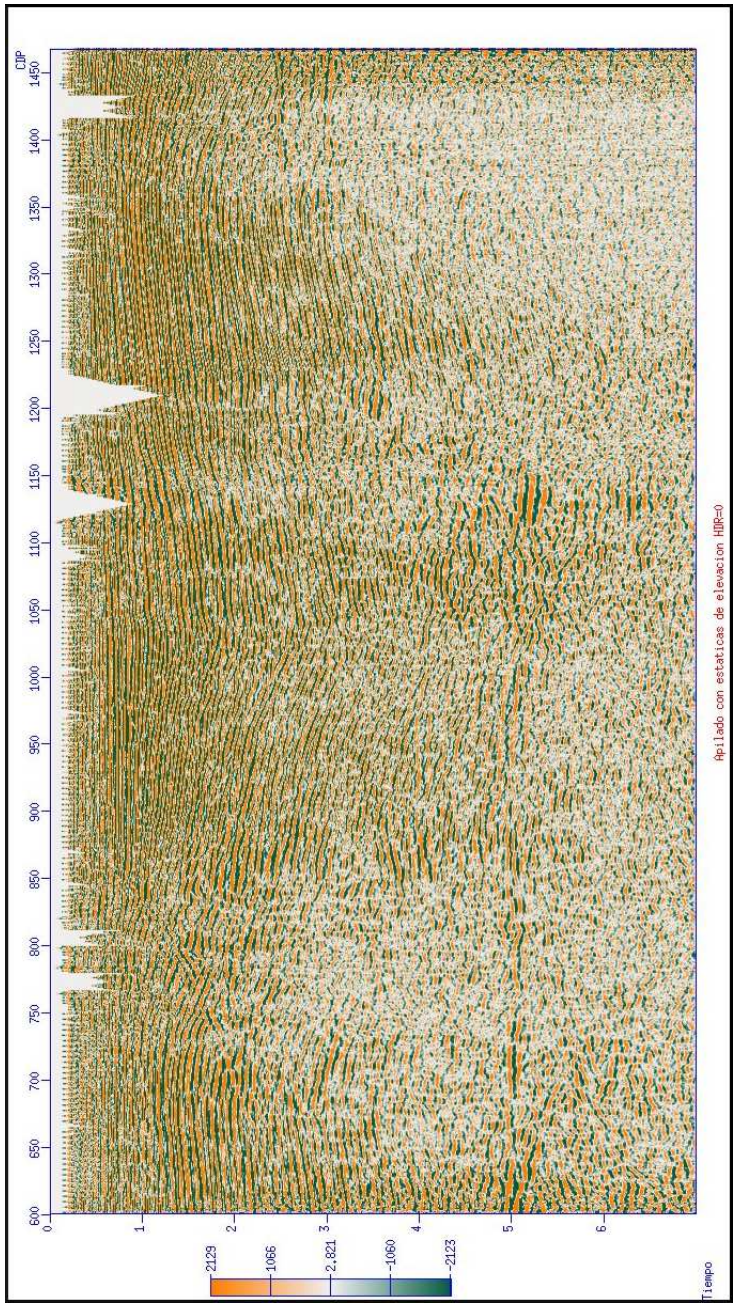



Figura 4.21: Apilado con estáticas de elevación

### 4.8.2. Estáticas de refracción

Para calcular las estáticas de refracción es necesario conocer las velocidades cercanas a la superficie y el espesor del estrato intemperizado (modelo superficial) para entonces, reemplazar el espesor de intemperismo y subintemperismo al nivel de referencia; en el caso de adquisiciones con dinamita, a la profundidad del pozo se le restará la elevación de cada estación.

Los métodos de estáticas de refracción requieren que se asignen tiempos a los primeros arribos: los tiempos de refracción al ángulo crítico (primeros arribos) son grabados como líneas rectas por lo tanto las pendientes y tiempos de intercepción se puede estimar a partir del tiempo de retardo y de las velocidades de los refractores; en ocasiones, en datos reales es difícil ajustar líneas rectas a los primeros arribos debido a la rugosidad de la cima del reflector así como a cambios de espesor y velocidad de la capa de intemperismo; La integridad de dichos métodos depende de los primeros arribos obtenidos de un refractor común.

El objetivo de calcular y aplicar las correcciones por estáticas de refracción es eliminar los efectos sísmicamente indeseables de la capa intemperizada, efectos que se deben a las variaciones de elevación en fuentes y receptores, la profundidad de pozo y la velocidad en el refractor, que provocan diferencias en los tiempos de arribo, cabe recordar que al aplicar las correcciones estáticas de refracción, cada trazas se desplazan hacia ariba o hacia abajo unos cuantos milisegundos.

### 4.8.3. Métodos para calcular las estáticas de refracción

Los métodos utilizados para calcular las estáticas de refracción se explican a continuación:

**Método Recíproco Generalizado (GRM)** (Palmer D, 1980)

El enfoque de la reciprocidad generalizada utiliza dos geófonos $X$ y $Y$ registrando las llegadas desde el mismo punto refractado evitando estas posiciones [5].

El método GRM define dos funciones:

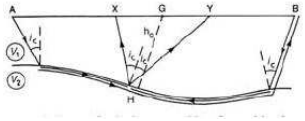



Figura (a)

1. Función del análisis de velocidad, $T_V$

$$T_V = \frac{T_{AY} - T_{BX} + T_{AB}}{2}$$

Este es el tiempo de viaje de A a H (Figura a)

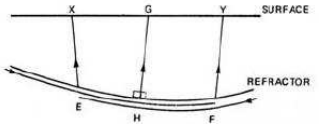



Figura (b)

2. Función del tiempo, $T_G$

$$T_G = \frac{T_{AY} + T_{BX} - T_{AB} - (XY/V')}{2}$$

V' es la velocidad aparente del refractor calculado a partir de $T_V$ (Figura b)

Este es el tiempo de viaje a lo largo de EX o FY menos el tiempo de viaje de la proyección de GX o GY a lo largo de la interface del refractor.

En función del análisis de velocidad, $T_V$ (Figura c):

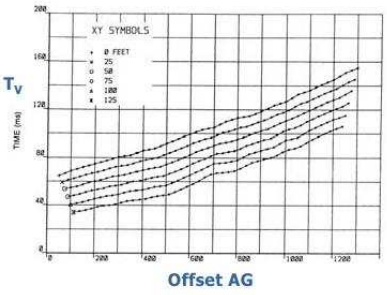



Figura (c)

1. Calcula $T_V$ como una función del offset AG por una variación de distancias XY
2. El óptimo XY es cuando E y F convergen en H
3. El óptimo XY esta identificado por la curva suavizada $T_V$
4. La velocidad del refractor V' es el recíproco de la pendiente de $T_V$
5. Puede determinar las variaciones en V' a lo largo de la longitud del perfil

En función del tiempo, $T_G$ (Figura d):

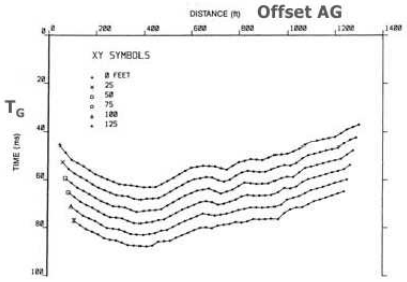



Figura (d)

1. Calcula $T_G$ como una función del offset AG por una variedad de distancias XY
2. El óptimo XY es identificado por las curvas más difíciles $T_G$
3. Calcula la velocidad promedio de la superficie para el refractor

$$\bar{V} = \sqrt{\frac{V'^2 XY}{XY + 2T_G V'}}$$

4. Calcula la profundidad de $T_G$ y la velocidad promedio

$$h = \frac{T_G \bar{V} V'}{\sqrt{V^{t2} - \bar{V}^2}}$$

**Método de Diferencias de Tiempo (DLT)**

El **tiempo de retardo** es la diferencia entre el tiempo de viaje (AB) y el tiempo de viaje en el refractor A'B (Figura e) [5].

Para calcular el tiempo de retardo en un punto de tiro (S):

$$\Delta T_S = \frac{AB}{V_1} - \frac{A'B}{V_2}$$

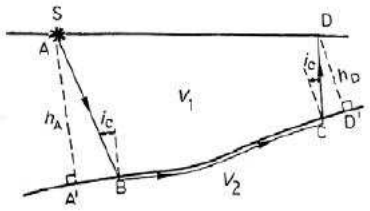



Figura (e)

$$\Delta T_S = \frac{h_A}{V_1 \cos i_c} - \frac{h_A \tan i_c}{V_2}$$

$$\Delta T_S = -\frac{h_A\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{V_2 V_1}$$

Lo mismo para debajo de un geófono (D):

$$\Delta T_D = \frac{h_D\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{V_2 V_1}$$

El tiempo de retardo se relaciona con la perpendicular debajo del geófono. Si conocemos el tiempo de retardo , $V_1$ y $V_2$, entonces se podra calcular su profundidad.

Para obtener el tiempo de retardo debajo de un geófono $\Delta T_D$ (Figura f):

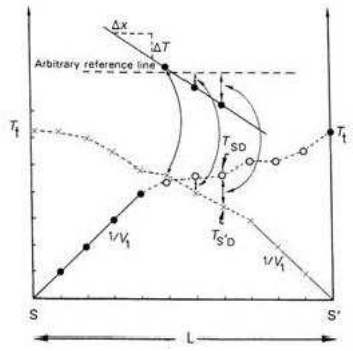



Figura (f)

Tiempo Total de viaje ABFG:

$$T_t = \frac{L}{V_2} + \Delta T_s + \Delta T_{s'}$$

Tiempo Total de viaje ABCD:

$$T_{SD} = \frac{x}{V_2} + \Delta T_s + \Delta T_D$$

Tiempo total de viaje GFED:

$$T_{S'D} = \frac{L-x}{V_2} + \Delta T_{s'} + \Delta T_D$$

al sumar las ecuaciones de $T_{SD}$ y $T_{S'D}$ menos la ecuación $T_t$ se obtendrá la ecuación para $\Delta T_D$:

$\Delta T_D = \frac{T_{SD}+T_{S'D}-T_t}{2}$ determina el inverso de una línea refractada.

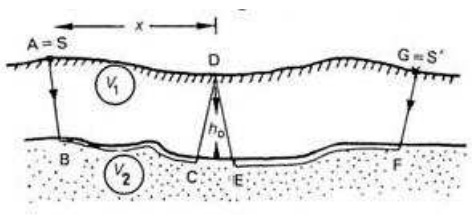



Figura (g)

Calcular la velocidad $V_1$ $V_2$ (Figura g)
llegada directa de la pendiente = $1/V_1$

Restando las ecuaciones para $T_{SD}$ y $T_{S'D}$ se obtiene la siguiente ecuación:

$$T_{SD} - T_{S'D} = \frac{2x}{V_2} - \frac{L}{V_2} + \Delta T_S - \Delta T_{S'}$$

$$y = ax + b$$

Trazando ($T_{SD}$-$T_{S'D}$) x contra la pendiente resulta $2/V_2$

Las variaciones en la pendiente reflejan variaciones laterales en la velocidad.

### 4.8.4. Procedimiento para cálcular las estáticas de refracción

Para continuar con el procesamiento usando Seismic Unix, se buscó la forma de calcular y obtener las estáticas de refracción por el método GRM (módulo *grm*) y el método estáticas de refracción por deconvolución (módulo *surefcon*) que están incluidos en Seismic Unix, pero, debido a la escasa documentación y entendimiento del formato de los archivos que solicitaba el módulo *grm* y a la escasa experiencia con el módulo, se optó por obtener el archivo de las estáticas de refracción por medio del software comercial llamado PROMAX, que tiene como opciones los métodos DLT, GRM entre otros.

El procedimiento seguido con PROMAX consiste en:

- Picar los primeros arribos de todas las trazas.

- Calcular el tiempo de retardo y las velocidades de la capa subintemperizadas.

- Asignar la velocidad de la capa intemperizada.

- Calcular el espesor de la capa intemperizada.

- Calcular la correción estática (tiempo necesario para llevar los datos sísmicos al DATUM). En este trabajo el datum es cero.

### 4.8.5. Resultados de los método DLT y GRM

Inmediatamente después de obtener los valores del calculo de las estáticas de refracción para tiros y para receptores, es conveniente graficarlos individualmente por método; ver que cada curva graficada tenga coherencia, y medir el rango de las correciones estáticas (ver Figuras 4.22, 4.23 y 4.24 4.25).

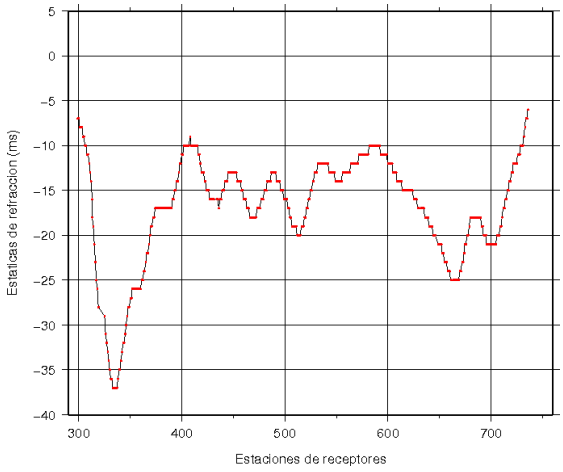



Figura 4.22: Estáticas de los receptores: DLT

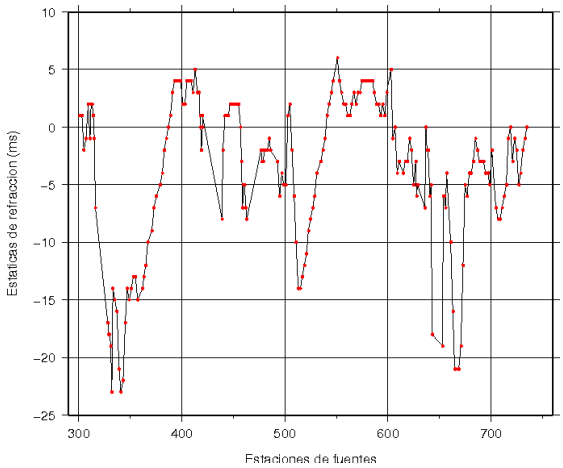



Figura 4.23: Estáticas de las fuentes: DLT

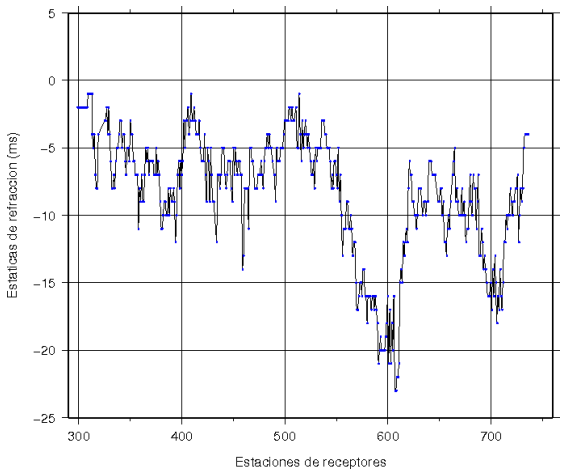



Figura 4.24: Estáticas de los receptores: GRM

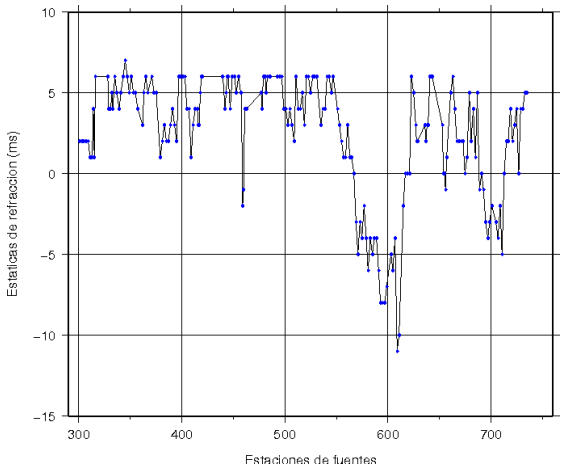



Figura 4.25: Estáticas de las fuentes: GRM

Para medir el promedio e identificar las diferencias entre las correcciones estáticas de cada método, se recomienda juntar en un grafico las curvas en tiros y la curvas en receptores (ver Figuras 4.26 y 4.27).

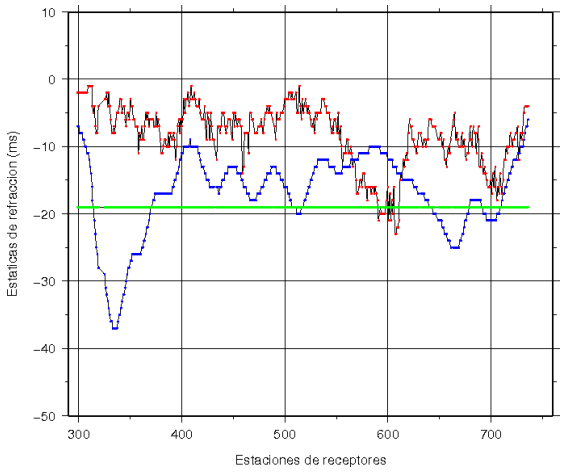



Figura 4.26: Estáticas de los receptores: cálculadas con elevación (verde), DLT (rojo) y GRM (azul)

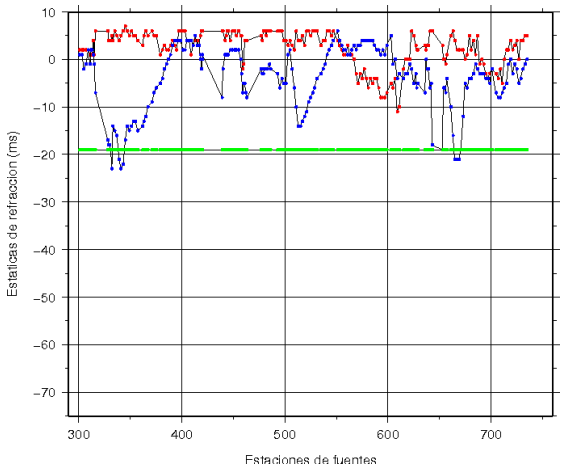



Figura 4.27: Estáticas de las fuentes: cálculadas con elevación (verde), DLT (rojo) y GRM (azul)

### 4.8.6. Control de calidad a las estáticas de refracción aplicadas

El principal control de calidad consiste en apilar los datos con las estáticas de elevación (apilado de referencia) y con las estáticas de refracción de los métodos GRM y DLT; cada una de ellas asignadas en los encabezados *sstat* y *gstat*. La comparación entre los apilados (ver figuras 4.21, 4.28 y 4.29), permitirá elegir el método que mejore la imagen sísmica: elevación, GRM o DLT.

Las estáticas de refracción calculadas con el método GRM (ver Figura 4.28) mejoran la imagen del apilado en el rango de tiempo 200 a 2000 ms respecto al apilado con estáticas de elevación (Figura 4.21); el apilado con las estáticas de refracción del método DLT ofreció menos resolución en esta zona mostrando los mismos resultados después de los 2 s respecto al apilado de referencia. En conclusión las correcciones estáticas elegidas para aplicarlas en la secuencia de proceso, corresponden al método GRM.

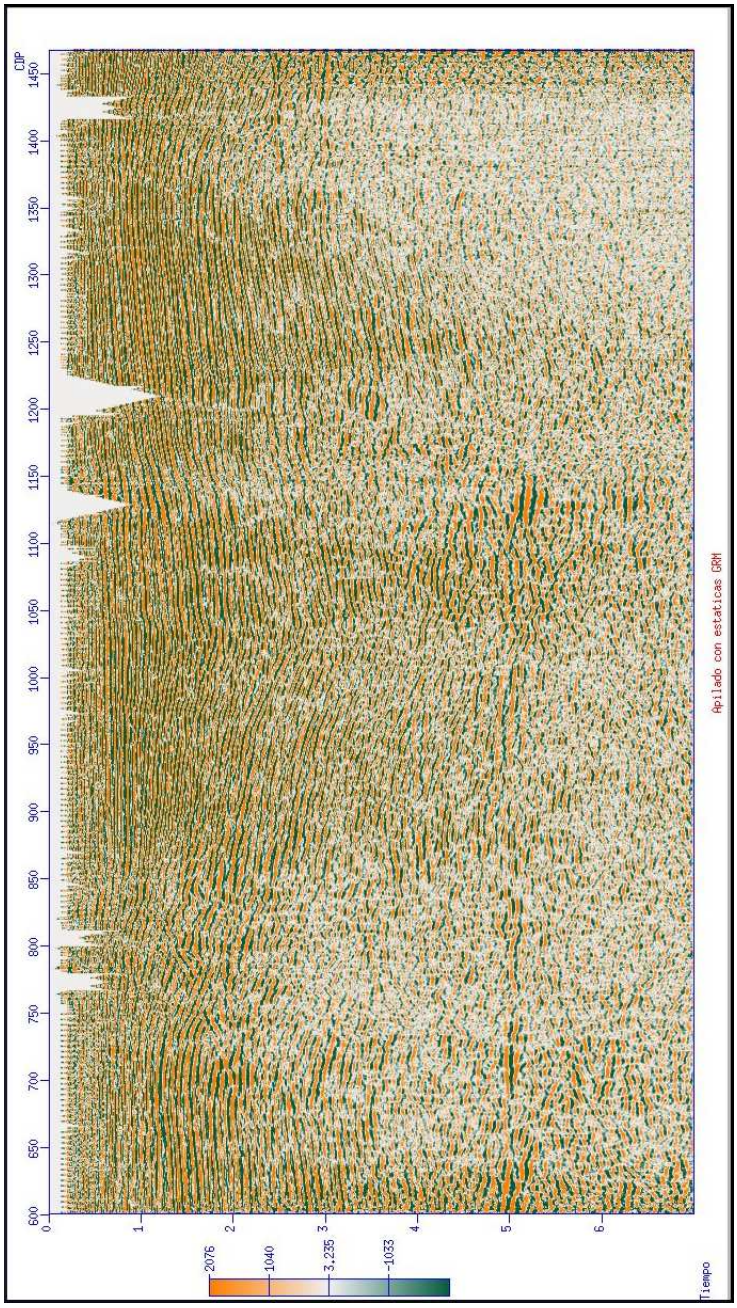



Figura 4.28: Apilado con estáticas obtenidas con el método GRM

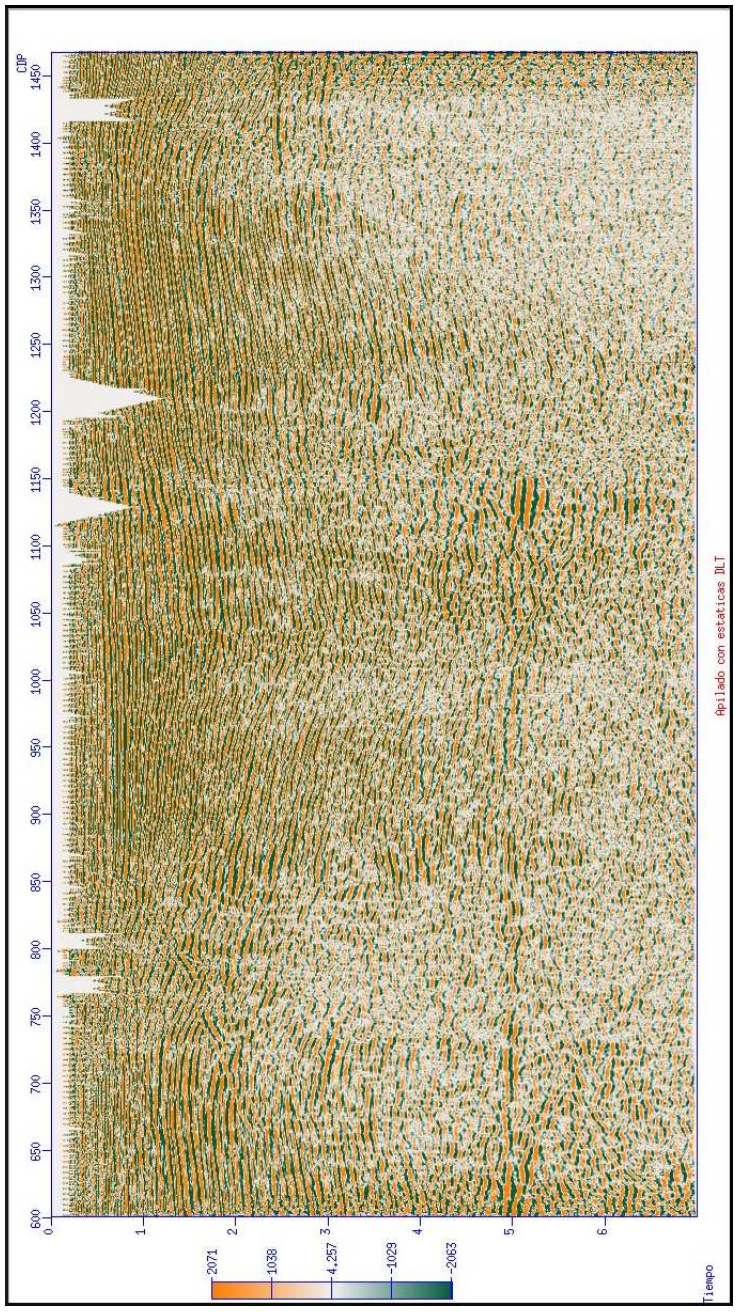



Figura 4.29: Apilado con estáticas obtenidas con el método DLT

## 4.9. Recuperación de amplitudes

Las amplitudes de los datos sísmicos antes de ser grabadas sufrieron de atenuación por factores como la absorción y la dispersión: la absorción es una perdida de energía debida a la fricción de partículas y fluídos en el subsuelo, y se convierte entonces en energía calorífica. La dispersión está relacionada con la divergencia esférica, la dispersión geométrica hace que la intensidad y densidad del frente de ondas esférico decrezca inversamente proporcional al cuadrado de la distancia de la fuente.

Conceptualmente un PT (shot) genera un campo esférico de ondas, la Tierra tiene dos efectos en el campo de propagación, en un medio homogéneo la densidad de energía decae proporcionalmente a $1/r^2$, donde r es el radio del frente de ondas; la amplitud de la onda es proporcional a la raíz cuadrada de la densidad de energía. En la práctica las velocidades comúnmente se incrementan con la profundidad, causando un rápido decaimiento de amplitudes con la distancia. El contenido de frecuencia de la señal inicial cambia con el tiempo durante la propagación; en partícular, las altas frecuencias son absorbidas mas rápido que las bajas frecuencias; esto se debe a la atenuación intrínseca en la rocas [3].

Para una Tierra estratificada, el decaimiento de amplitud puede estar descrita aproximádamente por [3]:

$$1/[v^2(t)] \tag{4.3}$$

donde $t$ es el tiempo doble (de ida y vuelta) y $v(t)$ es la velocidad $RMS$ de las reflexiones primarias (aquellas reflejadas una sola vez).

Los métodos para la recuperación de amplitudes son: corrección por divergencia esférica, corrección por absorción (exponenciación, atenuación inelástica) e igualación. El objetivo principal de dichos métodos es compensar la perdida de amplitudes en tiempo observada en la adquisición, con la finalidad de obtener unicamente amplitudes que sean indicativas de las características geológicas del subsuelo.

### 4.9.1. Corrección por divergencia esférica

Los valores de la función que se aplican a la corrección por divergencia esférica para preservar la amplitud, dependen del tiempo del viaje y de una función primaria de velocidad $RMS$, la cual está asociada con las reflexiones primarias en un área partícular del estudio. Para poder obtener el campo de velocidades es necesario aplicar una función de recuperación de amplitudes

($t^{tpow}$) a los datos sísmicos para corregir el decaimiento de la amplitud.

En el script del cuadro 4.26 se muestra la secuencia para corregir los datos sísmicos por divergencia esférica, la cual consiste en compensar las perdidas por atenuación aplicando una función de ganancia exponencial con el módulo *sugain*, para posteriormente obtener el campo de velocidades $RMS$ (la obtención de este campo de velocidades $RMS$ se mostrará con detalle en la sección 4.13). Obtenido el campo de velocidades $RMS$ (*vel_divcor.par*) se aplica la función $t[v(t_0)]^2$ con el módulo *sudivcor* para recuperar la amplitud y preservarla para continuar con la secuencia de proceso.

A partir de esta etapa, que es donde inicia el tratamiento de los gathers CDP, es recomendable seleccionar aleatoriamente PT's para evaluar las pruebas que se vayan realizando, sin perder de vista todos los registros de la línea. En cuanto a lo que se refiere a controles de calidad, es necesario que se comparen rangos de PT's y los apilados (ver sección 4.13) con la etapa posterior o anterior a la que se ésta procesando.

**Script-Shell aplicar la divergencia esferica**

```
#!/bin/bash
#Nombre_Script:09P_sudivcor.sh
 direc=/NOMBRE_ESTUDIO/DATA
 veloc=/NOMBRE_ESTUDIO/JOBS/SEISMIC/VELOCIDADES_DIV

                    #Procedimiento :#
#1.- Aplicar una funcion de ganancia exponencial a los tiros que
serán usados en el paso 2#
sugain < $direc/EDICION/06Q_suwind_duse1_300684.su tpow=0.7

#2.- Obtener el primer campo de velocidades seccion 4.13#

#3.- Aplicar la divergencia esferica#
 > $direc/DIV_ESF/temp1_sugain.su tpow=0.7
sudivcor < $direc/EDICION/06Q_suwind_duse1_300684.su
 par=vel_divcor.par > $direc/DIV_ESF/09P_sudivcor_300684.su
```

Cuadro 4.26: `Divergencia esférica`

### 4.9.2. Curvas de decaimiento de amplitud

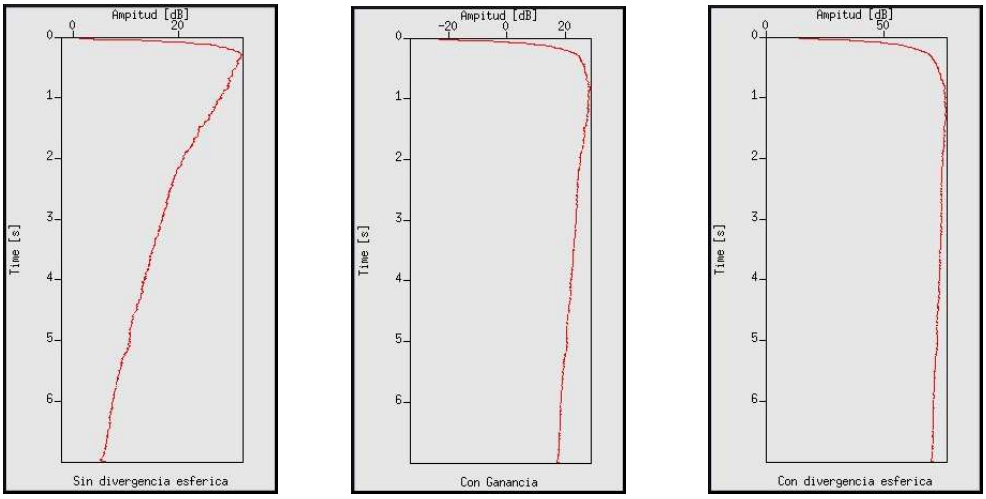
Visualizar la compensación de amplitudes en curvas de decaimiento en dB/seg es útil para controlar el decaimiento de las amplitudes antes y después de aplicar la corrección por divergencia esférica.

El cálculo para obtener las curvas de decaimiento de amplitud consiste en seleccionar algunos PT's de la línea y separarlos en rangos de offset; el siguiente paso consiste en calcular el valor absoluto de las amplitudes, sumarlas y convertirlas a dB con la formúla :

$$1\ dB = 20 log_{10} A$$

Los rangos de offset seleccionados fueron: $0 - 500\ m$, $1000 - 1500\ m$ y $2000 - 2500\ m$; las curvas se observan en las figuras 4.30, 4.31 y 4.32 respectivamente. El cuadro 4.27 contiene el script shell que calcula el decaimiento de las amplitudes en los datos sísmicos de entrada (Figura 4.33).

La corrección por divergencia esférica con el campo de velocidades, se ve más estable en el inciso c) de las figuras 4.30, 4.31 y 4.32 que en los incisos b) que corresponden a los gathers con la exponencial aplicada.

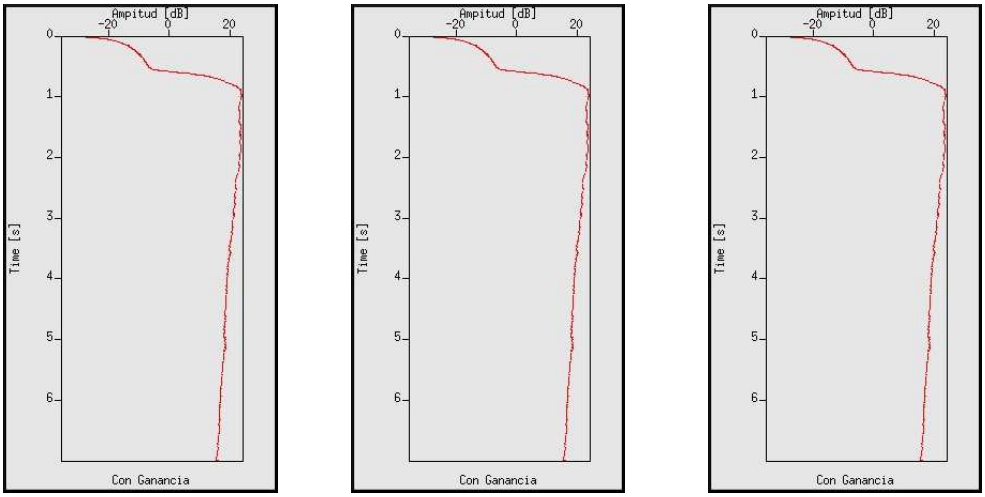



a) obtenido de los gathers brutos

b)formula exponencial SU tpow=0.7

c)con divergencia esferica

Figura 4.30: Curvas de decaimiento de amplitud; offset=0-500m

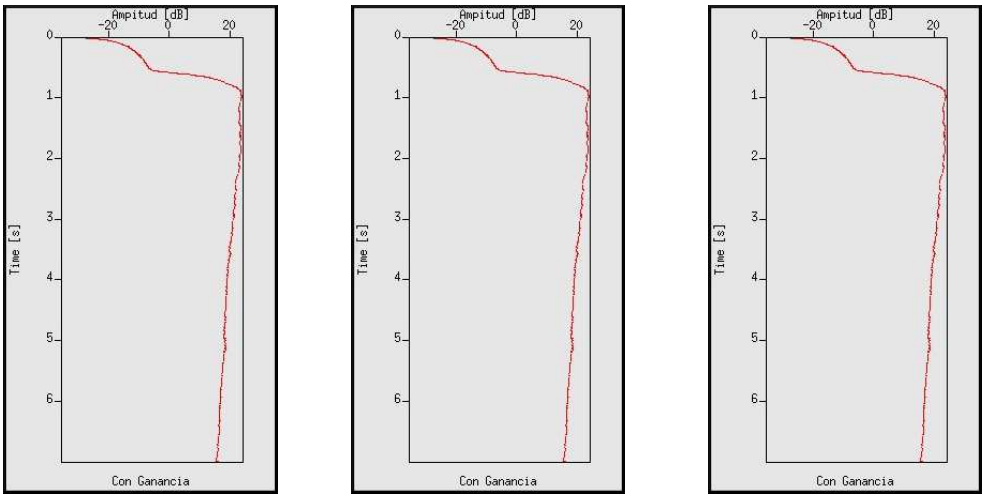



a) obtenido de los gathers brutos

b)formula exponencial SU tpow=0.7

c)con divergencia esferica

Figura 4.31: Curvas de decaimiento de amplitud; offset 1000-1500m




a) obtenido de los gathers brutos

b)formula exponencial SU tpow=0.7

c)con divergencia esferica

Figura 4.32: Curvas de decaimiento de amplitud; offset 2000-2500m

**Script-Shell obtener las curva de decaimiento de amplitud**

```
#!/bin/bash
 #Nombre_Script: 09Q_sudivcor.sh
direc=/NOMBRE_ESTUDIO/DATA/

#Seleccion de un rango de offset#
suwind < $direc/EDICION/06Q_suwind_duse1_300684.su
% suwind < $direc/DIV_ESF/09P_sudivcor_300684.su
 key=offset min=0 max=500 |

#Artificio para sumar todas las trazas.#
 sushw key=cdp a=1 |

#Valor absoluto de las amplitudes.#
 suop op=abs |
#Apilamiento de las trazas (suma).#
 sustack |

#Visualizar la curva en decibeles.#
 suop op=db |
suxgraph windowtitle="SIN divergencia esferica"
 title="CURVA CON DECAIMIENTO DE AMPLITUD"
 label1="Time [s]" label2="Amplitud [dB]" markesize=1
 width=400 height=800 grid1=10 verbose =1&
#Duplicar el script o cambia los datos de entrada y el windowtitle #
```

Cuadro 4.27: `Curvas decaimiento de amplitud`

## 4.10. Control de calidad de la divergencia esférica

El control de calidad consiste en visualizar a los tiros de entrada (ver Figura 4.33) & los tiros de salida (ver Figura 4.34); cuantitativamente el control de calidad se realiza calculando las curvas con decaimiento en $dB/seg$ (Figuras 4.30, 4.31 y 4.32). El apilado de la figura 4.35 se generó como parte del control de calidad y es la referencia para la siguiente etapa del proceso aplicada.

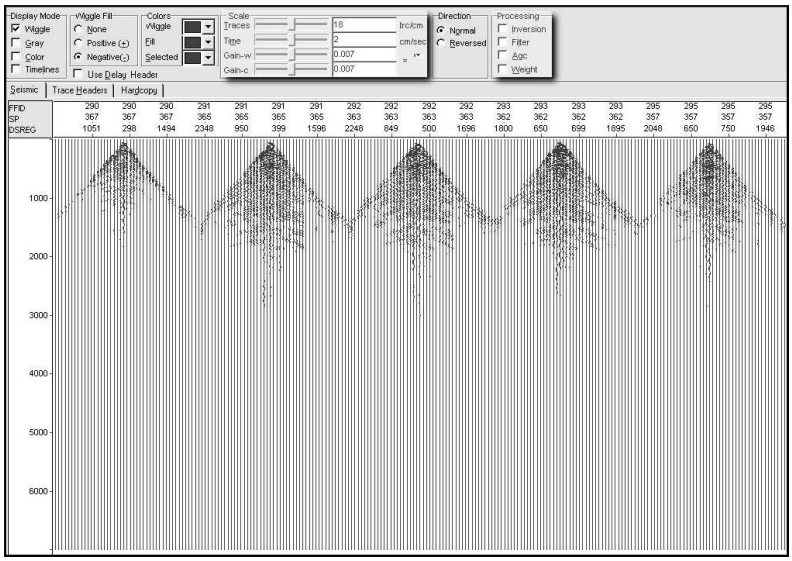



Figura 4.33: Gathers PT brutos

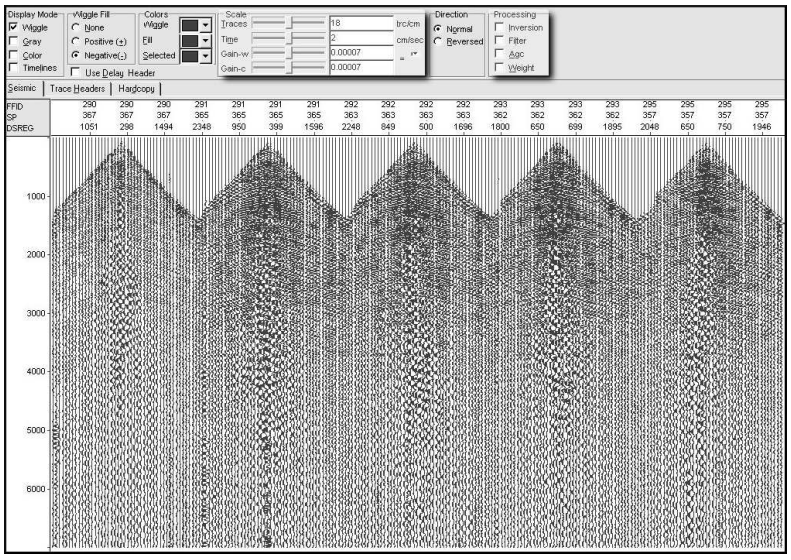



Figura 4.34: Gathers PT con divergencia esférica

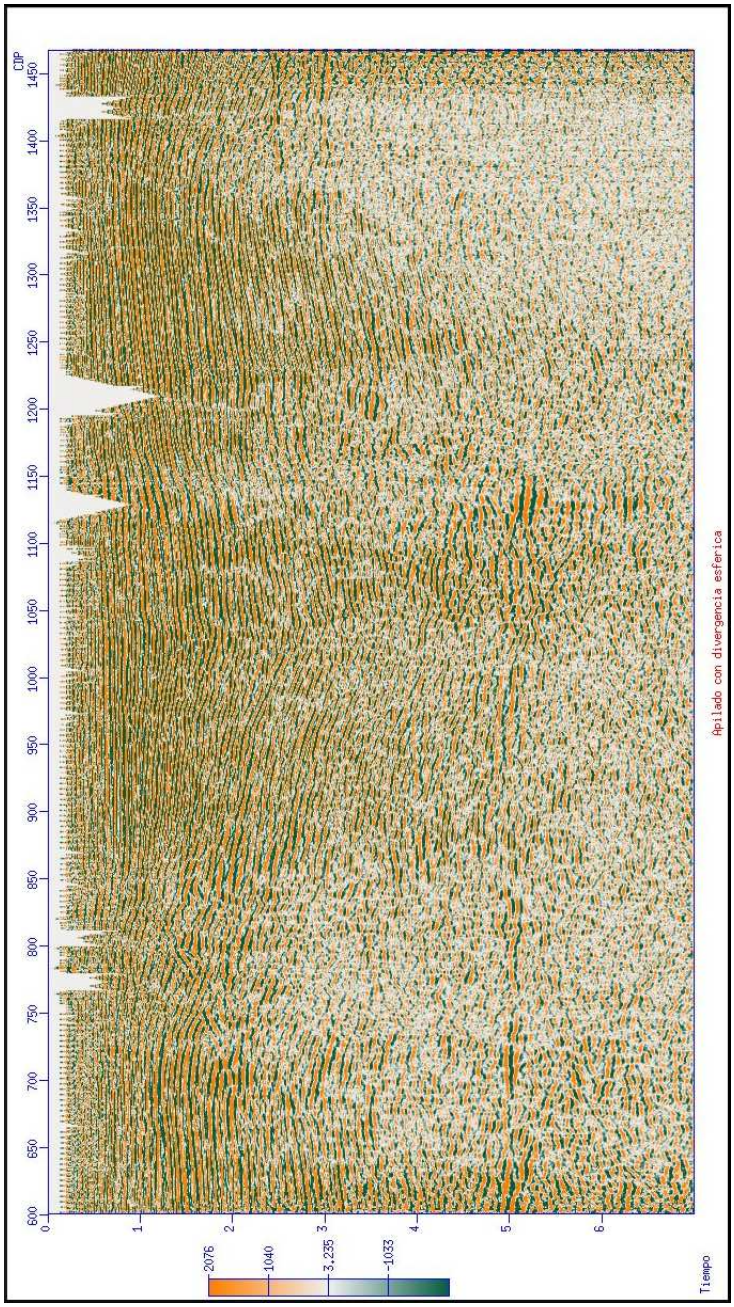



Figura 4.35: Apilamiento con divergencia esférica

## 4.11. Atenuación de Ruidos

Los ruidos inevitablemente se graban durante el registro de los datos sísmicos; cuando el ruido se repite en el mismo receptor de distintos tiros, tiene la misma dirección de viaje y además tiene coherencia, cumple con las características de ruidos coherentes a los que pertenece el Ground roll, los múltiples, etc; cuando el ruido se presenta aleatoriomente o en spikes se dice que el ruido es incoherente y lo pudo haber generado el equipo del registro, el medio ambiente, los automoviles, la lluvia, los trabajadores, etc.

Una de las técnicas que se usa para atenuar ruidos consiste en aplicar filtros que actúan en distintos dominios: el filtro pasa-bandas, filtra en el dominio del tiempo (atenua ruidos incoherentes); el F-K actúa en el dominio de la frecuencia - número de onda, y el filtro Radon filtra en el dominio Tau-P (actúalmente es el más usado para la atenuación de múltiples).

### 4.11.1. Filtro en el dominio F-K

Los eventos que están en el plano $(x, t)$ pueden separarse utilizando métodos multidimensionales de Fourier en el plano $(k, \omega)$, donde $k$ es el número de onda o frecuencia espacial $(ciclos/Km)$ y $\omega$ es la frecuencia temporal $(Hz)$;

La transformada bidimensional de Fourier se define como:

$$F(\omega, k) \int_{\infty}^{-\infty} f(x,t) e^{-ikx\omega t} dt\, dx \tag{4.4}$$

En el dominio F-K, al multiplicar el espectro $S(k, \omega)$ por un filtro diseñado con un respuesta fija al impulso $H(k, \omega)$ produce la salida filtrada $G(k, \omega)$.

$$G(k, \omega) = H(k, \omega) S(k, \omega) \tag{4.5}$$

El filtro calculado $H(k, \omega)$ mejor conocido como filtro F-K es útil para eliminar cierto tipo de energía indeseada, en partícular el ruido lineal coherente, ruido en forma de ground roll u onda aérea y ondas superficiales; el módulo en SU que cálcula el filtro F-K se llama *sudipfilt* y se define por la relación de las pendientes $\Delta k / \Delta f$.

Para obtener los valores de la pendiente es necesario realizar pruebas basadas en los espectros F-K de los gathers de entrada y de salida. El script del cuadro 4.28 aplica el filtro F-K a los PT's con divergencia esférica (entrada).

**Script-Shell aplicar el filtro F-K**

```
#!/bin/bash
#Nombre_Script: 10P_sudipfilt.sh
 direc=/NOMBRE_ESTUDIO/DATA
#Ajuste de parámetros de los módulos desde el inicio del shell.#
 dt=0.004 (intervalo de muestreo en segundos)
 dx=0.05 (intervalo entre trazas en kilometros)
 amps=0,1,1,0
 slopes=-0.6,-0.5,0.5,0.6
 bias=0.0
#Aplicar el Filtro F-K#
sudipfilt < $direc/DIV_ESF/09P_sudivcor_300684.su dt=$dt dx=$dx
 slopes=$slopes
 amps=$amps bias=$bias  > $direc/FILTRO_FK/10P_sudipfilt_300684.su
```

Cuadro 4.28: Filtro F-K

### 4.11.2. Estimación del espectro F-K

Estimando el espectro bidimensional, se pueden detectar componentes de señales en diferentes pendientes y estimar su energía, lo que mejorará la separación de energía de la señal.

Considerando que la frecuencia Nyquist es : $F_N = \frac{1}{2\Delta t}$ y $F_N = \frac{1}{2\Delta x}$

dx=0.05 $k_x = 10\frac{ciclos}{km}$

dy=0.004 $f_y = 125\frac{ciclos}{segundo}$

El módulo en SU que gráfica el espectro F-K se llama *suspecfk* y necesita leer los siguientes parámetros: la distancia entre los receptores $dx = 50\ m$ (0,05 $km$) y el intervalo de muestreo $dy = 4$ (0,004 $segundos$), para calcular la frecuencia temporal (125 $Hz$) y la frecuencia espacial (10 $ciclos/km$) de Nyquist (ver cuadro 4.29 ).

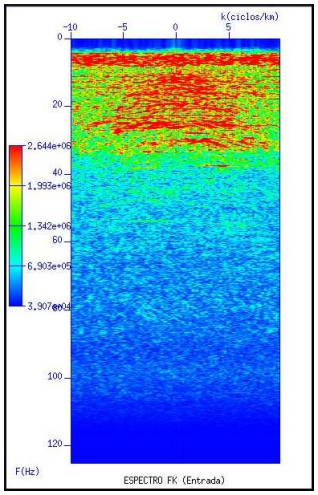
**Script-Shell graficar el espectro F-K**

```
#!/bin/bash
#Nombre_Script: 10Q_sudipfilt.sh
 direc=/NOMBRE_ESTUDIO/DATA/
#Grafica del espectro F-K sin filtro F-K#
suspecfk < $direc/DIV_ESF/09P_sudivcor_300684.su dt=$dt dx=$dx |
suximage perc=90 cmap=hsv1 &
#Grafica del espectro F-K con filtro F-K#
suspecfk < $direc/FILTRO_FK/10P_sudipfilt_300684.su dt=$dt
 dx=$dx |
 suximage perc=90 cmap=hsv1 &
```

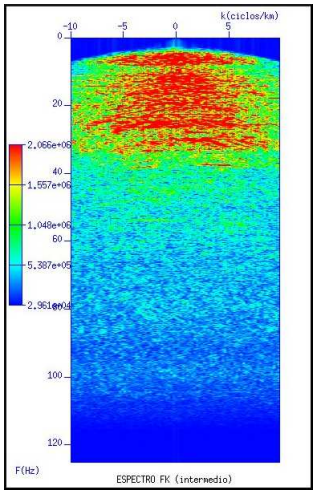
Cuadro 4.29: `Espectros F-K`

Los espectros F-K de las figuras 4.36 y 4.37 ilustran la entrada (antes de aplicar el filtro F-K) en los incisos a) y las salidas (después de aplicar el filtro F-K) con las pendientes calculadas sobre el espectro de entrada $slope = -1{,}5, -0{,}06, 0{,}06, 1{,}5$ y $slope = -0{,}6, -0{,}5, 0{,}5, 0{,}6$ en los incisos b).

Para aprobar los valores de las pendientes (*slope*) se prueban en algún PT y se calcula la diferencia (entrada - salida) para verificar el corte de cada pendiente (ver figuras 4.38 y 4.39); en el script del cuadro 4.30 se muestra la secuencia para visualizar el corte de las pendientes probadas. El gather de entrada -PT 362- fue tomado de la figura 4.34.

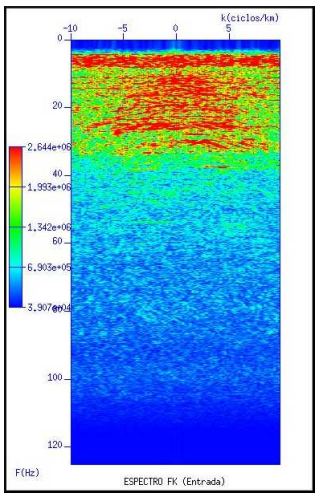



a) Obtenido del gather con divergencia esferica

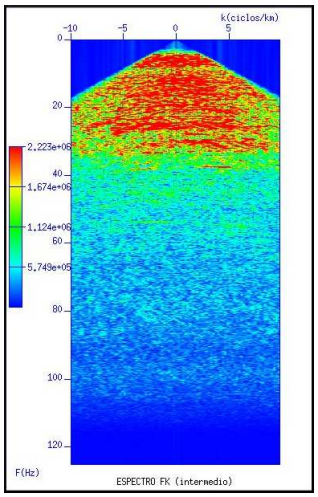



b) con filtro F-K slope=-1.5, -0.06, 0.06, 1.5

Figura 4.36: Espectros F-K con los parámetros de prueba del gather PT-362




a) Obtenido del gather con divergencia esferica




b) con filtro F-K slope=0.6, -0.5, 0.5, 0.6

Figura 4.37: Espectros F-K con los parámetros aprobados del gather PT-362

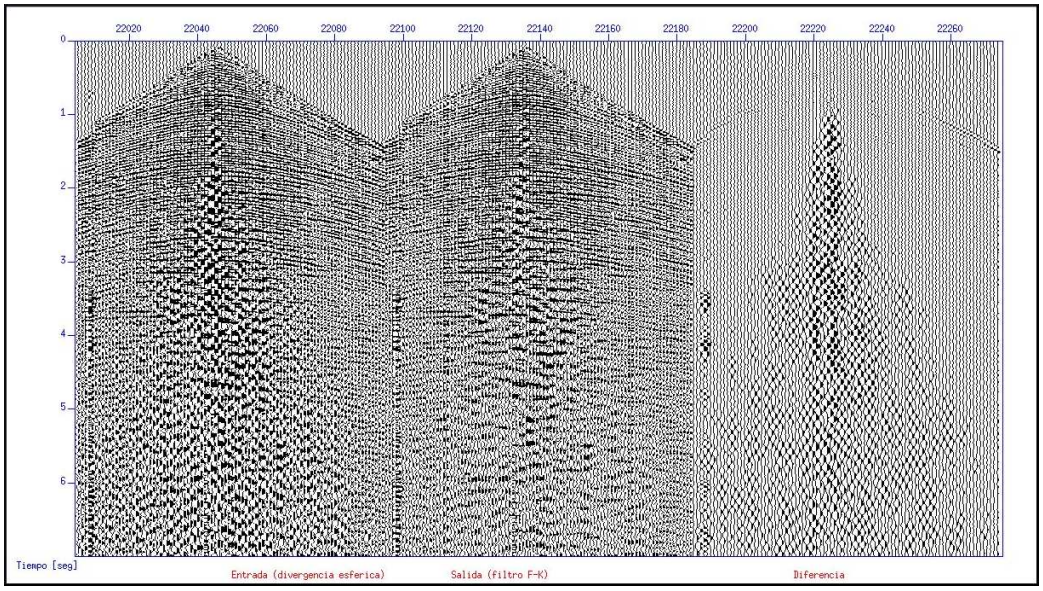



Figura 4.38: Prueba 1 de F-K con el PT-362 slope=-1.5,-0.06,0.06,1.5

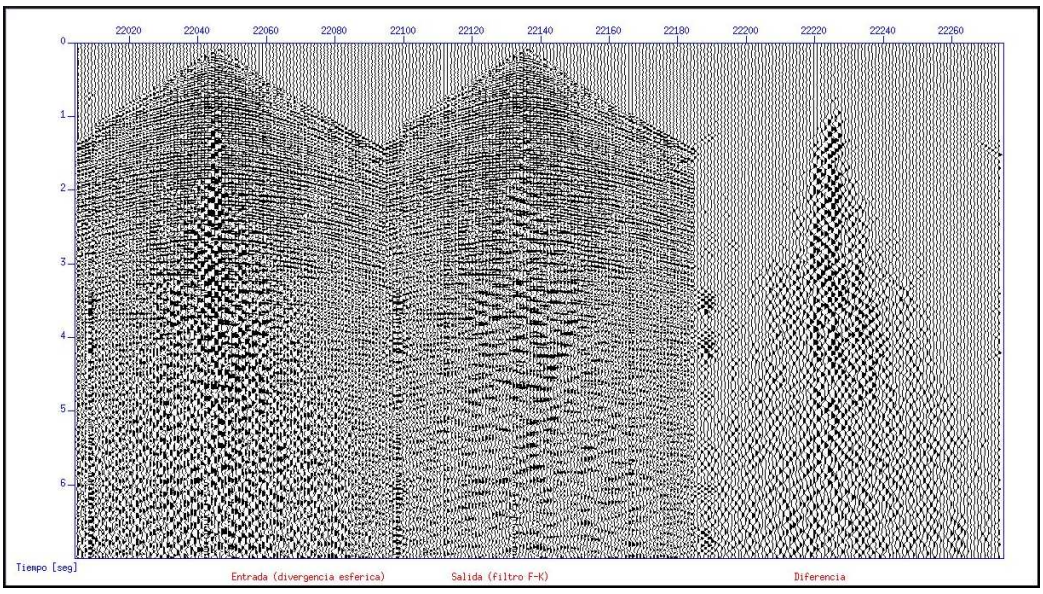



Figura 4.39: F-K seleccionado con el PT-362 slope=-0.6,-0.5,0.5,0.6

**Script-Shell visualizar pruebas de F-K**

```
#!/bin/bash
HEIGHT=675
WIDTH=1210
#Nombre_Script: 10Q_sudiff.sh
 direct=/NOMBRE_ESTUDIO/DATA

#Seleccionar un PT de la entrada y uno de la salida #
suwind < $direc/DIV_ESF/09P_sudivcor_300684.su key=fldr
 max=0 accept=293 > $direct/FILTRO_FK/293_entrada.su
suwind < $direc/FILTRO_FK/10P_sudipfilt_300684.su key=fldr
 max=0 accept=293 < $direct/FILTRO_FK/293_salida.su

#Sustraer (salida - entrada)#
sudiff $direct/FILTRO_FK/293_entrada.su $direct/FILTRO_FK/293_salida.su
 < $direct/FILTRO_FK/293_diff.su

#Concatenar para visualizar (salida, entrada y diferencia)#
fcat $direct/FILTRO_FK/293_entrada.su
 $direct/FILTRO_FK/293_salida.su 293_diff.su
 < cat_prueba1.su

suxwigb < cat_prueba1.su
 perc=93 windowtitle=dif F-K pb wbox=$WIDTH
 hbox=$HEIGHT label1=" Tiempo [seg]"
 title="Entrada (Filtro F-K)
 Salida (filtro pasa bandas) Diferencia" &
```

Cuadro 4.30: Pruebas de F-K

### 4.11.3. Control de calidad al filtro F-K

El control de calidad se hace a los PT's con filtro F-K; el filtro se aplicó a los Pt's con divergencia esférica con la pendiente slope=-0.6,-0.5,0.5,0.6,; parámetro seleccionado a partir de la pruebas realizadas.

Para realizar un control de calidad completo se deben visualizar: los espectros F-K (figura 4.37) entrada Vs salida; los PT's con el filtro F-K (ver figura 4.40) correspondientes con los tiros de entrada (Figura 4.33);

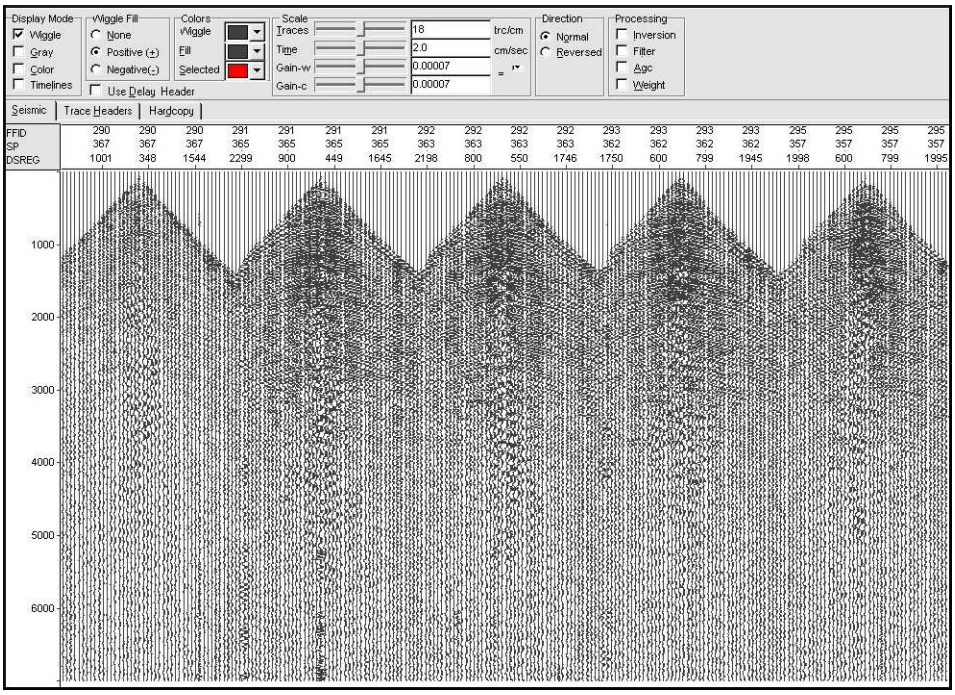



Figura 4.40: QC Gathers PT con filtro F-K slope=-0.6,-0.5,0.5,0.6

y generar el apilado (ver Figura 4.41) para comparlo con el apilado de referencia (Figura 4.35) y verificar que mejore la imagen; si la calidad de la imagen se deteriora, sera necesario realizar más pruebas.

El uso de este filtro no se recomienda para procesos donde se requiere preservar la amplitud porque puede afectar las amplitudes, además de que el polígono de corte debe ser muy preciso o de lo contrario crea alias.

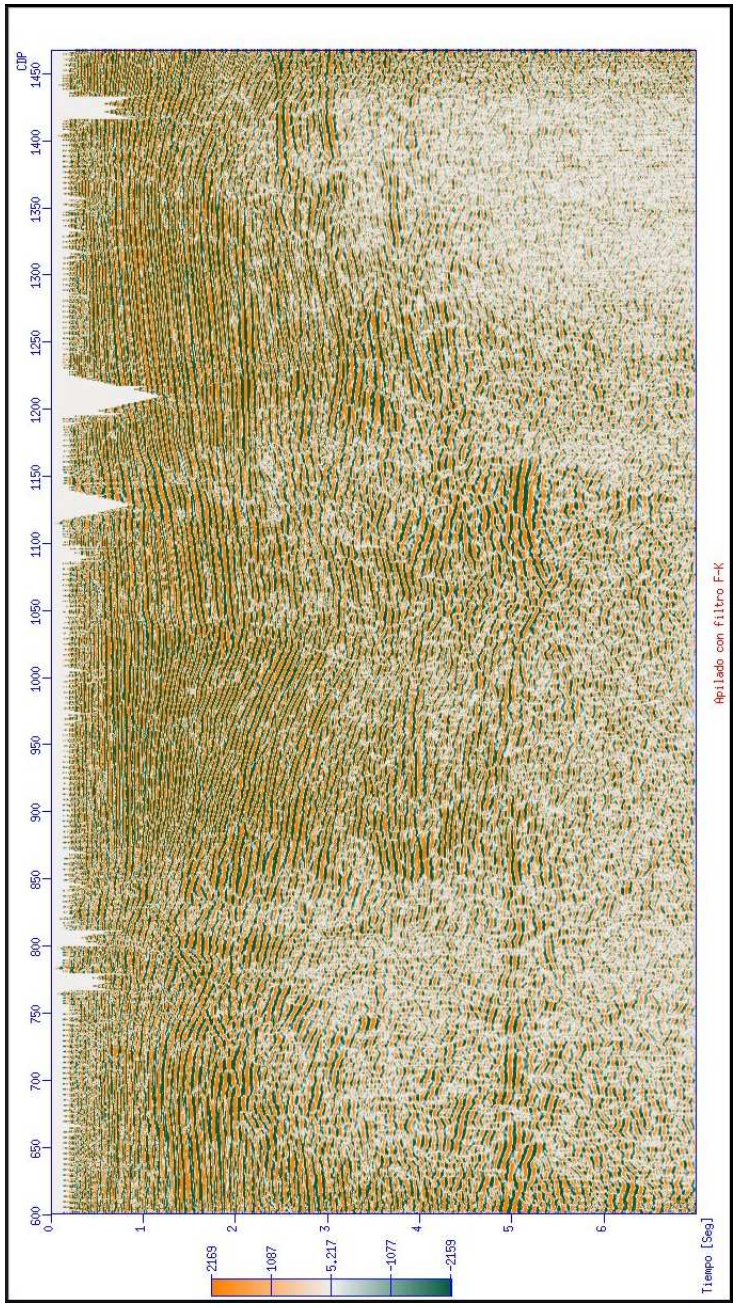
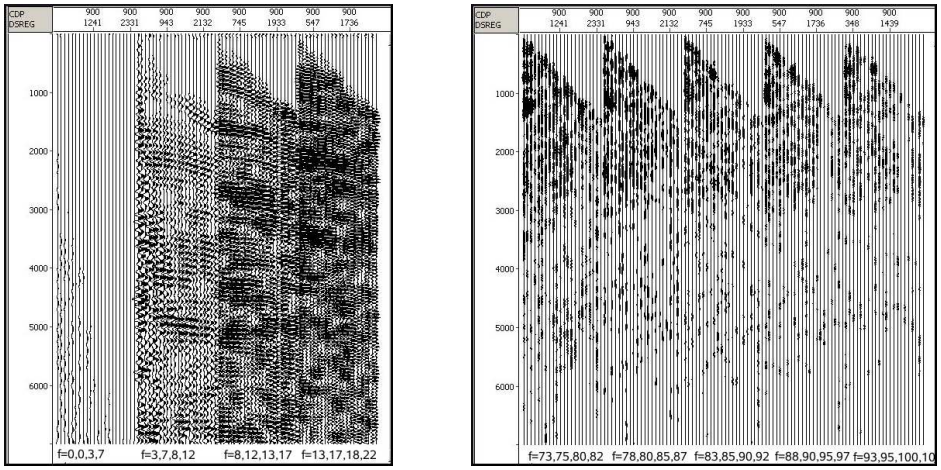



Figura 4.41: Apilamiento obtenido a partir de los PT's con filtro F-K

### 4.11.4. Filtro pasa-bandas

El filtro pasa-bandas filtra los registros en una banda de frecuencia definida por el usuario; con este filtro se pueden atenuar las bajas frecuencias como el Ground roll y las altas frecuencias generadas por los ruidos ambientales; para seleccionar el rango del filtrado es conveniente considerar las frecuencias de corte aplicadas durante la adquisición de la línea (especificados en el reporte de observador, grabadas en los encabezados de las trazas o descritos en el EBCDIC de los datos sísmicos).

El EBCDIC de esta línea describe un filtro pasabandas de corte bajo de 8 $Hz$ y un filtro de corte alto de 125 $Hz$, considerando esta información se realizaron pruebas con una imagen de filtros (ver Figura 4.42) para precisar los rangos de corte.




a) analisis para el corte bajo b) analisis para el corte alto

Figura 4.42: Pruebas para seleccionar el filtro pasabandas

En la figura del inciso a) se aplicaron filtros diseñados para limitar la frecuencia donde empieza la señal, y en el inciso b) el diseño consistió en identificar hasta donde hay señal; el script del cuadro 4.31 muestra la secuencia y los filtros que se usaron para realizar el análisis de frecuencias en el CDP 900.

Posterior al análisis de las imagenes de frecuencias se propone diseñar un filtro para remover las bajas frecuencias entre $(0 - 9\ Hz)$ y las altas frecuencias que estan entre $(90 - 125\ Hz)$; para que el módulo *sufilter* pueda leer correctamente los rangos de corte f=6,9,90,100, se incluye el parámetro amps=0,1,1,0, que describe la forma en que fue diseñado el filtro.

**Script-Shell limitar filtros de corte bajo y alto**

```
#!/bin/bash
# Nombre_Script: 014T_sufilter.sh
direc=/home/gcureno/EST_MACUSP_IDOLOS/DATA/FILT_FK
direct=/home/gcureno/EST_MACUSP_IDOLOS/DATA/FILT_PB
 #Parametros de entrada #
 amps=0,1,1,0
 dt=0.004
 #Selecciona un CDP #
suwind < $direc/10P_sudipfilt_sort.su key=cdp max=0
 accept=900 > $direct/900.su
#a) Pruebas para seleccionar el filtro de corte bajo #
sufilter < $direct/900.su dt=$dt amps=$amps f=0,0,3,7 > 01Tb.su
sufilter < $direct/900.su dt=$dt amps=$amps f=3,7,8,12 > 02Tb.su
sufilter < $direct/900.su dt=$dt amps=$amps f=8,12,13,17 > 03Tb.su
sufilter < $direct/900.su dt=$dt amps=$amps f=13,17,18,22 > 04Tb.su
 #Concatena las pruebas con diseño de filtro corte bajo #
fcat 01Tb.su 02Tb.su 03Tb.su 04Tb.su > cat_Tb_sufilter.su
#b) Pruebas para seleccionar el filtro de corte alto #
sufilter < $direct/900.su dt=$dt amps=$amps f=73,75,80,82 > 01Ta.su
sufilter < $direct/900.su dt=$dt amps=$amps f=78,80,85,87 > 02Ta.su
sufilter < $direct/900.su dt=$dt amps=$amps f=83,85,90,92 > 03Ta.su
sufilter < $direct/900.su dt=$dt amps=$amps f=88,90,95,97 > 04Ta.su
sufilter < $direct/900.su dt=$dt amps=$amps f=93,95,100,102
> 05Ta.su
 #Concatena las pruebas con diseño de filtro corte alto #
fcat 01Ta.su 02Ta.su 03Ta.su 04Ta.su 05Ta.su > cat_Ta.su
```

Cuadro 4.31: `Filtros pasabandas de prueba`

Para aprobar el filtro pasabandas (propuesto) se prueba en el rango de PT's seleccionado para pruebas; posteriormente se selecciona alguno de ellos -PT 362- para ver como actúa el filtro, aplicando la técnica de diferencia (entrada - salida), ver la figura 4.43.

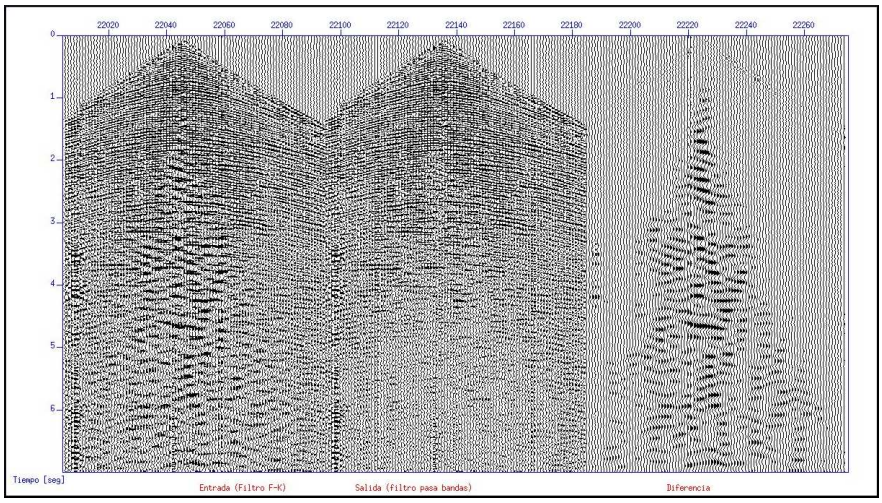



Figura 4.43: Filtro pasabandas seleccionado con el PT-362 f=6,9,90,100

Con el script de cuadro 4.32 se asignó el filtro pasabandas, a los PT's con filtro F-K.

**Script-Shell aplicar el filtro pasa-bandas**

```
#!/bin/bash
#Nombre_Script: 14P_sufilter.sh
 direc=/NOMBRE_ESTUDIO/DATA/
 #Parametros de entrada #
 amps=0,1,1,0
 dt=0.004
#Aplicar filtro pasa-bandas#
sufilter < $direc/DECONVOLUCION/13P_supef_largo_corto.su dt=$dt
 amps=$amps f=6,9,90,100 > $direc/FILTRO_PB/14P_sufilter_300684.su
```

Cuadro 4.32: `Filtro pasabandas`

### 4.11.5. Control de calidad al filtro pasabandas

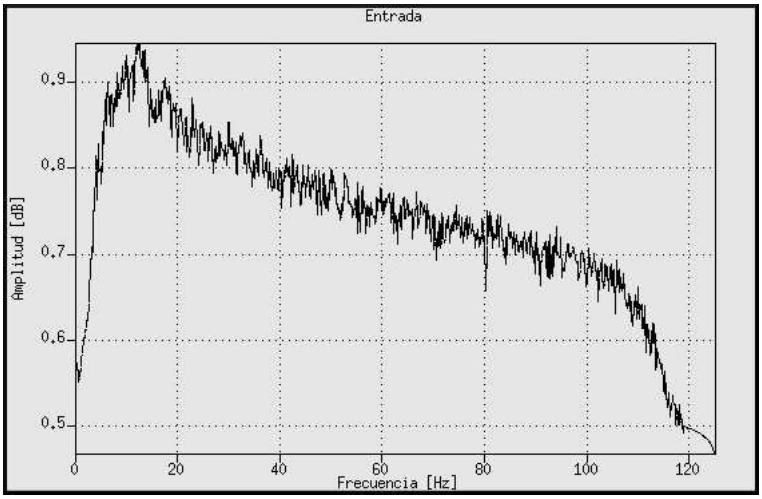
El control de calidad para el filtro pasabandas consiste en:

- Calcular los espectros en $dB/Oct$ (Figura 4.44) de algún tiro seleccionado, antes y después de su aplicación, y

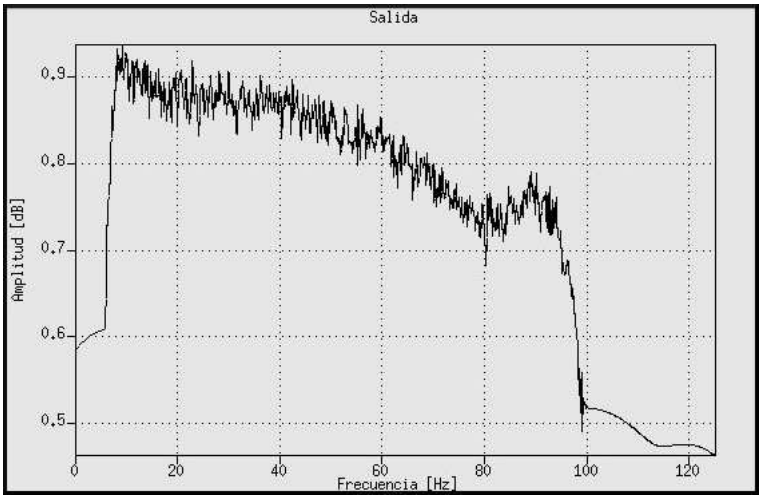
- Visualizar los espectros y compararlos entre ellos para ver como actúo el filtro después de su aplicación.

- Comparar los tiros de salida (ver Figura 4.45) respecto a los tiros de entrada (Figura 4.40).

- Verificar que el apilado con el filtro pasabandas ($f = 6, 9, 90, 100$), de la figura 4.46, mejore respecto al apilado del proceso anterior (Figura 4.41).




a) CDP entrada con F-K




b) CDP salida con filtro pasabandas

Figura 4.44: Espectros calculados antes y después del filtro pasa bandas

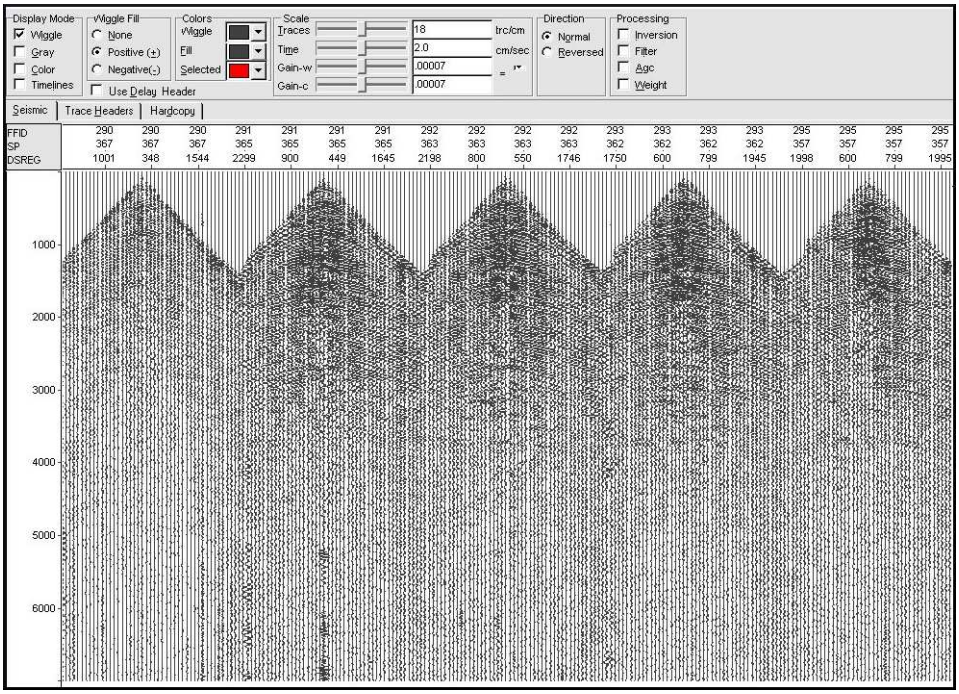



Figura 4.45: PT con filtro F-K slope=-0.6,-0.5,0.5,0.6 y filtro pasa-bandas f=6,9,90,100

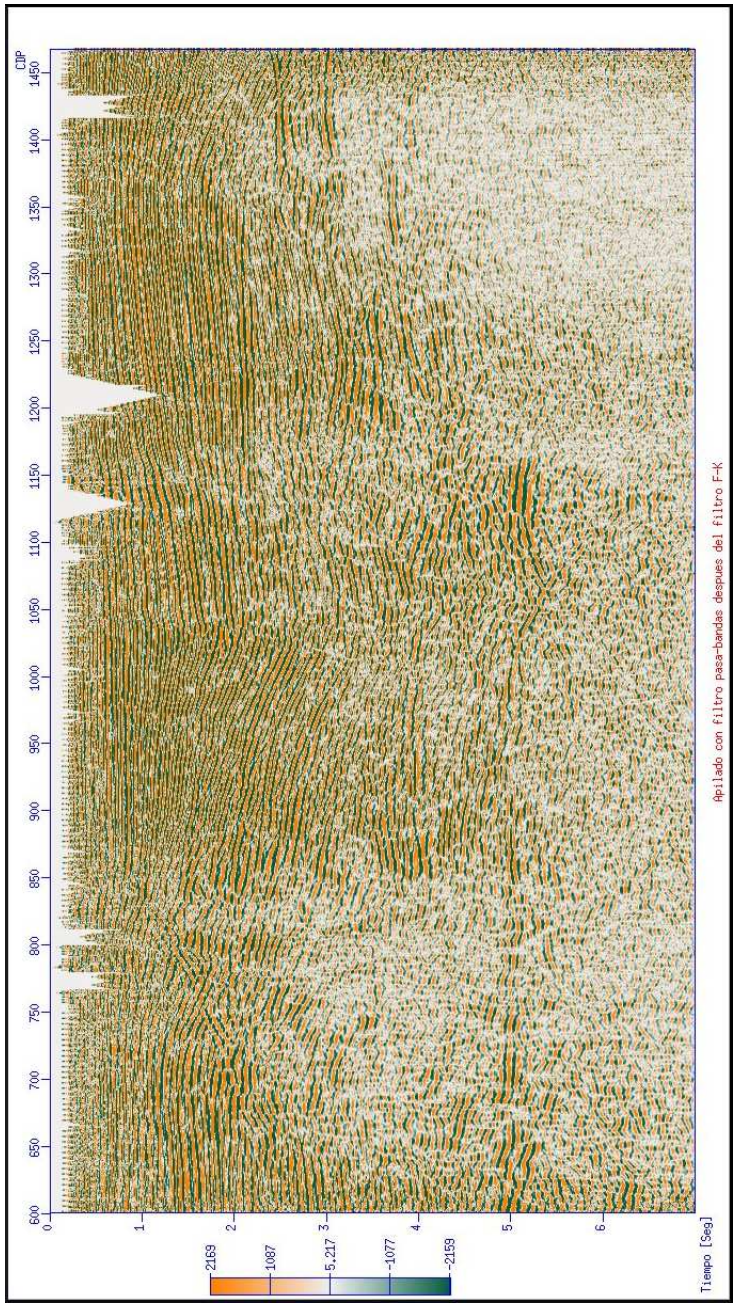



Figura 4.46: Apilamiento de los datos con filtro pasabanda

## 4.12. Deconvolución

La deconvolución consiste en convolucionar una traza con un filtro inverso, es decir, una ondícula básica inversa se convoluciona con cada traza y se obtiene la compresión de las señales, por el principio de superposición. El objetivo de la deconvolución es comprimir los componentes de la ondícula y eliminar múltiples dejando sólo la reflectividad de la tierra en la traza sísmica con la finalidad de aumentar la resolución temporal de las reflexiones.

### 4.12.1. Filtro Wiener

**Wiener Predictive Error Filtering o Statistical Deconvolution:** se considera que el filtro capaz de convertir una entrada en una salida deseada en el sentido de error de cuadrados mínimos, se llama filtro de cuadrados mínimos o filtro Wiener y en ocasiones, filtro óptimo [3].

**Deconvolución predictiva**: su objetivo es eliminar los múltiples, los cuales pueden predecirse, si se conoce el tiempo de llegada de las reflexiones primarias. A menudo los reflectores empiezan a ejercer efecto hasta después de un tiempo L (intervalo de predicción), que es el tiempo de viaje de ida y vuelta al primer reflector generador de múltiples [3].

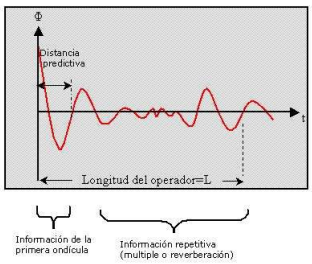
**Deconvolución impulsiva**: si la distancia predictiva es igual al intervalo de muestreo, se tiene una deconvolución impulsiva, por lo tanto, en la deconvolución predictiva el gap deberá ser mayor. La ventaja de la deconvolución impulsiva es maximizar la resolución (su contenido de frecuencias) aunque, es menos efectiva en la eliminación de múltiples Yilmas [7].

La deconvolución predictiva y la deconvolución impulsiva en el filtro Wiener permiten que este algoritmo sea el más óptimo para mejorar la resolución temporal de las reflexiones, comprimir las señales y eliminar efectos de múltiples en las secciones sísmicas.

### 4.12.2. Autocorrelación

El filtro inverso de cuadrados mínimos se diseña a partir de valores obtenidos de la autocorrelación. El pico central de la función de autocorrelación representa cambios de menos de la mitad del período dominante y contiene la mayor parte de la información acerca de la forma de la ondícula promedio. Por otra parte, los picos y los retrazos más grandes representan repetición de información producida por múltiples. [3].

Al graficar una traza autocorelacionada se obtiene el autocorrelograma con la finalidad de obtener la *longitud del operador* que abarca desde el inicio del autocorrelograma al segundo cero de la ondícula y la *distancia predictiva*, valor aproximado a la longitud del sistema de ondículas (Figura 4.47).




$$\phi_{xx}(\tau) = \phi_{xx}(-\tau)$$

Figura 4.47: Autocorrelograma de una traza autocorrelacionada

En un conjunto de datos sísmicos, el autocorrelograma para estimar la forma de onda, se obtiene autocorrelacionando las trazas apiladas. La figura 4.48 con el apilado de los PT's con divergencia esférica y el autocorrelograma calculado con el módulo *suacor* de *su* (ver cuadro 4.33), muestra el pico máximo centrado en 200 ms que representa la ondícula promedio, y las líneas aproximadamente paralelas representan los múltiples (el objetivo consiste en eliminarlas o atenuarlas).

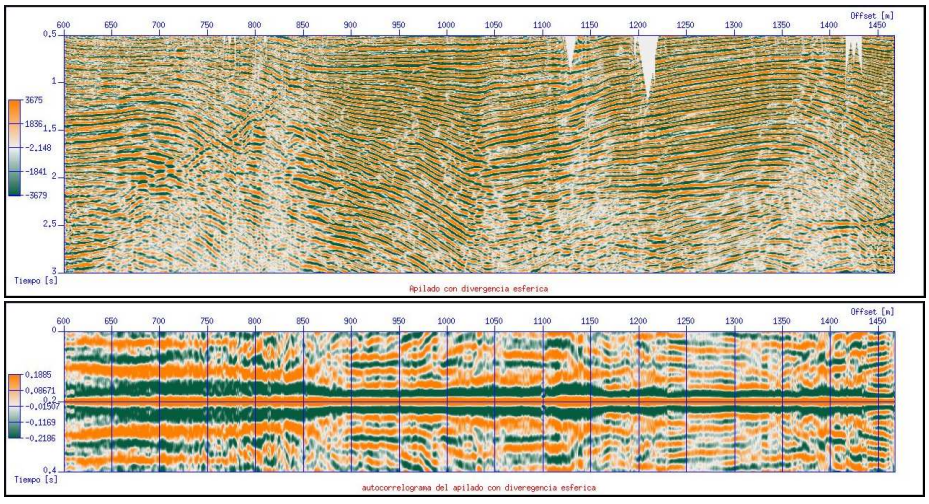



Figura 4.48: Autocorrelograma, apilado con divergencia esférica de 500-3000 ms

**Script-Shell calcular y graficar la autocorrelacion**

```
#!/bin/bash
#Nombre_Script: 12P_suacor.sh
 direc= /NOMBRE_ESTUDIO/DATA
suwind  < $direc/FILTRO_PB/11P_stack_grm_300684.su
 tmin=.500 tmax=3.0  > $direc/AUTOCORRELACION/temp1_suwind.su
suacor  < $direc/AUTOCORRELACION/temp1_suwind.su norm=1 sym=1 |
suxwigb perc=85 xbox=385 ybox=10 wbox=550 hbox=700
 label1="Tiempo [s]" label2="Offset [m]" legend=3 cmap=rgb8
 title="Autocorrelograma-FK_pb" verbose=0 grid1=solid
 grid2=solid wbox=${WIDTH} hbox=${HEIGHT}&
```

Cuadro 4.33: `Autocorrelación y autocorrelograma`

Para aplicar la deconvolución predictiva a los datos con el módulo *supef* de *SU*, se genero el script-shell del cuadro 4.34; en los parámetros que solicita el módulo se asignan los valores medidos en el autocorrelograma generado.

**Script-Shell aplicar la deconvolucion**

```
#!/bin/bash
#Nombre_Script: 13P_supef.sh
direc= /NOMBRE_ESTUDIO/DATA

#Parametros que eliminan multiples de periodo largo en seg#
 minlag_l=0.02
 maxlag_l=0.24
 mincorr_l=0.5
 maxcorr_l=3.0

#Parametros que eliminan multiples de periodo corto en seg#
 minlag_c=0.080
 maxlag_c=0.240
 mincorr_c=0.5
 maxcorr_c=3.0

supef  < $direc/FILTRO_FK/10P_sudipfilt_300684.su
 minlag=$minlag_l maxlag=$maxlag_l mincorr=$mincorr_l
 maxcorr=$maxcorr_l showwiener=0 >
 $direc/DECONVOLUCION/13P_supef_largo.su

supef  < $direc/DECONVOLUCION/13P_supef_largo.su
 minlag=$minlag_c maxlag=$maxlag_c mincorr=$mincorr_c
 maxcorr=$maxcorr_c
 > $direc/DECONVOLUCION/13P_supef_largo_corto.su
```

Cuadro 4.34: `Deconvolución a los tiros`

### 4.12.3. Secuencia usada para aplicar la deconvolución a los datos sísmicos

Para alcanzar los objetivos (eliminar múltiples de superficie y comprimir la ondícula) se realizan pruebas y se comparan los resultados (entrada & salida). A continuación se muestra la secuencia para aplicar la deconvolución a los datos sísmicos.

1. Seleccionar una ventana de tiempo de 500 a 3000 ms del apilado para

autocorrelacionarla.

- Apilado con F-K (Figura 4.49)

Con el autocorrelograma obtenido:

2. Calcular la longitud del operador y la distancia predictiva (en segundos para SU)

- de los mútiples de período largo y
- de los múltiples de período corto

para asignarlos a la entrada del script-shell deconvolución (Cuadro 4.34)

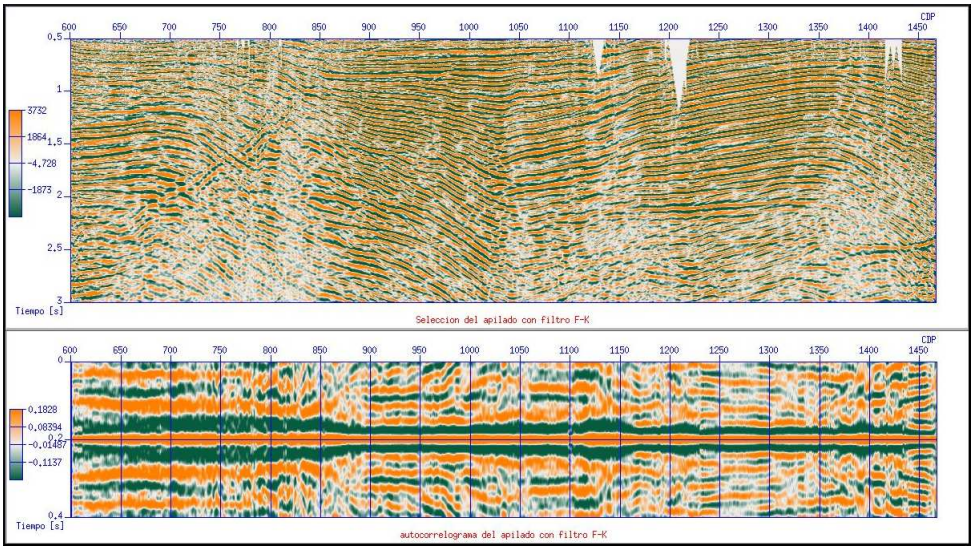



Figura 4.49: Autocorrelograma inicial

En el autocorrelograma de la figura 4.49 calculado con el script shell del cuadro 4.33, se observan 2 tipos de repeticiones: de período corto del lado derecho y de período largo del lado izquierdo; para atenuar cada repetición la deconvolución se aplicó dos veces (una después de la otra, con distintos parámetros), respectivamente. Las pruebas realizadas consistieron en: calcular los parámetros para cada período de los múltiples y elegir que parámetros aplicar primero.

3. Aplicar la deconvolución

- A los PT's con F-K para eliminar los múltiples de período largo (Figura 4.50)
- A los PT's con F-K + deconvolución (múltiples de período largo) para eliminar los múltiples de período corto (Figura 4.51)

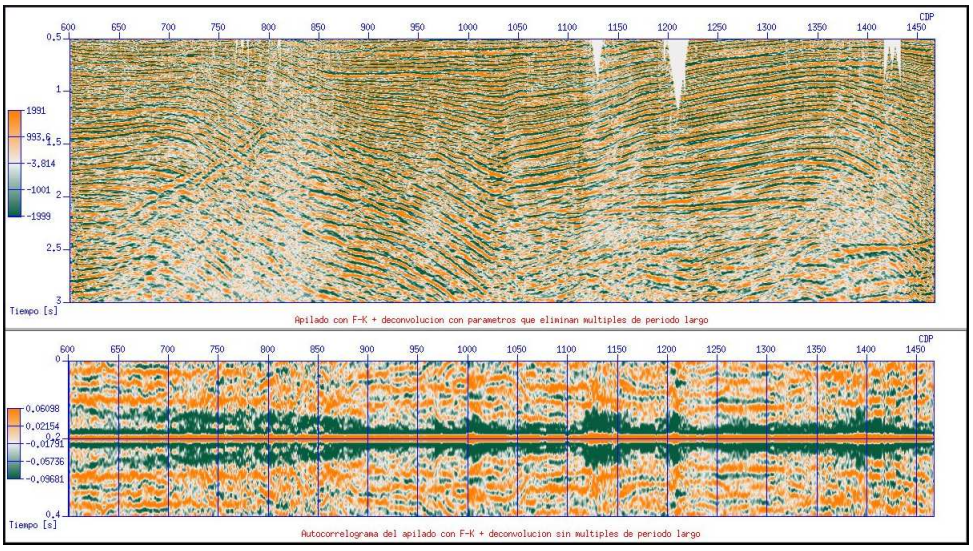



Figura 4.50: Sin múltiples de período largo

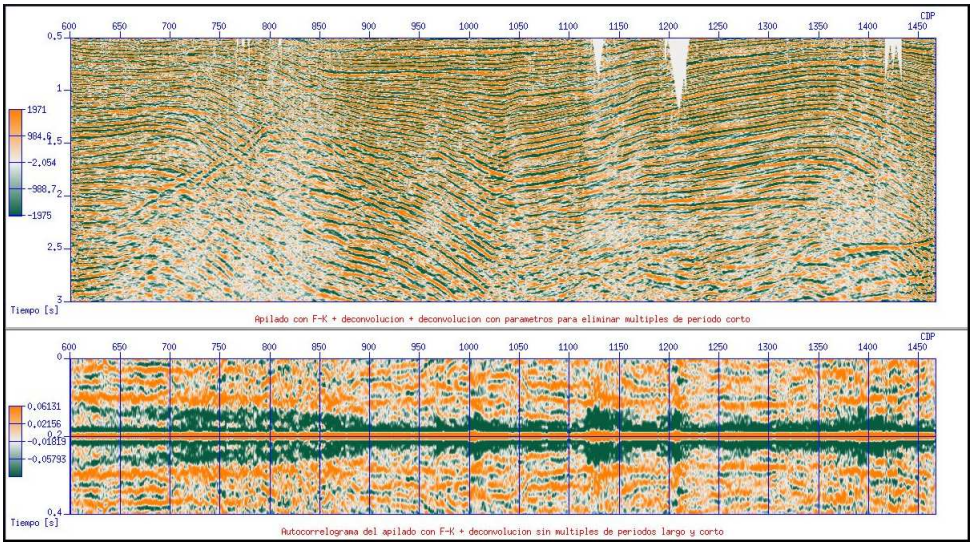



Figura 4.51: Sin múltiples de período largo y de período corto

El script shell del cuadro 4.34 calculó la primera deconvolución a los tiros con fltro F-K (entrada) con los siguientes parámetros de entrada: distancia predictiva de 0.080 $s$ y longitud de operador de 0.240 $s$ para eliminar los múltiples de período largo solamente, los resultados se muestran en el autocorrelograma de la figura 4.50. En la segunda deconvolución aplicada a la salida de la primera deconvolución se usó una distancia de predicción de 0.02 $s$ y una longitud de operador de 0.240 $s$ para eliminar únicamente los múltiples de período corto, obteniendo el autocorrelograma de la figura 4.51.

Al aplicar el proceso de deconvolución a los tiros, también se resaltan ruidos (spikes de alta frecuencia, etc). Es por eso que se aplica la salida de la deconvolución el filtro F-K y el pasa-bandas. El autocorelograma final (Figura 4.52) incluye todos los procesos aplicados después de la deconvolución.

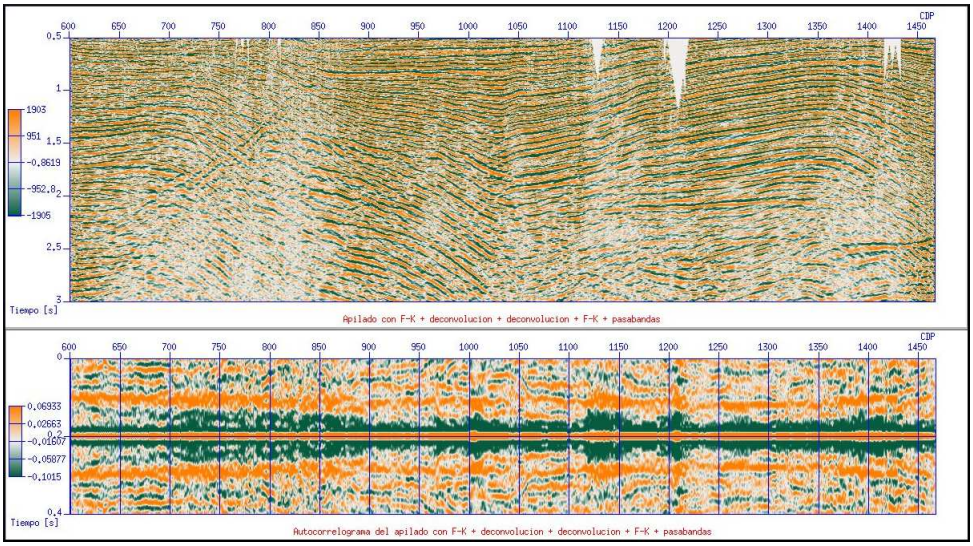



Figura 4.52: Autocorrelograma final

## 4.12.4. Control de calidad de la deconvolución

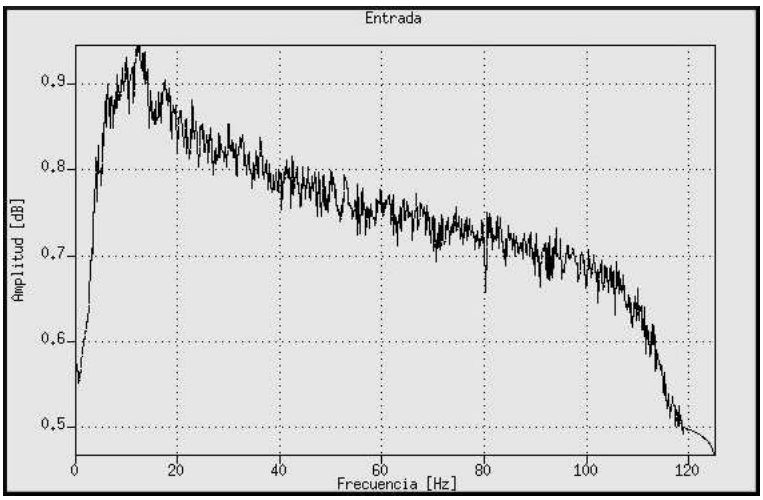
El control de calidad en la etapa de la deconvolución, consiste en visualizar y comparar las salidas del proceso aplicado respecto a las entradas:

- los espectros (Figuras 4.53)
- algunos PT's (Figuras 4.54)
- algunos CDP's (Figuras 4.55),
- los apilados (Figura 4.56) y

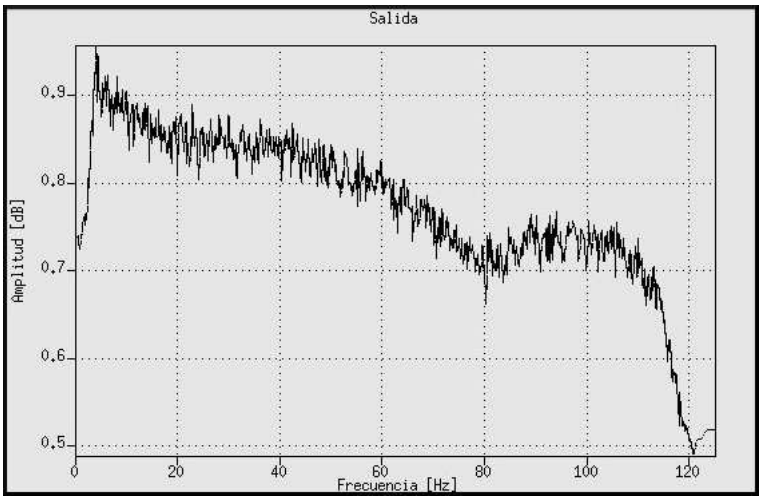
- las autocorrelaciones de los apilados (Figuras 4.49 - 4.52) .

La función de autocorrelación también se debe calcular después de aplicar la deconvolución, el autocorrelograma seguirá mostrando el pico máximo centrado, pero las líneas aproximadamente paralelas que representan los múltiples tendrán que verse atenuadas. En el autocorrelograma de la figura 4.52 se nota que las repeticiones de período corto y largo están atenuadas.

La figura 4.56 muestra el apilado de los tiros con deconvolución; este apilado debe compararse con el apilado de la figura 4.46 que es el paso previo (filtro F-K + pasabandas).

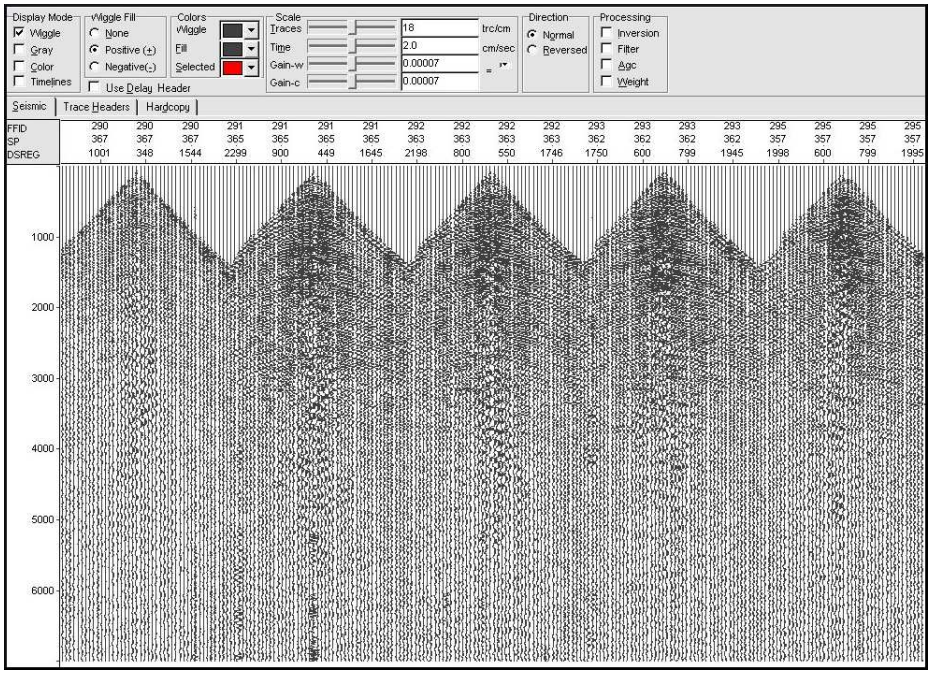



a) CDP entrada con F-K

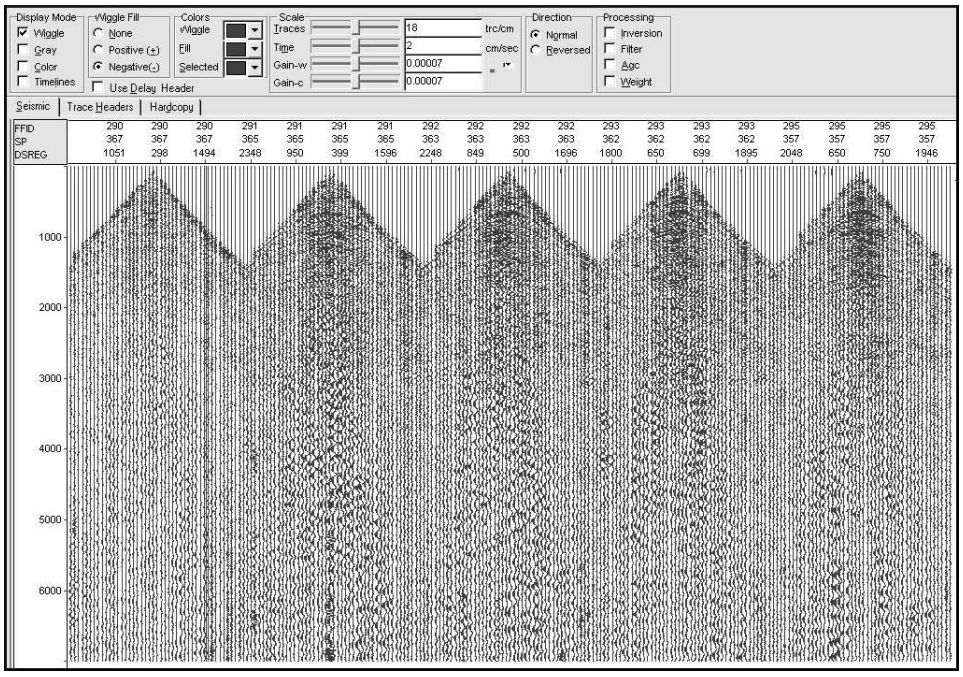



b) CDP salida con deconvolucion

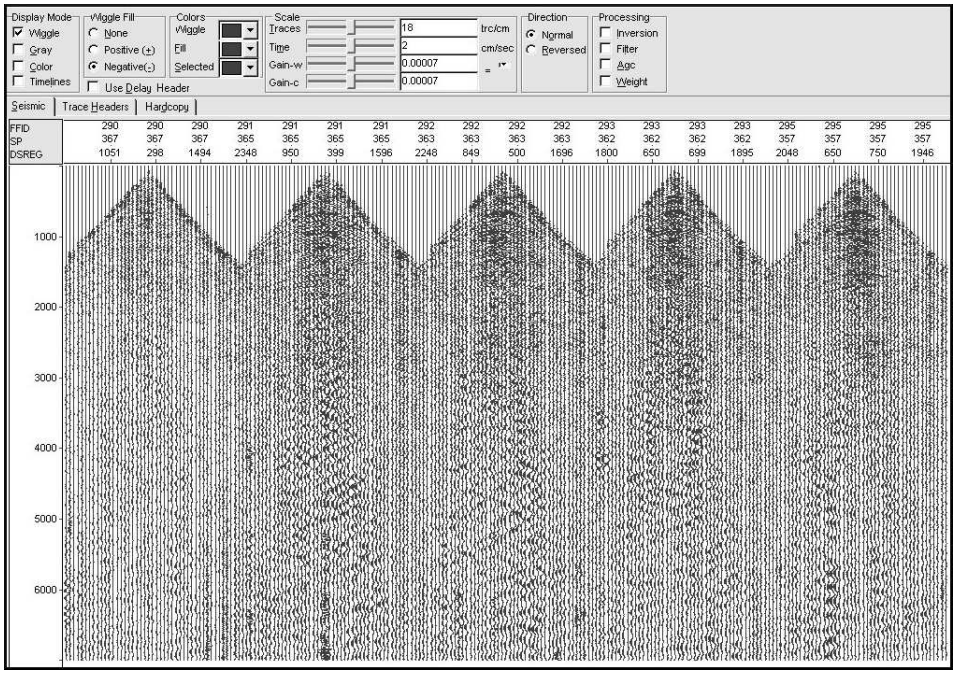
Figura 4.53: Espectros calculados antes y después de la deconvolución



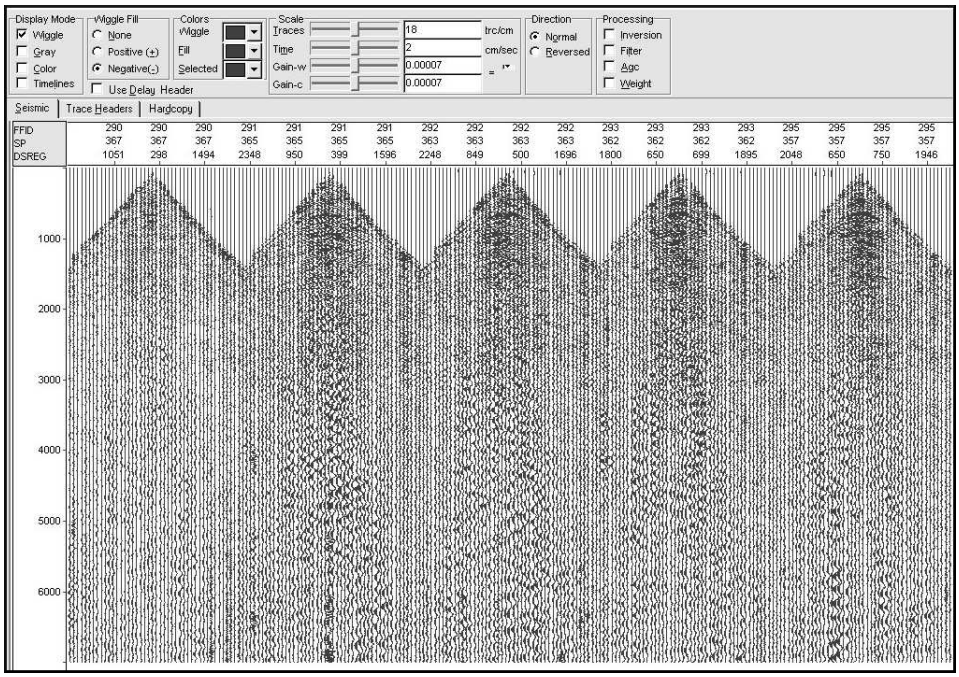

a) PT's con F-K




b) PT's con F-K + doble deconvolución

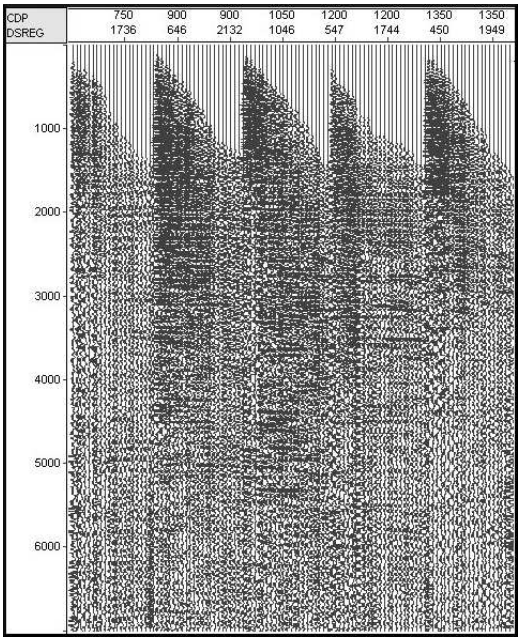



c) PT's con F-K + doble deconvolución + filtro F-K

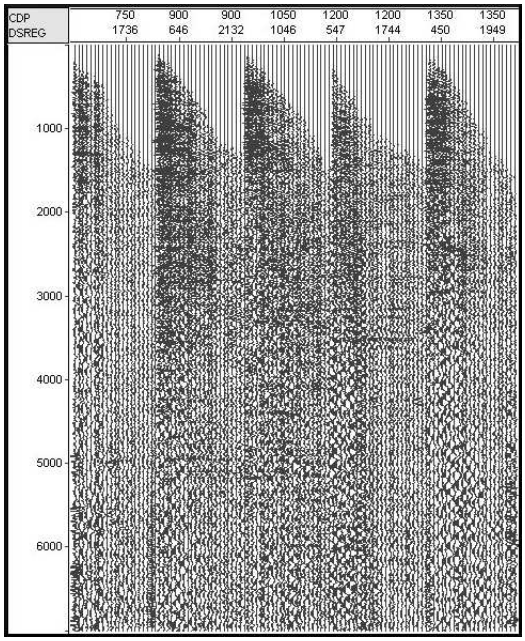



d) PT's con F-K + doble deconvolución + filtro F-K + filtro pasa-bajas

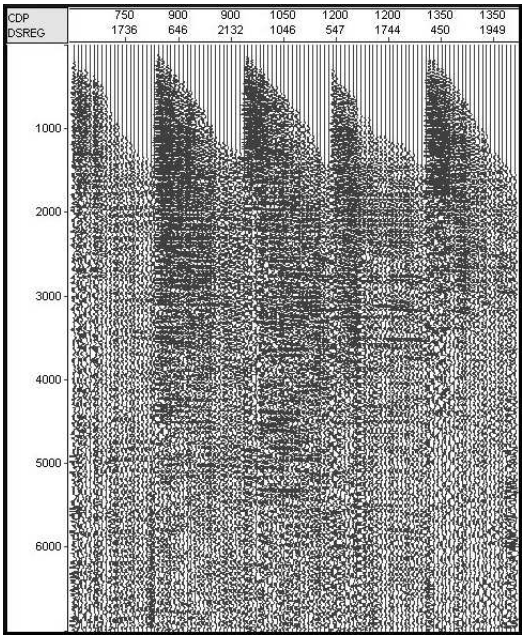
Figura 4.54: Gathers PT's



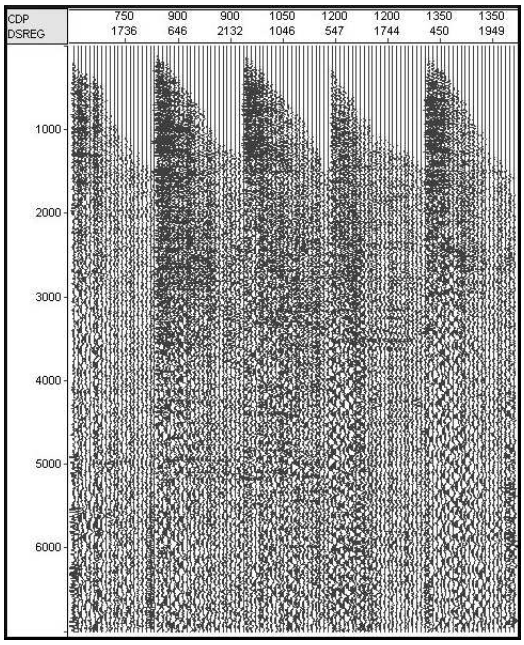

a) CDP entrada




b) deconvolucion 1
multiples de periodo largo




d) CDP salida + F-K + Pasa-bandas
para atenuar ruidos de salida




c) deconvolucion 2
multiples de periodo corto

Figura 4.55: CDP's con la secuencia de deconvolución aplicada a,b,c y d respectivamente

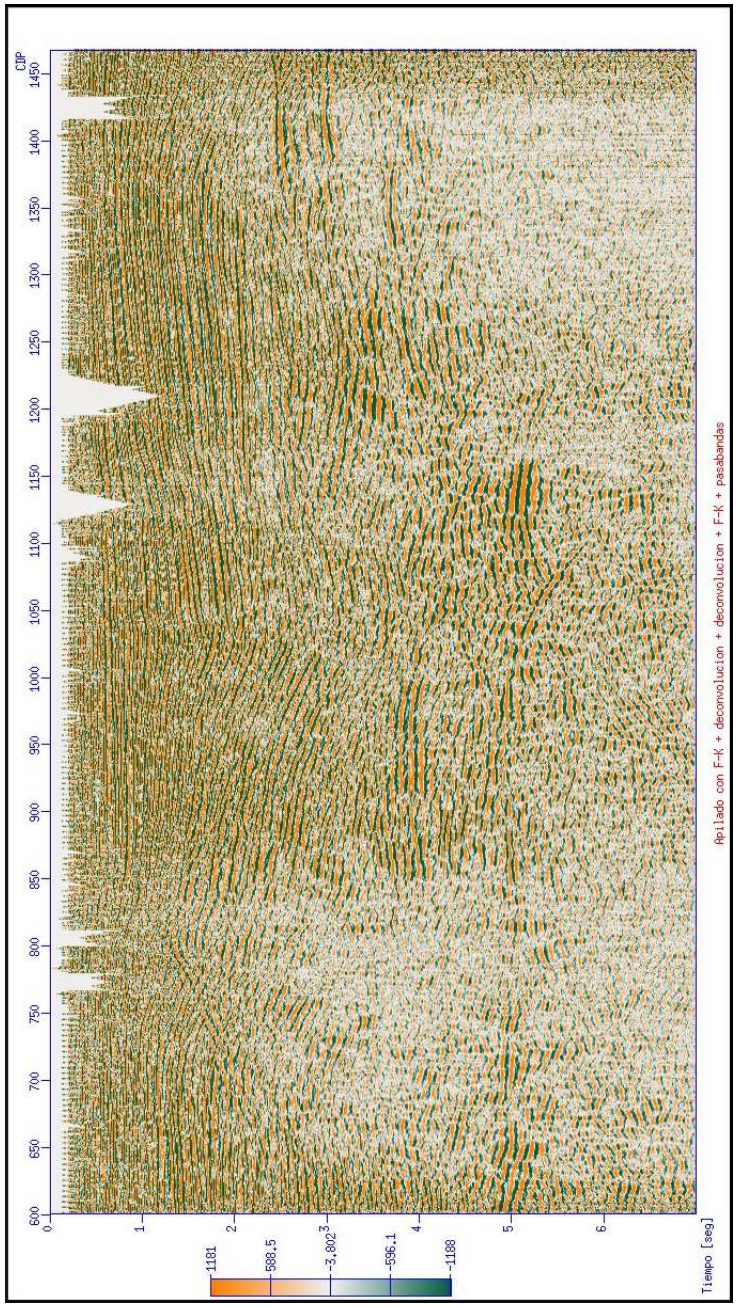



Figura 4.56: Apilamiento de los datos con deconvolución

## 4.13. Análisis de velocidades

El análisis de velocidades es el camino para estimar las velocidades de apilamiento; la presición del método depende de la relación señal/ruido, que puede afectar la calidad del picado de velocidades.

El NMO (sección 4.12.2) es la base para determinar las velocidades del subsuelo en los datos sísmicos, es decir, el campo de velocidades resultante del picado de velocidades se usa para aplicar el NMO con la finalidad de eliminar el efecto hiperbólico, de tal forma que las reflexiones se horizontalicen lo mejor posible en un CDP gather antes de apilar. En el caso que las velocidades establecidas sean poco precisas, afectará la alineación de los eventos degradando la calidad de la sección apilada, esto es debido a que las reflexiones no se suman coherentemente.

Los estudios sísmicos tienen desde cientos hasta miles de CDP's, lo que resultaría imposible terminar de hacer un análisis de velocidad para cada uno de ellos. Por tal motivo se hace una selección con intervalos iguales entre cada gather CDP seleccionado (considerando la longitud de la línea), suficiente para interpolar los valores de velocidad de los CDP´s que no fueron analizados y picados. La distancia que se consideró para realizar el picado de velocidades es de 1000 metros (cada 40 CDP's).

Para el análisis de velocidad se utilizan varias herramientas; dependiendo del software a usar, las herramientas más comunes y empleadas en SU son las siguientes:

**Semblanza**

La semblanza es la medida de similitud que existe entre dos o más trazas, pero con diferente velocidad aplicada a cada una de ellas al apilar; considerando esto, en un plot-semblanza $(v, t)$ todas las trazas requeridas por las velocidades especificadas en el shell-script del cuadro 4.37, reflejan la energía contenida en un evento con una velocidad $v$ , la cual se puede picar considerando que los máximos de las semblanzas horizontalicen mejor los eventos del gather para obtener la traza apilada del CDP seleccionado. El script shell del cuadro 4.35 es un segmento del script mostrado en el cuadro 4.37 con el fin de mostrar la parte correspondiente a la semblanza.

La ecuación para obtener la semblanza tomada del módulo *suvelan* de SU es la siguiente:

$$s(t) = \frac{\left[\sum_{j=0}^{n-1} q\,(t,j)\right]^2}{\sum_{j=0}^{n-1} [q(t,j)]^2} = \frac{(amplitud)^2 de\ la\ traza\ apilada}{(amplitud)^2 de\ la\ traza\ no\ apilada} \tag{4.6}$$

**Segmento del script-shell 4.37 para obtener una semblanza**

```
#parametros de lectura#
  nv=55 # Numero de velocidades scan #
  dv=50 # Intervalos de velocidad mostrados en el scan #
  fv=1500 # velocidad inicial en scan #
#calcula la semblanza#
suvelan <cmp.$cdp nv=$nv dv=$dv fv=$fv \
 normpow=$normpow slowness=$slowness |
#visualiza la semblanza y genera la libreria del picado#
suximage f2=$fv d2=$dv \
 label1="tiempo [s]" label2="velocidad [m/s]" \
 windowtitle="semblanza" title="semblanza del cmp $cdp" \
 grid1=solid grid2=solid cmap=hsv2 \
 wbox=400 hbox=600 xbox=10 ybox=10 perc=98 \
 mpicks=mpicks.$cdp
```

Cuadro 4.35: `Muestra para obtener una semblanza`

### CVS(Constant Velocity Stack por sus siglas en inglés)

El CVS es un plot que muestra diferentes paneles de un rango de CDP´s apilados cuyo CDP central es el mismo que el de la semblanza; cada panel se genera apilando cinco gathers antes y cinco gathers después del gahter central con una función de velocidad constante; comparando los paneles generados se decide en qué tiempo y con cual velocidad se apila mejor el evento; el plot permite darse una idea del apilado de la sección sísmica.

El CVS y la semblanza son herramientas útiles en el análisis de velocidades para cada gather, y las velocidades pueden picarse en cualquiera de los dos plots.

El Script shell del cuadro 4.36 es una muestra tomada del script 4.37 para explicar cómo obtener el CVS.

**Segmento del script-shell 4.37 para obtener los CVS**

```
  > tmp1
  j=1
  k=‘expr $cdp + 10‘
  l=‘bc -l << -end
  $dv * $nv /120
  end‘
suwind <$velpanel key=cdp min=$cdp max=$k > tmp0
  while [ $j -le 10 ]
  do
  vel=‘bc -l << -end
  $fv + $dv * $j * $nv / 10
  end‘
  sunmo <tmp0 vnmo=$vel | sustack >> tmp1
  sunull ntr=2 nt=$nout dt=$dout >> tmp1
  j=‘expr $j + 1‘
  done
suximage <tmp1 xbox=834 ybox=10 wbox=630 hbox=600 \
 windowtitle=CVS title="constant velocity stack cmp $cdp" \
 label1="tiempo [s]" label2="velocidad [m/s]" \
 f2=$fv d2=$l verbose=0 mpicks=mpicks.$cdp \
 perc=99 n2tic=5 cmap=rgb0 &
```

Cuadro 4.36: `Muestra para obtener un CVS`

El Script shell del cuadro 4.37 contiene los módulos para desplegar las herramientas que se necesitan para realizar el analisis de velocidades en cada CDP seleccionado.

### 4.13.1. Script-shell para realizar el análisis de velocidades

Al ejecutar el script-shell del cuadro 4.37 en la consola de linux, aparecerá información relevante y las instrucciones para picar las velocidades; en pantalla aparecerá el gather CDP a picar, un plot-semblanza y un plot CVS para el picado (Figura 4.57).

Para cambiar los colores del plot oprimir "r"; posicionando el cursor en el punto a picar presionar "s"; en la parte superior izquierda de cualquier plot se muestran interactivamente las coordenadas $(velocidad, tiempo)$ al presionar el boton izquierdo del mouse, los puntos picados no se indican en el plot (desventaja de SU), y para terminar de picar un CDP presionar "q".

Es recomendable picar velocidades especialmente donde exista evento primario con incrementos razonables en tiempo y velocidad, para que la interpolación temporal y espacial de las velocidades sean razonables. Las velocidades se graban en el archivo generado por el script, con la condición de mínimo tener 4 puntos picados (el módulo *suvelan* no finaliza al no cumplirse este requisito).

Al salir ("q") del plot-semblanzas, en pantalla aparecerá el gather CDP seleccionado con corrección NMO (Figura 4.58), con las velocidades picadas; la función de velocidades picadas del gather, y en el editor vi en la terminal se abre el archivo generado después de verificar los pares (tiempo-velocidad) salir del editor vi con (":q"), presionar "enter" y contestar la pregunta: estas de acuerdo con el picado? (s/n). "s" cambia de CDP, "n" realiza el cálculo de la misma semblanza y CVS para el mismo CDP hasta que se esté convencido con el picado ("s"); de inmediato aparecerá el mismo o el siguiente gather CDP a picar, según la desición tomada. Se considera una desventaja el uso de esta herramienta, al querer corregir un par $t - v$, porque se tiene que generar cada vez el gather con NMO; la mayoría del software comercial permite corregir interactivamente el punto $(t, v)$ horizontalizando interactivamente el gather en el mismo despliegue.

El scrip-shell termina de ejecutarse en el momento de aceptar el picado de velocidades del último CDP ($maxcdp); automáticamente concatena todas los archivos generados, los ordena de tal forma que el archivo generado (apilvel.pk1) pueda leerlo el módulo *sunmo*. Cabe mencionar que al teclear el comando *ls* en la consola Linux se observan archivos con distinto nombre y formato: el script genera y adecúa los archivos de cada picado al formato que necesita leer cada módulo.

**Script-Shell Analisis de velocidades**

```
#! /bin/bash
#Nombre_Script:14P_suvelan.sh
#set -v

#Variables y parametros#
   direc=/NOMBRE_ESTUDIO/DATA/MUTE
     echo  "                                          "
     echo "No perder de vista la informacion de la consola de Linux"
     echo  "                                          "
     echo $direc
   velpanel=$direc/13P_supef_cdp.su
    vpicks=apilvel.pk1
    cdpmin=660
    cdpmax=1460
#1460-660=800;800x25=20,000; 20,000/500=40#
    dcdp=40
    fold=24

#Muestreo para velocidades y filtro #
    nv=55  # Numero de velocidades scan #
    dv=50  # Intervalos de velocidad mostrados en el scan #
    fv=1500  # velocidad inicial en scan #
    f=4,8,40,50  # filtro pasabandas #

#Toma la informacion de los encabezados #
    nout=`sugethw ns <$velpanel | sed 1q | sed 's/.*ns=//'`
    dt=`sugethw dt <$velpanel | sed 1q | sed 's/.*dt=//'`
    dxout=`bc -l << end
    $dt / 1000000
    end`
     echo nt=$nout dt=$dt dxout=$dxout
#Muestra el gather-cdp cada 40 cdp's #
    cdp=$cdpmin                                          1/6
```

**. . .continua**

```
    while [ $cdp -le $cdpmax ]
    do
    ok=false
    while [ $ok = false ]
    do
#Inicio del analisis de velocidades #
     echo "                                          "
     echo "Inicio del analisis de velocidad para el cdp=$cdp"
     echo "                                          "
suwind <$velpanel key=cdp min=$cdp max=$cdp  \
    count=$fold |
sufilter f=$f >cmp.$cdp
suxwigb <cmp.$cdp xbox=422 ybox=10  \
   wbox=200 hbox=600 grid1=solid grid2=dot  \
   windowtitle="cmp=$cdp" title="cmp gather $cdp"  \
   perc=97 key=offset verbose=0  &
#CVS (Constant Velocity Stack) #
    >tmp1
    j=1
    k=`expr $cdp + 10`
    l=`bc -l << -end
    $dv * $nv /120
    end`
suwind <$velpanel key=cdp min=$cdp max=$k >tmp0
    while [ $j -le 10 ]
    do
    vel=`bc -l << -end
    $fv + $dv * $j * $nv / 10
    end`
sunmo <tmp0 vnmo=$vel | sustack >> tmp1
    sunull ntr=2 nt=$nout dt=$dout >> tmp1
    j=`expr $j + 1`
    done                                              2/6
```

**. . . continua**

```
suximage <tmp1 xbox=834 ybox=10 wbox=630 hbox=600  \
   windowtitle=CVS title="constant velocity stack CDP $cdp"
   label1=" Tiempo [s]" label2="Velocidad [m/s]"  \
   f2=$fv d2=$1 verbose=0 mpicks=mpicks.$cdp  \
   perc=99 n2tic=5 cmap=rgb0  &
        #Analisis interactivo de velocidad .#
echo "                                        "
echo " Analisis de velocidad del cdp=$cdp  "
echo "                                        "
echo "  INSTRUCCIONES PARA EL ANALISIS INTERACTIVO "
echo "  DE VELOCIDAD. "
echo "                                        "
echo " - Coloca el cursor sobre la semblanza o sobre  "
echo " el CVS (Constant Velocity Stack)  "
echo " - Presiona 's' para picar las velocidades elegidas  "
echo " - Presiona 'q' posicionado en la semblanza  "
echo "   cuando termines de picar "
echo " - Inmediatamente aparecera en pantalla un gather "
echo "   corregido con NMO "
echo "                                "
#Semblanza para el analisis de velocidad #
suvelan <cmp.$cdp nv=$nv dv=$dv fv=$fv  \
   normpow=$normpow slowness=$slowness |
suximage f2=$fv d2=$dv  \
   label1="tiempo [s]" label2="velocidad [m/s]"  \
   windowtitle="semblanza" title="semblanza del CDP $cdp"  \
   grid1=solid grid2=solid cmap=hsv2  \
   wbox=400 hbox=600 xbox=10 ybox=10 perc=98  \
   mpicks=mpicks.$cdp
   sort <mpicks.$cdp -n |
   mkparfile string1=tnmo string2=vnmo > par.$cdp
   sed <par.$cdp '                                        3/6
```

**. . . continua**

```
   s/tnmo/xin/
   s/vnmo/yin/
   ' >unisam.$cdp
    > tmp2
     echo "cdp=$cdp" >> tmp2
    cat par.$cdp >> tmp2
sunmo <cmp.$cdp par=tmp2 |
suxwigb windowtitle="cmp=$cdp corregido"
   title="CDP gather despues del nmo $cdp" xbox=422 \
  ybox=310 wbox=200 hbox=600 verbose=0 key=offset perc=94 &
echo "acomodando funcion de velocidades para el cdp $cdp"

#Script GMT grafica el picado de velocidades sin interpolar #
    awk '{print $2,"-"$1}' mpicks.$cdp | tee nada |
   psxy -JX2i/5i -R1500/4000/-8/0 -Ba1000f1000g1000/a2f2g2
    -Sc0.2 -G0/0/255 -K >mpicks.$1.ps
   psxy nada -JX2i/5i -R1500/4000/-8/0 -W0.5p -O
   >> mpicks.$1.ps
    kghostview mpicks.$1.ps &
#Interpola y grafica cada funcion de velocidades picada#
  unisam nout=$nout fxout=0.0 dxout=$dxout
    par=unisam.$cdp method=linear > unis.$cdp
  xgraph < unis.$cdp n=$nout nplot=1 d1=$dxout f1=0.0
    label1=" Tiempo [seg]" label2="Velocidad m/seg"
    title=" Funcion de velocidad apilado: CMP $cdp"
    wbox=200 hbox=600 xbox=10 ybox=10
    linecolor=2 style=seismic &
#Ordena y cambia de formato el archivo del picado#
    sort <mpicks.$cdp -n |
    mkparfile string1=tnmo string2=vnmo >par.$cdp
    edit=true
echo "editar los valores? (s/n) " >/dev/tty          4/6
```

**. . . continua**

```
echo "editar los valores? (s/n) " >/dev/tty
    read response
  case $response in
  n*) edit=false ;;
  s*) edit=true ;;
  esac
  if [ $edit = true ]
  then
  vi par.$cdp
  fi
  pause
     echo "picados ok? (s/n)" | tr -d "\012" >/dev/tty
  read response
  case $response in
  n*) ok=false ;;
  *) ok=true ;;
  esacn*) ok=false ;;n*) ok=false ;;n*) ok=false ;;
  done </dev/tty
  cdp=`bc -l <<end
  $cdp + $dcdp
  end`
  done
  set +x
#Combina el picado individual (cdp) en un archivo compuesto#
#para sunmo #
     echo "editando archivo de picados..."
   >$vpicks
     echo "cdp=" | tr -d " \012 " >> $vpicks
  cdp=$cdpmin
     echo "$cdp" | tr -d " \012 " >> $vpicks
  cdp=`bc -l << end
  $cdp + $dcdp
```

**. . . continua**

```
  end‘
  while [ $cdp -le $cdpmax ]
  do
     echo ”,$cdp” | tr -d ” \012 ” >> $vpicks
   cdp=‘bc -l << end
   $cdp + $dcdp
   end‘
   done
     echo >> $vpicks
   cdp=$cdpmin
   while [ $cdp -le $cdpmax ]
   do
   cat par.$cdp >> $vpicks
   cdp=‘bc -l << end
   $cdp + $dcdp
   end‘
   done
     echo ”sunmo par archivo: $vpicks esta listo”
   cdp=$cdpmin
   while [ $cdp -le $cdpmax ]
   do
   rm mpicks.$cdp par.$cdp
   cdp=‘bc -l << end
   $cdp + $dcdp
   end‘
   done                                                    6/6
```

Cuadro 4.37: `Análisis de velocidades`

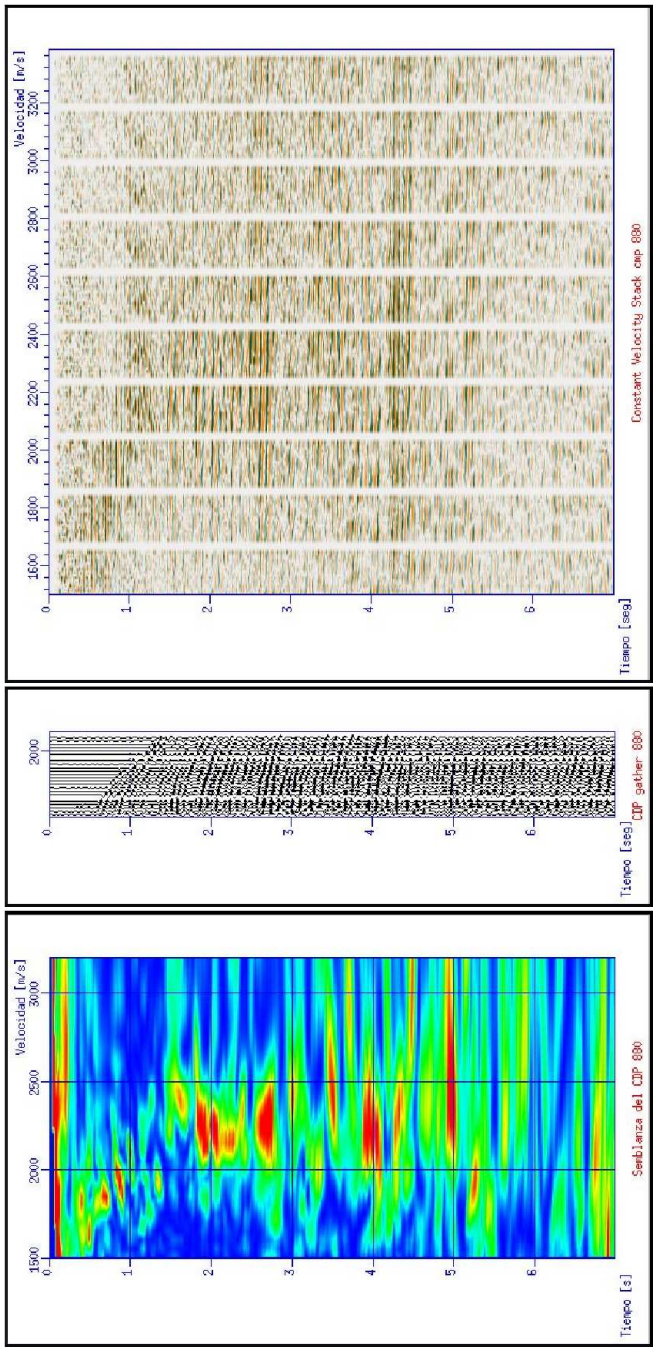



Figura 4.57: Análisis de velocidades: semblanza, CDP central 800 y CVS

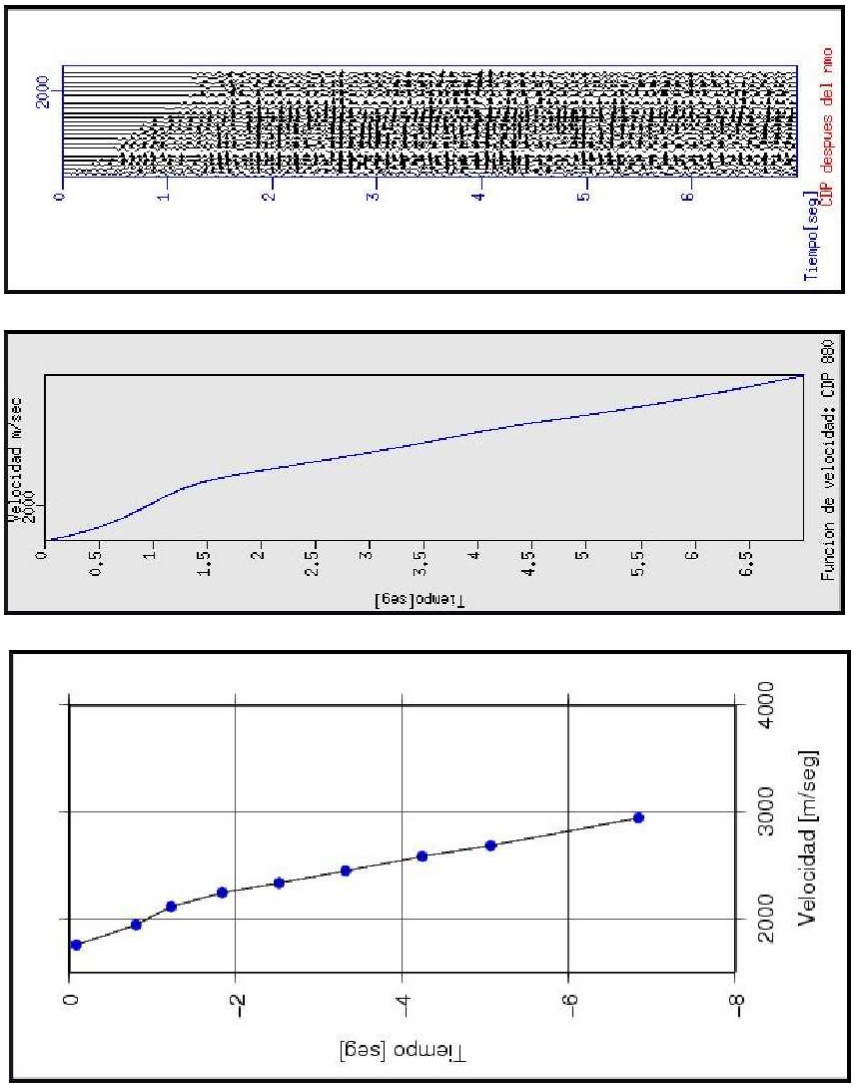



Figura 4.58: Función de velocidades $RMS$ y gather con NMO aplicado

### 4.13.2. Secuencia del Picado de velocidades en producción con controles de calidad

1) Selección de CDP gathers

Considerando, que la distancia entre CDP's es de 25 m. y una separación de 1000 m entre cada función de velocidades, entonces, el intervalo entre cdps será de 1000/25=40.

2) Intervalos de velocidad de los CVS (constant velocity scan por sus siglas en inglés)

Los mini-stack inician con una velocidad de 1500 m/seg con incrementos de 50 m/s hasta 4000 m/s.

3) CDP sin NMO

La visualización del CDP en la primer ventana "sin NMO" sirve de apoyo para identificar que eventos requieren horizontalizarce.

4) Picado sobre la Semblanza y el CVS

El picado de velocidades se realiza seleccionando los valores máximos de la semblanza; las velocidades $RMS$ aumentan con el tiempo; el criterio para realizar el picado consiste en descartar los posibles múltiples que se manifiesten como máximos de semblanzas con bajas velocidades y que puedan afectar el picado en la semblanza; durante el picado es necesario analizar la semblanza y el apilado del CVS, ver figura 4.57.

5) CDP con NMO

Como QC se visualiza el CDP corregido con NMO después de realizar el picado; los eventos del gather se horizontalizan cuando las velocidades son correctas; si los valores de velocidad obtenidos son muy altos implica que hubo una baja corrección de los eventos y si son muy bajas ocasionará una sobrecorrección. Las inversiones de la velocidad de intervalo ocurren cuando la velocidad de un medio es más baja que el medio que se encuentra encima, ver figura 4.58.

6) Gráficas de la función de velocidad

Los puntos picados se grafican también como QC, por tal motivo la función de velocidad $v(t)$ se graficó de dos formas: uno con el software GMT para visualizar los pares $(t, v)$ picados; y el otro interpolado con el módulo *unisam* y graficado con *suxgraph* de SU (Figura 4.58); el cuadro 4.38 contiene

un segmento del script-shell 4.37 que interpola y grafica las funciones picadas.

7) Perfil de isovelocidades

La figura 4.59 muestra la interpolación de las funciones entre los CDP's picados en (*tiempo*, *velocidad*) en escala de colores en m/s; a este trabajo se le conoce como *campo de velocidades RMS*.

8) Apilamiento de la línea sísmica

La mejor forma de revisar el picado de velocidades es obtener el apilado con el nuevo campo (Figura 4.62) y compararlo con el apilado del proceso previo (deconvolución) para verificar mejoras en la imagen sísmica (Figura4.56).

**Segmento del script shell 4.37 graficar la funcion de velocidad**

```
#Con GMT sin interpolar #
 awk 'print $2,"$1' mpicks.$cdp | tee nada |
psxy -JX2i/5i -R1500/4000/-8/0 -Ba1000f1000g1000/a2f2g2
 -Sc0.2 -G0/0/255 -K > mpicks.$1.ps
psxy nada -JX2i/5i -R1500/4000/-8/0 -W0.5p -O >>
mpicks.$1.ps
kghostview mpicks.$1.ps &
#Interpolados con unisam y graficados con suxgraph #
unisam nout=$nout fxout=0.0 dxout=$dxout
  par=unisam.p method=spline >unis.$cdp
suxgraph <unis.$cdp n=$nout nplot=1 d1=$dxout f1=0.0
  label1="Time sec" label2="Velocity m/sec" style=seismic
  title="Stacking Velocity Function: CMP $cdp"
  wbox=200 hbox=600 xbox=10 ybox=10 linecolor=2 &
```

Cuadro 4.38: `Muestra, grafica una función de velocidad por CDP`

El campo de velocidades se ajustó con semblanzas y CVS; este se suavizó con el módulo *smooth2* con la finalidad de evitar fuertes variaciones laterales de velocidad. Se compara el campo de velocidades picado que se muestra en la figura 4.59 con el campo de velocidades suavizado que se muestra en la figura 4.60; este nuevo campo se verificó visualizando los CDP gathers y su respectivo apilado. Al aplicar el NMO con este nuevo campo de velocidades suavizado, se comprobó que la imagen no fue afectada.

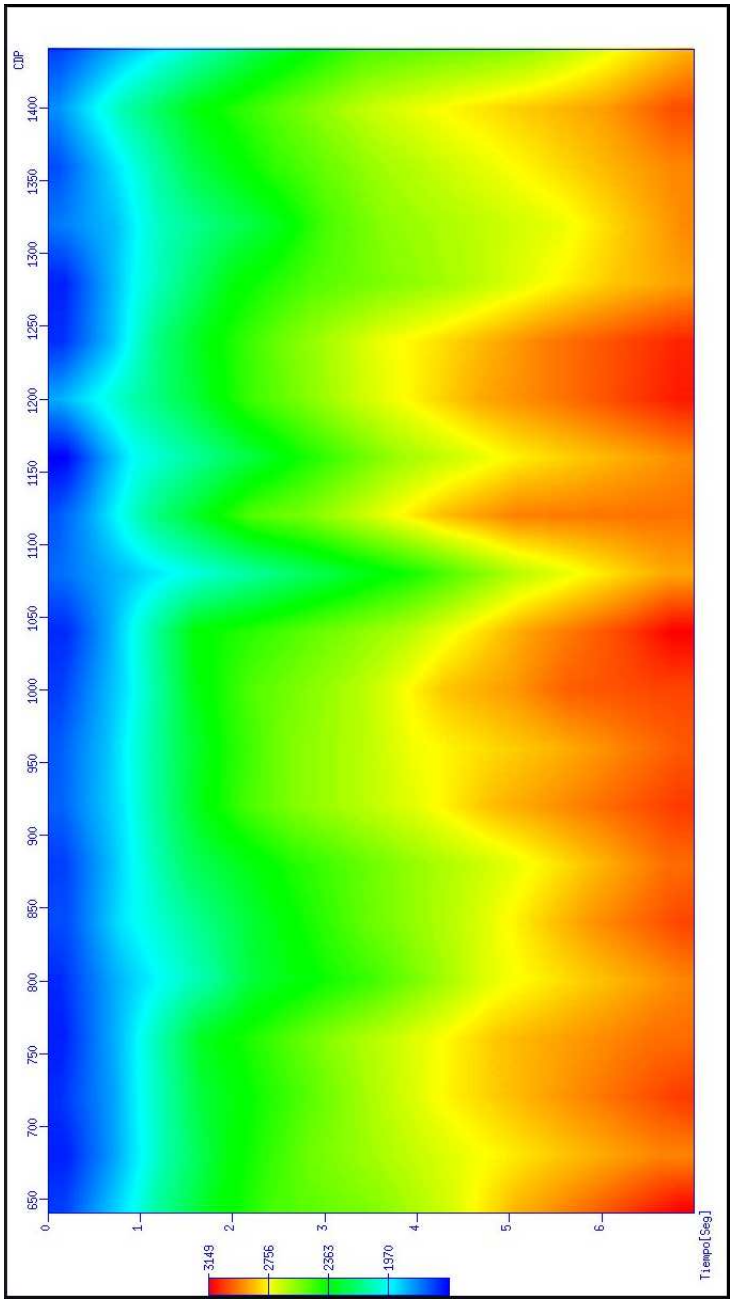



Figura 4.59: Campo de velocidades RMS [m/s]

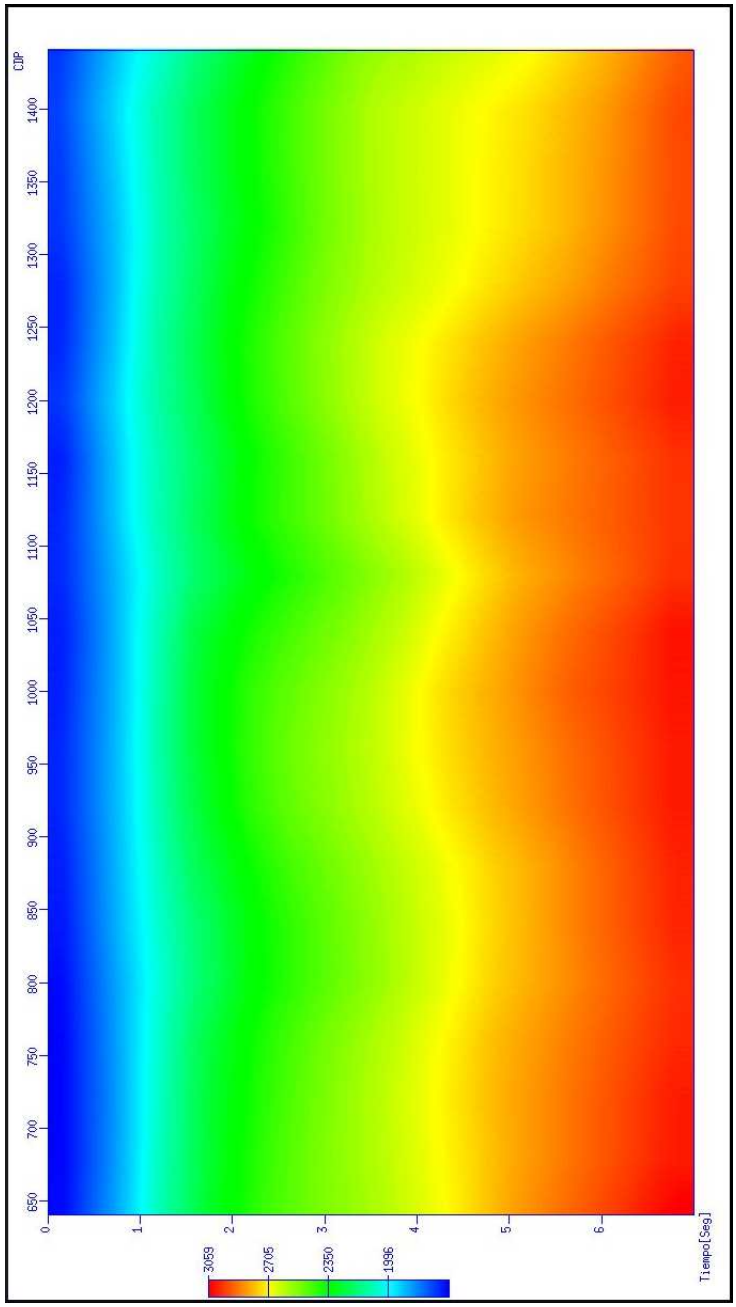



Figura 4.60: Campo de velocidades RMS suavizados [m/s]

## 4.14. Estáticas residuales

Las estáticas residuales son valores de tiempo calculados a partir de las componentes de la superficie en la que se divide; la estática es afectada por la fuente y el detector considerando la consistencia con el subsuelo y las condiciones NMO residuales; al aplicar el algóritmo iterativo Gauss-Seidel para determinar las estáticas residuales pertenecientes a la fuente y al detector, se dice que estas son estáticas de reflexión de período corto.

En el siguiente cuadro se menciona como difieren la aplicación de las estáticas residuales de las estáticas de refracción:

| **Estáticas residuales** | **Estáticas de refracción** |
|---|---|
| Compensan por los efectos de variación de velocidad y espesor de las capas someras. | Consideran únicamente la capa intemperizada corrigiendo a nivel de referencia. |
| Estima las estáticas con base en las diferencias de tiempo de reflexiones. | Cálcula las estáticas basadas en tiempos absolutos de los primeros arribos. |
| Aplican compensación por estáticas de período corto. | Aplican compensación por estáticas de período largo. |

Los tiempos de reflexión se ven afectados por irregularidades en la capa somera, de acuerdo a la tabla comparativa anterior no es suficiente con aplicar las estáticas de refracción; también es necesario aplicar las estáticas residuales a las traza sísmicas.

La relación que existe entre las estáticas y las velocidades puede afectar de dos formas: uno, estáticas incorrectas pueden causar que los análisis de velocidad no sean claros en las semblanzas, presentando errores de desplazamiento cuando se lleva a cabo el picado de velocidades; y dos, variaciones fuertes de velocidad pueden causar errores al momento de calcular las estáticas residuales, por tal motivo es necesario revisar el campo de velocidades [4].

Existen diferentes métodos para calcular las estáticas residuales tales como el método de maximización de potencia, estáticas diferenciales y el de correlación, este último método es el que se uso en SU con el módulo *sustatic*.

### 4.14.1. Cálculo y asignación de las estáticas residuales

Para calcular las estáticas residuales, se requiere una ventana de tiempo con mayor concentración de la información de intéres para efectuar correlaciones de cada traza. El módulo *surestat* de SU calcula las estáticas residuales para fuente y para receptor; tal como se muestra en el cuadro 4.39. El cuadro 4.40 aplica las estáticas residuales y genera el apilado (ver Figura 4.61) y los gathers respectivos . El apilado previo es el apilado con deconvolución y el campo de velocidades suavizado (Figura 4.62).

Los CDP gather con estáticas residuales en la actualidad se usan para realizar estudios de AVO (Amplitu Vs Offset).

**Script-Shell calcula las estaticas residuales**

```
#!/bin/bash
#Nombre_Script: 15P_suresstat.sh
direc=/NOMBRE_ESTUDIO/DATA
#entrada = Gathers PT con NMO#
suresstat  < $direc/RESIDUAL/15P_shots_con_nmo.su
 ntraces=11013 ssol=source.bin rsol=receiver.bin ntpick=20
 ns=127 nr=96 nc=1465 sfold=96 rfold=96 cfold=24 mode=1
 ntpick=50 sub=1 verbose=1 niter=5 perc=10
```

Cuadro 4.39: `Calcula las estáticas residuales`

**Script-Shell asigna las estaticas residuales y despliega el apilado para su comparacion**

```
#!/bin/bash
#Nombre_Script: 15P_sustatic_resid.sh
direc=/NOMBRE_ESTUDIO/DATA
HEIGHT=675
WIDTH=1210
#Asigna las estaticas residuales #
sustatic  < $direc/RESIDUAL/15P_shots_con_nmo.su nr=96 ns=127
 sou_file=source.bin rec_file=receiver.bin hdrs=3 verbose=1
 > $direc/RESIDUAL/15P_sustatic_resid_pts.su
#————————Apilado con estáticas residuales———————— #
suabshw < $direc/RESIDUAL/15P_sustatic_resid_pts.su
 > $direc/RESIDUAL/temp1_abs.su key=offset
susort <  $direc/RESIDUAL/temp1_abs.su
 > $direc/RESIDUAL/temp1_sort.su cdp offset
sustack  < $direc/RESIDUAL/temp2_sort.su
 > $direc/RESIDUAL/15P_sustatic_res_stack_300684.su
suchw  < $direc/RESIDUAL/15P_sustatic_res_stack_300684.su key1=tracr
 key2=cdp a=0 b=1 |
suximage cmap=rgb8 title="Apilado con estáticas
 residuales_20_mode1"
 windowtitle="stack con residuales" label1=" Tiempo [seg]"
 label2="CDP" legend=1 wbox=$WIDTH hbox=$HEIGHT perc=85&
```

**continuacion ...**

#————————Apilado sin estáticas residuales ———————— #

```
suabshw < $direc/RESIDUAL/15P_shots_con_nmo.su
 > $direc/RESIDUAL/temp2_abs.su key=offset
susort < $direc/RESIDUAL/temp2_abs.su
> $direc/RESIDUAL/temp2_sort.su cdp offset
sustack < $direc/RESIDUAL/temp2_sort.su
 > $direc/RESIDUAL/temp2_stack.su
suchw < $direc/RESIDUAL/temp2_stack.su key1=tracr
key2=cdp a=0 b=1 |
suximage cmap=rgb8 title="Apilado sin estáticas residuales"
 windowtitle="stack sin residuales" label1=" Tiempo [seg]"
 label2="CDP" legend=1 wbox=$WIDTH hbox=$HEIGHT perc=85&
rm $direc/temp*.su
```

Cuadro 4.40: `Asigna las estáticas residuales y apila para comparar las imagenes`

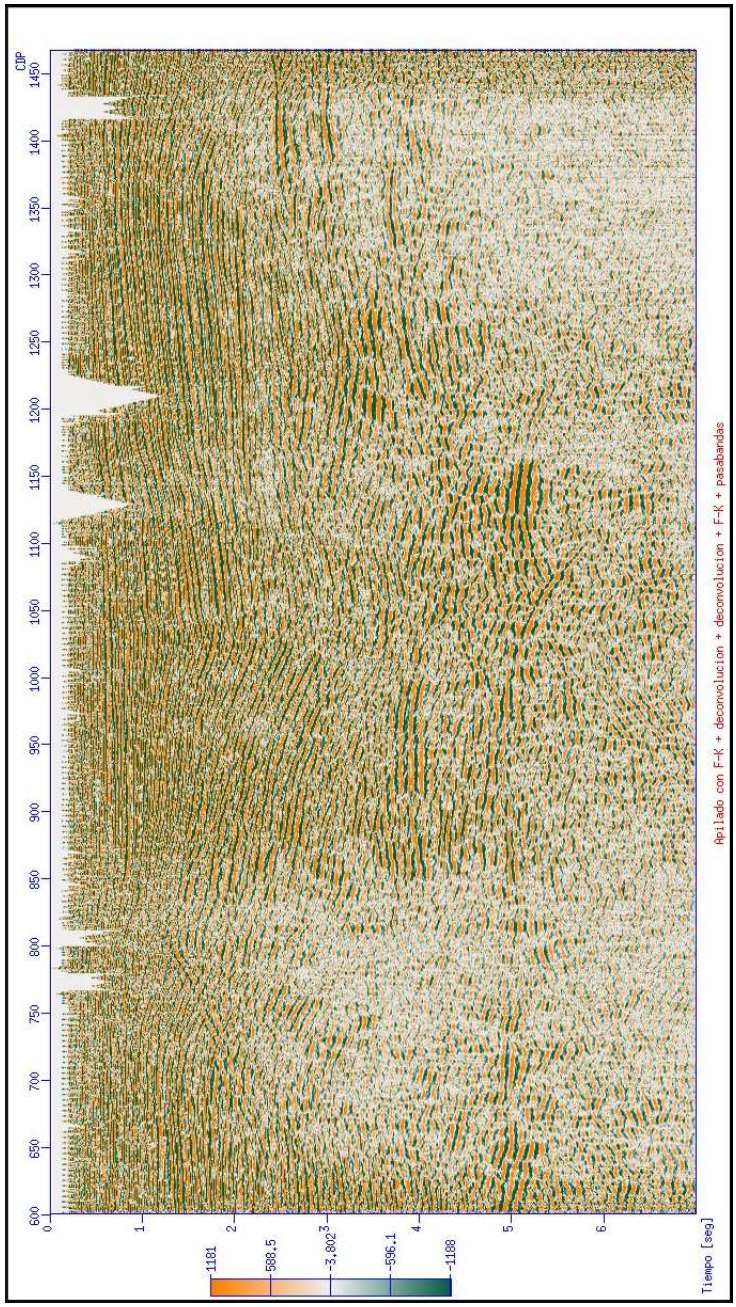



Figura 4.61: Apilado con estáticas residuales

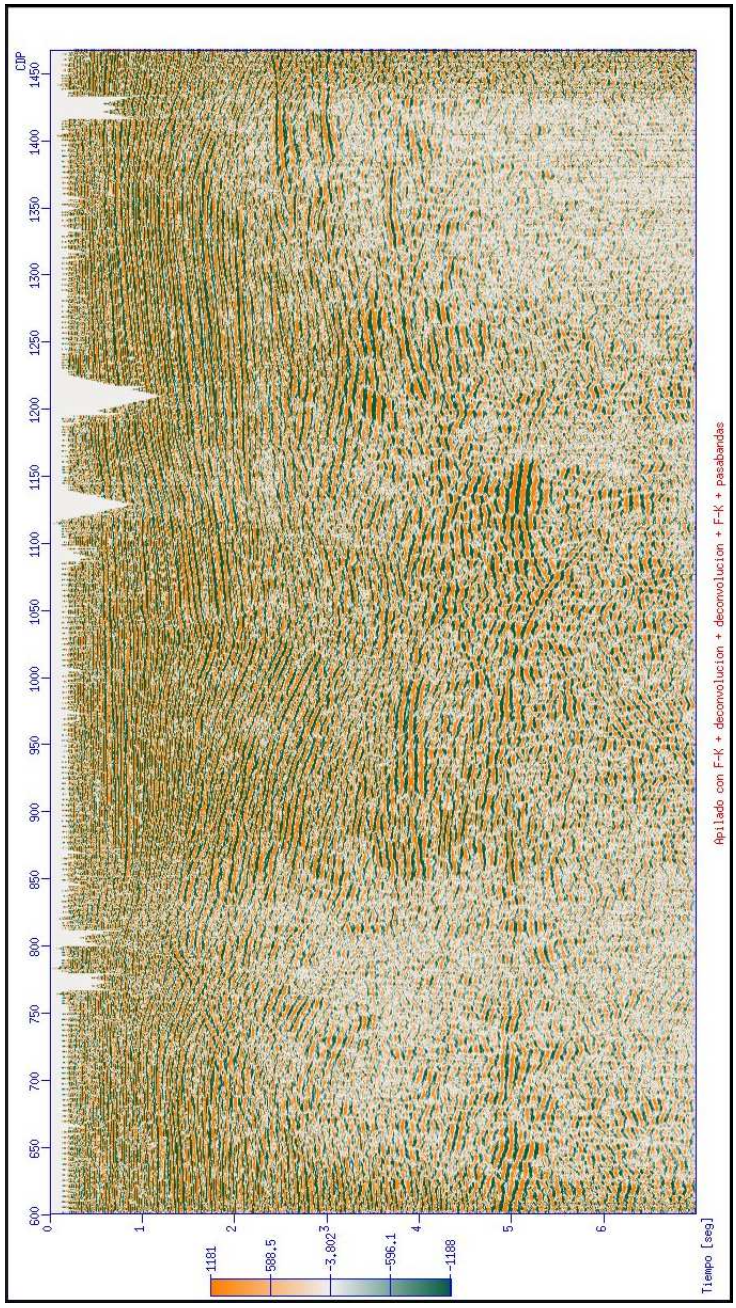



Figura 4.62: Apilado con el nuevo campo de velocidades

### 4.14.2. Resultado del cálculo de las estáticas residuales

En las figuras 4.63 y 4.64 se muestra el resultado del cálculo de las estáticas residuales en fuentes y receptores, calculadas con el módulo *suresstat* de SU, ver cuadro 4.39.

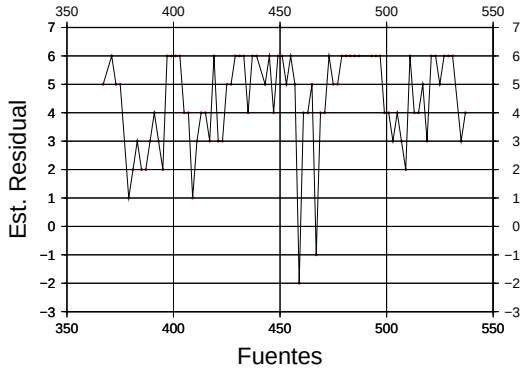



Figura 4.63: Estáticas residuales de las fuentes

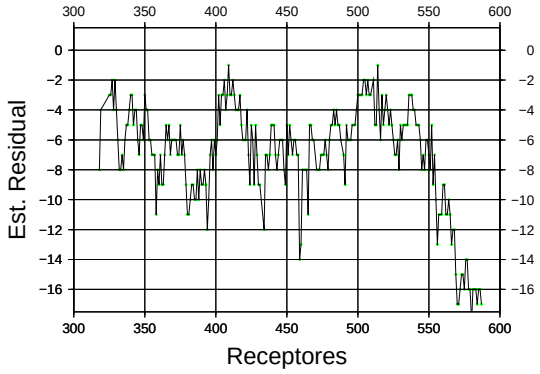



Figura 4.64: Estáticas residuales de los receptores

# 4.15. Apilamiento

Para obtener una traza apilada se suman las trazas de cada gather CDP. En cada etapa del procesamiento el objetivo es mejorar la imagen del apilado previo, de esta forma el control de calidad consiste en comparar los apilados durante la secuencia; el procedimiento a seguir para obtener el apilado se muestra en el cuadro 4.41.

## 4.15.1. Gather's CMP

Un gather CMP es el conjunto de trazas que pertenecen a un mismo punto reflector pero con diferentes trayectorias de viaje y tiempo, que muestra las mismas características reflectivas. Un gather CMP es el resultado de ordenar las trazas por CDP-OFFSET; el módulo que realiza este ordenamiento se llama *susort*.

En la industria sísmica CMP=CDP cuando los reflectores son horizontales y las velocidades no varian; sin embargo cuando los reflectores estan buzando estos dos terminos difieren y unicamente se usa el termino CMP.

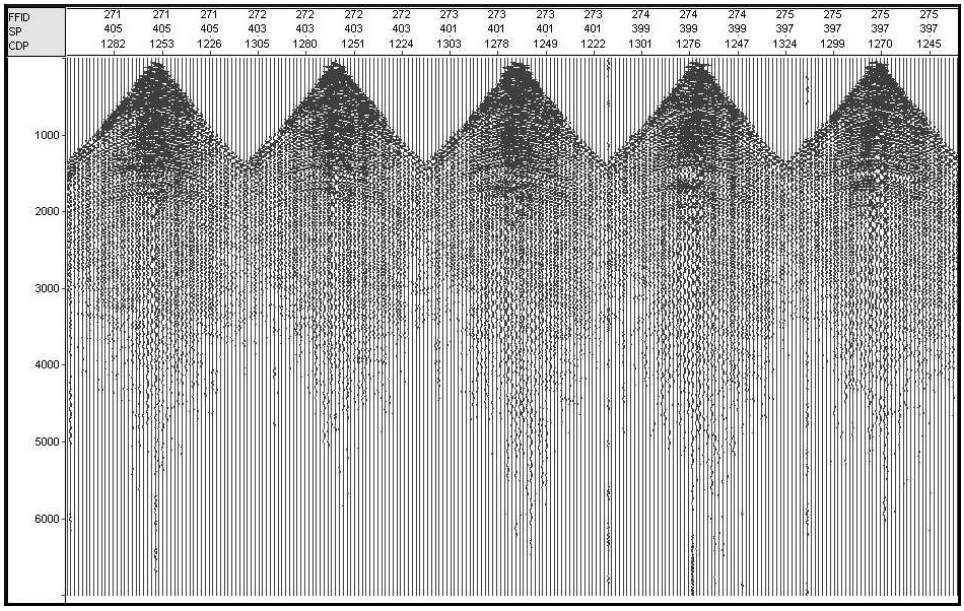



Figura 4.65: PT's con Geometría

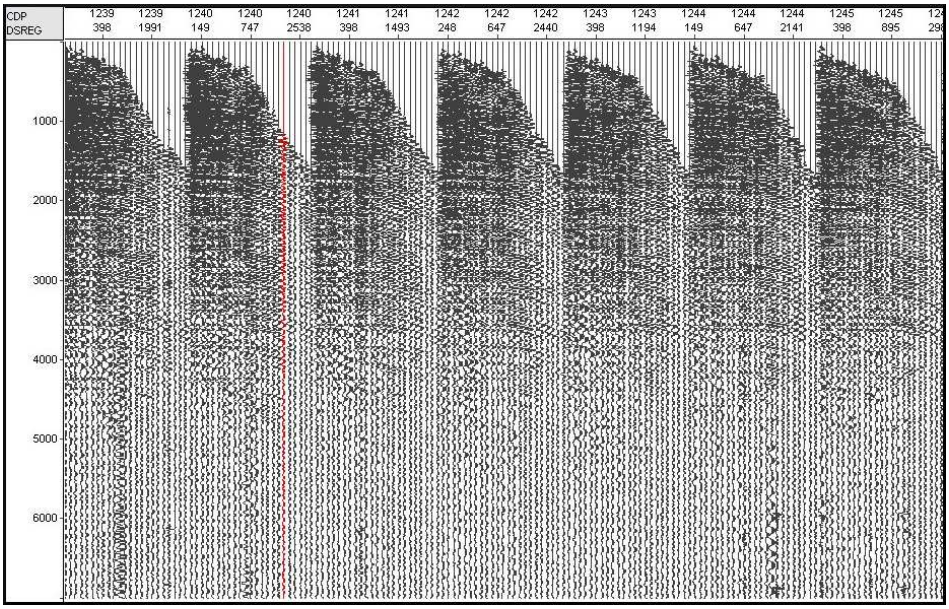



Figura 4.66: Gathers CMP

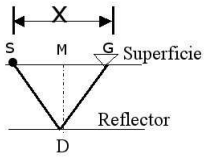
La figura 4.65 muestra unos PT's que contribuyeron a los CDP gathers de la figura 4.66; los CDP's tienen aplicadas estáticas de refracción y recuperación de amplitudes que consiste en multiplicar las muestras por una función de la forma $t^{tpow}$, donde $tpow = 7$. (sección 4.9)

### 4.15.2. Normal Move Out (NMO)

La posición de una capa genera una reflexión en un registro sísmico, formando una hipérbola que relaciona la distancia a un reflector plano ($x$), con el tiempo de llegada de cada arribo ($t$) Yilmaz (1987) [7].

La figura 4.67 muestra esquemáticamente como se realiza el cálculo de la corrección NMO para cada traza por medio de la ecuación de Dix (4.7).

La ecuación NMO describe una hipérbola en un plano de 2 ejes, (tiempo, offset). La corrección (por offset) NMO consiste en eliminar el efecto hiperbólico, llevando los eventos a la horizontal; en el eje del tiempo el retardo del evento primario para cada traza de un CDP gather después del NMO es el mismo (offset-cero).




$$t^2(x) = t_0^2 + \frac{x^2}{v_{NMO}^2} \tag{4.7}$$

donde:

$t_0$ = tiempo de viaje vertical (a offset cero) $\longrightarrow 2MD$

$x$ = offset

$v_{NMO}$ = velocidad moveout de la interface del reflector $t(x) \longrightarrow SDG$

Figura 4.67: Corrección NMO

Offset - cero, es una técnica que intenta colocar la fuente y el receptor uno tan cerca de otro, casi en una misma posición; y de esta manera considerar que la información sísmica viajó de ida y vuelta desde el mismo punto en el que se generó.

Para lograr la horizontalidad de los eventos con la corrección NMO(Figura 4.68), se requiere un perfil de velocidades RMS, donde las velocidades cambian con las estructuras geológicas durante la trayectoria de las ondas sísmicas en el subsuelo hasta el punto de reflexión en un CDP gather; el módulo que corrige por NMO se llama *sunmo*.

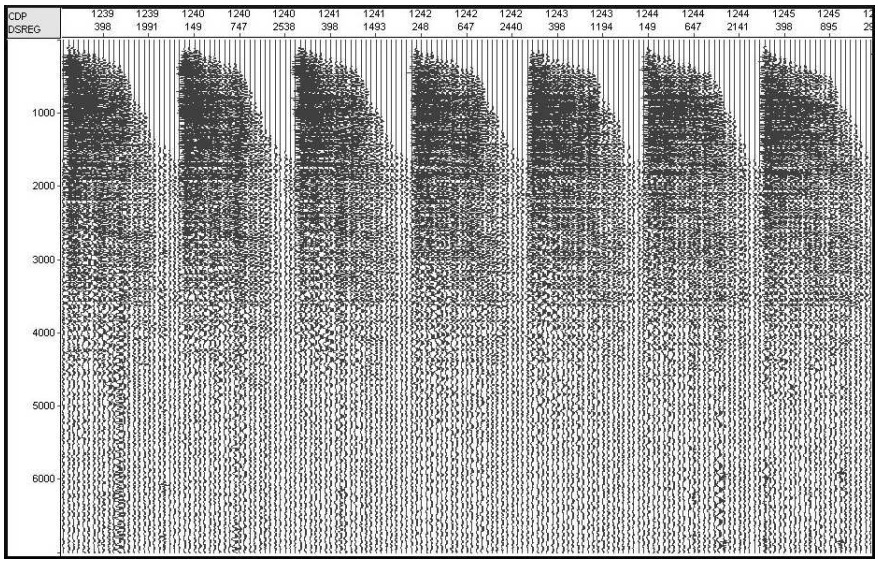
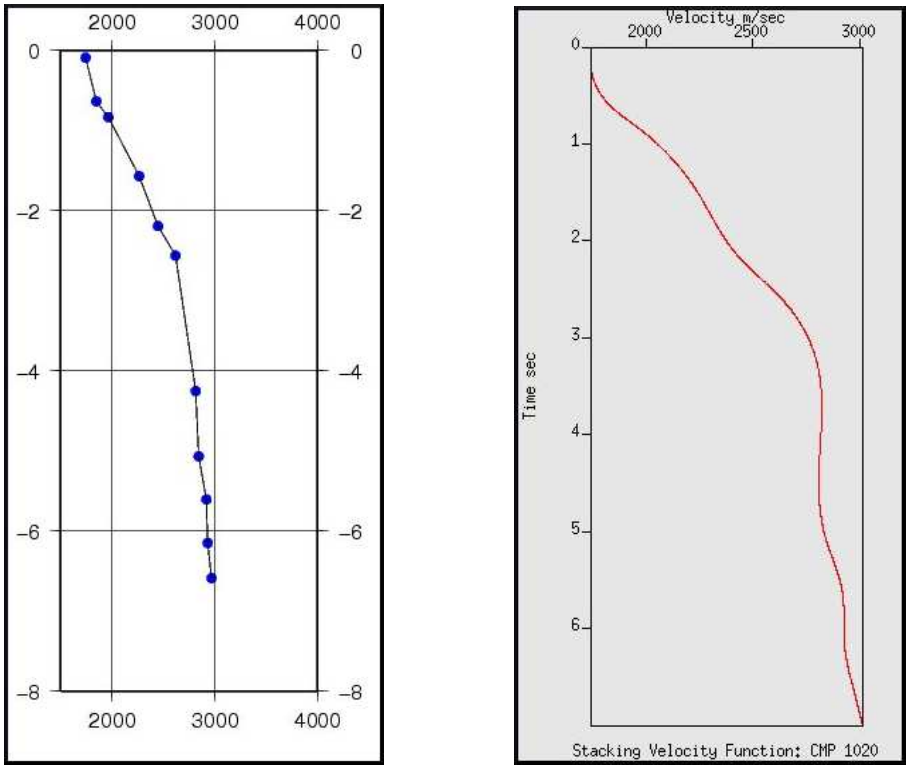



Figura 4.68: Gathers CDP con NMO sin mute

Las figuras 4.69a. y 4.69b. muestran la misma función de velocidad obtenida con el picado sobre semblanzas y CVS (Constant Velocity Stack por sus siglas en inglés): en la figura 4.69a. generada con el software GMT, la línea que une los puntos de las velocidades picadas se generó con una interpolación lineal, y la función que se muestra en la figura 4.69b se generó a partir de la interpolación de los puntos de la figura 4.69a con el módulo *unisam* de SU.

El módulo de visualización *suxgraph* de SU requiere un muestreo constante para realizar el despliegue de la función en pantalla. En este trabajo se realizó el picado de velocidades cada 1000 metros, esto es cada 40 CDP's. (en la sección 4.13 se tratan los temas semblanza, CVS y el procedimiento para realizar el picado de velocidades).




a) real (GMT) b) suavizado (unisam)

Figura 4.69: Función de velocidades del gather CDP 1020

### 4.15.3. Mute

En la figura 4.68 los eventos están horizontalizados a lo largo del offset; esto es, el efecto de offset ha sido removido; sin embargo, como un resultado de la corrección Moveout las trazas en los offset lejanos son estiradas causando que su contenido de frecuencias se muevan hacia la parte baja del espectro. La distorsión de frecuencia se incrementa en tiempos iniciales y offsets largos. Para prevenir la degradación de los eventos someros al apilar, la zona distorsionada es borrada (este proceso es llamado aplicación de mute); los mismos gathers de la figura 4.68 con NMO se muestran con el mute aplicado en la figura 4.70.

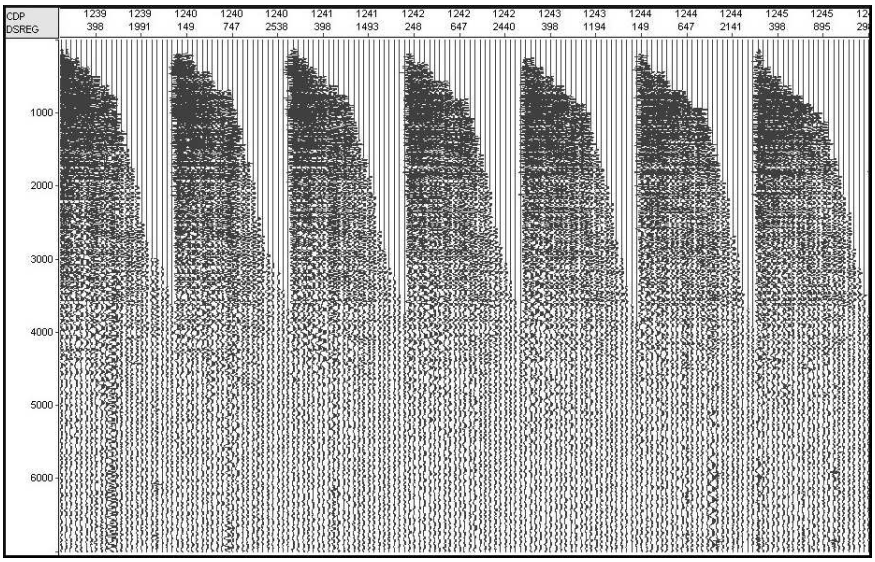



Figura 4.70: Gathers CDP con NMO y con mute

### 4.15.4. Apilado

Las trazas con NMO que forman un gather CDP se suman para obtener una traza resultante (traza CDP) llamada *apilado*, debido a la suma de las trazas con NMO los eventos que estan en fase se suman mejorando la relación señal-ruido; el módulo *sustack* apila las trazas de cada CDP. El Script Shell del cuadro 4.41 genera el apilado bruto ver figura 4.71.

**Script-Shell apilamiento bruto**

```
#!/bin/bash
#Nombre_Script:08P_sustack_raw.sh
 HEIGHT=675
 WIDTH=1210
 direc=/NOMBRE_ESTUDIO/DATA/
 veloc=/NOMBRE_ESTUDIO/JOBS/SEISMIC/VELOCIDADES_NMO_1

#Visualización de algunos fldr#
suwind < $direc/ESTAT_DE_REFRAC/07P_sustatic_elevC_300684.su
 key=fldr min=200 max=205 |
suxwigb < title="Gathers PT's con Geometria"perc=93&

#Aplicar las estaticas de elevacion y una ganancia cuadro 4.25#
sustatic < $direc/ESTAT_DE_REFRAC/07P_sustatic_elevC_300684.su hdrs=1
 > $direc/ESTAT_DE_REFRAC/07P_sustatic_elevA_300684.su
sugain < $direc/ESTAT_DE_REFRAC/07P_sustatic_elevA_300684.su tpow=0.7
 > $direc/APILADO_RAW/temp1_sugain.su

#Ordenar las trazas por cdp y offset#
suabshw < $direc/APILADO_RAW/temp1_sugain.su key=offset
 > $direc/APILADO_RAW/temp2_suabs.su
susort < $direc/APILADO_RAW/temp2_suabs.su cdp offset
 > $direc/APILADO_RAW/temp3_susort.su
```

**...continuación**

```
#Aplicar la correccion NMO con la librería de velocidades#
sunmo < $direc/APILADO_RAW/temp3_susort.su
 par=$veloc/apilvel_raw_ext.pk1
 > $direc/APILADO_RAW/temp4_sunmo.su

#Aplicar un mute#
sumute < $direc/APILADO_RAW/temp4_sunmo.su key=offset
 xmute=0,3600 tmute=0.0,4.50 > $direc/APILADO_RAW/temp5_sumute.su

#Apilamiento de los gathers CDP con correccion NMO#
sustack  < $direc/APILADO_RAW/temp5_sumute.su
 > $direc/APILADO_RAW/08P_sustack_raw.sh

#Modificar el encabezado para visualizar con el No. de CDP #
suchw < $direc/APILADO_RAW/08P_sustack_raw.su key1=tracr key2=cdp
 a=0 b=1 > $direc/APILADO_RAW/08P_sustack_raw_cdp.su
suximage < $direc/ESTATICAS/APILADO_RAW/06P_sustack_elev_cdp.su
 title="Apilado bruto"  windowtitle="stack raw"  legend=1
 label1="Tiempo"  label2="CDP"  wbox=${WIDTH}
 cmap=hsv2 hbox=${HEIGHT} perc=85&
```

Cuadro 4.41: `Apilamiento bruto`

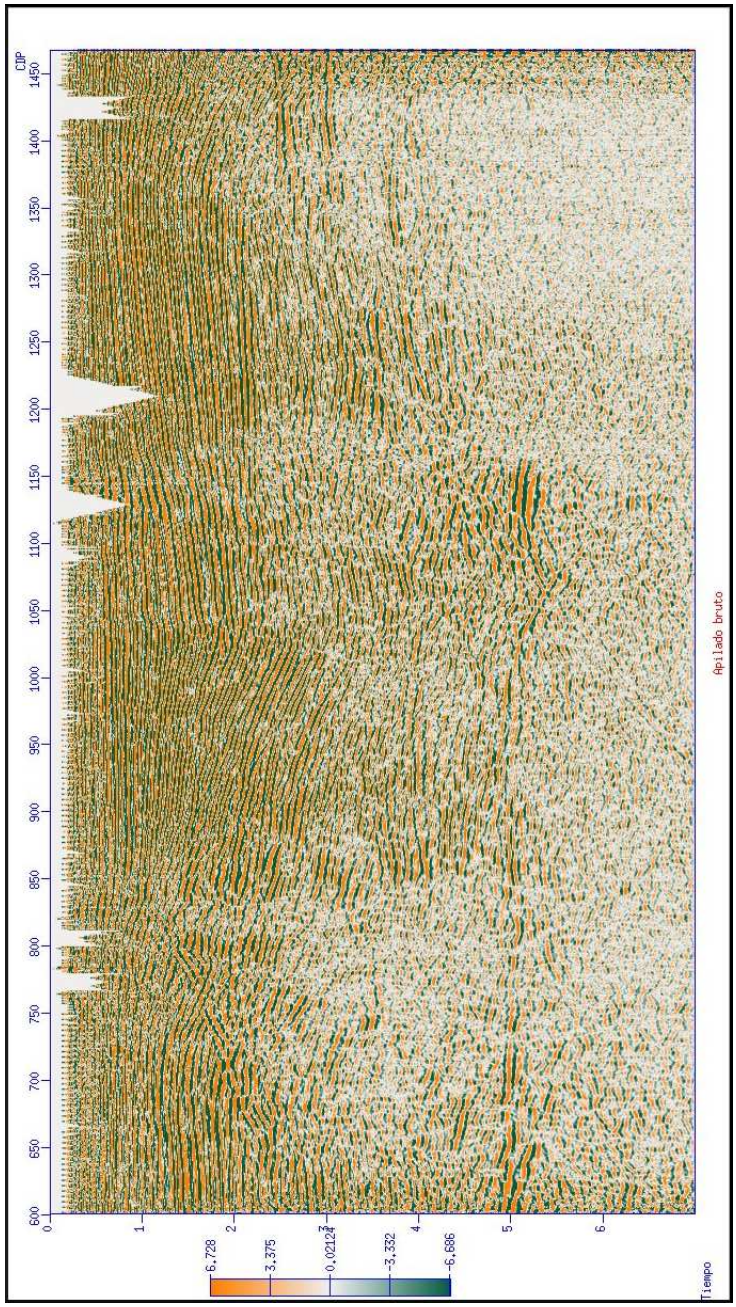



Figura 4.71: Apilado en bruto (CDP-tiempo)

## 4.16. Migración

Los datos sísmicos antes de la migración están orientados con respecto del punto de observación. La migración consiste en reubicar elementos de los datos para adecuar sus posiciones a las posiciones de los reflectores asociados o puntos difractantes.

La migración se basa generalmente en la premisa de que todos los elementos de los datos representan ya sea reflexiones primarias o difracciones. La migración requiere el conocimiento de la distribución de las velocidades, debido a que los cambios de velocidad desvían las trayectorias de los rayos y por lo tanto afectan la migración.

El enfoque más sencillo para la migración consistía en determinar la dirección de acceso de la energía y rastrear hacia atrás la trayectoria del rayo al punto reflectante a la mitad del tiempo del viaje, o encontrar la tangente común a los frentes de onda a la mitad del tiempo de viaje.

Actualmente los métodos por computadora implican soluciones de la ecuación de onda, es decir se empieza con la energía que se origina en cada reflector, como si cada reflector estuviera cubierto por fuentes puntuales elementales, como lo postula el principo de Huygens, todas actuando en el instante $t = 0$ (modelo de reflector explosivo); se considera $\Phi(x, z, c)$ como una sección vertical que muestra el movimiento de la onda en el punto $(x, z)$ en el tiempo $t = c$, o sea, una sección no migrada corresponde a $\Phi(x, z, 0)$ [3]. En este trabajo la migración se obtuvo con el algoritmo migración post -stack en el dominio T-K.

### 4.16.1. Migración Post-Stack en el dominio *T-K*

Este método consiste en transformar los datos a un seudo-dominio de profundidad para aproximar una velocidad constante de la Tierra; posteriormente reubicar la energía en el dominio ($frecuencia - número\ de\ onda$), filtrando la velocidad de conversión, finalmente los datos se convierten de nuevo al dominio del tiempo. En el proceso de migración el tiempo es interpolado dentro de la posición tiro/geófono.

Para la migración post-stack los datos deben estar apilados; definimos a la migración como el proceso mediante el cual se toma la imagen acústica de la tierra (sección sísmica) y se eliminan las distorsiones geométricas inherentes al proceso de producción a esta imagen (fenómeno sísmico) [3] y obedece a

dos factores:

* La Tierra no está hecha de una superficie plana y las capas tampoco, las capas no son homogéneas ni con velocidad constante.

* La energía sísmica no solamente se expande en una sola trayectoria, sino que radia hacia todas partes en cualquier dirección de la fuente formándose frentes de onda esféricos.

El módulo para este tipo de migración se llama *sumigtk*; el cuadro 4.42 muestra el script shell que genera el apilado con migración Post Stack.

**Script-Shell migrar un apilado**

```
#¡/bin/bash
#Nombre_Script:16P_sumigtk.sh
 direc=  /NOMBRE_ESTUDIO/DATA
dxcdp=25
fmax=125
sumigtk < $direc/RESIDUAL/15P_sustatic_res_stack_300684.su
par=/NOMBRE_ESTUDIO/JOBS/SEISMIC/VELOCIDADES/NEW/apilvel.pk1
 dxcdp=$dxcdp fmax=$fmax > $direc/MIGRACION/16P_sumigtk.su
sugain  < $direc/MIGRACION/16P_sumigtk.su agc=1 |
suximage title="Apilado bruto migración PostSTM Migtk"
 label2="Apilado migrado bruto amplitudes preservadas"
 label1="Time [s]" x1beg=0 xlend=15 perc=92 grid1=dot
 grid2=dot windowtitle = Apilado verbose=1 &
sufxdecon  < $direc/MIGRACION/16P_sumigtk.su fmin=0 fmax=125
 ntrw=70 ntrf=5 twlen=6.0 verbose=1
 > $direc/MIGRACION/16P_sumigtk_sufxdecon.su
sugain  < $direc/MIGRACION/16P_sumigtk_sufxdecon.su agc=1 |
suximage title="Apilado bruto migración PostSTM Migtk"
 label2="Apilado migrado fxdecon amplitudes ecualizadas"
 label1="Time [s]" x1beg=0 xlend=15 perc=92 grid1=dot
 grid2=dot windowtitle=Apilado verbose=1 &
```

Cuadro 4.42: Migración aplicada

### 4.16.2. Controles de calidad de la migración

La migración introduce un tipo de ruido a la información, el ruido más común es el conocido como ”arcos de migración” (sonrisas) que son remanentes del operador de migración; los efectos de borde son remanentes del operador de migración debido a que se encuentran en los bordes de la sección; los efectos de migración indican que los datos se encuentran migrados con altas velocidades (sobre-migrados), o con bajas velocidades (bajo-migrados); esto implica entonces que se deben realizar pruebas con diferentes porcentajes del campo de velocidad hasta obtener el mejor resultado.

Cuando los horizontes reflejantes están planos y tienen echados menores de 10 grados, se puede suponer que la sección sísmica se asemeja a la sección geológica de la tierra en cuanto a sus características estructurales, sin embargo en áreas geológicamente semicomplejas o complejas en donde los estratos han sufrido plegamientos, fallamientos, intrusiones, etc, la sección sísmica puede tener poca o ninguna semejanza con la configuración estructural real; de esta manera la migración hace que la sección apilada parezca similar a la estructura geológica que aparece en la sección sísmica.

La figura 4.72 muestra la sección migrada, que puede compararse con la figura 4.61 que es el apilado antes de la migración; la figura 4.73 muestra el apilado final migrado con amplitudes ecualizadas usando una longitud de operador de 1000 ms y un filtro post apilado llamado *sufxdecon* deconvolución en el dominio F-X (filtro de ruido aleatorio que resalta los eventos coherentes). Este apilado final es el que se usa para sustentar o actualizar la interpretación geológica del área realizada por el intérprete.

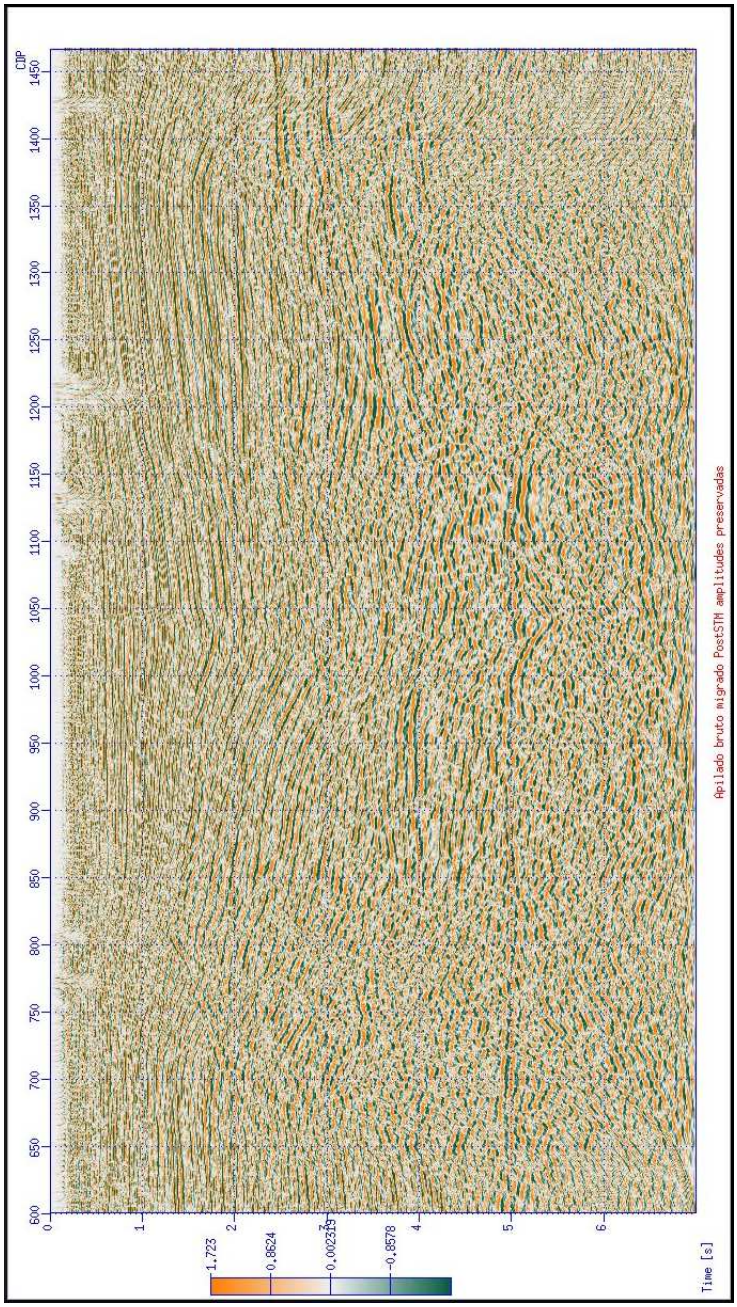



Figura 4.72: Migración con amplitudes preservadas

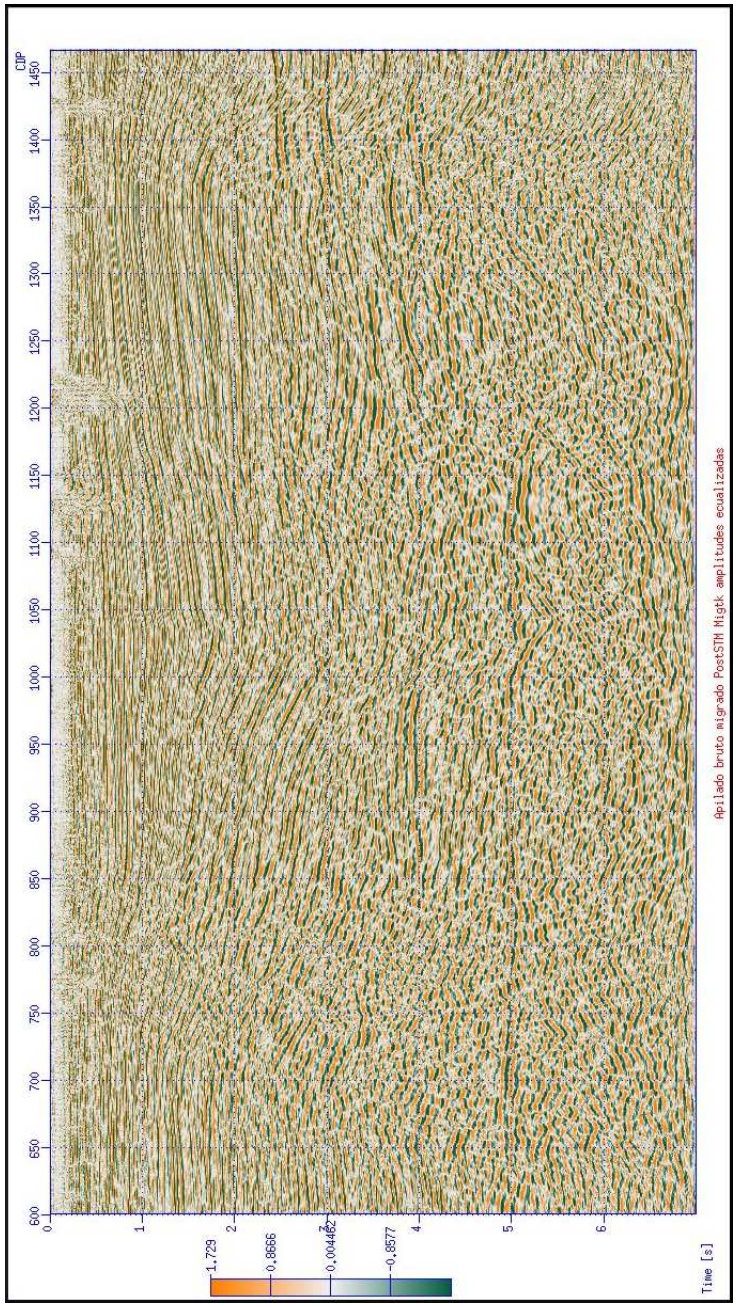



Figura 4.73: Migración con amplitudes ecualizadas

# Capítulo 5

# Resultados

En este capítulo se expone el apilado de referencia (ver Figura 5.1) proporcionado por el cliente procesado con un software comercial y el apilado final obtenido con Seismic Unix en este trabajo (ver Figura 5.2).

Las principales diferencias entre estos dos apilados se deben además del software, a la metodología, técnicas, controles de calidad, parámetros y criterios del análista.

Al observar y comparar ambos apilados, la imagen sísmica procesada con Seismic Unix esta mejorada principalmente en el rango de tiempo de 0 a 4 seg, y son similares en el rango de 4 a 6 seg.

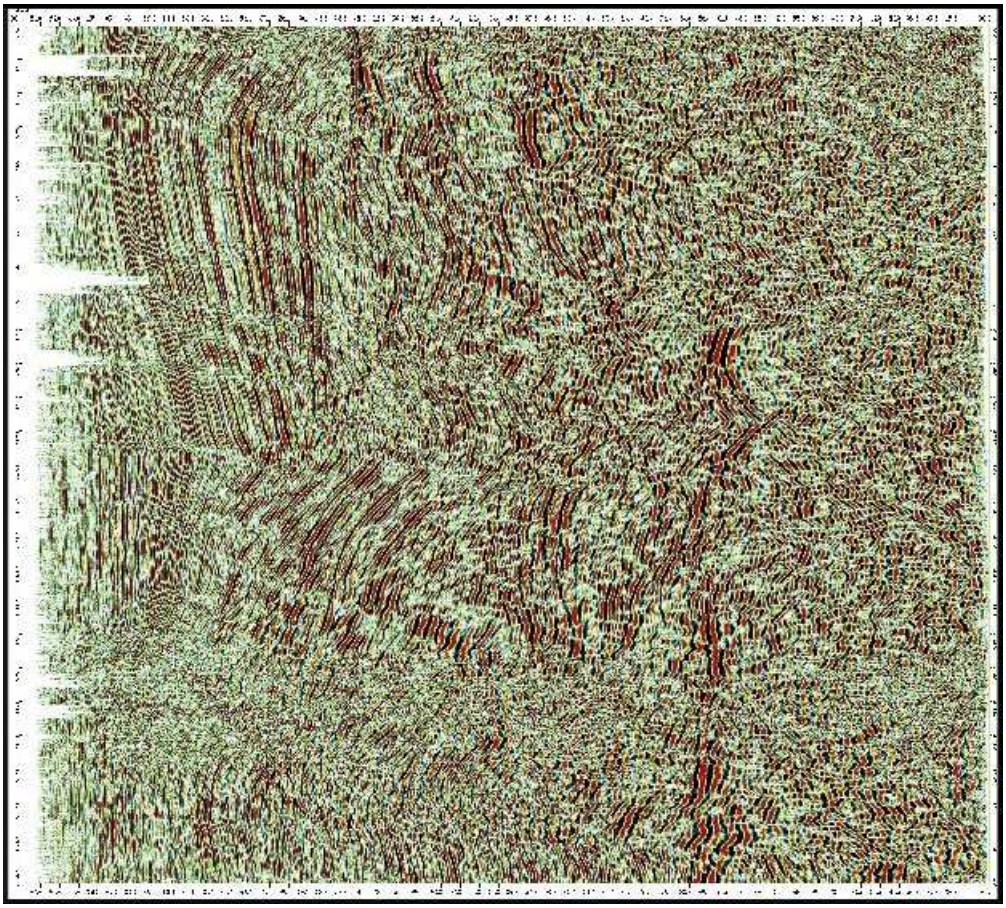


Figura 5.1: Apilado de referencia, proporcionado por el cliente

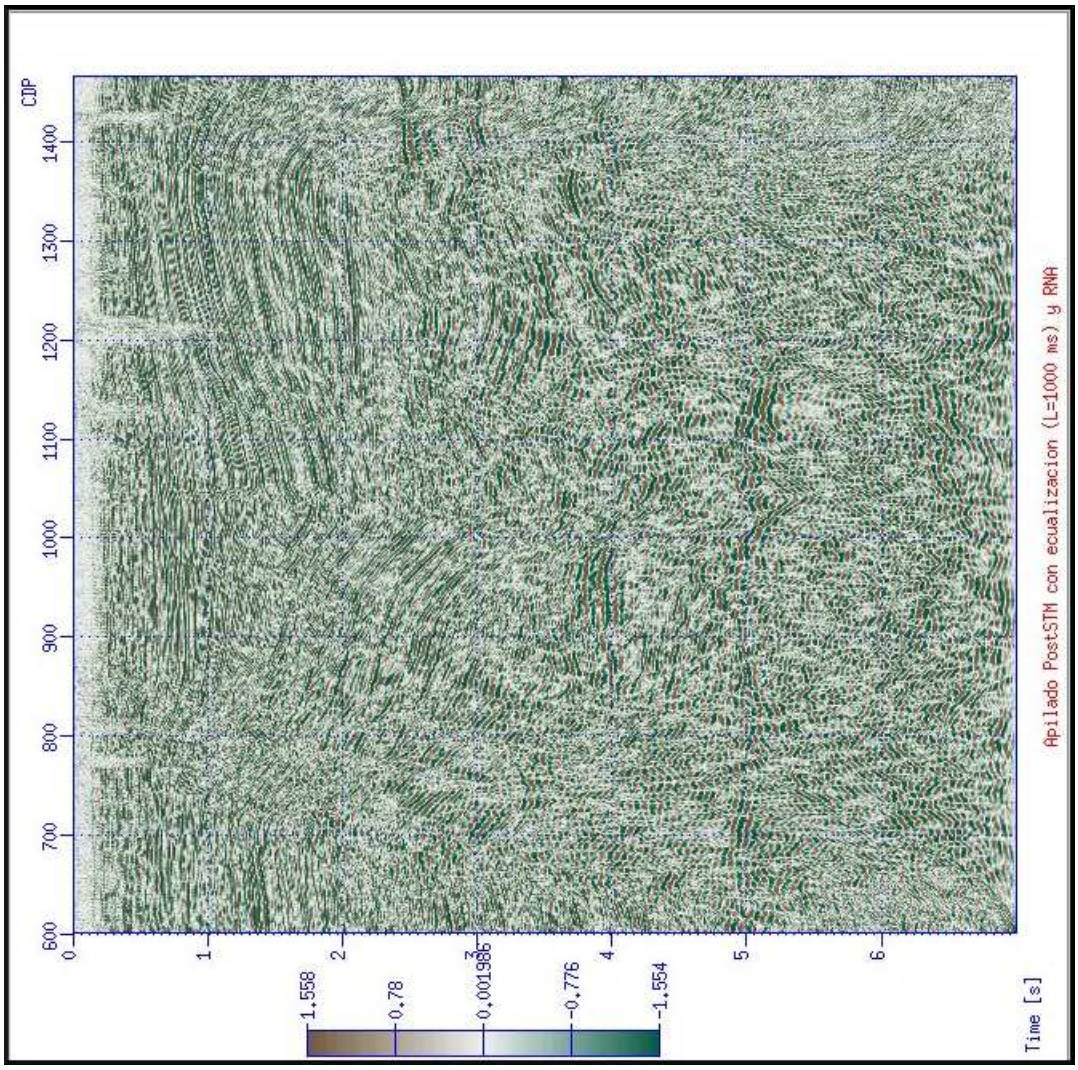



Figura 5.2: Apilado final obtenido de la secuencia de procesamiento aplicada

# Capítulo 6

# Conclusiones y recomendaciones

Se logró obtener la sección sísmica migrada en tiempo después de apilar; el apilado final presenta una mejor imagen sísmica respecto al apilado de referencia proporcionada por la Gerencia de Geofísica de PEP, principalmente en el rango de tiempo de 0 a 4 seg, y son similares en el rango de 4 a 6 seg.

La experiencia adquirida en procesamiento de datos sísmicos con *Seismic Unix* inició desde la selección del hardware, software, organización del proyecto, desarrollo, implementación de *SCRIPTS* (nuestros y de los demos) y los QC's.

De acuerdo a la industria sísmica, el tiempo de desarrollo de los proyectos se miden con cronogramas; en este trabajo se decidió no incluirlo debido a que es un proyecto de tesis; y en el caso de los controles de calidad QC's se verificaron de igual forma, "obligatoriamente".

*Seismic Unix* además de ser un software libre, gratuito y de fácil adquisición es ejecutable en las consolas de *LINUX* y mostró ser suficiente para desarrollar secuencias básicas de procesamiento de datos sísmicos con algunas limitantes que se mencionan a continuación:

-Los módulos *suxwigb* y *suximage* (visualizadores gráficos de SU), mostraron dos limitantes para realizar el control de calidad en los datos sísmico: uno, no permite visualizar los encabezados deseados (dispensable en etapas donde se han actualizado, como en el caso de la geometría asignada). y dos, las amplitudes sufren un aplanamiento (inapropiado apara el juicio de la edición de trazas). Por estos motivos fue necesario usar un software

como complemento llamado *SeiSee*; este software permite ver las trazas sin clipping y realizar análisis interactivos de los encabezados, de una manera más práctica, de la misma forma como se realizan en un ambiente de producción.

- Los módulos *grm* y *surefcon* que *SU* tiene para cálcular las estáticas de refracción, cuentan con escasa documentación y un límite muy pequeño en el número de PT's de entrada, considerando esta limitante, el cálculo se realizó con el software comercial *PROMAX*, cabe mencionar que por razones de mejora se eligió el método *GRM* en la secuencia de producción.

- Durante el picado de velocidades, la herramienta que ajusta un par $tiempo - velocidad$ no es práctica, porque para corregir la función aplicada para obtener un CDP gather con NMO con sus eventos horizontalizados, se debe genera una nueva función (por ensayo y error) comenzando con distinta velocidad, esto se debe a que la función de velocidades no se grafica sobre la semblanza ni sobre los CVS; este detalle impidió picar con precisión las semblanzas y los CVS después de aplicar las estáticas residuales. En la industria sísmica el picado se realiza interactivamente; cuando un punto $t - v$ cambia, el gather CDP se corrige en el mismo display sin necesidad de cerrar la aplicación. Cabe mencionar que los autores del proyecto *SU* establecieron que *SU* no es para usarse en un ambiente de producción; lo que se comprobó con nuestra experiencia.

La secuencia de proceso aplicada en este trabajo y sus QC's puede ser de útilidad en futuros trabajos de tesis, independientemente del software a usar; en la industria sísmica la mayoría de estos controles de calidad son obligatorios.

*Seismic Unix* puede usarse como complemento a la materia de procesamiento de datos sísmicos que se imparte en la ESIA-Ticomán del IPN.

# Bibliografía


[1] Cohen, J. K. y Stockwell, J. W., (2001), *The new SU Users Manual Version 3.0*, http://www.cwp.mines.edu/cwpcodes/

[2] Geralt, L.P y Sheriff, R.E, (1987), *Historia,teoría y obtención de datos*, Exploración sismológica Vol. 1

[3] Geralt, L.P y Sheriff, R.E, (1991), *Procesamiento e interpretación de datos*, Exploración sismológica Vol. 2

[4] Gómez Santiago, M, (2005), *Procesado sísmico de unión de dos cubos sísmicos*, Memorias de experiencia profesional, IPN ESIA-Ticomán

[5] Richard M. Allen, (2009), *Seismic methods: Refraction II Advanced interpretation*, http://seismo.berkeley.edu/ $\sim$ rallen/teaching/F04_GEO594_IntroAppGeophys/Lectures/L15_SeismicReflectionII.pdf

[6] Wessel, P, (2002), *The Generic Mapping Tools*, http://gmt.soest.hawaii.edu/

[7] Yilmaz, O., (1987) *Seismic Data Procesing*, Stephen M. Doherty Society of Exploration Geophysicists

[8] Pavlukhin, Sergey , (2007), *Software SeiSee Version 2.10.2b*, http://www.dmng.ru/seisview/

[9] *Wikipedia*,(2009) http://es.wikipedia.org