

ESTUDIO GEOFÍSICO DE LA CUENCA ESTEFANIENSE DEL BIERZO

SÍSMICA DE REFLEXIÓN



INFORME FINAL

5 DE FEBRERO 2009



ÍNDICE

ANTECEDENTES Y OBJETIVOS.....	5
ADQUISICIÓN DEL PERFIL SÍSMICO BIERZO-1.....	6
SITUACIÓN DEL PERFIL SÍSMICO.....	6
PRUEBAS DE RUIDO POR ALEJAMIENTO ("WALK-AWAY NOISE TEST")	7
PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DEL PERFIL BIERZO-1.....	10
REGISTRO DEL PERFIL SÍSMICO BIERZO-1.....	14
PROCESADO DE LA LÍNEA DE SÍSMICA DE REFLEXIÓN BIERZO-1.....	17
1) SEG-2 A SEG-Y.....	17
2) EDICIÓN DE LOS REGISTROS.....	17
3) "SHIFTS" EN DETONADORES NO-SÍSMICOS.....	18
4) GEOMETRÍA.....	19
5) CORRECCIONES ESTÁTICAS.....	19
6) PROCESADO PRE-STACK.....	22
7) ANÁLISIS DE VELOCIDADES Y STACK.....	22
8) PROCESADO POST-STACK Y MIGRACIÓN EN TIEMPO.....	22
ANEXO. PROCESOS Y MÓDULOS APLICADOS USANDO GLOBE CLARITAS.....	29
PERFIL DE SÍSMICA DE REFRACCIÓN.....	31
INTRODUCCIÓN.....	31
PROCESADO Y MODELIZACIÓN.....	32
DESCRIPCIÓN E INTERPRETACIÓN DEL MODELO DE VELOCIDADES.....	35
DESCRIPCIÓN E INTERPRETACIÓN DEL PERFIL SÍSMICO BIERZO 1.....	37
INTERPRETACIÓN DEL PERFIL SÍSMICO BIERZO-1.....	39
INTERPRETACIÓN 3D.....	42
MAPAS DE PROFUNDIDAD EN TIEMPO.....	45
CONVERSIÓN DE TIEMPO A PROFUNDIDAD.....	52
MAPAS DE ISÓBATAS.....	55
EL LÍMITE OESTE DE LA CUENCA ESTFANIENSE.....	57
MODELO GEOLÓGICO 3D DE LA CUENCA.....	60
EQUIPO INVESTIGADOR DE LA UNIVERSIDAD DE OVIEDO.....	64



ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

Con fecha 16 de julio de 2007 se firma un Convenio Específico de colaboración entre el Instituto Geológico y Minero de España y la Universidad de Oviedo para la realización de un estudio geofísico de la Cuenca Estefaniense de El Bierzo. El objetivo era la realización de un perfil de sísmica de reflexión en una zona rural situado al N de Bembibre, en la parte sur de la cuenca Estefaniense de El Bierzo. Este perfil tendría una longitud de unos 5-7 km y discurre en dirección OSO-ENE, entre Viñales y Villaviciosa de San Miguel.

Para la adquisición del perfil sísmico se utilizaría un sismógrafo Geometrics Stravisor NX propiedad del Departamento de Geología de la Universidad de Oviedo. Este sismógrafo cuenta con 60 canales y un dispositivo de 5 cables, de 120 m cada uno, con geófonos de 20 Hz. Y espaciado máximo de 10 metros entre si, siendo la longitud final máxima del dispositivo de registro de 600 m. Para realizar el “rollalong” durante el registro se despliega un dispositivo completo de 10 cables y 1200 m de longitud. Dicho despliegue se realizaría por el Departamento de Geología de la Universidad de Oviedo con la colaboración del IGME.

La fuente sísmica a utilizar serían explosivos (tipo “goma 2 eco”) cargados en pozos de 7 cm de diámetro a una profundidad de 3-4 m, convenientemente retacados. La contratación de la

empresa de voladuras para la realización de los sondeos y las voladuras sería llevada a cabo por el IGME. Para elegir la geometría del dispositivo y los parámetros de adquisición a utilizar, previamente a la realización del perfil propiamente dicho, se llevaría a cabo un “walkaway noise test”, para ensayar distintas configuraciones y el “offset” más adecuado. La longitud del registro se puede extender hasta un rango de 3-5 segundos, con un muestreo de los datos 0,5 ms y los tiros se registrarán en el formato de datos SEG-2.

El procesado convencional de los datos se realizaría en el Departamento de Geología de la Universidad de Oviedo, en una estación de trabajo HP xw8000, con plataforma Linux y utilizando el software denominado “Globe Claritas”. La secuencia de procesado se resume en: Edición de los registros, adición de la geometría, balance de amplitudes, divergencia esférica, deconvolución, filtro pasabanda, mute de las llegadas refractadas, corrección de elevación, Corrección estática de refracción y corrección estática residual, ordenamiento en “CDP-gathers”, análisis de velocidades, stack y procesado post-stack. Se obtendrá así la correspondiente sección sísmica en tiempo.

Por último se abordaría un interpretación general de los datos sísmicos obtenidos.

ADQUISICIÓN DEL PERFIL SÍSMICO BIERZO-1

SITUACIÓN DEL PERFIL SÍSMICO

Dentro de los estudios realizados para la caracterización de la cuenca del Bierzo, se llevó a cabo la adquisición de un perfil sísmico de reflexión. El trazado elegido se sitúa al NW de Bembibre, a lo largo de una serie de pistas de tierra y caminos asfaltados que discurren en dirección W-E entre las poblaciones de Viñales y Villaviciosa de San Miguel (figura 1), dejando al S la población de Santibáñez del Toral.

Este perfil, que hemos denominado BIERZO-1, está diseñado de manera que se cruza con algunos de los perfiles sísmicos que se realizaron en la zona durante la década de los 80. Es un área favorable para la realización de perfiles sísmicos por tratarse de una zona de bajo relieve, con poco ruido ambiental, que pueda perturbar los resultados, debido a estar alejada de las principales vías de comunicación, la ausencia de viviendas y el escaso tráfico que discurre por los

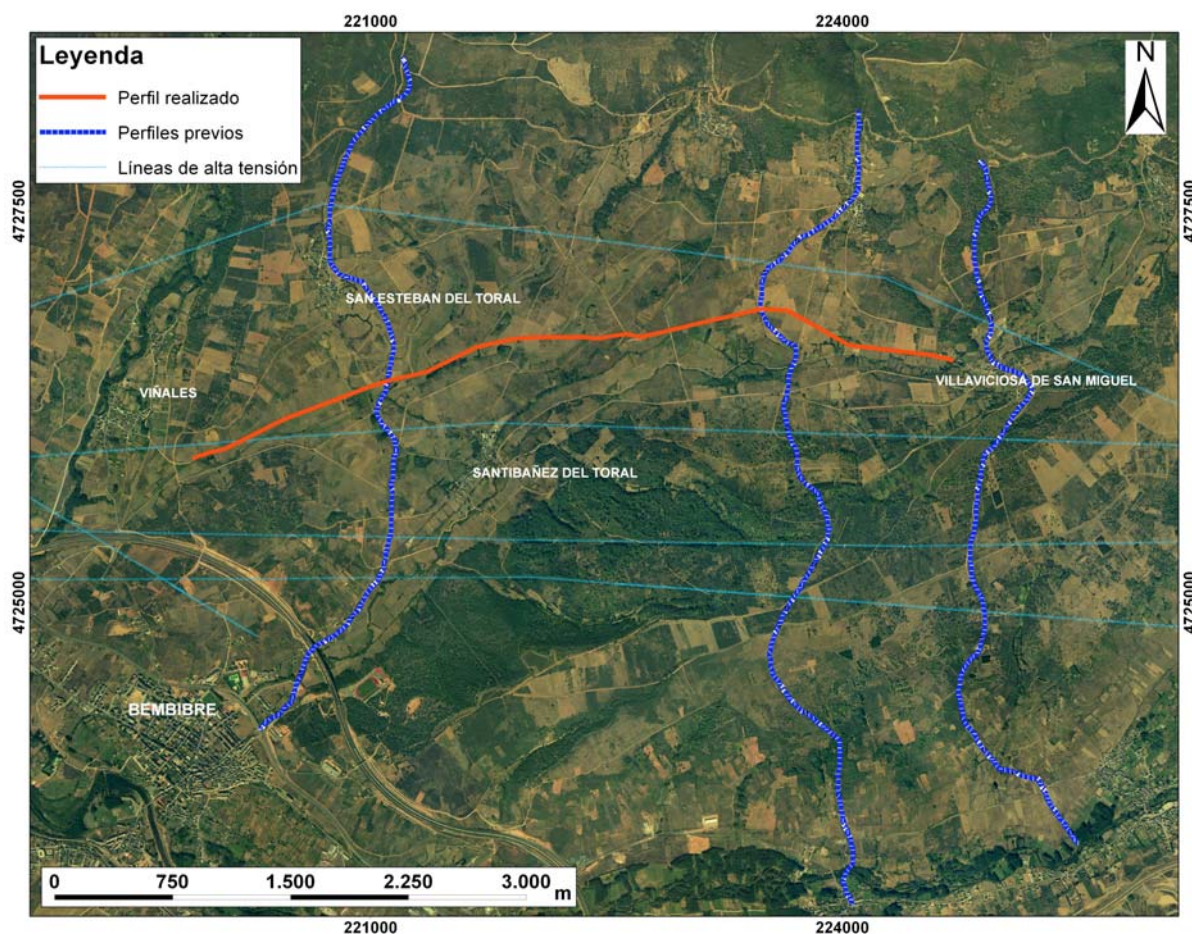


Figura 1.- Ortofoto mostrando la posición del perfil realizado, junto con la disposición de algunos de los antiguos perfiles de reflexión realizados en la zona en 1980.

caminos seleccionados. Si bien en el apartado negativo cabe destacar la presencia de numerosas líneas de alta tensión procedentes de la central térmica de Compostilla, que provocaron algunas interferencias en la señal en las zonas en que cruzaban por encima del perfil o muy próximas al mismo.

Para conseguir que el perfil siguiese una línea lo más recta posible fue necesario enlazar las sucesivas pistas atravesando algunos campos, lo que en ocasiones complicó considerablemente las labores tanto de preparación de la línea como de la posterior adquisición de los datos (Figura 2).

PRUEBAS DE RUIDO POR ALEJAMIENTO ("WALK-AWAY NOISE TEST")

Antes de la realización de un experimento de sísmica de reflexión como el que se pretendía abordar es una práctica común llevar a cabo un "walk-away noise test", que se podría traducir por "pruebas de ruido por alejamiento". El objetivo de estas pruebas es comprobar la viabilidad de la adquisición del perfil sísmico proyectado y la determinación de los parámetros de adquisición más adecuados referentes a la fuente de energía y a la geometría del dispositivo, que a priori son desconocidos y varían considerablemente de unas



Figura 2.-.- Vista E-O de una parte del trazado del perfil Bierzo-1. En primer plano se puede observar la zona intermedia del perfil, una de los puntos complicados en que fue necesario atravesar un campo y una zona de monte para poder mantener la línea del perfil lo más recta posible.

zonas a otras dependiendo de la naturaleza del sustrato y la profundidad del objetivo.

En nuestro caso se pretendía determinar:

- La ventana de registro donde la llegada de las ondas superficiales no interfiere con la señal sísmica y por lo tanto la distancia óptima entre la fuente de energía y el geófono más cercano del dispositivo de registro (shot-receiver offset), así como el espaciamiento entre geófonos.
- La cantidad de explosivo que generaba una mejor relación señal/ruido junto con una menor cantidad de ondas superficiales (ground-roll).
- El espaciamiento óptimo entre geófonos para permitir la máxima resolución

Normalmente también se busca en este tipo de pruebas la profundidad óptima de los pozos en los que se carga el explosivo utilizado como fuente sísmica. En esta ocasión eso no fue posible debido a las limitaciones de la máquina perforadora, por lo que todos los pozos se practicaron hasta una profundidad fija de 3 metros.

Todos estos parámetros son fundamentales durante la realización de una campaña de sísmica de reflexión ya que de la correcta elección de los mismos depende la calidad final del perfil sísmico. La prueba consiste en el despliegue de un dispositivo de registro en el campo (geófonos, cable sísmico y sismógrafo) y la realización de diferentes disparos variando los parámetros que se quieren comprobar, fundamentalmente la distancia al primer geófono y la carga de explosivos de los mismos. Una vez procesados los datos e identificadas las reflexiones se pueden determinar los parámetros óptimos por comparación entre los registros de los diferentes disparos.

La zona elegida para la realización del test fue el inicio del perfil, junto al pueblo de Viñales (Figura 3). Teniendo en cuenta la disponibilidad de la fuente explosiva que se iba a utilizar, se desplegó también un dispositivo adicional para la adquisición de un perfil de refracción, aprovechando la energía de los explosivos, que puede proporcionar información muy valiosa en cuanto a la estructura del subsuelo más superficial y sobre todo de las velocidades sísmicas de los materiales.

Se utilizaron dos dispositivos de adquisición:

1. Un sismógrafo Geometrics Stratavisor NX de 60 canales, con 60 geófonos de 20Hz espaciados 10 m (longitud total del dispositivo 590 m).
2. Dos sismógrafos Geometrics Geode de 24 canales cada uno (48 canales en total), con 48 geófonos de 20 Hz espaciados 5 m (longitud total del dispositivo 235m).

La longitud total del dispositivo para el estudio de refracción fue, por tanto, de 830 m.

En total se realizaron 19 tiros, que se fueron espaciando a distancias de 60 m y 150m a lo largo de la línea, añadiendo dos tiros alejados a distancias de 970m y 1235m (medidos desde el punto de control) hacia el W para poder dotar de más profundidad al modelo final de refracción. La idea original era la de realizar también dos tiros alejados por el E de la línea, pero no fue posible debido a los problemas mecánicos de la máquina perforadora (Figura 4).

Sólo se probó un tipo de fuente, la explosiva (goma 2-eco con detonadores sísmicos), por lo que las pruebas para determinar la fuente definitiva se realizaron con distintas cantidades de masa de explosivo. Se usaron cargas de 150g, 250g, 500g y 800g. Para los tiros alejados al O del dispositivo se usaron cargas de 1600g y de 1200g.

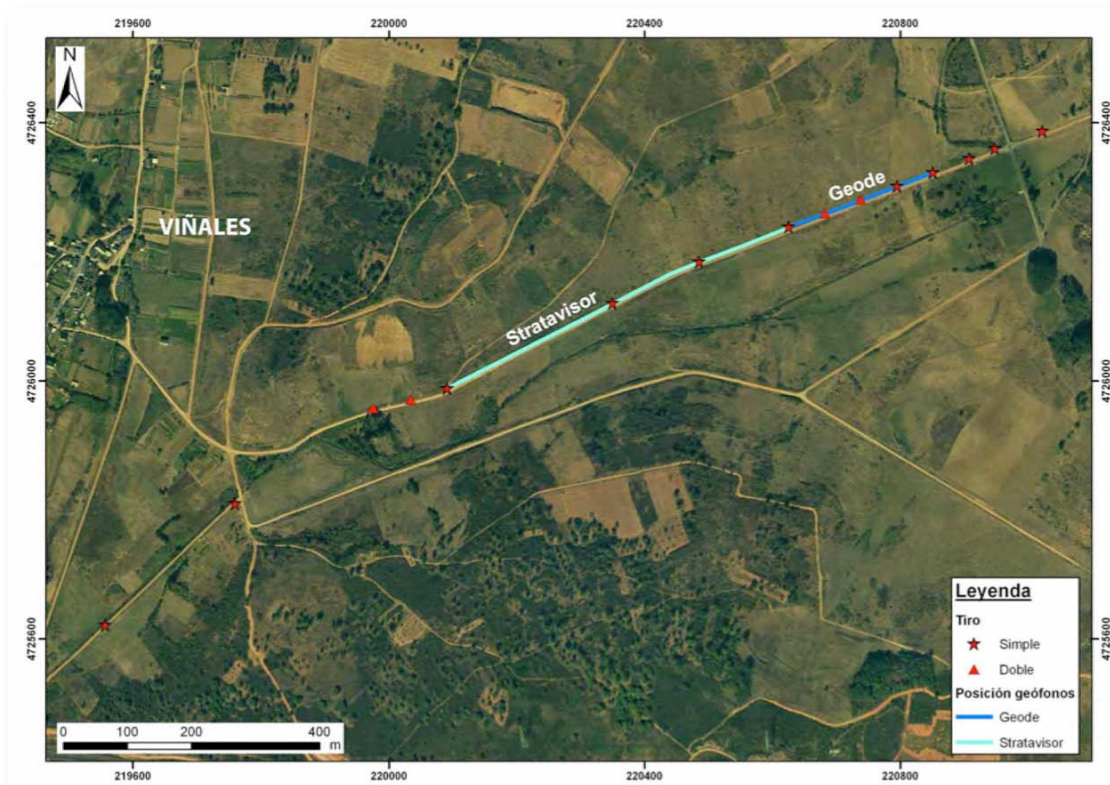


Figura 3.- Ortofoto mostrando la zona elegida para la realización del "Walk-away noise test" sobre la que se han superpuesto los dispositivos desplegados y la posición de las fuentes sísmicas



Figura 4.- Máquina perforadora con la que se hicieron la mayor parte de los pozos para la colocación del explosivo en todos los trabajos sísmicos..

La profundidad de los pozos era de 3m, salvo los dos que fueron perforados a 4m. Todos los pozos se retacaron con arena. Algunos de los pozos tenían agua, pero la gran mayoría estaban secos.

Los días previos a la fecha de realización del test se llevaron a cabo los trabajos de campo de preparación del perfil. Así se procedió a un reconocimiento preliminar de la zona para estudiar el trazado del perfil y a la posterior colocación de estacas sobre el terreno en los puntos de emplazamiento de los geófonos de ambos perfiles (reflexión y refracción) y de los pozos de carga del explosivo. La posición y altura sobre el nivel del mar de cada uno de esos puntos (coordenadas x, y, z) también fue medida mediante GPS diferencial que proporciona precisiones centimétricas para las tres coordenadas espaciales. La realización de los pozos en las fechas anteriores fue contratada a la empresa Cónica Norte, encargada también del manejo de los explosivos y el control de las detonaciones. El registro de los datos del test se

realizó el día 10 de julio de 2008, al ritmo marcado fundamentalmente por el tiempo necesario para la carga de los pozos. Las condiciones meteorológicas fueron favorables por la ausencia de viento y precipitaciones durante la mayor parte del día, si bien cabe reseñar que a partir de las 15 h comenzó a levantarse un viento bastante fuerte que introdujo mucho ruido en los disparos del final de la tarde.

PARÁMETROS DE ADQUISICIÓN DEL PERFIL BIERZO-1

Una vez analizados los resultados del test, se definieron los parámetros de adquisición del perfil sísmico de reflexión que se han sintetizado en la Tabla 1.

Para el registro se utilizó un sismógrafo de 60 canales "Geometrics Stratavisor NX" (Figura 5), con geófonos de 20 Hz (un geófono por canal)

Tabla 1.- Resumen de los parámetros seleccionados para la adquisición del perfil de reflexión Bierzo-1.

Sismógrafo	Geometrics Stratavisor NX
Precisión	24 bits
Rango dinámico	125 dB
Nº canales	60
Geófonos	20 hz
Geometría	End-On
Distancia tiro-1^{er} geófono	100 m
Separación entre tiros	20 m
Separación entre geófonos	5 m
Longitud total perfil	5 195 m
Fuente	Explosivos (Goma-2 Eco)
Explosor	Geometrics HVB-1
Carga	400 g (nominal)
Profundidad de la carga	3 m (nominal)
Filtros de adquisición	Notch 50 Hz entre tiros 196 a 245
Intervalos de muestreo	0,25 ms
Pre-trigger	10 ms
Longitud de registro	5 s



Figura 5.- Vista general del centro de control instalado en un todoterreno. En la imagen de la derecha se puede ver en un primer plano el sismógrafo Geometrix StratavisorNX y en un segundo plano el Rollalong.



Figura 6.- Detalles del despliegue del dispositivo. A la izquierda se puede ver la línea marcada con estacas y los trabajos de implantación de los geófonos; a la derecha, vista ampliada de un geófono clavado en el suelo.

espaciados 5 metros, siendo la longitud final del dispositivo de registro de 295 m (Figura 6).

Los disparos se realizaron cada 20 m siendo la distancia entre el disparo y el primer geófono del dispositivo de 100 m, resultando un longitud total del dispositivo utilizado para el registro de 5195 m. El explosivo utilizado fue dinamita “goma 2 eco” cargada en pozos de 12 cm de diámetro a una

profundidad de 3 m (Figs. 7 y 8). Para detonar la carga se hizo uso del instrumento “Geometrics HVB-1 seismic trigger” (Fig. 9). Este aparato funciona de tal manera que a la vez que deflagra el detonador envía una señal al sismógrafo para que abra la ventana de grabación, consiguiendo un “tiempo-cero” muy preciso y estable.



Figura 7.- Secuencia de preparación de la fuente sísmica. Arriba, a la izquierda, primer plano de un cartucho de explosivo y de un detonador sísmico; a la derecha, el detonador se introduce en el cartucho; abajo a la izquierda, el cable del detonador se anuda al cartucho para evitar que se suelte durante el descenso; abajo a la derecha, el cartucho y el detonador se introducen en el pozo.



Figura 8.- Retacado del pozo una vez que ha sido cargado con el explosivo.



Figura 9.- Explosor Geometrics HVB-1 utilizado para detonar los tiros. A la izquierda, los cables del detonador se conectan a los bornes del explosor; a la derecha, la salida de "trigger" del explosor se conecta a la bobina de cable coaxial para llevar la señal hasta el sísmógrafo.

El número previsto de disparos era de 245 con una carga de alrededor de 400 g. Algunos de los pozos se cargaron con menos carga debido al cierre parcial de los mismos, llegándose a realizar algunas cargas a menos de 1 m de profundidad. Sin embargo, los últimos tiros se realizaron con más carga, entre 575 y 690 g, aprovechando el explosivo sobrante que de no ser detonado tendría que ser destruido (quemado).

REGISTRO DEL PERFIL SÍSMICO BIERZO-1

Una vez se han fijado los parámetros de adquisición se abordaron los trabajos de detallado reconocimiento previo del terreno y permitaje. Los trabajos siguientes consistieron en la colocación a lo largo del perfil de estacas en las posiciones de implantación de los geófonos (1020) y de perforación de los pozos para la carga del explosivo (245) y su posterior levantamiento topográfico mediante GPS diferencial.

Una vez marcado y topografiado el perfil, los datos se introdujeron en el GIS para tener una cartografía detallada del mismo (Fig. 10) y se elaboró un esquema detallado de planificación del registro que será el documento básico a utilizar por los equipos de campo y el centro de control durante el registro del perfil (Fig. 11).

El registro de los datos del perfil de sismica de reflexión se realizó en dos fases. La primera fase tuvo lugar entre los días 4 y 6 de agosto de 2008. Por problemas logísticos (falta de detonadores adecuados) los trabajos de adquisición tuvieron que suspenderse y posponerse la finalización del registro completo del perfil. Los trabajos se reanudaron y finalizaron en una segunda fase el día 30 de septiembre de 2008.

Las condiciones meteorológicas fueron favorables por la ausencia de precipitaciones, si bien todas las tardes se levantaba algo de viento que perjudicaba más o menos levemente los registros.

Inicialmente se desplegaron 120 geófonos conectados por 10 cables de 12 tomas al sismógrafo mediante el "rollalong switch". Esto permite que tras el avance de cada disparo (20 metros) siempre permanezcan 60 geófonos desplegados y activos registrando las señales sísmicas. A medida que avanza el experimento se recogen los geófonos inactivos para proceder a su implantación por delante del dispositivo activo permitiendo el desarrollo del registro sin paradas.

Durante la carga de los pozos se detectó el cierre parcial de un pequeño número, oscilando las profundidades finales entre 0,5 m y 3 m en la mayoría de los casos. Debido a ello algunos pozos se cargaron con cantidades de dinamita inferiores a las previstas (6 pozos con cargas en torno a 250 g y 2 pozos con 150 g aunque la mayor parte de los pozos se cargaron con cantidades variables entre 345 y 420 g hasta completar un total de 100 Kg de dinamita (25 por día).

El total de personas implicadas en conjunto de las labores fue de 24, que incluyen el personal de la Universidad de Oviedo (9), Instituto Geológico y Minero de España (8) y Cónica Norte (7), la empresa encargada de la perforación de pozos y manejo de los explosivos, si bien el número medio diario de personal de campo durante la adquisición fue de 10-13.

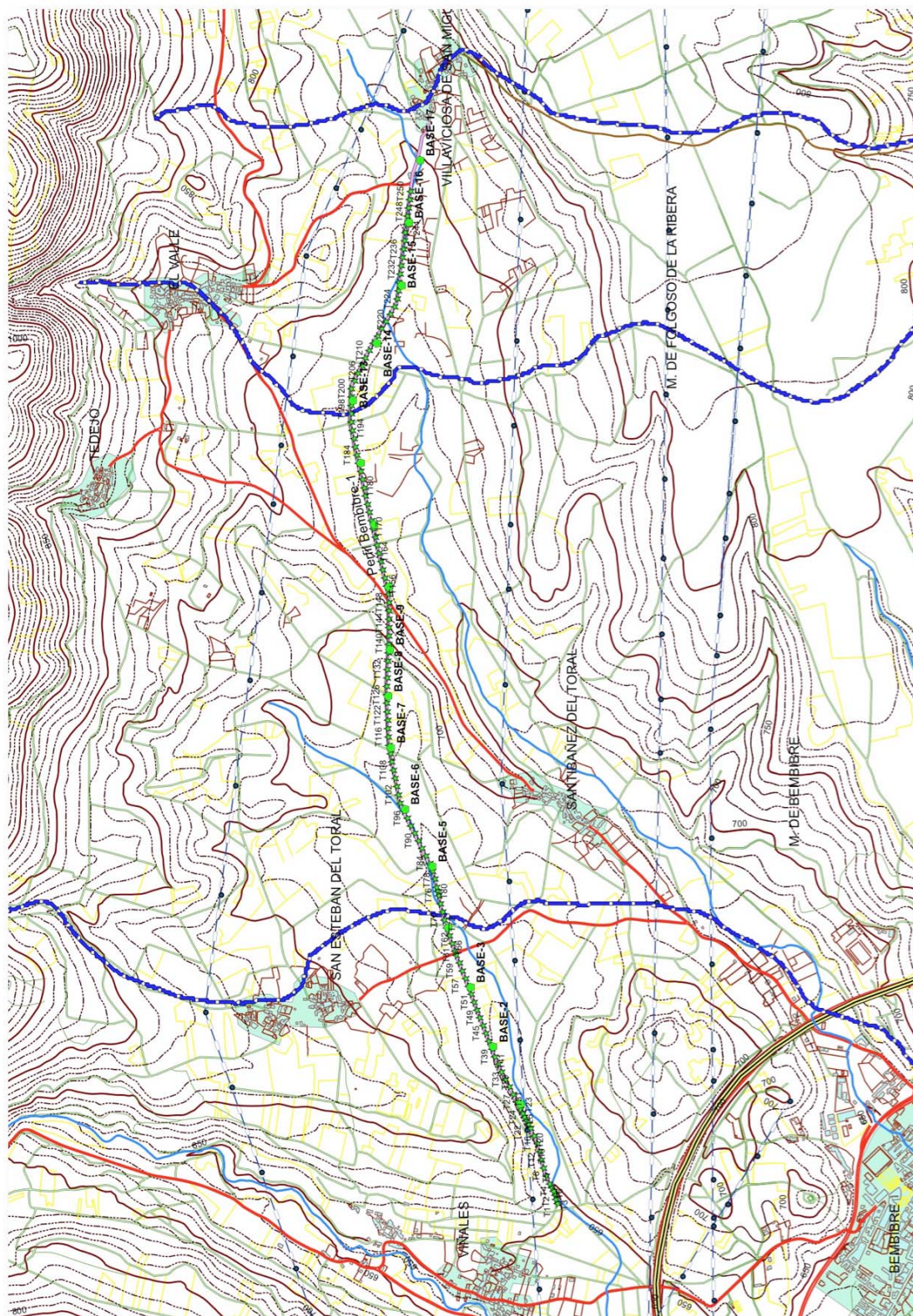


Figura 10.- Cartografía GIS del trazado detallado del perfil y de las posiciones de geófonos y tiros.

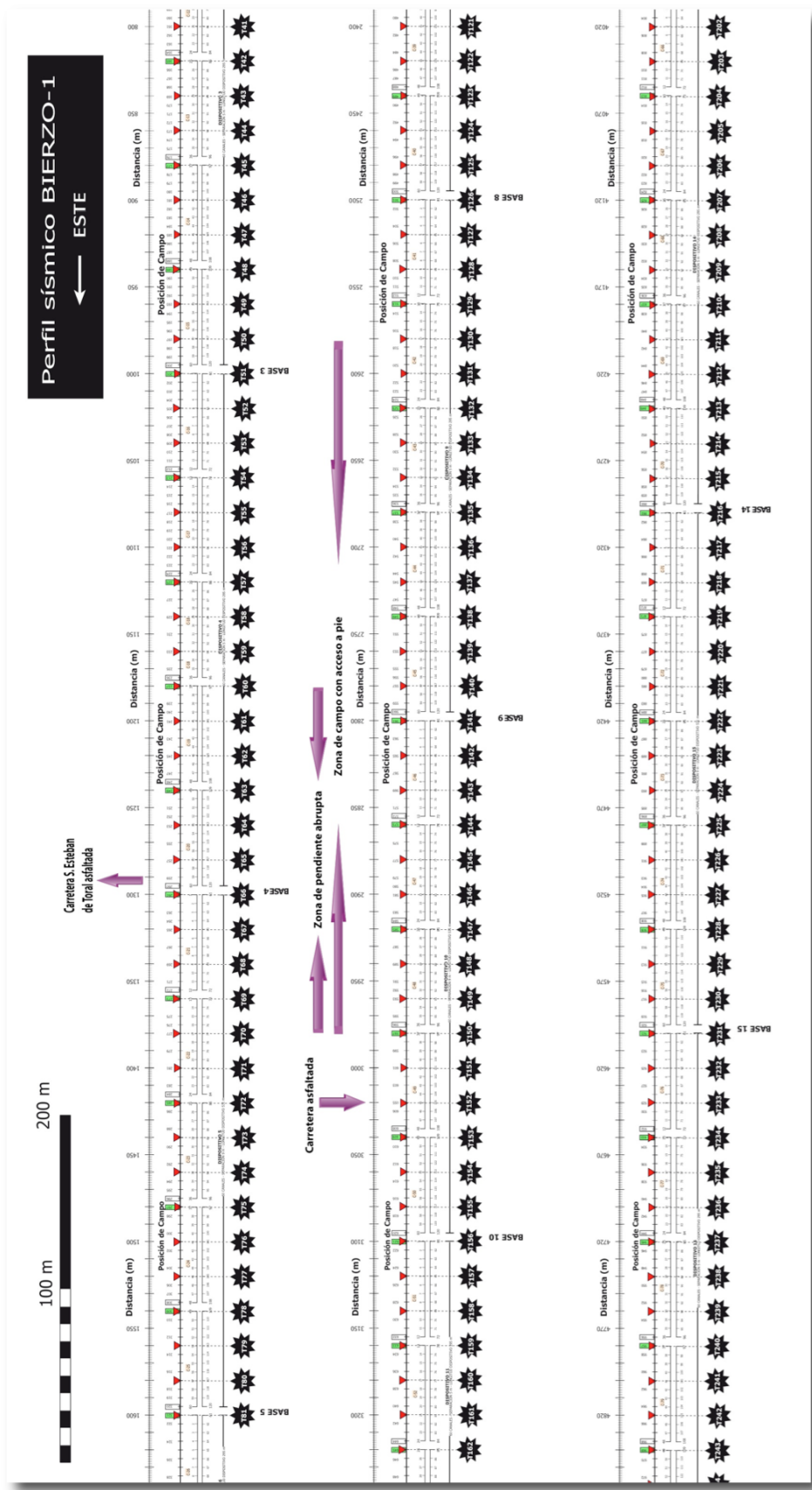


Figura 11.- Vista parcial del esquema de campo con la geometría del dispositivo de adquisición utilizada para el control en el campo de todas las operaciones implicadas en el registro (posiciones de tiros, cables, geófonos, rollalong, etc).

PROCESADO DE LA LÍNEA SÍSMICA DE REFLEXIÓN BIERZO-1

Como ya se ha dicho anteriormente, los datos sísmicos pertenecientes al perfil Bierzo-1 se adquirieron en dos campañas, una a principios de agosto de 2008 y la parte final a finales de septiembre del mismo año. En la primera campaña, al no disponer la empresa Cónica Norte de suficientes detonadores sísmicos, se usaron detonadores no sísmicos en varios de los tiros iniciales, lo que conlleva retardos diferentes de un tiro a otro y un empeoramiento en la relación señal/ruido. Hay que destacar también la presencia de una línea de alta tensión cruzando sobre la línea de registro que interfiere con los datos, principalmente en el primer tercio del perfil.

El procesado de los datos sísmicos se ha realizado con el Software GLOBE CLARITAS del IGN- New Zealand. A continuación se detallan los principales pasos seguidos en la secuencia del procesado de los datos de la línea sísmica en el Bierzo.

1) SEG-2 A SEG-Y

El formato de los registros procedente del sismógrafo es como ficheros individuales, uno por tiro, en formato SEG-2. El primer paso consiste en hacer un fichero único con todos los registros en formato SEG-Y para poder comenzar a visualizarlos y editarlos.

Las incidencias en esta fase son las siguientes:

- El fichero de campo 1112 no consigue leerse y se ignora. No se pudo saber cual era la causa pero fue imposible recuperar esos datos.
- Falta el fichero 1137 por no haberse realizado el tiro al no tener pozo perforado (ver notas de adquisición).

El resultado final es un fichero SEG-Y con un total de trazas útiles de 14640 correspondientes a 244 disparos.

2) EDICIÓN DE LOS REGISTROS

En un primer control de calidad se observan todos los registros para analizar sus problemas y limitaciones (Fig. 12). Hay dos canales que siempre salen mal, los números 55 y 56 (problemas de conexiones en el sismógrafo y/o rollalong). Hay otro canal que suele cambiar de polaridad.

Se crean dos ficheros de edición, uno con las trazas a eliminar y otro con las trazas a las que debe invertirse la polaridad y se aplica la edición a los datos brutos. En este paso se cambian las cabeceras SEG-Y de los disparos para que el número asignado en el campo y el número asignado en el procesado sea el mismo. (RECORDNUM=SHOTID). También se intentan recuperar de algún modo las trazas de los canales 55 y 56 con un proceso de interpolación entre las anteriores y posteriores, puesto que en general la cobertura es escasa.

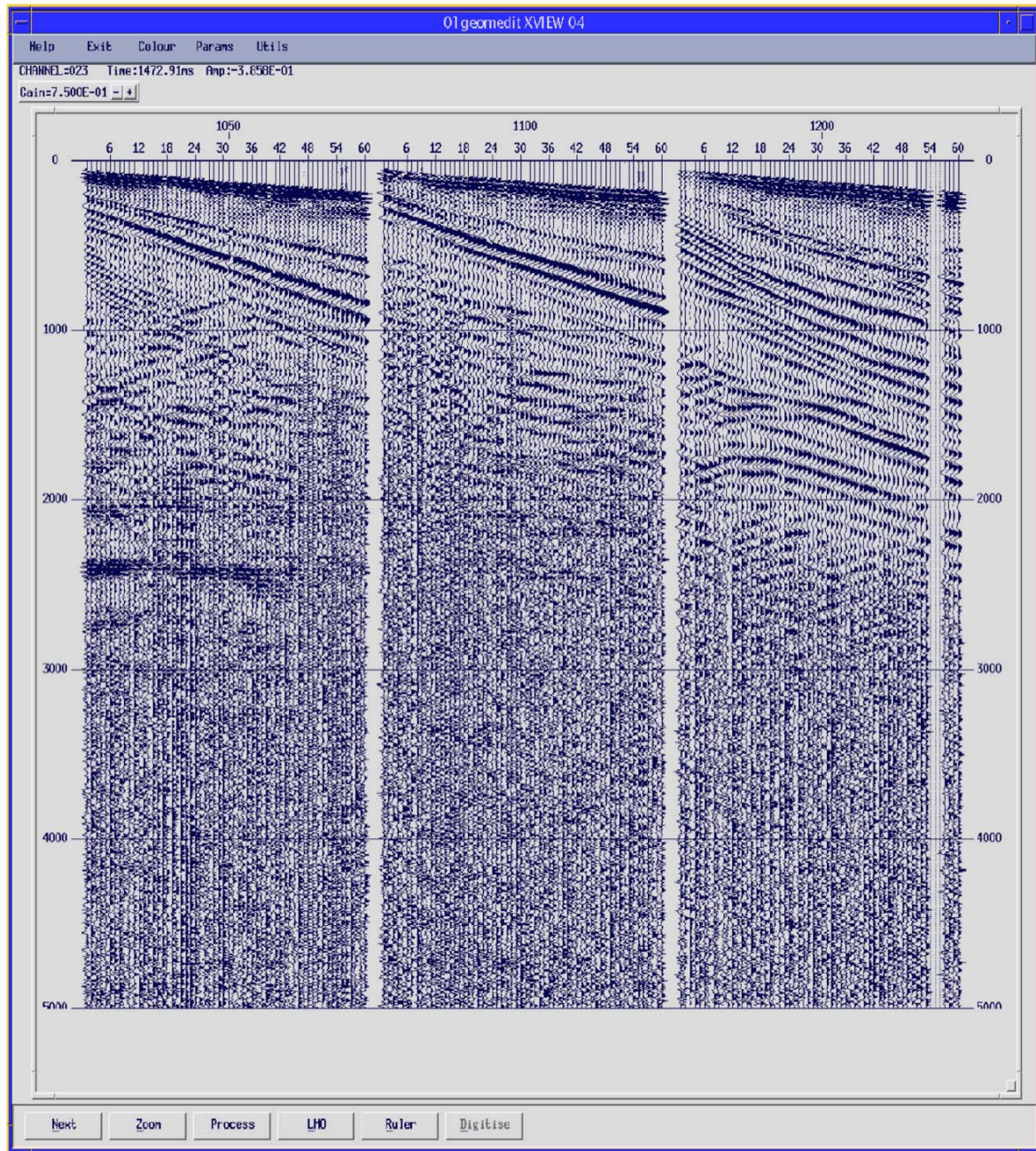


Figura 12.- Aspecto de tres tiros sin procesado, con una ganancia básica a efectos de crear la imagen.

3) "SHIFTS" EN DETONADORES NO-SÍSMICOS

Debido al uso de detonadores no sísmicos en algunos de los tiros iniciales de la primera campaña, es necesario hacer una corrección en el

tiempo de llegada de esos tiros. En algunos el retardo viene dado en las notas de adquisición. En aquellos en los que no se posee esa información el retardo se calcula interpolando entre los tiros anterior y posterior que tengan detonador sísmico.

Aunque no es un método exacto, es lo mejor para no perder esos datos de manera definitiva.

4) GEOMETRÍA

En este punto se hace necesario realizar la geometría a partir de los ficheros referenciados de campo sobre localización de tiros y geófonos y de elevaciones medidos con GPS diferencial. Se emplea la utilidad de geometría en Claritas y se cambia el formato de los ficheros de texto, convirtiéndolos en las unidades adecuadas para su aplicación en Claritas. Este paso, que es costoso en tiempo, es necesario antes de realizar cualquier tipo de proceso de los datos brutos, pues necesitamos referenciar cada traza a su CDP correspondiente.

Obtenemos unos ficheros de entrada de posiciones en el campo o “pegs”, con un total de 1266 posiciones (o pegs), que incluye tanto las posiciones de los geófonos como las posiciones de los tiros. También es necesario incluir la información de qué “pegs” registran cada tiro en otro fichero que contiene esa información para los 245 tiros de la línea y las sesenta posiciones que registran cada uno de ellos. A partir de esas dos bases de datos se puede completar la geometría y calcular las posiciones de los CDPs de la línea según una línea curva que siga el trazado de la línea en el campo. El tamaño de las cajas se toma como el mínimo para que obtengamos un número mínimo de trazas por CDP.

Se integra entonces esa información en las cabeceras de las trazas añadiéndoles el número de CDP y se aplica el retardo temporal en la cabecera DELAY. El número final de CDPs es de 1977. La numeración de CDPS comienza en 100. El espaciado entre CDPs es de 2.5 m. La longitud de los “bins” a lo largo de la línea es de 3.6 m (mitad de la caja) y en perpendicular se optó por una

anchura que permitiera la recuperación de todas las trazas, 45m.

El offset mínimo incluido es de 20 m y el máximo de 398. El máximo número de CDPS en un bin es de 12 y el número total de trazas es de 14700.

La Tabla 2 siguiente muestra el número de bins que alcanzan una determinada cobertura.

La geometría de la línea sísmica con las posiciones de los tiros y CDPs se observa en la figura. 13. En ella se diferencian los tiros (numeración en rojo) y los CDPs (numeración en azul). Obsérvese la zona donde los tiros están alejados de la línea principal disminuyendo la cobertura entre los CDPs 1220 y 1380 aproximadamente

5) CORRECCIONES ESTÁTICAS

En el procesado de una línea sísmica en tierra es muy importante realizar las correcciones debidas a las heterogeneidades de la parte más superficial. Estas correcciones son lo que se denomina correcciones estáticas. En ellas debemos

Tabla 2.- Número de bins con cada cobertura

COBERTURA (CDP FOLD)	Nº de BINS
0	0
1	12
2	12
3	12
4	13
5	20
6	70
7	832
8	852
9	131
10	17
11	5
12	1

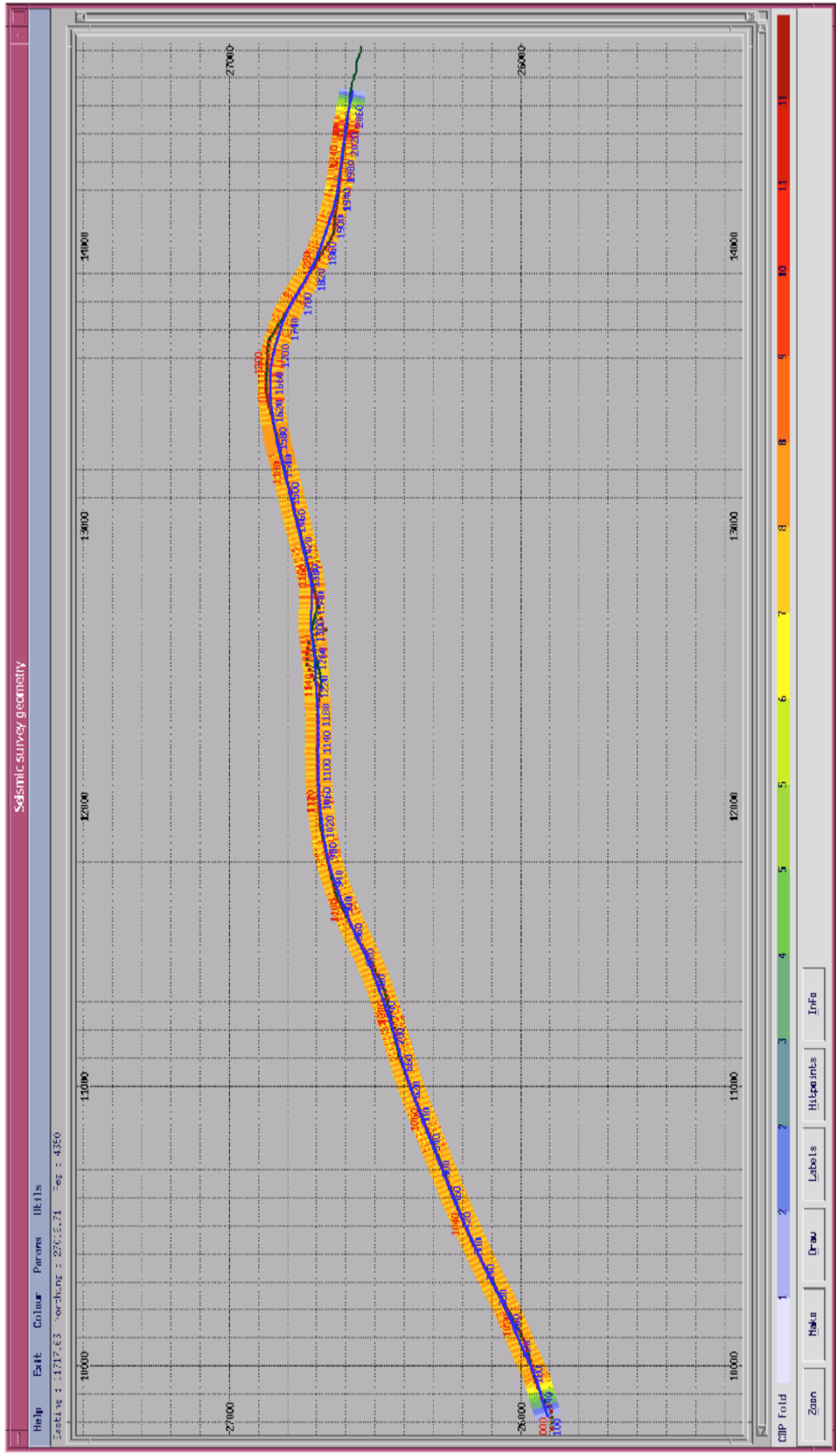


Figura 13.- Geometría de la línea sísmica con las posiciones de los tiros y de los CDPs. Los diferentes colores muestran el fold o cobertura de cada uno de los cdps con la escala en la parte inferior.

incluir la corrección por elevación o alturas diferentes y la corrección por la capa más superior y meteorizada del subsuelo donde las variaciones de velocidad son muy importantes lateralmente.

Para ello se procede a “picar” o anotar las primeras llegadas en todos los tiros. A partir de este fichero de tiempos de llegada podemos construir un modelo de velocidad para las capas más superficiales aplicando los cálculos empleados en la sismica de refracción. Obtenemos un modelo de velocidades a partir del cual podemos calcular las correcciones necesarias que se tendrían que realizar a cada traza si nuestra línea fuese una línea homogénea y sin elevación en superficie.

Obtenemos en total tres ficheros, uno para las correcciones estáticas mayores, pertenecientes a cada disparo; otro para correcciones residuales referentes a las diferencias entre tiro y receptor aplicadas a cada una de las trazas y un tercero correspondiente a la elevación. En este último, primero elegimos un “datum” o superficie de referencia por encima de la altura máxima de la línea, en este caso 740 m, y luego se elige una velocidad de reemplazamiento que se aplicará a todo el área por debajo de la superficie del “datum”. La velocidad de reemplazamiento se elige como la velocidad por debajo de la capa alterada, en este caso, según nuestro modelo obtenido a partir de primeras llegadas es de 2200 m/s. A partir de esos tiempos y velocidad se pueden obtener las correcciones de elevación que se aplican junto con las estáticas propiamente dichas en el mismo proceso.

La figura 14 muestra el modelo de velocidades resultante del estudio de las primeras llegadas y está compuesto de dos capas. La primera de unos 10 metros es bastante homogénea con una velocidad de 850-900 m/s y la segunda con una velocidad bastante alta de una media de 2200 m/s que es la que se utilizó después para realizar el datum en la geometría. Hay que tener en cuenta

que debido a la geometría elegida para la adquisición no tenemos llegadas muy cercanas a los tiros con lo que el porcentaje de error en este modelo es mayor que en las adquisiciones donde el offset tiro-receptor es cero o muy pequeño.

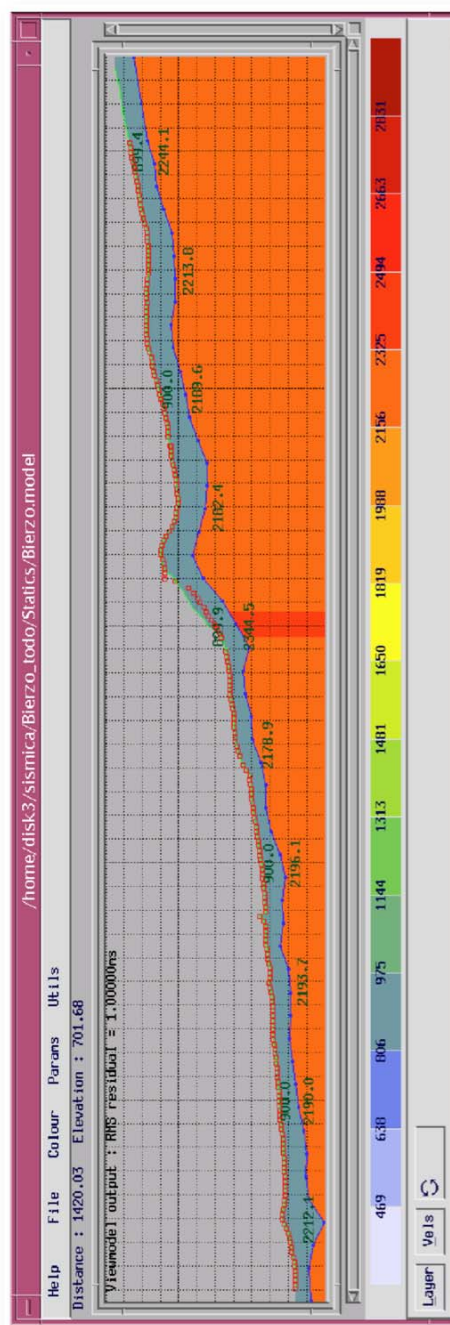


Figura 14.- Modelo de velocidades a partir del estudio de las primeras llegadas.

6) PROCESADO PRE-STACK

En este procesado se incluyen todas las secuencias de procesado destinados a mejorar la calidad de la señal por medio de filtros, en una y dos dimensiones, deconvolución y ganancia, aplicados en el dominio de shot-gather. Incluye pruebas para obtener los parámetros referentes a:

a) MUTE en el dominio FK.

Principalmente se intenta eliminar el ruido del “ground roll” que tiene una imagen característica en el dominio fk. Sin embargo no se puede quitar todo, al ser las ondas superficiales ondas dispersivas.

b) DECONVOLUCION.

Se aplica una deconvolución con ventana variable utilizando un operador de 40 ms y un gap de 4ms. Antes y después de la deconvolución se aplica un filtro pasabanda. En la figura 15 se muestra un ejemplo de varios tiros antes y después de la deconvolución.

c) FILTROS PASABANDA.

Se realizan en este punto también pruebas sobre filtros de frecuencias que permitan obtener una mejor imagen eliminando del espectro las frecuencias que no contengan información útil. Incidencias: En los tiros que pasan al lado de la torre de alta tensión la frecuencia de 50 Hz hace que la señal sísmica sea realmente mala. La aplicación de un filtro “notch” en el campo en la segunda parte del perfil aminora mucho este problema. Sin embargo, se ha eliminado en gran parte la frecuencia de 50 Hz para la primera parte del perfil aplicando un filtro donde no se deja pasar la frecuencia indeseada, sin destruir mucha información.

d) GANANCIAS.

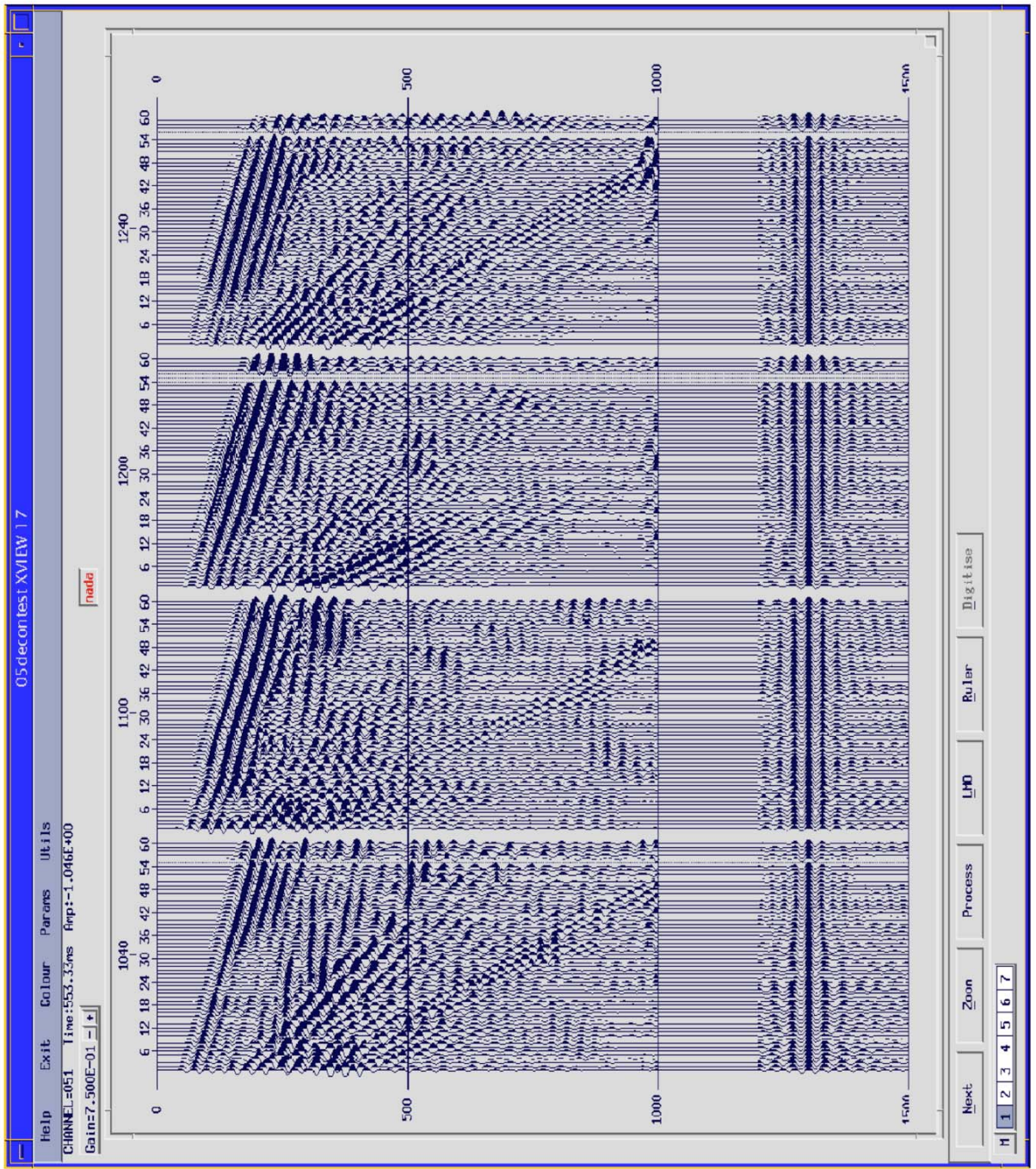
Dentro de las pruebas y tests correspondientes la procesado pre-stack se incluyen las pruebas encaminadas a conseguir una mejora en la visualización de los datos a todos los tiempos, o ganancias. En este caso se optó por aplicar una ganancia que incluye una divergencia esférica y un balance de amplitudes.

7) ANÁLISIS DE VELOCIDADES Y STACK

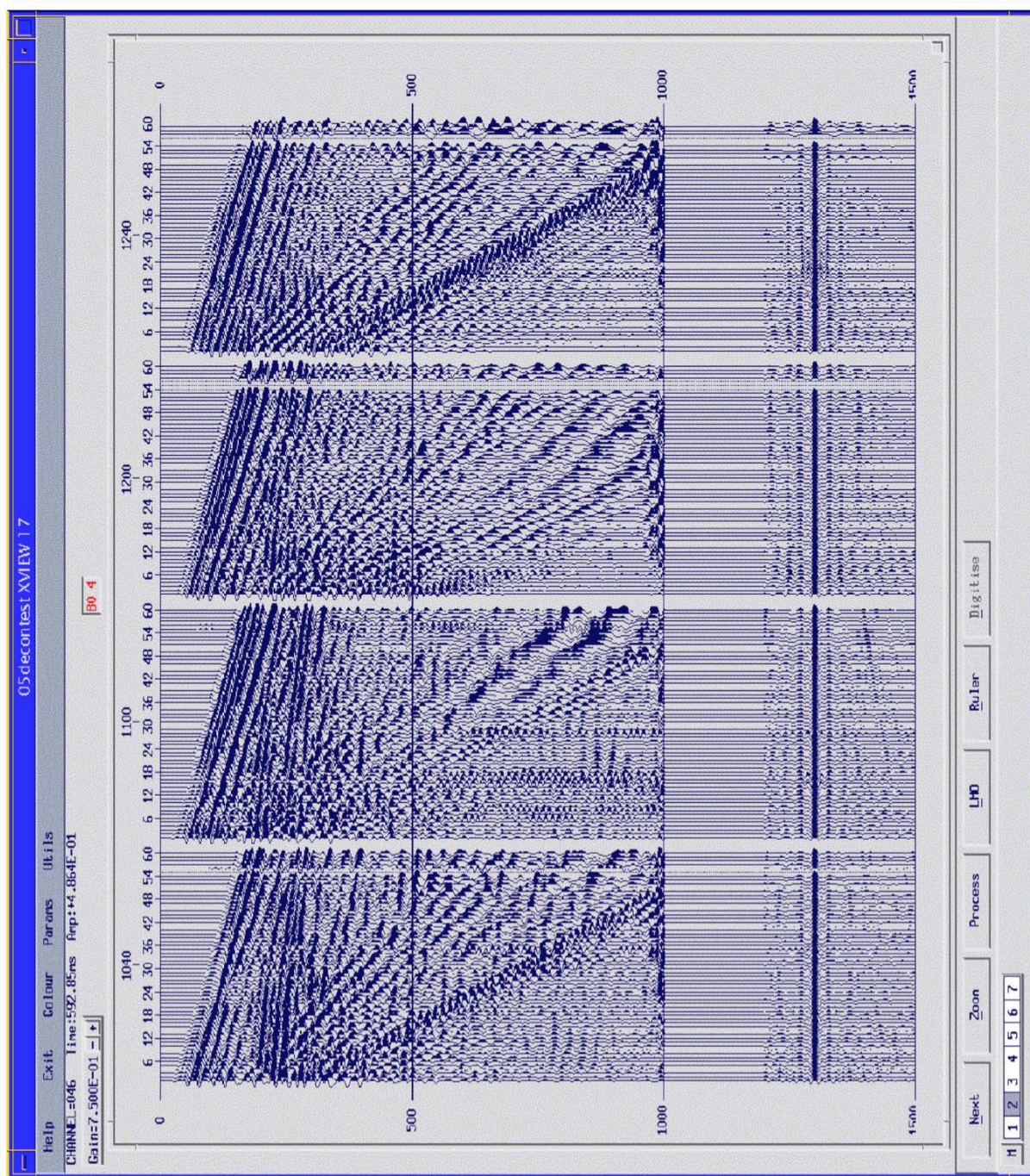
Una vez obtenidos los disparos con una secuencia de procesado que incluye, ganancias, filtros y deconvolución, que se han integrado en las cabeceras de las trazas con la información correspondiente a los CDPs, podemos realizar un stack bruto con una velocidad constante aproximada para poder comenzar a realizar el análisis de velocidades. A partir de este primer stack bruto con los tiros procesados se analizan las velocidades por medio de semblanzas y paneles de velocidad constante (Fig. 16). En el análisis de velocidad las semblanzas son claras hasta 1500 ms. pero después no hay señal alguna clara de velocidades por lo que continuo con un suave gradiente. Existen dos llegadas profundas que suman con cualquier velocidad. Esto puede ser debido, o bien a que son llegadas laterales o artefactos o bien que debido a la profundidad a la que se encuentran en relación con la longitud del dispositivo el “move out” es mínimo y no podemos establecer una velocidad clara basándonos en las diferencia de tiempo a diferentes offsets.

8) PROCESADO POST-STACK Y MIGRACIÓN EN TIEMPO

Una vez que obtenido un modelo de velocidades satisfactorio podemos realizar un “stack” sobre el que seguir haciendo algún tipo de



Figuras 15.- Aspecto de cuatro tiros entre 0 y 1s antes y después la deconvolución. En la parte inferior se dibuja la función de autocorrelación para compararlas.



Figuras 15.- (Continuación).

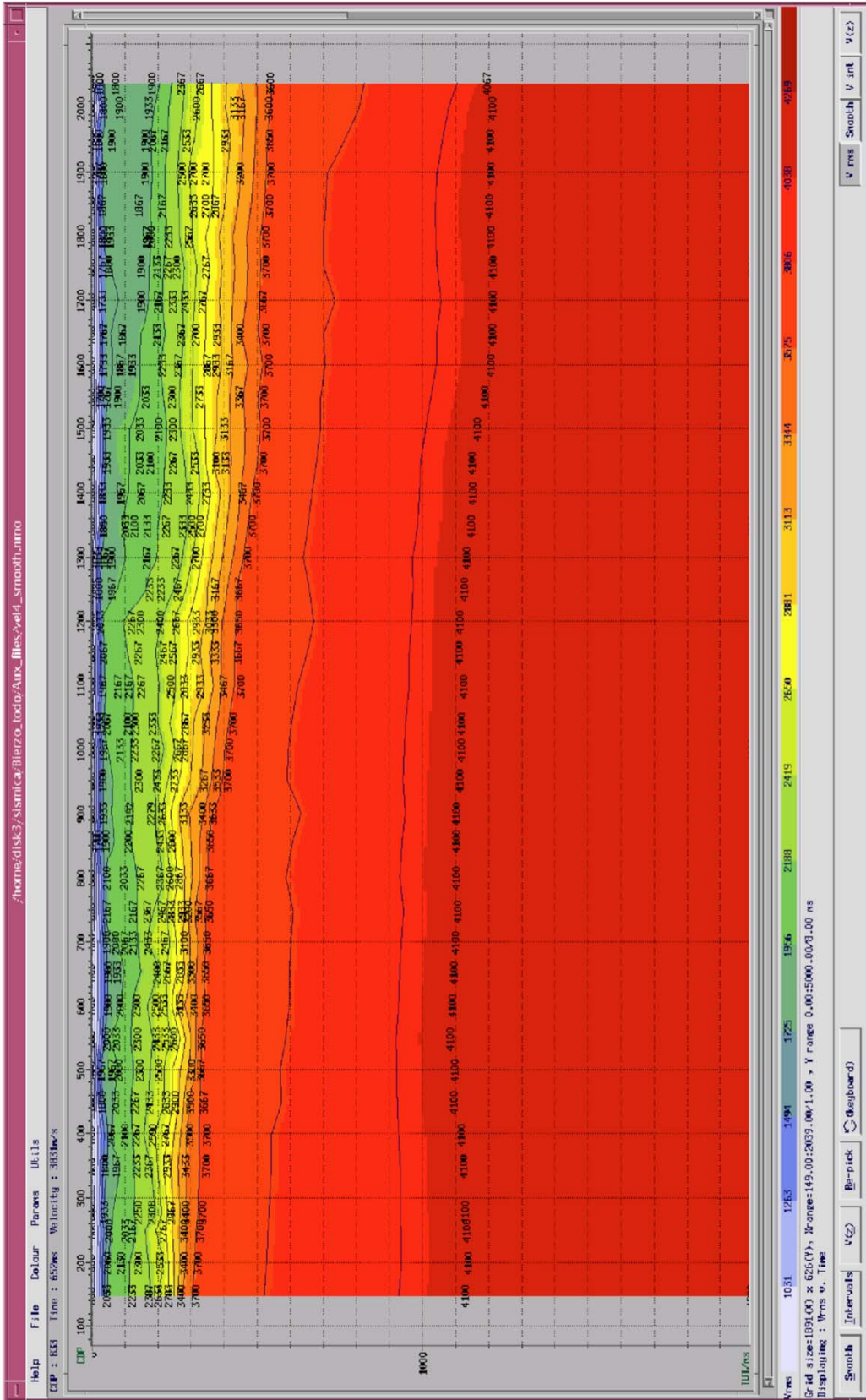


Figura 16.- Modelo de velocidades RMS suavizado utilizado en el stack de la línea sísmica.

proceso, principalmente aquellos dirigidos a marcar la coherencia de los eventos en el stack. Después de hacer varias pruebas con diferentes filtros de coherencia, el mejor resultado se obtiene al aplicar una deconvolución FX y un filtro bidimensional de tipo predictivo para obtener la imagen sísmica de la figura 17.

También se realiza a los datos una migración en el tiempo usando el algoritmo de STOLT, con unas

velocidades de intervalo constantes. En este caso y al tener reflectores con poca inclinación la migración no cambia mucho la geometría de las reflexiones (Fig. 18). Lo único que se observa diferente es una de las llegadas profundas que parece colapsarse en un espacio menor indicando que probablemente estemos antes un eco lateral de una discontinuidad muy fuerte.

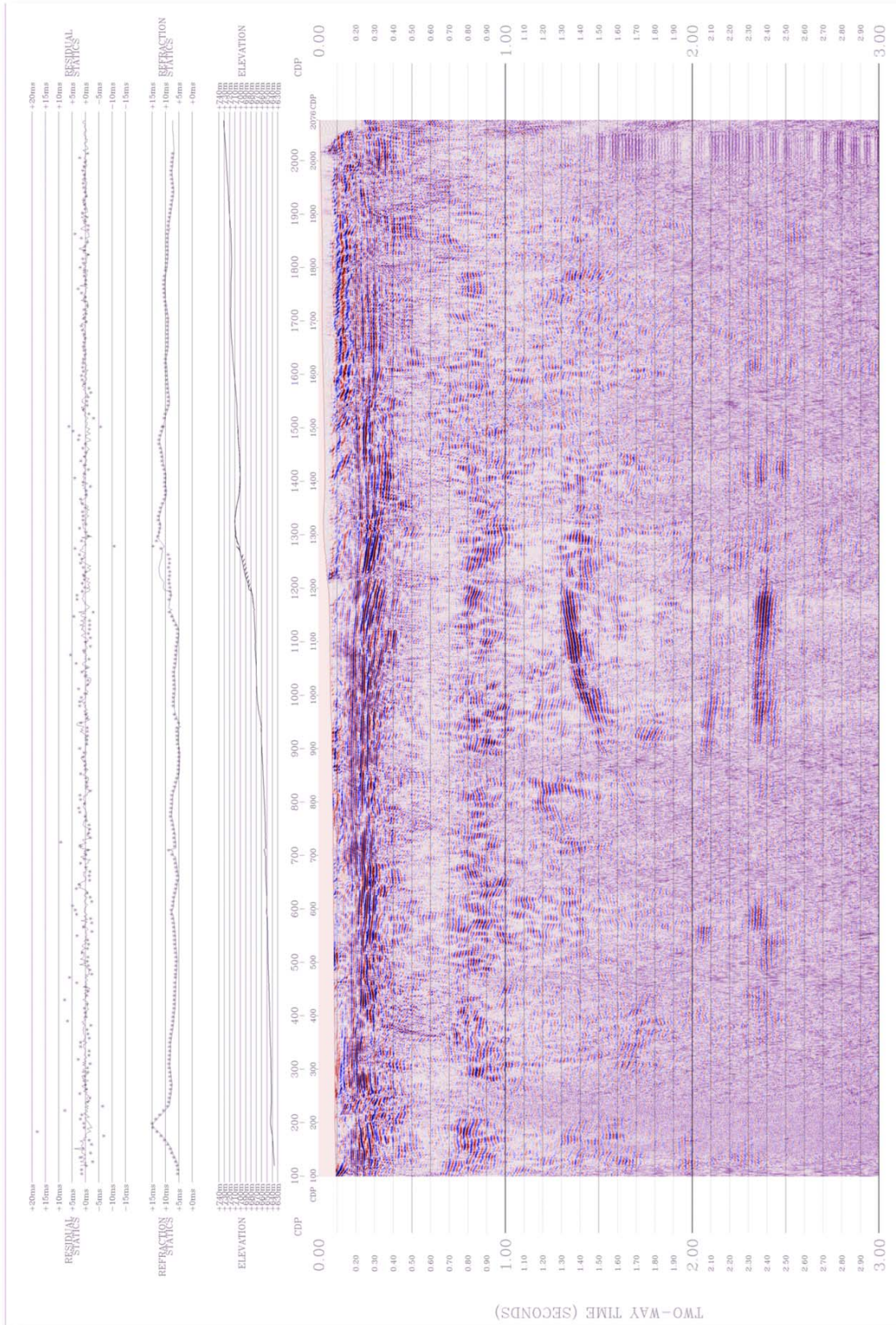


Figura 17.- Stack final de la línea sísmica del Bierzó-1.

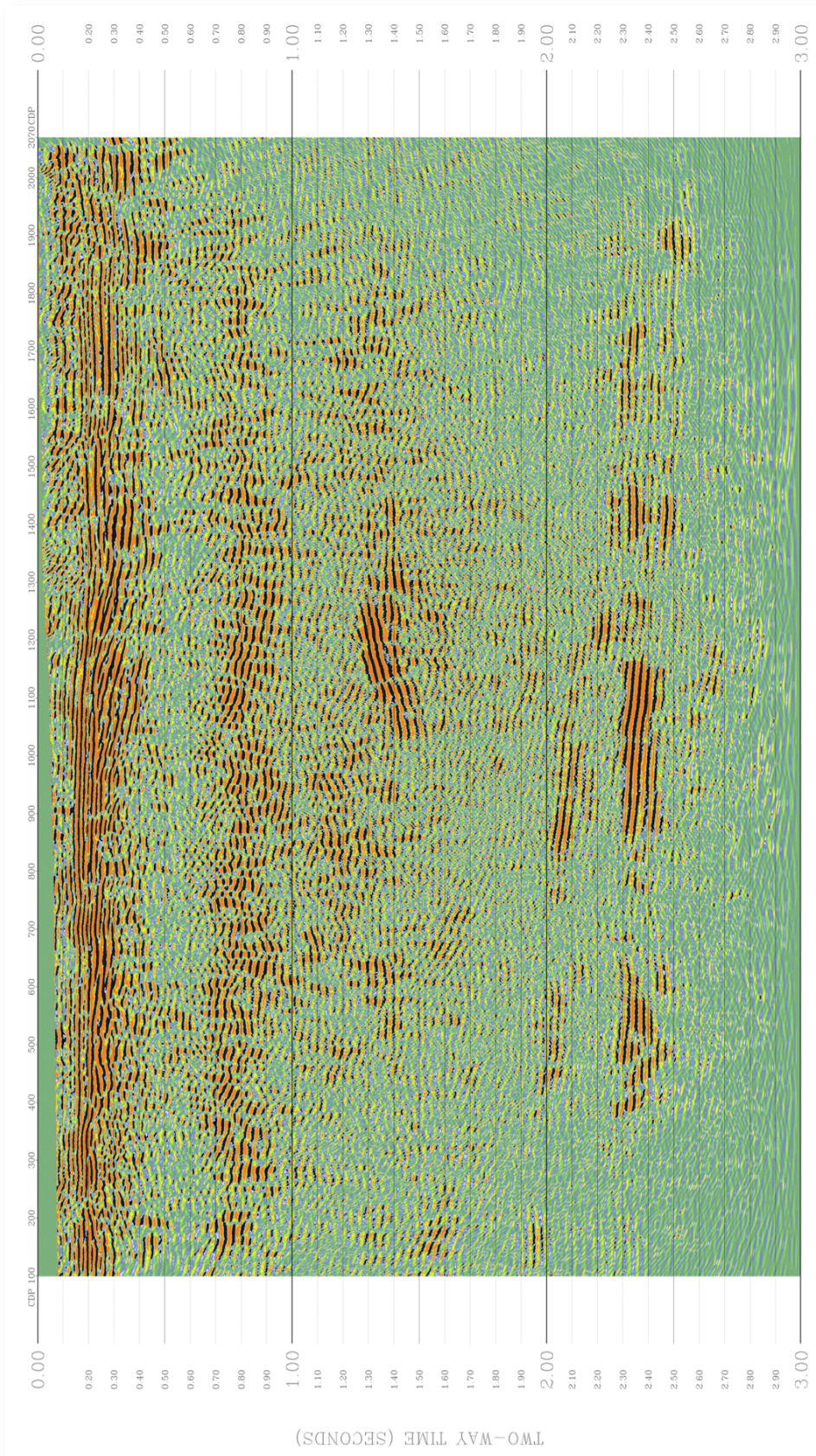


Figura 18.- Stack final migrado en el tiempo de la línea sísmica del Bierzo-1.

ANEXO. PROCESOS Y MÓDULOS APLICADOS USANDO GLOBE CLARITAS

Fichero de entrada: Bierzo.sht (Fichero SEG.Y. A partir de los SEG-2)

TREDIT: Eliminación de trazas sin señal.

ADDGEOM: adición de la geometría en las cabeceras

STATIC: Aplicación de los retardos correspondientes determinados a partir del modelo de refracción obtenido. Correcciones de elevación, de refracción y residuales.

Datum: Altura: 740m, velocidad de reemplazamiento: 2200 m/s

SPHDIV+BALANCE: Se aplica una ganancia en las trazas por medio de una divergencia esférica y un balance de amplitudes en el dominio de shot-gather.

TVFILT: Primer paso de filtro pasabanda entre 20-25 y 90-100 Hz

DECONW: Deconvolución a los tiros con unos parámetros de 40 ms como longitud del operador y 4 ms como longitud del gap.

TVFILT: Se vuelve a aplicar el mismo filtro después de la deconvolución, pues cambia el espectro.

DISCGATH: Se reordenan las trazas en cdp-gathers.

NMO: Se les aplica la velocidad de normal move out determinada en el análisis de velocidad efectuado en los cdps mediante análisis de semblanzas. Las semblanzas indicaban que hasta

500 ms. las llegadas son muy claras pero a partir de ahí los datos no alcanzan cobertura suficiente ni “move out” para poder realizar un análisis factible. Se suavizan las velocidades lateral y verticalmente a partir de ese punto y a través de varios tests se observa que el resultado final apenas difiere.

STACK. Se suman las trazas corregidas por nmo y se mutan aquellas muestras que sobrepasen un factor de estiramiento de más del 55 %.

FDILT Se filtran las frecuencias de 50 Hz producidas por las torres de alta tensión, puesto que en la primera parte del perfil no se había utilizado ningún tipo de “notch” en el campo para contrarrestarlas. En el caso de los tiros de la segunda parte, ya vienen del campo con la frecuencia de 50 Hz atenuada.

FKMUTE. Se aplica un mute de los ruidos que se separan en el espacio FK, aunque muestran un poco de interferencia o “aliasing” que es imposible eliminar totalmente. Principalmente se trata de la onda aérea y de parte de las ondas superficiales

FXDECON. En este punto se intenta aplicar algún tipo de filtro de coherencia, que en este caso se optó por la deconvolución en el espacio FX, con un mezclado de 25 trazas.

Se aplica un AGC para observar los datos mejor con una ventana de 900 ms.

Finalmente se aplica un migración de tipo STOLT con unas velocidades de intervalo de 0-800/30-1000/50-1200/100-1400/200-1600/1000-1800/.

Finalmente se vuelve a filtrar el resultado entre 25-27 y 70-80 Hz.

Número de CDP: 100-2076

OFFSETS: 254 m: 3971 m.

SHOTS: 1000: 1244

Número total de trazas: 14640

Muestreado: 0,25 ms.

Muestras totales: 200001 muestras.

Longitud de registro: 5000 ms.

PERFIL DE SÍSMICA DE REFRACCIÓN

INTRODUCCIÓN

Los registros sísmicos realizados en el “Walk-away noise test” se aprovecharon para el estudio del subsuelo mediante el método de sísmica de refracción. Esta técnica se basa en los tiempos de primeras llegadas de ondas P determinadas en diferentes receptores dispuestos linealmente con el

fin de modelizar un perfil de velocidades de ondas P (V_P) en dos dimensiones, en el cual, y gracias a la correlación de velocidades sísmicas con litologías, es posible determinar la disposición y geometría de los diferentes cuerpos geológicos en el subsuelo así como hacer una estimación de sus propiedades físicas (como por ejemplo: grado de meteorización o de fracturación).

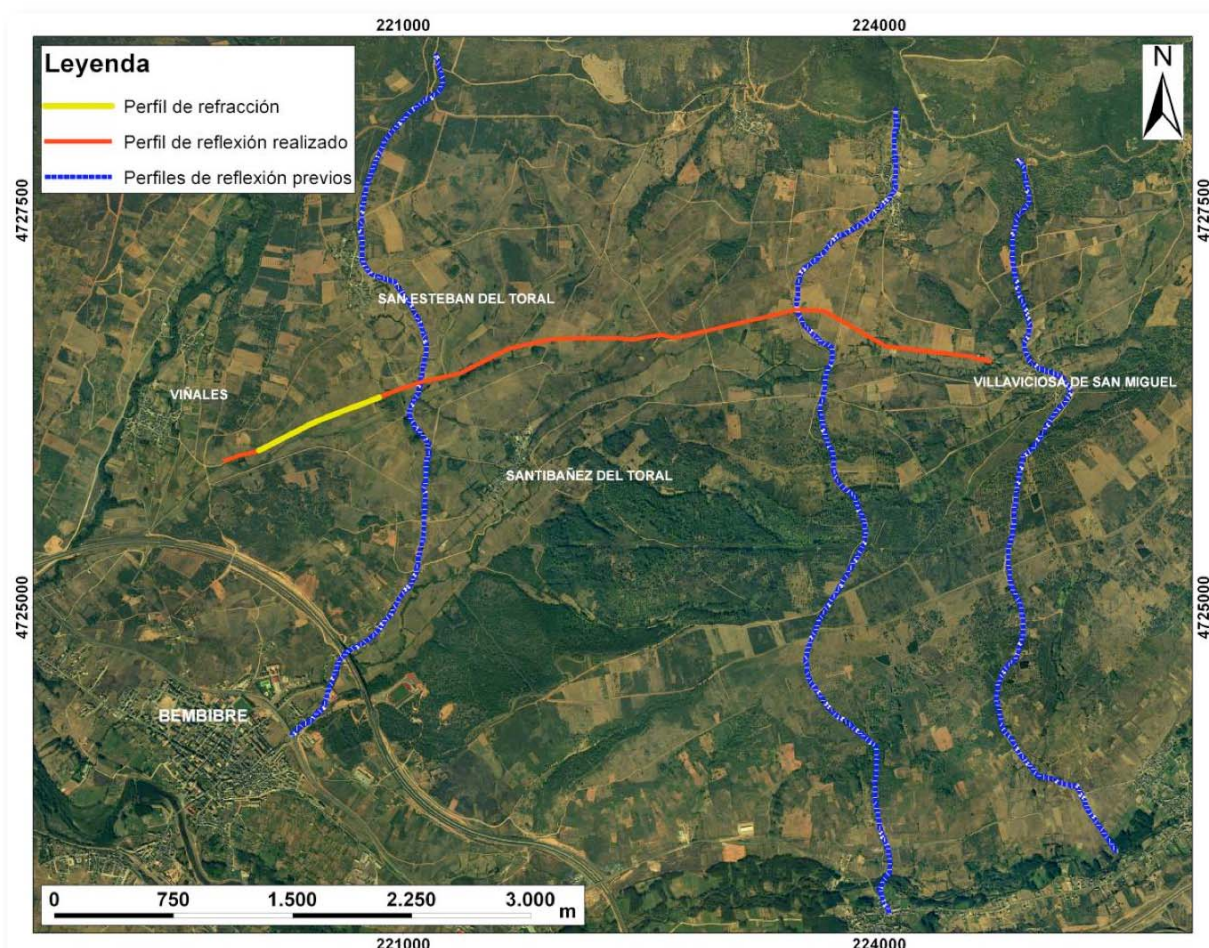


Figura 19.- Situación del perfil de refracción realizado.

La buena calidad de los datos sísmicos adquiridos en campo permitió la modelización del perfil sísmico del que se pudo obtener una reconstrucción en 2 dimensiones de la relación de los materiales terciarios y paleozoicos que conforman la cuenca estudiada.

La geometría de adquisición para el perfil de refracción es la descrita para el "Walk-away noise test" en el apartado de adquisición. De los 19 tiros realizados en el "Walk-away noise test" se utilizaron 15 en la modelización del perfil de velocidades. La razón es que en las posiciones donde se hicieron tiros dobles únicamente se utilizó la información del tiro de mejor calidad. A los tiros dentro de la línea de geófonos se les complementó con otros exteriores con el fin de aumentar la profundidad de investigación. La longitud total del perfil fueron 830 m a lo largo de los cuales se dispusieron geófonos con dos

espaciados diferentes. La información registrada por los geófonos espaciados a 5 y 10 metros fue adquirida con sismógrafos Geode y Stratavisor NX respectivamente. La posición de los puntos de tiro y geófonos empleados en la modelización del perfil de refracción se muestra con más detalle en la figura 20.

PROCESADO Y MODELIZACIÓN

El primer paso en la etapa de procesado fue la identificación manual de los tiempos de primeras llegadas en los registros de campo mediante el programa PickWin de Geometrics (Fig. 21). Los tiempos de primeras llegadas únicamente se determinaron en aquellas trazas donde se pudo identificar con claridad la primera llegada de las ondas P, excluyendo aquellas en las que el ruido electrónico o ambiental enmascaraba la señal

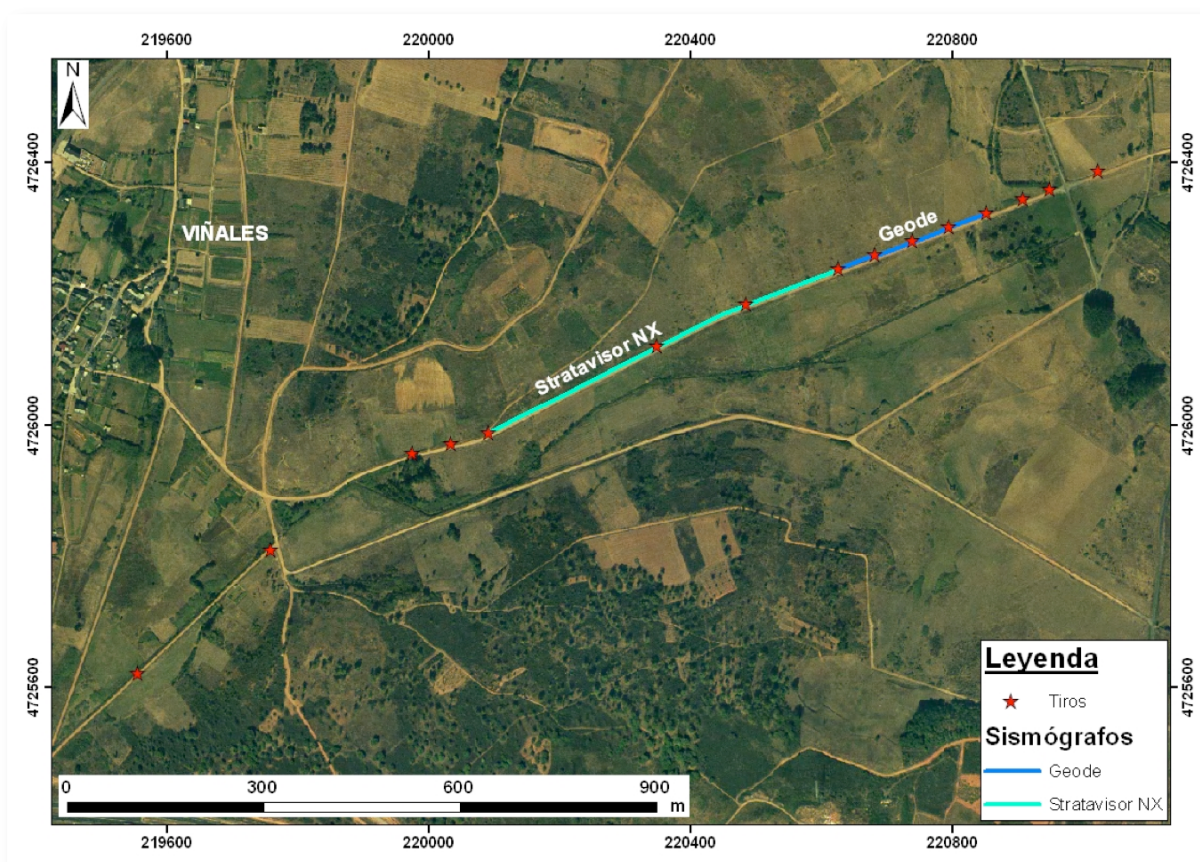


Figura 20.- Posición de los tiros y geófonos empleados en la modelización.

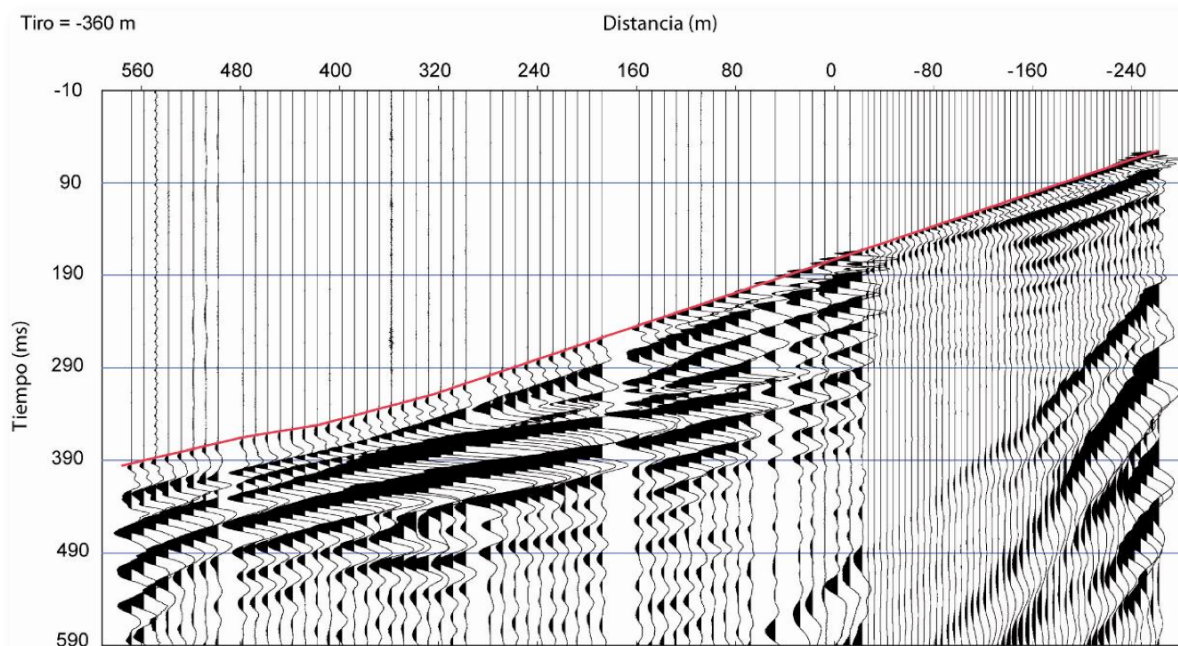


Figura 21.- Identificación (“picadas”) de las primeras llegadas mediante el programa PickWin (Geometrics). Las trazas sin información útil fueron borradas (espacios en blanco).

sísmica. En total se realizaron 1359 determinaciones de tiempos de llegada. Una vez identificadas todas las primeras llegadas se revisaron mediante el programa Plotrefa de Geometrics corrigiendo posibles incoherencias. Posteriormente se convirtió el fichero final de primeras llegadas PickWin al formato de ficheros de entrada del programa de modelización SeisOpt Pro.

Para el proceso de modelización se utilizó el programa “SeisOpt Pro” (versión 2.5) de “SeisOpt Software”. Se trata de un programa tomográfico de optimización global que se basa en los tiempos de primeras llegadas de ondas sísmicas para modelizar perfiles en dos dimensiones en los que se muestran gradientes de velocidad de dichas ondas. En el proceso de modelización únicamente es necesario especificar las posiciones de los tiros y receptores, los tiempos de primeras llegadas, la resolución espacial del modelo y los límites de velocidad sísmica máxima y mínima, sin necesidad de establecer modelos iniciales a priori.

La elección de la resolución del modelo requirió de varios ensayos. Una resolución muy baja da como resultado un modelo sin apenas definición, mientras que una resolución inicial demasiado alta podría dar lugar a errores de computación, a la vez que aumentaría enormemente el tiempo de cálculo. Finalmente, el tamaño de las celdas ha sido de 4,1 x 4,1 m.

Hay que resaltar que aunque el programa de modelización crea un perfil de velocidades que englobe desde el primer hasta el último tiro de la línea, el perfil de refracción se sitúa bajo la línea de geófonos (ver fig. 22), el único objetivo de los tiros laterales es aumentar la profundidad de investigación. En el proceso de modelización se consiguió un modelo final que se ajusta bien a los datos obtenidos en campo (fig. 22). El error final de los desajustes entre los tiempos observados y los calculados por ambos modelos medido por el método de mínimos cuadrados fue de $1.56 \times 10^{-5} \text{ s}^2$.

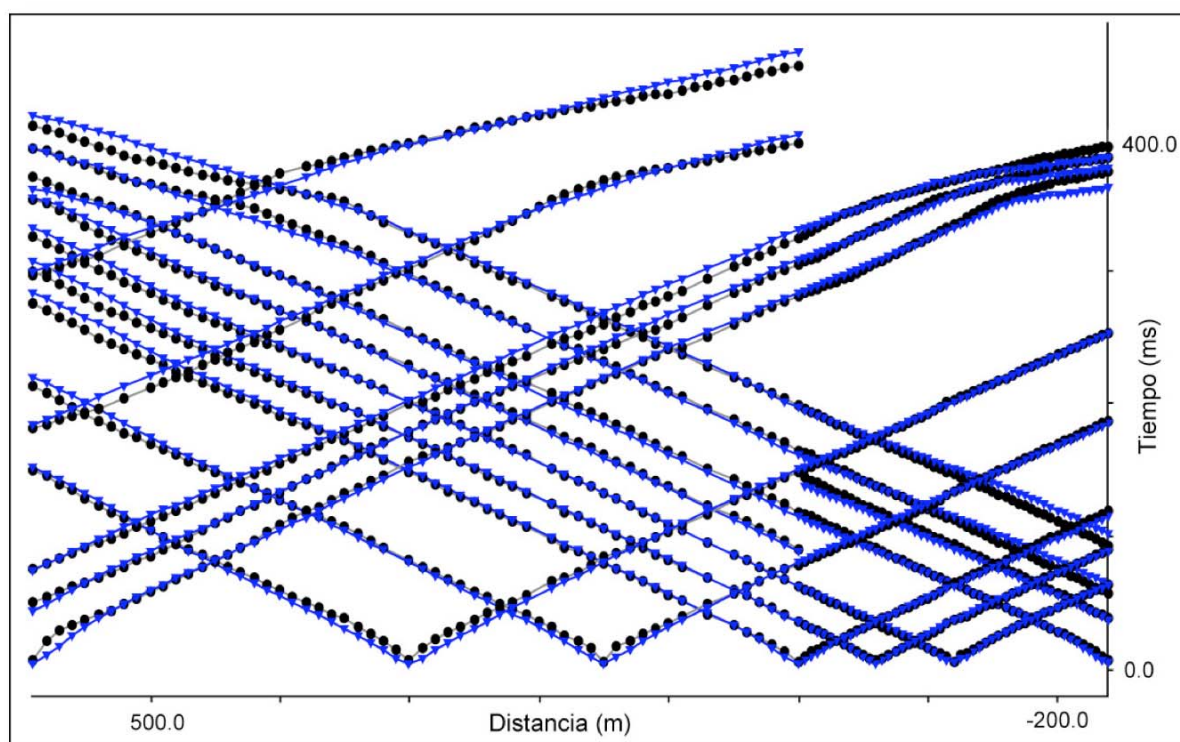
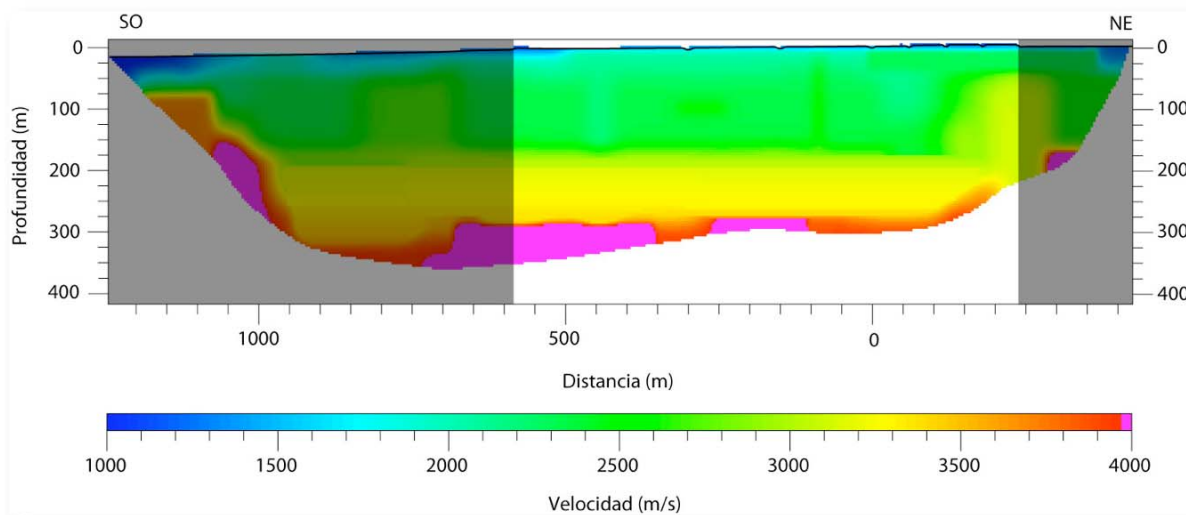


Figura 22.- Modelo de velocidades de ondas P (arriba). La zona sin sombreada delimita el perfil de refracción. Escala horizontal igual a escala vertical. Ajuste entre tiempos observados (círculos negros) y observados (triángulos azules) para el modelo de velocidades (abajo).

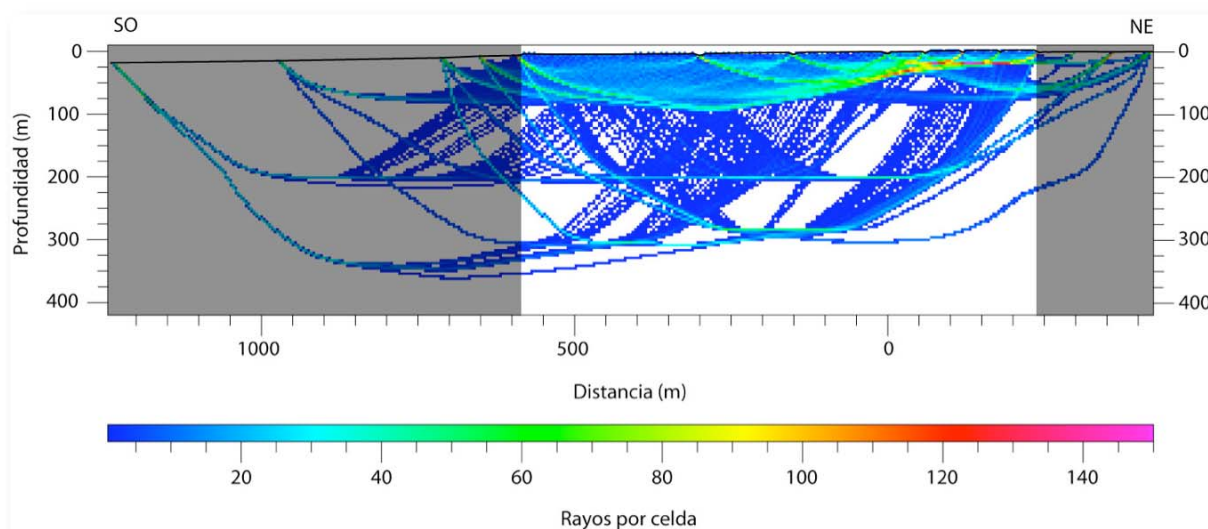


Figura 23. Perfil con el trazado de rayos. Escala horizontal igual a escala vertical.

El programa genera además un perfil mostrando el número de rayos que atraviesa cada celda de la sección estudiada permitiendo conocer si determinadas partes del modelo están bien muestreadas o si por el contrario las velocidades obtenidas están sujetas a mayores ambigüedades. Como se puede apreciar en la figura 5 la mayor densidad de rayos se encuentra en los primeros 60 metros de profundidad. Conforme esta aumenta la densidad se hace menor siendo muy baja en los laterales y en las zonas de mayor profundidad del perfil. Esto se traduce en que la información más fiable del modelo se sitúa en los primeros 200 a 250 metros de profundidad en el centro del perfil mientras que en los bordes y a mayor profundidad se encuentra la información más susceptible a ambigüedades.

DESCRIPCIÓN E INTERPRETACIÓN DEL MODELO DE VELOCIDADES

El rango de valores de velocidad para el perfil oscila entre 950 m/s en la parte más superficial y más de 4000 m/s en profundidad, siendo la

profundidad máxima de investigación del modelo de velocidades de 345 m al suroeste de la línea.

En el perfil se distinguen cuatro partes bien diferenciadas según sus velocidades sísmicas. La parte más superficial, con potencias de 25 metros al suroeste y 15 metros al noreste, muestra velocidades que oscilan entre 950 m/s en las zonas más someras y 2000 m/s en las zonas más profundas. La segunda zona se caracteriza por ser la de mayor espesor, con potencias de entre 155 metros al suroeste y 175 al noreste; en ella los valores de velocidad aumentan con la profundidad en un rango de 2100 m/s a 2700 m/s. La tercera zona con potencias de 100 metros al suroeste y 35 metros al noreste presenta, al igual que la zona dos, un bajo gradiente en profundidad con rangos de velocidad de 3000 m/s a 3400 m/s. El límite entre la zona dos y tres, situado a una profundidad de 180 metros, es un gradiente no muy acusado pero en todo caso mayor que el que presentan ambas capas por separado. En la zona más profunda se observa un fuerte gradiente de velocidades en donde se alcanzan valores máximos desde 4970 m/s, en el centro del perfil, hasta

4000m/s, en el extremo noreste. Este gradiente no es homogéneo lateralmente, siendo mayor en la zona media y suroeste, mientras que en la zona noreste no es tan acusado. Esta información hay que tomarla con cautela ya que aunque se utilizó un dispositivo de adquisición largo la información referente a esta zona es muy escasa por lo que el proceso de modelización se ve comprometido para este sector. La escasa información de la que se dispone en este sector del modelo, reflejada en su baja densidad de rayos en el perfil de trazado de rayos (Fig. 23), sumado a los malos ajustes entre los tiempos observados y calculados durante la modelización (Fig. 22), producidos a su vez por la falta de información, hace que las velocidades y geometrías por debajo de la zona tres sean poco fiables por lo que en la interpretación se van a obviar.

Este perfil de sismica de refracción discurre por la zona centro de la cuenca terciaria del NE de Bembibre, la cual en este sector se caracteriza por depósitos continentales terrígenos principalmente de grano fino que se apoyan sobre un basamento paleozoico (Estefaniense) compuesto predominantemente por areniscas y pizarras con algún tramo de carbón. En este contexto geológico las velocidades de los tramos primero y segundo se han interpretado como depósitos terciarios. Las

velocidades del tramo superior sensiblemente más bajas que las del segundo tramo indican un grado de meteorización mayor y/o cambios litológicos en los depósitos terciarios, mientras que el aumento gradual de velocidades con la profundidad en el segundo tramo puede ser debido a un aumento de la compactación o a cambios litológicos graduales. El tercer tramo se ha interpretado como materiales Paleozoicos Estefanienses. La diferencia de velocidad entre los materiales de la base del Terciario y el Estefaniense no es muy alta, sin embargo a 180 metros de profundidad se encuentra un gradiente ligeramente mayor del que presentan ambas formaciones por separado, lo que ha permitido diferenciarlas. Por debajo del Estefaniense aparece una zona de altas velocidades que por estar sujeta a una información ambigua e incompleta no se tiene en cuenta.

La interpretación geológica final del modelo de velocidades es que la formación de edad terciaria con potencias de entre 180 metros al suroeste y 190 al noreste se apoya horizontalmente sobre el sustrato Estefaniense dentro del cual que se han alcanzado profundidades máximas del mismo de 280 metros en prácticamente todo el perfil excepto en el noreste donde se ha alcanzado hasta 225 metros de profundidad (Fig. 24).

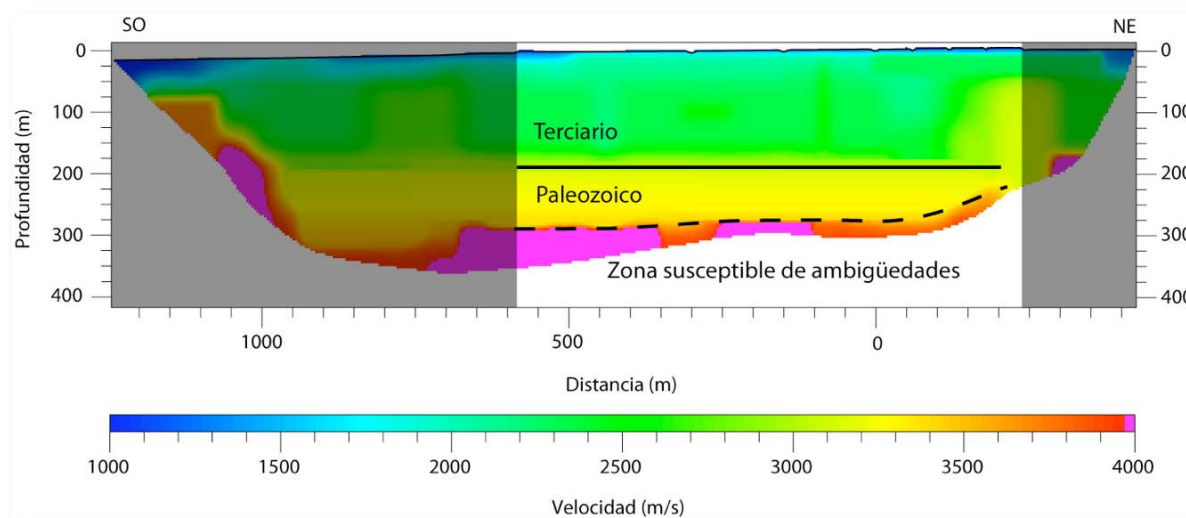


Figura 24. Interpretación del modelo de velocidades. Escala horizontal igual a es vertical.

DESCRIPCIÓN E INTERPRETACIÓN DEL PERFIL SÍSMICO BIERZO 1

El perfil de reflexión Bierzo-1, aunque fue registrado hasta 5 s TWT, muestra un imagen sísmica con buena reflectividad y una resolución aceptable solo hasta 3 s TWT, aproximadamente (Fig. 25). En la parte más superficial, hasta 0,6-0,7 s TWT, la imagen sísmica muestra muy buena resolución, con numerosos reflectores que presentan una gran continuidad lateral. En esta parte superficial se pueden diferenciar muy claramente dos conjuntos: un primer paquete de reflectores muy continuos que llegan hasta 0,35 s TWT, con una disposición subhorizontal a ligeramente inclinados hacia el E, por debajo del cual aparece un segundo conjunto en discordancia angular, perfectamente observable entre los CDPs 800 y 1400. Al E y O de esta zona, el conjunto inferior dibuja un suave sinclinal y anticlinal, respectivamente, y la reflectividad en ambos conjuntos se disponen más paralelamente. Como veremos a continuación, este conjunto inferior debe corresponder a los materiales estefanienses situados en discordancia angular por debajo del conjunto superior que debe corresponder a los materiales terciarios.

A profundidades intermedias del perfil, entre 0,7-1,5 s, la resolución de la imagen sísmica es menor probablemente debido, en gran parte, a las dificultades para eliminar el “ground roll” en el procesado, por la configuración del dispositivo de

adquisición, y quizás también a la complejidad geológica de la zona. No obstante, a mayores profundidades aparecen algunos eventos muy notables. Así, a una profundidad de 1,4-1,6 s TWT, aparece una banda reflectiva muy marcada, ligeramente curvada, que se sigue muy bien entre los CDPs 850 a 1400. A mayor profundidad, entre 2,1 y 2,7 s, TWT, aparecen también unas bandas reflectivas muy marcadas, con cierta oblicuidad entre ellas, que se siguen a través de todo el perfil con una ligera inclinación de O (2,1-2,5 s TWT) a E (2,5-2,7 s). Estos reflectores profundos deben corresponder a estructuras profundas en el basamento y, aunque su interpretación puede ser de gran interés para el conocimiento de la estructura geológica de la zona, no va a ser abordada aquí por salirse de los objetivos del presente proyecto.

En lo que sigue nos centraremos en la interpretación de la parte más superficial, hasta 1s TWT aproximadamente, que cubre las profundidades de interés para el este proyecto. Además, esto nos permitirá integrar la interpretación del perfil Bierzo-1 con la de los perfiles previos existentes e la zona que abarcan solamente este rango de profundidades

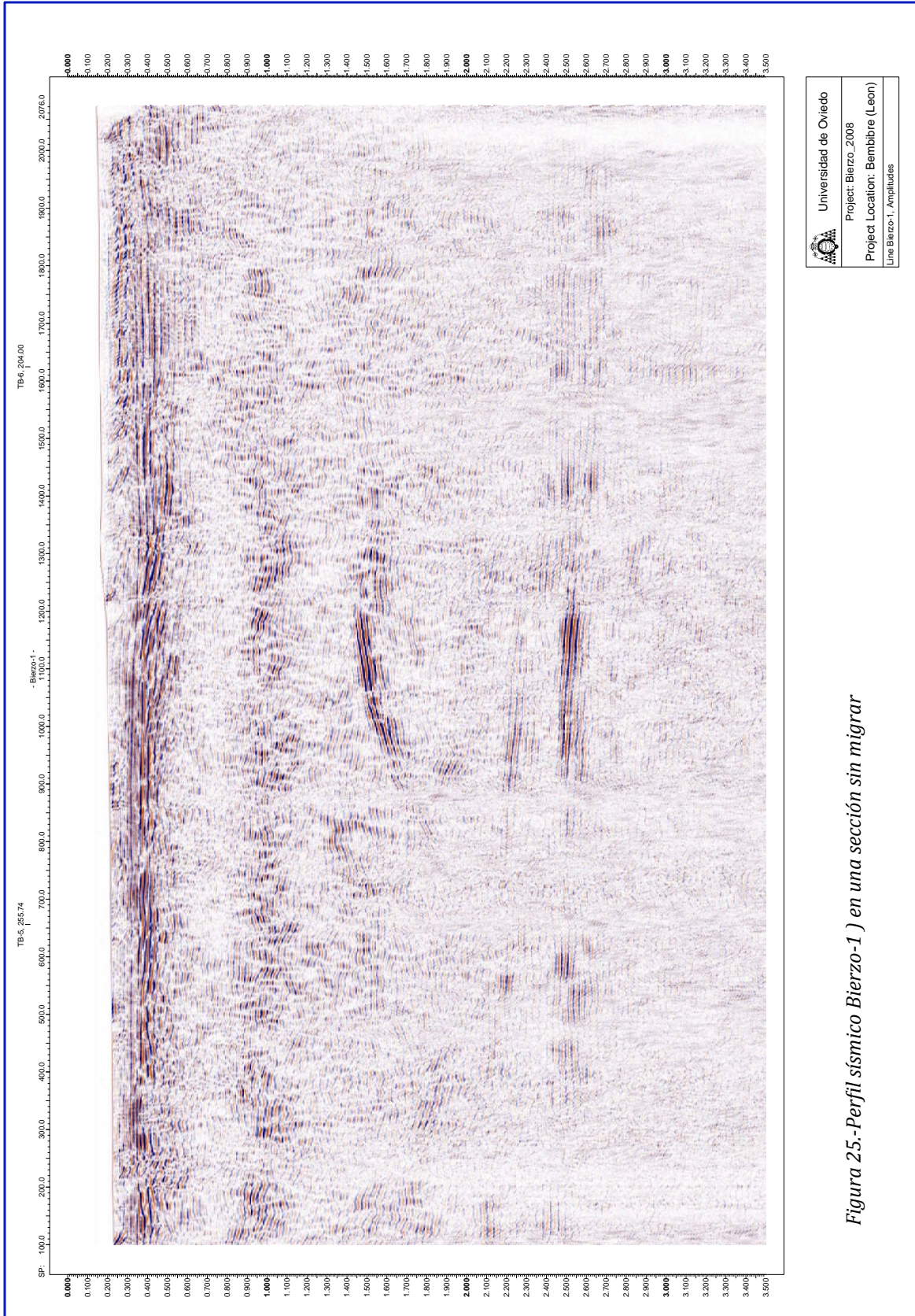


Figura 25.-Perfil sísmico Bierzo-1) en una sección sin migrar

pulgar@FIA.IGMVA352C
02/02/09 17:10:32

INTERPRETACIÓN DEL PERFIL SÍSMICO BIERZO-1

La imagen sísmica del perfil en la zona de interés se muestra con mayor detalle en la Fig. 26A y su interpretación en la Fig. 26B. En esta figura se aprecia perfectamente que la imagen sísmica presenta una excelente resolución hasta 0,5 s TWT, en la parte O y hasta 0,7 s TWT en la parte E. La parte superior se caracteriza por una reflectividad subhorizontal muy regular que es más discontinua en la parte superficial y con reflectores de gran continuidad lateral entre 0,25 y 0,35 s TWT, en la parte O, y entre 0,3 y 0,4, en la parte E del perfil. Esta parte superior se puede interpretar como correspondiente a los materiales terciarios, donde se pueden distinguir, a su vez, dos partes con fábrica sísmica diferente.

Este conjunto superior reposa discordante sobre un conjunto inferior plegado, con un suave anticlinal al O y un sinclinal al E, que se puede interpretar como correspondiente a los materiales estefanienses. La discordancia angular se observa muy bien en el flanco entre estos dos pliegues (entre los CDPs 800 a 1400), mientras que en su zona de charnela, dado lo abierto de los pliegues, los reflectores terciarios y estefanienses son subparalelos. En la parte más occidental, entre los CDPs 150 y 300, aparece el otro flanco del anticlinal y vuelve a observarse mejor la discordancia angular. Prolongado los reflectores de la zona central se puede extender la interpretación hacia las zonas más profundas, donde la resolución de la imagen sísmica es peor.

Utilizando los datos de geología de superficie y los sondeos antiguos disponibles (IGME, 1984) se ha ensayado una interpretación en términos de los paquetes o tramos diferenciados en el Estefaniense, tal como se puede ver en la Fig. 27. Siguiendo la terminología del estudios del IGME

(1984) se han tratado de interpretar los reflectores que podrían corresponder al techo de los tramos Chuchú-Navaleo, Torre y Sarita (Fig. 27), por correlación con los datos de los sondeos TB-7, TB-8 y TB-10 (Fig. 28)

En esta imagen sísmica no es posible distinguir la base del conjunto Estefaniense y en esta interpretación se ha trazado una posición tentativa de ésta en base a los espesores reconocidos en la zona, con un cierto grado de incertidumbre. En todo caso, el límite marcado debe tomarse como la profundidad mínima de los materiales estefanienses.

Como se puede ver en estas figuras, la imagen sísmica obtenida muestra una secuencia terciaria ligeramente buzante hacia el E, con espesores sísmicos que varían de O a E entre 0,12 y 0,22 s, aproximadamente. Los materiales terciarios dibujan un suave sinclinal con su núcleo situado en la parte E del perfil (Fig. 27).

Por debajo del Terciario aparecen los materiales estefanienses suavemente plegados, dibujando un sinclinal al E y un anticlinal al O. El contacto con los materiales terciarios suprayacentes es una discordancia angular que es observable sobre todo en la zona del flanco entre ambos pliegues. Aunque, como se ha dicho, no se observa ningún evento que pueda ser identificado como la base de la serie Estefaniense, en la interpretación se ha señalado una posición posible de este contacto que nos daría, en todo caso, un profundidad mínima de la cuenca Estefaniense. De acuerdo con esta interpretación, los materiales estefanienses alcanzarían una profundidad mínima de 0,65 s, en la parte O, llegando a 1 s de profundidad en la parte E.

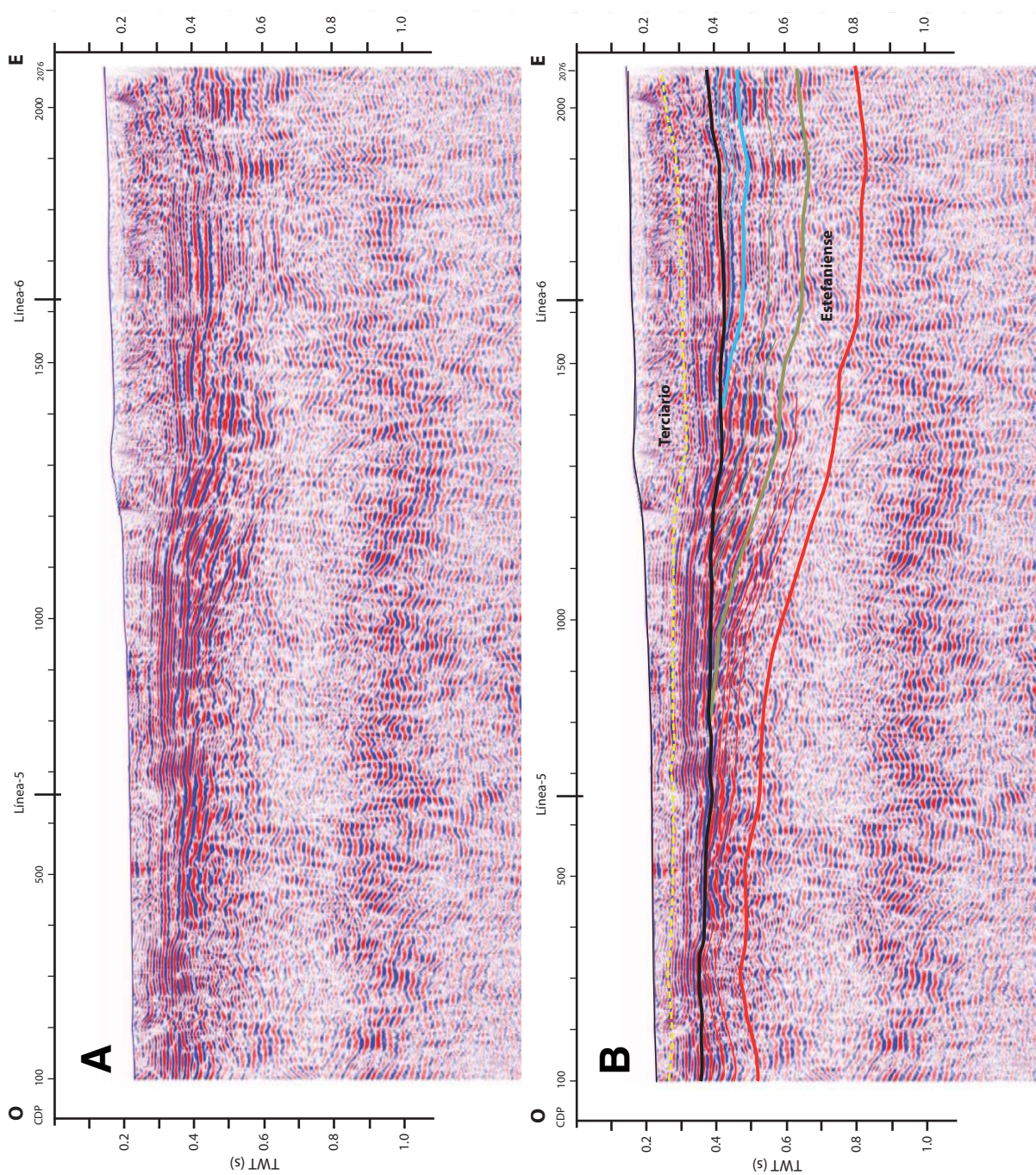


Figura 26.- Detalle del sector superficial del perfil sísmico Bierzo-1 (A) y su interpretación (B)

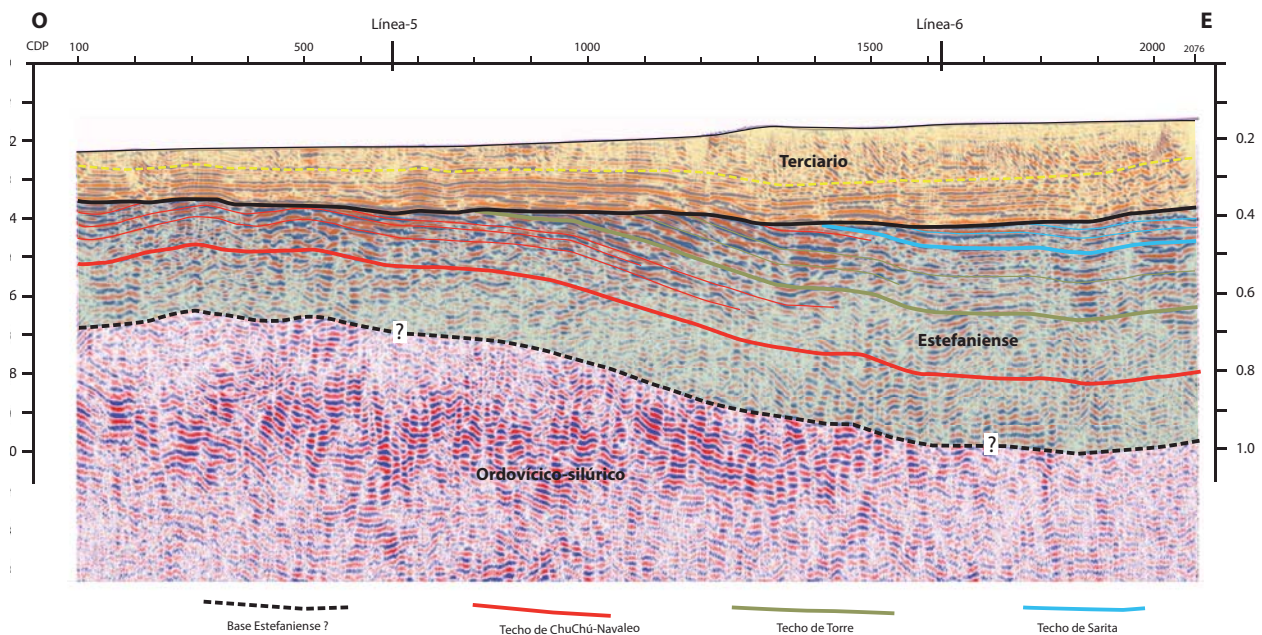


Figura 27.- Interpretación del perfil sísmico Bierzo-1, diferenciando los materiales terciarios y estefanienses y señalando dentro de éstos la posición de algunos tramos

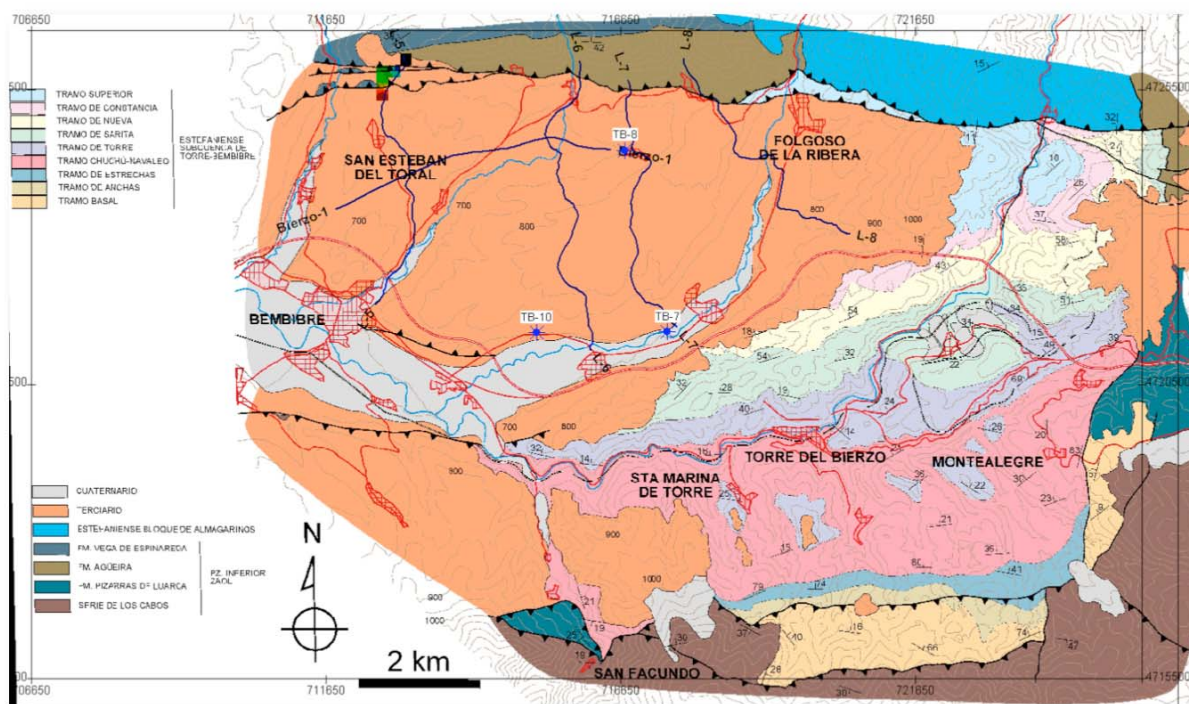


Figura 28.- Mapa geológico de la cuenca Estefaniense de Bembibre mostrando la posición del perfil sísmico Bierzo-1 y de los perfiles CGG, líneas L-5 a L-8, así como los sondeos TB-7, TB-8 y TB-10, utilizados en la interpretación.

INTERPRETACIÓN 3D

Utilizando el programa “KINGDOM Software” se ha realizado una interpretación conjunta del perfil Bierzo-1 y de los cuatro perfiles de sismica de reflexión adquiridos por CGG para el IGME en 1980 (líneas L-5 a L-8), utilizando también la información suministrada por los sondeos realizados en el estudio de la cuenca del Bierzo realizado por ENADINSA para el IGME en 1980 (Fig. 28). Estos perfiles, a pesar de ser adquiridos hace ya muchos años, presentan una calidad muy buena, con una resolución más que aceptable hasta los 0,6-0,7 s TWT.

Aunque, el perfil Bierzo-1 se intersecta solamente con los perfiles L-5 y L-6, se ha tratado de correlacionar las interpretaciones con las otras dos líneas para obtener una imagen sísmica 3D de todo el sector de la cuenca cubierto por los perfiles sísmicos. Esto nos permite contrastar las interpretaciones, sobre todo en las partes de cada perfil donde la imagen sísmica es más deficiente, y obtener una imagen en tres dimensiones de la cuenca terciaria y de los materiales estefanienses subyacentes. A partir de la interpretación de este conjunto de perfiles se pueden obtener mapas de profundidad en tiempos que, como veremos posteriormente, pueden ser convertidos a mapas de profundidades de los distintos horizontes diferenciados. Igualmente, a partir la interpretación en tiempos se puede realizar también una conversión a profundidades para obtener cortes geológicos a lo largo del trazado de los perfiles sísmicos.

INTERPRETACIÓN DE LAS LÍNEAS CGG

La interpretación de los perfiles CGG (L-5 a L-8) se muestra en las Figs. 29 y 30. Los perfiles L-5, L-6 y L-7 tienen un trazado aproximadamente N-S, mientras que el perfil L-8 tiene un trazado NO-SE (Fig. 28). La imagen sísmica que nos ofrece estos

perfiles es similar a la ya vista con el perfil Bierzo-1, con la salvedad de la diferente orientación de los mismos. En los perfiles L-5, L-6 y L-7 se puede distinguir perfectamente la discordancia basal del Terciario, visible sobre todo en la parte N de los mismos, donde el Estefaniense presenta un buzamiento mayor (Figs. 28 y 29). En la parte central y meridional de los perfiles hay un mayor paralelismo entre los reflectores terciarios y estefanienses y la discordancia es menos aparente, aunque el contacto basal del Terciario puede trazarse sin mayores dificultades. En el perfil L-8, el paralelismo aparente entre Terciario y Estefaniense, por la diferente orientación de este perfil, hace que la discordancia no sea evidente, siendo la diferente fábrica sísmica el mejor criterio para separar los materiales terciarios y estefanienses (Fig. 30).

Para los materiales estefanienses, estos perfiles sólo muestran una buena resolución en la parte superior, mientras que la imagen sísmica se degrada rápidamente en profundidad. En todo caso, se ha realizado una interpretación de los tramos Sarita, Torre y Chuuch, partiendo de la realizada para el perfil Bierzo-1, que tiene un mejor calidad en esta parte.

En la estructura de los materiales estefanienses cabe destacar la presencia de algunos pliegues, que en algunos puntos aparecen cortados por cabalgamientos fuertemente inclinados al N. Aunque, a este nivel, la resolución de los perfiles no es suficientemente buena, lo que dificulta una interpretación de detalle, parecen fallas con un desplazamiento bastante bajo (Figs. 29 y 30). En general estas fallas parecen afectar solamente a la parte basal de los materiales terciarios, donde en ocasiones acaban con una flexión más o menos pronunciada en los mismos. La correlación de estas fallas de unos perfiles a otros permite

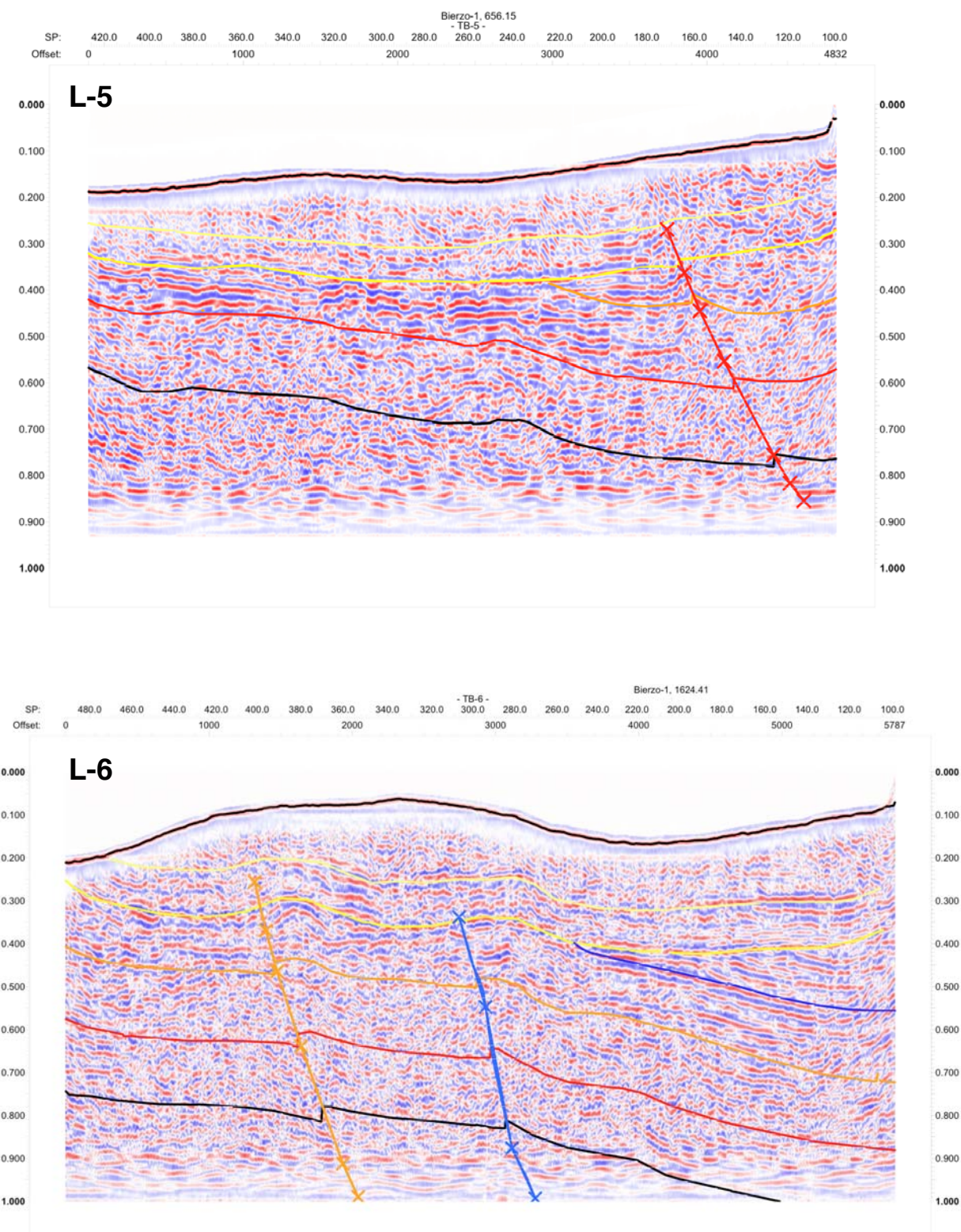


Figura 29.- Imagen de la interpretación de los perfiles sísmicos L-5 y L-6 realizada con KINGDOM software. Los colores corresponden a los mismos horizontes de la figura 3.

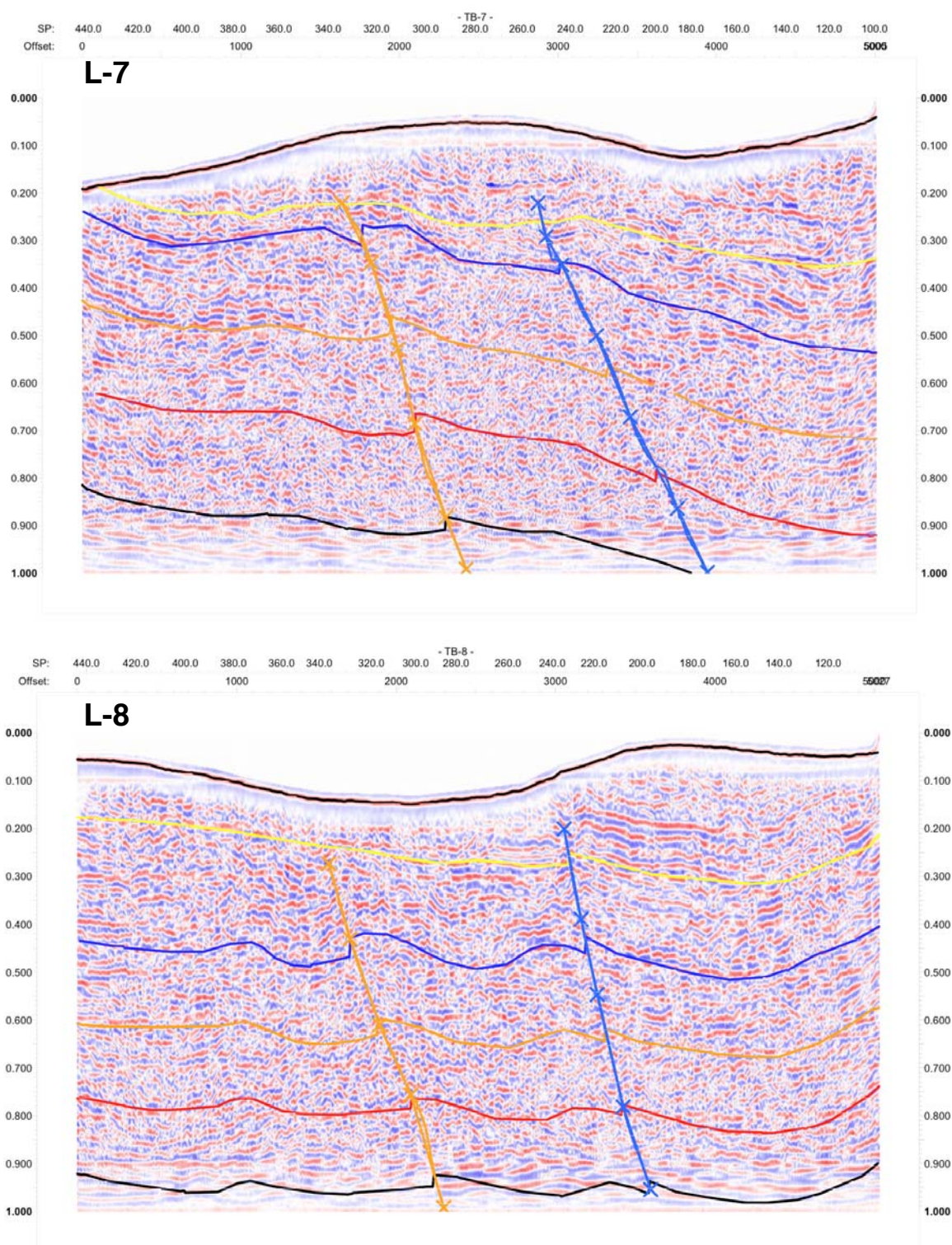


Figura 30.- Imagen de la interpretación de los perfiles sísmicos L-7 y L-8 realizada con KINGDOM software. Los colores corresponden a los mismos horizontes de la figura 3.

obtener el trazado cartográfico de estas estructuras bajo los sedimentos terciarios más recientes (Fig. 31).

Otra característica destacable en estos perfiles es que, de O a E, van apareciendo materiales más altos en la serie estefaniense, reflejando la inclinación general hacia en NE de estos materiales.

MAPAS DE PROFUNDIDAD EN TIEMPO

Utilizando las cinco líneas sísmicas disponibles se han obtenido mapas de contornos TWT para cada uno de los horizontes interpretados. Por simplicidad, en estos mapas se ha prescindido de las fallas inversas presentes en algunos de los perfiles; además, dado su pequeño desplazamiento, no alterarían significativamente los mapas resultantes.

La malla de datos ofrecidos por estos perfiles no es muy densa, por lo que es difícil evitar que se

generen algunos artefactos durante las interpolaciones que efectúan los algoritmos de generación de las isolíneas de KINGDOM. Estos mapas deben ser tomados, por tanto, con la debida cautela y deberían ser contrastados y complementados con más perfiles sísmicos o con otros datos geofísicos o geológicos. En todo caso, son los datos en 3D que se pueden obtener con la información disponible hasta en momento y pueden ser muy útiles como una primera aproximación.

En la figura 32 se muestra el mapa de profundidades TWT (s) de la discordancia basal del terciario. Se puede observar que la profundidad máxima se sitúa en la zona de San Esteban del Toral, donde parece dibujarse un suave sinclinal de dirección NE-SO, similar a la de los cabalgamientos descritos anteriormente y a la del borde cartográfico meridional de esta cuenca. Este sinclinal parece cortado por el cabalgamiento que limita la cuenca por el N, donde los materiales terciarios parecen levantarse para inclinarse hacia

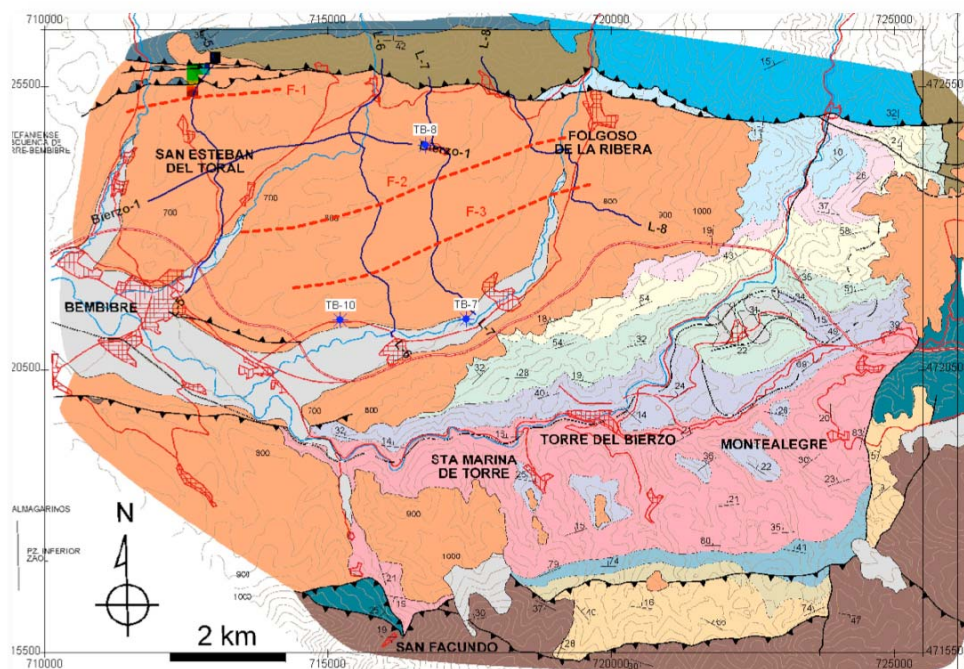


Figura 31.- Trazado cartográfico de los cabalgamientos vergentes al S interpretados en los perfiles sísmicos.

el S. Todo ello evidencia el juego alpino de este cabalgamiento.

En las figuras siguientes se muestran los mapas de profundidades TWT para los horizontes diferenciados dentro del estefanienses que son los techos de los tramos Sarita (Fig. 33), Torre (Fig. 34) y Chuchú (Fig. 35) y para el horizonte asignado tentativamente a la base del Estefaniense (Fig. 36). Si se compara estos mapas con el de la figura 32, se puede ver que, mientras los materiales terciarios muestran una inclinación general hacia el NO, los materiales estefanienses se inclinan hacia el NE. Esta disposición de los materiales estefanienses parece apuntar a una estructuración en dirección NO-SE, totalmente oblicua a la dirección del cabalgamiento que limita la cuenca por el N, sugiriendo una vez un origen alpino para esta estructura.

Dado que la discordancia basal del Terciario va biselando los tramos estefanienses, los paquetes

superiores solo aparecen en la parte E de la cuenca, tal como se puede observar también en el mapa geológico. Así, el mapa de la figura 33 nos muestra la extensión de los materiales situados por encima del tramo Sarita, restringido solamente a la parte mas oriental de la cuenca, igual que la figura 34 nos mostraría la extensión hacia el O del tramos Sarita y así sucesivamente.

Como se puede observar en la figuras 36, la zona de menor profundidad de la base de los materiales estefanienses se sitúa entre San Esteban del Toral y Bembibre, coincidiendo, tal como se ha visto en el perfil Bierzo-1, con una zona anticlinal, que no se dibuja bien en estos mapas por situarse en el borde de la zona con datos.

Estos mapas se pueden visualizar y analizar como superficies en un modelo 3D utilizando el módulo VuPAK de KINGDOM, que permite visualizar superficies conjuntamente con las líneas sísmicas (Figs. 37 a 40).

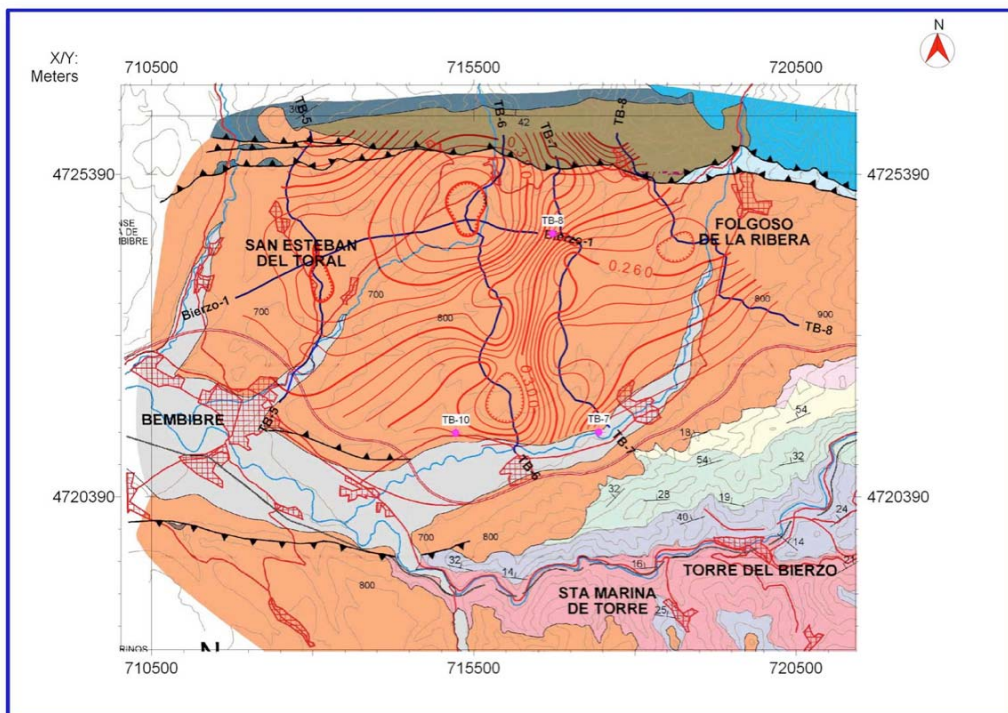


Figura 32.- Mapa de profundidades en tiempo (seg) de la discordancia basal del Terciario

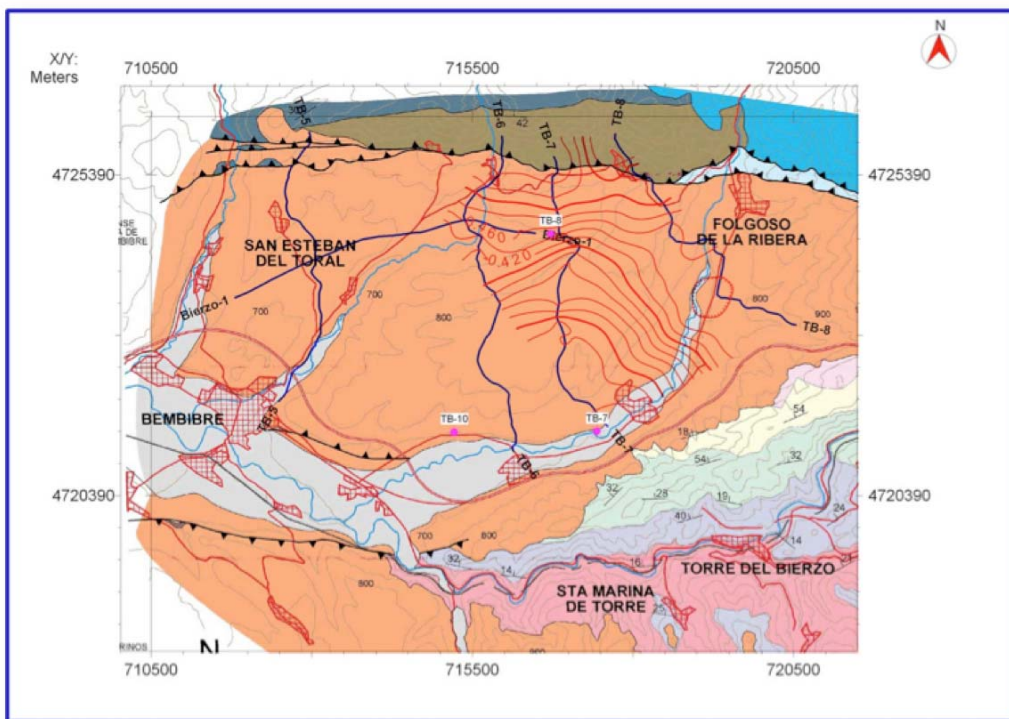


Figura 33.- Mapa de profundidades en tiempo (seg) del techo del tramo Sarita

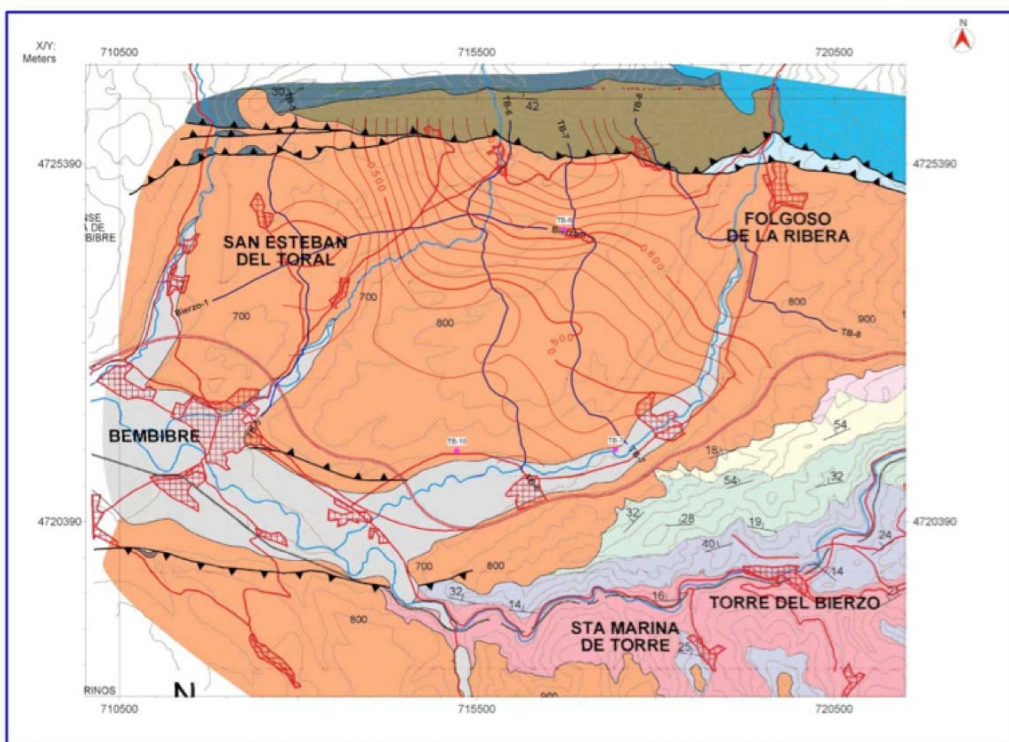


Figura 34.- Mapa de profundidades en tiempo (seg) del techo del tramo Torre

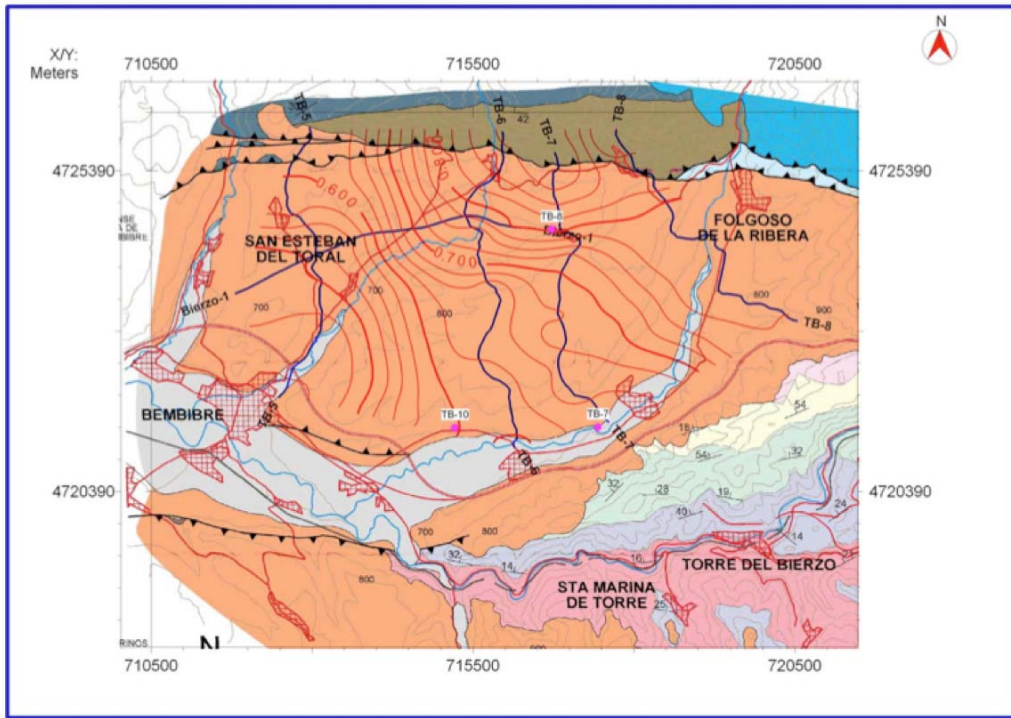


Figura 35.- Mapa de profundidades en tiempo (seg) del techo del tramo Chuchú-Navaleo.

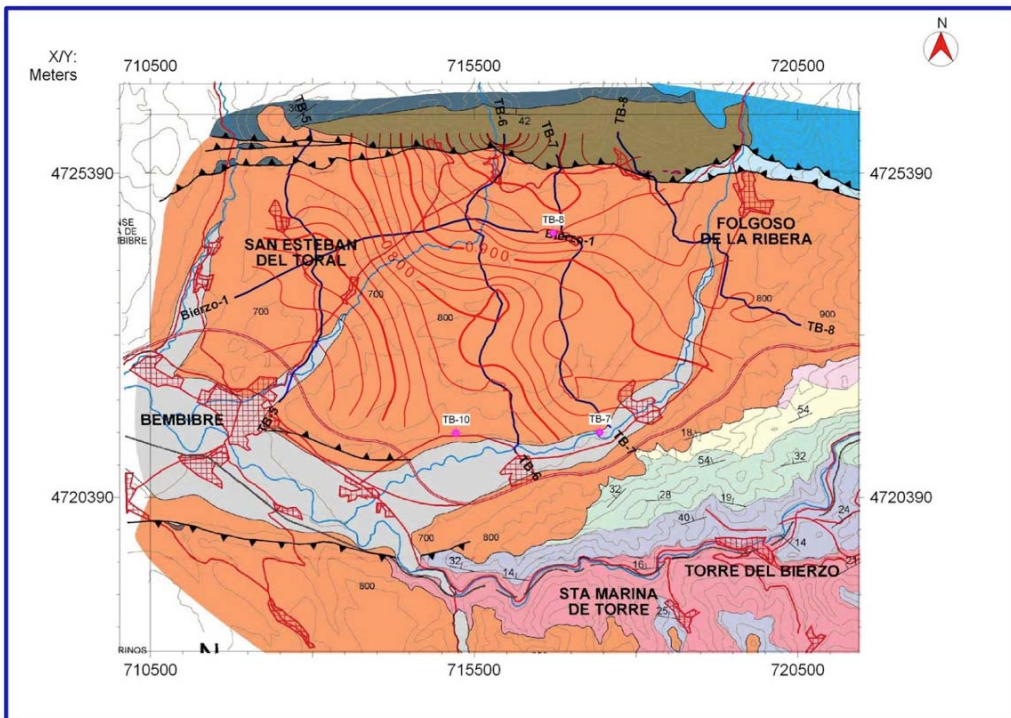


Figura 36.- Mapa de profundidades en tiempo (seg) de la base (?) de la serie Estefaniense.

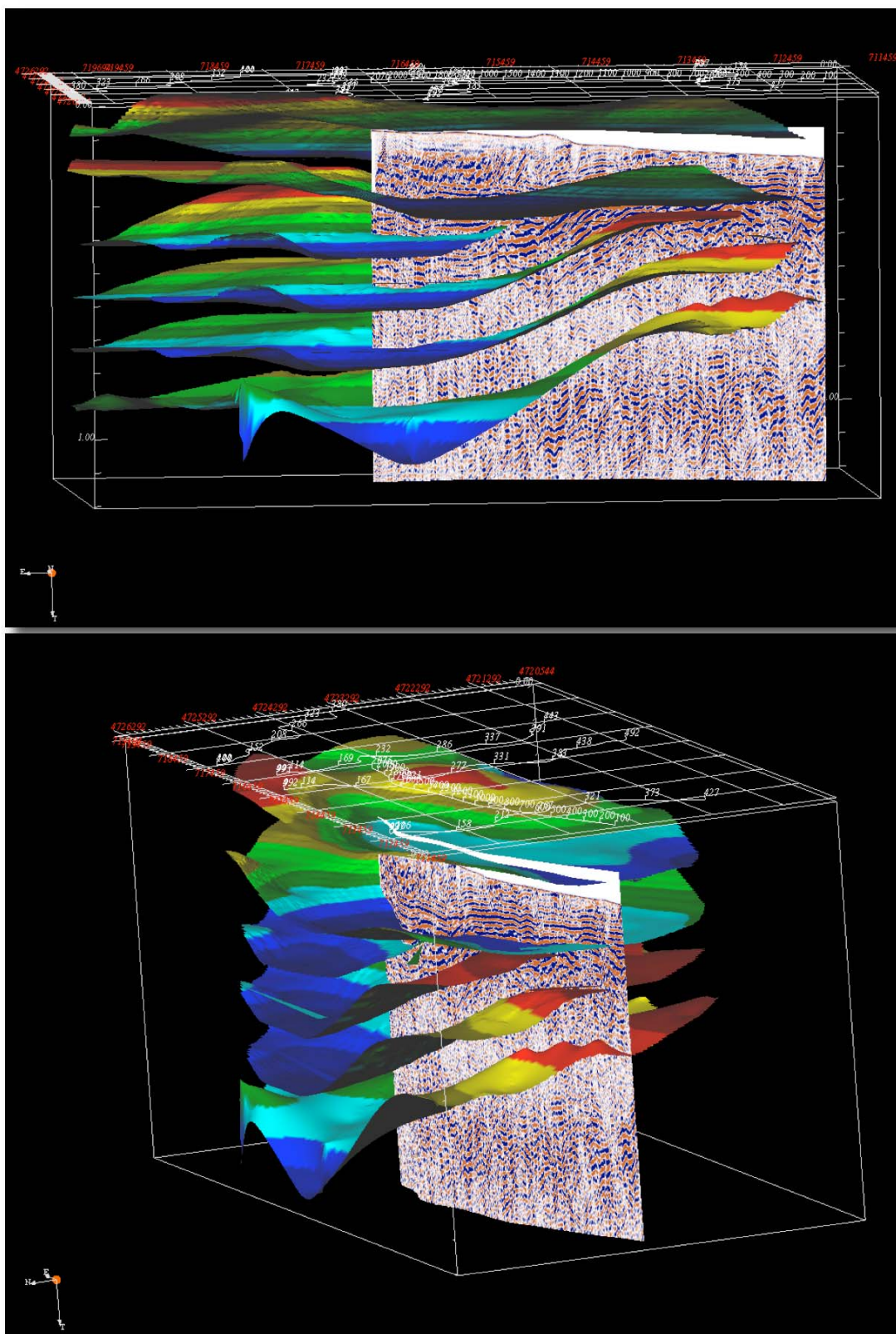


Figura 37.- Visualización 3D de las superficies generadas y de la línea sísmica Bierzo-1; De arriba a abajo, las superficies tiempo son: topografía, base del Terciario, Techo Tramos Sarita, Torre y Chuchú y base del Estefaniense. Arriba, vista hacia el S; abajo, vista hacia el SE

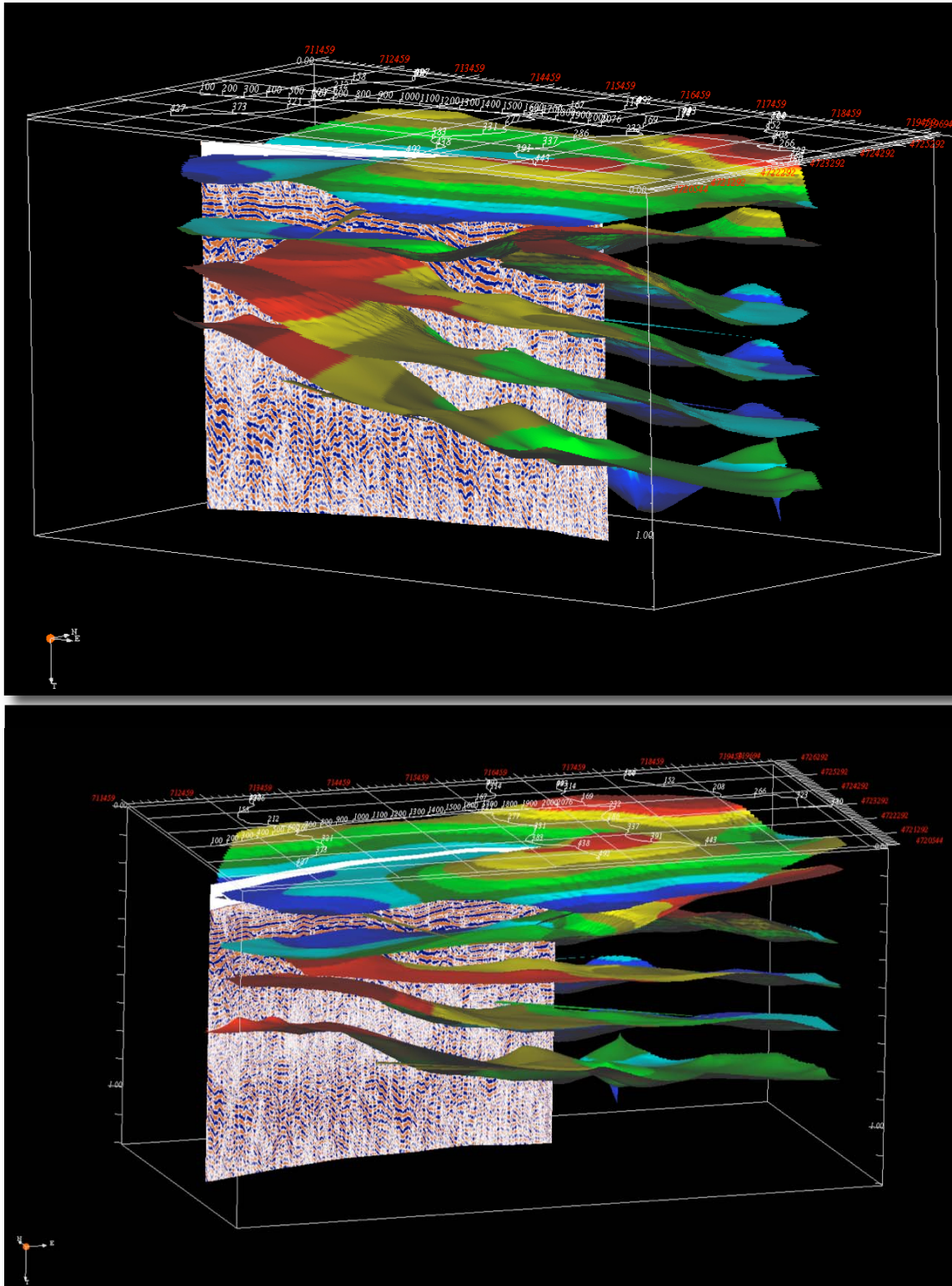


Figura 38.- Visualización 3D de las superficies generadas y de la línea sísmica Bierzo-1.; De arriba a abajo, las superficies tiempo son las siguientes: topografía, base del Terciario, Techo de los tramos Sarita, Torre Chuchú y base del Estefaniense. Arriba, vista hacia el NO; abajo, vista hacia el N.

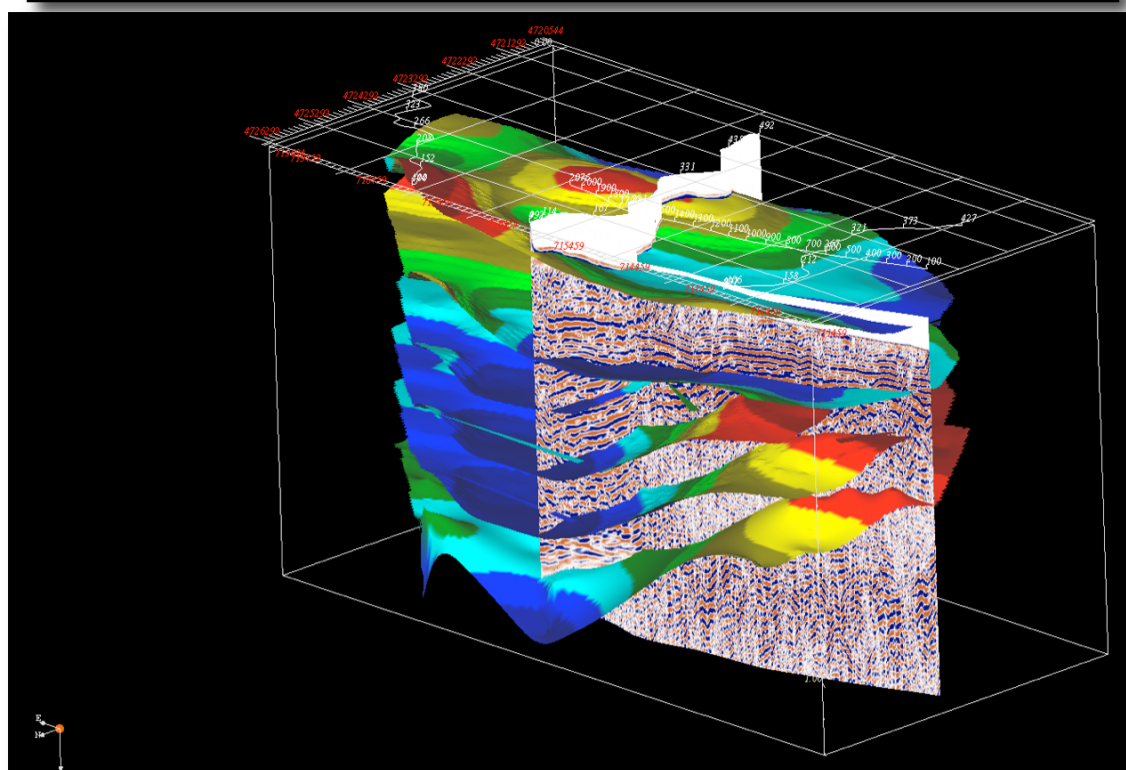
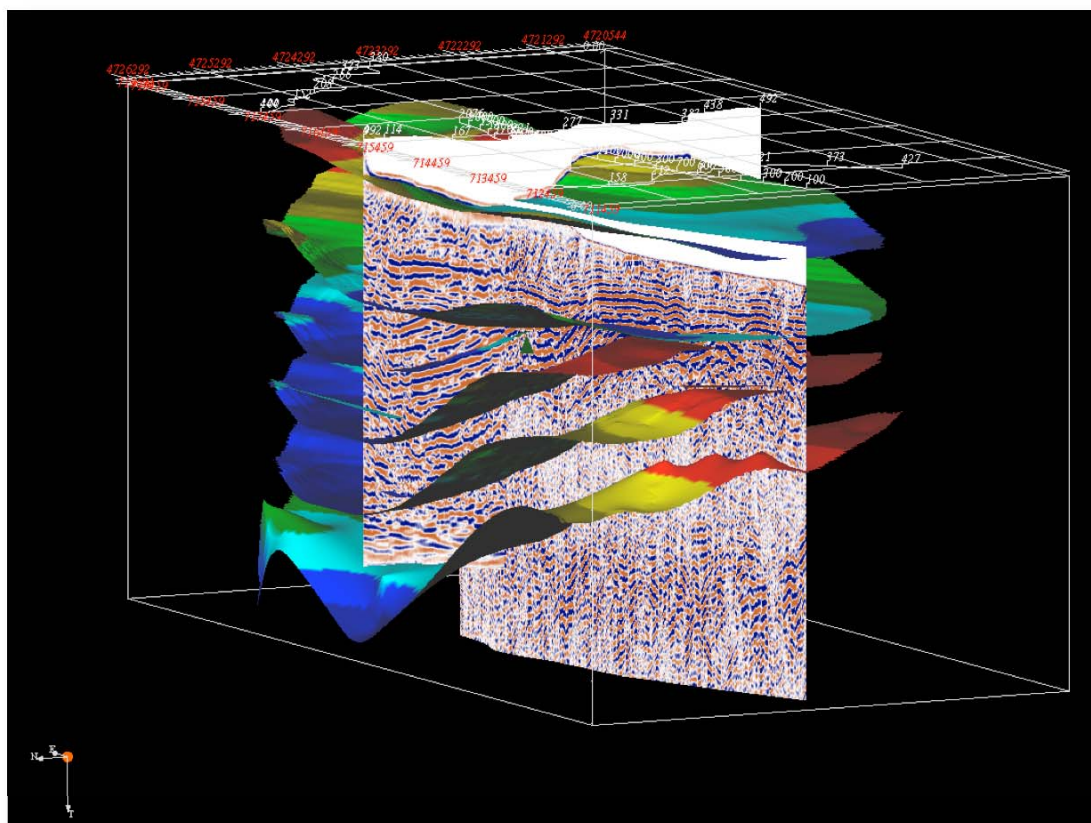


Figura 39.- Visualización 3D de las superficies generadas y de las líneas sísmicas Bierzo-1 y L-6.; De arriba a abajo, las superficies tiempo son las siguientes: topografía, base del Terciario, Techo de los tramos Sarita, Torre y Chuchú y base del Estefaniense. En ambos casos, vista hacia el SO.

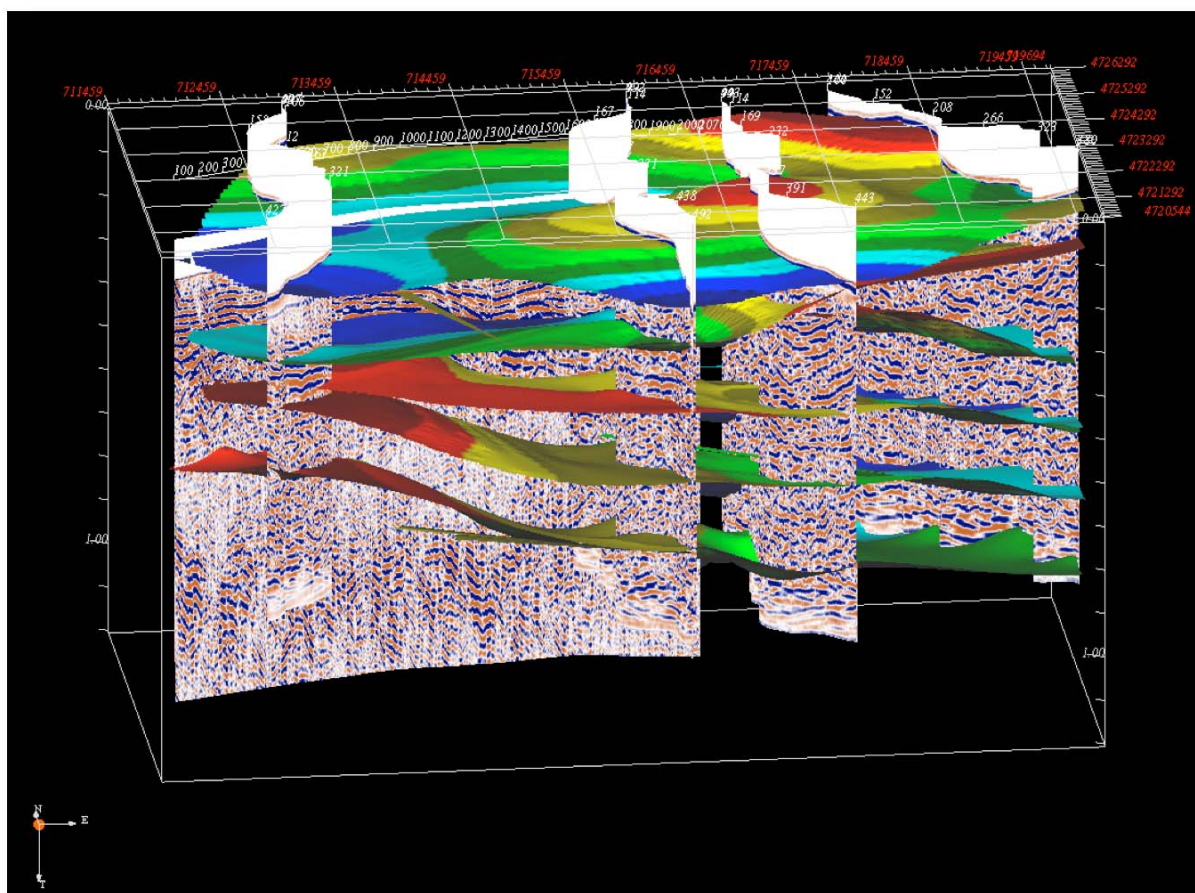


Figura 40.- Visualización 3D de las superficies generadas y de todas líneas sísmicas utilizadas en la interpretación, De arriba a abajo, las superficies tiempo son las siguientes: topografía, base del Terciario, Techo de los tramos Sarita, Torre y Chuchú y base del Estefaniense. En ambos casos, vista hacia el SO.

En estas figuras se puede visualizar los rasgos estructurales, ya comentados anteriormente, como la suave inclinación general de los materiales terciarios hacia el NO, que se sitúan discordantes sobre los materiales estefanienses, cuya inclinación general es hacia el NE.

Estos mapas y modelos 3D de las profundidades TWT nos permiten obtener una visión general de los rasgos estructurales mayores de la cuenca pero, para obtener un modelo geológico que se pueden integrar con otros estudios, se requiere abordar una conversión de

tiempo a profundidades de los horizontes interpretados sobre las líneas sísmicas.

CONVERSIÓN DE TIEMPO A PROFUNDIDAD

Como es bien sabido, la conversión de tiempo a profundidad requiere disponer de un modelo de velocidades sísmicas para los materiales de la zona. Si se quiere obtener un modelo geológico 3D preciso se necesitaría también un modelo de velocidades 3D, lo que requeriría numerosos puntos de control geológico por medio de sondeos, para obtener un mapa detallado de velocidades

para cada tramo. Al no disponer de estos puntos de calibración hemos utilizado simplemente un tabla tiempo-profundidad para toda la zona. Esta aproximación supone algunas limitaciones sobre la precisión del modelo final. Un primer problema es que, al manejar unos valores constantes, no se tiene en cuenta las posibles variaciones estratigráficas y estructurales en la zona; otra dificultad es cómo elegir los valores asignados en la tabla T-P. En nuestro caso se han utilizado los datos de control disponibles que básicamente eran la correlación con los dos sondeos (TB-7 y TB-8), situados sobre o próximos a alguna línea sísmica, y los valores de velocidad obtenidos en el perfil de refracción realizado, para las partes más superficiales. La tabla de tiempos-profundidades obtenida y utilizada para la conversión a profundidad es la mostrada en la figura 41.

En lo que sigue, todas las profundidades están referidas a profundidades bajo la superficie

topográfica y no a cotas absolutas, por ser el dato más interesante para los objetivos generales del proyecto.

Utilizando esta tabla T-P y los sondeos disponibles se ha podido convertir las secciones sísmicas interpretadas en cortes geológicos a lo largo de las trazas de los perfiles, tal como se muestra en la figura 42. Hay que tener en cuenta, sin embargo, que como se trabaja con profundidades bajo la superficie del terreno y estos cortes están referidos a una superficie topográfica plana, para disponer de unos verdaderos cortes geológicos habría que introducir la topografía que, aunque es muy suave, introduciría algunas variaciones sobre los cortes de la figura 42.

En estos cortes se han diferenciado los materiales terciarios y los tramos intraestefanienses Sarita (S), Torre (Tr) y Chuchú (Chu). Por encima del tramo Sarita aparecen sin

Prof (m)	T (s)
-34	0,209
-151	0,311
-209	0,354
-273	0,394
-290	0,403
-328	0,426
-628	0,597
-928	0,760
-1228	0,917

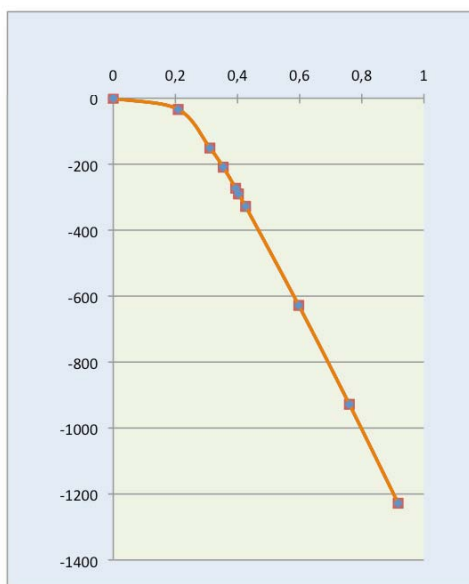


Figura 41.- Tabla tiempo-profundidad utilizada para la conversión a profundidad.

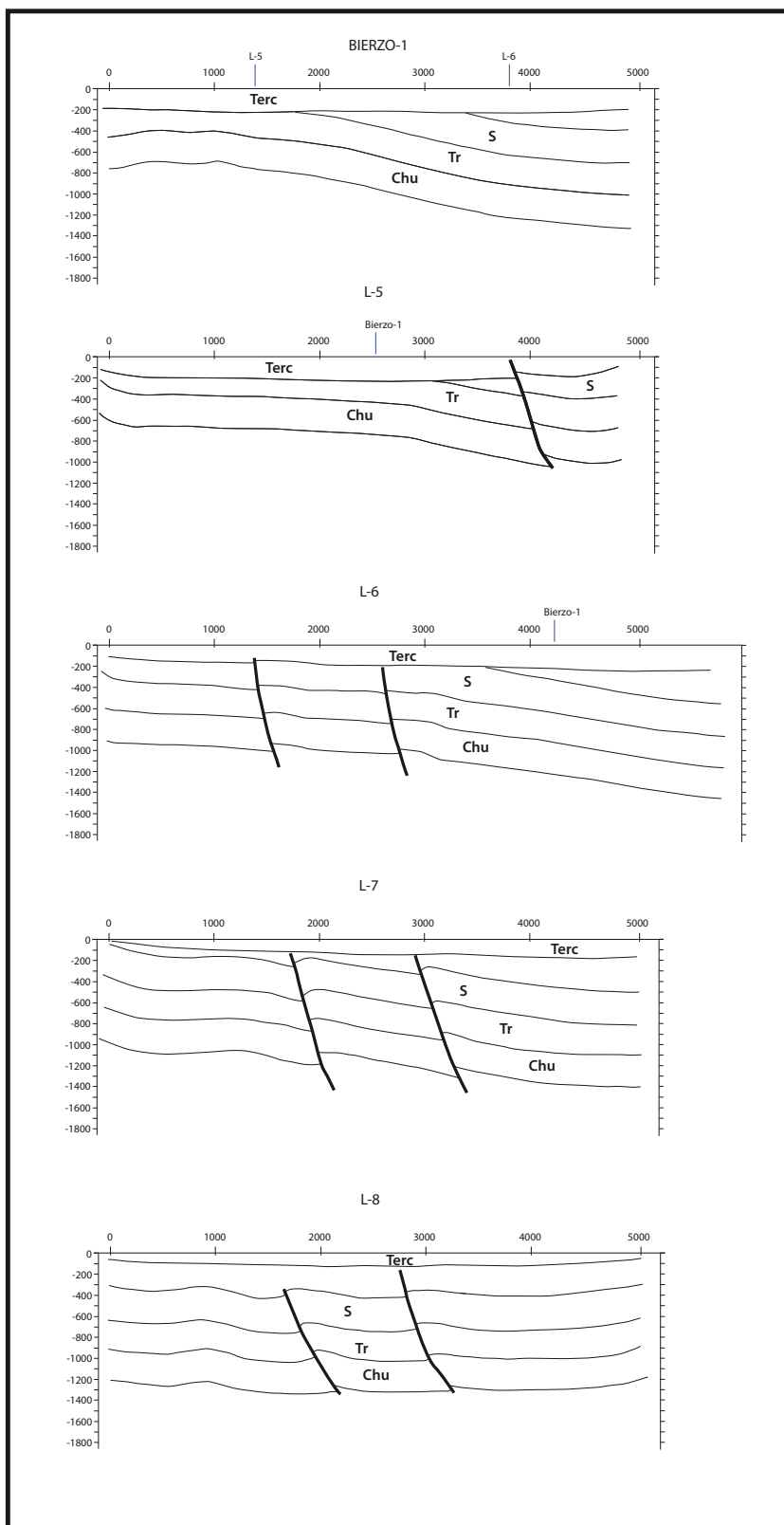


Figura 42.- Cortes geológicos a lo largo de las trazas de los perfiles sísmicos obtenidos después de la conversión a profundidad de distintos los horizontes interpretados.

diferenciar materiales de los tramos superiores (Nueva y Constancia). El tramo señalado en los cortes como Chuchú (Chu) incluiría los materiales propiamente de este tramo y los tramos basales del Estefaniense, aunque, como ya se comentó anteriormente, la discordancia basal de la cuenca estefaniense no se distingue en los perfiles sísmicos. Esto significa que este límite basal de la serie estefaniense debe ser tomado con cautela como una profundidad mínima.

El corte según el perfil Bierzo-1 tiene un trazado de dirección ENE-OSO, mientras que los otros perfiles son aproximadamente perpendiculares a éste. En este corte se observa un a serie terciaria subhorizontal, con un espesor medio de unos 200 m, que se levanta ligeramente hacia los bordes. Los materiales terciarios se sitúan discordantemente sobre los estefanienses que dibujan un anticlinal cuya traza se sitúa próxima a la intersección de la línea L-5, en la zona de San Esteban del Toral. La profundidad de la base del Estefaniense varía entre unos 700 m en esta zona hasta unos 1300 m en el otro extremo del perfil (Fig. 42).

Los cortes L-5, L-6 y L-7 muestran un Terciario con una ligera inclinación hacia el N, que se levanta hacia los borde S y N de la cuenca. El espesor de estos materiales disminuye de O a E, pasando máximo de unos 220 m en L-5 a unos 150m en L-7. Los materiales estefanienses se disponen con una inclinación general hacia el N que es muy suave en la mitad S de los cortes y se hace más pronunciada en la parte N (Fig. 42). Estos materiales están cortados por algunas fallas inversas fuertemente inclinadas al N que parecen llevar algunos pliegues asociados. Estas fallas parecen afectar en algunos casos a los materiales terciarios que aparecen desplazados o levantados ligeramente.

El corte mas oriental, L-8, con una orientación ligeramente diferente, muestra también una estructura ligeramente diferente. En él los materiales estefanienses muestran una disposición

general subhorizontal con pliegues suaves, algunos en relación con las fallas inversas (Fig. 42).

MAPAS DE ISÓBATAS

Utilizando los datos de estos cortes, así como los sondeos disponibles, el perfil de refracción y el control de la geología de superficie en los bordes de la cuenca terciaria, se han realizado mapas de isóbatas para los horizontes diferenciados (Figs 43 a 47). Estos mapas se han construido por conversión a profundidad con KINGDOM de los mapas de tiempo, utilizando la tabla T-D antes descrita, y han sido calibrados y extendidos con los datos de los sondeos y la información geológica de superficie.

La distribución de profundidades de los materiales terciarios se muestra en la figura 43. Esencialmente, la cuenca terciaria dibuja un amplio sinclinal cuya traza se orienta en dirección NE-SO, en la zona de San Esteban del Toral, para pasar a una O-E, en la parte más oriental. Esta estructuración parece controlada básicamente por los cabalgamientos que limitan la cuenca por el N (Fig. 43). La discordancia basal terciaria se levanta bruscamente en la zona al E de Bembibre, donde aparece un pequeño afloramiento de materiales estefanienses, por efecto de un cabalgamiento alpino trazado en el mapa geológico. Este cabalgamiento debe prolongarse hacia el E, por debajo de los materiales aluviales del río Boeza (Fig. 43).

En la figura 44 se muestra el mapa de profundidades de la superficie de techo del tramo de Sarita. Como se puede ver, este contacto se inclina hacia el N-NE, contra el cabalgamiento que limita la cuenca por el N, donde llega a alcanzar más de 400 m de profundidad. Por efecto de la discordancia terciaria, los materiales de los tramos superiores del Estefaniense quedan restringidos a la parte más oriental (al E de la línea de trazos de la figura 44).

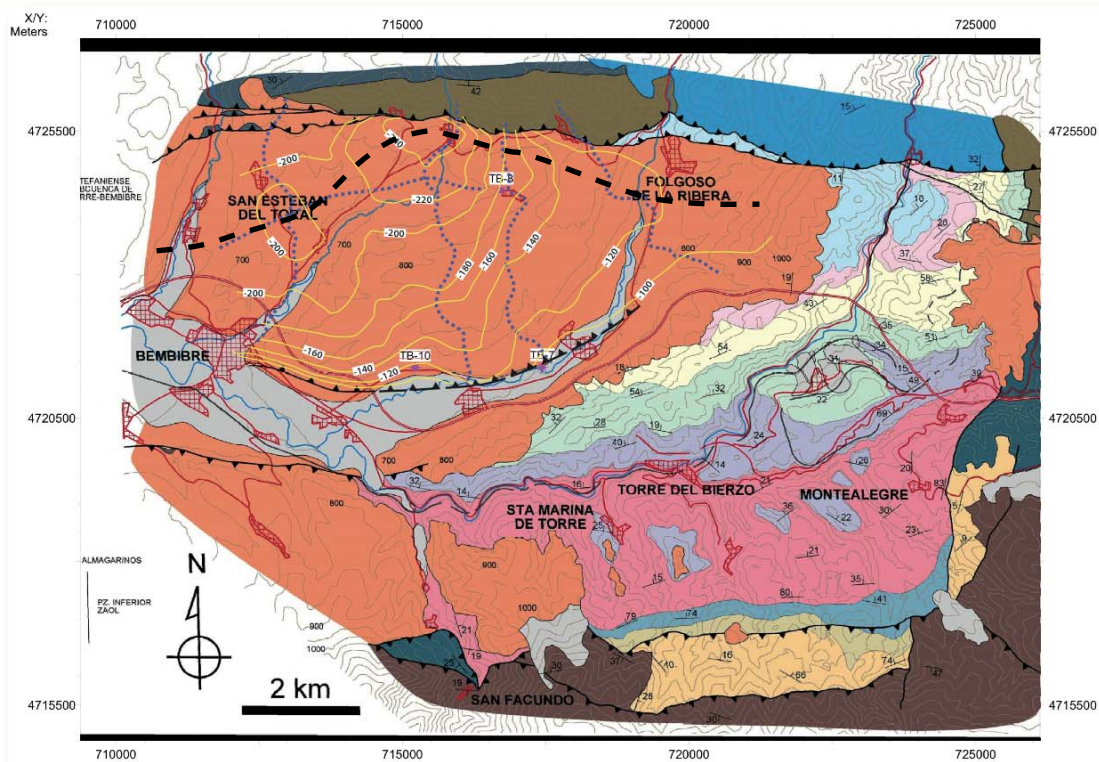


Figura 43.- Mapa de isóbatas de la discordancia basal del Terciario.

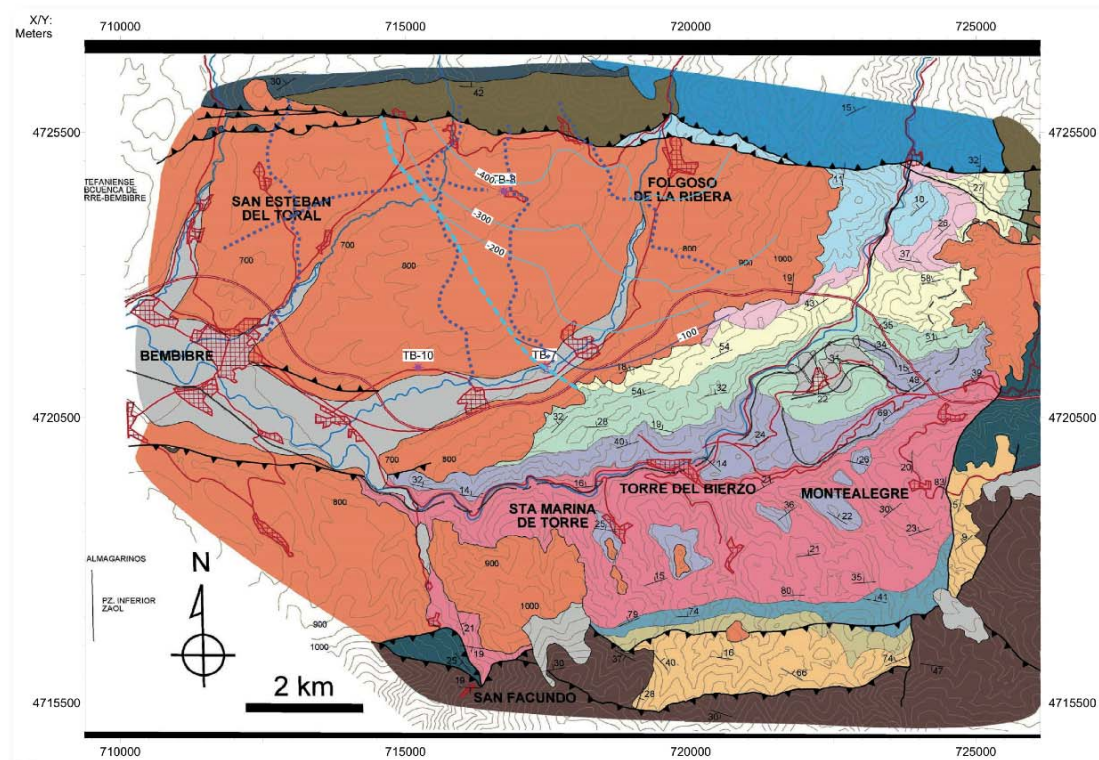


Figura 44.- Mapa de isóbatas de la superficie de techo del tramo de Sarita. La línea a trazos representa la traza de la intersección de esta superficie por la discordancia basal terciaria y marca la máxima extensión hacia el O de los tramos superiores a Sarita.

Las profundidades del techo del tramo de Torre se muestran en la figura 45. Esta superficie de contacto se dispone con una inclinación general hacia el NE, salvo en el borde S donde el buzamiento es hacia el N. Las profundidades del techo del tramo de Torre varían desde algo más de 200 m en la zona más próxima a San Esteban del Toral hasta más de 800 m en la zona N cerca del cabalgamiento. La extensión máxima hacia el O del tramo de Sarita, por debajo del Terciario, viene indicada por la línea de trazos de la figura 45.

El techo del tramo Chuchú se muestra en la figura 46. Este tramo se extiende por debajo del Terciario a través de toda la zona estudiada, llegando a alcanzar profundidades de más de 1000 m en la zona más próxima al cabalgamiento N. La estructura general dibuja un anticlinal de traza aproximadamente N-S, en la zona de Bembibre-San

Esteban del Toral y un sinclinal al E de Folgoso de la Ribera (Fig. 46).

Una geometría similar es la que muestra la superficie de base del cuenca estefaniense (Fig. 47). Esta superficie nos muestra las profundidades mínimas de la base del Estefaniense, por debajo de la cuenca terciaria, que irían de los 700-800 m, en la zona entre Bembibre y San Esteban del Toral, hasta más de 1300 m en la zona de Folgoso de la Ribera (Fig. 47).

EL LÍMITE OESTE DE LA CUENCA ESTEFANIENSE

Uno de los problemas geológicos por los que se planteó la realización del perfil sísmico Bierzo-1 era determinar la naturaleza (falla o acñamiento)

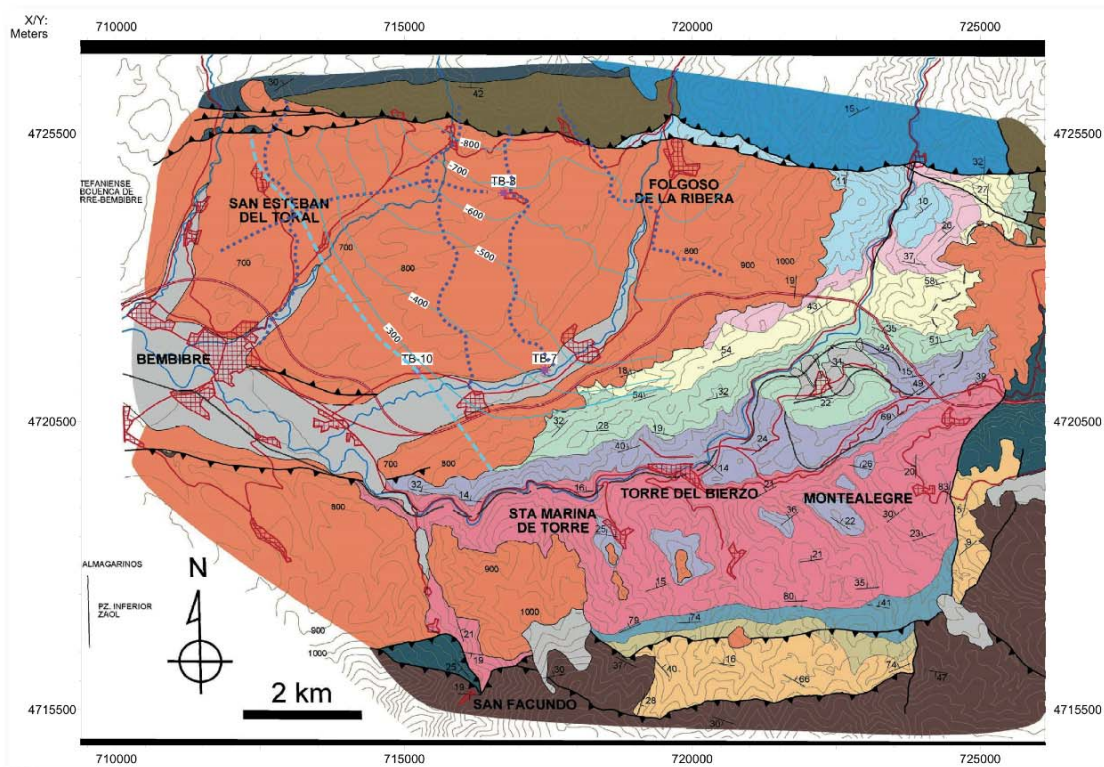


Figura 45.- Mapa de isóbatas de la superficie de techo del tramo de Torre. La línea a trazos representa la traza de la intersección de esta superficie por la discordancia basal terciaria y marca la máxima extensión hacia el O de los tramos superiores a Torre.

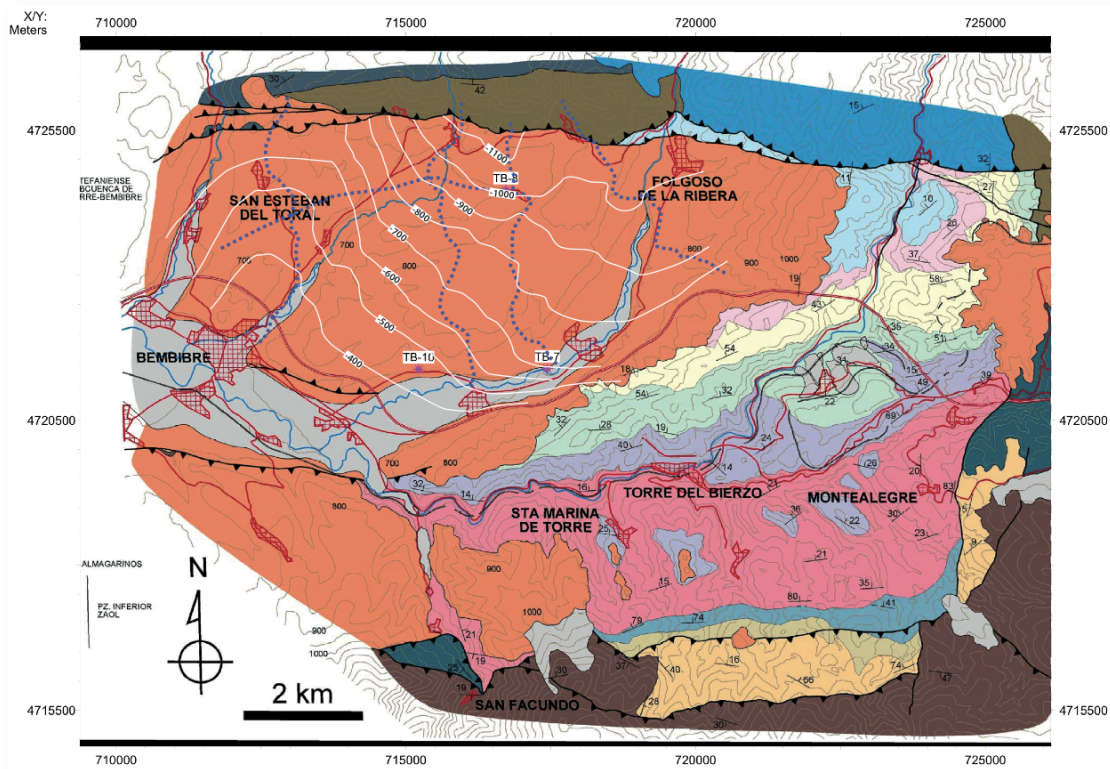


Figura 46.- Mapa de isóbatas de la superficie de techo del tramo de Chuchú.

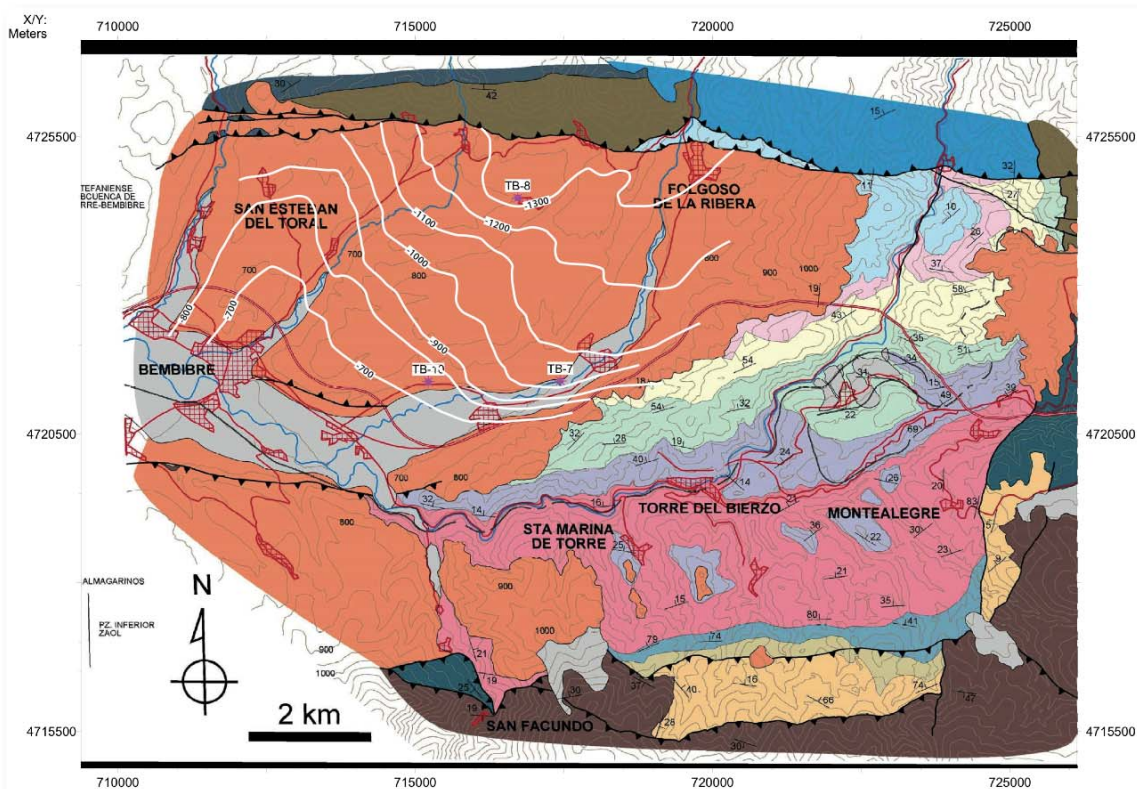


Figura 47.- Mapa de isóbatas de la discordancia basal del Estefaniense (?).

del límite por el O de la subcuenca estefaniense del N de Bembibre. Aunque, por problemas logísticos, el perfil sísmico no pudo cruzar sobre este límite, los datos aportados por el mismo y por las otras líneas sísmicas ofrecen elementos sustanciales para abordar esta cuestión.

El problema planteado era la imposibilidad de conocer la extensión hacia el O de los materiales estefanienses bajo la cobertera terciaria, tan solo a partir de la cartografía geológica de la zona. Tal como se pueden ver en los mapas los geológicos, una potente sucesión de materiales estefanienses se oculta bajo la cobertera terciaria al E de Bembibre, donde aparece un último y aislado afloramiento de Estefaniense a favor de un cabalgamiento. Por otra parte, inmediatamente al O de Bembibre, directamente por debajo de los materiales terciarios aparecen rocas del Paleozoico inferior, sin presencia de materiales estefanienses (Fig. 48), sin que se pueda reconocer ninguna

estructura en la superficie, que está cubierta por los materiales terciarios. Para explicar este hecho se planteaban dos hipótesis extremas:

- 1) El límite O de la cuenca podría ser una falla de dirección NNE-SSO, con el bloque elevado situado al O.
- 2) Un rápido acuñaamiento de los materiales estefanienses hacia el O.

Si se observan las isóbatas de la figura 48 se puede ver que no hay un acuñaamiento, con una superficie basal cada vez más superficial hacia el O. Por el contrario, la superficie basal se inclina al O en el flanco occidental del anticlinal de Bembibre. Esta geometría de la superficie basal de Estefaniense descarta completamente la segunda hipótesis, apuntando necesariamente a la existencia de una falla NNE-SSO actuando como límite O de la cuenca estefaniense. Otro argumento a favor de esta opción es la propia estructuración



Figura 48.- Mapa isóbatas de la base del Estefaniense superpuesto al mapa MAGNA de la zona de Bembibre.

de la cuenca estefaniense, con unos pliegues orientados también en dirección NNE-SSO, que parecen evidenciar la influencia de esta falla en la estructuración de la cuenca estefaniense (Fig. 48)).

MODELO GEOLÓGICO 3D DE LA CUENCA

Todos los datos expuesto permiten disponer, aunque con algunas limitaciones, de un primer modelo 3D de la estructura de los materiales estefaniense por debajo de la cuenca terciaria de Bembibre, tal como se puede ver en las figuras 49 a

52. En las figuras se puede observar muy claramente el sinclinal que dibuja la discordancia basal del terciario, de orientación NE-SO, y, por debajo, los horizontes intraestefanienses inclinados hacia el NE.

A partir de este modelo 3D son posibles otros cálculos como p.e. el espesor de los materiales estefanienses por debajo de la cobertera terciaria (Fig. 53) o el espesor de estefaniense situado a profundidad mayor de 800 m bajo la superficie topográfica (Fig. 54).

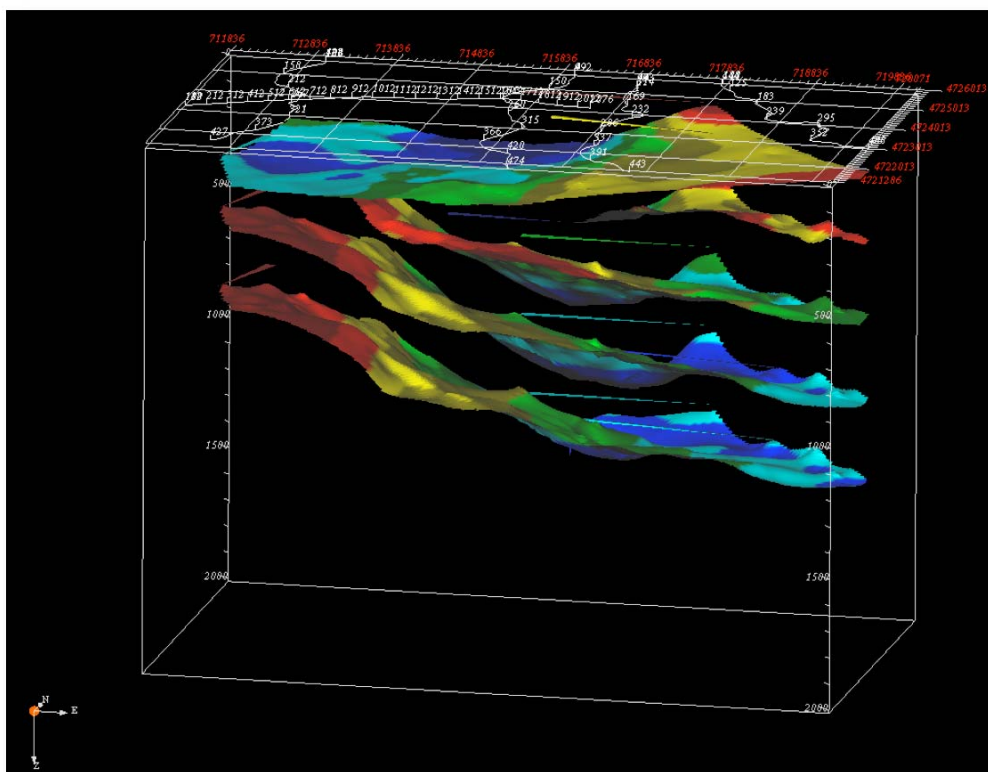


Figura 49.- Modelo 3D de las superficies intra-estefaniense por debajo del terciario de la cuenca de Bembibre. La primera superficie es la discordancia basal terciaria y, por debajo, sucesivamente, el techo de los tramos de Sarita, Torre y Chuchú, y la base de la cuenca estefaniense. Vista hacia el N

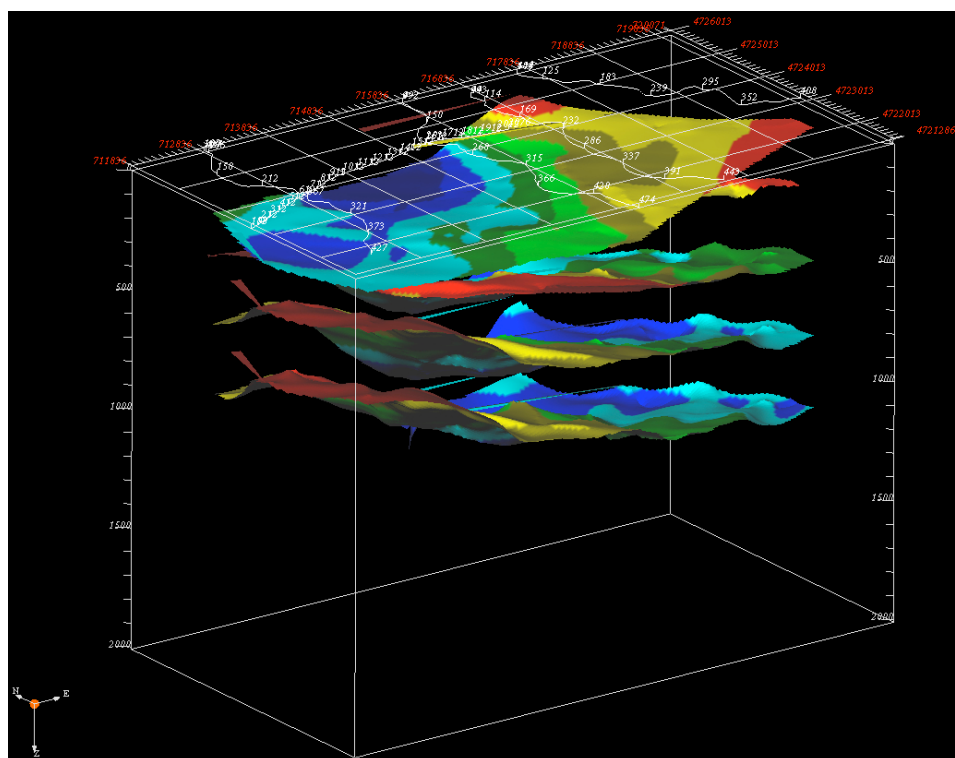


Figura 50.- Modelo 3D de las superficies intra-estefaniense por debajo del terciario de la cuenca de Bembibre. Vista hacia el NE.

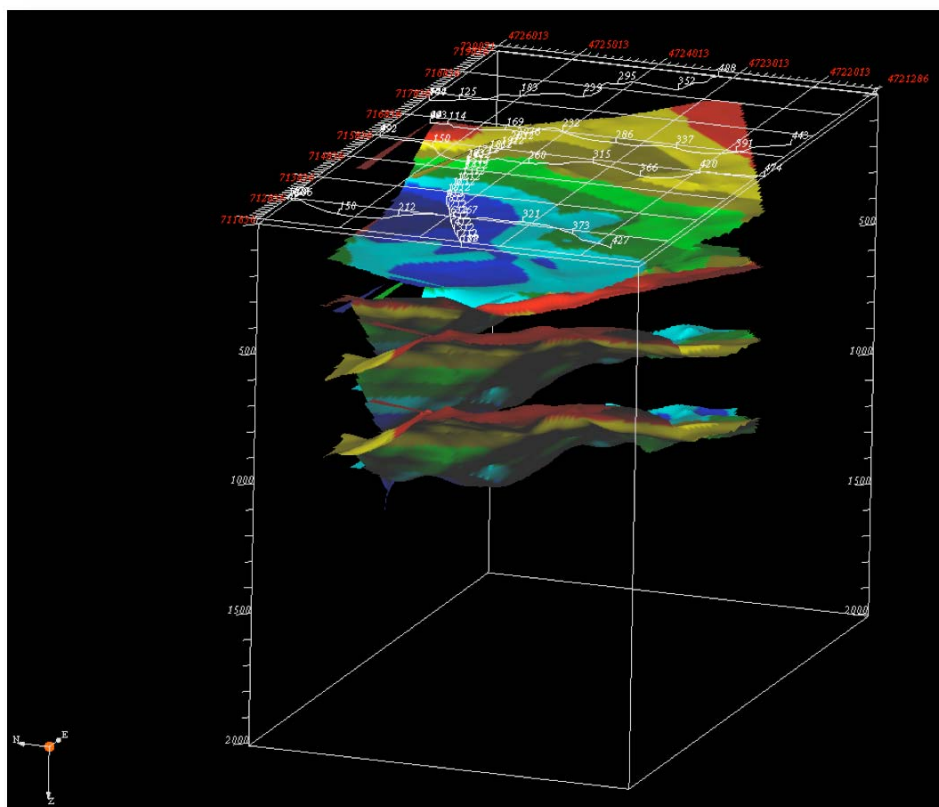


Figura 51.- Modelo 3D de las superficies intra-estefaniense por debajo del terciario de la cuenca de Bembibre. Vista hacia el E.

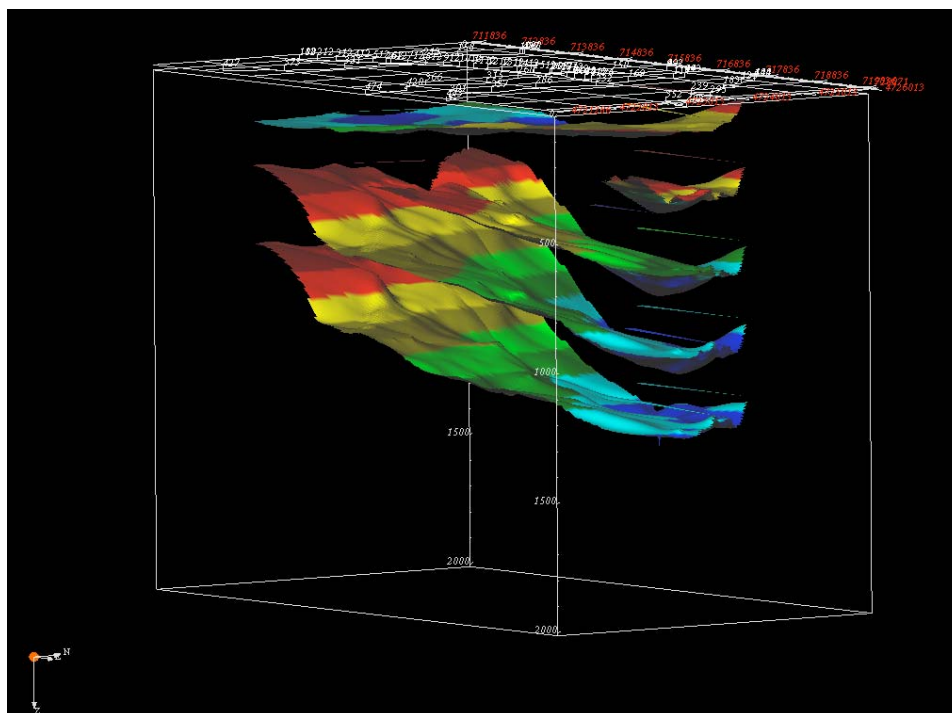


Figura 52.- Modelo 3D de las superficies intra-estefaniense por debajo del terciario de la cuenca de Bembibre. Vista hacia el NO.

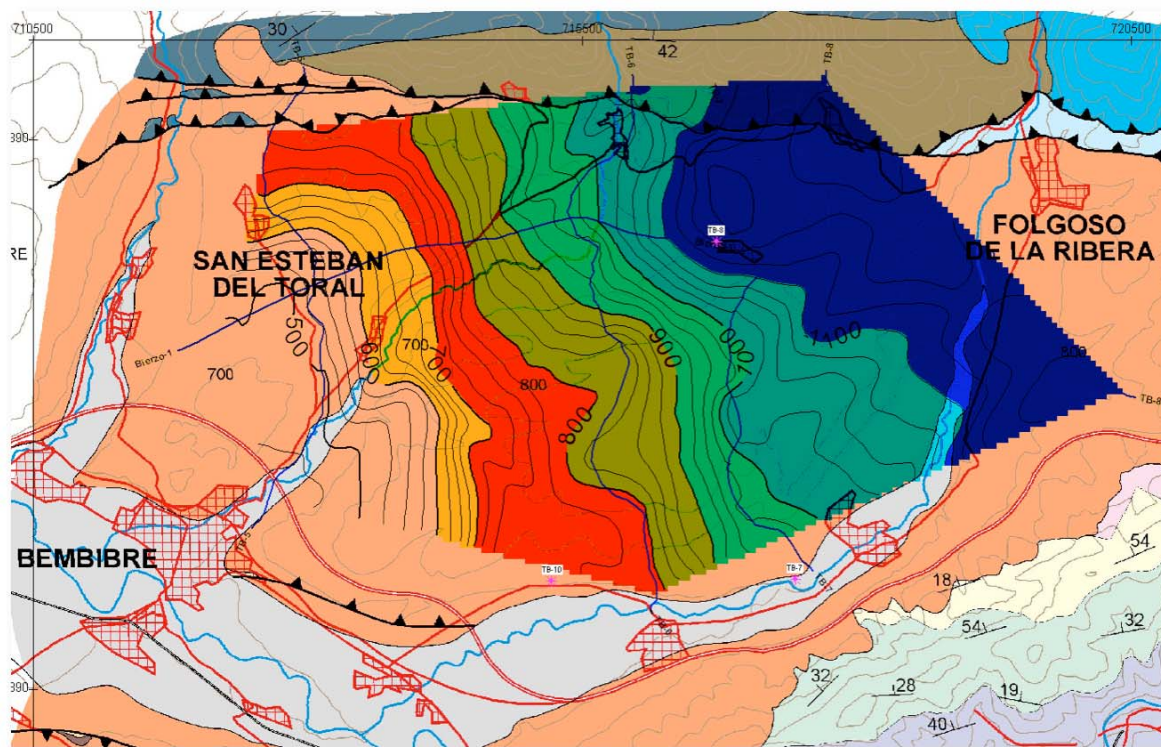


Figura 53.- Espesor de la serie estefaniense por debajo de la cobertera terciaria.

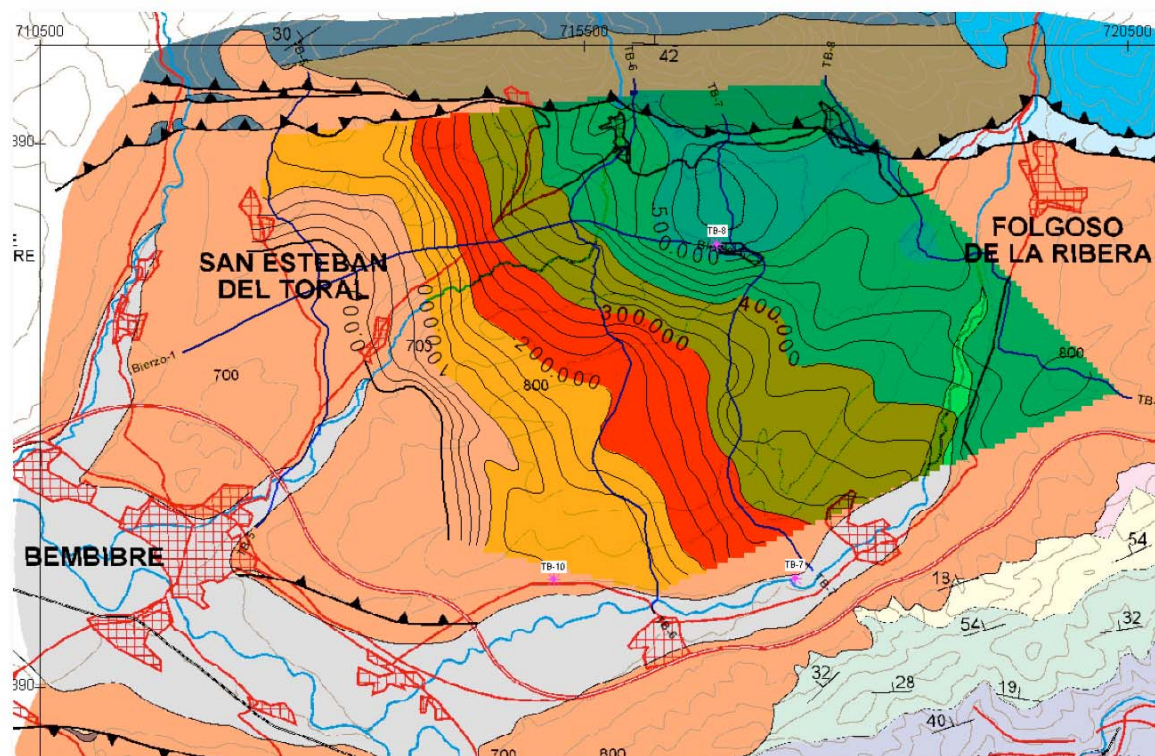


Figura 54.- Espesor de la serie estefaniense situado a profundidad mayor de 800 m bajo la superficie topográfica.

EQUIPO INVESTIGADOR DE LA UNIVERSIDAD DE OVIEDO

RESPONSABLE DEL PROYECTO:

Francisco Javier Álvarez Pulgar. Dr. Geología. Catedrático de Geodinámica. Dpto. de Geología

INVESTIGADORES:

Jorge Gallastegui Suárez. Dr. Geología. Prof. Profesor Titular. Dpto de Geología

Gabriela Fernández Viejo. Dr. Geología. Investigadora Contratada Doctor. Dpto de Geología

David Pedreira Rodríguez. Dr. Geología. Prof. Ayudante. Dpto de Geología

Carlos López Fernández. Dr. Geología. Prof. Ayudante. Dpto de Geología

Luis A. Quintana Rodríguez, Licenciado en Geología. Prof. Ayudante. Dpto de Geología

Juan Manuel González Cortina. Licenciado en C. Físicas. Investigador contratado. Dpto de Geología

Javier Olona Allué, Licenciado en Geología, Becario FPI. Dpto de Geología

Isabel Moriano Fernández, Licenciada en Geología, Investigadora Contratada. Dpto de Geología