



Facultad de Ciencias Geológicas
Universidad Complutense de Madrid

Máster Universitario en Exploración de
Hidrocarburos y Recursos Minerales
Curso 2021-2022

**Evaluación preliminar de la posibilidad
de explotación geotérmica en el área de
Jaca-Sabiñánigo**

***Preliminary evaluation of the possibility
of geothermal exploitation in the Jaca-
Sabiñánigo area***

HÉCTOR TORRE RUIZ

TUTORES DEL TRABAJO:

Cristina de Santiago Buey (IGME)

Massimiliano Masini (REPSOL)

Javier Martín Chivelet (UCM)



Facultad de Ciencias Geológicas
Universidad Complutense de Madrid

Máster Universitario en Exploración de
Hidrocarburos y Recursos Minerales

Curso 2021-2022

**Evaluación preliminar de la posibilidad de
explotación geotérmica en el área de Jaca-
Sabiñánigo**

***Preliminary evaluation of the possibility of
geothermal exploitation in the Jaca-Sabiñánigo
area***

HÉCTOR TORRE RUIZ

TUTORES DEL TRABAJO:

Cristina de Santiago Buey (IGME)

Massimiliano Masini (REPSOL)

Javier Martín Chivelet (UCM)

Fdo.:

Fdo.:

Fdo.:



Facultad de Ciencias Geológicas

Universidad Complutense de Madrid

DECLARACIÓN DE NO PLAGIO

Héctor Torre Ruiz con NIF 02579488S, estudiante de Máster universitario en exploración de hidrocarburos y recursos minerales en la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid en el curso 2021 -2022 , como autor/a del trabajo de fin de máster titulado “Evaluación preliminar de la posibilidad de explotación geotérmica en el área de Jaca-Sabiñánigo” y presentado para la obtención del título correspondiente, cuyo/s tutor/es es/son: Cristina de Santiago Buey, Massimiliano Masini y Javier Martín Chivelet.

DECLARO QUE: El trabajo de fin de máster que presento está elaborado por mí y es original. No copio, ni utilizo ideas, formulaciones, citas integrales e ilustraciones de cualquier obra, artículo, memoria, o documento (en versión impresa o electrónica), sin mencionar de forma clara y estricta su origen, tanto en el cuerpo del texto como en la bibliografía. Así mismo declaro que los datos son veraces y que no he hecho uso de información no autorizada de cualquier fuente escrita de otra persona o de cualquier otra fuente. De igual manera, soy plenamente consciente de que el hecho de no respetar estos extremos es objeto de sanciones universitarias y/o de otro orden.

En Madrid, a 27 de Julio de 2022

Fdo.:

Agradecimientos

En primer lugar, a Celestino García de la Noceda Márquez (IGME) por proponer la idea original para el TFM. Me ha apoyado y me ha aportado los informes históricos necesarios para realizar las primeras fases de estudio.

En segundo lugar, a mis tutores: Javier Martín Chivelet (UCM) me ha ayudado desde el primer momento a organizarme y entrar en contacto con el IGME y Repsol. A Massimiliano Masini (Repsol) le debo su paciencia y dedicación en la interpretación sísmica y conversión en profundidad que ha permitido el desarrollo del trabajo. Por último, Cristina de Santiago Buey (IGME), que indistintamente de su labor esencial en la evaluación geotérmica y en trabajo, es una persona que lo ha dado todo por ayudarme en cualquier cosa, siempre con una sonrisa en la cara.

En tercer lugar, a la empresa Repsol, por otorgarme una beca con la que he permitido llegar a todo el potencial del TFM. Me habéis suministrado los datos necesarios, una supervisión envidiable y la visión del mundo empresarial.

Por último, a diferentes personas a las que podido consultar y sin las que este trabajo no hubiera sido posible: Vaiva Cypaite y Carlos Alonso de Seequent que me han ayudado a comprender Leapfrog, Ignasi Hermes (ICGC) que me asesoró cuando 3DHIP-Calculator no leía los datos, así como Carlos Peropadre y el resto de los profesores del máster de exploración de la Facultad de Ciencias Geológicas.

¡Gracias a todos!

Resumen del TFM en castellano

Este trabajo consiste en una evaluación preliminar de posibilidad de explotación geotérmica en el área Jaca-Sabiñánigo (Huesca, España). Para su realización se ha recopilado los fundamentos básicos de la geotermia profunda, así como la información histórica del antiguo yacimiento de gas de Serrablo. Dicha información se ha tenido que modernizar, modificar y transformar para ser utilizada en programas modernos. Se ha creado un flujo de trabajo partiendo de la interpretación de líneas sísmicas de reflexión del yacimiento, con la que se han modelizado las estructuras y horizontes principales. La modelización 3D del yacimiento Serrablo se ha terminado con el *software Leapfrog*, que ha permitido conocer la geometría del yacimiento geotérmico en toda la concesión. A partir de la información de las diagráfias, se ha delimitado el reservorio, sobre el que, finalmente, se ha realizado una estimación del potencial geotérmico con el programa 3DHIP-Calculator, basado en el método volumétrico "*Heat in place*". Los resultados han sido óptimos para su explotación para generación de electricidad.

Summary of the TFM in English

This work consists in a preliminary evaluation of the possibility of geothermal exploitation in the Jaca-Sabiñánigo area (Huesca, Spain). To carry out the project, the fundamentals of deep geothermal energy have been revised, as well as all the historical information about the old Serrablo gas field. This information has had to be modernized, modified, and transformed to be used in modern software. A workflow has been created based on the interpretation of seismic lines of reflection of the reservoir, with which the main structures and horizons have been modelled. The 3D modelling of the Serrablo reservoir has been completed with the Leapfrog software, which has made it possible to discover the geometry of the geothermal reservoir along the concession. Based on the information given by the well logs, the reservoir has been delimited, on which, finally, the evaluation of the geothermal potential has been estimated with the 3DHIP-Calculator program, based on the volumetric method "Heat in place". The results have been optimal for its exploitation for electricity generation.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	Planteamiento y justificación.....	1
1.2.	Objetivos:	1
2	FUNDAMENTOS GEOTÉRMICOS.....	3
2.1.	Concepto, usos y clasificación de la energía geotérmica	3
2.2.	Reservorios geotérmicos	4
2.3.	“Plays” geotérmicos	4
2.3.1.	Plays Convectivos	5
2.3.2.	Plays Conductivos.	6
2.4.	Cuencas sedimentarias profundas.....	6
2.5.	Explotación de yacimientos de alta y media T°C.....	8
2.6.	Evaluación del recurso geotérmico	8
2.6.1.	Método “HEAT IN PLACE” (HIP)	9
3	EL YACIMIENTO DE SERRABLO.....	11
3.1.	Localización.....	11
3.2.	Contexto geológico	11
3.2.1.	Contexto geológico regional del subpirineo	11
3.2.2.	Geología de la cuenca de Jaca	14
3.2.3.	Estratigrafía del yacimiento Serrablo	15
3.3.	Cronología del yacimiento Serrablo	19
3.4.	Serrablo como yacimiento geotérmico	20
5	METODOLOGÍA.....	21
6	RESULTADOS y DISCUSIÓN: CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO.....	25
6.1.	Columnas de sondeos y correlación	25
6.2.	Interpretación de las Diagrafías	26
6.3.	MODELIZACIÓN	27
6.3.1.	Interpretación y modelización con <i>Move</i>	27
6.3.2.	Modelización 3D con <i>Leapfrog</i>	33
6.4.	Evaluación geotérmica con el <i>software</i> 3DHIP_Calculator.....	35
7	CONCLUSIONES.....	39
8	BIBLIOGRAFÍA.....	42
8.1.	Artículos científicos, libros de texto e informes técnicos:.....	42
8.2.	Legislación / Regulación:.....	44

8.3. Páginas Web:	45
9 ANEXO.....	46

1 INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento y justificación

Las complicadas condiciones medioambientales que evidencian un cambio climático a escala mundial unido a las repercusiones energéticas y económicas de las últimas revoluciones geopolíticas obligan a acelerar una transición ecológica hacia la independencia de los combustibles fósiles. En este sentido, las grandes empresas de hidrocarburos se están abriendo a las energías renovables, surgiendo interesantes iniciativas como la reutilización de datos históricos del sector petrolero en cuencas sedimentarias a la exploración de potenciales yacimientos / almacenes de energía geotérmica.

Este trabajo consiste en una evaluación preliminar de la posibilidad de explotación geotérmica de un antiguo yacimiento de gas natural en la concesión de Serrablo (Huesca). Dentro de la amplia gama de contextos geotérmicos definidos en función de sus características geológicas, el yacimiento de Serrablo se identifica como de tipo cuenca sedimentaria profunda. Para realizar esta evaluación se ha partido de la interpretación de datos provenientes de diferentes técnicas de exploración geológicas, para lo que han resultado cruciales los conocimientos adquiridos en el máster de exploración de hidrocarburos y recursos minerales. Se ha creado un flujo de trabajo adecuándose a los datos de partida y el resultado buscado: un modelo geológico estático 3D del yacimiento que permita evaluar su potencial geotérmico mediante el método volumétrico "*Heat in Place*".

1.2. Objetivos:

El objetivo principal del trabajo es caracterizar y evaluar el potencial geotérmico del yacimiento Serrablo, en el área Jaca-Sabiñánigo. Para su realización, se plantean los siguientes objetivos parciales:

- Estudiar los fundamentos básicos de la geotermia profunda necesarios para la elaboración de este trabajo.

- Recopilar información histórica del yacimiento Serrablo (informes del IGME, prensa, BOE, artículos, informes de testificación, ...).
- Preparar, transformar y actualizar la información y los datos analógicos disponibles para incorporarlos a programas modernos. Ello implica la digitalización de los sondeos para transformarlos en bases de datos numéricas.
- Interpretar y modelar el yacimiento a partir de las líneas de sísmica de reflexión facilitadas, mediante el programa *Move*.
- Construir un modelo geológico estático 3D mediante el programa *Leapfrog Geothermal*.
- Realizar la evaluación del potencial geotérmico del yacimiento mediante el método volumétrico "*Heat in Place*", usando el programa *3DHIP-Calculator*.
- Analizar los resultados obtenidos y discutir la viabilidad de una explotación geotérmica en el yacimiento Serrablo.

2 FUNDAMENTOS GEOTÉRMICOS

2.1. Concepto, usos y clasificación de la energía geotérmica

Según la Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables (Refundida posteriormente mediante la Directiva 2018/2001 de 11 de diciembre de 2018), se define la geotermia como la energía renovable almacenada en forma de calor bajo la superficie terrestre.

Este calor proviene fundamentalmente del calor remanente de la formación de la Tierra, la estructura y procesos exotérmicos de cristalización y convección en el interior de núcleo y manto y la desintegración de elementos radiactivos (^{235}U , ^{232}Th y ^{40}K) en la corteza terrestre. Además, una gran parte de energía proviene del sol, que queda absorbida en el interior de los primeros metros de superficie terrestre.

La clasificación de los tipos de geotermia se basa en el origen interno o externo del calor y la entalpía del yacimiento. Dado que la entalpía es un concepto complejo de medir, se simplifica clasificando los tipos de energía geotérmica /yacimientos en función de la temperatura (Tabla 1).

Tabla 1: Clasificación de yacimientos geotérmicos en función de origen del calor y temperatura.

Origen	T°C	Tipo de yacimiento	Uso
Profundo	> 150°C	De alta T°C	Transformar directamente el vapor de agua en ENERGÍA ELÉCTRICA mediante turbinas
	90 – 150°C	De media T°C	Transformar directamente el vapor de agua en ENERGÍA ELÉCTRICA mediante turbinas usando un fluido intermedio con menor punto de evaporación.
	30 – 90°C	De baja T°C	Calor insuficiente para generar electricidad. USOS TÉRMICOS DIRECTOS
Somero	< 30°C	De muy baja T°C	CLIMATIZACIÓN mediante bomba de calor.

Así, los yacimientos de alta T°C (> 150°C) permiten generar electricidad mediante turbinas. En los yacimientos de media T°C (90 – 150°C), los fluidos geotérmicos no presentan una temperatura suficiente para generar electricidad por sí mismos, pero los avances tecnológicos de los últimos años han permitido la creación de plantas eléctricas donde el fluido geotérmico transmite su calor a un circuito cerrado con un fluido intermedio de punto de ebullición inferior al agua. Este fluido se vaporizará y el vapor resultante sí podrá ser conducido a la turbina para generar electricidad.

En los yacimientos geotérmicos de baja T°C, el fluido geotérmico puede ser utilizado para usos térmicos directos como balneología, piscicultura, agricultura en invernaderos o usos industriales.

Por último, cualquier punto de la corteza terrestre es susceptible de ser un recurso geotérmico de muy baja T°C (< 30°C), usado para calefacción y/o refrigeración mediante bombas de calor.

En resumen, la geotermia constituye una energía renovable e ilimitada que, a diferencia de otras, se encuentra disponible en la naturaleza las 24 horas, los 365 días del año. Presenta mínimos efectos ambientales y es compatible con otras formas de energía. Gracias a su gran versatilidad, permite generar electricidad, así como usos térmicos directos o mediante bomba de calor, usando el terreno como fuente/sumidero o como almacén de energía térmica.

De todas las posibilidades explicadas, este trabajo se centra en un posible yacimiento geotérmico profundo en el que el calor procede del interior de la Tierra. Los estudios permitirán determinar si se trata de un yacimiento de alta, media o baja T°C.

2.2. Reservorios geotérmicos

Un sistema o reservorio geotérmico “tipo” presenta los siguientes elementos: una fuente de calor, normalmente de origen magmático, una capa o estrato / reservorio, que presenta una permeabilidad tal que permite el movimiento del agua hidrotermal, una capa o formación/sello impermeable, que impide que se escape la energía hacia la superficie y un flujo de agua que puede ser agua meteórica que entra al sistema por zonas de permeabilidad / conexión del reservorio con la superficie, se calienta durante su trayectoria cerca del foco de calor y sale, si encuentra modo de hacerlo.

2.3. “Plays” geotérmicos

Los posibles reservorios con potencial geotérmico profundo (alta, media y baja T°C) pueden a su vez ser clasificados según el catálogo de contextos geotérmicos (*“geothermal play types”*) definido por Moeck (2014) en función del contexto geológico y estructural, el origen de la fuente de calor y el mecanismo de transporte dominante. Según esta clasificación, los *plays* geotérmicos se dividen en dos grandes grupos en función del mecanismo de transporte del calor: Convectivos y conductivos.

2.3.1. Plays Convectivos

Son sistemas donde el mecanismo de transporte de calor predominante es el movimiento convectivo de fluidos geotérmicos. Estos movimientos convectivos se originan por la variación de viscosidad y densidad de los fluidos con la temperatura. Al ser calentados, disminuye su densidad y viscosidad y tienden a ascender hacia la superficie terrestre. A medida que realizan esta ascensión se van enfriando y aumenta su densidad y viscosidad hasta que llega un momento en que tenderán a profundizar otra vez completando una celda convectiva. Los *plays* convectivos se definen por la presencia de un fluido que transporta el calor y que puede ser extraído de la roca del yacimiento. Se distinguen tres tipos de sistemas convectivos en función del fluido cuyo movimiento convectivo transporta el calor (Figura 1):

- Tipo vulcanismo: El movimiento del magma transporta el calor. Los reservorios geotérmicos se encuentran en cámaras magmáticas y zonas de vulcanismo activo, asociada a arcos magmáticos, crestas oceánicas y puntos calientes.
- Tipo intrusión: El calor se transporta por una combinación de magma y aguas hidrotermales. En estos sistemas los reservorios geotérmicos se encuentran en intrusiones jóvenes (plutonismo reciente) asociados a áreas orogénicas jóvenes o fases postorogénicas.
- Tipo dominio continental: El calor se transporta por aguas hidrotermales que transcurren a lo largo de fallas en zonas de adelgazamiento cortical debido a tectónicas extensionales, donde se aumenta considerablemente el gradiente geotérmico.

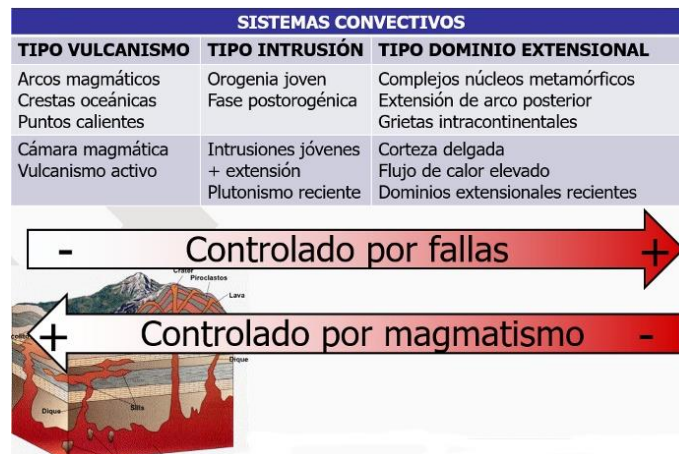


Figura 1: Clasificación de “Plays” convectivos con los factores que los controlan (Moeck, 2014).

2.3.2. Plays Conductivos.

Son sistemas donde el transporte de calor tiene lugar por conducción entre materiales en estado sólido, sin movimiento de masas. Los plays conductivos no presentan fluidos o no tienen una permeabilidad suficiente que permita su movimiento a través de los poros/fracturas. El control de las fracturas y las características de las facies determina una subdivisión (Figura 2):

- Tipo cuenca intracratónica: Donde el reservorio geotérmico puede encontrarse en acuíferos sedimentarios de porosidad y permeabilidad variable, asociados a cuencas de rift, cuencas de margen pasivas o intracratones.
- Tipo cinturón orogénico: En este caso los reservorios geotérmicos se encuentran en acuíferos sedimentarios profundos asociados a zonas de engrosamiento cortical como cinturones de pliegue y empuje o cuencas de antearco, donde la fracturación y las características de las facies determinan la calidad del acuífero.
- Tipo basamento: En este caso los reservorios geotérmicos se encuentran en macizos rocosos de baja porosidad y permeabilidad. Destaca la importancia del calor radiogénico de las intrusiones plutónicas.

SISTEMAS CONDUCTIVOS		
TIPO CUENCA INTRACRATÓNICA	TIPO CINTURÓN OROGÉNICO	TIPO BASAMENTO
Intracratones Cuencas de Rift Cuencas de margen pasivas	Cinturón de pliegue y empuje Cuencas de antearco	Intrusión en terreno plano Calor radiogénico: U ²³⁵ , U ²³⁸ , Th ²³² y K ⁴⁰ Intrusiones plutónicas (granito)
Acuíferos sedimentarios ↑ Poros. + ↓ perm.	Acuíferos sedimentarios ↑ Poros. + ↓ Perm. ↑ Poros. + ↑ Perm.	↓ Poros. + ↓ Perm.

- Controlado por fallas +

+ Controlado por lito-biofacies -

Figura 2: Clasificación de “Plays” conductivos y los factores que los controlan (Moeck, 2014).

2.4. Cuencas sedimentarias profundas

En la Figura 3 se observan las diferentes formas de explotación de energía geotérmica en función de las condiciones de profundidad (presión) y temperatura del reservorio (Boden, 2017).

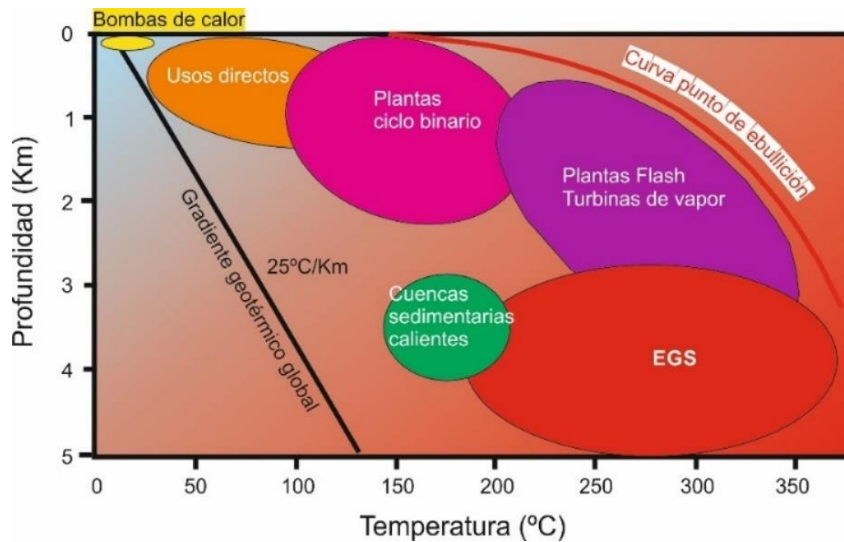


Figura 3: Tipos de explotación de energía geotérmica según profundidad y temperatura (Traducido de Boden, 2017).

Así, en condiciones superficiales de presión y temperatura, es posible la climatización mediante bombas de calor. Los yacimientos de mayor profundidad y temperatura permiten el uso térmico directo en diferentes aplicaciones. Las plantas de ciclo binario y plantas Flash son diferentes tecnologías de generación de electricidad que se explicarán más adelante. Los yacimientos geotérmicos estimulados, en inglés EGS (*Enhanced Geothermal Systems*) son yacimientos de alta presión y temperatura donde la roca presenta una porosidad y permeabilidad insuficiente para permitir el flujo de fluido geotérmico y su extracción mediante un pozo de producción. Para su aprovechamiento resulta necesario aumentar la permeabilidad de la roca mediante estimulación hidráulica, que en ningún caso debe confundirse con el *fracking* de la industria del petróleo y gas natural (ICOG, 2022).

Entre todas estas opciones de aprovechamiento geotérmico, este trabajo se concentra en el concepto de “Cuencas sedimentarias calientes profundas” que, como su propio nombre indica se trata de cuencas sedimentarias que, aunque presenten un gradiente geotérmico cercano a la media global, su gran profundidad (entre 3 y 5 km) les confiere unas condiciones de presión y temperatura elevadas (> 150°C) interesantes de explotar (Boden, 2017). El yacimiento Serrablo se ajusta a este modelo de “Cuenca sedimentaria profunda”.

2.5. Explotación de yacimientos de alta y media T°C

Como se ha explicado anteriormente, los yacimientos geotérmicos de alta (>150°C) y media (90 – 150°C) temperatura permiten la generación de electricidad. El factor fundamental que determina el tipo de planta más apropiada en cada caso es la temperatura, aunque importan otros como la proporción entre vapor y líquido, dimensiones del yacimiento o la química del fluido geotérmico (generalmente bifásico: líquido + vapor). Las plantas geotérmicas se clasifican en: Plantas tipo *Steam* (vapor), plantas tipo Flash y plantas tipo binario (Boden, 2017):

- Las plantas *Steam* son las más rentables, ya que el yacimiento genera naturalmente un vapor a alta presión y temperatura que activa la turbina sin necesidad de separadores u otros mecanismos de control, pero también las menos comunes con una pequeña distribución mundial.
- Las plantas de tipo *Flash* necesitan una separación del fluido geotérmico ascendente, que es una mezcla de agua y vapor, antes del turbinado por un separador ciclónico que separa el vapor del líquido.
- Las plantas de tipo binario se instalan cuando el fluido geotérmico no presenta vapor a suficiente presión y temperatura para generar electricidad en la turbina por sí mismo. El fluido geotérmico transmite su calor a un segundo fluido, generalmente orgánico, en circuito cerrado, de forma que no se produce contacto directo entre los dos fluidos. Este segundo fluido orgánico debe tener un punto de ebullición inferior, de modo que al calentarse genera vapor que es conducido a la turbina donde generará electricidad.

2.6. Evaluación del recurso geotérmico

Muffler, P. y Cataldi, R. (1978) analizan y comparan todos los métodos existentes de evaluación de recurso geotérmico y proponen una clasificación agrupándolos en cuatro grandes tipologías: Método del flujo de calor superficial, método de fracturas planares, métodos de disponibilidad de calor magmático y el método volumétrico. Este último método ha sido el seleccionado para realizar la evaluación en el yacimiento Serrablo.

La evaluación por métodos volumétricos de reservorio se utiliza valores conocidos o estimados de temperatura, calor específico y densidad de las rocas en profundidad para calcular el “recurso accesible base”. Multiplicando el valor resultante por un factor de recuperación se obtiene el “calor recuperable”.

Este método resulta ser el más apropiado para evaluar reservorios en cuencas sedimentarias profundas, ya que se basa en el conocimiento de la columna

litoestratigráfica y parámetros petrofísicos de los materiales geológicos atravesados en un área específica. Además de resultar similar al método usado habitualmente en la estimación de recursos en la industria de la exploración mineral y de hidrocarburos.

2.6.1. Método “HEAT IN PLACE” (HIP)

Posteriormente el servicio geológico de los Estados Unidos (*U.S. Geological Survey*) desarrolló el mundialmente conocido y aceptado método “*Heat in Place*” (HIP) que combina el método volumétrico explicado anteriormente con simulaciones de Monte Carlo para obtener una estimación preliminar del potencial de un reservorio geotérmico. Este método consiste en combinar funciones de densidad probabilística de estimaciones aproximadas de temperatura, área y espesor del reservorio para obtener la función de distribución de energía almacenada (“*Heat in place*”) y la capacidad de generación de energía geotérmica. El cálculo del “*Heat in place*” (HIP) se realiza según la siguiente ecuación (Muffler y Cataldi, 1978):

$$HIP = V \cdot [(\Phi \cdot \rho_F \cdot C_F) + ((1 - \Phi) \cdot \rho_R \cdot C_R)] \cdot (T_r - T_i)$$

Donde:

HIP: “*Heat in Place*”: Energía almacenada (kJ)

V: Volumen del cubo del modelo geológico 3D (m³)

Φ: Porosidad (tanto por uno)

ρ_F y ρ_R: Densidad del fluido (F) y de la roca (R) (kg/m³)

C_F y C_R: Calor específico del fluido (F) y de la roca (R) (kJ/kg·°C)

T_r: Temperatura de cada cubo del reservorio en el modelo 3D (°C)

T_i: Temperatura de referencia (de reinyección) o de abandono (°C)

$$H_{rec} = \frac{HIP \cdot C_e \cdot R}{T_{live} \cdot L_F}$$

Donde:

H_{rec}: Calor recuperable (kW)

C_e: Factor de eficiencia

R: Factor de recuperación (Por defecto 0,10)

T_{live}: Vida útil de la planta (s)

L_F: Factor de planta

Por último, es posible estimar la reserva de energía disponible en el interior del volumen de reservorio (roca + fluido) según las siguientes ecuaciones (Quinao y Zarrouk, (2014); Pastor *et al.*, (2010)):

$$qr = \rho \times c \times V(T_r - T_o)$$

Donde:

qr: Energía disponible (J)

ρ : densidad (kg/m³)

c: calor específico de la roca (J/kgK)

V: Volumen (m³)

Tr - To: temperatura del reservorio y temperatura de reinyección (K)

$$Reservas (MWe) = \frac{E \times R \times Ce}{LF \times LD}$$

Donde:

E: Energía disponible

Ce: Factor de eficiencia (0,1)

R: Factor de recuperación (0,10)

LD: Factor de recarga (0,75)

LF: Factor de vida de planta (25 años)

Se observa una clara analogía entre las fórmulas de Pastor *et al.* (2010) y las originales del método *Heat in Place*, de Muffler y Cataldi (1978).

El Factor de recuperación (R) depende de la estructura de la red de porosidad / permeabilidad de la roca, del diseño y profundidad de los pozos de producción e inyección y de las condiciones de contorno hidráulicas y térmicas. Dado que, en una evaluación preliminar, estos factores se desconocen en gran medida, en la mayoría de los casos se comienza suponiendo valores estadísticos. Un rango razonable como primera aproximación sería entre 0 (no hay fluido) y 0,20 (máximo creíble acumulado en yacimientos de todo el mundo). El programa 3DHIP-calculator propone como valor por defecto 0,10.

Para el resto de los parámetros, Pastor *et al.* (2010) proponen los siguientes valores: El factor de eficiencia (Ce) depende de la temperatura y del diseño de la planta geotérmica. En la práctica se utiliza el valor 0,1 estadístico para una planta *Flash*. El factor de carga (LD) de la planta es inherente al diseño de ingeniería de la central. Los valores medio típico de 0,75. La vida de la planta puede presentar un valor promedio de unos 25 años.

3 EL YACIMIENTO DE SERRABLO

3.1. Localización

El yacimiento Serrablo se ubica entre las localidades de Jaca (42°34'17.11"N 0°32'51.50"O) y Sabiñánigo (42°31'9.75"N 0°21'49.88"O) en la provincia de Huesca, España (Figura 4). La concesión se encuentra en la cuenca eocena de Jaca, que a su vez se enmarca en el Prepirineo, entre las Sierras Exteriores al sur y la zona axial al norte. Las Sierras Exteriores se constituyen por las sierras de Guara, Gratal y Gabardiella, en las localidades de Santo Domingo y Loarre. Las principales redes de drenaje regionales en el yacimiento son el río Aragón, Lubierre, Estarrún, Osia, Aragón Subordán y Veral. Ambos contextos, el local y regional del Pirineo, se van a explicar en apartados posteriores.

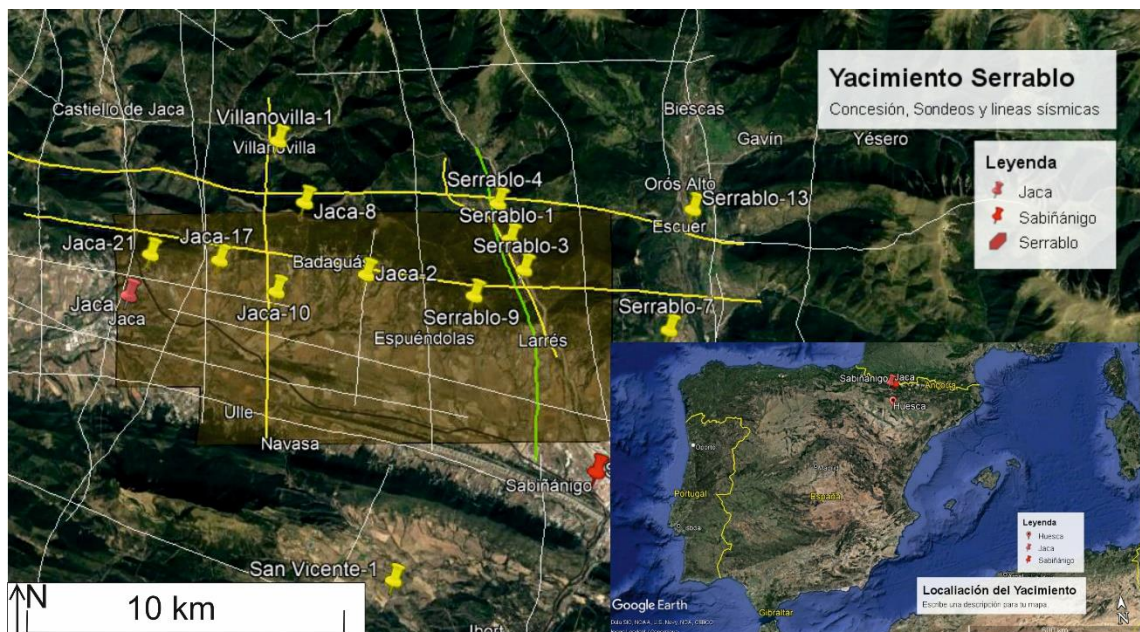


Figura 4: Ubicación de la concesión Serrablo en España. Sobre el yacimiento se han colocado las líneas sísmicas, los sondeos y las localidades próximas (creado a partir de imagen de Google Earth).

3.2. Contexto geológico

3.2.1. Contexto geológico regional del subpirineo

Los Pirineos son un sistema orogénico formado por la convergencia entre la placa ibérica y la placa euroasiática durante la Orogenia Alpina (Cretácico superior - Mioceno inferior) (Barnolas y Gil-Peña, 2001). El orógeno pirenaico responde a los movimientos de la placa euroasiática y africana, la cual empuja a la placa ibérica. Este orógeno se

caracteriza por tener una geometría asimétrica, tener doble vergencia norte y sur, por un proceso subductivo que subduce la subplaca ibérica bajo la euroasiática).

La sedimentación del Cretácico inferior fue en pequeñas cuencas formadas por trastensivas muy subsidentes formadas por *rifting*. Este *rift* estaba asociado a la apertura del Atlántico N y la formación del golfo de Vizcaya (Aptiense). Este evento provocó los primeros efectos compresivos en la formación de cuencas de transtensivas. Dichas cuencas fueron ganando en extensión durante el Cretácico medio y superior, hasta que, en el Santoniense superior se inició la convergencia de las placas y el régimen compresivo. Con lo que comienza la evolución de la cuenca sinorogénica de antepaís.

La compresión se desarrolla por distintos pulsos tectónicos que va provocando diferentes sistemas de mantos de cabalgamientos (Barnolas y Gil-Peña, 2001). Mientras se van produciendo los distintos episodios de deformación, a ambos flancos se forman cuencas de antepaís (*foreland basin*), de las cuales, la cuenca S pro-antepaís (*pro-foreland basin*) define la Cuenca Surpirenaica. La cuenca se subdivide según su geodinámica en la cuenca Surpirenaica oriental, cuenca de Tremp-Graus y cuenca de Jaca, donde se encuentra el área de estudio (Figura 6) (Barnolas y Gil-Peña, 2004).

El Paleoceno se caracteriza por relativa estabilidad tectónica y la sedimentación de *facies* carbonáticas marinas someras, ligadas a ciclos transgresivos. En el Ilerdiense basal (Eoceno inferior, Figura 5) se conforma el surco surpirenaico (Barnolas y Gil-Peña, 2004). En dicho surco se depositarán turbiditas, deltas y plataformas carbonatadas dependiendo de la posición dentro del surco hasta el Priaboniense medio (Eoceno, Figura 5). A partir de entonces, la sedimentación del Oligoceno está controlada por sistemas continentales fluviales y aluviales post-orogénicos con alguna reactivación eventual (Muñoz *et al.*, 2018).

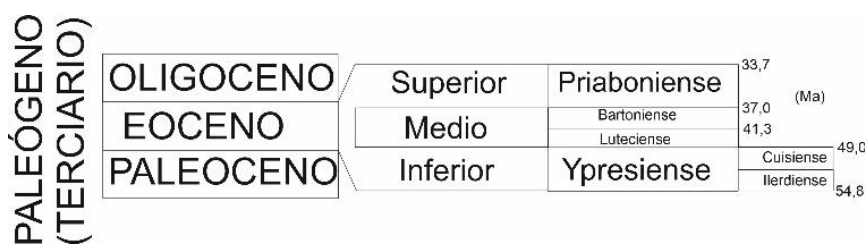


Figura 5: Tabla cronoestratigráfica del Paleógeno con todas las divisiones del Eoceno y sus edades relativas.

La zona meridional del Pirineo se subdivide en cinco regiones: zona axial, sierras interiores, depresión media, sierras exteriores y depresión del Ebro (Figura 6). El complejo axial está constituido por rocas metamórficas de la Orogenia Varisca que se encuentran removilizadas por los grandes mantos de cabalgamientos alpinos corticales

de Gavarnie y Guarga (Millán Garrido *et al.*, 2006). Los cabalgamientos del S se enraízan como nivel de despegue en el Triásico (*Keuper*) con una vergencia S hacia la cuenca del Ebro. En las Sierras Exteriores la sedimentación de cobertura se sobrepone a la cuenca del Ebro configuradas por un sistema de cabalgamientos que forman pliegues en superficie (Millán Garrido *et al.*, 2006).

Las estructuras de apilamiento en el centro del Surpirineo son los mantos de Gavarnie, Guarga, Guara-Gèdre (Millán Garrido *et al.*, 2006). Estos cabalgamientos del basamento tienen un acortamiento regional de 52 km. El manto de Gavarnie es el primero en formarse (Bartoniense inferior-Rupeliense medio) con gran interés en la cuenca de Jaca. Su configuración tectónica es por rampa-rellano, duplicando el paleozoico y el cretácico de (Labaume y Teixell, 2018). De forma coetánea se desarrolla el manto de Guara-Gèdre que acorta las Sierras Exteriores. Se estructura en paralelo a Gavarnie, siendo la unidad de despegue el Keuper del Triásico (Millán Garrido *et al.*, 2006). Posteriormente a ambos, el manto de Guarga, duplicaría los materiales del basamento y del Trías para utilizar el nivel del Muschelkalk como despegue. Forma el flanco N del del sinclinorio de Guarga y a su vez deforma bloqueando el manto de Gavarnie y Guara-Gèdre (Millán Garrido *et al.*, 2006).

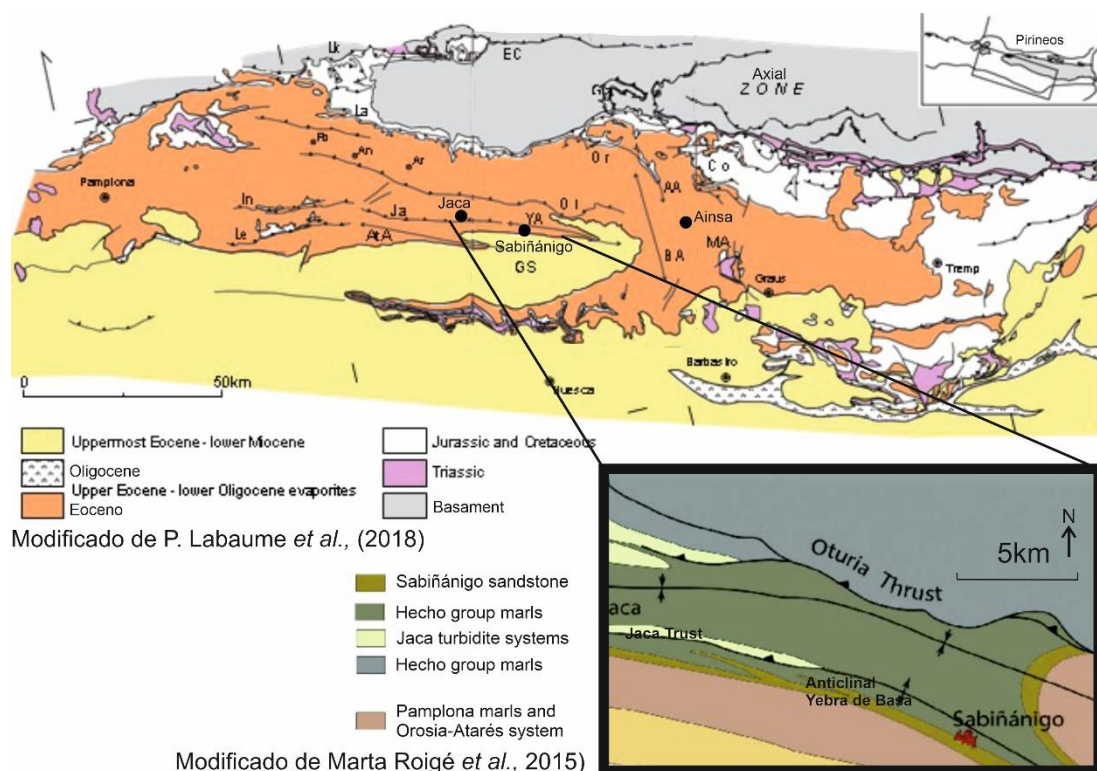


Figura 6: Mapa geológico simplificado del Surpirineo. Se identifican los materiales pre-orogénicos (basamento de la zona axial, evaporitas del Triásico y depósitos jurásico-cretácicos), sin-orogénico (Eoceno) y post-orogénico (Oligoceno-Mioceno) (Modificado de Labaume y Teixell, 2018). Ampliación del mapa geológico de la concesión Serrablo con sus principales estructuras: El cabalgamiento de Jaca, Oturia y el anticlinal volcado de Yebra de Basa (Modificado de Roigé *et al.*, 2015).

3.2.2. Geología de la cuenca de Jaca

La cuenca terciaria de Jaca es una cuenca con estructura *piggy-back* dentro del contexto de cuenca orogénica de antepaís (Cámara *et al.*, 1986). Su sedimentación es sin-orogénica al orógeno pirenaico. Los sedimentos de la cuenca se depositan entre el Cretácico superior y el Mioceno, acorde con la evolución de los Pirineos (Labaume y Teixell, 2018). La cuenca de Jaca se puede considerar como un sinclinal asimétrico limitado entre las Sierras Interiores influenciadas por la zona axial y las Sierras Exteriores. El mapa paleogeográfico del Lutecio temprano (Figura 5) muestra la deposición de los principales sedimentos de la cuenca: Las turbiditas eocenas que constituyen el Grupo Hecho.

El mapa geológico del yacimiento de Jaca (Figura 6) se subdivide en 3 partes de norte a sur: El cabalgamiento de Oturia que conecta con la zona axial, la cuenca turbidítica de Jaca y sinclinal de Guarga, divididas por el cabalgamiento de Jaca. El cabalgamiento de Jaca (Figura 6) hacia el este de la cuenca se convierte en el anticlinal de Yebra de Basa. El anticlinal volcado de Yebra de Basa se ha interpretado como la continuidad superficial de las ramificaciones del manto de Guara (Figura 7) (Teixell y García-Sansegundo, 1995). Este anticlinal está ubicado al S de la localidad de Sabiñánigo. La formación del anticlinal de Basa durante el Bartoniano generó una migración del epicentro al O (Muñoz *et al.*, 2018). Este evento caracteriza a la cuenca como asimétrica en su sedimentación, generando mayor espesor en las capas sedimentarias como se puede observar en los sondeos (Anexos 1-5).

La estructuración tectónica de la cuenca de Jaca se constituye por pliegues y cabalgamientos con vergencia hacia el S, con dirección NNE-SSO. La intensidad de deformación decrece en toda la cuenca de N a S. El sistema de cabalgamiento de Larra desde las Sierras Interiores deforma al Grupo Hecho. Estos cabalgamientos superiores se unen en el cabalgamiento basal de Gavarnie al norte. (Figura 7). Se desarrolla una primera etapa, donde el sistema de Larra forma duplex y pliegues en el Grupo Hecho. En una segunda etapa bascula todo el sistema de cabalgamientos al S, causado por una reactivación del manto de Gavarnie (Muniesa y Liesa, 2014). Este segundo evento de deformación es el que genera las estructuras dominantes.

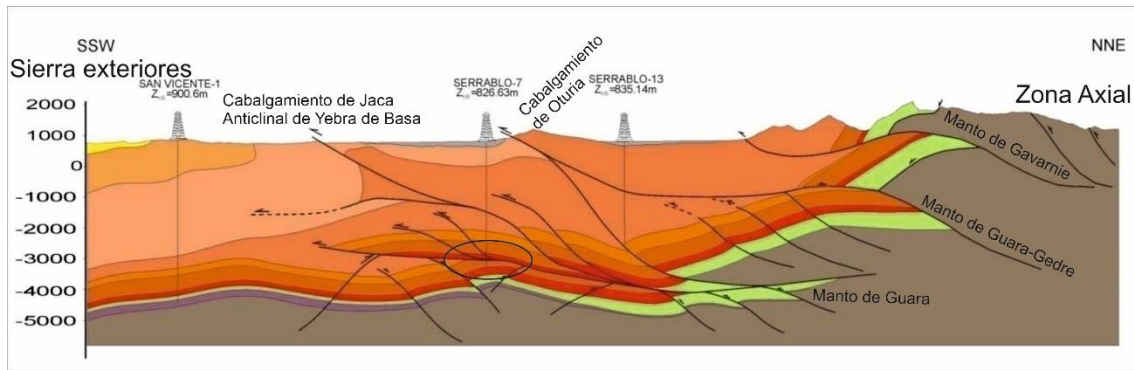


Figura 7: Corte estructural del yacimiento Serrablo. Se observan los diferentes mantos regionales del Pirineo y en superficie las estructuras de Oturia y Jaca del este de la cuenca de Jaca (Modificado de Klimowitz y Hernández, 2021).

3.2.3. Estratigrafía del yacimiento Serrablo

La sedimentación principal del yacimiento Serrablo dentro la cuenca de Jaca corresponde al Eoceno. Se trata de una sedimentación sinorogénica marina profunda, representada por el Grupo Hecho. La base del yacimiento Serrablo se ha podido conocer por el sondeo serrablo-1 (Anexo 1) y su informe de testificación asociado. El Paleozoico empieza a 5239 m, descrito como calizas grises-negras que pasan de arenosas a arcillosas. Las *facies Buntsandstein* (Triásico) empieza a 4986 m, descrito como arcillas rojas intercaladas con areniscas blancas con cementos silíceo.

El Cretácico superior conforma la base estratigráfica extendida en todo el yacimiento, colocándose directamente sobre el Paleozoico en afloramientos. La extensión del *Buntsandstein* es incierta aún. Las primeras capas cretácicas son calizas bioclásticas pertenecen al Santoniense y Campaniense. Por encima, se depositan calizas arenosas, lutíticas y dolomíticas con pequeñas intercalaciones de areniscas y lutitas. Esta unidad se ha datado por su registro fósil como Maastrichtiense inferior (Gil Peña *et al.*, 1996).

Las facies del Garumniense marcan el límite entre el Cretácico-Paleógeno. Son facies continentales de color rojizo que se encuentran en los sondeos (Anexo 1-5) con espesores medios de 100 m. Representan un buen nivel guía para correlacionar los distintos sondeos. Las calizas de plataforma terciarias por encima del Garumniense se dividen en dos unidades de Dolomías y Calizas. La Formación Salarons de edad paleocena está compuesta por dolomías sacaroideas competentes de ambiente de *lagoon* (Gil Peña *et al.*, 1996). La formación Gallinera se constituye de calizas masivas blancas a calizas arenosas de carácter más calcáreo a techo. Las calizas masivas son *facies arrecifales* y coralinas (Gil Peña *et al.*, 1996) del Ilerdiense.

El espesor medio en los sondeos (Anexo 1-5) es de 500 m, pero el real no tendrá valores tan altos, pues el buzamiento de las capas da valores sobredimensionados. Se llega a esta conclusión a partir de la comparación con otros espesores al N del yacimiento que tienen espesores de 135 m (Gil Peña *et al.*, 1996). La estructura de fallas y pliegues del yacimiento refuerzan que los buzamientos sean considerables.

De forma concordantes, se colocan las Calizas de Alveolinas frecuentes en la cuenca Tremp-Graus del E. Esta formación es un nivel guía para las sierras interiores. Se constituyen por ser calizas tableadas bioclásticas de *packstone* de Alveolinas (Gil Peña *et al.*, 1996). Esta unidad presenta el contacto erosivo con el Grupo Hecho en la cuenca de Jaca. Como se puede ver la columna cronoestratigráfica (Figura 8), el Grupo Hecho onlapa al S con las formaciones de Boltaña y Guara al sur de cuenca de Jaca.

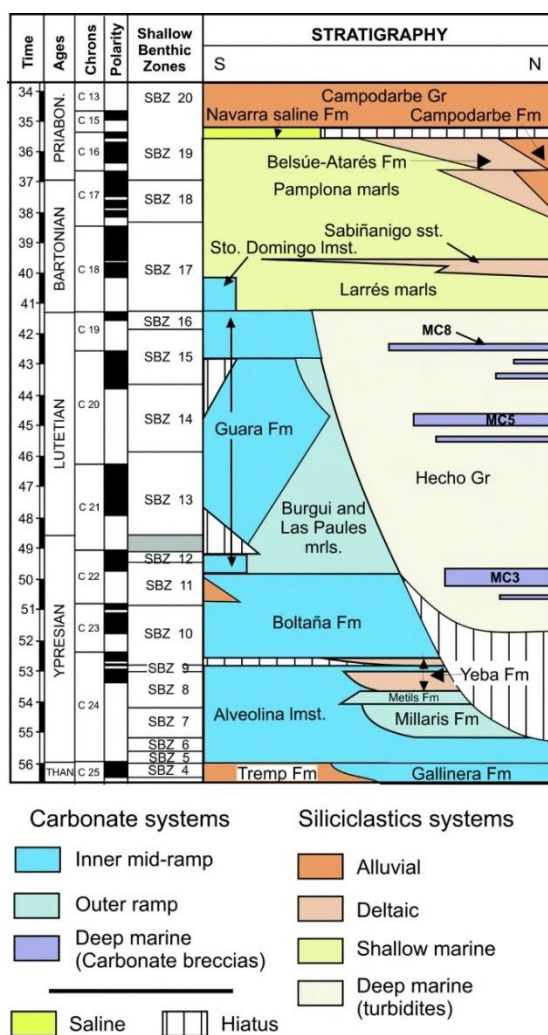


Figura 8: Columna cronoestratigráfica del Paleoceno y Eoceno para el margen carbonático del antepaís entorno a la cuenca de Jaca. Se pueden ver los contactos entre todas las unidades que se están describiendo del yacimiento (Barnolas *et al.*, 2019).

El Grupo Tremp (Figura 8) es una clasificación que engloba a las formaciones sedimentarias del Cretácico superior (Maastrichtiense superior) y Paleoceno (Agirrezabala *et al.*, 2004). Es frecuente que utilizarla para sintetizar la cantidad de formaciones para estudiar la sedimentología del Eoceno. Debido al estudio del almacén inferior que se encuentra en dichas formaciones de, se ha considerado mantener una división más amplia.

El Grupo Hecho se constituye por sucesiones de sedimentos margosos y arenosos, generados en la parte distal de un gran sistema turbidítico que drenaba desde el este hacia el oeste, en la cuenca de antepaís (Montes Santiago, 2002). Esta es una unidad de grandes dimensiones y gran extensión, representando la mayor parte del afloramiento en superficie del yacimiento Serrablo. Este grupo tienen una edad Ypresiense – Luteciense (Montes Santiago, 2002). En profundidad, los sondeos (Anexo 1-5) miden un espesor medio de 3000 m que debido a su deformación no representan el espesor real. El Grupo Hecho se compone por grandes conjuntos de facies: Las facies de margas y arenas finas turbidíticas y facies intercaladas de brechas carbonáticas, denominadas como megacapas.

Las megacapas, o SPECMs (*South Pyrenean Eocene carbonate megabreccias*) (Payros *et al.*, 1998) son acumulaciones puntuales por resedimentación de carbonatados erosionados en plataformas meridionales del antepaís (forebulge). Por tanto, pese a que sean coetáneos a las turbiditas del Grupo Hecho, su origen sedimentario es distinto. Los SPECMs son exclusivos de la cuenca de Jaca, donde se han definido 9 capas (MT-1 a MT-9) (Payros *et al.*, 1998). En la Figura 9 se muestra la estratigrafía interna de las SPECMs.

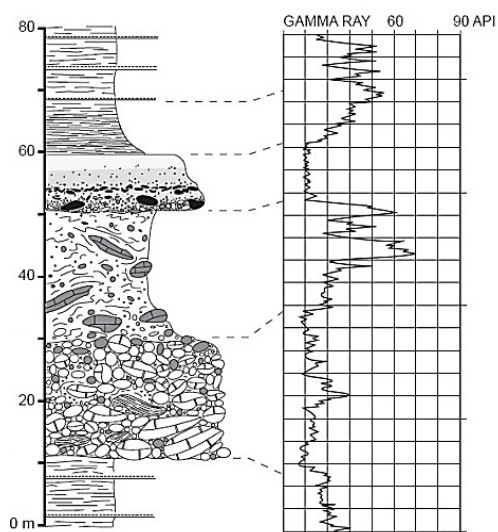


Figura 9. Columna estratigráfica sintética de las megacapas del Grupo Hecho, donde se indica su respuesta con la diagráfia Gamma Ray del nivel del mar. (Payros *et al.*, 1998).

Su sedimentación se produce por flujos de alta densidad compuestos por escombros erosionados cohesivos. En los sondeos (Anexos 1-5) miden una potencia media de 100m. Se ha propuesto como desencadenante de la resedimentación de los carbonatos eventos sísmicos o una pendiente extrema en el margen de cuenca (Barnolas y Teixell, 1994). Payros (1998) propone que el detonante de la sedimentación es una combinación de la actividad sismo-téctónica y la caída relativa del nivel del mar.

Estas megacapas presentan unas características petrofísicas muy diferentes de los materiales finos que las rodean, lo que las han convertido en los buenos almacén de gas que son en la actualidad. Su porosidad es secundaria formada por fracturas (Cámara *et al.*, 1986; Payros *et al.*, 1998). A nivel regional, todos los cuerpos tienen una

dirección OSO y ONO, provenientes de la parte oriental de la Cuenca de Ainsa separada de la Cuenca de Jaca por el anticlinal de Boltaña (Figura 9).

Se han definido y modificado numerosas veces la estratigrafía del Grupo Hecho en relación con la cuenca Tresp-Graus por distintos autores, pero la clasificación elegida ha sido la de Das Gupta y Pickering, (2008) que divide el Grupo Hecho en 5 grandes unidades y además las correlaciona con la cuenca de Ainsa con tres petrofacies (Figura 9): turbiditas inferiores, las unidades de Torla y Broto, la unidad de Cotefablo y unidades de Banastón-Fiscal-Jaca.

Das Gupta y Pickering (2008) concluyen que la mezcla de composiciones petrográficas se debe al control sintectónico que va erosionando materiales previos. Los terrígenos provienen de la exposición aérea del orógeno Pirenaico. El carbonato intracuenal proviene de la plataforma marginal o de la propia erosión. El carbonato extracuenal proviene de la erosión de los anticlinales de mediano y Boltaña. El anticlinal de Boltaña aparte de dividir ambas cuencas controla la sedimentación del Grupo hecho en la cuenca de Jaca (Figura 9).

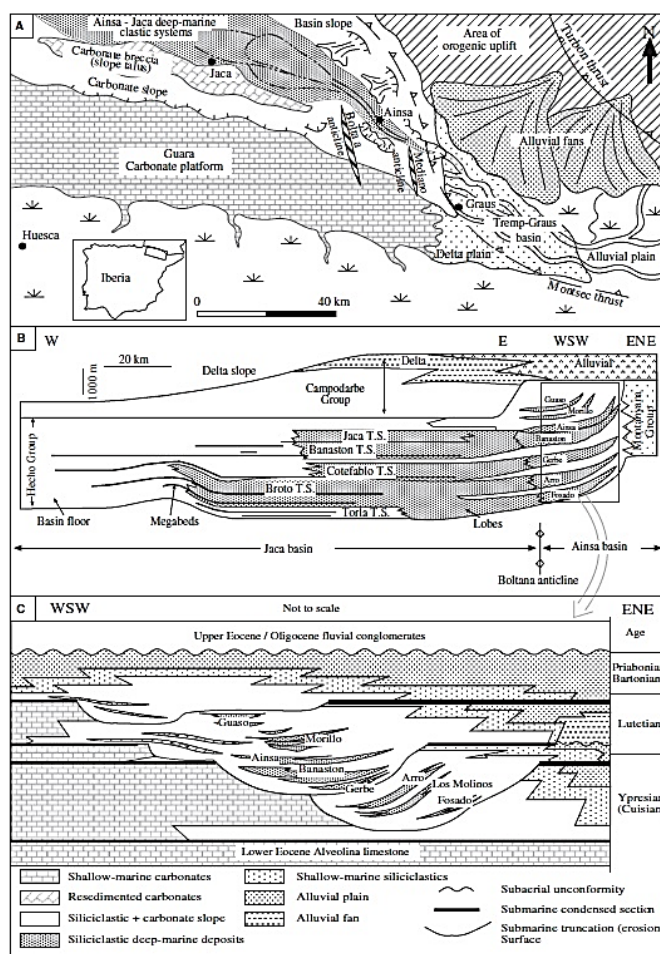


Figura 10: A) Mapa paleogeográfico del Luteciense temprano B) Correlación entre las unidades del Grupo Hecho en la cuenca de Jaca y Ainsa C) Gráfico cronoestratigráfico de la sedimentación del Grupo Hecho en el este de cuenca de Jaca (Das Gupta y Pickering, 2008).

La subunidad superior de Jaca marca la transición final de turbiditas a las margas de Larrés de la plataforma siliciclástica (Montes Santiago, 2002). Es la última unidad dentro del yacimiento Serrablo que se va a explicar en detalle, el resto de la estratigrafía del Eoceno se puede ver en la columna cronoestratigráfica de la Figura 8.

3.3. Cronología del yacimiento Serrablo

La concesión Serrablo (Jaca, Huesca) posee una historia de exploración y explotación de distintos recursos geológicos. La Compañía *Phillips Oil Co.* inició exploraciones en el año 1962, renunciando a la concesión otorgada después de cuatro años de estudios. Posteriormente el I.N.I. (Instituto Nacional de Industria), con las empresas asociadas Hispanoil y Eniepsa continuó la exploración de estos permisos, realizando campañas sísmicas que permitieron delimitar, entre otras, una estructura cercana a Sabiñánigo (IGME, 1981).

El primer sondeo (Serrablo-1) (Anexo 1) se comenzó a perforar en Isín (término municipal de Sabiñánigo) el 28/01/1978. Alcanzaría una profundidad de 5.278 m. tras atravesar tres zonas perfectamente diferenciadas: la sedimentación turbidítica entre 1.500 - 2.900 m. con posibilidades interesantes de gas; una serie carbonatada (Eoceno-Cretácico Superior) hasta 3.850 m., formando una buena estructura de unos 70 km.2 de superficie; y, por último, una tercera unidad hasta los 4.900 m. de Eoceno carbonatado basal. Dichos resultados mostraban tres posibles yacimientos. Se dio prioridad al reconocimiento de los dos almacenes superior e intermedio, independientes entre sí. Con este objetivo, se iniciaron los sondeos Serrablo-3 y 5 (Anexo 5) para la investigación de la zona superior y el sondeo Serrablo-4 (Anexo 2) para la zona intermedia. Al perforarse el segundo sondeo de la serie Serrablo-3, en la cuenca del río Aurín se encontró registró gas natural. Los siguientes sondeos Serrablo-4 y 5 dieron resultados positivos también, confirmando la existencia de un yacimiento en las megacapas dentro de la sedimentación turbidítica, estimándose el yacimiento de unas reservas del orden de los 25.000 millones de metros cúbicos de gas como mínimo (IGME, 1981).

A partir del año 1981 se inició el aprovechamiento comercial del gas en Sabiñánigo, localidad próxima al yacimiento de Isín, que veía revalorizadas así sus posibilidades industriales tanto por la ampliación de las empresas localizadas. De la misma forma, a partir de 1983 se inició la comercialización del gas con la construcción y montaje del gasoducto Serrablo-Zaragoza, con ramal distribuidor a las principales poblaciones de la provincia de Huesca (IGME, 1985). Su explotación cesa en 1989 por el agotamiento de las reservas de gas natural (REAL DECRETO 1200/1989). Desde entonces, se fueron cambiando la concesión entre distintas empresas, hasta que finalmente en 1995, Enagás obtuvo la concesión de explotación para almacenamiento subterráneo de gas natural (BOE, 1995). Dicha concesión se renovarí en 2013 nuevamente por Enagás (Orden IET/1119/2013).

El yacimiento Serrablo es por tanto el primer lugar de almacenamiento de gas en España, al que luego seguirán Yela (Guadalajara) y Gaviota (Bizkaia). Para el almacenamiento de gas, en Serrablo solo se utilizan los dos almacenes superior e intermedio con una capacidad total de 1.100 m³. La propuesta de explotación geotérmica de este trabajo corresponde al tercer almacén de carbonatos del Eoceno basal y el techo del Cretácico superior.

3.4. Serrablo como yacimiento geotérmico

El interés geotérmico en la zona central de la cuenca Surpirenaica se recoge por primera vez en la “Memoria de estudio de posibilidades de explotación de energía geotérmica en almacenes profundos de baja y media temperatura del territorio nacional” (IGME, 1981). Específicamente, reconoce al yacimiento Serrablo como la mejor zona para explotación geotérmica de media entalpía, debido a que varios sondeos de explotación de gas (Serrablo 1, 4 y 7) cortaron niveles acuíferos a 3.500 m de profundidad, con valores de temperaturas entre 130 y 160°C.

Klimowitz y Hernández (2021) publicaron en Serrablo-7 temperaturas de 125-150°C en el acuífero termal de espesor de 190 m., entre 3660-3850 m. En el sondeo Villanovilla, a partir de diagrfías sónicas, calculan una porosidad sónica de entre 2-7% dependiendo de la litología. Los tramos de matriz dolomítica alcanzaban el 7%. Concluyen también que las diagrfías sónicas indican la presencia de niveles fracturados. Este argumento puede ser correcto, debido que la porosidad del yacimiento de gas natural de Serrablo provenía también de fracturas. También hay medidos en la concesión gradientes térmicos (Anexo 1-5), donde Serrablo-7 presenta un valor máximo de 3,35°C/100m.

El yacimiento Serrablo se clasifica como un yacimiento geotérmico conductivo de tipo orogénico. Es una cuenca sedimentaria caliente profunda que, según la subclasificación de la geotermia de alta entalpía de la tabla 2 propuesta por Díaz Martos (2022), se podría definir como de media temperatura.

Tabla 2: Subclasificación de yacimientos geotérmicos de alta entalpía (basado en Díaz Martos, 2022).

Temperatura (°C)	Entalpía (KJ/kg)	categoría
T < 125°C	H < 500	Agua caliente de baja temperatura en una sola fase.
T < 225°C	H < 1000	Agua caliente de media temperatura en una sola fase.
225 < T < 270°C	1000 < H < 1100	Fluido bifásico de alta temperatura bifásico de baja entalpía
250 < T < 330°C	1500 < H < 2000	Fluido bifásico de alta temperatura bifásico de alta entalpía
250 < T < 330°C	2600 < H < 2800	Fluido bifásico de alta temperatura con vapor dominante

5 METODOLOGÍA

El apartado de metodología va a ir describiendo todo el flujo de trabajo (Figura 11) creado a propósito para a la elaboración del estudio. Se ha diseñado el flujo de trabajo de tal forma que permita ser iterativo y utilizarse de forma versátil en cualquier estadio de la exploración o explotación geotérmica.

Flujo de Trabajo

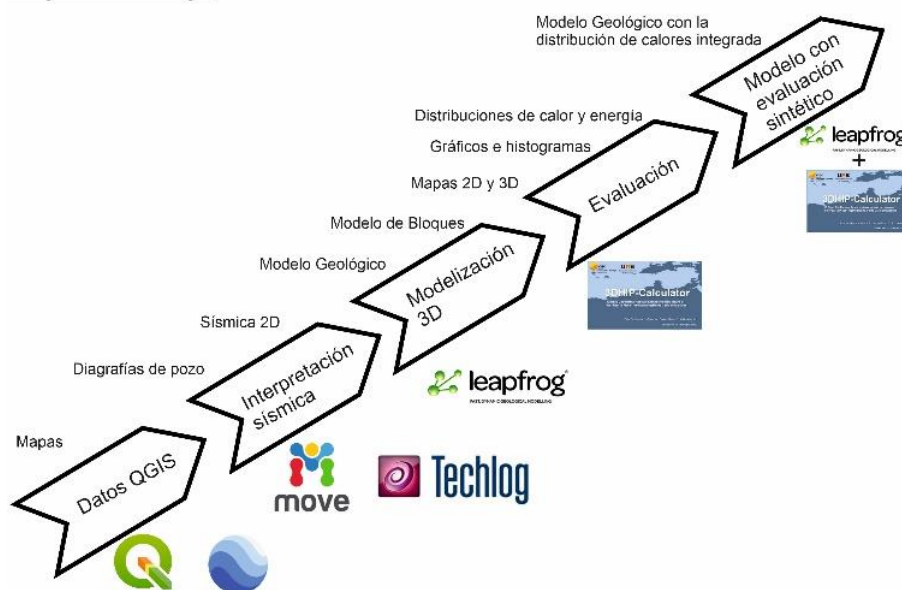


Figura 11. Flujo de trabajo del presente estudio. Se indican los distintos tipos de datos que se manejan y los programas utilizados en cada fase del proyecto.

A partir del archivo “Contribución de la explotación petrolífera al conocimiento de la geología de España” del IGME (1987) se ha obtenido la información de la testificación de los pozos del yacimiento Serrablo. Se han digitalizado las columnas litológicas (Anexos 1-5) de sondeos añadiendo y modificando los datos según diferentes fuentes bibliográficas. La información adicional se ha obtenido de la hoja MAGNA nº177 (Gil Peña *et al.*, 1996), la publicación de (Klimowitz y Hernández, 2021) y diferentes informes técnicos específicos de los sondeos Serrablo 1, 4 y 7. Además, se han obtenido algunos informes de testificaciones de los sondeos Serrablo 1 y Jaca-2 de la empresa Eniepsa. Con estas dos fuentes de información, se han realizado las columnas de sondeos del yacimiento Serrablo (Anexos 1-5) para la correlación estratigráfica del yacimiento. Tanto las columnas como las correlaciones (Anexos 6 -7) entre sondeos se han realizado mediante el programa de dibujo CorelDRAW 2019.

Se han combinado la topografía y el mapa de la zona de estudio trabajando de forma conjunta con QGIS Desktop 3.10.2 y Google Earth Pro. QGIS se ha utilizado para modificar datos vectoriales y ráster en la topografía, mapas temáticos y datos

superficiales que han sido necesarios en los procesos posteriores del estudio. Google Earth Pro se ha utilizado para ubicar todos los elementos superficiales del yacimiento con visión satelital y de elevación.

Las líneas sísmicas de reflexión cedidas por Repsol (en formato SEG Y) pertenecen al grupo JAT, de las cuales se han seleccionado las más relevantes para la concesión Serrablo (Anexos 8-11). Su estudio se ha realizado con el *software* Move2019.

Los datos de pozo suministrados también por Repsol pertenecen al grupo de sondeos de Serrablo y Jaca (Figura 4). Los datos consisten en coordenadas y distintas diagráfias (logs) realizadas en formato LAS. Los datos de las diagráfias adjuntados en los anexos con los sondeos se han realizado con el *software* Techlog 2019 de la empresa Schlumberger. Estas diagráfias albergan numerosos errores o falta de datos que muchas veces impiden su uso. El Gamma Ray (radiactividad en grados API) y las resistividades (ohm·m) se encuentra en todos los pozos en buen estado, por lo que ha sido la base de la interpretación (Anexos 1-4). Específicamente en algunos pozos se ha utilizado adicionalmente RHOB (densidad en g/cm³), NPHI (porosidad en m³/m³) (Figura 12). El log ΔT (delta time) en los archivos LAS define la velocidad en (s/m) y para una mejor interpretación de los datos se ha transformado a us/ft. La transformación y visualización de los logs se ha realizado con el *software* Techlog 2019 de la empresa Schlumberger.

Unidades de las diagráfias

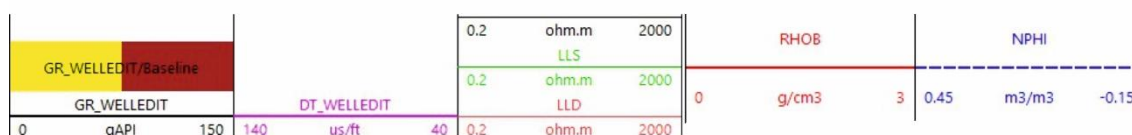


Figura 12. Cabeza de las diagráfias donde se muestran las unidades de cada parámetro estudiado (Creado a partir del programa Techlog).

El estudio sísmico del yacimiento se ha realizado con el programa Move2019. Las líneas sísmicas cedidas por Repsol (en formato SEG Y) pertenecen al grupo JAT, de las cuales se han seleccionado las líneas más relevantes para la concesión Serrablo (Anexos 8-11). La interpretación se realizó con las líneas sísmicas en tiempo (TWT). Finalmente se realizó la conversión a profundidad (Depth en m) para exportar los datos. Se ha seguido este proceso para evitar interpretar datos sísmicos procesados y poder trabajar con los datos menos deformados posibles. Ha sido necesario primar la nitidez, debido a la mala resolución de la sísmica terrestre antigua. La conversión a profundidad se ha

realizado a partir del método de los polígonos a los que se le van añadido diferentes intervalos de velocidades (Figura 13). Se han definido las 3 unidades de polígonos en relación con grupos litológicos con parámetros de velocidades parecidos: Grupo Hecho (negro), Carbonatos (azul) y Paleozoico (naranja). Las velocidades obtenidas mediante este método se han comparado y cotejado con las testificaciones de los sondeos (Anexos 1-5). Se crean los polígonos en toda la línea sísmica y posteriormente se añaden los parámetros petrofísicos en el apartado de estratigrafía.

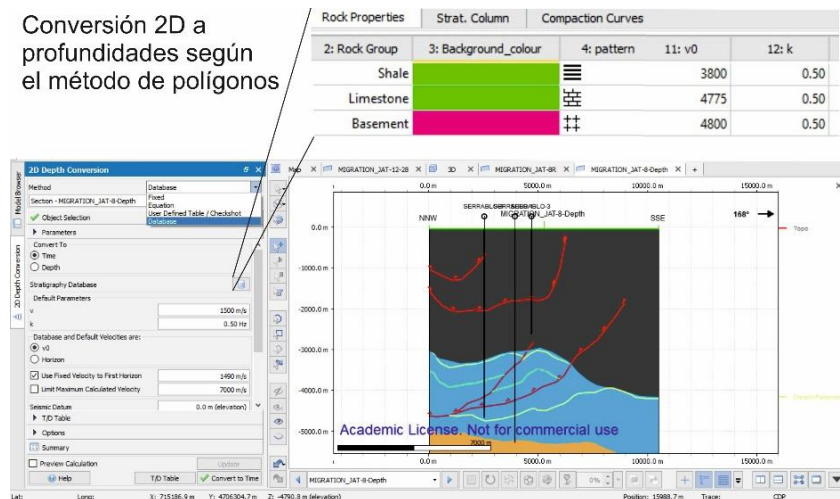


Figura 13: Conversión 2D en profundidades según el método de los polígonos (Creado a partir del programa Move).

Con las fallas y horizontes definidos en 3D en forma de superficie, se han exportado en formato DFN, shapefile y grid 3D. Estos formatos son los compatibles con el software con el que se ha realizado el modelo geológico 3D, *Leapfrog Geothermal*. El software *Leapfrog Geo* de la empresa neozelandesa Seequent se ha utilizado por su versatilidad de opciones y permitir generar un modelo de bloques con el que se puede realizar la evaluación geotérmica. El modelo geológico se ha construido a partir de las superficies y líneas interpretadas de *Move2019*. Se ha utilizado también los datos superficiales de los mapas geológicos regionales. Por último, para tener datos empíricos, se han digitalizado los sondeos con datos litológicos.

Se han digitalizado y transformados los datos de pozo, a partir de los archivos LAS y los informes de testificación de los pozos. Estos últimos se han obtenido del archivo “Contribución de la explotación petrolífera al conocimiento de la geología de España” del IGME (1987). Con los datos finales de pozo se han creado tres tablas en formato CSV (*Comma Separated Values*) para su incorporación como datos de sondeo en *Leapfrog: Collar* (datos de coordenadas y distancias), *survey* (inclinación o variaciones) y geología (datos geológicos específicos a mostrar).

Por último, se ha utilizado el *software* 3DHIP_Calculator para evaluar el recurso geotérmico. Es un *software* geotérmico diseñado en MATLAB por el Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña en colaboración con la Universidad de Barcelona a partir del método volumétrico “*Heat in place*” (HIP) descrito en el apartado de fundamentos geotérmicos.

Para realizar la evaluación del recurso en el programa 3DHIP_Calculator se ha importado el modelo en bloques 3D generado en *Leapfrog* y dividido en cubos (voxels) de 300x300x300 m, en formato CSV (del inglés comma-separated values).

Para la evaluación geotérmica se han introducido los datos de la Tabla 3 que se explican a continuación.

Tabla 3: Datos utilizados en la evaluación del potencial geotérmico mediante 3DHIP-calculator.

Datos introducidos en el modelo		
Gradiente geotérmico (Serrablo-7)	33,5°C/Km	Klimowitz y Hernández, 2021
Densidad roca reservorio	2682 kg/m ³	Techlog 2019
Calor específico del reservorio	820 kJ/kg·°C	UNE 100715-1: 2014
T°C media en Jaca-Sabiñánigo	9,4°C	AEMET
Densidad del fluido	1020 kg/m ³	Por defecto
Capacidad térmica del fluido	4800 kJ/kg·°C	Por defecto
Factor de recuperación	0,10	Por defecto
T°C de reinyección	30°C	Por defecto
Factor de eficiencia	0,85	Por defecto
Factor de planta	0,95	Por defecto
Tiempo de vida de la planta	25 años	Por defecto

Algunos de los datos de la tabla corresponden a parámetros de las ecuaciones para determinar el calor recuperable del reservorio (H_{rec}) y la energía almacenada HIP: “*Heat in Place*”, definidos en el apartado de fundamentos geotérmicos. La densidad de la roca se ha obtenido de las diagráfias de los sondeos (Anexos 1-4). Debido a la falta de datos, se han usado algunos valores propuestos por defecto por el programa, como el Factor de recuperación, la T°C de reinyección, el Factor de eficiencia, el Factor de planta y el tiempo de vida de la planta. Todos los valores propuestos por defecto son razonables como punto de partida a falta de datos más realistas.

6 RESULTADOS y DISCUSIÓN: CARACTERIZACIÓN DEL YACIMIENTO

6.1. Columnas de sondeos y correlación

A partir del archivo “Contribución de la explotación petrolífera al conocimiento de la geología de España” del IGME (1987) se ha obtenido la información de la testificación de los pozos del yacimiento Serrablo. Se han digitalizado las columnas litológicas (Anexos 1-5) de sondeo añadiendo y modificando los datos según diferentes fuentes bibliográficas. La información adicional se ha obtenido de la hoja MAGNA nº177 (Gil Peña *et al.*, 1996), “*Geophysical hydrocarbon exploration data and Deep Geothermal research: Two feasibility projects in Spain*” (Klimowitz y Hernández, 2021) y diferentes informes técnicos específicos de los sondeos Serrablo 1, 4 y 7.

Se realizaron distintas correlaciones N-S y E-O en torno a la concesión Serrablo a partir de los sondeos con los pocos datos disponibles del momento para focalizar el espacio del tercer almacén profundo. Los cortes resultantes NO-SE, NE-SO y E-O (Anexo 6-7) representan la fase incipiente del estudio, pero dejan una serie de conclusiones:

-El corte NO-SE indica que existe correlación del almacén entre los sondeos serrablo1 y 4. Serrablo 7 en el corte NE-SO define el almacén con buenos datos de temperatura 125 - 150°C (Klimowitz y Hernández, 2021) pero no se puede correlacionar con Serrablo 13, que termina justo en las capas superiores al almacén. La mayoría de los sondeos presentan el mismo problema, sin llegar a cortar el almacén.

-En el corte E-O se observa este problema debido a que los sondeos tienen una profundidad máxima de 3500 m. El objetivo de los sondeos de la época era la exploración las megacapas del Grupo Hecho para gas, por lo que según se desarrolló la campaña de sondeos, estos se fueron precisando por encima de los 3000 m. En el corte E-O se ha podido observar la correlación de las megacapas, pero no del almacén Eoceno inferior – Paleoceno de interés. Únicamente, se ha podido correlacionar las primeras capas de carbonáticas del Eoceno con el objetivo de extrapolar donde se encontrarían.

-Se observa una profundización de las megacapas y del Grupo Hecho en los sondeos hacia el oeste. Ejemplifica su origen deposicional de una rampa de talud formada por el anticlinal de Boltaña. La migración del depocentro de la cuenca hacia el oeste por la formación de anticlinal de Yebra de Basa se refuerza con la correlación.

Por la cantidad de datos y conocimiento específico de un pequeño anticlinal como trampa estructural, el estudio prevé viabilidad en la parte este de la concesión Serrablo. Aunque se va a estudiar el reservorio para toda la concesión de Serrablo.

6.2. Interpretación de las Diagrafías

En posesión de la información de las diagrafías (Logs) suministradas por Repsol, se pudo definir mejor los límites del tercer almacén, así como una interpretación petrofísica básica del mismo. Debido a los numerosos errores en los archivos LAS, así como la no continuidad de algunas diagrafías en profundidad, se ha podido utilizar únicamente las diagrafías disponibles en Anexos 1-4.

Las diagrafías de los sondeos Serrablo 1, 4 y 7 al este de la concesión han sido las únicas que se han sido útiles para la interpretación del tercer almacén. Se definen unos límites máximos del almacén entre 3400 y 4000 m. A modo de comparación se ha interpretado diagrafías de Jaca-8, únicamente para ver sus valores a las mismas profundidades. Al ser parte del Grupo turbidítico Hecho presenta unas características muy distintas (Anexos 1-4).

Los resultados de interpretación de las propiedades corroboran la litología del almacén como carbonatos con presencia de fluido acuoso con baja porosidad, aunque aumentada por fracturas. Los resultados de cada grupo de diagrafías se han interpretado son:

-El Gamma Ray en los tres sondeos indica valores constantes muy bajo, próximos a 0 (gAPI). La inexistencia general de elementos radiactivos, indica que no hay capas de composición lutíticas en el almacén. A excepción de la parte inferior del almacén en Serrablo-7 (Anexos 1-4) que presenta capas de espesor considerable de lutitas.

-La resistividad tiene alta variación, ya que la respuesta eléctrica depende del fluido que este en la porosidad de la roca. Los picos de menor resistividad corresponden a capas porosas de carbonatos saturada que conduce mejor. La separación de las resistividades en dichas zonas corrobora la existencia de un fluido. Es fluido es acuoso debido a que en Serrablo-7 dispone de RHOB y NPHI y no se observa la existencia de ningún efecto gas. Este efecto hace que NPHI de porosidades subestimadas por la existencia de gas en los poros. Si observa el efecto arcilla en NPHI que de forma contraria sobrestima la porosidad.

-Por último, el log sónico (DT) (Anexos 1-4) en Serrablo 7 y 4 tiene valores constantes de 40us/ft, a excepción de pequeñas subidas de velocidad asociadas a las lutitas de la

parte inferior del almacén de Serrablo 7. El valor estadístico de carbonatos saturados en agua con porosidades entre 5-20% es para calizas de 54.0–76.9us/ft y para dolomías de 50.0–66.6us/ft (Schlumberger log Interpretation Charts). Las mismas litologías sin porosidad poseen valores de 47,6us/ft y 43,5us/ft respectivamente (Schlumberger log Interpretation Charts). En relación con el valor medio obtenido de 40us/ft indica una gran compactación de los carbonatos que coherentemente conlleva el cierre de la porosidad. Esto se corrobora con los valores obtenidos del NPHI en los anexos 1-4.

6.3. MODELIZACIÓN

6.3.1. Interpretación y modelización con *Move*

La primera parte de la modelización se ha realizado con el programa *Move*. Se han interpretado 5 líneas sísmicas 2D N-S y otras 5 líneas E-O en tiempo (TWT) con horizontes y fallas (figura 14). Las interpretaciones son propias, pero el estilo de interpretación estructural de las líneas se ha basado en los estudios previos de Labaume, P. y Teixell, A., (2018), Muñoz *et al.*, (2018) y Cámara P. *et al.*, (1986). Una vez se han correlacionado dichos horizontes y fallas, se ha realizado la conversión a profundidad (explicada en el apartado de metodología) y finalmente, se han generado superficies 3D para conocer su geometría.

La Figura 14 representa el total de líneas sísmicas cedidas por Repsol. También se encuentran marcados los distintos sondeos de los grupos Serrablo y Jaca. Las líneas verdes indican las líneas sísmicas utilizadas para la interpretación del yacimiento al este. Mientras que las líneas rojas indican las líneas complementarias necesarias para poder interpretar y modelizar toda la concesión. Se ha realizado primero la interpretación del yacimiento y a continuación se ha ido expandiendo en toda la concesión.

La interpretación inicial ha sido con las líneas sísmicas N-S porque se diferencian mejor las estructuras dominantes al ser perpendiculares. Las líneas E-O se han interpretado posteriormente utilizando los puntos de contacto con las otras líneas sísmicas. Se ha ido modificando y actualizando hasta que todas las líneas sísmicas han tenido una interpretación coherente con las demás y con sentido propio.

fallas que engrosan y deforman su espesor real. Posee una amplitud y frecuencia muy irregulares. Las capas con mayor amplitud y frecuencia se interpretan como las distintas megacapas y el resto con menor definición como las margas de cuenca turbidítica. Presentan una configuración reflexiva de subparalelo a ondulado.

6.3.1.2 Líneas sísmicas interpretadas

Las líneas sísmicas en TWT 2D utilizadas para este apartado se encuentran en Anexos 8-11. Se puede observar la línea sísmica limpia sin convertir en profundidad, así como con las interpretaciones. No corresponden a la totalidad de la interpretación modelado la cuenca de Jaca, pero corresponden a las más representativas. A continuación, se van a mostrar las líneas 2D perpendiculares a las estructuras de la cuenca. Estas se encuentran convertidas en profundidad por el método de intervalos de velocidades, donde a cada intervalo se le asigna un polígono con velocidad constante. La conversión a profundidad se encuentra explicada en detalle en el apartado de metodología. Dichas líneas sísmicas son de este a oeste: JAT-8R, JAT-12-28, JAT-109 y JAT-87V:

-JAT-8R y JAT-12-28 (Figura 15). Se observan en ambas líneas sísmicas el suave anticlinal que conforma la trampa del yacimiento. Este anticlinal se ha formado por el desplazamiento del cabalgamiento de Jaca según el mecanismo rampa-rellano. El cabalgamiento de Jaca se subdivide en dos fallas, una superior y otra inferior. La unidad de carbonatos del bloque superior del cabalgamiento sufre la flexión, formando inicialmente un denominado pliegue anticlinal por flexión de falla (Suppe, 1983). La flexión se produce en las rampas, mientras que en los rellanos se produce una relajación de las capas que continúan en paralelo su acortamiento. En los posteriores pulsos compresivos, se desarrollan las rampas que se ajustan más al mecanismo de un pliegue por propagación de falla (Suppe, 1983). En ambas líneas sísmicas se puede observar tanto las rampas que generaron el anticlinal, cómo la igualdad en el espesor de las unidades (Figuras 15 y 16).

El despegue principal del cabalgamiento de Jaca se inicia y asciende sobre una primera rampa hasta un rellano superior, superponiendo materiales más viejos sobre materiales más jóvenes. En JAT-8R se observa las rampas, mientras que de JAT-12-28 en adelante se observan mejor los rellanos con mayor desplazamiento. El cabalgamiento de Jaca tiene un desplazamiento máximo de unos 10 km hacia el oeste y va perdiendo desplazamiento hacia el este con unos 5 km. Se repite y sobrepone toda la unidad de carbonatos.

Por último, los horizontes de gran continuidad dentro del Grupo Hecho se han interpretado como las megacapas (verde oscuro). Son depósitos también sin-tectónicos

que se encuentran plegados y deformados por cabalgamientos menores. Aquí es donde se encuentran los almacenes superiores de gas. No se ha profundizado en su interpretación debido a que no corresponde con los objetivos del actual trabajo, pero son necesarios para entender el desarrollo estructural de la concesión y la cuenca de Jaca.

-JAT-109 (Figura 16). La base de la cuenca se mantiene horizontal en el techo del Paleozoico (color naranja). Se observan como los cabalgamientos de Jaca y Oturia tiene una expresión en forma de rellano más desarrollado que las anteriores. Las rampas ascienden en los materiales débiles del Grupo Hecho hasta aflorar en superficie. La unidad Cretácico-Paleoceno (verde amarillento) mantiene su espesor por encima y por debajo de la rotura del cabalgamiento de Jaca.

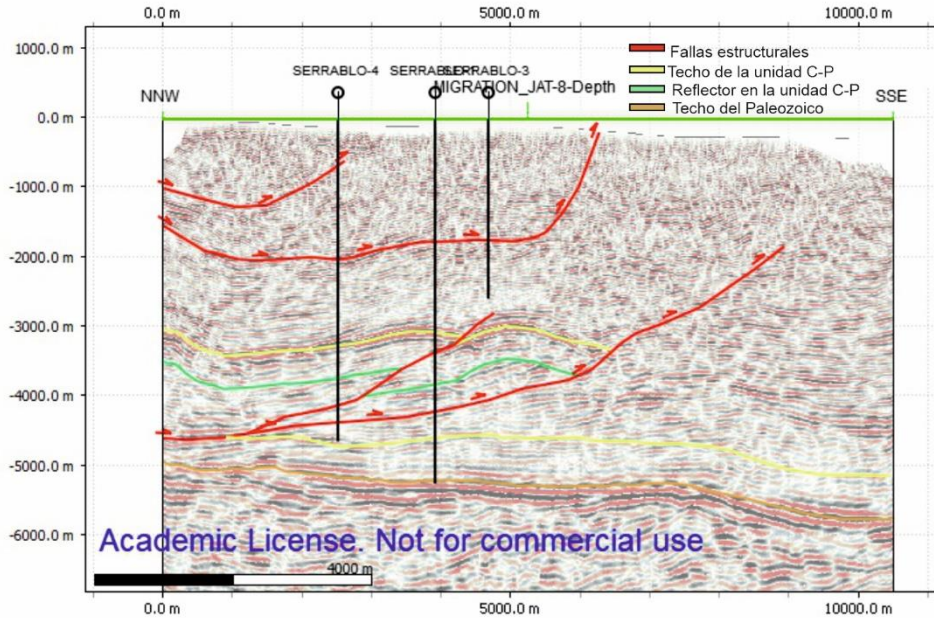
-JAT-87V (Figura 16). La base de la cuenca la marcada por el techo del Paleozoico (color naranja) se mantiene rectilínea también. El cabalgamiento de Jaca se subdivide en dos fallas, una superior y otra inferior como también se observaba en JAT-8R y JAT-12-28. El bloque levantado de la falla superior ha levantado parte del basamento del paleozoico y la unidad de carbonatos (verde amarillento). Ambas rampas se pierden en el Grupo Hecho sin llegar a aflorar en superficie.

Además de las interpretaciones, quedaría añadir que al este de la concesión de Serrablo, los perfiles sísmicos de Labaume y Teixell (2018) muestran que la repetición de carbonatos ya no existe. La pérdida de empuje se observa en el cambio lateral del cabalgamiento de Jaca al anticlinal de Basa. Este anticlinal es la expresión superficial del cabalgamiento a través de una estructura disarmónica compleja entre los carbonatos del Cretácico Superior-Eoceno y las formaciones clásticas débiles del Grupo Hecho. El anticlinal de Boltaña es un factor de control de la distribución de los diferentes esfuerzos de los cabalgamientos.

El cabalgamiento de Oturia levanta en JAT-87V (Figura 16) la unidad de carbonatos (verde amarillento). La dirección de esfuerzos es ONO-ESE con un desplazamiento de 4 – 5 km (Labaume, y Teixell, 2018). En JAT-12-28 también se observa en el límite Al N-NO, como el cabalgamiento de Oturia levanta la unidad Cretácica-Paleocena otra vez (Figura 16). Por lo tanto, al oeste de la concesión el desplazamiento de ambos cabalgamientos es mayor que en el este. El cabalgamiento de Oturia en el este pierde desplazamiento y como se puede ver en JAT-8R (Figura 15) se subdivide en cabalgamientos menores.

Depth Conversion

JAT-8R



JAT-12-28

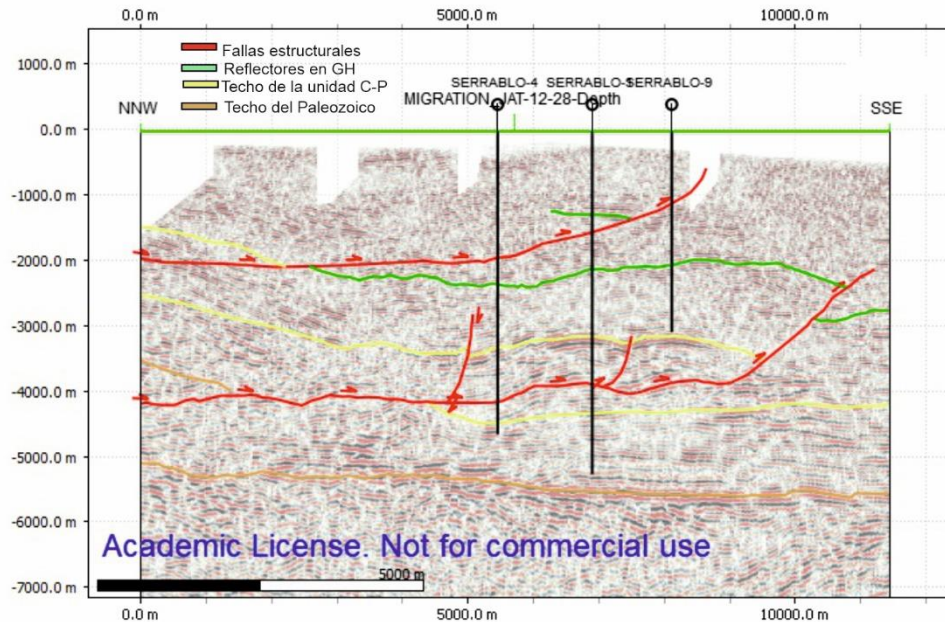
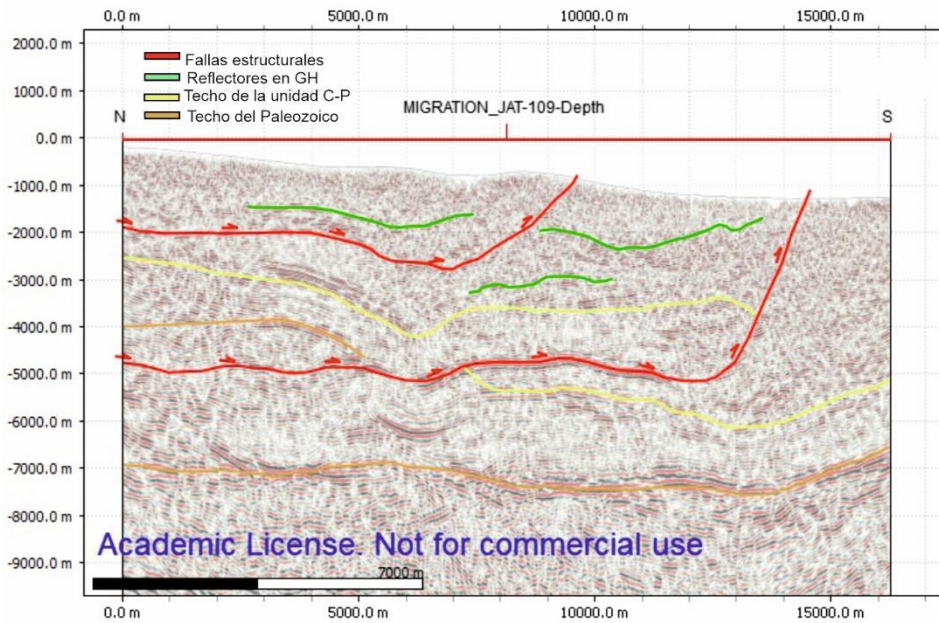


Figura 15. Líneas sísmicas 2D transformadas a profundidades de JAT-8R, JAT-12-28. Se observan los horizontes principales: Paleozoico (naranja), carbonatos (verde amarillento) y megacapas dentro del Grupo hecho (GH) (verde oscuro). El reflector verde claro de JAT-8R se encuentra dentro de la unidad de carbonatos C-P (Cretácico superior – Paleoceno). Se observan las estructuras: superior Oturia e inferior Jaca (rojo) (Move).

Depth Conversion

JAT-109



JAT-87V

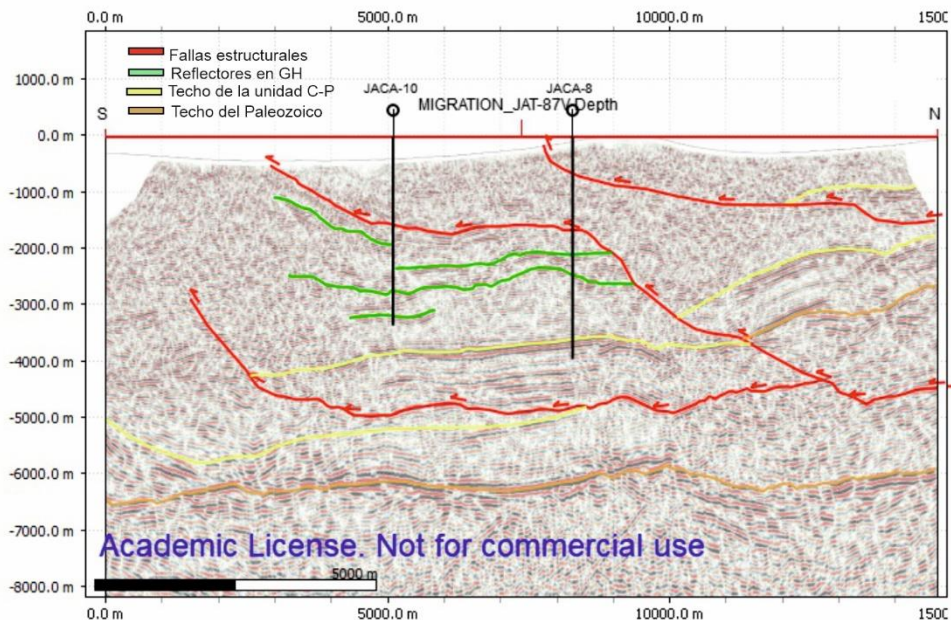


Figura 16. Líneas sísmicas 2D transformadas a profundidades de JAT-109, JAT-87V. Se observan los horizontes principales: Paleozoico (naranja), carbonatos (verde amarillento) y megacapas (verde oscuro). Se observan las estructuras: superior Oturia e inferior Jaca (rojo) (Move).

6.3.2. Modelización 3D con *Leapfrog*

Se han importado todos los datos sísmicos interpretados en *Move*, una vez convertidos a profundidad (Figura 15 y Figura 16). Se han utilizado específicamente las superficies y polilíneas de: El Paleozoico (Base de la cuenca), techos de la unidad 2 (Cretácico-Paleoceno) y las fallas de Jaca y Oturia. Se ha respetado los desplazamientos de la falla de Jaca en las superficies de Paleozoico y la unidad 2, importándose por separado. El estudio del cabalgamiento de Jaca en el este de la concesión es prioritario y se ha respetado todo lo interpretado del plano principal de falla (Figura 17D). Las ramificaciones del cabalgamiento de Jaca se han simplificado al plano de falla principal.

Se ha simplificado la falla de Oturia, sin levantar la unidad de carbonatos en el bloque superior, porque no es el objetivo del trabajo. Se ha decidido debido a la complejidad causada por la cantidad de fallas asociadas a Oturia dentro del Grupo Hecho, por lo que el modelo estructural superior se ha simplificado. Solo se ha utilizado la falla de Oturia que aflora al N en superficie.

Además de las interpretaciones sísmicas como esqueleto del modelo en profundidad, se han utilizado los datos cartográficos superficiales (IGN) y los litológicos de los sondeos. En estos datos no se ha simplificado la información importada a *Leapfrog*, debido a que son datos empíricos con mayor fiabilidad. Es más, se ha configurado el programa con la opción *snap to drill well* para que, en la interpolación de superficies y volúmenes resultantes, priorice los datos de pozo.

El resultado es el modelo geológico de la Figura 17. Muestra volumétricamente las tres unidades principales: Grupo Hecho (Verde oscuro), Unidad Cretácico-Paleoceno subdividida en Cretácico superior (morado oscuro) y Paleoceno (Verde claro), y finalmente el Paleozoico (morado). Cabe resaltar que el modelo resultante tiene mayor precisión en la mitad este por la cantidad de datos. La mitad oeste de la cuenca no posee sondeos que traspasan el Grupo Hecho, por lo que la continuidad de las capas en profundidad se ha basado únicamente en los resultados de la interpretación sísmica.

Para finalizar este apartado, se ha generado un modelo en bloques a partir del modelo geológico. Se ha utilizado una versión simplificada en la que Cretácico superior y Paleoceno se encuentran en la misma unidad (Figura 17C).

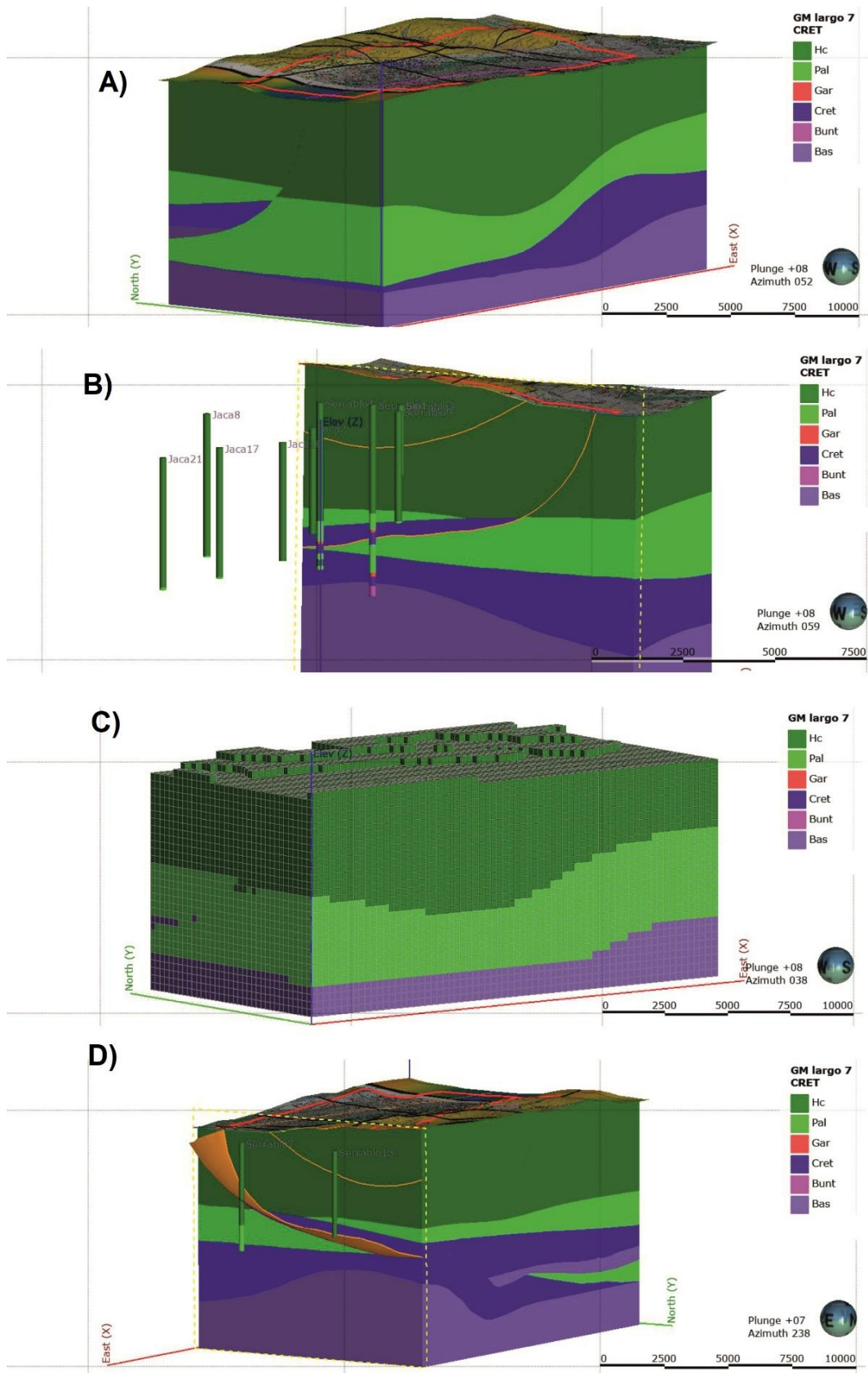


Figura 17. Imágenes de distintas vistas y cortes del modelo geológico de la concesión Serrablo. A) Vista general del modelo. B) Corte donde se observa el yacimiento geotérmico. El suave anticlinal se encuentra en el techo del Paleoceno, formado por el cabalgamiento de Jaca. C) Resultado del modelo en bloques, donde el Paleoceno y el Cretácico superior se unen en la unidad carbonática. D) Corte donde se observa el desplazamiento del cabalgamiento de Jaca en el yacimiento Serrablo (Leapfrog).

6.4. Evaluación geotérmica con el software 3DHIP_Calculator

A partir del modelo de bloques con celdas de 300x300x300 m (Figura 17C) realizado en *Leapfrog*, se ha exportado el archivo en formato CSV.

Se analizará mediante este *software* exclusivamente el recurso geotérmico de la unidad de carbonatos, para el que se ha establecido el límite del análisis entre 3.500-4.000 m. Además, se ha introducido un gradiente geotérmico de 33,5°C/Km, propuesto Klimowitz y Hernández (2021) en el pozo Serrablo-7. Así se obtiene la recta de distribución de temperaturas con la profundidad (Figura 18). Se identifican además en el gráfico las profundidades, superior (-3.500 m) e inferior (-4.000 m) del reservorio que se han impuesto para la evaluación. Se observa que el rango de temperaturas obtenido en esta franja de profundidades es coherente con los 125 – 150°C publicados por Klimowitz y Hernández (2021).

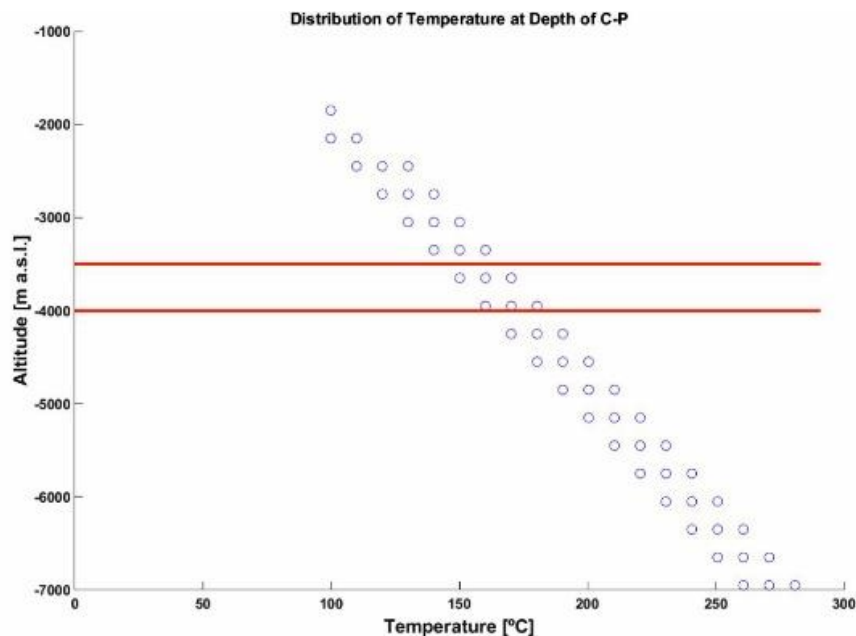


Figura 18. Gradiente geotérmico distribuyendo la temperatura en función de la profundidad, indicando el reservorio de estudio (3500 - 4000 m) (propio, tomado en 3DHIP-calculator).

A continuación, se introducen los parámetros enunciados en el capítulo de metodología, correspondientes al método volumétrico “*Heat in Place*”. Con estos parámetros, y siguiendo las ecuaciones del método, se generan las siguientes figuras:

Figura 19: Histograma de valores de energía almacenada en el reservorio (HIP) en pico Julios (3DHIP-calculator).

(PJ = 10⁻¹² J)

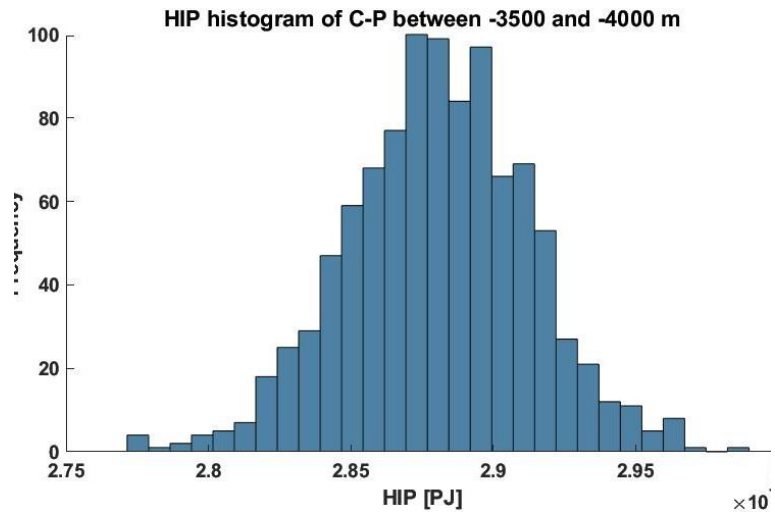
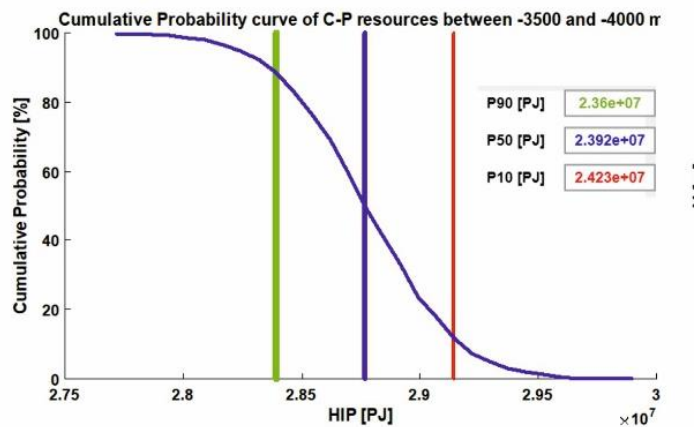


Figura 20: Curva de distribución de probabilidad acumulada de energía acumulada en el modelo 3D entre las profundidades especificadas (en este caso 3.500 – 4.000 m), identificando tres verticales que corresponden a la probabilidad de un 10% (baja confianza), 50% y 90% (alta confianza) de la estimación (3DHIP-calculator).



P90 = 2,36 · 10⁷ PJ = 23,6 · 10⁻⁶ J = 23,6 μJ

P50 = 2,39 · 10⁷ PJ = 23,9 · 10⁻⁶ J = 23,9 μJ

P10 = 2,42 · 10⁷ PJ = 24,2 · 10⁻⁶ J = 24,2 μJ

Figura 21: Gráfico de distribución de energía acumulada (en PJ) entre 3.500 – 4.000 m de profundidad con un 90% de probabilidad. Los valores mostrados se calculan como la suma vertical de los valores de los cubos del modelo con idénticas coordenadas X e Y, dividida entre el área de los cubos, en km², expresados en unidades PJ/km². Este gráfico se repite para probabilidades del 10% (baja confianza), 50% (media confianza) y 90% (alta confianza). En la figura se muestra únicamente el correspondiente a 90% que se ha seleccionado contemplar los valores más realistas (3DHIP-calculator).

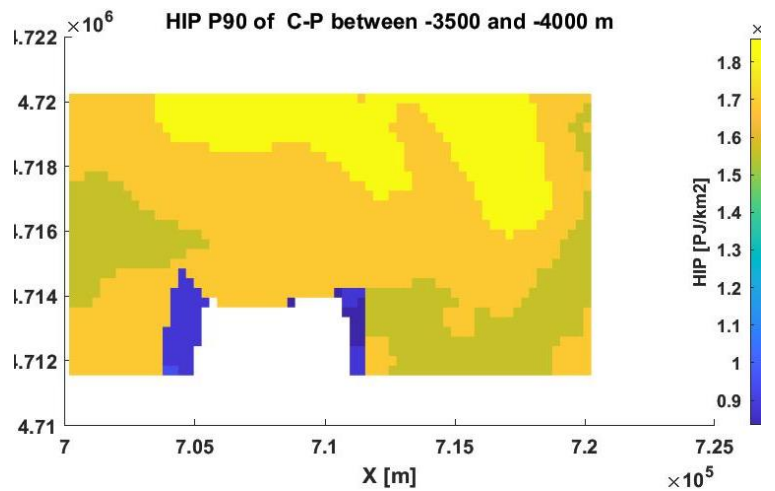


Figura 22: Gráfico de distribución de temperaturas a techo del reservorio geotérmico definido (en este caso 3.500 – 4.000 m) (3DHIP-calculator).

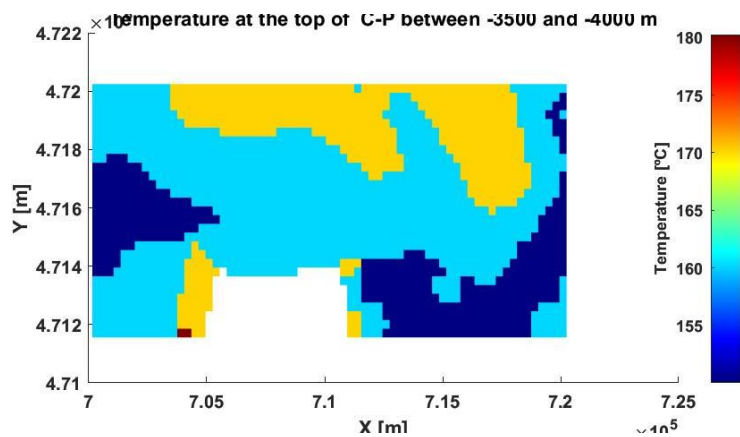
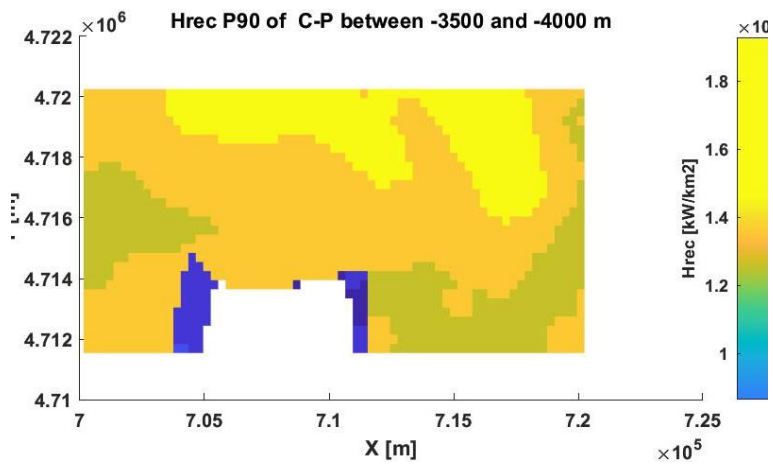


Figura 23: Gráfico de distribución de calor recuperable (Hrec) en kW en el reservorio definido entre 3.500 y 4.000 m. Los valores mostrados se calculan como la suma vertical de los valores de los cubos del modelo con idénticas coordenadas X e Y, dividida entre el área de los cubos, en km^2 , expresados en unidades PJ/km^2 . Este gráfico se repite para probabilidades del 10% (baja confianza), 50% (media confianza) y 90% (alta confianza). En la figura se muestra únicamente el correspondiente a 90% que se ha seleccionado al contemplar los valores más realistas (3DHIP-calculator).



A continuación, se ha comprobado la posibilidad de exportar los resultados del 3DHIP-calculator en formato CSV e introducirlos en el programa *Leapfrog* para visualizarlos. En la figura 24A se puede observar la distribución espacial de los valores de energía acumulada (en PJ por celda) en el área limitada de 3.500 – 4.000 m del recurso geotérmico con un 90% de probabilidad. Además, ha sido posible determinar el volumen del reservorio, definido por el modelo geológico 3D con los mismos para las superficies de techo y muro. Este volumen es $6,5 \cdot 10^{10} \text{ m}^3$ (Figura 24B).

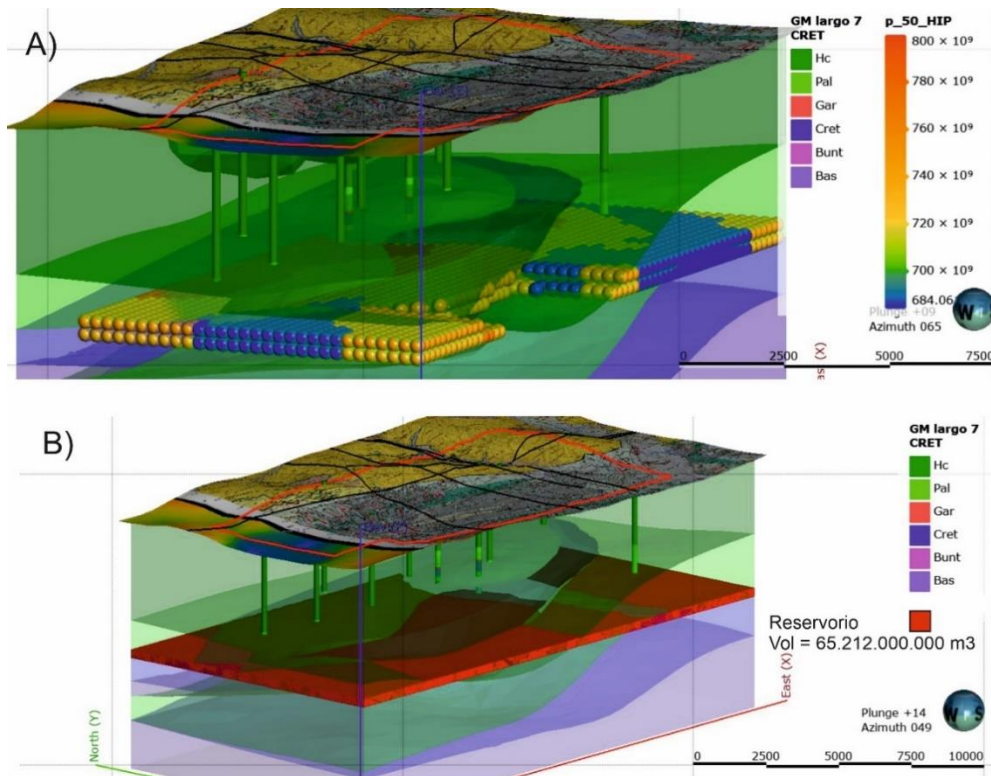


Figura 24. A)

Visualización en Leapfrog de la distribución de energía acumulada obtenida en el programa 3DHIP-Calculator en el reservorio en los límites (3500 – 4000 m). B) El recurso volumétrico del reservorio modelizado 3D en Leapfrog sobre el modelo geológico de la concesión Serrablo. Valor obtenido de 65.212.000.000 m³.

Por último, se aplican las ecuaciones del capítulo de fundamentos geotérmicos para calcular una reserva potencial del recurso en toda la concesión (Quinao y Zarrouk, (2014); Pastor *et al.*, (2010)):

$$qr = 2682 \frac{kg}{m^3} \times 820 \frac{kJ}{kgK} \times 6,5 \times 10^{10} m^3 \times 130 K = 18.583 \times 10^{15} kJ$$

$$R (MWe) = \frac{(18.583 \times 10^{15} J \times 0,10 \times 0,10)}{0,75 \times (25 \times 365,25 \times 24 \times 3600)} \times 10^{-3} = \frac{314.058,52 MJ}{s} = 314.058,52 MWe$$

El parámetro del volumen del recurso se ha obtenido directamente del cálculo del programa *Leapfrog* en el que se ha modelado 3D (Figura 24B). Es un volumen simplificado uniforme para el reservorio 3.500 – 4.000 m. Se han aplicado las ecuaciones a partir los valores de la tabla 3 debidamente convertidos en las unidades correspondientes y el valor de temperatura media obtenido de la figura 22. Los resultados obtenidos para una reserva potencial de energía geotérmica son de 314.058,52 MWe en la concesión Serrablo, con un valor de probabilidad del 90%. Hay que tener en cuenta que se trata de una primera aproximación a una reserva potencial, con valores de parámetros que posiblemente sobredimensionen el valor final. Estos cálculos deben iterarse conforme se realicen estudios específicos o se obtengan nuevos valores más precisos.

7 CONCLUSIONES

- El yacimiento de gas natural de Serrablo, en el área Jaca-Sabiñánigo, tras su agotamiento y conversión a almacén de gas natural, es evaluado como potencial yacimiento de energía geotérmica, ya que se ajusta a los parámetros de un yacimiento de tipo cuenca sedimentaria profunda.
- En el yacimiento Serrablo se pueden diferenciar tres grandes unidades: El Grupo de margas Hecho, los carbonatos correspondientes al Cretácico superior y Paleoceno, y el Paleozoico (Figura 17C). Se definen tres almacenes en el yacimiento: Dos superiores asociados a las megacapacidades del Grupo Hecho, actualmente utilizadas como almacenamiento de gas y el almacén inferior que se propone en este trabajo como recurso geotérmico de media-alta entalpía.
- Se ha realizado una caracterización geofísica del yacimiento Serrablo a partir de la sísmica de reflexión que ha permitido reconocer las estructuras y horizontes principales. Paralelamente, se han recopilado y analizado las diagráfias de los sondeos Serrablo 1, 4 y 7, corroborando los parámetros publicados en estudios previos de la zona.
- La información de las diagráfias de los sondeos 1, 4 y 7 (Anexos 1-4) ha permitido conocer la petrofísica básica del reservorio que se corresponde positivamente con los resultados de Klimowitz y Hernández (2021). La escasa porosidad de los carbonatos se encuentra saturada en agua y hay fracturas que producen porosidad secundaria. La existencia de fracturas visibles en las diagráfias permite inferir condiciones de flujo interno en el almacén viables para la explotación. La petrofísica, por tanto, parece confirmarse similar a la de los almacenes superiores que actualmente no presentan problemas de producción / evolución de su explotación.
- Se ha creado, desarrollado y validado un flujo de trabajo para modelar y evaluar el potencial geotérmico en cuencas sedimentarias con explotación de hidrocarburos (Figura 11). Consiste en una primera fase de estudio bibliográfico, histórico, cartográfico y de adquisición y transformación de datos; una segunda fase de interpretación y modelización del yacimiento a partir de la geofísica; una tercera fase de realización de un modelo geológico 3D compacto, consistente con la información anterior; y una fase final de evaluación geotérmica que cuantifique el yacimiento.
- Se ha demostrado que es posible un correcto trabajo, manejo y transformación de información y bases de datos del mundo de hidrocarburos al de la geotermia.

- Las temperaturas obtenidas por 3DHIP como recurso geotérmico para el almacén inferior del yacimiento al este de la concesión son de 155 – 160°C (Figura 22). La energía acumulada, expresada en PJ, entre 3.500 – 4.000 m son de $1,6 - 1,7 \cdot 10^5$ PJ/km² (Figura 21) y la energía recuperable es de $1,3 - 1,4 \cdot 10^7$ kW/km² (Figura 23).
- La evaluación geotérmica ha resultado favorable en toda la concesión con unas reservas de 314.058,52 MWe para el recurso geotérmico de la figura 24B. Habría que ver su viabilidad técnica y económica. El mapa de temperaturas del techo del reservorio (-3500 m) (Figura 22) indica valores máximos de 170°C en el norte de la concesión. Los valores medios se encuentran entre 160-170°C. El hueco no evaluado por el programa en el sur se debe a que para los parámetros del reservorio (3500 - 4000 m) se encontraba la unidad litológica del Grupo Hecho y no la del Cretácico-Paleoceno. Se extrapola que las condiciones serán semejantes a las de la media de la concesión de unos 160-170°C.
- La versatilidad del método volumétrico de evaluación de reservorios geotérmicos “*Heat in place*”, propuesto por el U.S. Geological Survey, combinado con simulaciones de Monte Carlo (programa 3DHIP-calculator), permite realizar evaluaciones iterativas a medida que se van conociendo estos parámetros con mayor precisión, incluso durante el periodo de explotación a lo largo de la vida útil de la planta geotérmica. Con toda esta información, este método puede considerarse una herramienta interesante de evaluación de capacidad de producción geotérmica de un reservorio. En las primeras fases resulta imprescindible realizar una apropiada estimación de los parámetros del reservorio, admitiendo una fuerte variabilidad. Bajo este argumento, en el yacimiento Serrablo se ha restringido el margen de la distribución de probabilidad del 90%.

Nuevas líneas de investigación:

Se debe continuar con el proceso iterativo de evaluación geotérmica sin restringirse solo a 500 m de reservorio. La innovadora utilización de *Leapfrog* para visualizar la distribución de energía acumulada, abre un abanico de nuevas posibilidades entre ambos programas. Se puede plantear un modelo de distribuciones de todo el yacimiento, así como distintas superficies que marquen valores específicos en todo el modelo.

Pese al que el conjunto de los datos se centre en el yacimiento Serrablo al este de la concesión, se ha realizado el estudio en toda la concesión por el interés geotérmico de la cuenca. El sondeo Villanovilla (Anexo 5) al norte de la zona de estudio presenta un gradiente geotérmico de 3,4°C/100m mayor a los medidos en los sondeos de la concesión. Las secuencias carbonáticas basales del Eoceno y del Paleoceno descritas por Klimowitz y Hernández (2021) en Villanovilla, indican características petrofísicas del reservorio óptimas también.

La interpretación sísmica en el oeste de la concesión muestra que las estructuras se disponen de la misma forma (Anexos 8-11) que en el yacimiento. Los gráficos de distribución de energía acumulada (Figura 21) muestran temperaturas parecidas a las del yacimiento, por lo que se debe estudiar pormenorizado y relacionarlo con el sondeo Villanovilla.

Se debería estudiar la viabilidad de los antiguos sondeos petroleros para la producción geotérmica. En el caso negativo, se puede utilizar el modelo geológico de *Leapfrog* con la distribución espacial de los valores de energía acumulada (en PJ) para realizar el estudio de sondeo.

Por último, hay que tener en cuenta la falta de un estudio específico de la hidroquímica del yacimiento para determinar su salinidad (que se obtuvo en los informes técnicos de Serrablo 4 con 2gr/l). No era objetivo de este trabajo, por lo que no se ha mencionado en ningún momento, pero condiciona factores tan importantes como la capacidad de transmisión de calor, punto de evaporación y fusión, y la corrosión del fluido.

8 BIBLIOGRAFÍA

8.1. Artículos científicos, libros de texto e informes técnicos:

ADARO (1981). Nota del posible proyecto de investigación geotérmica en la zona de Jaca-Sabiñánigo. ADARO investigaciones mineras SA.

ADARO (1985). Investigación Geotérmica del área de Jaca y sondeos recientes del proyecto de seguimiento de sondeo de Hidrocarburos. ADARO investigaciones mineras SA, Departamento de hidrogeología, geotermia y medio ambiente, nº 50312, 1985.

Barnolas, A. y Gil-Peña, I. (2001). Ejemplos de relleno sedimentario multiepisódico en una cuenca de antepaís fragmentada: La Cuenca Surpirenaica. Boletín Geológico y Minero, 112 (3): 17-38.

Barnolas, A., Teixell, A., (1994). *Platform sedimentation and collapse in a carbonate-dominated margin of a foreland basin (Jaca basin, Eocene, southern Pyrenees)*. *Geology* 22, 1107-1110.

Barnolas, A.; Larrasoaña, J.C.; Pujalte, V.; Schmitz, B.; Sierro, F.J.; Mata, M.P.; Van den Berg, C.J.; Pérez-Asensio, J.N.; Salazar, A.; Salvany, J.M.; Ledesma, S.; García-Castellanos, D.; Civis, J. and Cunha, P. (2019). *The Geology of Iberian: a Geodynamic Approach, vol 4 Cenozoic Basins, first chapter alpine foreland basin*, editado por Cecilio Quesada y José Tomás Oliveira, Springer.

Boden, D.R. (2017). *Geologic Fundamentals Geothermal Energy, series editor Abbas Ghassemi New Mexico State University, by Taylor & Francis Group, LLC*

Cámara, P.; Rodríguez de Pedro, J. and Moreno, J.M. (1988). Serrablo Gas Field: *An Example of a Trap in Syntectonic Brecciated Reservoirs, Pyrenees (Spain)*. AAPG Search and Discovery Article Mediterranean Basins Conference and Exhibition, Nice, France, 25-28

De Celles, P.G. and Giles, K.A. (1996). *Foreland basin systems*. *Basin Research*, 8: 105-123

Diaz Martos S. (2022). Informe de Geotermia de alta Entalpia. Curso de Geotermia Somera y Profunda con Certificación Energética Edificios, ESG y ICOG, págs. 1-26.

Klimowitz, J. and Hernández, E. (2021). *Workshop pixil interreg project: Workshop From science to praxis: Experiences employing Geophysical methods to characterize*

Geothermal anomalies. Presentación: “*Geophysical hydrocarbon exploration data and Deep Geothermal research: Two feasibility projects in Spain.*”. GESSAL

Labaume, P. and Teixell, A. (2018). *3D structure of subsurface thrusts in the eastern Jaca Basin, southern Pyrenees*. UAB y CNRS. *Geologica Acta* 16 (4), 477.

Marzo, M.; Vergés, J.; Santaularia, T.; Serra-Kiel, J.; Burbank, D.W.; Muñoz, J.A. and Giménez-Montsant, J. (1998). Geological Society, London, Special Publications, 134, 107-134.

Millán Garrido, H.; Oliva Urcia, B. y Pocoví J.A. (2006). La transversal de Gavarnie-Guara. Estructura y edad de los mantos de Gavarnie, Guara-Gèdre y Guarga (Pirineo centrooccidental) *Geogaceta* 40 (2006), 35-38

Moeck, I.S. and Beardsmore, G. (2014). *A new ‘geothermal play type’ catalog: Streamlining exploration decision making*. *Procs. Thirty-Ninth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford University, Stanford, California, February 24-26, 2014. SGP-TR-202.

Montes Santiago MJ (2002) Estratigrafía del Eoceno-Oligoceno de la Cuenca de Jaca. Sinclinorio del Guarga. Tesis doctoral, Univ. Autónoma de Barcelona, 365p.

Muffler, P. and Cataldi, R. (1978): “*Methods for regional assessment of geothermal resources, U.S. Geological Survey, Open File Report*”

Muniesa Abadía P. y Liesa Carrara C. L. (2014). Geometría y cinemática de pliegues y cabalgamientos en el entorno de Aragüés del Puerto (Sierras Interiores, Pirineos centrales). Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza

Muñoz J.A., Mencos J., Roca E., Carrera N., Gratacós O., Ferrer O. y Fernandez O. (2018). *The structure of the South-Central-Pyrenean fold and thrust belt as constrained by subsurface data*, *Geologica Acta*, Vol.16, Nº 4, December 2018, 439-460

Ortigosa Miranda I. (2021). Estudio estructural del anticlinal del Basa (Cuenca de Jaca). Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza

Pastor S. M., Fronda D. A., Vanessa S. Lazaro S. V. y Velasquez B. N. (2010). *Resource Assessment of Philippine Geothermal Areas*. *Geothermal and Coal Resources Development Division, Energy Resource Development Bureau, Department of Energy, Energy Center, Merritt Road, Fort Bonifacio, Taguig City, Philippines*.

Payros A., Pujalte V. y Etxebarria X. (1998). *The South Pyrenean Eocene carbonate megabreccias revisited: new interpretation based on evidence from the Pamplona Basin*.

Departamento Estratigrafía y Paleontología, Facultad Ciencias, Universidad País Vasco, Apartado 644

Piris G., Herms I., Griera A., Colomer M., Arnó G. and Gómez-Rivas E. (2021). 3DHIP-Calculator—A New Tool to Stochastically Assess Deep Geothermal Potential Using the Heat-In-Place Method from Voxel-Based 3D Geological Models. *Energies* 2021, 14, 7338.

Piris, G., Herms, I., Griera, A., Gómez-Rivas, E. and Colomer, M. (2020). 3DHIP-Calculator (v1.1) [Software]. ICGC, UAB. CC-BY 4.0.

Piris, G., Herms, I., Griera, A., Gómez-Rivas, E. and Colomer, M. (2020). 3DHIP-Calculator Software manual v1.1. ICGC, UAB.

Quinao J. J. y Zarrouk J. S. (2014). *A review of the volumetric stored-heat resource assessment: one method, different results*, Department of Engineering Science, University of Auckland, New Zealand

Roigé, M.; Gómez-Gras, D.; Remacha, E.; Daza, R. and Boya, S. (2015). *Tectonic control on sediment sources in the Jaca basin (Middle and Upper Eocene of the South-Central Pyrenees)* Académie des sciences. Publicado por Elsevier Masson SAS.

SGE-IGME (1996). Memoria de la Hoja nº 177 (Sabiñánigo). Mapa Geológico de España E. 1:50.000. Segunda Serie (MAGNA), Primera edición. IGME. (Gil Peña *et al.*, 1996).

Stober, I. and Bucher, K. (2013). *Geothermal Energy: from theoretical Models to Exploration and Development* Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Suppe J. (1983). *Geometry and kinematics of fault bend folding*. *Am. J. Sci.*, 283: pags 684 – 721.

Teixell A. y García-Sansegundo J. (1995). Estructuras del sector central de la Cuenca de Jaca (Pirineos meridionales). *Rev. Soc. Geol. España*, 8 (3): 215-228.

8.2. Legislación / Regulación:

AENOR (2014). "Diseño, ejecución y seguimiento de una instalación geotérmica somera – Parte 1: Sistemas de circuito cerrado vertical", 40 p.

Directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables

Directiva 2018/2001 del Parlamento Europeo y del Consejo de 11 de diciembre de 2018, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables (versión refundida).

Orden de 6 de septiembre de 1995 sobre concesión administrativa a «Enagás, Sociedad Anónima», para el almacenamiento de gas natural en Jaca, Aurín y Suprajaca, del campo de Serrablo. 1995

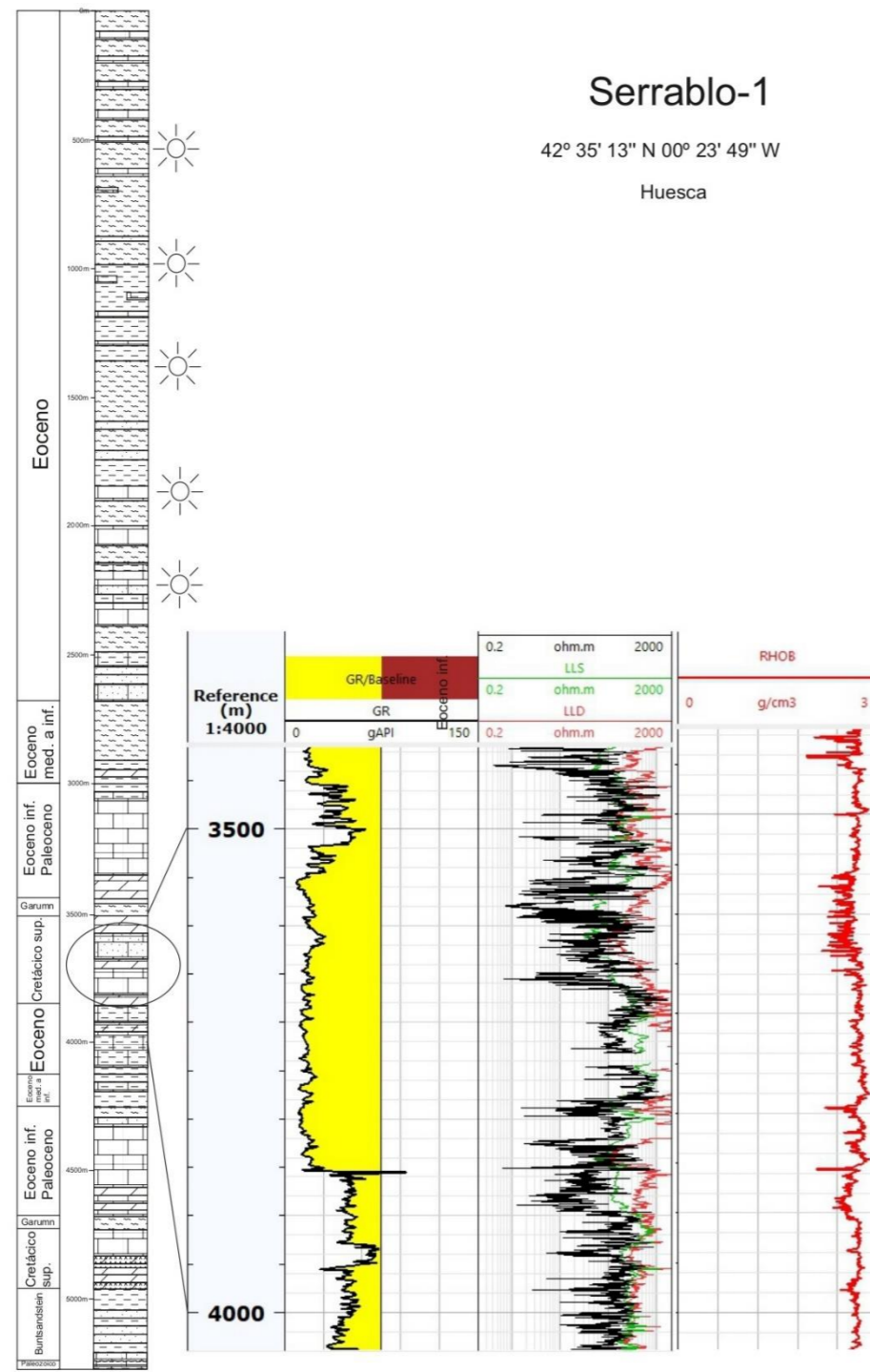
Orden IET/1119/2013, de 27 de mayo, por la que se autoriza la cesión de las concesiones de explotación de almacenamiento subterráneo de gas natural denominadas «Gaviota», «Serrablo» y «Yela» a la Sociedad Enagas transporte, SAU. 2013

R.D. 1200/1989, de 22 de septiembre, por el que se modifican las condiciones del Plan de Explotación de los yacimientos Jaca y Aurín, dentro de la concesión de explotación de hidrocarburos Serrablo.

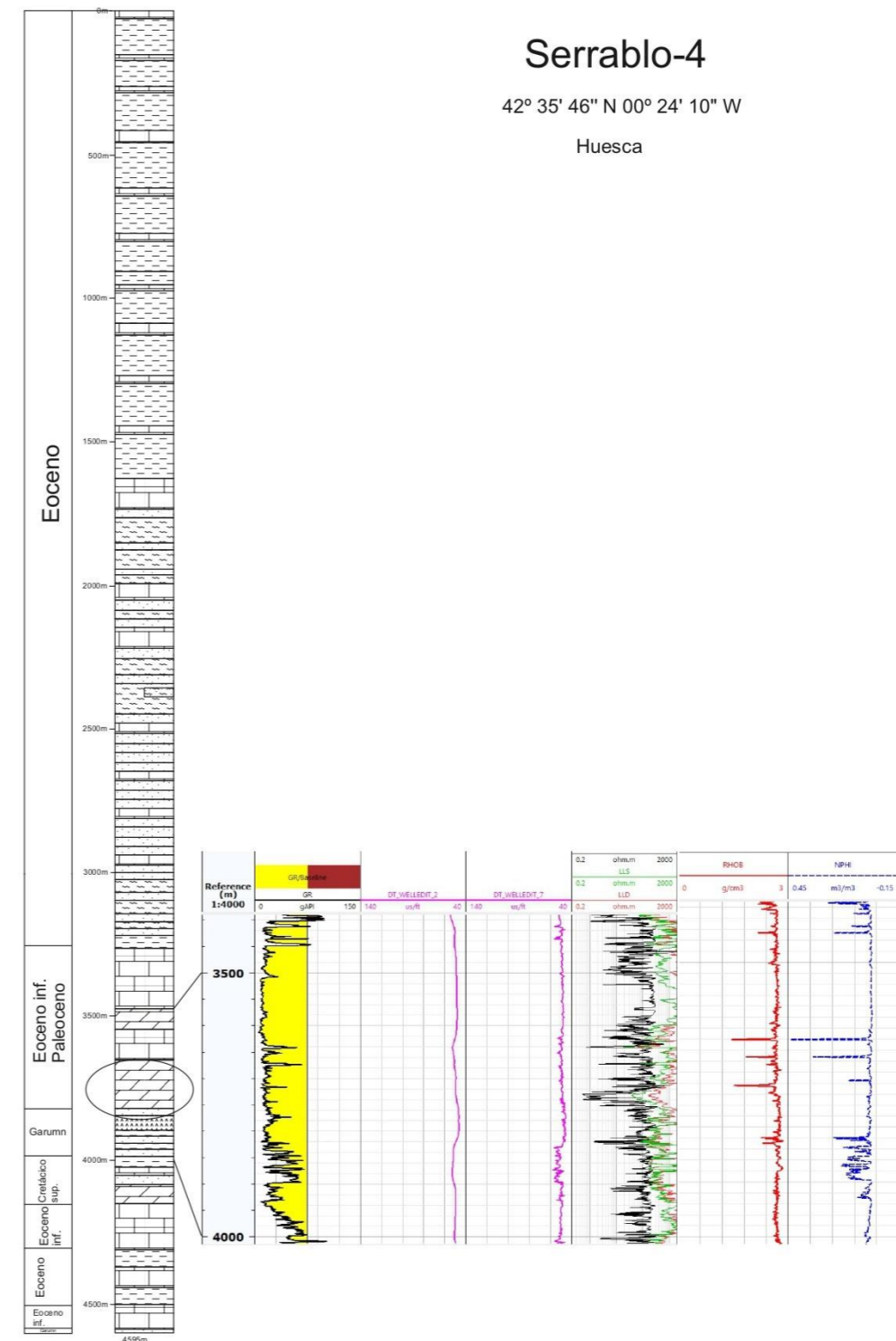
8.3. Páginas Web:

- Agencia Estatal de Meteorología (AEMET): <https://www.aemet.es/es/portada>
- Instituto Geográfico Nacional (IGN), centro de descargas: <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>
- Conferencia geotermia de alta entalpia (2022) del colegio oficial de geólogos (ICOG): <https://www.youtube.com/watch?v=ss7Qn5tXxsl&t=3602s>
- Schlumberger: Manual Schlumberger log Interpretation Charts (12/8/2013) <https://www.slb.com/>
- Instituto Geológico y Cartográfico de Cataluña – Programa 3DHIP-Calculator: [Evaluación del potencial geotérmico profundo \(3DHIP Calculator\). Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya \(icgc.cat\)](#)

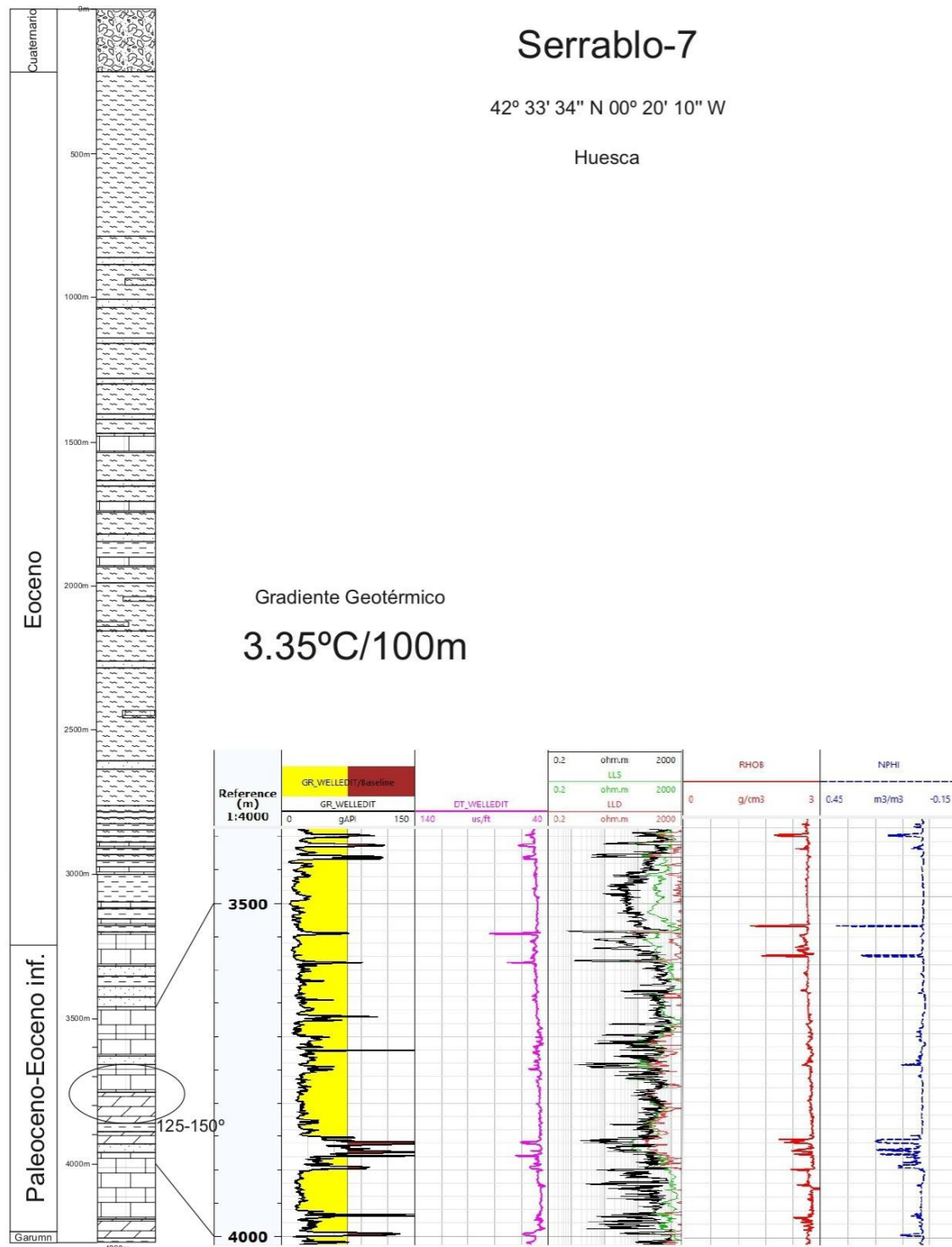
9 ANEXO



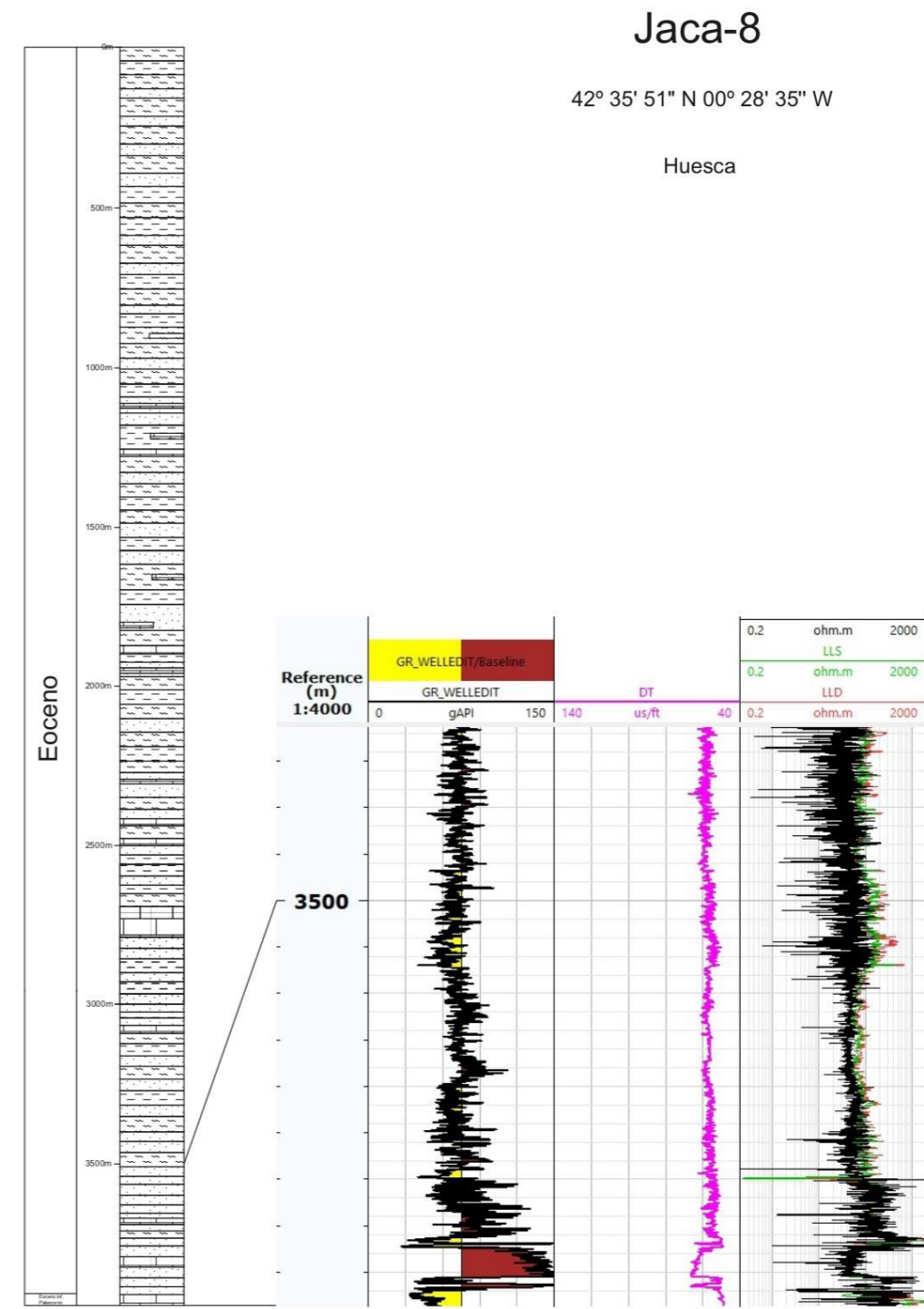
Anexo 1. Columna litoestratigráfica del sondeo Serrablo-1 en la que se indica la edad de las capas testificadas durante el sondeo. Para la sección delimitada del reservorio geotérmico (3500 – 4000 m), se han seleccionado las diagráfias Gamma Ray, resistividades y la curva de densidad media (RHOB) o Bulk-Density. (propio, tomado en Techlog).



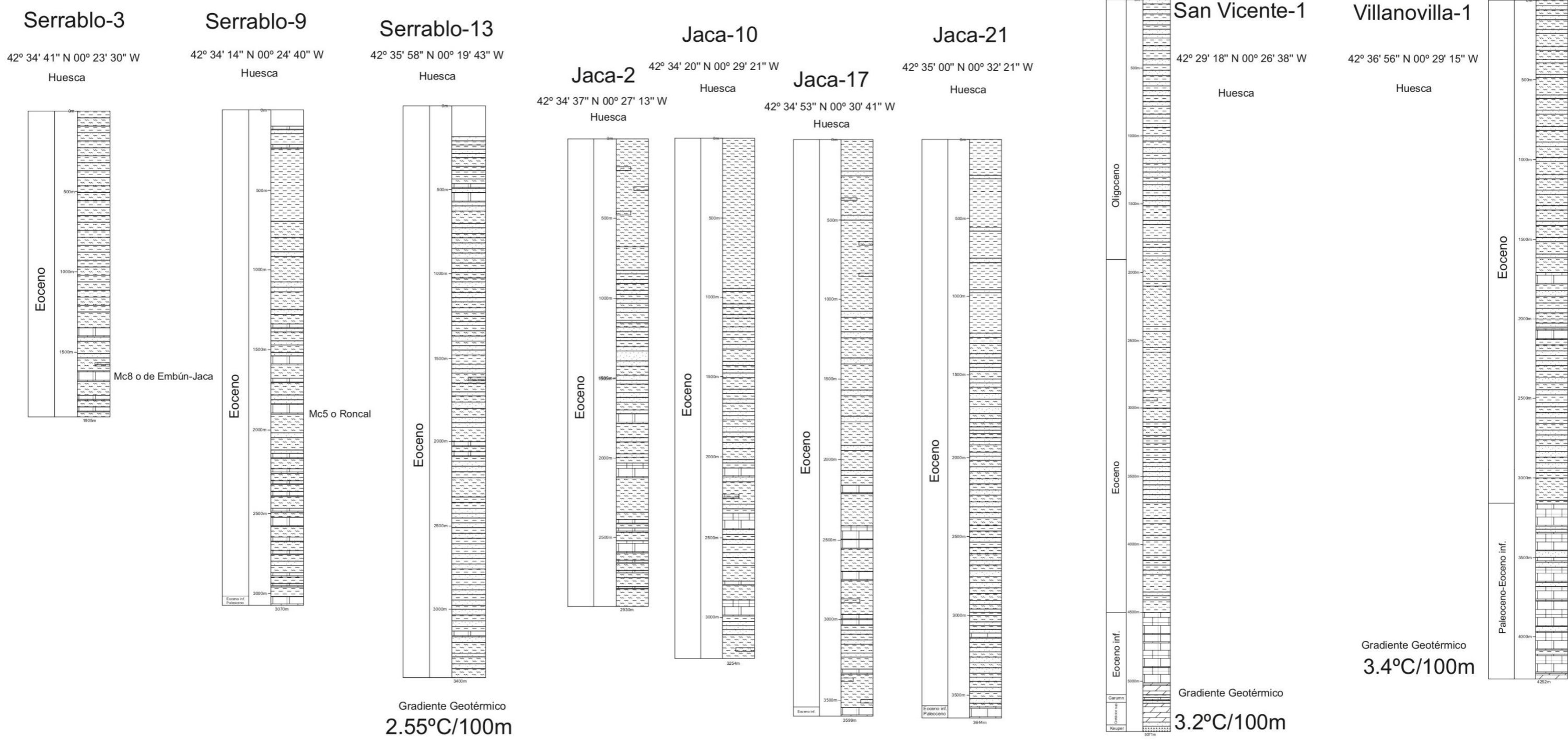
Anexo 2. Columna litoestratigráfica del sondeo Serrablo-4 en la que se indica la edad de las capas testificadas durante el sondeo. Para la sección delimitada del reservorio geotérmico (3500 – 4000 m), se han seleccionado las diagráfias Gamma Ray, registro sísmico (DT, delta-time) en dos formatos, resistividades, la curva de densidad media (RHOB) o Bulk-Density y la curva de porosidad neutrón o NPHI (neutron-porosity) (propio, tomado en Techlog).



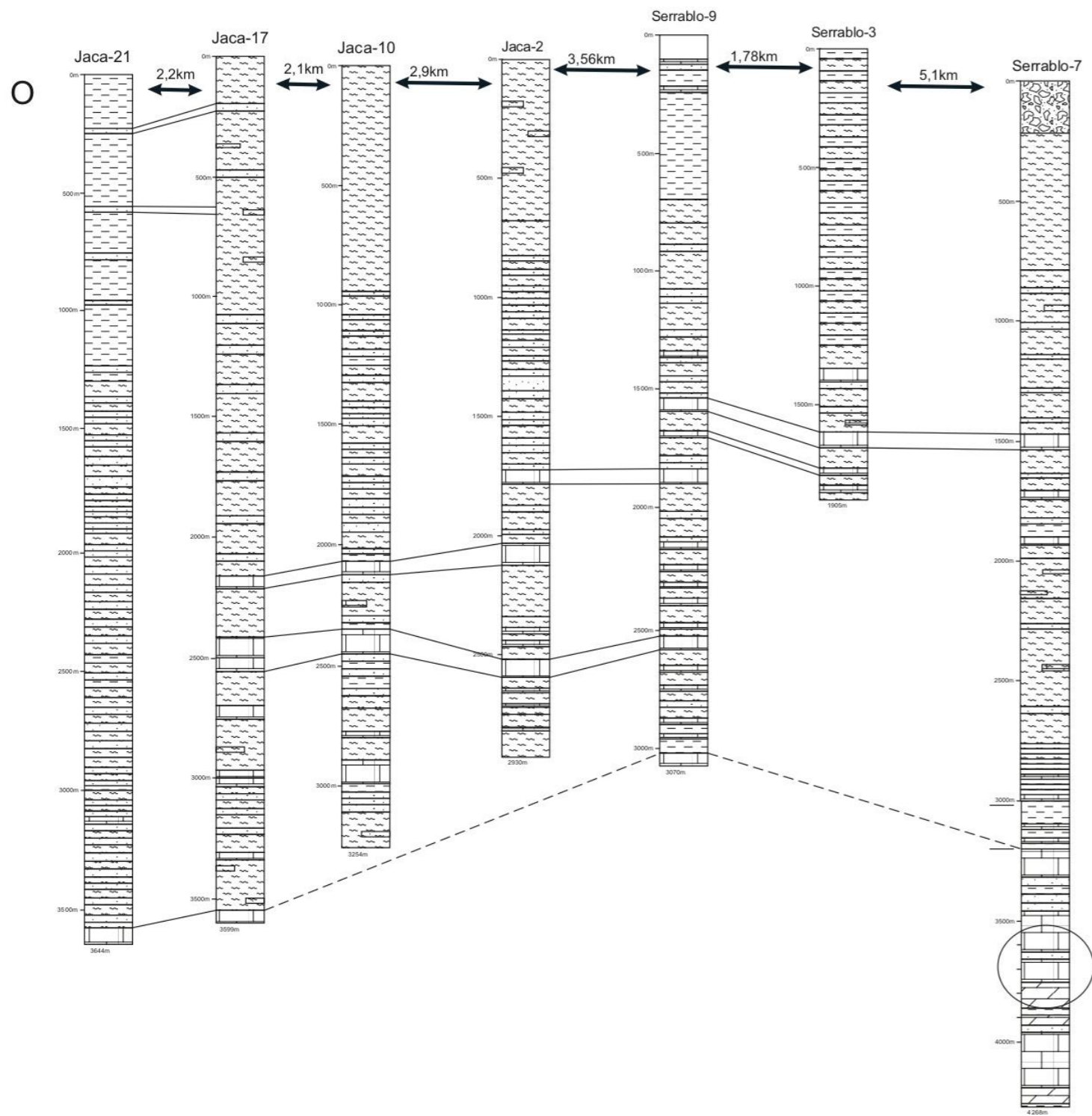
Anexo 3. Columna litoestratigráfica del sondeo Serrablo-7 en la que se indica la edad de las capas testificadas durante el sondeo. Para la sección delimitada del reservorio geotérmico (3500 – 4000 m). Se han seleccionado las diagrfias Gamma Ray, registro sónico (DT, delta-time), resistividades, la curva de densidad media (RHOB) o Bulk-Density y la curva de porosidad neutrón o NPHI (neutron-porosity) (propio, tomado en Techlog). Se indican valores de gradiente geotérmico, así como valores exactos de temperatura en el reservorio geotérmico (Klimowitz y Hernández, 2021).



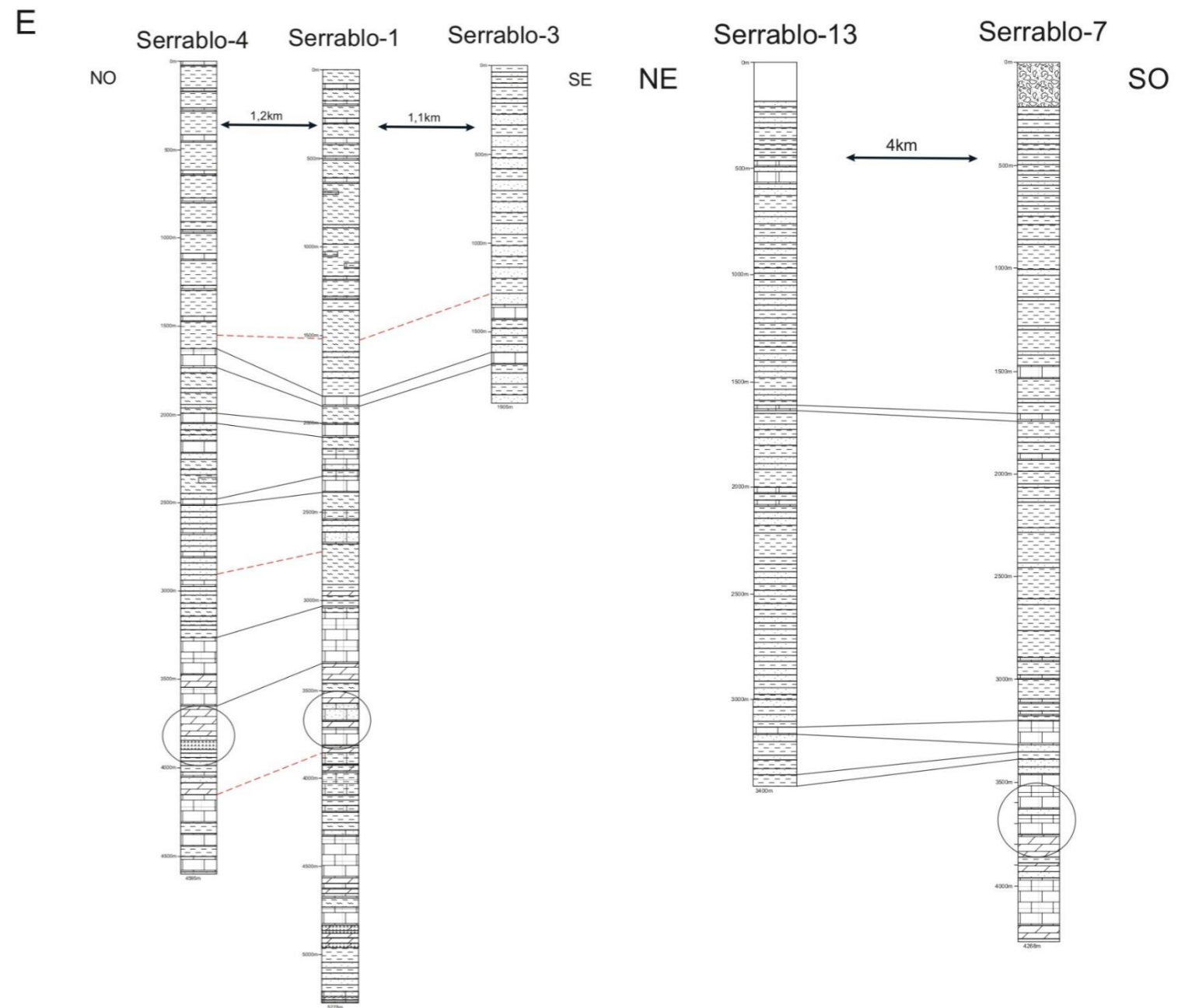
Anexo 4. Columna litoestratigráfica del sondeo Jaca-8 en la que se indica la edad de las capas testificadas durante el sondeo. Comparativa a la sección delimitada del reservorio geotérmico (3500 – 4000 m) del este de la concesión. Se han seleccionado las diagrfias Gamma Ray, registro sónico (DT, delta-time) y las resistividades. Los resultados distan de ser semejantes a los del reservorio geotérmico, debido a que se encuentra en el Grupo margoso Hecho y no en la unidad carbonática.



Anexo 5. Columnas litoestratigráfica del grupo de sondeos Jaca y Serrablo, en los que se indican la edad de las capas testificadas durante el sondeo. Se indican las megacapas en Serrablo 3 y 9. En los sondeos San Vicente y Villanovilla se indican los gradientes geotérmicos (Klimowitz y Hernández, 2021).

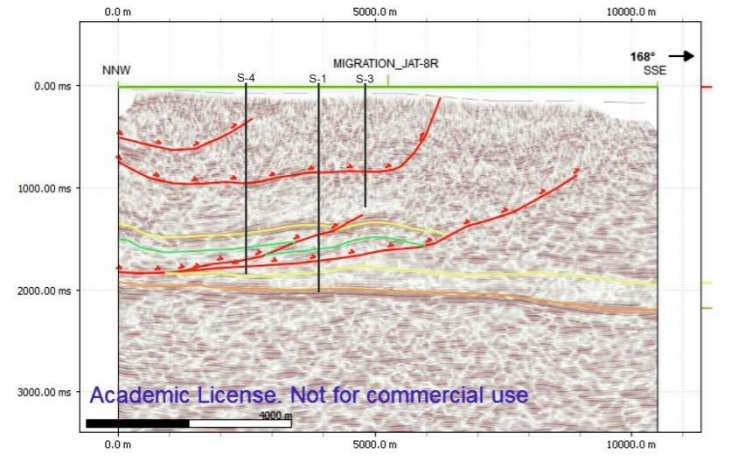
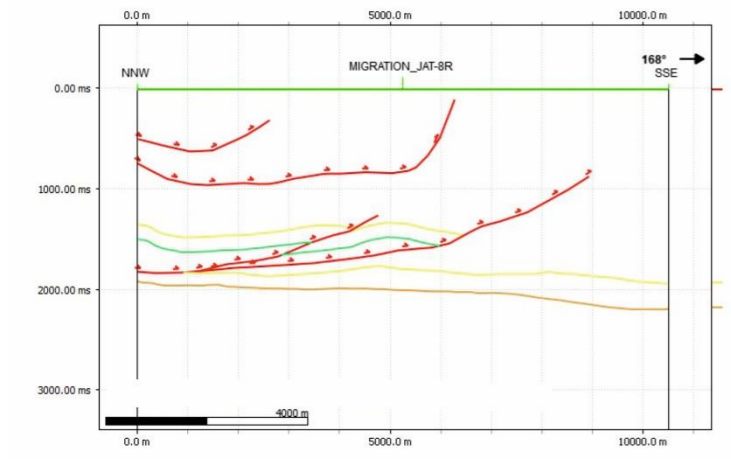
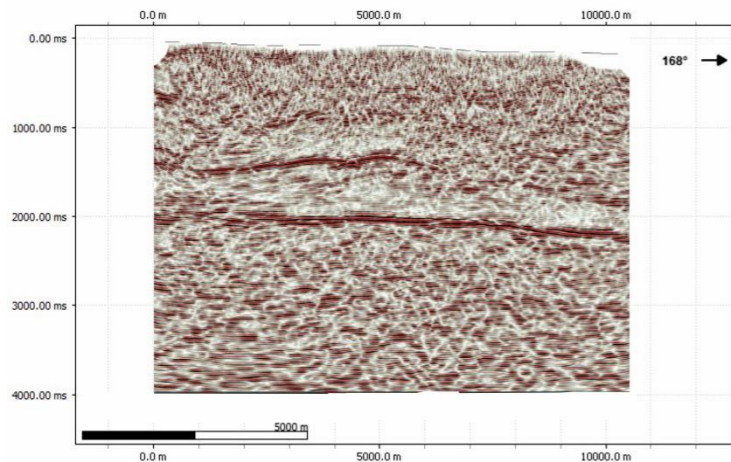


Anexo 7. Correlación O-E de los sondeos de la concesión Serrablo en las que se puede ver la distancia entre sondeos. Permite ver la continuidad de las megacapas que se extienden hacia el oeste basculadas y deformadas por fallas. Se indica el límite inferior del Grupo Hecho con una línea discontinua, donde se encuentra la unidad carbonática de interés.



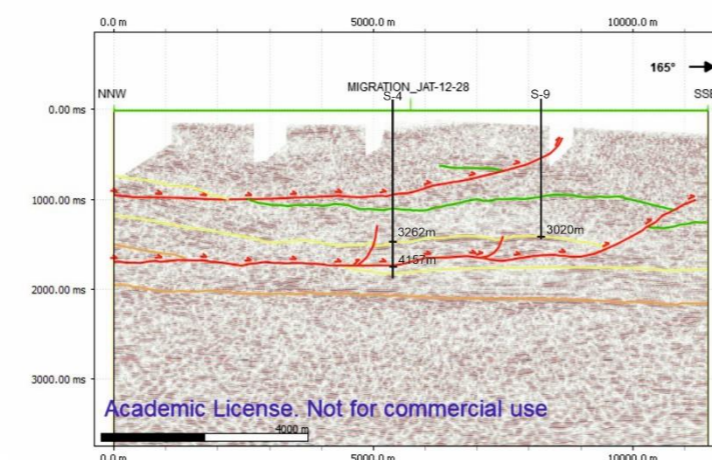
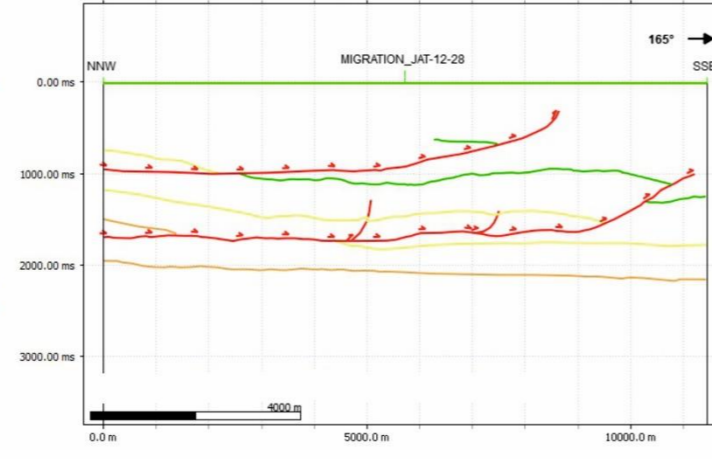
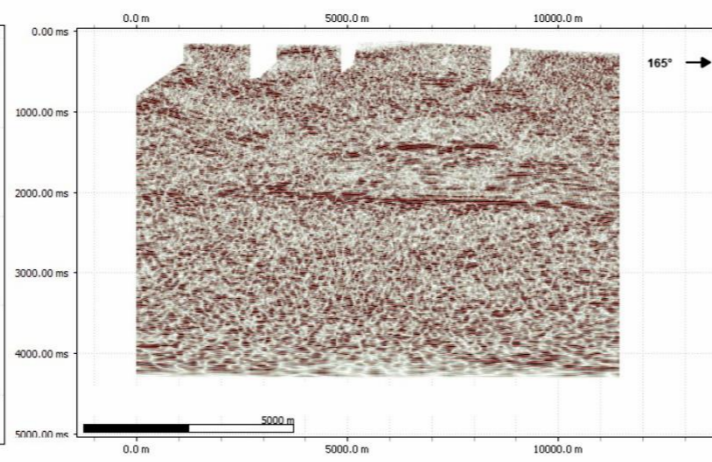
Anexo 6. Correlaciones N-S de los sondeos de la concesión Serrablo en las que se puede ver la distancia entre sondeos. Permite ver la continuidad del reservorio delimitado en la unidad de carbonatos (3500 – 4000 m). Serrablo 1 y 4 se correlaciona el reservorio, mientras que Serrablo 7 y 13 no, debido a que Serrablo 13 no sobre pasa en Grupo Hecho.

JAT-8R



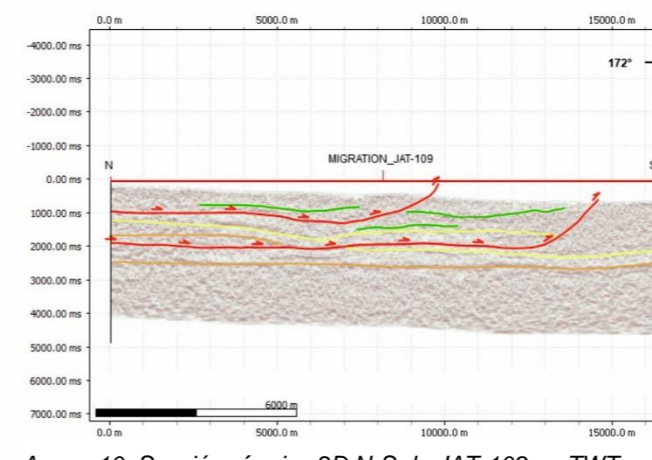
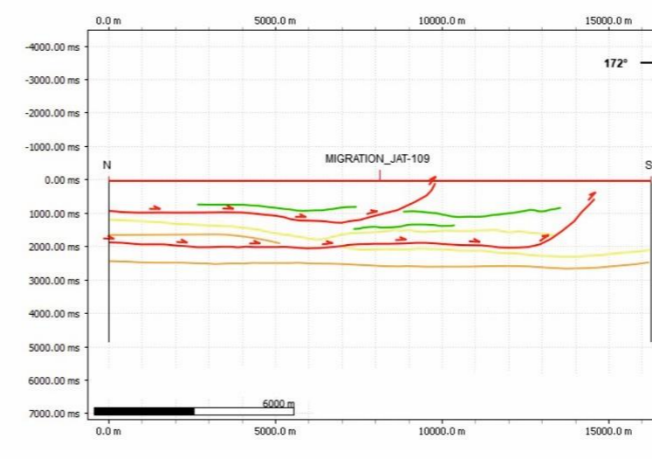
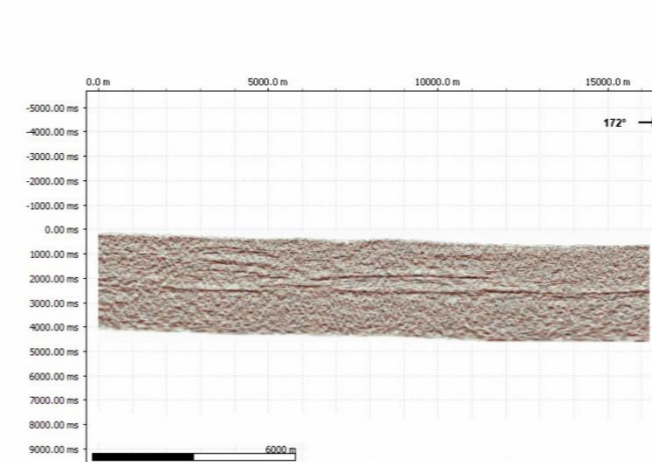
Anexo 9. Sección sísmica 2D NNW-SSE de JAT-8R en TWT. Primero la sección sísmica limpia sin alterar. Por debajo la interpretación sobre fondo blanco. Por último, la combinación de ambos, con los sondeos indicando su profundidad máxima en tiempo (basado en Muñoz et al., 2018).

JAT-12-28



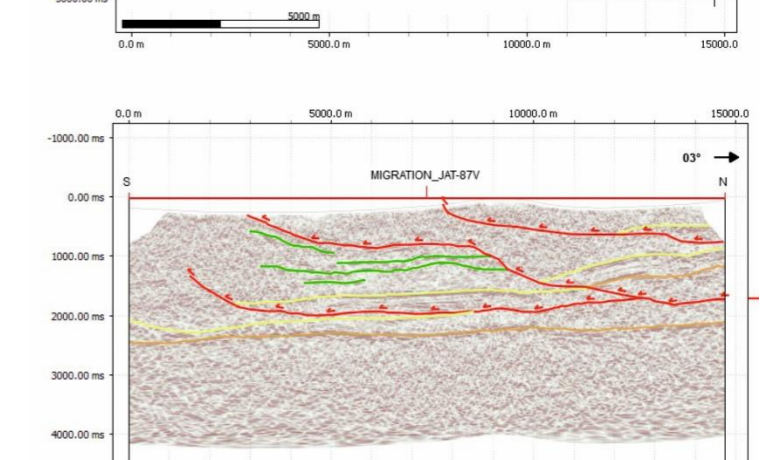
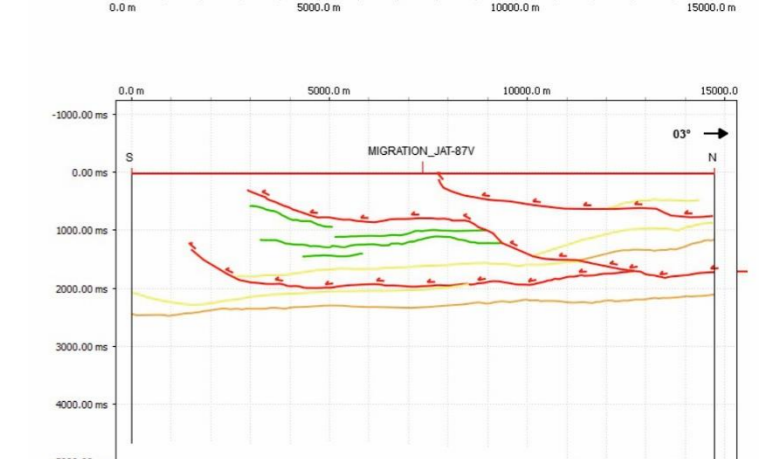
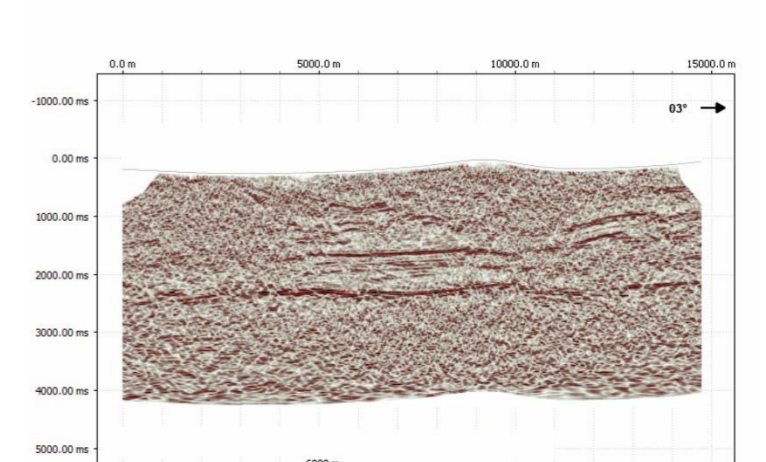
Anexo 8. Sección sísmica 2D NNW-SSE de JAT-12-28 en TWT. Primero la sección sísmica limpia sin alterar. Por debajo la interpretación sobre fondo blanco. Por último, la combinación de ambos, con los sondeos indicando su profundidad máxima en tiempo.

JAT-109



Anexo 10. Sección sísmica 2D N-S de JAT-109 en TWT. Primero la sección sísmica limpia sin alterar. Por debajo la interpretación sobre fondo blanco. Por último, la combinación de ambos, con los sondeos indicando su profundidad máxima en tiempo.

JAT-87V



Anexo 11. Sección sísmica 2D S-N de JAT-87V en TWT. Primero la sección sísmica limpia sin alterar. Por debajo la interpretación sobre fondo blanco. Por último, la combinación de ambos, con los sondeos indicando su profundidad máxima en tiempo.

Entidades colaboradoras:

