

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA



DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES PETROFÍSICAS DEL
SUBSUELO Y SU CONTENIDO DE AGUA Y GAS MEDIANTE
RESONANCIA MAGNÉTICA NUCLEAR.

Trabajo Especial de Grado presentado por
Claudia Josefina Huapaya Mora
ante la Facultad de Ciencias de la
Ilustre Universidad Central de Venezuela
como requisito parcial para optar al Título
de: Licenciada en Física

Con la tutoría de: Dr. Pierre Embaid.
Dr. Gerardo Jaimes

Agosto – 2015
Caracas – Venezuela.

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA



DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES PETROFÍSICAS DEL
SUBSUELO Y SU CONTENIDO DE AGUAY GAS MEDIANTE
RESONANCIA MAGNÉTICA NUCLEAR.

Trabajo Especial de Grado presentado por
Claudia Josefina Huapaya Mora
ante la Facultad de Ciencias de la
Ilustre Universidad Central de Venezuela
como requisito parcial para optar al Título
de: **Licenciada en Física**

Con la tutoría de: Dr. Pierre Embaid.
Dr. Gerardo Jaimes

Agosto – 2015
Caracas – Venezuela.



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE FÍSICA



VEREDICTO

Quienes suscriben, miembros del Jurado designado por el Consejo de la Escuela de Física de la Facultad de Ciencias de la Universidad Central de Venezuela, para examinar el Trabajo Especial de Grado presentado por **Claudia Huapaya**, Cédula de Identidad **V-15872321**, bajo el título "**Determinación de propiedades petrofísicas del subsuelo y su contenido de agua y gas mediante Resonancia Magnética Nuclear**", a los fines de cumplir con el requisito legal para optar al grado de **Licenciada en Física**, dejan constancia de lo siguiente:

1. Leído como fue dicho trabajo por cada uno de los miembros del Jurado, éste fijó el día 5 de agosto de 2015, a las 9:00 am, para que el autor lo defendiera en forma pública, lo que éste hizo en la Sala de Seminarios Guillermo Ruggeri de la Escuela de Física, mediante un resumen oral de su contenido, luego de lo cual respondió satisfactoriamente a las preguntas que le fueron formuladas por el jurado; todo ello conforme a los artículos 20, 21, 22, 25, 26 y 28 de la Normativa de Trabajo Especial de Grado de la Licenciatura en Física de la Facultad de Ciencias de la UCV vigente.
2. Finalizada la defensa pública del trabajo, el jurado decidió declararlo aprobado por considerar que se ajusta a lo dispuesto y exigido en la Normativa de Trabajo Especial de Grado de la Licenciatura en Física de la Facultad de Ciencias de la UCV vigente en sus artículos 1, 5 y 6.

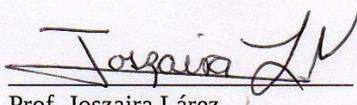
Se levanta la presente acta a los 5 días del mes de agosto de 2015, dejándose también constancia de que, conforme a la normativa jurídica vigente, actuó como coordinador del jurado el tutor del Trabajo Especial de Grado Prof. Pierre Embaid.

Firma del jurado evaluador


Prof. Miguel Martín
V-3982506
UCV




Prof. Pierre Embaid
V-12162811
UCV


Prof. Jozaira Lárez
V-15200862
UCV

“Si he logrado ver mas lejos, ha sido porque he subido a hombros de gigantes”

Isaac Newton.

Agradecimientos

A la Universidad Central de Venezuela la casa que vence las sombras, en especial a la Facultad de Ciencias, Escuela de Física.

A mis Padres Juan Huapaya y Gloria Mora, los pilares fundamentales en esta etapa de mi vida, a mi hermana Katuska, por tus abrazos. A mi abuela Augusta Mora, mi madrina Graciela Mora, por el cariño incondicional. A mi otra mitad Pedro Garate, por brindarme un gran apoyo.

A mi tutor académico Pierre Embaid, por su dedicación, carisma, enseñanzas durante mis días de estudios y como tesista en el desenvolvimiento del trabajo especial de grado.

Al Dr. Gerardo Jaimes y la empresa PDVSA, por brindarme la oportunidad de poder realizar este TEG.

A mis amigos de estudios universitarios, Jessica, Astrid, Gabriel, Lisbeth, Vladimir, Daniel, Eric y Lisbeth, grandes amigos de la vida.

Agradecida con Dios.

RESUMEN

La aplicación más conocida de la técnica de Resonancia Magnética Nuclear es su uso en el diagnóstico clínico. En la industria petrolera su atención inmediata se destaca en los registros de pozos para inferir y diferenciar los fluidos existentes en la formación, tales como agua, petróleo y gas. Igualmente existen equipos de laboratorio de alta resolución para análisis petrofísicos sobre muestras de rocas y crudo. Todos ellos utilizan campos magnéticos por inducción artificial para polarización del medio a estudiar.

En este estudio se trabajará con el campo magnético terrestre como ente natural polarizante, utilizando un novedoso sistema “Hardware – Software” de transmisión y recepción de datos, cuya antena estará posicionada en la superficie terrestre, y su alcance en profundidad depende del consumo de corriente y disposición geométrica de la misma.

Con el objeto de estudiar el desempeño de este novedoso sistema, denominado Resonancia Magnética Nuclear de Superficie (RMNS), el mismo se probó por primera vez en campo abierto donde se conocía la presencia de un pozo de agua mas no se precisaba su profundidad. Las medidas de los tiempos de relajación transversal y longitudinal corroboran la presencia de este pozo, y como valor agregado las propiedades petrofísicas como porosidad y permeabilidad.

Índice General

ÍNDICE DE FIGURAS	13
ÍNDICE DE CUADROS.....	15
CAPÍTULO 1.....	17
INTRODUCCIÓN.	17
CAPÍTULO 2.....	19
MARCO TEORICO.	19
2.1. MÉTODO DE RESONANCIA MAGNÉTICA NUCLEAR (RMN).	19
2.2. APLICACIÓN EN GEOFÍSICA.	22
2.3. PROPIEDADES PETROFÍSICAS.	26
2.4. INVERSIÓN DE LA DATA DE RESONANCIA MAGNÉTICA NUCLEAR DE SUPERFICIE.	31
CAPÍTULO 3.....	33
METODOLOGÍA.....	33
3.1. EQUIPO NUMIS.	33
3.2. MEDICIÓN EN CAMPO.	36
3.3. ADQUISICIÓN DE DATOS.	38
CAPÍTULO 4.....	43
PROCESAMIENTO DE DATOS.....	43
4.1. CLASIFICACIÓN DE LOS ARCHIVOS.....	43
4.2. MATRIZ DE INVERSIÓN.	44
4.3. INVERSIÓN CON SAMOVAR	46
CAPÍTULO 5.....	53
RESULTADOS Y DISCUSION.	53
5.1. DATOS PROCESADOS CON FILTRADO Y SIN FILTRADO.	53
5.2. CUADRO COMPARATIVO DE LA RELACIÓN SEÑAL – RUIDO.....	67
5.3. LITOLOGÍA OBTENIDA EN LA INVERSIÓN.	69
CONCLUSIONES.....	73
BIBLIOGRAFÍA.....	75

Índice de Figuras

Figura 2.1.1. Momento magnético precesando alrededor del campo magnético efectivo	21
Figura 2.1.2. Rotación de la magnetización	21
Figura 2.1.3. Rotación de la Magnetización al plano xy	21
Figura 2.1.4. Señal de Decaimiento Libre (FID)	22
Figura 2.2.1. Momento de Pulso	23
Figura 2.2.2. Diagrama de los campos magnéticos	24
Figura 2.2.3. Comportamiento del espín durante la relajación	24
Figura 2.2.4. Función de la antena	25
Figura 2.2.5. Esquema de una secuencia de emisión – recepción en función del tiempo	26
Figura 2.3.1.1 Distribución de los tamaños de granos de los sedimentos	27
Figura 2.3.1.2. Espacio poral	27
Figura 2.3.1.3. Porosidad efectiva	28
Figura 2.3.2.1 Distribución hipotética para el gas y agua	29
Figura 2.3.3.1. Valores de resistividad de rocas y suelos	30
Figura 3.1.1. Diagrama de NUMIS	34
Figura 3.1.2. Componentes del Equipo	35
Figura 3.2.1. Faja Petrolífera HRCF	36
Figura 3.2.2 Descarga e Instalación del equipo NUMIS	37
Figura 3.2.3. Instalado el equipo	37
Figura 3.3.1. Pestaña de configuración	39
Figura 3.3.2. Valores y señales en tiempo real	40
Figura 4.1.1. Señales “FID” y ruido	44
Figura 4.2.1. Creación de la matriz	45
Figura 4.3.1. Ejecución del software Samovar	46
Figura 4.3.2. Ventana de entrada de datos y parámetros de la inversión	47
Figura 4.3.3. Puntos del “Blacklist”	48
Figura 4.3.4. Datos de entrada y Resultados numéricos	50
Figura 4.3.5. Descripción de las graficas.....	51
Figura 5.1.1. Configuración con Filtro y sin Filtro	53
Figura 5.1.2. Datos de entrada y Resultados numéricos “Sounding” 0016 (filtro)	54
Figura 5.1.3. Datos de entrada y Resultados numéricos “Sounding” 0016(sin filtro)	54
Figura 5.1.4. Curvas de decaimiento y Curva T_2 en función de Q “Sounding” 0016 (filtro)	55
Figura 5.1.5. Curvas de decaimiento y Curva T_2 en función de Q “Sounding” 0016 (sin filtro)	55
Figura 5.1.6. Curvas de fase y frecuencia “Sounding” 0016 (filtro)	56
Figura 5.1.7. Curvas de fase y frecuencia “Sounding” 0016 (sin filtro)	56
Figura 5.1.8. Curva de inversión y Función de la inversión “Sounding” 0016 (filtro)	57
Figura 5.1.9. Curva de inversión y Función de la inversión “Sounding” 0016 (sin filtro)	57
Figura 5.1.10. Datos de entrada y Resultados numéricos “Sounding” 0018 (filtro)	59
Figura 5.1.11. Datos de entrada y Resultados numéricos “Sounding” 0018 (sin filtro)	59
Figura 5.1.12. Curvas de decaimiento y Curva T_2 en función de Q “Sounding” 0018 (filtro)	60
Figura 5.1.13 Curvas de decaimiento y Curva T_2 en función de Q “Sounding” 0018 (sin filtro)	60
Figura 5.1.14. Curvas de fase y frecuencia “Sounding” 0018 (filtro)	61
Figura 5.1.15. Curvas de fase y frecuencia “Sounding” 0018 (sin filtro)	61
Figura 5.1.16. Curva de inversión y Función de la inversión “Sounding” 0018 (filtro)	62
Figura 5.1.17. Curva de inversión y Función de la inversión “Sounding” 0018 (sin filtro)	62

Figura 5.1.18. Datos de entrada y Resultados numéricos RMN Huyapari (filtro)	63
Figura 5.1.19. Datos de entrada y Resultados numéricos RMN Huyapari (sin filtro)	63
Figura 5.1.20. Curvas de decaimiento y Curva T_2 en función de Q RMN Huyapari (filtro)	64
Figura 5.1.21. Curvas de decaimiento y Curva T_2 en función de Q RMN Huyapari (sin filtro)	64
Figura 5.1.22. Curvas de fase y frecuencia RMN Huyapari (filtro)	65
Figura 5.1.23. Curvas de fase y frecuencia RMN Huyapari (sin filtro)	65
Figura 5.1.24. Curva de inversión y Función de la inversión RMN Huyapari (filtro)	66
Figura 5.1.25. Curva de inversión y Función de la inversión RMN Huyapari (sin filtro)	66
Figura A.1. Datos de entrada y Resultados numéricos “Sounding” 0017 (sin filtro)	77
Figura A.2. Curvas de decaimiento y Curva T_2 en función de Q “Sounding” 0017 (filtro)	77
Figura A.3. Curvas de fase y frecuencia “Sounding” 0017 (filtro)	78
Figura A.4. Curva de inversión y Función de la inversión “Sounding” 0017 (filtro)	78
Figura A.5. Datos de entrada y Resultados numéricos “Sounding” 0017 (sin filtro)	79
Figura A.6. Curvas de decaimiento y Curva T_2 en función de Q “Sounding” 0017 (sin filtro)	79
Figura A.7. Curvas de fase y frecuencia “Sounding” 0017 (sin filtro)	80
Figura A.8. Curva de inversión y Función de la inversión “Sounding” 0017 (sin filtro)	80
Figura A.9. Datos de entrada y Resultados numéricos “Sounding” 0023 (filtro)	81
Figura A.10. Curvas de decaimiento y Curva T_2 en función de Q “Sounding” 0023 (filtro)	81
Figura A.11. Curvas de fase y frecuencia “Sounding” 0023 (filtro)	82
Figura A.12. Curva de inversión y Función de la inversión “Sounding” 0023 (filtro)	82
Figura A.13. Datos de entrada y Resultados numéricos “Sounding” 0023 (sin filtro)	83
Figura A.14. Curvas de decaimiento y Curva T_2 en función de Q “Sounding” 0023 (sin filtro)	83
Figura A.15. Curvas de fase y frecuencia “Sounding” 0023 (sin filtro)	84
Figura A.16. Curva de inversión y Función de la inversión “Sounding” 0023 (sin filtro)	84
Figura A.17. Datos de entrada y Resultados numéricos “Sounding” 0019 (filtro)	85
Figura A.18. Curvas de decaimiento y Curva T_2 en función de Q “Sounding” 0019 (filtro)	85
Figura A.19. Curvas de fase y frecuencia “Sounding” 0019 (filtro)	86
Figura A.20. Curva de inversión y Función de la inversión “Sounding” 0019 (filtro)	86
Figura A.21. Datos de entrada y Resultados numéricos “Sounding” 0019 (sin filtro)	87
Figura A.22. Curvas de decaimiento y Curva T_2 en función de Q “Sounding” 0019 (sin filtro)	87
Figura A.23. Curvas de fase y frecuencia “Sounding” 0019 (sin filtro)	88
Figura A.24. Curva de inversión y Función de la inversión “Sounding” 0019 (sin filtro)	88
Figura A.25. Datos de entrada y Resultados numéricos “Sounding” 0020 (filtro)	89
Figura A.26. Curvas de decaimiento y Curva T_2 en función de Q “Sounding” 0020 (filtro)	89
Figura A.27. Curvas de fase y frecuencia “Sounding” 0020 (filtro)	90
Figura A.28. Curva de inversión y Función de la inversión “Sounding” 0020 (filtro)	90
Figura A.29. Datos de entrada y Resultados numéricos “Sounding” 0020 (sin filtro)	91
Figura A.30. Curvas de decaimiento y Curva T_2 en función de Q “Sounding” 0020 (sin filtro)	91
Figura A.31. Curvas de fase y frecuencia “Sounding” 0020 (sin filtro)	92
Figura A.32. Curva de inversión y Función de la inversión “Sounding” 0020 (sin filtro)	92
Figura A.33. Datos de entrada y Resultados numéricos “Sounding” 0013 (filtro)	93
Figura A.34. Curvas de decaimiento y Curva T_2 en función de Q “Sounding” 0013 (filtro)	93
Figura A.35. Curvas de fase y frecuencia “Sounding” 0013 (filtro)	94
Figura A.36. Curva de inversión y Función de la inversión “Sounding” (filtro)	94
Figura A.37. Datos de entrada y Resultados numéricos “Sounding” 0013 (sin filtro)	95
Figura A.38. Curvas de decaimiento y Curva T_2 en función de Q “Sounding” 0013 (sin filtro)	95
Figura A.39. Curvas de fase y frecuencia “Sounding” 0013 (sin filtro)	96
Figura A.40. Curva de inversión y Función de la inversión “Sounding” 0013 (sin filtro)	96

Índice de Cuadros

Tabla 2.3.1.1 Valores de tiempo de decaimiento para distintos estratos	28
Tabla 4.1.1. Clasificación de los archivos	42
Tabla 4.2.1. Valores de resistividad	45
Tabla 5.2.1. Relación señal – ruido con N.F. y sin N.F	67
Tabla 5.3.1. Litología del resultado de inversión en cada archivo	69

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN.

Este trabajo especial de grado es una investigación conjuntamente realizada con la empresa PDVSA, interesados en determinar las propiedades petrofísicas y el contenido de agua en la región Huyapari-Estado Anzoátegui, a través de una nueva técnica de sondeo recientemente llegada al país, basada en la resonancia magnética nuclear aplicada a la superficie terrestre y que de aquí en adelante se denominará Resonancia Magnética Nuclear de Superficie (RMNS).

El método RMNS se aplicó como una técnica de sondeo no invasiva con éxito a finales del año setenta por un grupo de físicos rusos, con la finalidad de evaluar las propiedades petrofísicas en un acuífero [1].

En el capítulo 2 se explica la teoría relacionada con la RMNS, motivado a que los protones de hidrogeno dentro de un acuífero, están bajo la acción del campo magnético terrestre, cuyo valor es muy pequeño del orden de $25 \mu T$ y $65 \mu T$, dependiendo del posicionamiento y el ruido de la zona; para recibir la señal del tiempo de relajación de dichos protones se requiere de un campo magnético oscilante, este se puede generar entre otras configuraciones al usar, una espira cuadrada de 100 m por lado, que se empleará como una antena de transmisión y recepción, colocada en la superficie del subsuelo, es decir, se realiza una medición “*in situ*”.

En el capítulo 3 se explica la metodología requerida para desarrollar el trabajo de campo, donde se adquirió la data con el uso del instrumento NUMIS. El procesamiento de la data, se describe en el capítulo 4, se trabajó con el software Prodiviner para visualizar la data adquirida en la medición y el software Samovar se utilizó para realizar el procesamiento de la data (inversión de los datos), con la finalidad de poder conseguir agua móvil (acuífero), **aunque este método no garantiza determinar la salinidad del agua subterránea.**[1]

En el capítulo 5 se muestran los resultados numéricos y gráficos (señales “FID”, curva de tiempo de relajación, curva de frecuencia, curva de fase, curva de sondeo y la función de inversión), la más resaltante es la función de inversión donde se observa la relación profundidad en función de la cantidad de agua (w), además se incorporan dos tablas comparativas, el primero se basa en la relación señal – ruido, uno de los resultados numéricos, la segunda tabla con la información obtenida de la función inversión, observamos la litología de cada data adquirida. En la discusión de los resultados, se consideran los valores de resistividad que fueron proporcionados por la empresa PDVSA para la inversión de los datos, ya que el efecto de la conductividad eléctrica en las aguas subterráneas puede afectar la amplitud de la señal RMNS, de dichas señales observadas se puede evidenciar, la presencia de agua en la zona estudiada.

El apéndice A, se observan los resultados de todos los archivos, que fueron suministrados por la empresa PDVSA.

CAPÍTULO 2

MARCO TEORICO.

2.1. Método de Resonancia Magnética Nuclear (RMN).

Todo núcleo atómico en su estado fundamental tiene un momento angular de spin distinto de cero $I\hbar$ y un momento dipolar magnético $\mu = \gamma\hbar I$ alineado con este, estos momentos dan lugar al magnetismo nuclear.

En presencia de un campo magnético estático H_0 , cada momento magnético μ del núcleo correspondiente a cada átomo libre empieza a rotar alrededor del campo magnético estático, esta rotación va con cierta rapidez angular ω y esta se denomina frecuencia de Larmor.

La frecuencia de Larmor depende del campo magnético estático y la constante giromagnética γ .

$$\omega = \frac{\gamma H_0}{2\pi} \quad (2.1.1)$$

La magnetización, es una característica del sistema de espines nucleares y es el resultado de la sumatoria del momento magnético total por unidad de volumen, donde su componente está a lo largo del eje del campo magnético estático.

$$M = \frac{\sum_i \mu_i}{V} \quad (2.1.2)$$

En la suposición de que el sistema de espines se encuentre en equilibrio termodinámico, la magnetización neta está dada por la ecuación 2.1.3.

$$M = N\gamma\hbar \frac{\sum_{-S}^S m e^{\gamma\hbar m H_0 / \kappa T}}{\sum_{-S}^S e^{\gamma\hbar m H_0 / \kappa T}} \quad (2.1.3)$$

Si en el sistema de espines la temperatura es elevada, talque $\kappa T \gg \gamma\hbar m H_0$ (esto casi siempre sucede en los núcleos), se puede aproximar la magnetización por la ecuación 2.1.4. [2]

$$M = \chi_0 H_0 = \frac{N\gamma^2 \hbar^2 S(S+1)H_0}{3\kappa T} \quad (2.1.4)$$

Donde N es el número de núcleo magnético por unidad volumen, $S = 1/2$ es el espín nuclear, \hbar y κ son la constante de Planck y la constante de Boltzman's respectivamente, y T es la temperatura.

Si un campo magnético oscilante H_1 es aplicado de manera perpendicular al campo magnético estático H_0 , el momento magnético μ cambia de orientación y empieza a precesar a la misma frecuencia de Larmor alrededor de una de las componentes del campo magnético oscilante, entrando en resonancia.

Al estar presente un campo magnético oscilante, el sistema de referencia es rotante por tanto el momento magnético μ precesa alrededor de un campo magnético efectivo H_{efec} ; como se puede observar en la Figura 2.1.1.

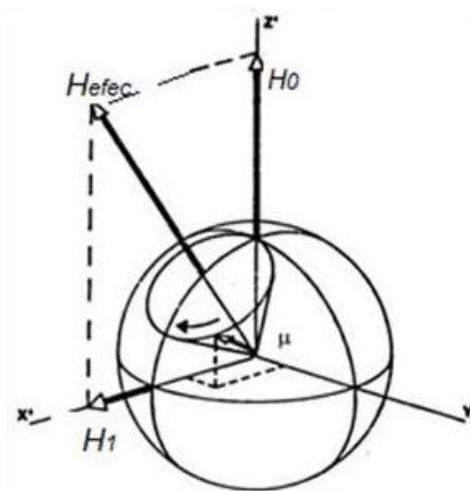


Figura 2.1.1. Momento magnético precesando alrededor del campo magnético efectivo.[3]

Se puede hacer “precesar” a la magnetización M fuera de su orientación original generalmente es el eje z , por un ángulo respecto a esa dirección $\theta = \omega t_p$ y en particular para el caso de resonancia (Figura 2.1.2), se puede establecer una magnetización en el plano “ xy ”(Figura 2.1.3).

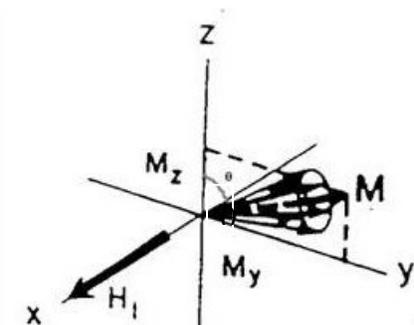


Figura 2.1.2. Rotación de la magnetización. [3]

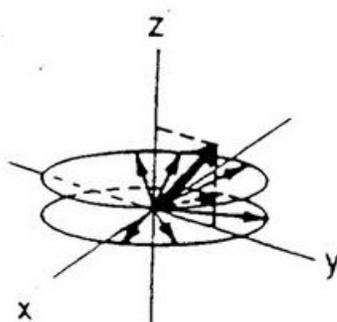


Figura 2.1.3. Rotación de la Magnetización al plano xy . [3]

Si se encuentra el campo magnético H_1 oscilante dispuesto a lo largo del eje x la componente rotante del campo H_1 , rota la magnetización en la dirección y para un pulso de duración t_p , tal que $\gamma H_1 t_p = \pi/2$.

Después de un pulso de 90° la magnetización original girará alrededor del eje z con la frecuencia de Larmor y será detectada en el plano xy , como una señal de Radio Frecuencia, la cual decae debido a los procesos de relajación transversales. Esta señal se conoce como “FID” (Free Induction Decay) (ver Figura 2.1.4).

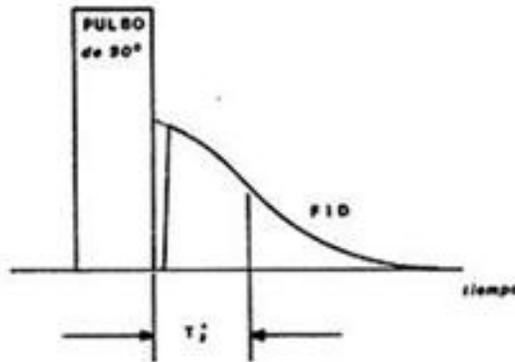


Figura 2.1.4. Señal de Decaimiento Libre (FID). [3]

2.2. Aplicación en Geofísica.

El campo magnético terrestre en la superficie toma valores entre $25 \mu T$ y $65 \mu T$, el valor de este dependerá de la ubicación geográfica donde se encuentra la zona de estudio, su rango de valores para la frecuencia de Larmor es de 1,06 a 2,80 kHz. [4]

Para el sondeo de agua en el subsuelo, se utiliza un cable en forma de espira rectangular de 100 m de lado, o circular de 100 m de diámetro, y sección transversal de 10 mm^2 . Este cable, colocado en la superficie cumplirá la función de una antena que emite y recibe la señal.

En la antena se genera un pulso de excitación caracterizado por un momento de pulso Q sintonizado a la misma frecuencia de Larmor local, donde $Q = I \cdot \Delta t$ con unidades de

Amper-milisegundos, se hace pasar por la antena una corriente oscilante $I(t) = I_0 \cos \omega_0 t$ durante un cierto tiempo entre 20-40 ms (ver Figura 2.2.1).

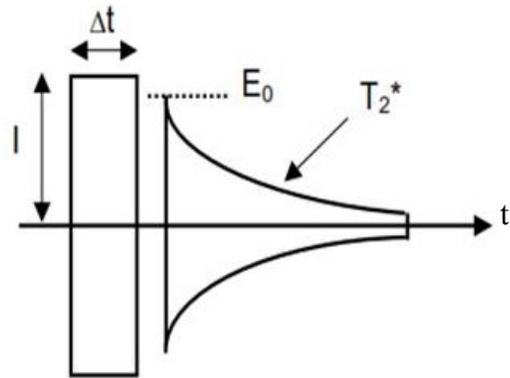


Figura 2.2.1. Momento de Pulso. [5]

La frecuencia de Larmor local es:

$$\omega_L = \frac{\gamma_H \cdot H_0}{2\pi} \quad (2.2.1)$$

donde γ_H es la constante giromagnética de los protones de hidrogeno.

El campo magnético oscilante H_1 generado en la espira es perpendicular al campo magnético estático H_0 (campo magnético terrestre) que sienten los protones de los átomos de hidrogeno mayormente encontrados en las moléculas de agua, en la Figura 2.2.2 se puede observar la espira que genera H_1 , además de las dos capas con estratificación horizontal y un acuífero representado en la segunda capa; la profundidad alcanzada es proporcional al radio de la antena [1].

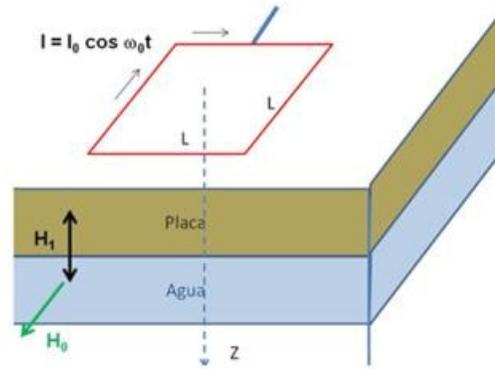
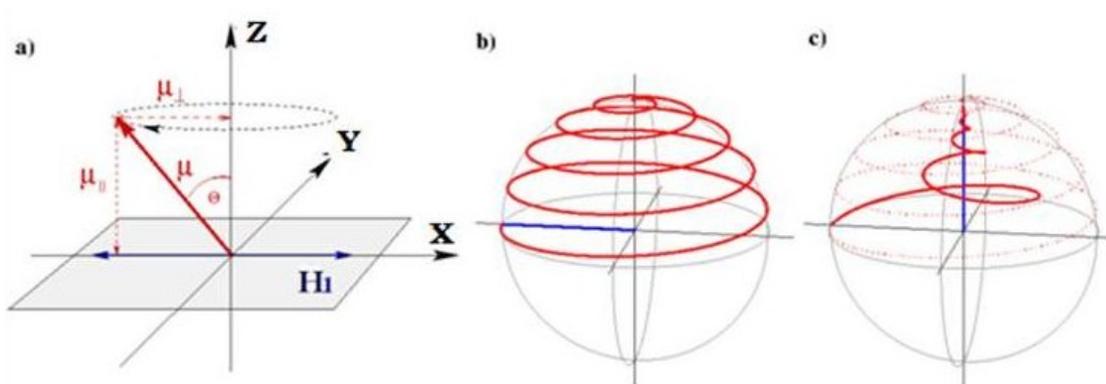


Figura 2.2.2. Diagrama de los campos magnéticos.

Como el método de sondeo está basado en la resonancia magnética nuclear, entonces la componente que se encuentre a la frecuencia de Larmor local del campo magnético oscilante H_1 , entra en resonancia con la componente perpendicular del momento magnético μ como se puede observar en la Figura 2.2.3.



- Componentes del momento magnético, precesión del espín.
- Trayectoria del momento magnético de giro durante el proceso de excitación.
- El proceso de relajación.

Figura 2.2.3. Comportamiento del espín durante la relajación. [6]

El momento magnético cambiara de orientación, entonces el ángulo de inclinación de la Magnetización M y el campo magnético terrestre H_0 es:

$$\theta(r) = \frac{1}{2} \cdot \gamma_H \cdot H_1 \cdot \Delta t \quad (2.2.2)$$

La componente de la magnetización nuclear M que esta normal al campo magnético H_0 , está dada por la ecuación 2.2.3.

$$M_{\perp} = M_0 \cdot \text{sen}(\theta) \quad (2.2.3)$$

Una vez que el pulso de excitación termina, los protones de hidrógeno se encuentran excitados como se observa en la figura 2.2.4, los protones empezaran a relajarse emitiendo una respuesta que la antena va a recibir.

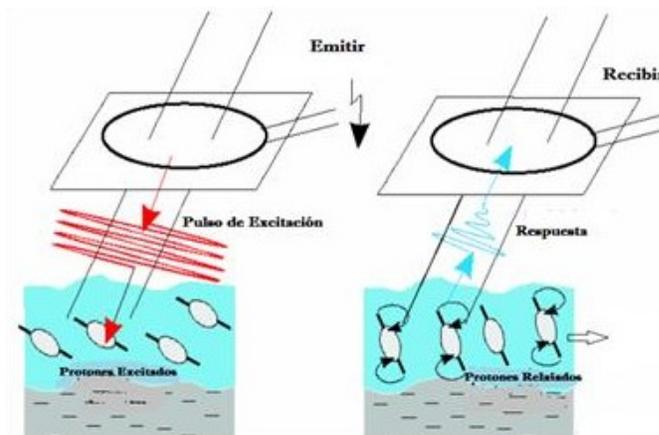


Figura 2.2.4. Función de la antena. [6]

El decaimiento de la señal durante la relajación de los protones, después del pulso de excitación está dado por la siguiente relación:

$$e(t) = e_0(Q) \exp^{-t/T_2^*} \text{sen}(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (2.2.4)$$

Donde T_2^* es el tiempo de relajación espín-espín; t es el tiempo transcurrido desde la supresión del campo de excitación; φ_0 es la fase entre la corriente de excitación y la relajación medida en voltaje en la espira (ver Figura 2.2.5).

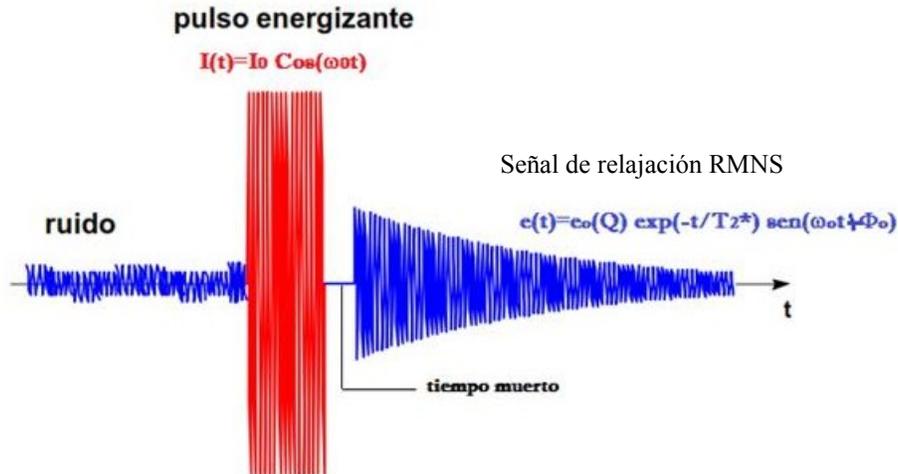


Figura 2.2.5. Esquema de una secuencia de emisión – recepción en función del tiempo. [5]

La señal de relajación recibida por la antena (en voltios) está dada por la siguiente expresión [2], [7]:

$$e_0(Q) = \frac{\omega}{I} \int_V M_0(\mathbf{r}) H_{1\perp}(\mathbf{r}) \sin(\theta) n(\mathbf{r}) dV(\mathbf{r}) \quad (2.2.5)$$

Donde ω es la frecuencia de Larmor; I la corriente oscilante; $M_0(\mathbf{r})$ magnetización nuclear para los protones; $H_{1\perp}(\mathbf{r})$ campo magnético oscilante; θ ángulo de inclinación de la magnetización; $n(\mathbf{r})$ cantidad de agua; \mathbf{r} el vector de coordenadas.

La medida de la señal de relajación determina la presencia o ausencia de agua subterránea, la amplitud de la señal $e_0(Q)$ en función del parámetro Q indica la relación entre la cantidad de agua versus la profundidad.

2.3. Propiedades Petrofísicas.

2.3.1. Porosidad

La RMNS detecta señales de relajación mayores a 30 ms, es decir, no recibe señales de agua (menores de 30 ms) confinada en los poros, por lo tanto las señales de relajación mayores a 30 ms indica agua libre, líquido que tiene movilidad por los poros; esto ocurre en equipos de baja resolución, como el Numis.

El tamaño del grano indica que tipo de sedimentos existen en los estratos, que van conformando las capas del subsuelo. Se puede observar en la Figura 2.3.1.1 la nomenclatura según, Udden & Wenworth, 1922.

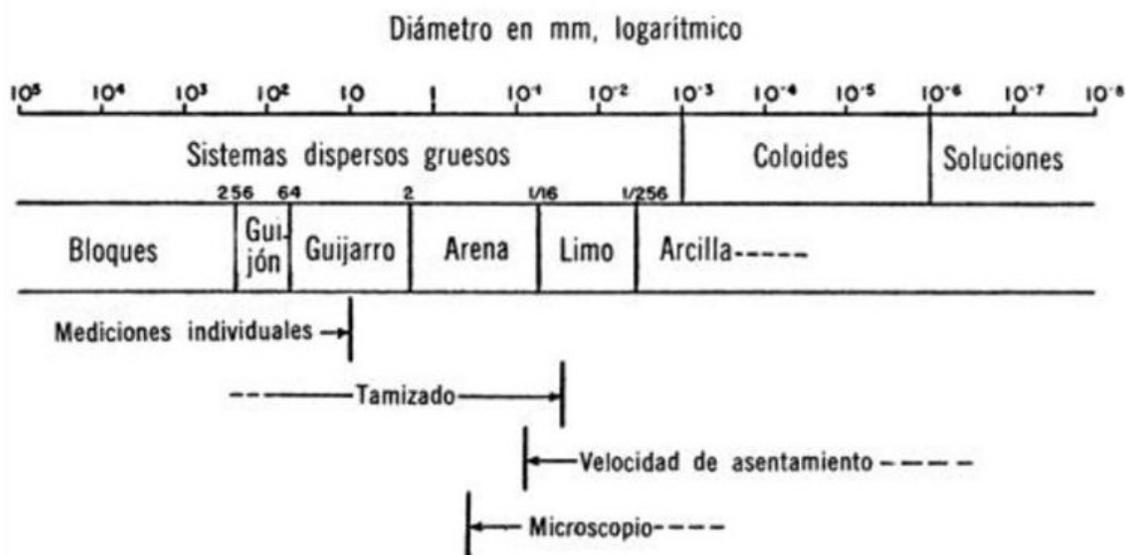


Figura 2.3.1.1 Distribución de los tamaños de granos de los sedimentos. [8]

Durante la sedimentación y litificación, algunos de los espacios de los poros (espacio vacío creado entre los granos) como se observa en la Figura 2.3.1.2, se van desarrollando por diversos procesos como la cementación y compactación. El espacio poroso es ocupado por fluidos (líquidos o gases).

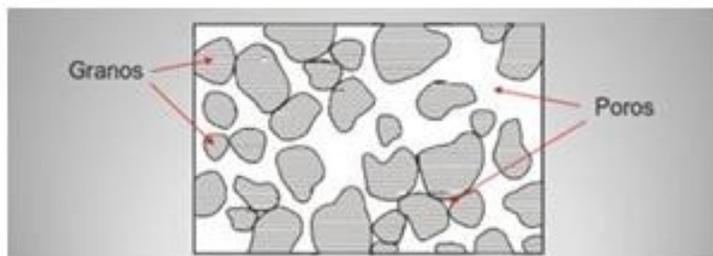


Figura 2.3.1.2. Espacio poral. [9]

Muchos de los poros estarán interconectados mientras que otros serán completamente aislados. La porosidad efectiva está dada por la relación entre el volumen de poros interconectados y el volumen total en de poros. (Ver Figura 2.3.1.3)

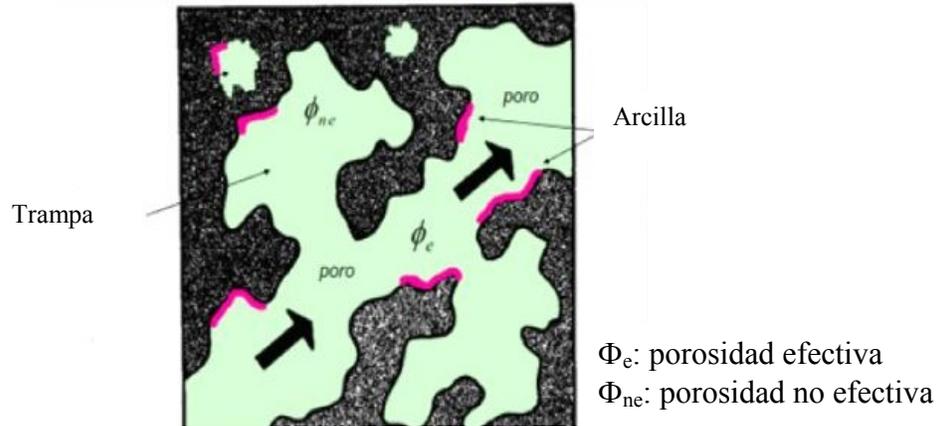


Figura 2.3.1.3. Porosidad efectiva. [9]

La porosidad efectiva, se ve afectada por una serie de factores litológicos incluyendo el tipo, el contenido y la hidratación de las arcillas presentes en la roca, la heterogeneidad de tamaños de grano, la cementación de los granos y cualquier meteorización que puede afectar a la roca.

El agua tiene un tiempo de decaimiento característico, que depende del tipo de estrato como se observa en la Tabla 2.3.1.1. [10]

Tabla 2.3.1.1. Valores de tiempo de decaimiento para distintos estratos.

Tiempo de decaimiento (ms)	Tipo de estrato
< 30	Arcillas-Arenosas.
30-60	Arenas-Arcillosas, arenas muy finas.
60-120	Arenas finas.
120-180	Arenas medianas.
180-300	Arenas gruesas y Gravas
300-600	Depósitos de Grava.
600-1000	Agua móvil.

2.3.2. Permeabilidad

La permeabilidad, es una propiedad que nos da cuenta del paso de fluido, a través de los poros interconectados (porosidad efectiva) de una roca, sin que se dañen ni se desplacen las partículas de la roca como se observa en la Figura 2.3.2.1.

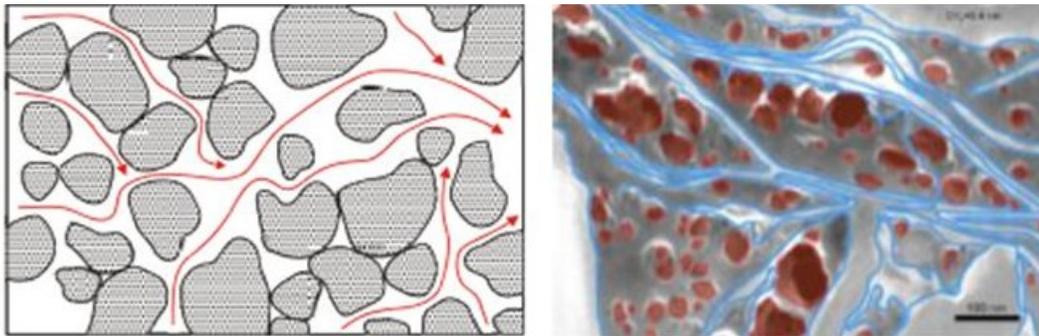


Figura 2.3.2.1. Distribución hipotética para el gas y agua. [11]

En consecuencia al depender de la porosidad efectiva, se ve afectada por el tipo de grano de la roca, el tamaño y forma del grano, la distribución de ellos, el grado de consolidación y la cementación.

La permeabilidad (m/s) se estima como en la ecuación 2.3.2.1. [12]

$$\text{permeabilidad} = C_{px} * \text{porosidad} * (T_1)^2 \quad (2.3.2.1)$$

donde C_{px} es un coeficiente que puede ser modificado en la configuración previa a la inversión.

Las formaciones sedimentarias son capaces de transmitir una corriente eléctrica sólo por medio de su contenido de agua intersticial y adsorbido

2.3.3. Resistividad.

La resistividad eléctrica (recíproco de la conductividad) de una roca con líquido saturado, es su capacidad para impedir el flujo de corriente eléctrica a través de la roca.

Generalmente las aguas que se encuentran en la naturaleza presentan una conductividad apreciable, pues tienen disueltas sales normalmente son cloruro de sodio (NaCl) y cloruro de potasio (KCl).

En las aguas de lagos y arroyos de alta montaña, su resistividad varían entre 1000 Ω -m a 3000 Ω -m, las aguas subterráneas tienen resistividades de 1 a 20 Ω -m, las aguas marinas tienen una resistividad de 0,2 Ω -m. [13]

Se puede observar en la siguiente Figura 2.3.3.1 que existen valores teóricos de resistividades que son relacionados a un tipo de estrato. [14]

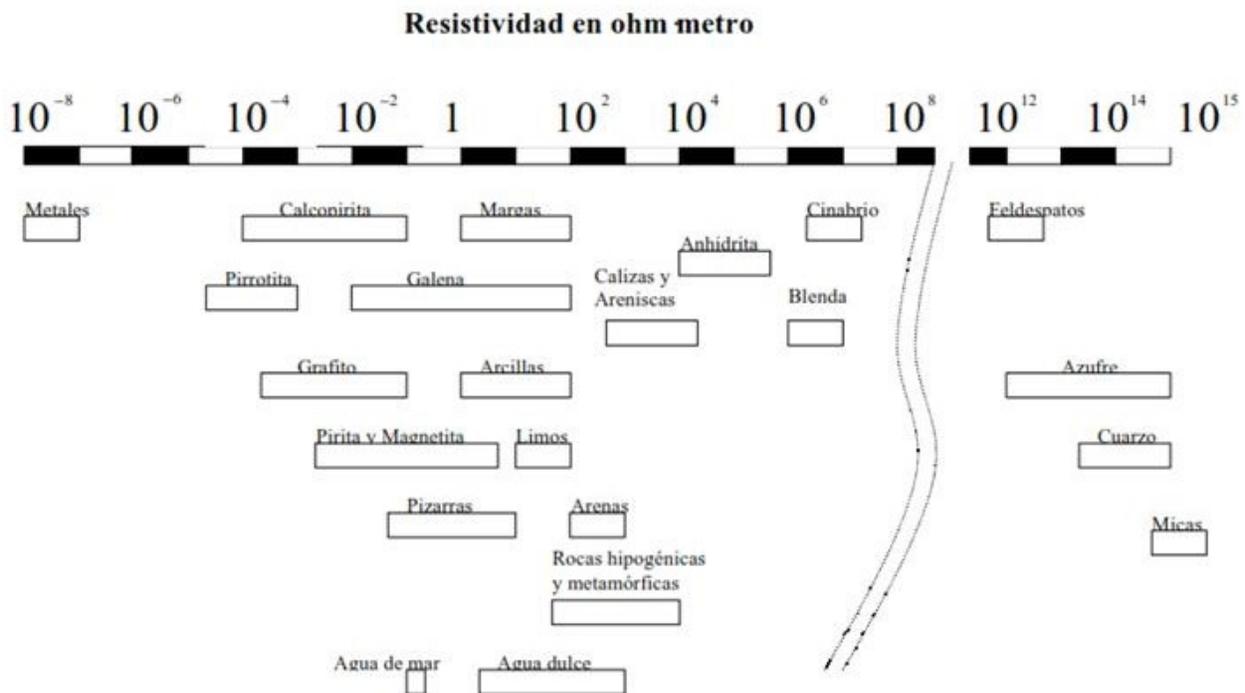


Figura 2.3.3.1. Valores de resistividades de rocas y suelos. [14]

Los estratos más relevantes para nuestra zona de estudio son la arcilla, arenas, gravas y otras. Con la información de la Figura 2.3.3.1 se pueden estimar los valores de resistividad, para arcillas entre 3 Ω -m a 30 Ω -m, arenas y gravas 100 Ω -m a 1000 Ω -m.

2.4. Inversión de la data de Resonancia Magnética Nuclear de Superficie.

La principal ventaja de la resonancia magnética nuclear de superficie, con respecto a otros métodos geofísicos es que a partir de la inversión de datos permite la detección de subsuelo acuífero con un alto grado de fiabilidad.

La amplitud de la señal de RMN depende del parámetro de pulso (el producto de la amplitud de la corriente y su duración), la masa del volumen de agua y la profundidad del agua. Las mediciones se realizan mientras se varía el parámetro del pulso y el procesamiento de datos posteriores revela el número de capas saturada con el agua y los datos relativos a su espesor de profundidad y contenido de agua.

Uno de los principales problemas en la aplicación práctica del método de RMN, es que la señal es muy pequeña ($< 3000 \text{ nV}$), esta señal se mejora con los “stacking” (apilamiento vertical, permite la suma de la señal registrada con el fin de disminuir el ruido aleatorio), pero se incrementa el tiempo de medición. Se ha desarrollado un algoritmo que minimiza el número de mediciones (número de diferentes valores del parámetro de pulso) sin pérdida de precisión para la inversión dado una relación señal / ruido (S/N) por lo que es posible determinar un conjunto de pulsos óptimos para las mediciones.

Las mediciones de RMNS también son sensibles a la conductividad eléctrica del subsuelo, un subsuelo eléctricamente conductor provoca variaciones en la profundidad de la investigación y en la resolución vertical del método. [12]

La experiencia obtenida de la aplicación del método, ha demostrado que tanto el algoritmo de inversión, en donde $[E_0(Q), T_2^*(Q), T_1(Q)]$ es la data medida en campo en función del momento de pulso, pasan a una conversión de parámetros en función de la profundidad $[w(z), T_2^*(Z), T_1(Z), k(z)]$ y su análisis, son eficientes.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA.

3.1. Equipo NUMIS.

El instrumento NUMIS es diseñado por la firma francesa IRIS, tiene las siguientes características:

- Cada convertidor DC/AC es alimentado por dos baterías de 12V conectados en serie, teniendo un tiempo de duración de 6 a 8 horas para medición en campo.
- Los sintonizadores son para sintonizar la frecuencia en la espira, al valor deseado (frecuencia de Larmor) por medio de capacitores.
- La unidad transmisora produce los pulsos de tensión generados por una corriente oscilante, los pulsos son programables, con momentos de pulso que varían en un rango de 100 a 1800 A-ms dependiendo de la frecuencia de Larmor y la espira. La salida máxima de voltaje y corriente son 4000 V y 450 A.
- Los receptores son para medir las señales de RMNS en voltios.
- La antena consta de un cable con longitud suficiente para configurar una antena de 100 metros de lado, la cual puede ser cuadrada o circular, la sección transversal del cable es 10 mm^2 .
- El computador es para el control del sistema, así como para la adquisición y procesamiento de datos, a través de los programas Prodiviner y Samovar respectivamente.

Lo descrito anteriormente está esquematizado en la Figura 3.1.1, la unidad transmisora está delimitada en el recuadro azul.

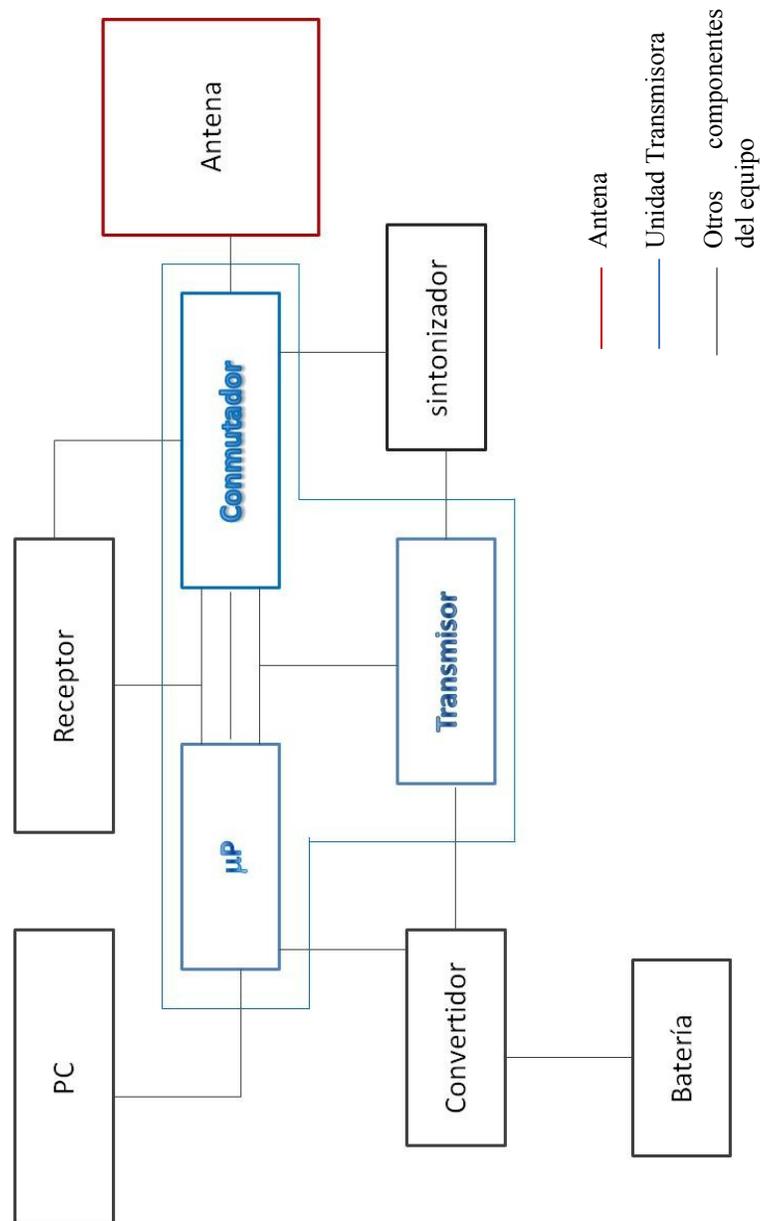


Figura 3.1.1. Diagrama de NUMIS.

En la Figura 3.1.2 se observa cada uno de los componentes que conforman el equipo NUMIS.

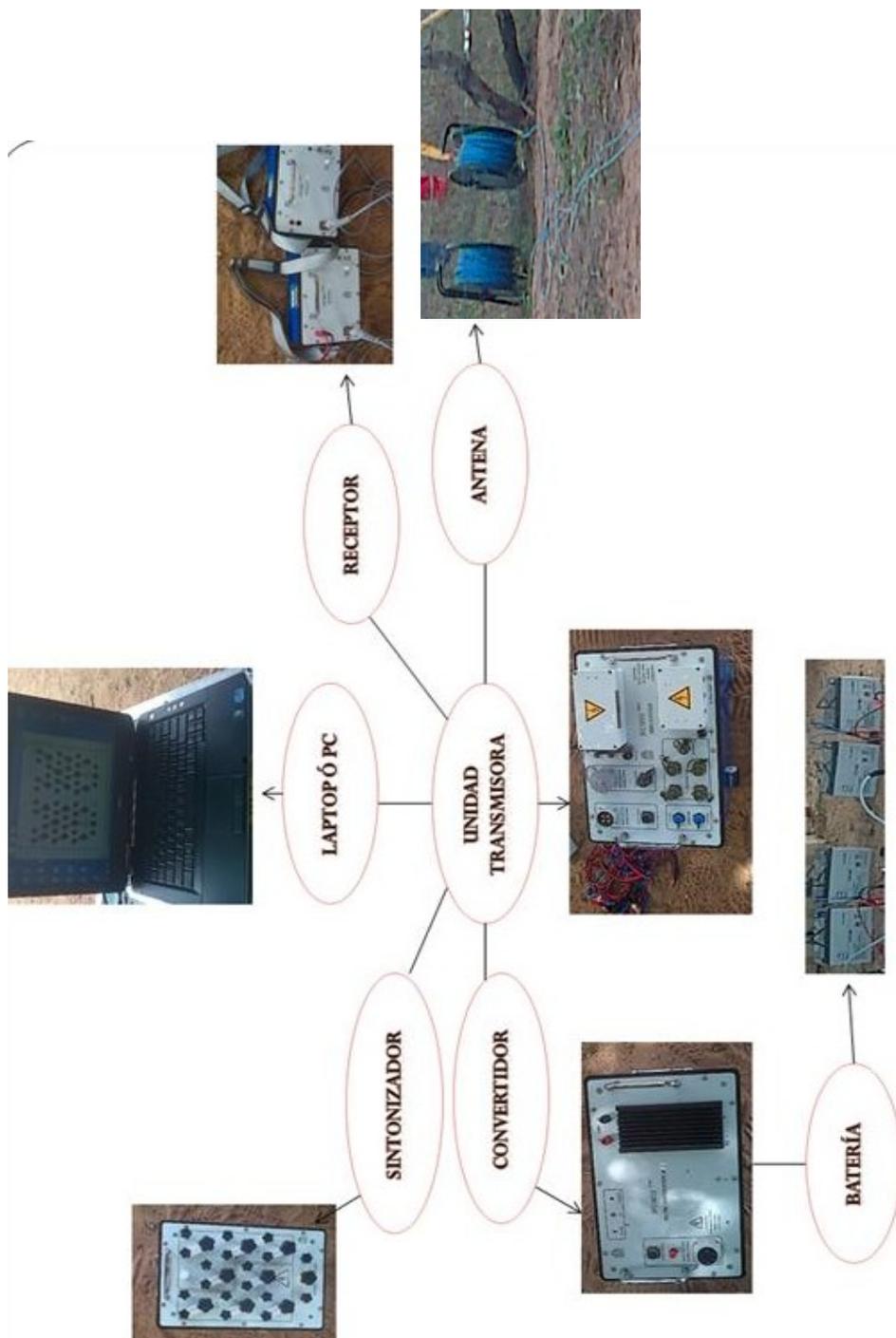


Figura 3.1.2. Componentes del Equipo.

3.2. Medición en Campo.

La región Huyapari, donde se realizaron las mediciones con el equipo NUMIS, se encuentra en la faja petrolífera Hugo Rafael Chávez Frías específicamente el bloque Ayacucho, la región está cerca de Petropiar.(Figura 3.2.1)

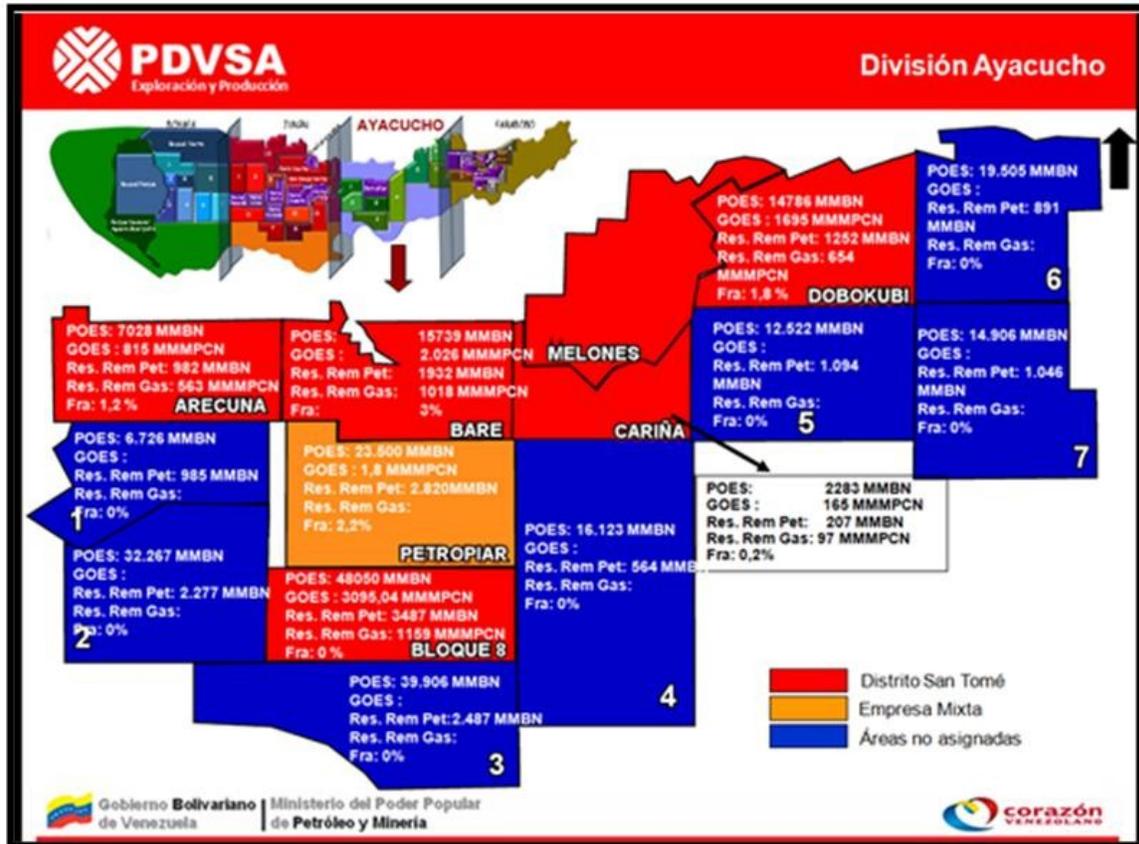


Figura 3.2.1. Faja Petrolífera HRCF.

Para adquirir la data, nos movilizamos desde el campamento base de la empresa sísmica bielovenenezolana, desde el Tigre - Edo. Anzoátegui con PDVSA-Exploración y PDVSA-Servicios, que trasladaron en vehículo el equipo NUMIS (Figura 3.2.2) hasta la zona de estudio.



Figura 3.2.2. Descarga e Instalación del equipo NUMIS.

Una vez instalado el equipo como se observa en la Figura 3.2.3, se empieza la adquisición de la data, para dicha adquisición se usa el software **Prodiviner**.



Figura 3.2.3. Instalado el equipo.

3.3. Adquisición de Datos.

El programa Prodiviner (ver Figura 3.3.1) es el software de adquisición de datos RMNS, es desarrollado bajo la plataforma Windows de 32 bits. Esta aplicación asume la función de adquisición junto con la visualización en tiempo real de las mediciones de campo.

- ❖ Puesta de la instrumentación: un día antes de la medición, se debe verificar el estado del bloque de condensadores, encargados de la sintonización. Sometiéndose a un ciclo de carga y descarga de tres horas, para así verificar funcionamiento en estado transiente.

Antes de empezar la adquisición de la data, en la pestaña **Configuration** (configuración) del programa Prodiviner, se deben introducir los siguientes parámetros:

- a. Se introduce el valor del campo magnético de la Tierra (en nT), medido con un Gaussímetro en la zona de estudio; esto con el fin de determinar la frecuencia a la cual se debe aplicar la señal del campo oscilante en la espira (frecuencia de Larmor).
- b. Se selecciona la forma geométrica y se introduce las dimensiones de la antena.
- c. Se selecciona la cantidad de momentos de pulso, generalmente son (16) dieciséis, el número depende la versión del software que se esté usando, (10) diez NUMIS Lite y (16) dieciseises para NUMIS Plus.
- d. Para adquisición se selecciona T_2 , el doble pulso es en caso de estimar la permeabilidad.
- e. La duración del pulso y grabación del FID, pueden ser modificadas.
- f. El tiempo de adquisición del ruido, se puede modificar.
- g. Marcar (On / Off) para conectar o desconectar el equipo.

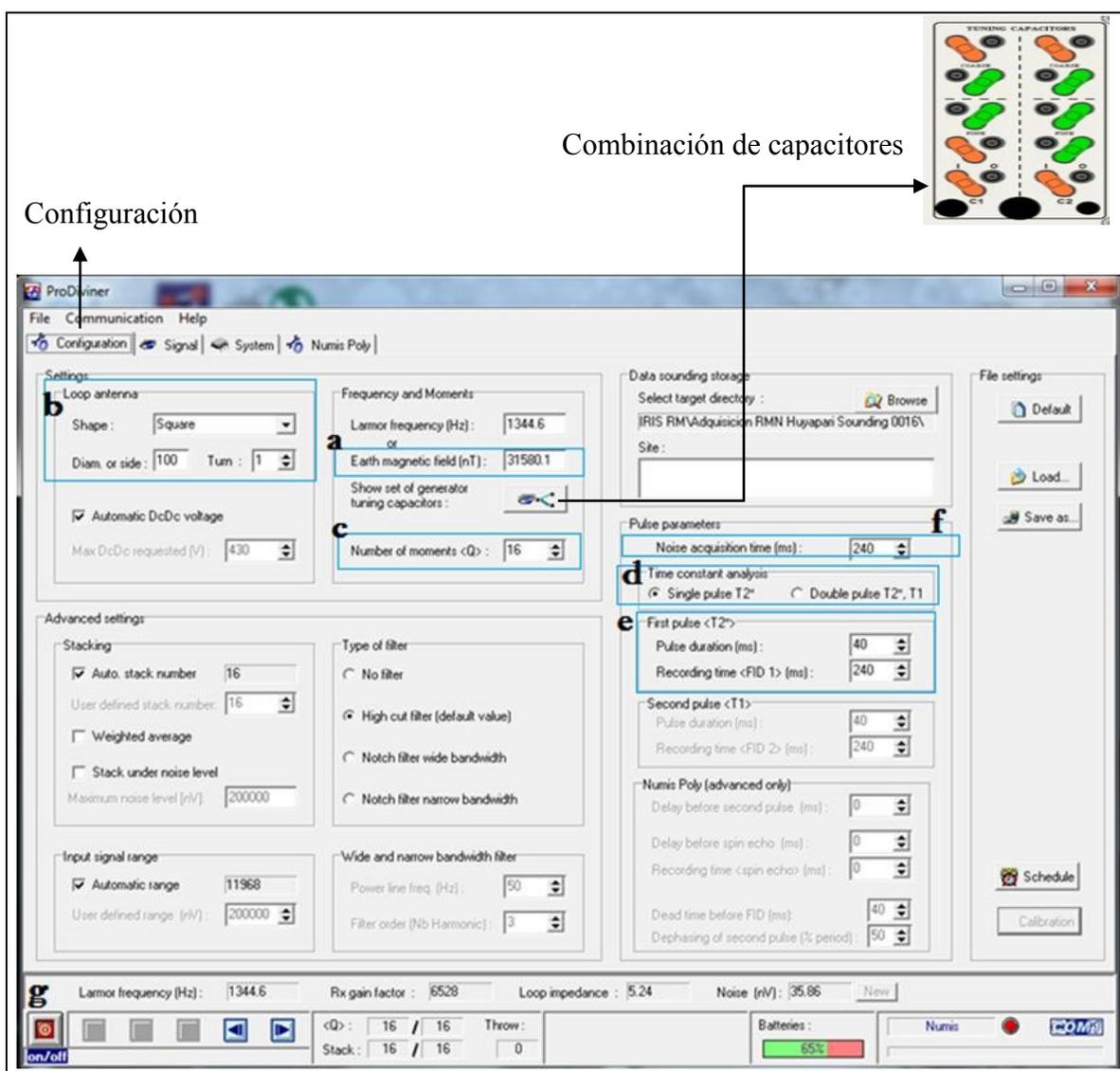


Figura 3.3.1. Pestaña de configuración.

En el proceso de la adquisición se observa en la Figura 3.3.2, donde la señal “FID” (curva de color azul) con un decaimiento exponencial, después aparece la señal ruido (curva de color negro) muy por debajo de la señal “FID”, ambas se observan en tiempo real en la pestaña **Signal** (Señal).

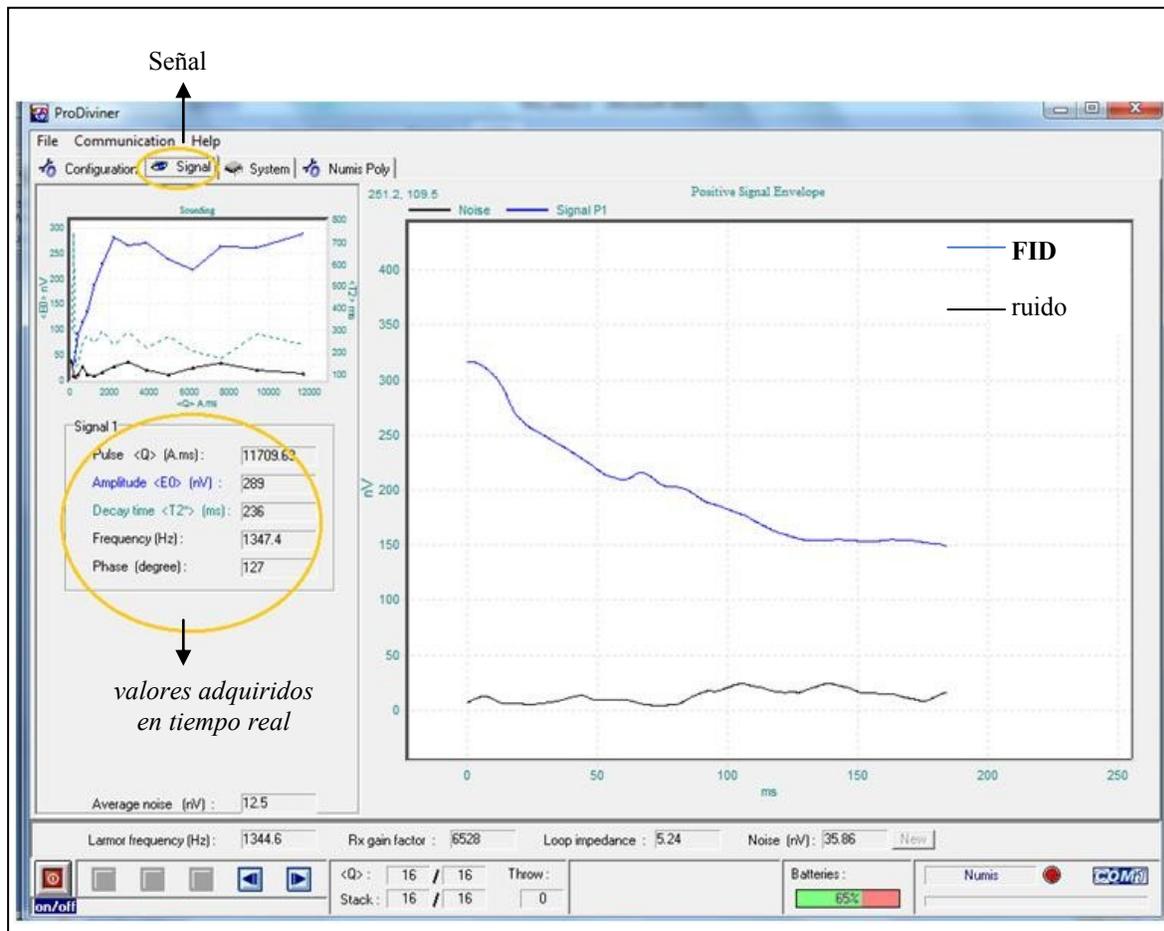


Figura 3.3.2. Valores y señales en tiempo real.

Mientras ocurre la adquisición, el número de **stack** (apilamiento vertical, permite la suma de la señal registrada con el fin de disminuir el ruido aleatorio) se va contabilizando para cada momento de pulso Q.

Se debe tomar en cuenta qué porcentaje de carga llevan las baterías, eso nos garantiza el tiempo en que vamos a realizar la medición.

CAPÍTULO 4

PROCESAMIENTO DE DATOS.

4.1. Clasificación de los archivos.

Los archivos que suministro PDVSA contienen los datos adquiridos en campo, que se midieron en distintos días, participando en la adquisición de datos de una de estas experiencias.

Se clasificaron los archivos de la siguiente manera:

Tabla 4.1.1. Clasificación de los archivos.

Archivo	Momento de pulso Q
RMN Huyapari “Sounding” 0016	16
RMN Huyapari “Sounding” 0017	16
RMN Huyapari “Sounding” 0023	16
RMN Huyapari “Sounding” 0018	16
RMN Huyapari “Sounding” 0019	16
RMN Huyapari “Sounding” 0020	16
RMN Huyapari	15
RMN Huyapari “Sounding” 0013	12

Los archivos que contienen momento de pulso Q igual a dieciséis, son considerados archivos completos.

Con el software **Prodiviner** se abre la data para cada archivo, para así observar las señales de “FID”, Ruido y en algunos casos T_1 (curva identificada de color rosado), para cada momento de pulso Q.

Un ejemplo de los archivos completos y para un solo momento Q se muestra en la Figura 4.1.1 a continuación.

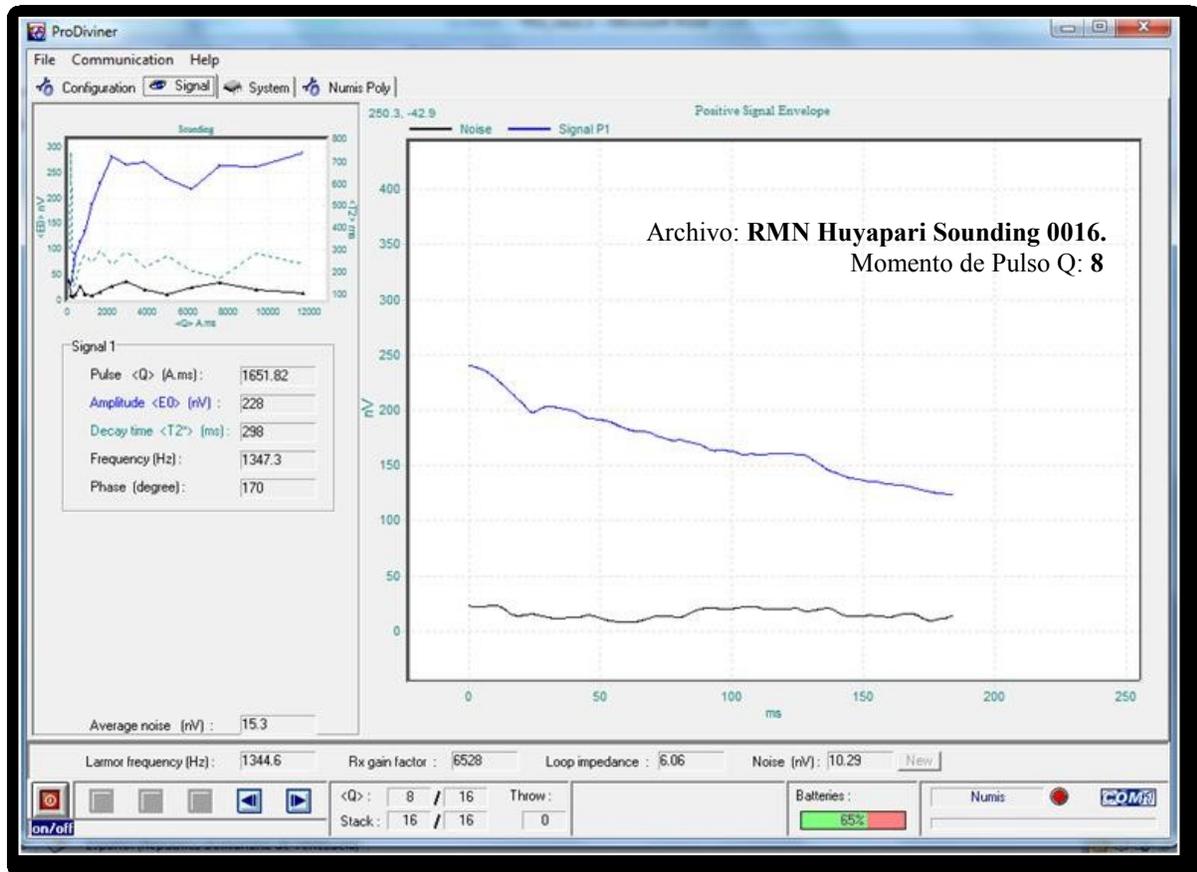


Figura 4.1.1. Señales FID y ruido

A todos los archivos se procede a realizar la inversión con el software **Samovar**. Se construye la matriz bajo la plataforma MS-Dos y con los datos de entrada de cada archivo podemos obtener los resultados de la inversión de estos.

4.2. Matriz de Inversión.

Parámetros de entrada para la matriz de inversión:

1. Tipo de configuración de la antena.
2. El diámetro o lado de la antena.
3. Número de vueltas.
4. Frecuencia (Hz).

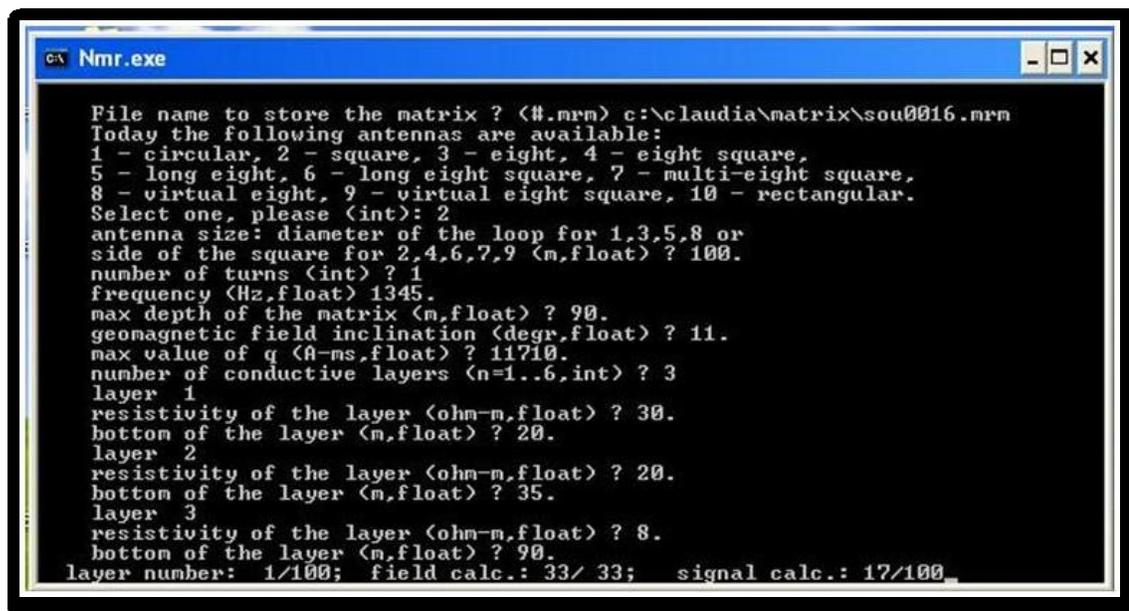
5. Máxima profundidad.
6. Inclinação del campo geomagnético dada por la latitud del sitio.
7. Número de capas conductoras.
8. Valores de resistividades y profundidad para capa.

La adquisición de la data se realizó para una antena cuadrada de lado 100 m y una sola vuelta, el valor de frecuencia fue obtenido en campo a través de la medición del campo magnético terrestre con el Gaussímetro, los demás parámetros son valores que proporcionó la empresa PDVSA de la zona de estudio que es la región Huyapari. En la Tabla 4.2.1 se muestran los valores de resistividad.

Tabla 4 .2.1.Valores de resistividad.

Capa	Profundidad (m)	Resistividad (Ω -m)
1	20	30
2	35	20
3	90	8

Para el archivo RMN Huyapari “Sounding” 0016, se construye la siguiente matriz (Figura 4.2.1):



```

File name to store the matrix ? (<#.mrn> c:\claudia\matrix\sou0016.mrn
Today the following antennas are available:
1 - circular, 2 - square, 3 - eight, 4 - eight square,
5 - long eight, 6 - long eight square, 7 - multi-eight square,
8 - virtual eight, 9 - virtual eight square, 10 - rectangular.
Select one, please <int>: 2
antenna size: diameter of the loop for 1,3,5,8 or
side of the square for 2,4,6,7,9 <m,float> ? 100.
number of turns <int> ? 1
frequency <Hz,float> 1345.
max depth of the matrix <m,float> ? 90.
geomagnetic field inclination <degr,float> ? 11.
max value of q <A-ms,float> ? 11710.
number of conductive layers <n=1..6,int> ? 3
layer 1
resistivity of the layer <ohm-m,float> ? 30.
bottom of the layer <m,float> ? 20.
layer 2
resistivity of the layer <ohm-m,float> ? 20.
bottom of the layer <m,float> ? 35.
layer 3
resistivity of the layer <ohm-m,float> ? 8.
bottom of the layer <m,float> ? 90.
layer number: 1/100; field calc.: 33/33; signal calc.: 17/100.

```

Figura 4.2.1. Creación de la matriz.

La matriz es $n \times m$ donde:

- n es el número de capas ($n=100$), los espesores de la capas depende de la profundidad máxima requerida para la investigación, son espaciadas logarítmicamente.
- m es el número de momento de pulso ($m=100$), los valores de los momentos de pulsos dependen de las profundidades y espesores de las capas, se seleccionan en relación con la amplitud de sus respuestas con respecto a las capas.

Cada elemento $\{i, j\}$ de la matriz representa la contribución de la i -ésima capa a la respuesta del j -ésimo valor del momento de impulso para la señal total medida por RMNS. Importante escribir el punto en donde indica “float” porque es un número flotante, de lo contrario no se crea la matriz.

4.3. Inversión con Samovar

Todos los valores de inversión, dependen de la data medida y de los parámetros seleccionados en el proceso de cálculo (sección 4.2).

Procedimiento de la inversión:

1. Se abre la ventana de Samovar, click a Run Inversion (F5) como se observa en la Figura 4.3.1.

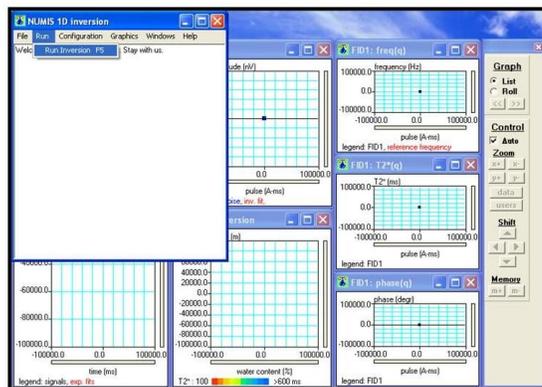


Figura 4.3.1. Ejecución del software samovar.

2. En la siguiente ventana, se seleccionan los datos de entrada y los parámetros de la inversión (Figura 4.3.2).

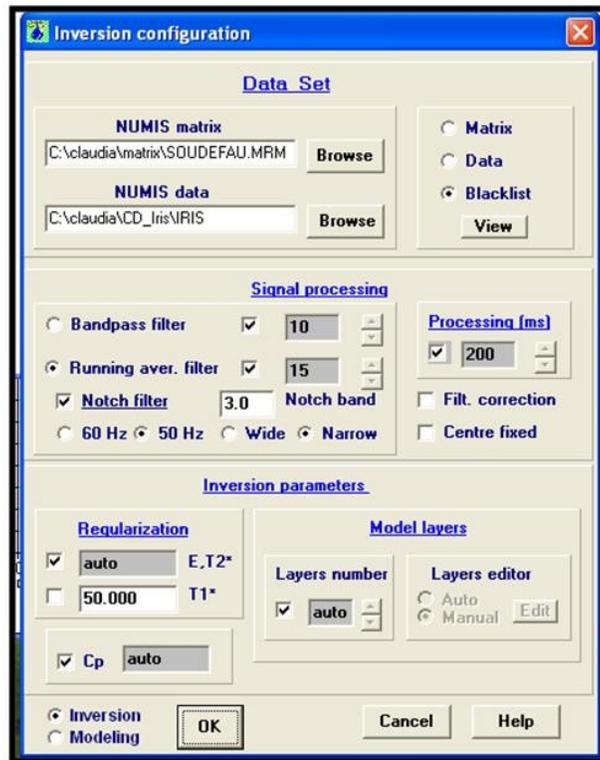


Figura 4.3.2. Ventana de entrada de datos y parámetros de la inversión

Data Set (conjunto de datos):

- Se selecciona en **Numis matrix** el archivo.mrm y **Numis data** el archivo.inp, que corresponden a la matriz y data de adquisición.
- **Blacklist** se observan los puntos de los datos que se genera de la inversión (Figura 4.3.3), se pueden editar convirtiendo los puntos “Good” en “Bad” y viceversa, también permite eliminar puntos considerados ruidosos. (los resultados presentados en el siguiente capítulo, Blacklist no fue modificado.)
- **Matrix** y **Data**, solo se pueden visualizar.

qualite	record	q(A.ms)	E(nV)	T2(ms)	freq(Hz)	phase(degr)
good	1	120.98	40.01	295.18	1345.56	41.73
good	2	196.34	25.19	1000.00	1347.47	-8.88
good	3	303.80	49.59	139.41	1347.00	-49.21
good	4	444.26	84.28	144.35	1347.21	-33.93
good	5	656.43	105.94	277.95	1347.24	-35.37
good	6	904.03	123.36	347.31	1347.59	-15.49
good	7	1226.63	176.84	262.29	1347.21	-36.44
good	8	1651.62	216.89	330.91	1347.26	-34.31
good	9	2216.00	266.81	252.56	1347.19	-38.44
good	10	2931.85	257.37	310.11	1347.29	-42.28
good	11	3874.16	249.31	253.18	1347.40	-37.61
good	12	4974.10	228.40	303.04	1347.41	-46.55
good	13	6184.68	201.40	229.06	1347.24	-60.82
good	14	7624.96	249.68	178.72	1347.36	-51.90
good	15	9424.14	245.28	324.71	1347.41	-48.75
good	16	11708.26	267.74	270.53	1347.35	-58.88

Figura 4.3.3 Puntos del Blacklist.

Signal processing (procesamiento de la señal):

El proceso realizado es un filtrado digital, con la finalidad de eliminar el ruido en la medida de lo posible y calcular así mejores valores de partida para la inversión. [15]

- **Bandpass filter** (pasa banda), deja pasar sólo una banda de frecuencias entorno a la frecuencia de resonancia (Larmor).
- **Running aver. Filter** (filtro media móvil), produce un suavizado de la curva, promediando los valores en una ventana de “n” ms.
- **Notch Filter** (filtro estrecho), es para amortiguar el efecto de la inducción de líneas eléctricas, puede ser 60 Hz o 50Hz dependiendo de la zona de estudio, se escoge “wide” (amplio) si Δf es mayor a 3Hz ó “narrow” (estrecha) si Δf es menor a 3Hz.

La aplicación del filtro puede ser perjudicial, porque elimina también la poca parte de señal que hay, distorsionando aún más los resultados.

- **Processing (ms)**, es el tiempo de procesamiento, se estima en 200ms. Aumentar el tiempo podría distorsionar los resultados.

Inversion parameters (parámetros de inversión):

- **Regularization** (regularización), regula el contenido de agua, “0” indica bajo contenido y capa delgada, “100” indica alto contenido y capa gruesa, generalmente se selecciona el modo automático “auto”.
 - **Model Layers** (capas del modelo), el número de capas es igual al número de momento de pulso en la selección automática “auto”, el número se puede modificar tomando valores entre 1 a 40.
Las profundidades de capas pueden ser editadas y se mantiene constante durante el ajuste de los contenidos de agua.
 - **Cp** (coeficiente de permeabilidad), si se ha medido T_1 para calcular la permeabilidad k , es preciso introducir un factor de calibración $C_p = 7 \times 10^{-9}$ m/s³, valor que toma por defecto el programa.
3. Los resultados de la medición e inversión de cada RMNS se presentan de forma numérica, donde se puede leer los datos y archivos de entrada, en principio se indica el lugar de adquisición, tipo de antena y su dimensión, día de adquisición y el tiempo transcurrido, como se observa Figura 4.3.4 y en forma gráfica Figura 4.3.5.

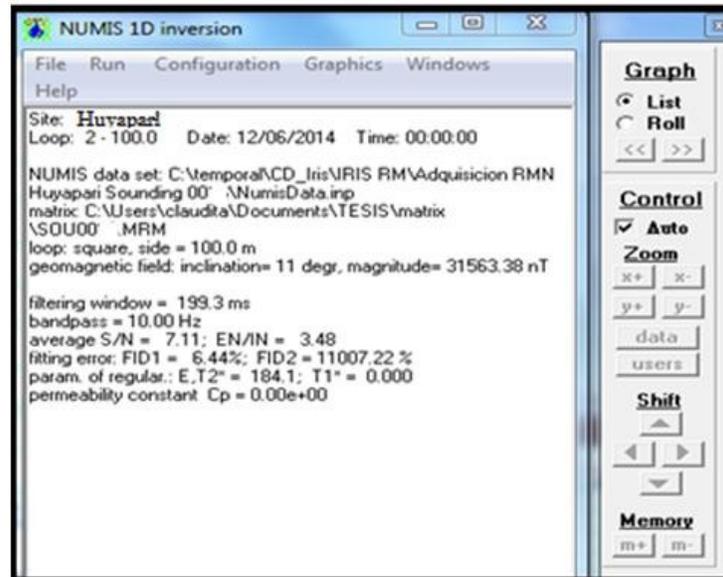


Figura 4.3.4. Datos de entrada y Resultados numéricos.

Numis date set, se indica la dirección del archivo con la data adquirida en campo, para realizar la inversión se debe tener otro archivo de entrada, la matriz (ver sección 4.2) también se puede observar el tipo de antena, su dimensión, datos del campo magnético: inclinación y magnitud.

Los datos de salida se describen a continuación:

- Filtering Windows: rango de tiempo que se filtró la señal.
- Bandpass: tipo de filtro usado en la inversión.
- Average S/N: relación de señal entre ruido y EN/IN: es un parámetro mayor que la unidad e indica si la prospección es válida desde el punto de vista instrumental.
- Fitting error FD1, FD2: errores de ajuste entre el modelo (curva de color rojo $E_0(q)$) y los datos (cuadros negros) para la señal de ambos pulsos.
- Param. of regular (parámetros de regularización) E, T_2^* , T_1 .

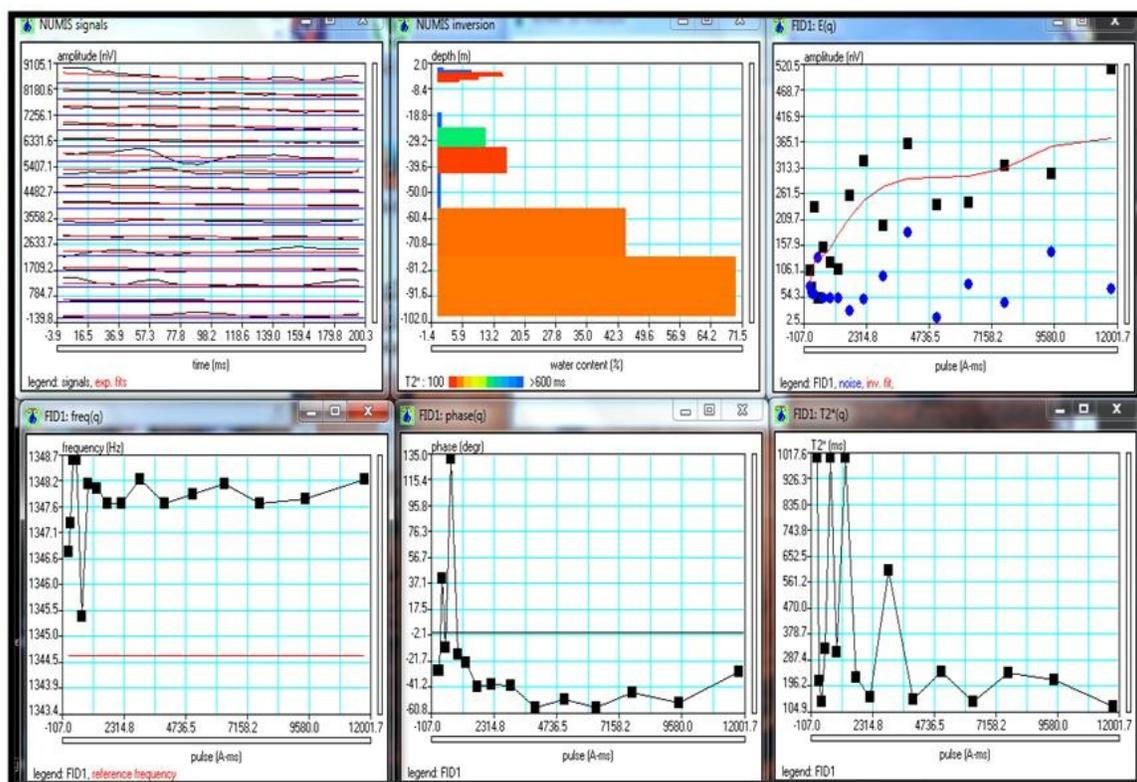


Figura 4.3.5. Descripción de las gráficas primera fila de izquierda a derecha: Numis signals (señales Numis), Numis inversión, FID1. Descripción de las gráficas segunda fila de izquierda a derecha: frecuencia (frecuencia), phase (fase), curva T_2^* .

Se describen las características de cada curva:

- **Numis Signals** (señales Numis), son las señales FID (curvas de color azul) para cada momento de pulso, la cantidad de señales FID dependerá del valor de momento de pulso, cada curva sigue un patrón exponencial (curva de color rojo).
- **Numis Inversión**, es la profundidad en función del porcentaje de agua, tiene importancia en el análisis de resultados, nos informan que cantidad de agua subterránea está contenida a cierta profundidad, a través de los valores de decaimiento que se representan en la franja de colores.

La gama de colores que se observa en la parte inferior del gráfico, indica que valor de tiempo de decaimiento T_2 correspondiente a cada color. El rojo indica arenas arcillosas y arenas muy

finas; de naranja a amarillo indica arenas finas y arenas medianas y de verde a azul indica arenas gruesas y depósitos de grava con agua móvil.

- **FID1 E (q)**: Es la curva de sondeo, la amplitud inicial para cada señal de FID que se gráfica en función de cada momento de pulso, los puntos cuadrados negros representa los datos, los puntos de círculos azules representa el ruido y la curva de color rojo es la respuesta teórica del modelo determinado por el software.
- Las curvas de **freq(q)** (frecuencia) y **Phase(q)** (fase), dan indicación de la calidad de las mediciones.
- La curva T_2^* en función del momento de pulso, son los valores máximos de tiempo de decaimiento para cada momento de pulso.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS Y DISCUSION.

5.1. Datos procesados con filtrado y sin filtrado.

Los datos son procesados con dos tipos de configuraciones, la primera configuración es con filtrado en donde se selecciona “Notch Filter” (filtrado) y la segunda configuración es sin filtrado donde no se selecciona “Notch Filter”, como se observada en la Figura 5.1.1.

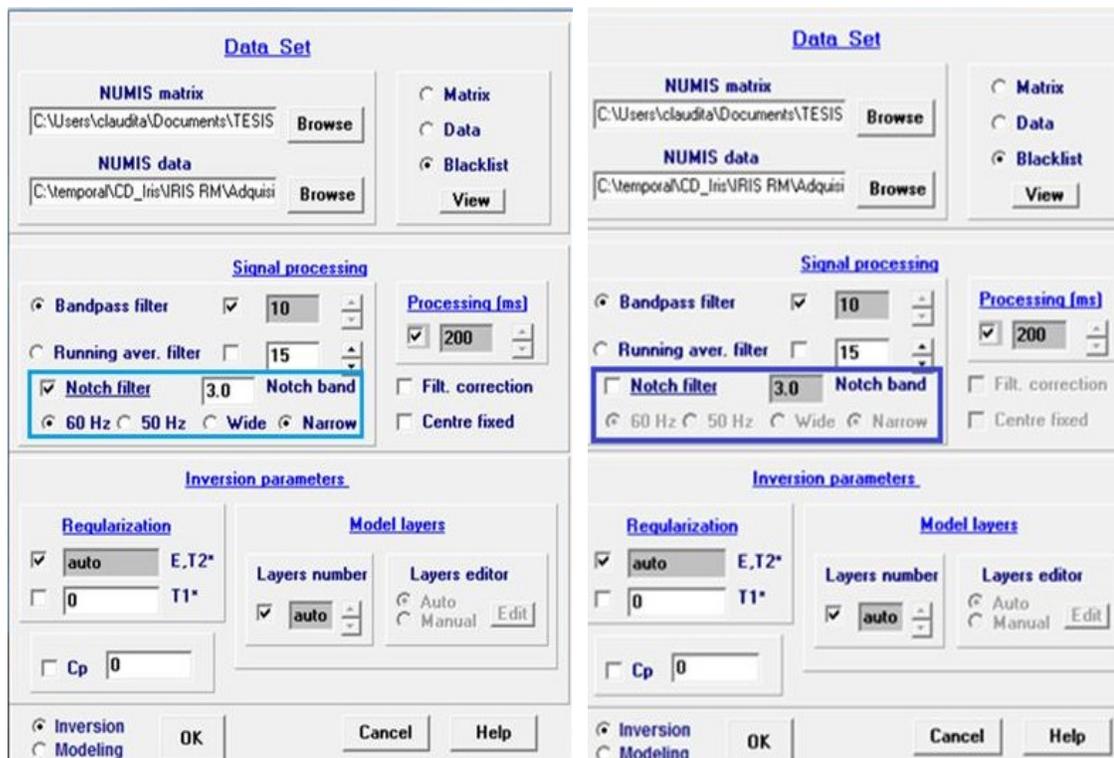


Figura 5.1.1. Configuración con filtrado y sin filtrado.

A continuación, se escoge de manera arbitraria un archivo para cada uno de los siguientes casos:

- 1) T_2^* y $Q=16$.
- 2) T_2^* , T_1 y $Q=16$.
- 3) T_2^* y $Q < 16$.

Los demás archivos, ver apéndice A.

1) **RMN Huyapari “Sounding” 0016.** (Finca La Fedrera)

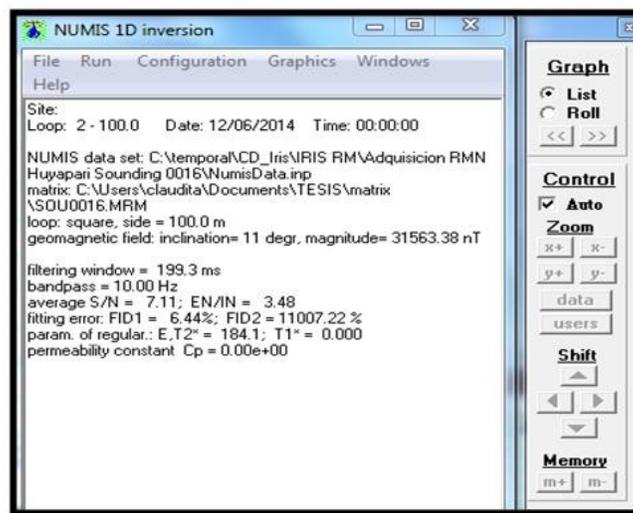


Figura 5.1.2. Datos de entrada y Resultados numéricos “Sounding” 0016 (filtrado).

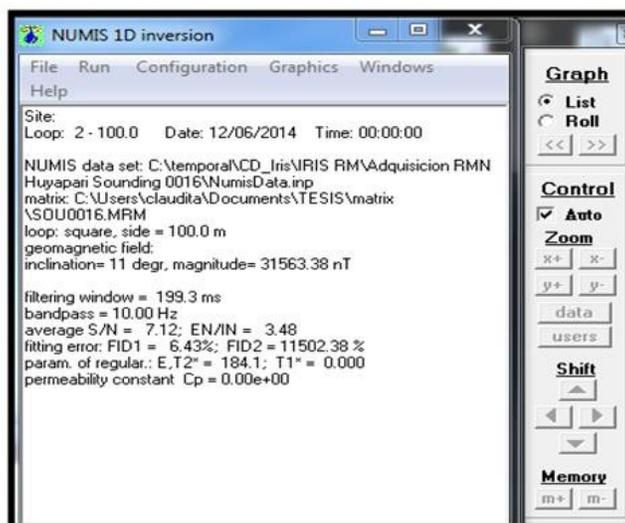


Figura 5.1.3. Datos de entrada y Resultados numéricos “Sounding” 0016 (sin filtrado).

- La figura 5.1.2 con filtrado y figura 5.1.3 sin filtrado, se pueden leer los datos y los nombres de los archivos de entrada, para realizar la inversión; la antena usada durante la prospección de estudio, es cuadrada con dimensión de 100 m. La fecha de adquisición, corresponde al día que se archivó la data a la computadora de la empresa.

De los resultados numéricos, es importante la relación señal – ruido que será considerado en la sección 5.2.

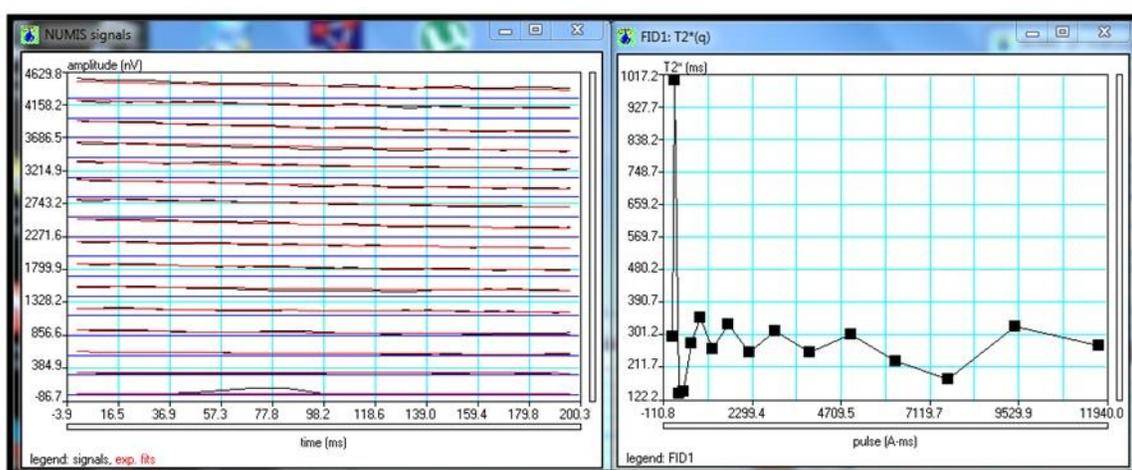


Figura 5.1.4. Curvas de decaimiento y Curva T_2 en función de Q “Sounding” 0016(filtrado).

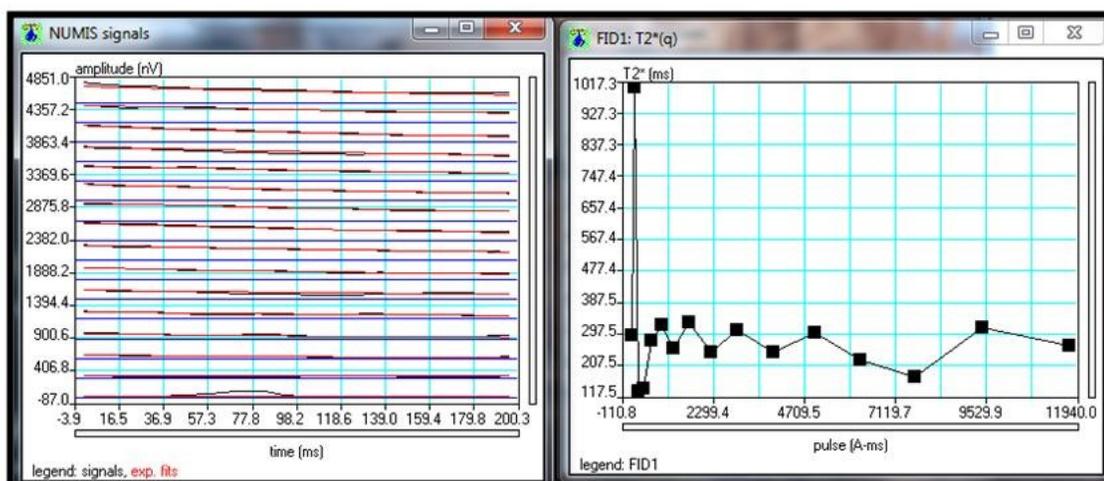


Figura 5.1.5. Curvas de decaimiento y Curva T_2 en función de Q “Sounding” 0016 (sin filtrado).

- La figura 5.1.4 con filtrado y figura 5.1.5 sin filtrado, se observan en el cuadro de la izquierda, las curvas de $E(t)$ por cada momento de pulso, ajustada a la función exponencial (en rojo), el objetivo es visualizar el aspecto de las señales adquiridas en la zona de estudio, tras la aplicación de filtros; no se detallan claramente en principio por la cantidad de señales (16) dieciséis y también debido a la escala que por defecto muestra el software.

La curva de la derecha, son los valores de T_2^* adquiridos en tiempo real para cada momento de pulso, se observa que en $Q=2$ el valor de T_2^* es mayor a 600 ms, esto puede sugerir la existencia de agua móvil.

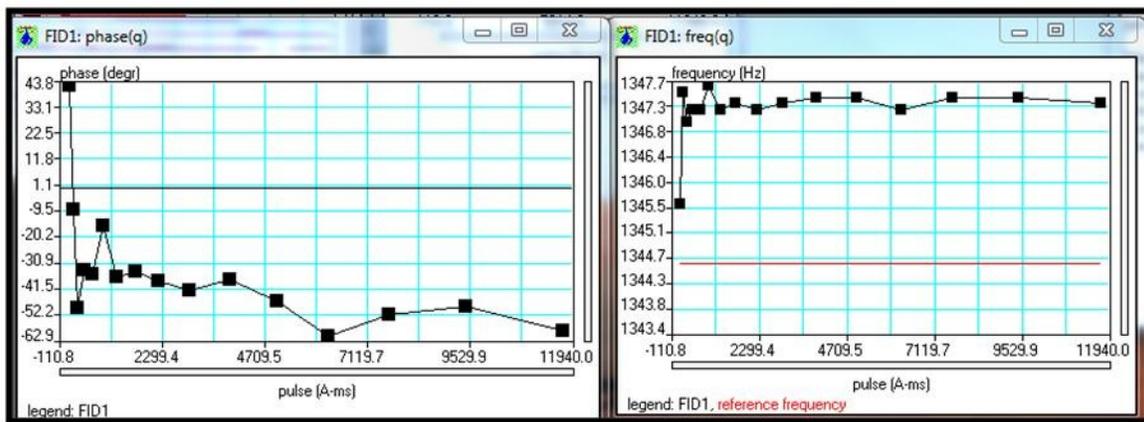


Figura 5.1.6. Curvas de fase y frecuencia “Sounding” 0016 (filtrado).

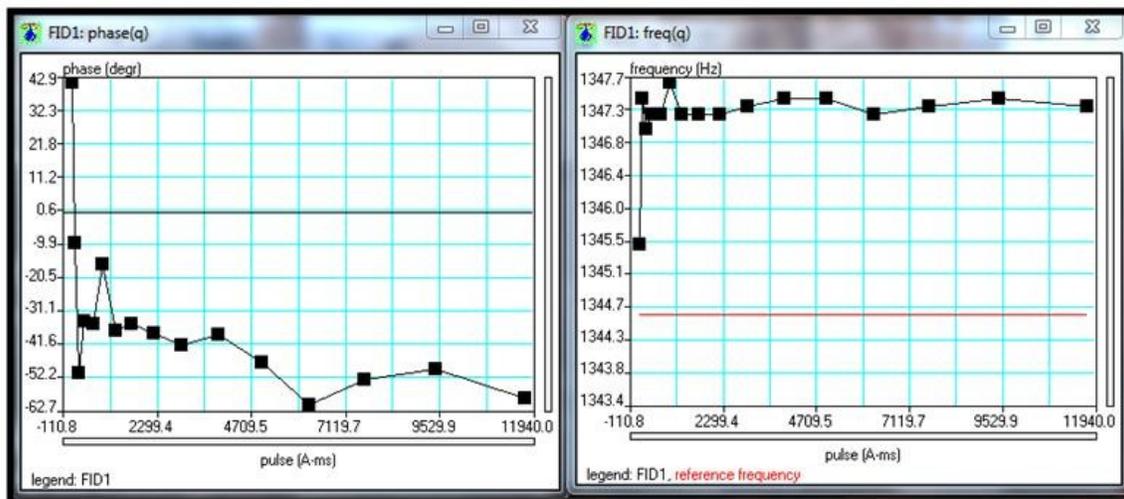


Figura 5.1.7. Curvas de fase y frecuencia “Sounding” 0016 (sin filtrado).

- La figura 5.1.6 con filtrado y figura 5.1.7 sin filtrado, a la derecha se observa la curva de fase y a la izquierda la curva de frecuencia, ambas en función del momento de pulso Q. La fase va decreciendo mientras aumenta los momentos de pulso; la curva de frecuencia para cada momento de pulso Q, tiene una diferencia de 2 Hz superior a la línea roja que representa el valor de la frecuencia de Larmor (frec. referencia).

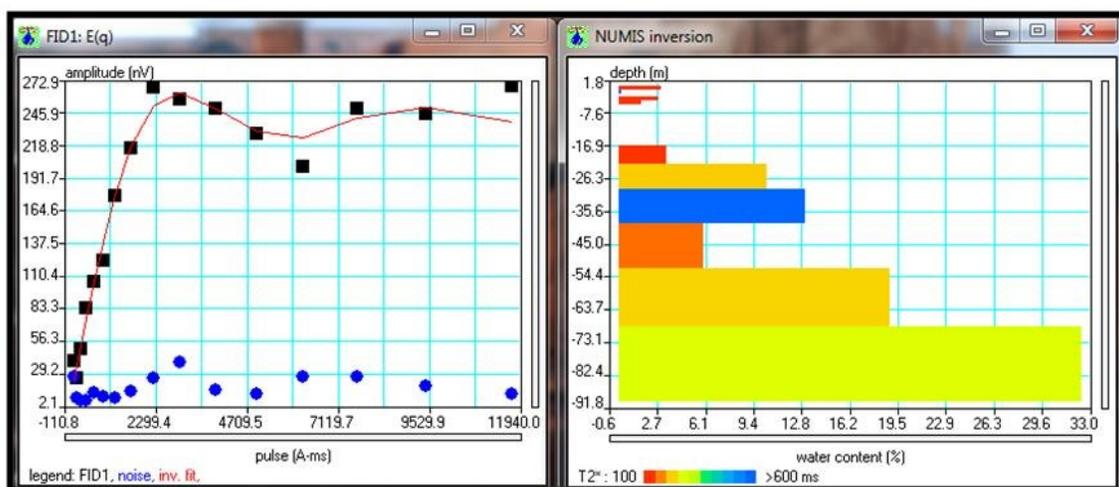


Figura 5.1.8. Curva de inversión y Función de la inversión "Sounding" 0016 (filtrado).

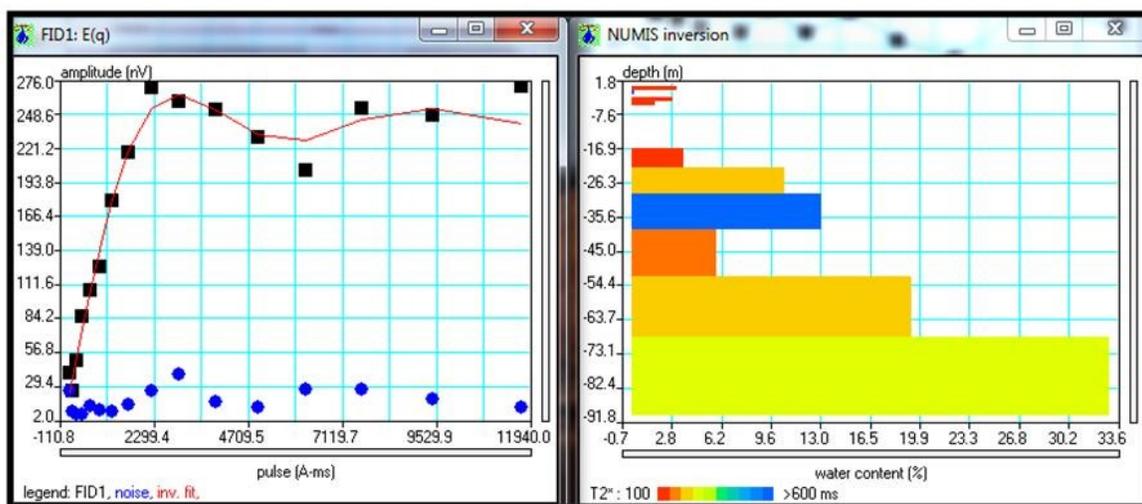


Figura 5.1.9. Curva de inversión y Función de la inversión "Sounding" 0016 (sin filtrado).

- La figura 5.1.8 con filtrado y figura 5.1.9 sin filtrado, a la izquierda observamos la curva de inversión donde los puntos negros siguen el patrón de la curva teórica (rojo), además los puntos azules están muy por debajo de los negros, entonces el ruido no es un factor tan influyente en la medición.

A la derecha se observa la función de la inversión, que indica la cantidad de agua a una cierta profundidad proporcional al tamaño de la antena, en este caso la profundidad máxima son 100 m, se observa que existe un 0,6% de agua móvil entre -1,00 m a -1,98 m, la más resaltante es la franja que se encuentra entre -29,50 m a -38,59 m con un 12,8%. Cada franja indicada por un color proporciona información del valor T_2^* y así relacionarlo a la porosidad, obteniendo la descripción litológica de la tabla 5.3.1.

2) **RMN Huyapari Sounding 0018.** (Finca la Fedrera)

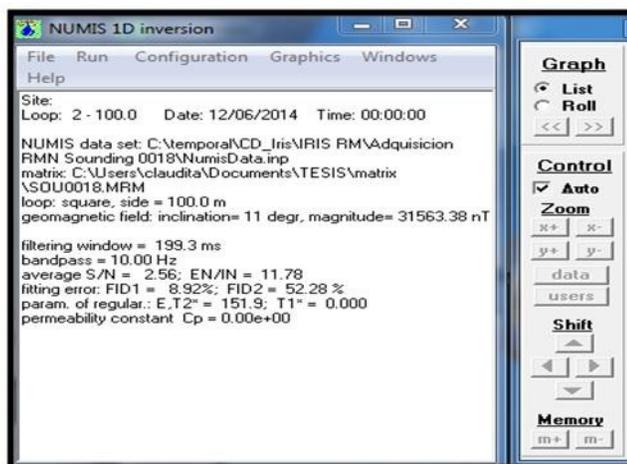


Figura 5.1.10. Datos de entrada y Resultados numéricos “Sounding” 0018 (filtrado).

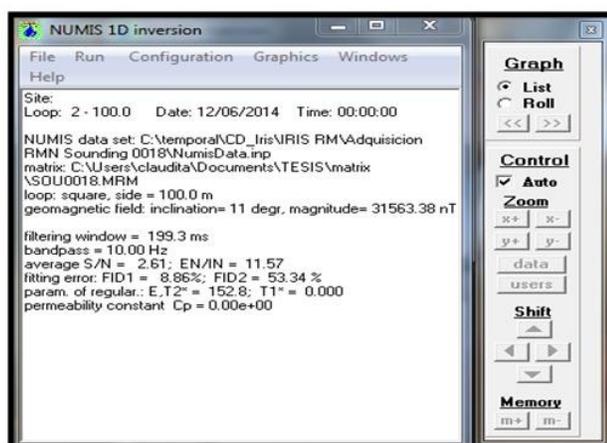


Figura 5.1.11. Datos de entrada y Resultados numéricos “Sounding” 0018 (sin filtrado).

- La figura 5.1.10 con filtrado y figura 5.1.11 sin filtrado, se pueden leer datos y nombre de los archivos de entrada, para la inversión; la antena usada durante la prospección de estudio, es cuadrada con dimensión de 100 m. La fecha de adquisición, corresponde al día que se archivó la data a la computadora de la empresa.

De los resultados numéricos, es importante la relación señal – ruido que será considerado en la sección 5.2.

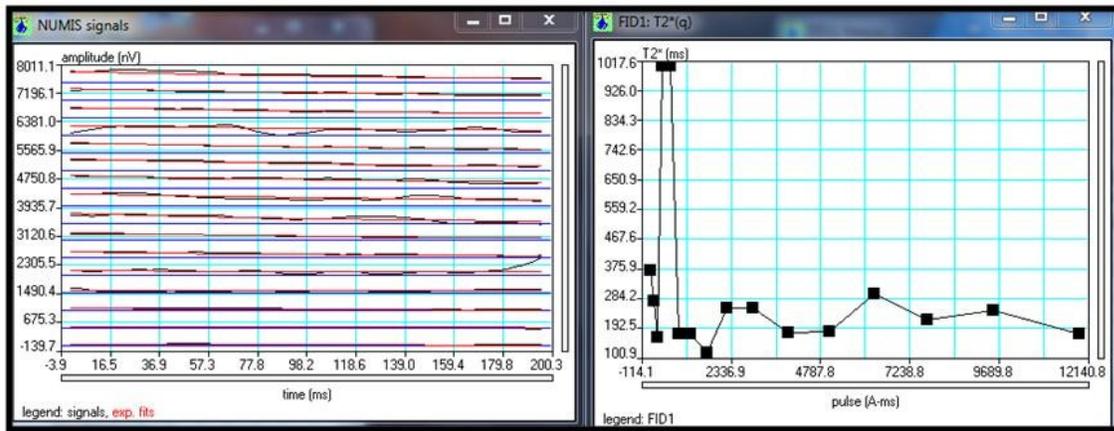


Figura 5.1.12. Curvas de decaimiento y Curva T_2 en función de Q “Sounding” 0018 (filtrado).

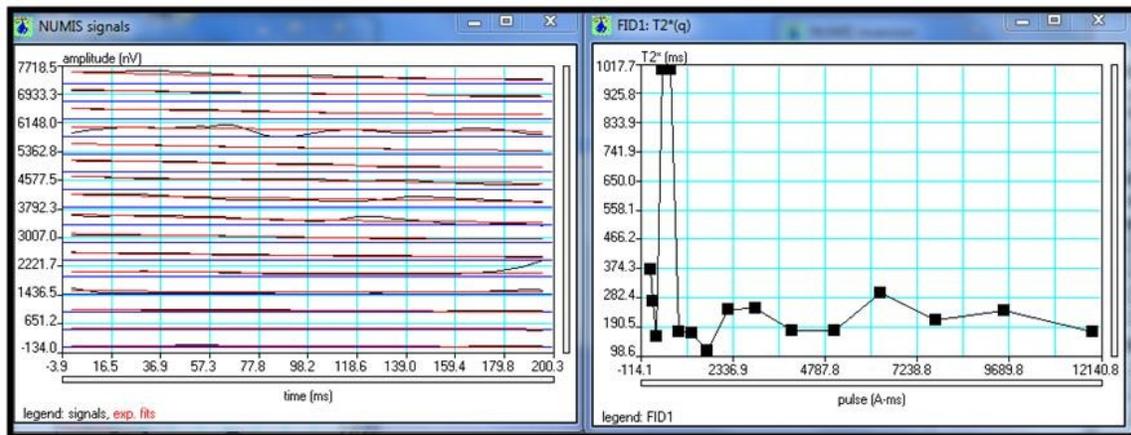


Figura 5.1.13. Curvas de decaimiento y Curva T_2 en función de Q “Sounding” 0018 (sin filtrado).

- La figura 5.1.12 con filtrado y figura 5.1.13 sin filtrado, se observan en el cuadro de la izquierda las curvas de $E(t)$ por cada momento de pulso, ajustada a la función exponencial (en rojo), con el objetivo es visualizar las señales adquiridas en la zona de estudio, tras la aplicación de filtros; no se detallan de manera clara en principio por la cantidad de señales (16) dieciséis y también debido a la escala que por defecto muestra el software.

La curva de la izquierda, son los valores de T_2^* adquiridos en tiempo real para cada momento de pulso, se observa que en $Q=4$ el valor de T_2^* es mayor a 600 ms, esto puede sugerir la existencia de agua móvil.

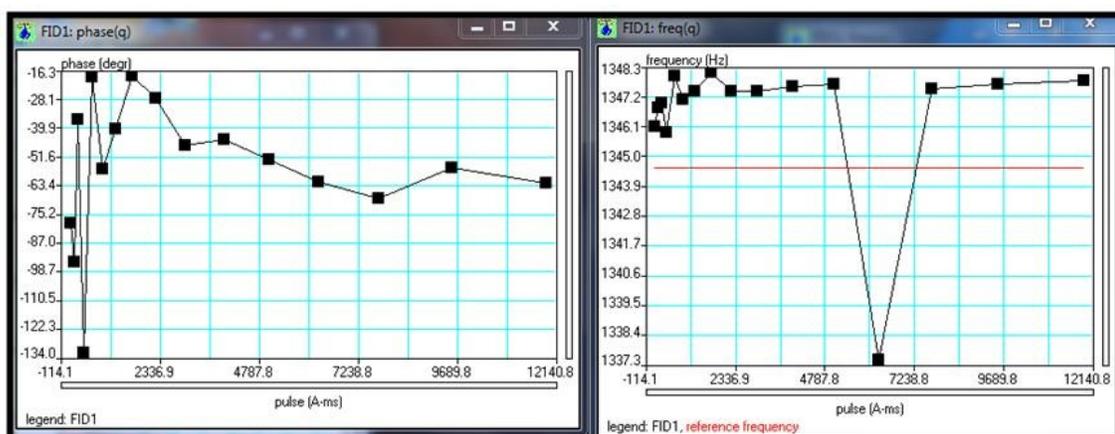


Figura 5.1.14. Curvas de fase y frecuencia “Sounding” 0018 (filtrado).

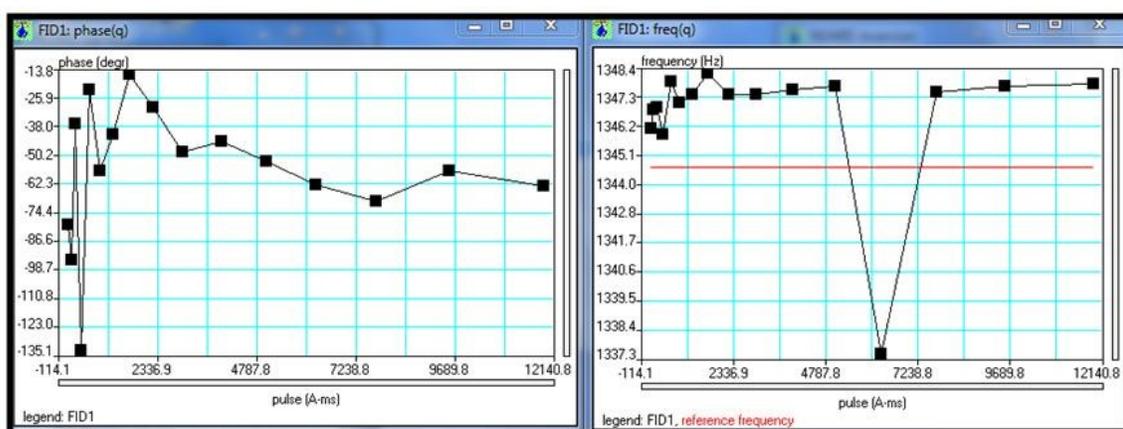


Figura 5.1.15. Curvas de fase y frecuencia “Sounding” 0018 (sin filtrado).

- La figura 5.1.14 con filtrado y figura 5.1.15 sin filtrado, a la derecha se observa la curva de fase y a la izquierda la curva de frecuencia, ambas en función del momento de pulso Q. La fase para los primeros Q va creciendo y luego decrece mientras aumenta los momentos de pulso; la curva de frecuencia para cada momento de pulso Q, tiene una diferencia de 3 Hz superior a la línea roja que representa el valor de la frecuencia de Larmor (frec. referencia), aunque en el momento $Q=13$ el valor de la frecuencia es aproximadamente cero, es posible un error instrumental para ese Q.

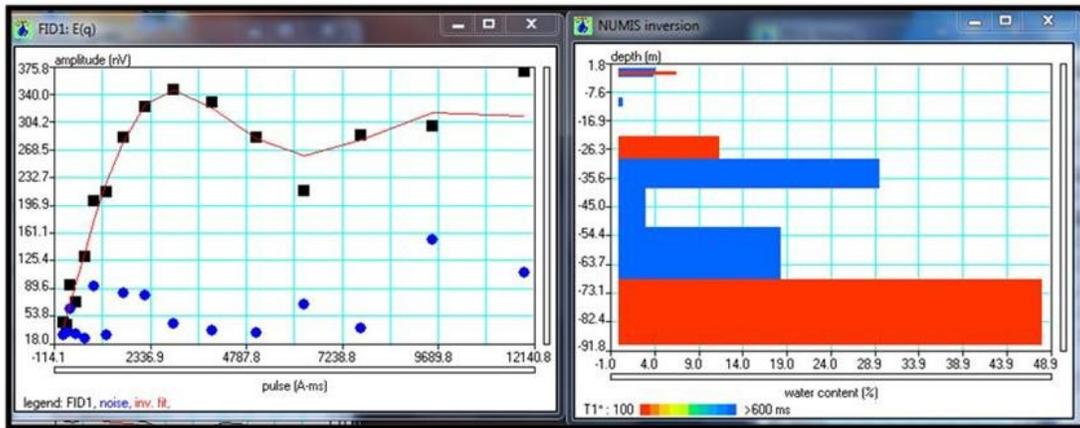


Figura 5.1.16. Curva de inversión y Función de la inversión “Sounding” 0018 (filtrado).

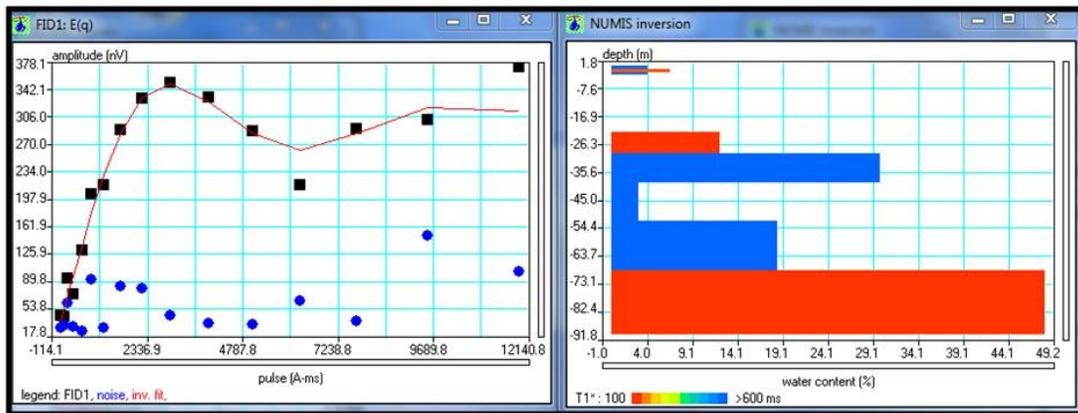


Figura 5.1.17. Curva de inversión y Función de la inversión “Sounding” 0018 (sin filtrado).

- La figura 5.1.16 con filtrado y figura 5.1.17 sin filtrado, a la izquierda observamos la curva de inversión donde los puntos negros siguen el patrón de la curva teórica (rojo), además los puntos azules están por debajo de los negros, entonces el ruido no es un factor tan influyente en la medición.

A la derecha se observa la función de la inversión, que indica la cantidad de agua a una cierta profundidad que es proporcional al tamaño de la antena, en este caso la profundidad máxima son 100 m, se observa que existe un 4,0% de agua móvil entre -0,29 m a -0,88 m y -2,22 m a -2,82 m, con distintos porcentajes de agua en -30,00 m a -68,00 m, con un máximo de 28,9% y un mínimo de 4% de agua móvil. La descripción litológica se encuentra en la tabla 5.3.1.

3) RMN Huyapari. (Finca la Fedrera)

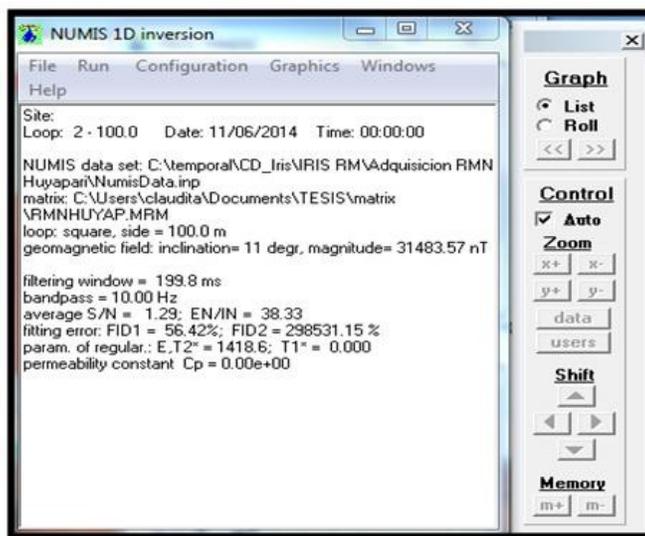


Figura 5.1.18. Datos de entrada y Resultados numéricos RMN Huyapari (filtrado).

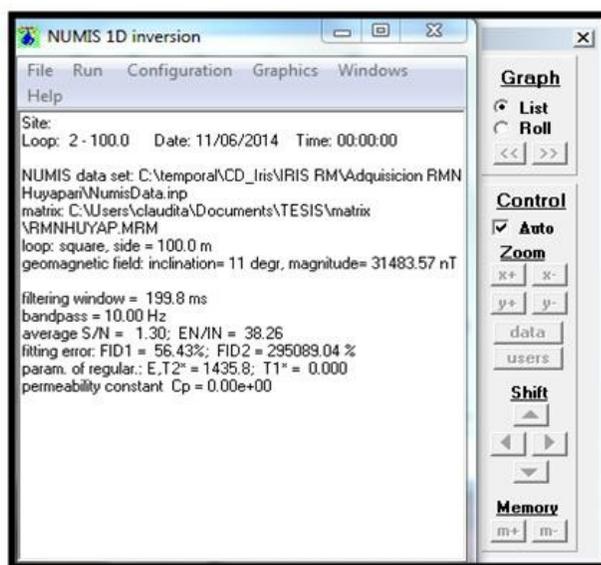


Figura 5.1.19. Datos de entrada y Resultados numéricos RMN Huyapari (sin filtrado).

- La figura 5.1.18 con filtrado y figura 5.1.19 sin filtrado, se pueden leer datos y nombre de los archivos de entrada, para realizar la inversión; la antena usada durante la prospección de estudio, es cuadrada con dimensión de 100 m y la fecha de adquisición, corresponde al día que se archivó la data a la computadora de la empresa.

Los resultados numéricos, es importante la relación señal – ruido que será considerado en la sección 5.2.

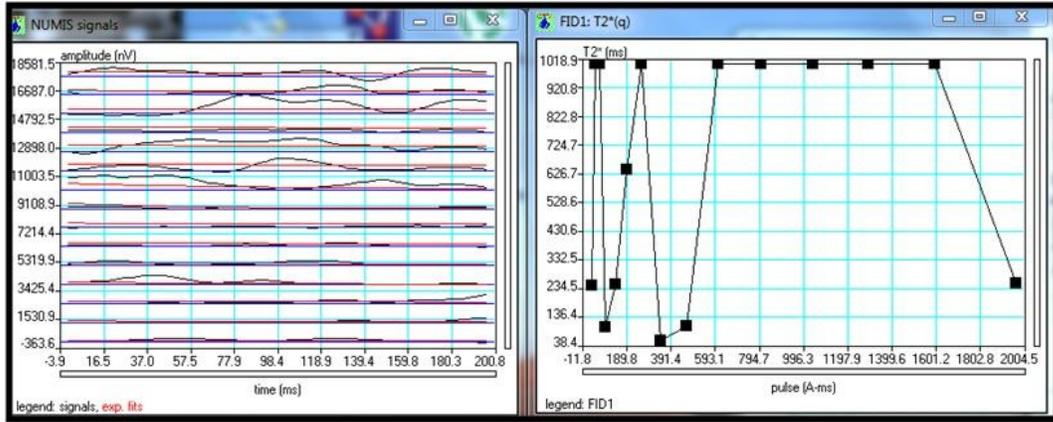


Figura 5.1.20. Curvas de decaimiento y Curva T_2 en función de Q RMN Huyapari (filtrado).

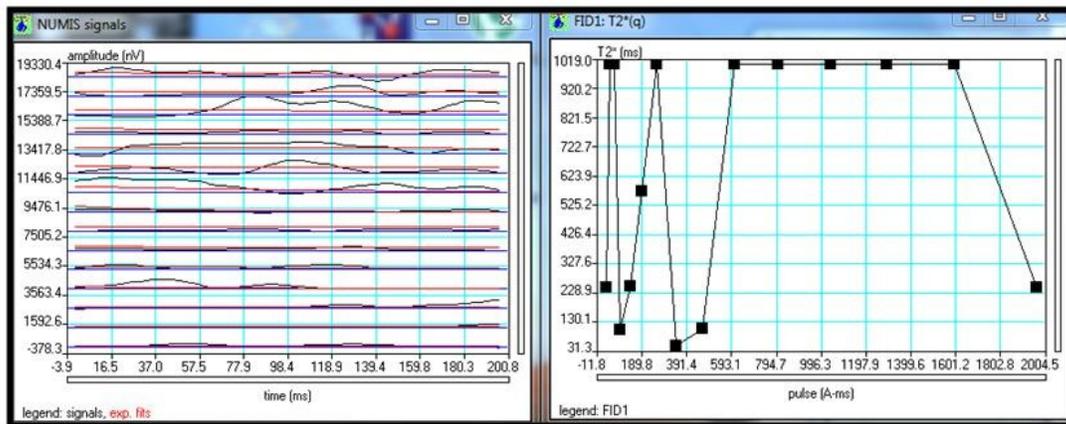


Figura 5.1.21. Curvas de decaimiento y Curva T_2 en función de Q RMN Huyapari (sin filtrado).

- La figura 5.1.20 con filtrado y figura 5.1.21 sin filtrado, se observan en el cuadro de la izquierda las curvas de $E(t)$ por cada momento de pulso, ajustada a la función exponencial (en rojo), el objetivo es visualizar las señales después de la aplicación de filtros; se pueden detallar un poco más debido a que son 15 momentos de pulsos, la señales están ubicadas según la escala que trae por defecto el software.

La curva de la izquierda, son los valores de T_2^* adquiridos en tiempo real para cada momento de pulso, se observa que en varios Q el valor de T_2^* es mayor a 600 ms, en Q=7 el valor es pequeño menor a 30 ms.

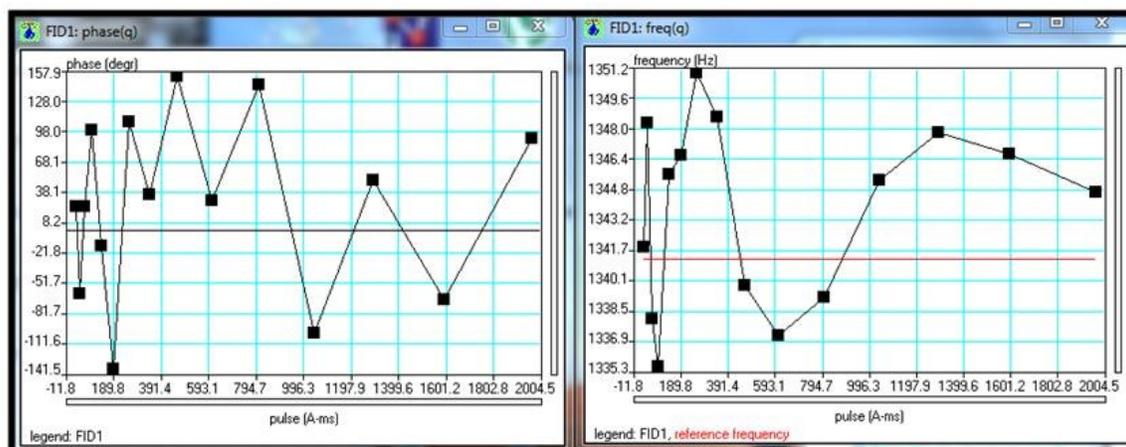


Figura 5.1.22. Curvas de fase y frecuencia RMN Huyapari (filtrado).

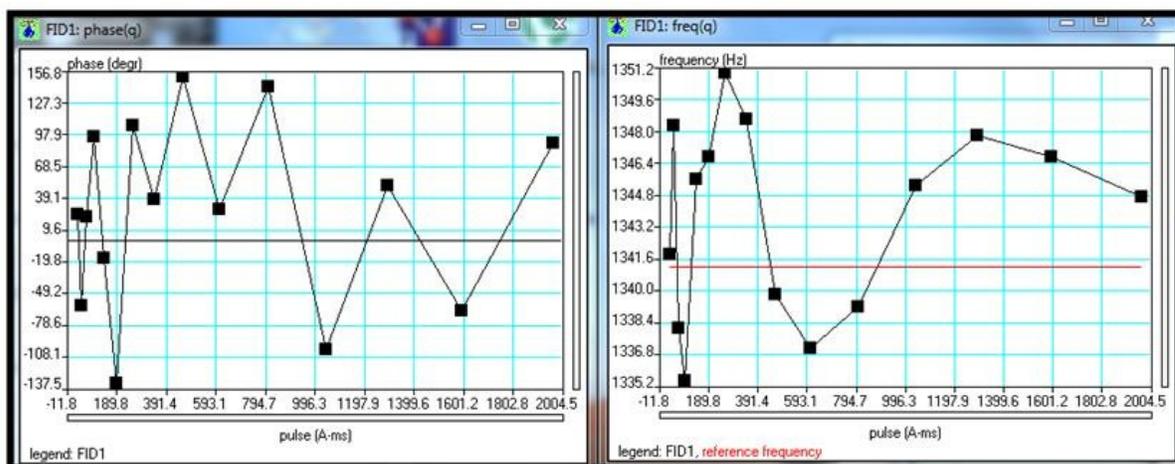


Figura 5.1.23. Curvas de fase y frecuencia RMN Huyapari (sin filtrado).

- La figura 5.1.22 con filtrado y figura 5.1.23 sin filtrado, a la derecha se observa la curva de fase y a la izquierda la curva de frecuencia, ambas en función del momento de pulso Q. La curva fase presenta un comportamiento sinusoidal, también se observa en la curva frecuencia, podemos inferir que donde se realizó la prospección no es del toda plana sino con curvatura.

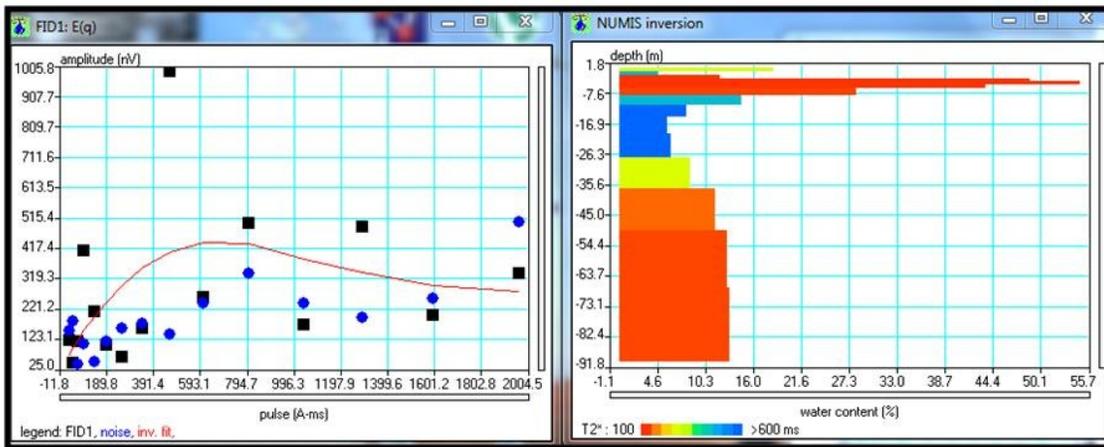


Figura 5.1.24. Curva de inversión y Función de la inversión RMN Huyapari (filtrado).

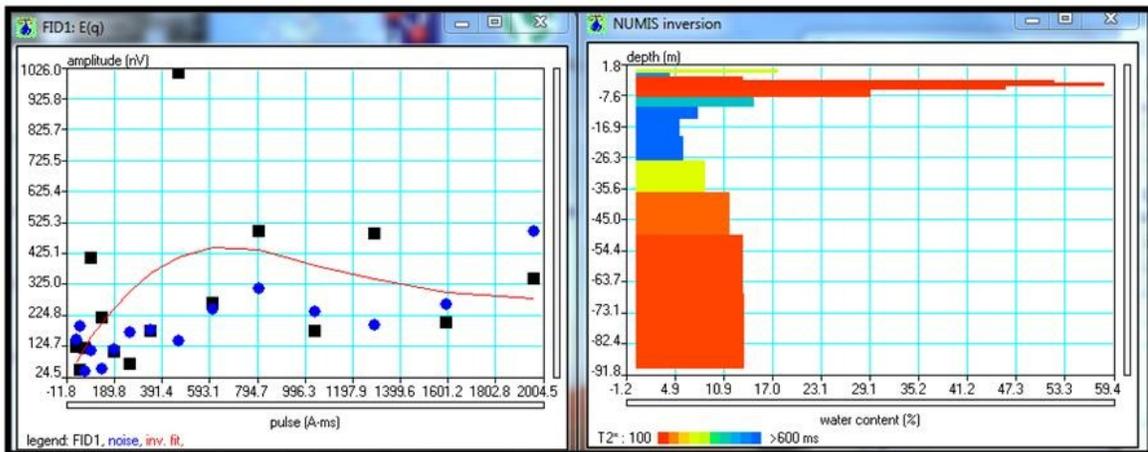


Figura 5.1.25. Curva de inversión y Función de la inversión RMN Huyapari (sin filtrado).

- La figura 5.1.24 con filtrado y figura 5.1.25 sin filtrado, a la izquierda observamos la curva de inversión donde los puntos negros no siguen el patrón de la curva teórica (rojo), los puntos azules están muy cercanos a los negros, inclusive hasta juntos.

Esta prospección no fue tan óptima en el estudio de la zona, las gráficas reflejan errores sistemáticos, es decir, que la cantidad de agua encontrada en esta inversión no es totalmente verídica. La descripción litológica se consideró y se puede leer en la tabla 5.3.1.

5.2. Cuadro comparativo de la relación señal – ruido.

Tabla 5.2.1. Relación señal – ruido con N.F. y S.N.F. (abreviatura a pie del cuadro)

Archivo	Pulso Q	S/N “N.F”	S/N “S.N.F”
RMN Huyapari Souding 0016	16	7,11	7,12
RMN Huyapari Souding 0017	16	4,63	4,64
RMN Huyapari Souding 0018	16	2,56	2,61
RMN Huyapari Souding 0019	16	3,54	3,55
RMN Huyapari Souding 0020	16	2,18	2,19
RMN Huyapari Souding 0023	16	2,07	2,08
RMN Huyapari	15	1,29	1,30
RMN Huyapari Souding 0013	12	1,13	1,15

“N.F” (filtrado), “S.N.F” (sin filtrado).

S/N : relación señal – ruido.

En la tabla 5.2.1, se observan los valores de relación entre la señal y el ruido (S/N) para cada archivo con filtrado y sin filtrado, el motivo de realizar una inversión que incluyera la primera configuración con filtrado, se debe a que la prospección **es sensible a los errores de medición de campo causados por interferencias electromagnéticas externas, tales como descargas eléctricas en la atmósfera, las tormentas magnéticas y todo tipo de corrientes eléctricas a través del subsuelo; otras interferencias son producidas por líneas eléctricas, generadores eléctricos y motores cercanos a la zona de medición.** [12]

Se debe considerar que en Venezuela la frecuencia es de 60 Hz, en la configuración de inversión con filtrado está marcado 60 Hz como se observa en la figura 5.1.1; para verificar si la interferencia (ruido) ha influido en la prospección de RMNS, es comparando los valores de S/N en cada archivo, con la configuración que incluye filtrado y la de sin filtrado.

La diferencia es de 1% entre los valores de relación S/N del mismo archivo, es notable que la interferencia (ruido) no altere las señales de RMNS; si el filtrado es un filtro para suprimir la interferencia producida por líneas eléctrica, generadores eléctricos y motores, que se encuentre cercano a la zona de prospección, se esperaría que la diferencia de los valores S/N sea de mayor valor.

El valor de relación S/N debe ser mayor que la unidad, ya que esto indicaría que la señal correspondiente al ruido no está muy cercana a la señal “FID”, existiría poca interferencia; analizando los archivos con momentos de pulsos completos (Q=16), el valor de S/N del archivo RMN Huyapari “Sounding” 0016 es 7, el valor más alto en comparación a los demás archivos, en cambio para el archivo RMN Huyapari “Sounding” 0023 el valor es aproximadamente 2, eso significa que en esa prospección ha podido influir, la conductividad eléctrica de la zona además del ruido y en donde la curva de señal ruido se encuentra cercana a la “FID”. Mientras más alto es el valor señal - ruido, se considera una buena prospección de agua.

Los últimos archivos en la tabla, contienen momento de pulso menores a (16) dieciséis y los valores de relación señal – ruido son aproximadamente 1, si se reduce el número de momento de pulso implica que la señal de ruido se aproxime al “FID”, sea más susceptible la prospección a la interferencia y conductividad eléctrica de la zona.

5.3. Litología obtenida en la inversión.

Tabla 5.3.1. Litología del resultado de inversión en cada archivo.

Archivo	Q	S/N (S.N.F)	Color	T ₂ (ms)	Profundidad (m)	Litología
RMN Huyapari “Souding” 0016	16	7,12	Rojo	51,6	-0,11 a -0,88	Arenas muy finas Arenas arcillosas
			Azul	>600	-1,00 a -1,98	Agua móvil
			Rojo	30,0	-2,00 a -5,00	Arenas muy finas Arenas arcillosas
			Rojo	49,8	-16,39 a -21,90	Arenas muy finas Arenas arcillosas
			Amarillo	204,2	-22,49 a -29,05	Arenas gruesas y Gravas
			Azul	>600	-29,50 a -38,59	Agua móvil
			Naranja	144,8	-39,19 a -50,96	Arenas medianas
			Amarillo	208,6	-51,56 a -68,25	Arenas gruesas y Gravas
RMN Huyapari “Souding” 0017	16	4,64	Rojo	30-60	-0,10 a -3,57	Arenas muy finas Arenas arcillosas
			Naranja	174,5	-22,20 a -29,50	Arenas medianas
			Amarillo	274,5	-30,00 a -38,89	Arenas gruesas y Gravas
			Amarillo	225,4	-39,49 a -51,26	Arenas gruesas y Gravas
			Naranja	173,6	-51,71 a -68,40	Arenas medianas
			Amarillo	190,4	-68,70 a -89,71	Arenas gruesas y Gravas
RMN Huyapari “Souding” 0023	16	2,08	Verde	329,5	-1,03 a -1,78	Depósitos de Gravas
			Azul	>600	-2,00 a -2,97	Agua móvil
			Rojo a Naranja	90,6	-4,91 a -5,80	Arenas finas
			Rojo	30	-6,00 a -8,93	Arenas muy finas Arenas arcillosas
			Azul	547,5	-29,65 a -38,45	Depósitos de Gravas
			Rojo a Naranja	102,7	-39,34 a -50,96	Arenas finas
			Amarillo	192,6	-51,86 a -67,95	Arenas gruesas y Gravas
Azul	458,8	-68,70 a -89,27	Depósitos de Gravas			

RMN Huyapari "Souding" 0018	16	2,61	Azul	>600	-0,29 a -0,88	Agua móvil
			Naranja	127	-1,33 a -1,78	Arenas medianas
			Azul	>600	-2,22 a -2,82	Agua móvil
			Rojo	50	-22,54 a -29,00	Arenas muy finas Arenas arcillosas
			Azul	>600	-30,00 a -68,00	Agua móvil
			Rojo	50	-69,00 a -87,96	Arenas muy finas Arenas arcillosas
RMN Huyapari "Souding" 0019	16	3,55	Azul	>600	-0,44 a -5,55 -7,29 a -9,00	Agua móvil
			Rojo	50	-9,38 a -10,00	Arenas muy finas Arenas arcillosas
			Azul	>600	-22,40 a -28,90	Agua móvil
			Azul	577	-30,00 a -38,79	Depósitos de Gravas
			Verde	386,3	-40,00a -51,00	Arenas gruesas y gravas
			Azul	>600	-51,20 a -67,79	Agua móvil
			Naranja	135,9	-68,00 a -89,42	Arenas medianas
RMN Huyapari "Souding" 0020	16	2,19	Azul	>600	-0,14 a -0,88	Agua móvil
			Rojo	50,00	-1,18 a -1,78	Arenas muy finas Arenas arcillosas
			Azul	>600	-2,97 a -4,61	Agua móvil
			Rojo	50,00	-4,91 a -6,00 -29,65 a -38,59	Arenas muy finas Arenas arcillosas
			Azul	>600	-39,00 a -67,99	Agua móvil
			Verde	333,00	-68,70 a -89,56	Arenas gruesas y gravas
RMN Huyapari	15	1,30	Verde	280,9	-0,14 a -0,73	Arenas gruesas y gravas
			Azul	529	-1,03 a -1,60	Depósitos de Gravas
			Rojo	30-60	-2,08 a -5,65	Arenas muy finas Arenas arcillosas
			Rojo a Naranja	106,9	-6,00 a -7,89	Arenas finas
			Azul	452,6	-8,00 a -10,72	Depósitos de Gravas
			Azul	>600	-11,00 a -26,67	Agua móvil
			Amarillo	263,7	-27,26 a -36,65	Arenas gruesas y gravas
			Naranja	65	-37,00 a -89,00	Arenas finas
RMN Huyapari "Souding" 0013	12	1,15	Amarillo	236,8	-0,14 a -0,88	Arenas gruesas y gravas
			Azul	>600	-1,18 a -1,63	Agua móvil
			Amarillo	281,1	-62,74 a -89,56	Arenas gruesas y gravas

La función de inversión, es uno de los resultados con mayor peso en la inversión de la data, para un modelo ideal con información de la estratigrafía y la resistividad de la zona, obtenemos la litología de la zona de estudio, así como la profundidad donde se encuentra el agua y su cantidad en porcentaje.

Para este trabajo, contamos con los valores de resistividades de la zona Huyapari, entregados por la empresa PDVSA, entonces realizamos la inversión de la data (ver tabla 4.2.1), aunque desconocemos la estratigrafía de la región, de igual manera describimos la litología de cada archivo como se puede observar en la tabla 5.3.1, a grandes rasgos en los primeros metros de profundidad, se observa agua móvil pero en poca cantidad, no mayor a 50%.

Es importante notar que para describir la litología en cada prospección, es tomando los valores de T_2^* que se relacionan con la porosidad y así encontrar que cada tipo de estrato característico a lo largo de los 100 m. la tabla 2.3.1.1 de la sección 2.3.1, fue la base para construir la litología en cada archivo.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES.

A través del análisis realizado con el Equipo NUMIS en la zona de estudio, se detectó la presencia de agua y adicionalmente también se pudo precisar la profundidad aproximada de la localización del agua. Esto permite corroborar el hecho de que, teniendo en cuenta la existencia de agua en esta zona, el sistema NUMIS nos brinda confiabilidad de su capacidad de detección.

El software Samovar, del equipo NUMIS suministra información detallada de la litología de la zona, en función de los valores de resistividad (proporcionados por PDVSA) y el tiempo de relajamiento transversal T_2 .

De los resultados obtenidos, se presentan graficas con momentos de pulso “Q” (16) dieciséis, (12) doce y (15) quince, en los cuales se evidencia la precisión de los resultados obtenidos, observándose que efectivamente con un momento de pulso (16) dieciséis, son las que poseen menos distorsión. El tiempo de adquisición de la señal “FID” se realizó a 200 ms, lo cual es recomendable ya que se expone a datos con valores menos distorsionados por el ruido.

Se descartan efectos de ruido debido a líneas de alta tensión presentes en la zona (aéreas y subterráneas), a relieves pronunciados en el terreno (terreno llano), ruido ambiental y la presencia de equipos mecánicos o eléctricos que sean fuente generadores de ruido. Se destaca alta resistividad en el terreno de la zona, esto favorece a una baja conductividad, contribuyendo así a una separación considerable entre la curva del “FID” y la de ruido (como se observa en la figura 4.1.1.).

Bibliografía

- [1] Shushakov. (1996). Groundwater NMR in conductive water. society of Exploration Geophysicists.
- [2] Abragham, A. (1961). The principles of nuclear magnetism. Oxford University Press.
- [3] Contreras, O.(1980). Métodos de pulsos en resonancia magnética nuclear para medir tiempos de relajación. Trabajo de ascenso, escuela de física, facultad de ciencias, ucv.
- [4] Cram 101.(2012). e-Study Guide for The Geologic Time Scale. vol 2.
- [5] Manual del equipo Numis.
- [6] Yaramanci et al. Workshop Hidrogeophysics. Technical University of Berlin.
- [7] Trushkin, S. (1994). Surface NMR applied to an electroconductive medium. Russia.
- [8] Udden, & Wenworth. (1922).
- [9] Yaraixa Perez. Curso petrofísica aplicada. UCV.
- [10] Shirov, M., & Legchenko, A. (1991). New direct non-invasive ground water detection technology. Australia: Geophysics.
- [11] OGS New Perspectives on Shales – July 28, 2010.
- [12] Legchenko, S. (1998). Inversion of surface NMR data . GEOPHYSICS vol.63.
- [13] Gasulla, M. (1998). Obtención de imágenes de la distribución de impedancia eléctrica del subsuelo. Aplicación a la detección de objetos locales. Universita Politècnica de Catalunya.
- [14] Orellana, E. (1982). Prospección Geoeléctrica en corriente continua. Grupo Paraninfo.
- [15]Plata Torres Juan Luis, Rubio Sánchez-Aguililla. (2009) PROYECTO FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLOGICO DE HUMEDALES RELACIONADOS CON LAS AGUAS SUBTERRANEAS EN LA CUENCA DEL EBRO. Grupo de Geofísica del IGME.

APÉNDICE A

RMN Huyapari “Sounding” 0017. [Filtrado] (finca la Fedrera)

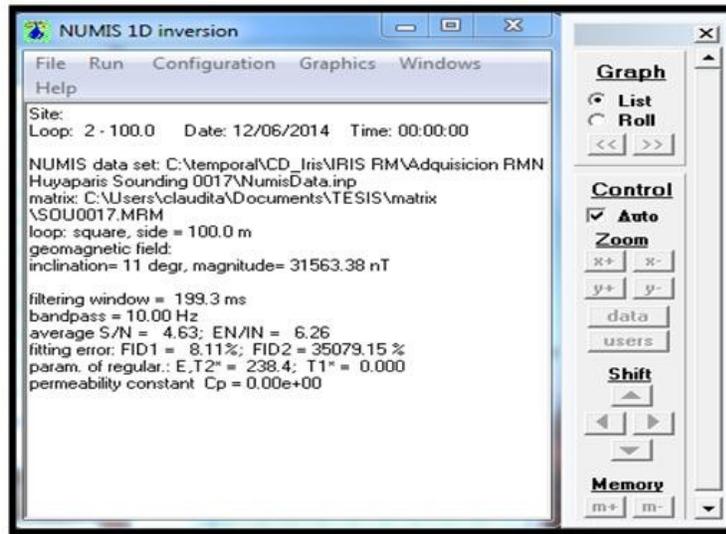


Figura A.1. Datos de entrada y Resultados numéricos “Sounding” 0017 (filtrado).

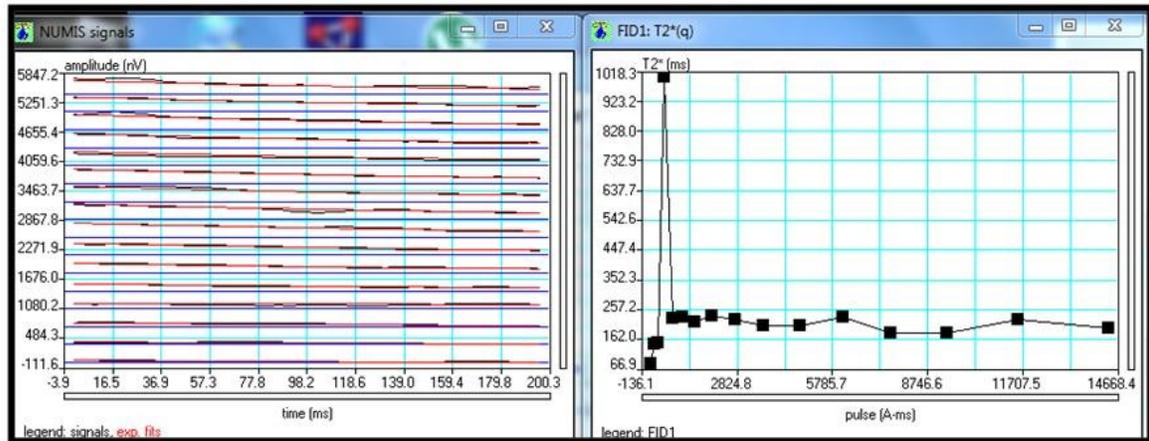


Figura A.2. Curvas de decaimiento y Curva T_2 en función de Q “Sounding” 0017 (filtrado).

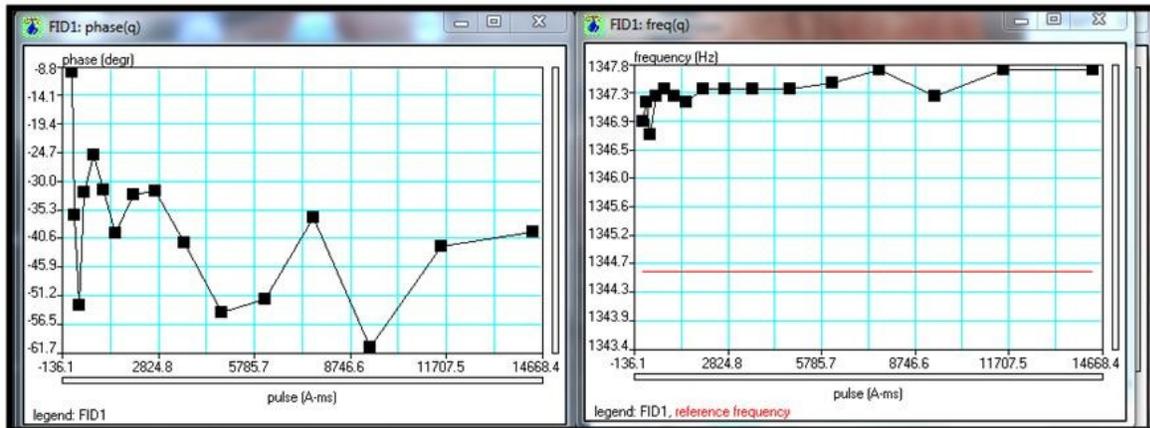


Figura A.3. Curvas de fase y frecuencia “Sounding”0017 (filtrado).

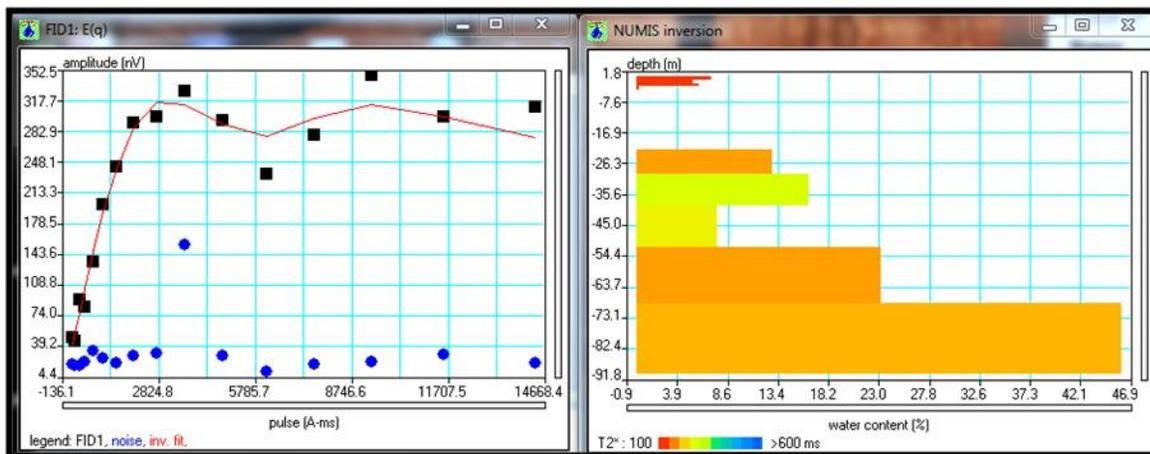


Figura A.4. Curva de inversión y Función de la inversión “Sounding” 0017 (filtrado).

RMN Huyapari “Sounding” 0017. [sin Filtrado]

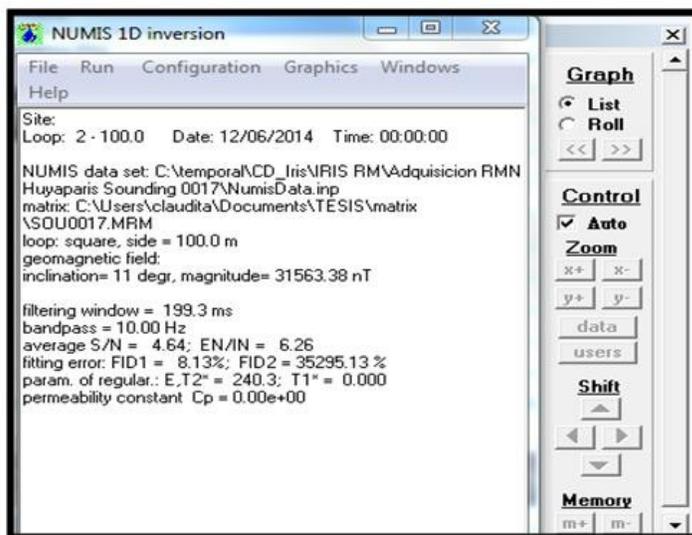


Figura A.5. Datos de entrada y Resultados numéricos “Sounding” 0017(sin filtrado).

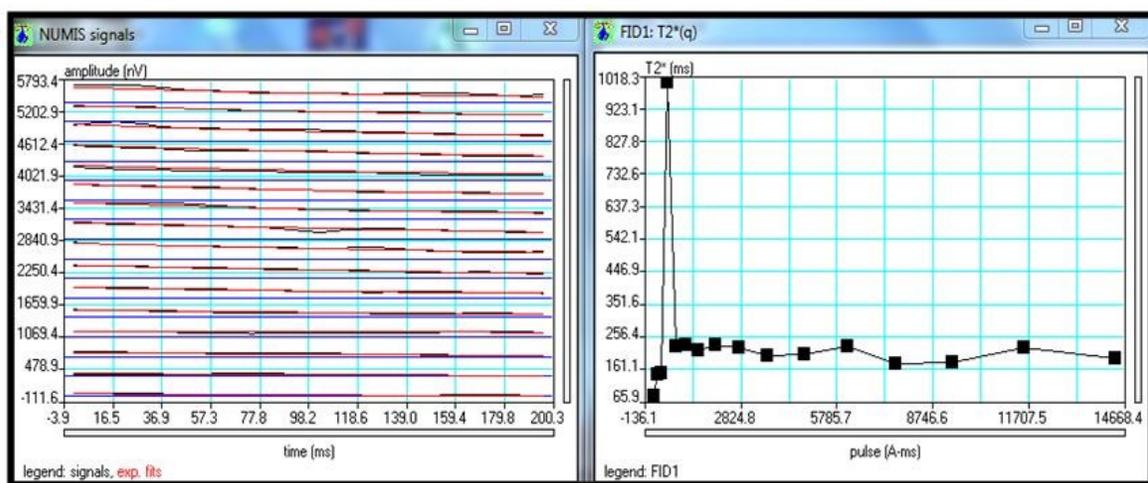


Figura A.6. Curvas de decaimiento y Curva T_2 en función de Q “Sounding” 0017 (sin filtrado).

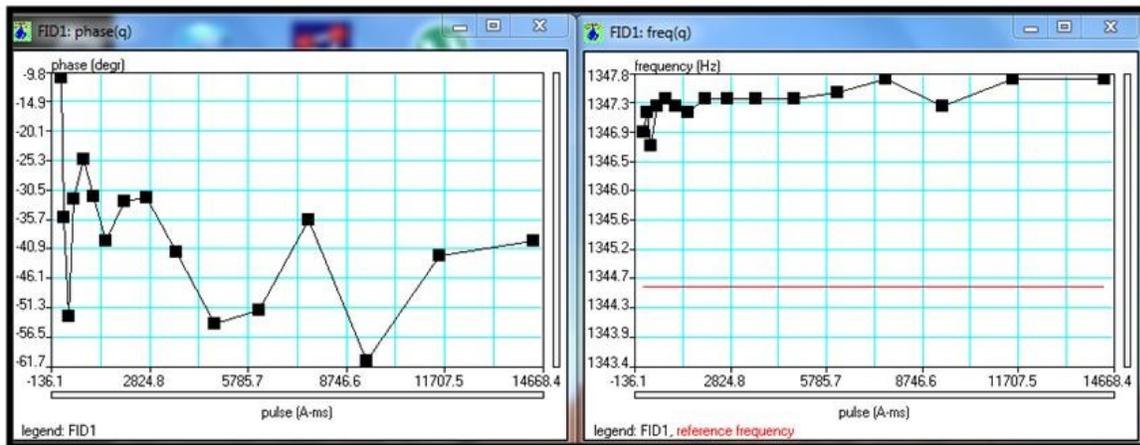


Figura A.7. Curvas de fase y frecuencia “Sounding” 0017(sin filtrado).

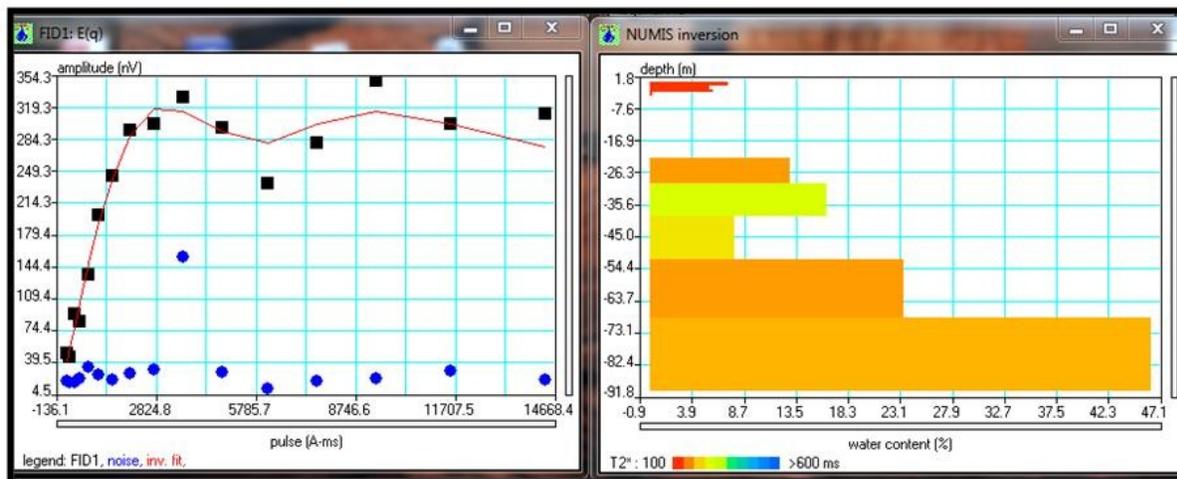


Figura A.8. Curva de inversión y Función de la inversión “Sounding” 0017 (sin filtrado).

RMN Huyapari “Sounding” 0023. [Filtrado] (finca la Fedrera)

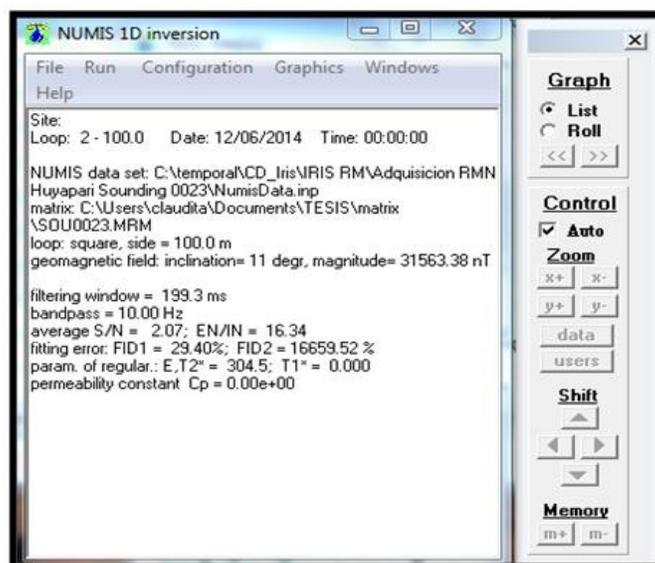


Figura A.9. Datos de entrada y Resultados numéricos “Sounding” 0023 (filtrado).

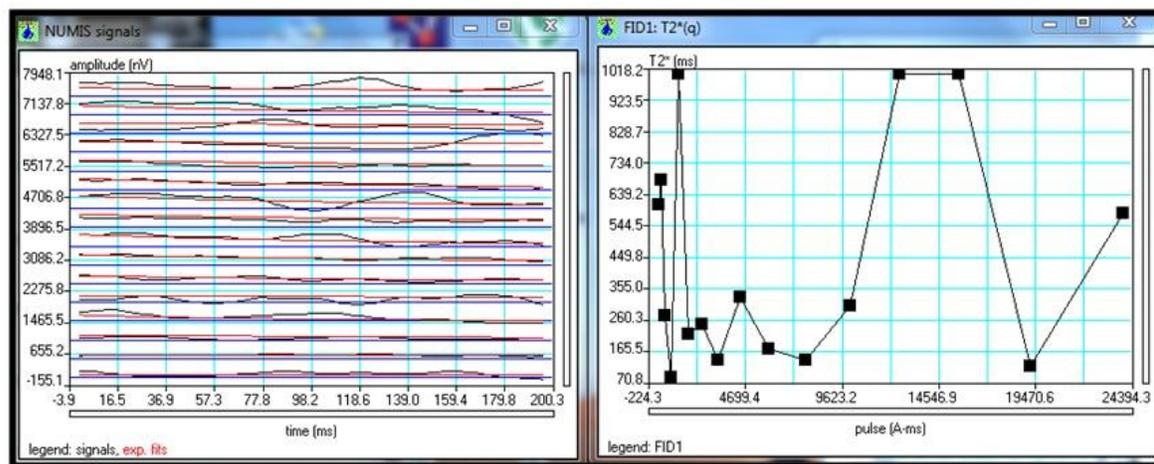


Figura A.10. Curvas de decaimiento y Curva T_2 en función de Q “Sounding” 0023 (filtrado).

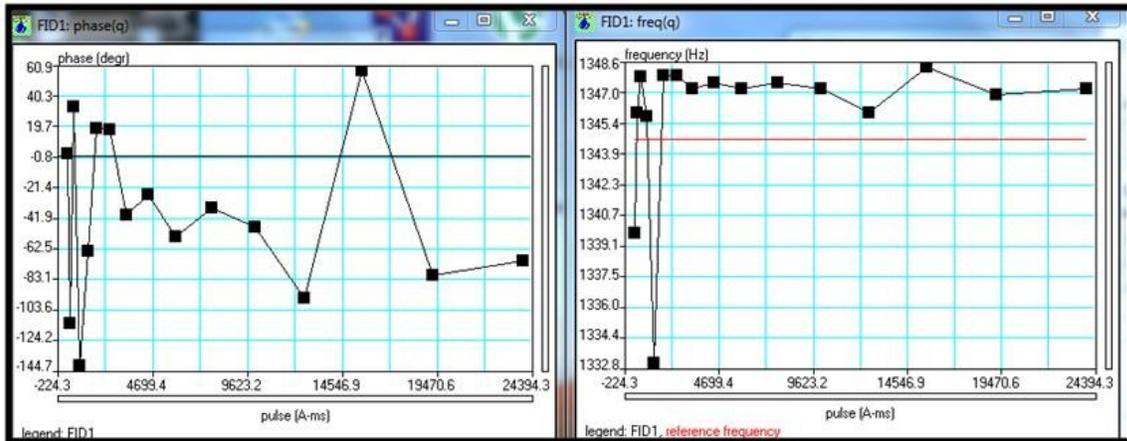


Figura A.11. Curvas de fase y frecuencia “Sounding” 0023 (filtrado).

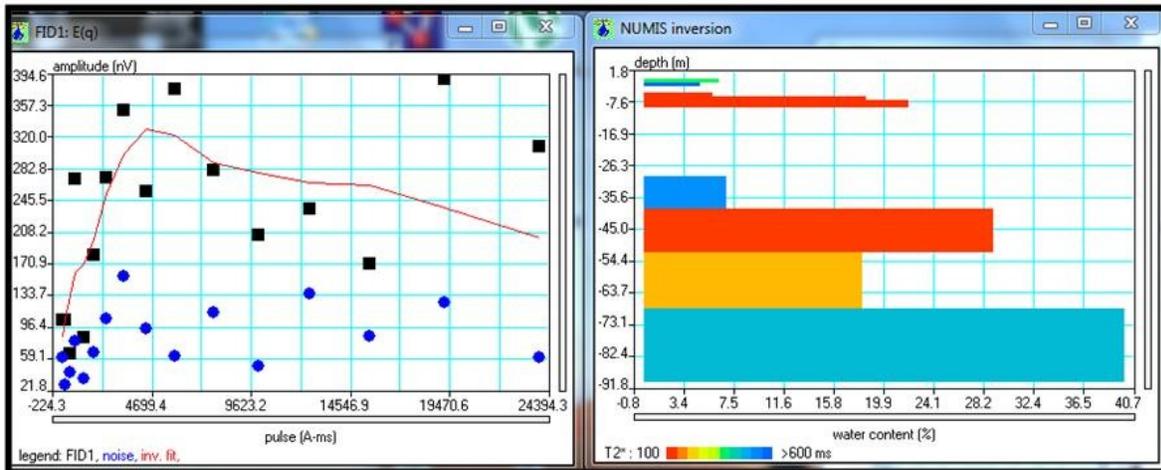


Figura A.12. Curva de inversión y Función de la inversión “Sounding” 0023 (filtrado).

RMN Huyapari “Sounding” 0023. [sin Filtrado]

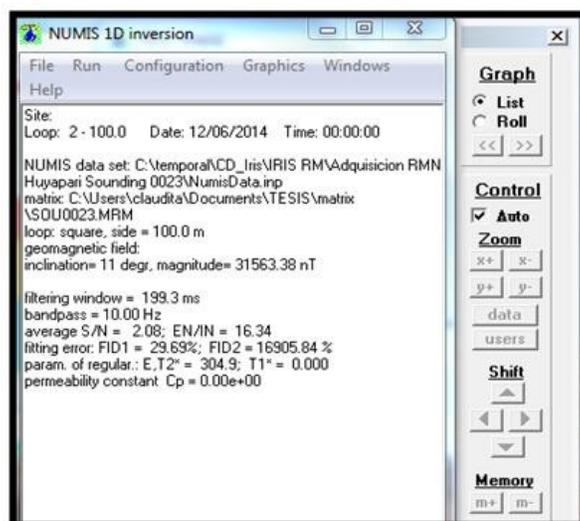


Figura A.13. Datos de entrada y Resultados numéricos “Sounding” 0023 (sin filtrado).

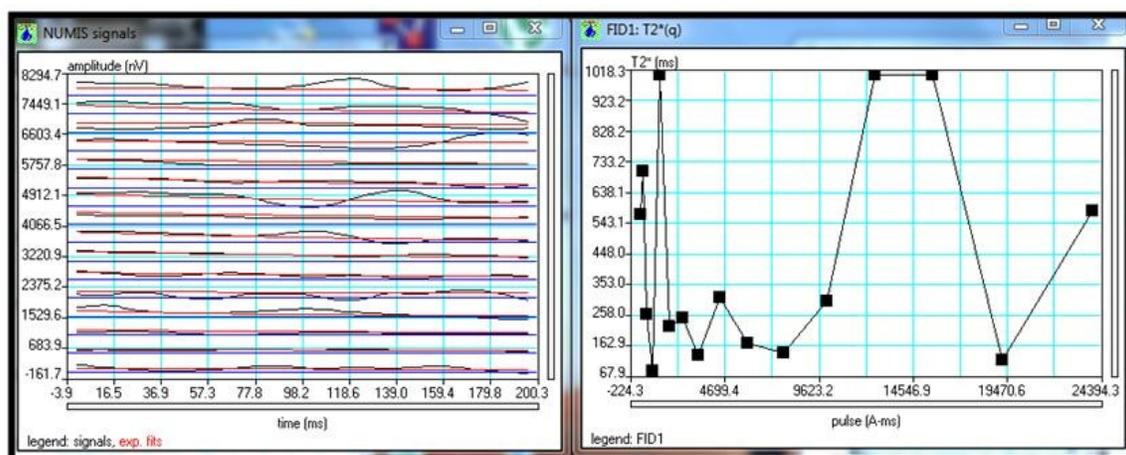


Figura A.14. Curvas de decaimiento y Curva T₂ en función de Q “Sounding” 0023 (sin filtrado).

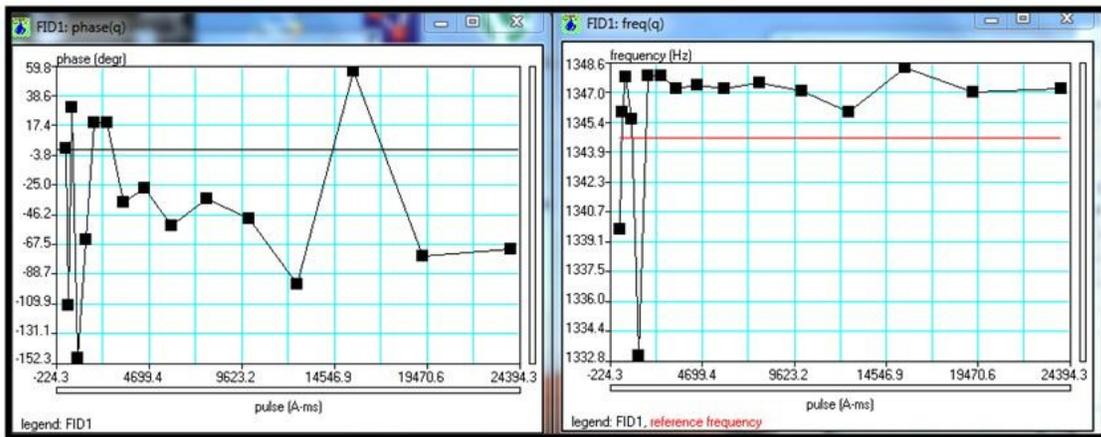


Figura A.15. Curvas de fase y frecuencia “Sounding” 0023 (sin filtrado).

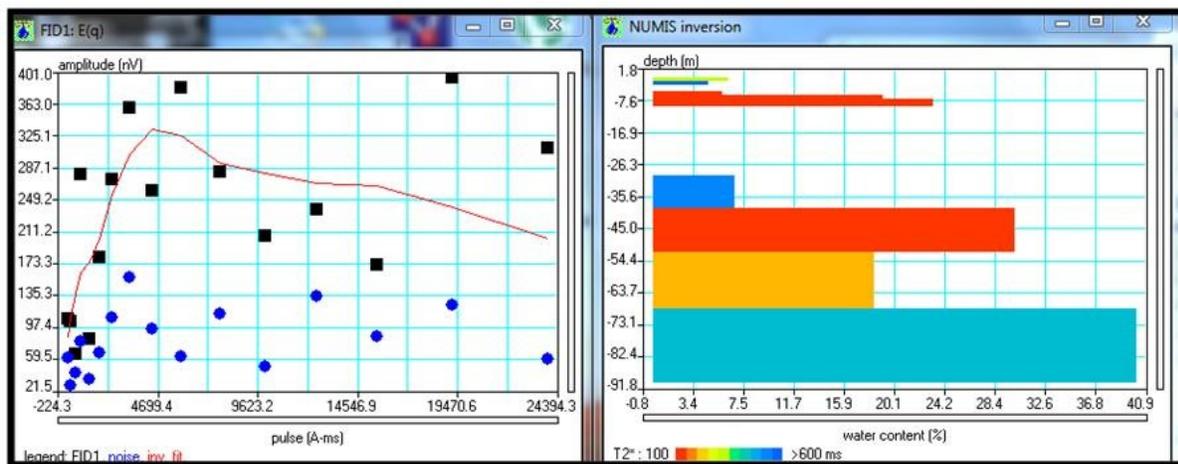


Figura A.16. Curva de inversión y Función de la inversión “Sounding” 0023 (sin filtrado).

RMN Huyapari “Sounding” 0019. [Filtrado] (finca la Fedrera)

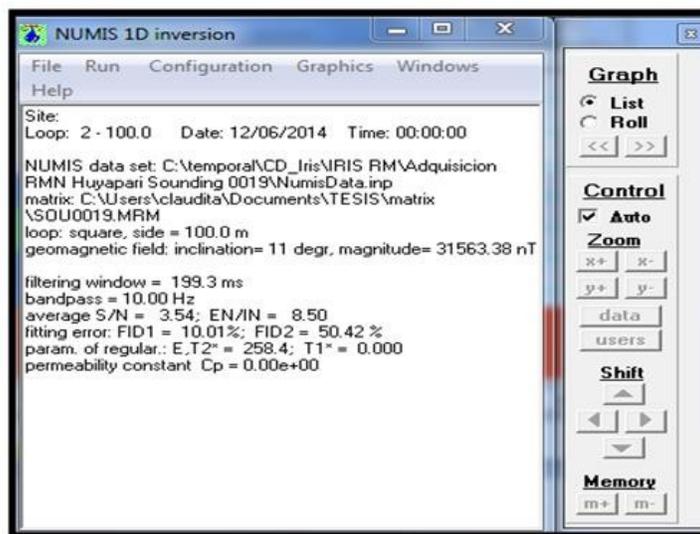


Figura A.17. Datos de entrada y Resultados numéricos “Sounding” 0019 (filtrado).

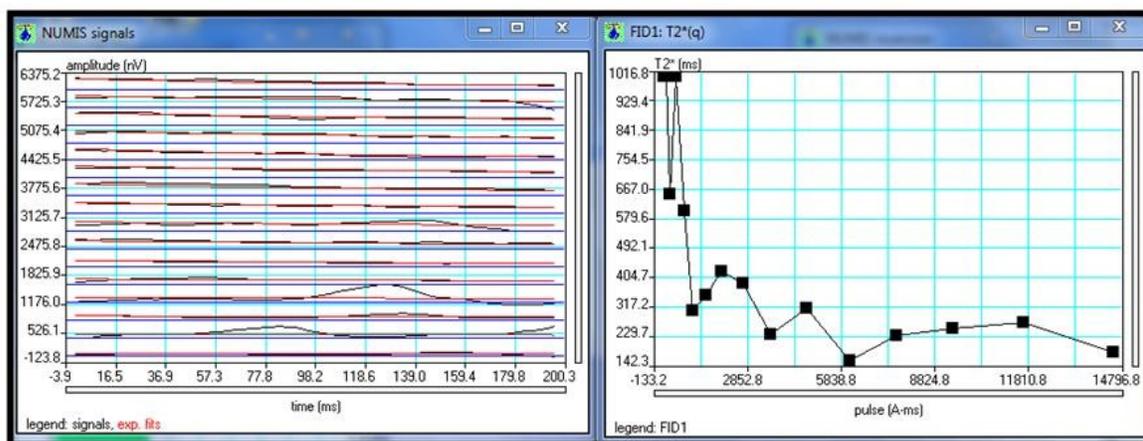


Figura A.18. Curvas de decaimiento y Curva T_2 en función de Q “Sounding” 0019 (filtrado).

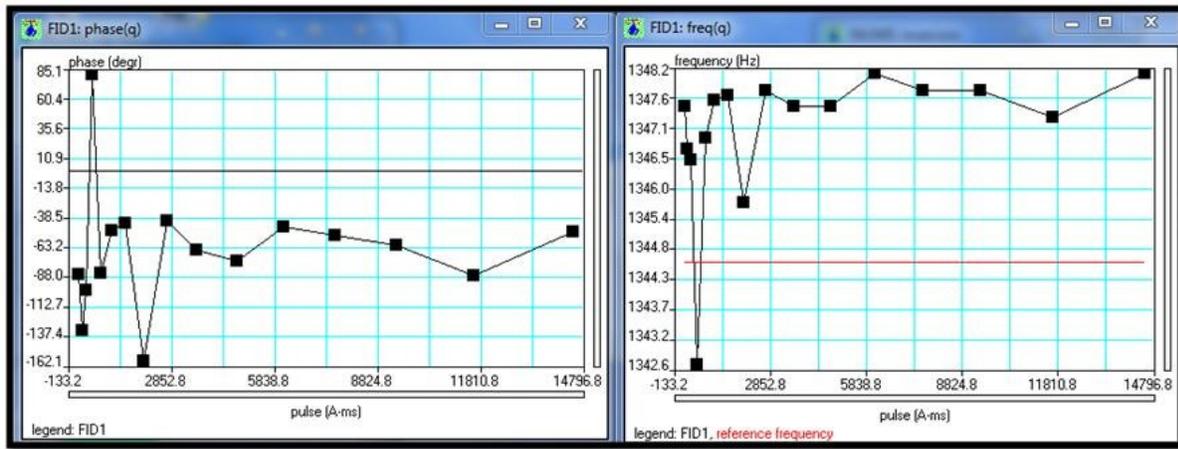


Figura A.19. Curvas de fase y frecuencia “Sounding”0019 (filtrado).

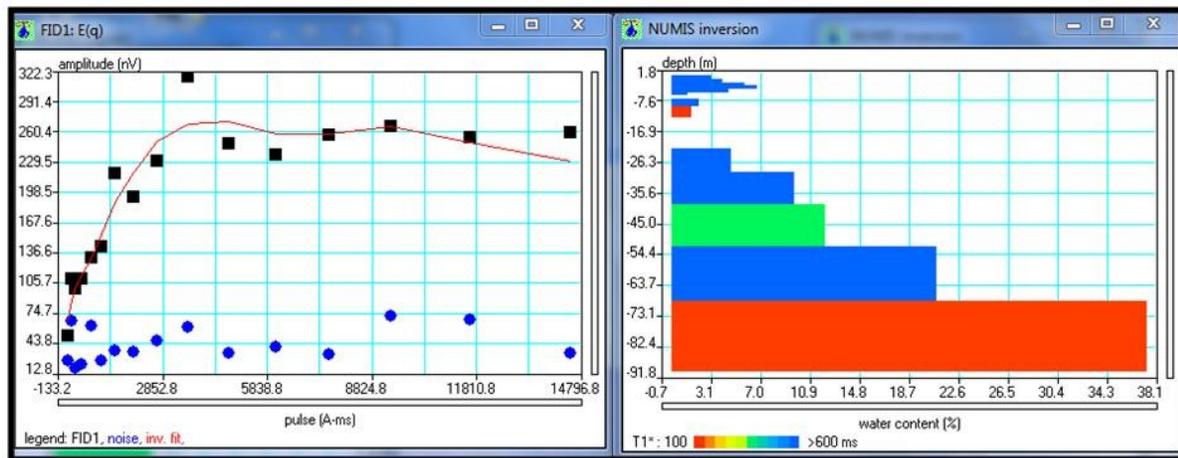


Figura A.20. Curva de inversión y Función de la inversión “Sounding” 0019 (filtrado).

RMN Huyapari “Sounding” 0019. [sin Filtrado]

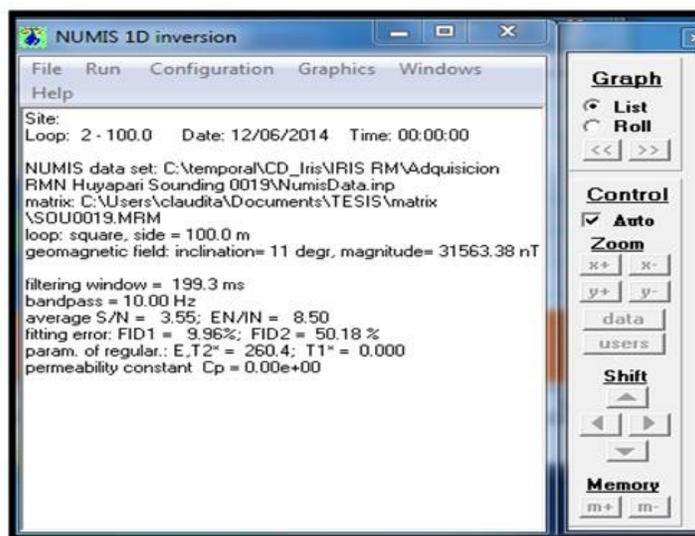


Figura A.21. Datos de entrada y Resultados numéricos “Sounding” 0019 (sin filtrado).

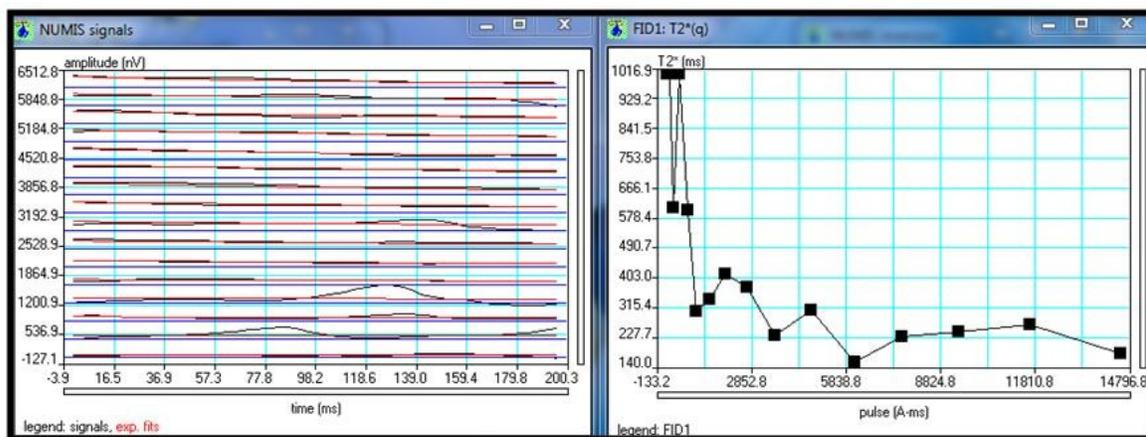


Figura A.22. Curvas de decaimiento y Curva T₂ en función de Q “Sounding”0019 (sin filtrado).

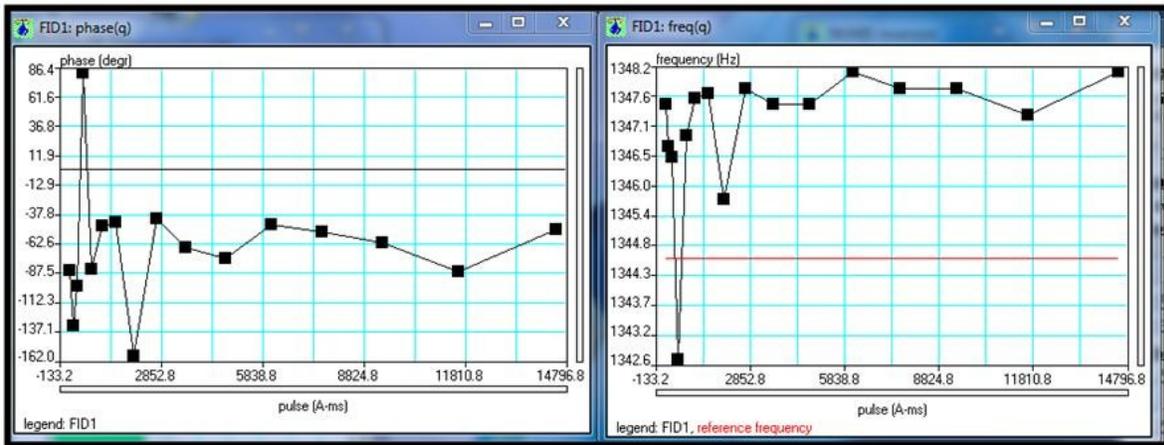


Figura A.23. Curvas de fase y frecuencia “Sounding” 0019 (sin filtrado).

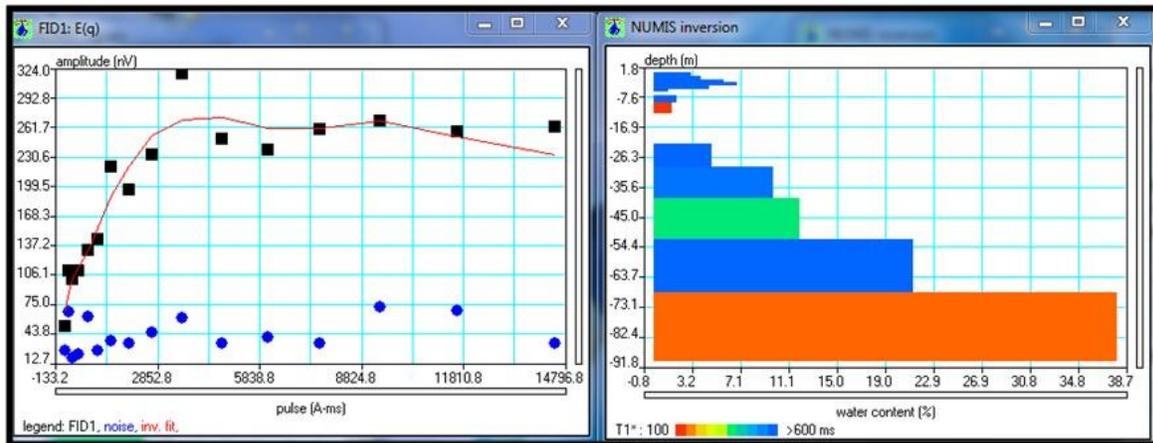


Figura A.24. Curva de inversión y Función de la inversión “Sounding” 0019 (sin filtrado).

RMN Huyapari “Sounding” 0020. [Filtrado] (finca la Fedrera)

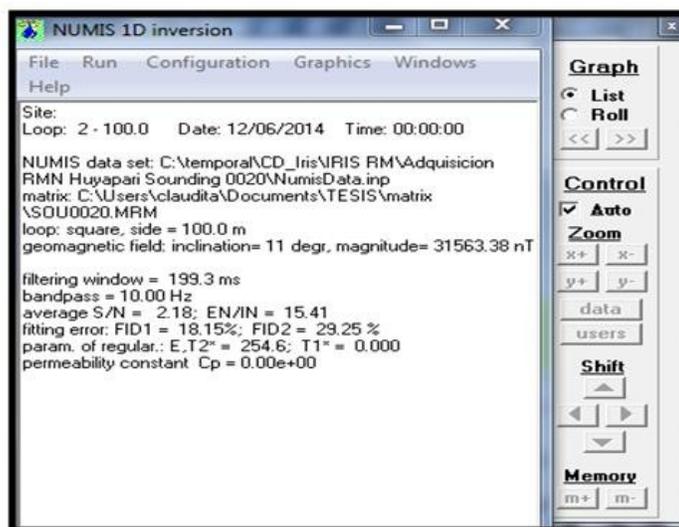


Figura A.25. Datos de entrada y Resultados numéricos “Sounding” 0020 (filtrado).

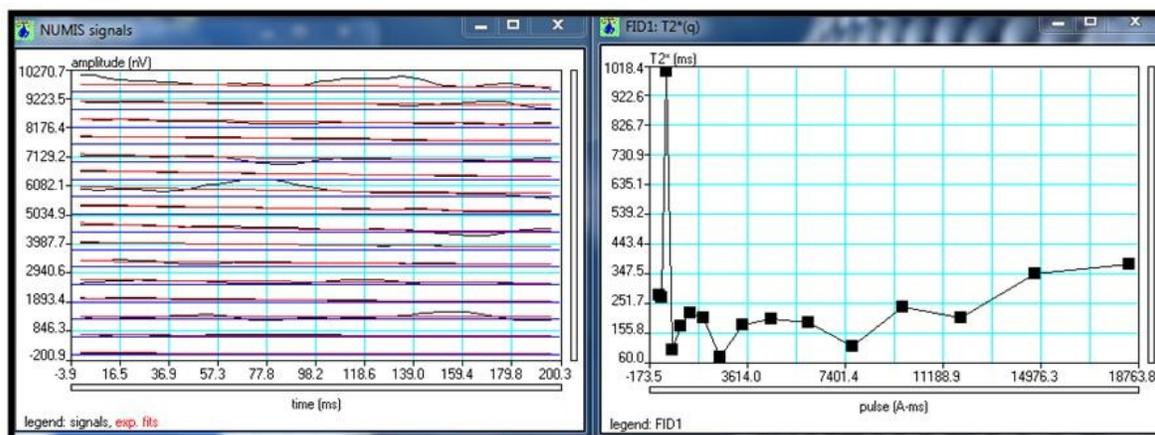


Figura A.26. Curvas de decaimiento y Curva T_2 en función de Q “Sounding”0020 (filtrado).

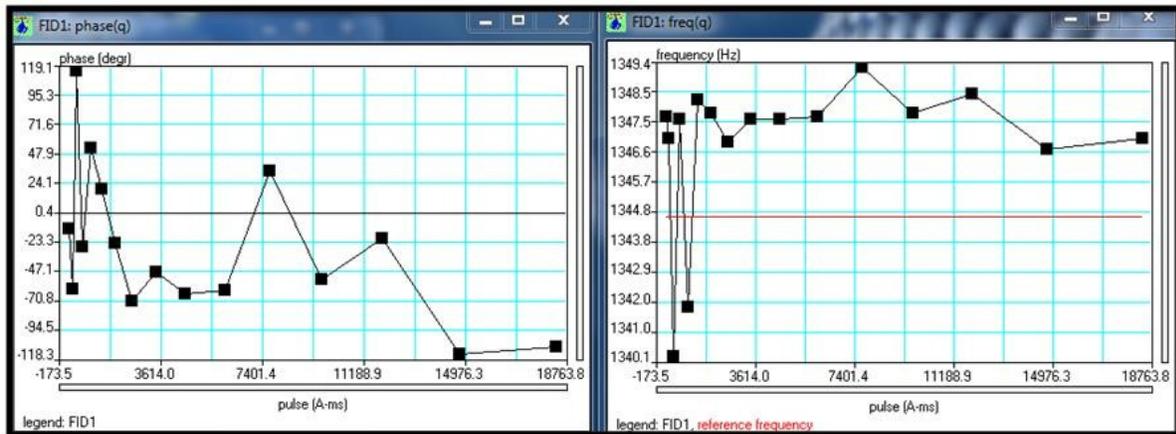


Figura A.27. Curvas de fase y frecuencia “Sounding” 0020 (filtrado).

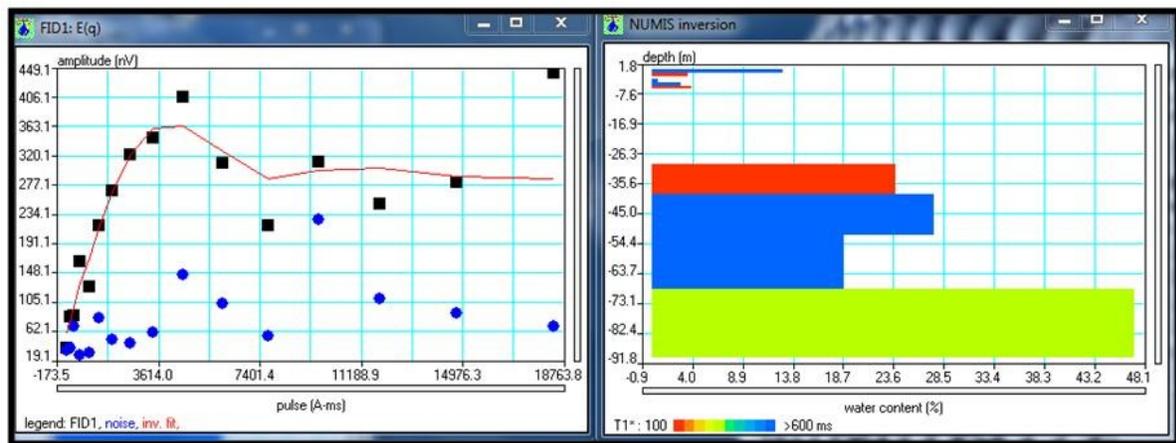


Figura A.28. Curva de inversión y Función de la inversión “Sounding” 0020 (filtrado).

RMN Huyapari “Sounding” 0020. [sin Filtrado]

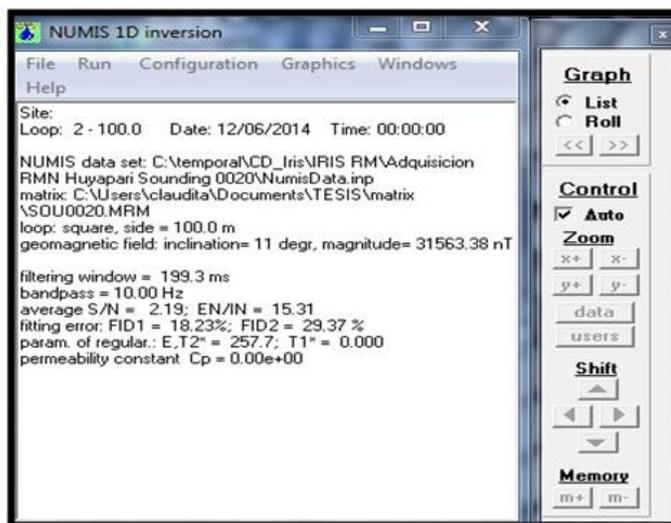


Figura A.29. Datos de entrada y Resultados numéricos “Sounding” 0020 (sin filtrado).

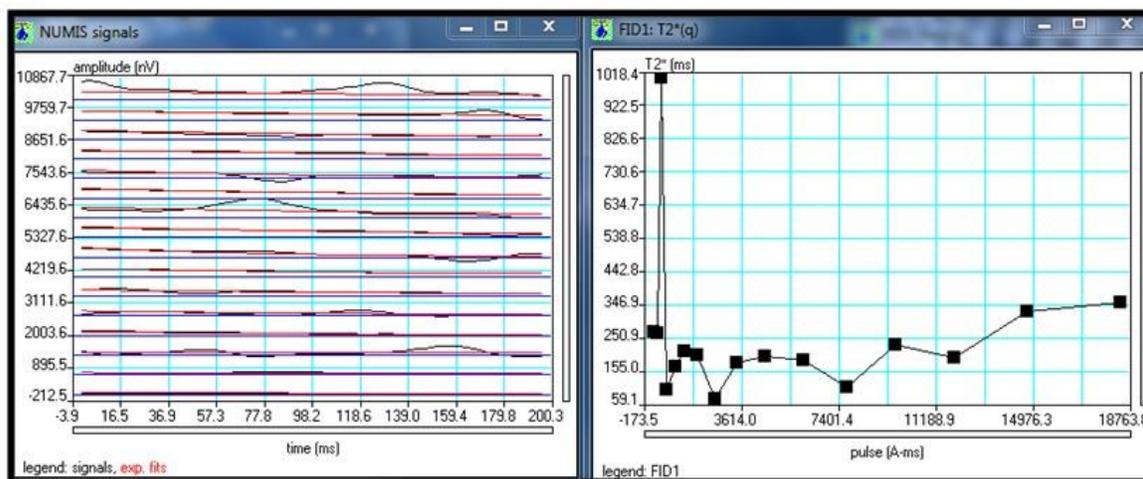


Figura A.30. Curvas de decaimiento y Curva T_2 en función de Q “Sounding” 0020 (sin filtrado).

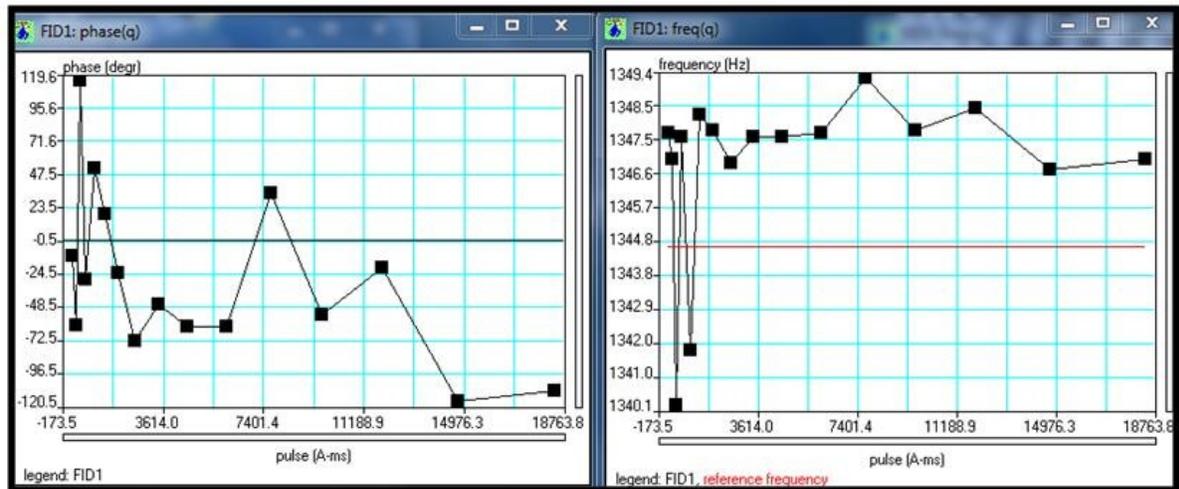


Figura A.31. Curvas de fase y frecuencia “Sounding” 0020 (sin filtrado).

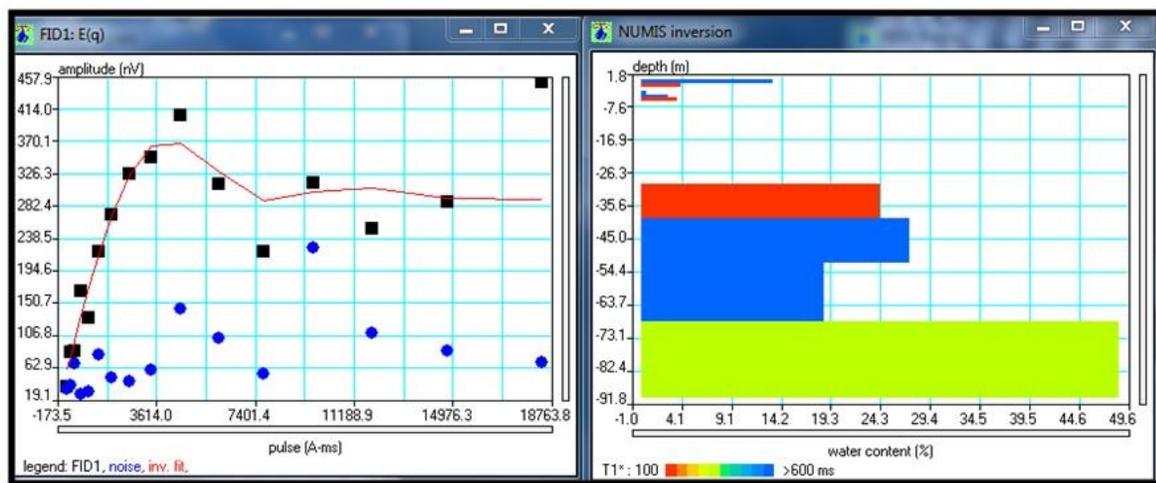


Figura A.32. Curva de inversión y Función de la inversión “Sounding” 0020 (sin filtrado).

RMN Huyapari “Sounding” 0013. [Filtrado] (finca la Fedrera)

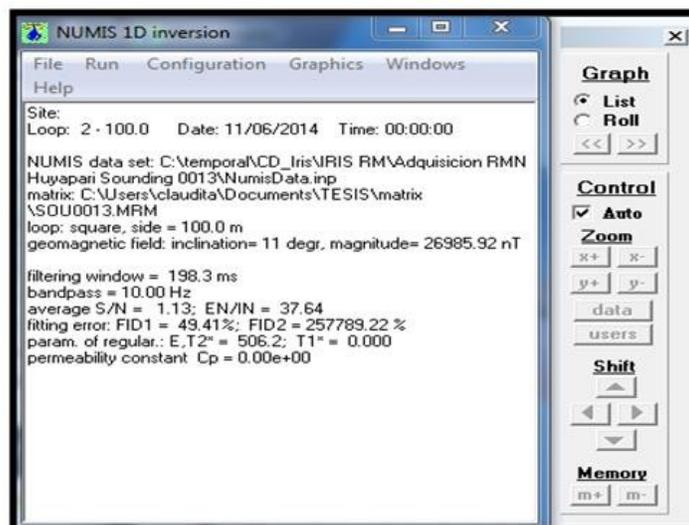


Figura A.33. Datos de entrada y Resultados numéricos “Sounding” 0013 (filtrado).

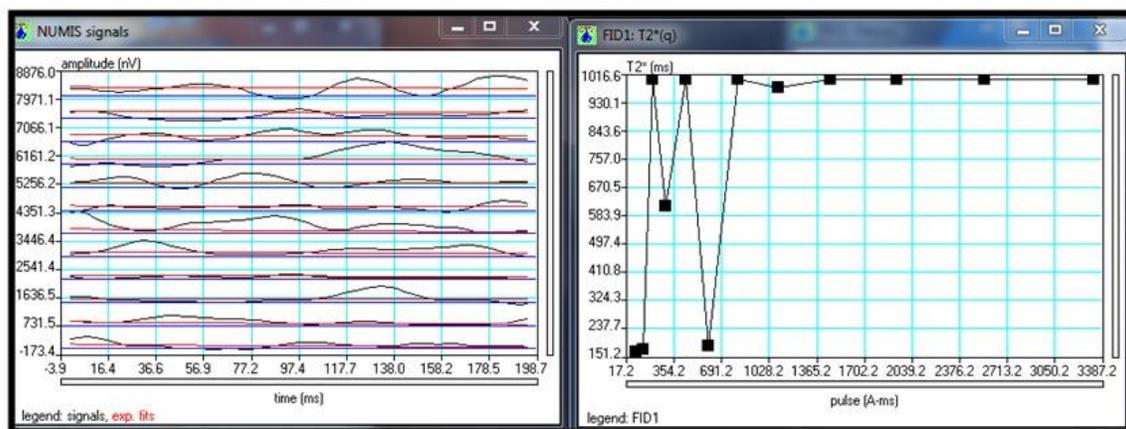


Figura A.34. Curvas de decaimiento y Curva T_2 en función de Q “Sounding” 0013 (filtrado).

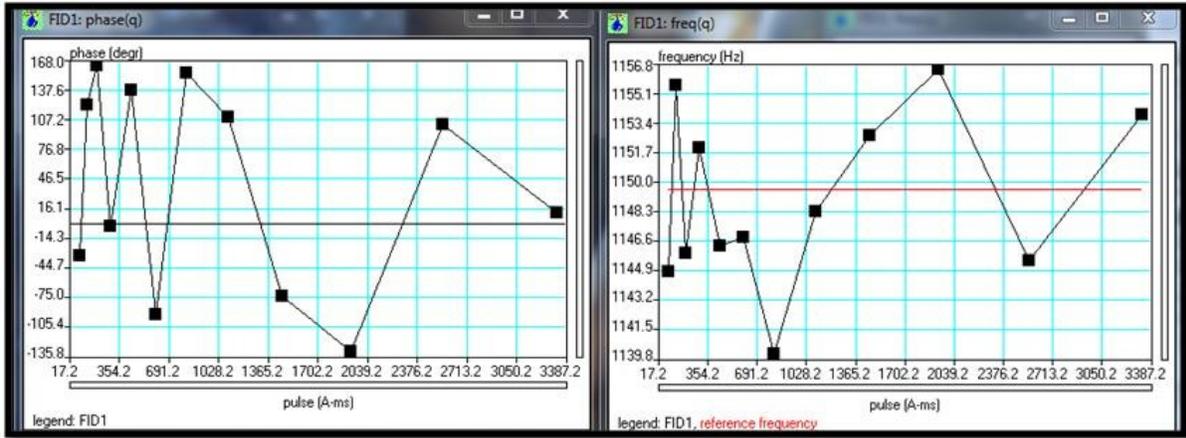


Figura A.35. Curvas de fase y frecuencia “Sounding” 0013 (filtrado).

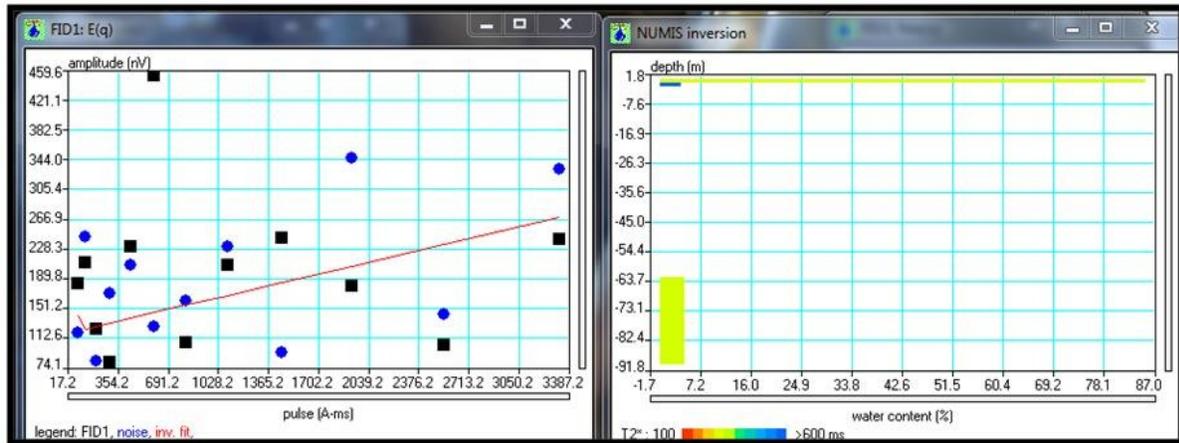


Figura A.36. Curva de inversión y Función de la inversión “Sounding” 0013 (filtrado).

RMN Huyapari “Sounding” 0013. [sin Filtrado]

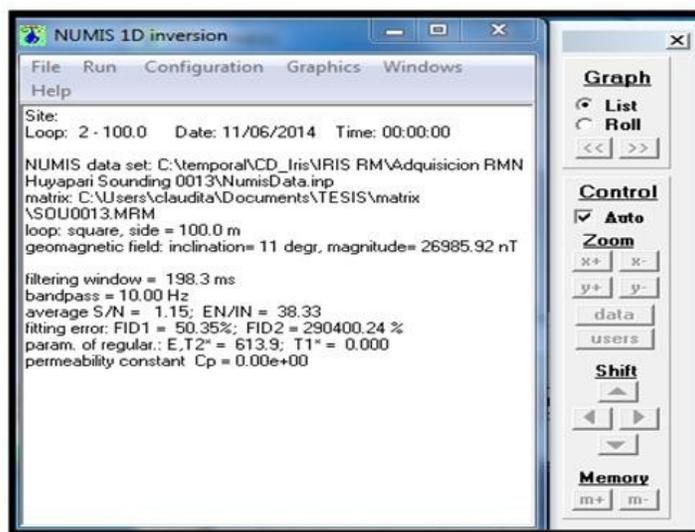


Figura A.37. Datos de entrada y Resultados numéricos “Sounding” 0013 (sin filtrado).

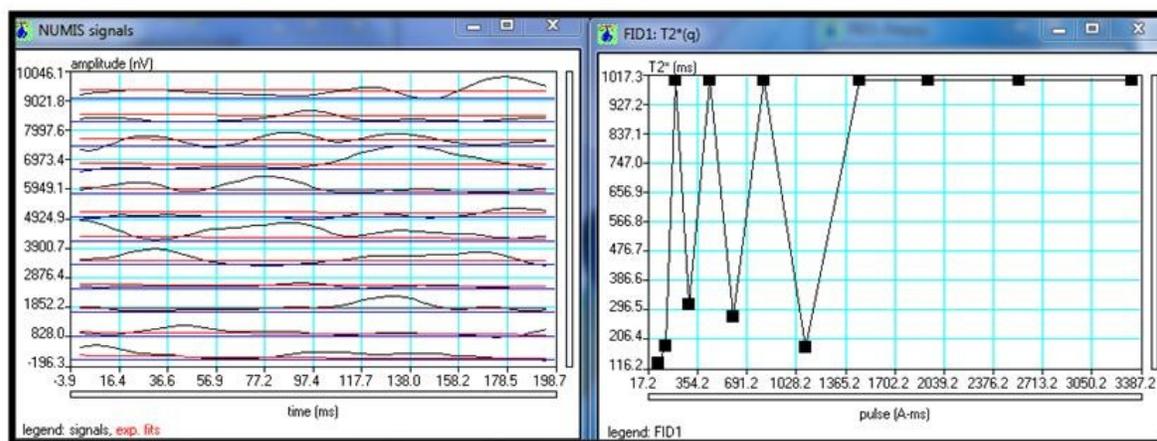


Figura A.38. Curvas de decaimiento y Curva T_2^* en función de Q “Sounding” 0013 (sin filtrado).

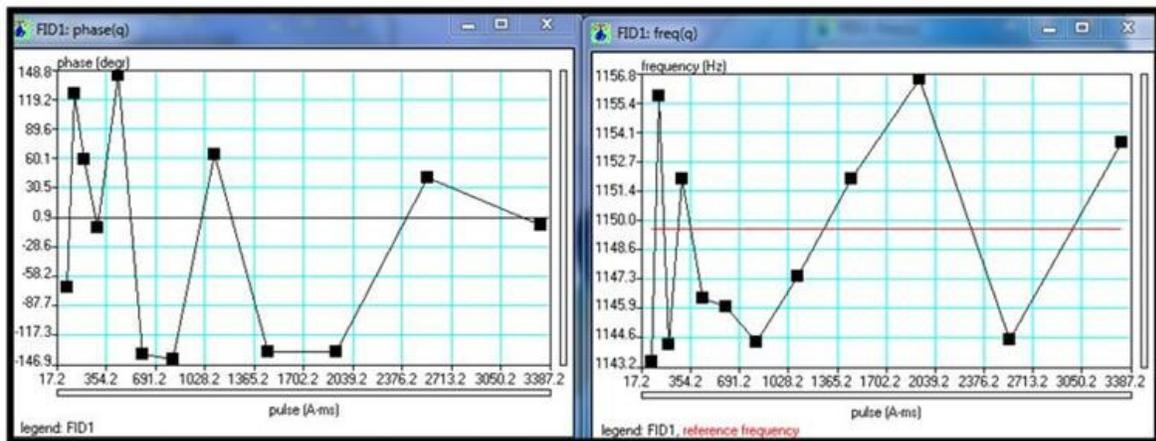


Figura A.39. Curvas de fase y frecuencia “Sounding” 0013 (sin filtrado).

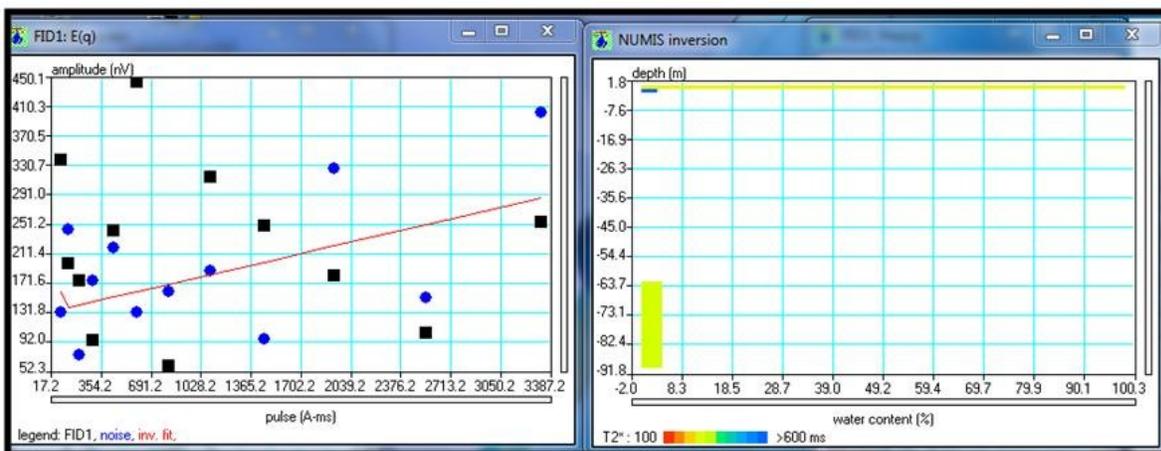


Figura A.40. Curva de inversión y Función de la inversión “Sounding” 0013 (sin filtrado).