

*Análisis Comparativo entre Resonancia
Magnética Funcional (f-MRI) y Monitoreo
Sísmico 4D*

LUCAS SANTIAGO CARVAJAL LEAL

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2014

*Análisis Comparativo entre Resonancia
Magnética Funcional (f-MRI) y Monitoreo
Sísmico 4D*

LUCAS SANTIAGO CARVAJAL LEAL

Proyecto de grado para optar por el título de ingeniero
electrónico

Director

DANIEL ALFONSO SIERRA BUENO, PhD

Codirector

Dr. Ing. ÓSCAR MAURICIO REYES TORRES

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2014

Índice general

| | |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN | 10 |
| Capítulo 1. Fundamentos de la resonancia magnética funcional | 11 |
| 1.1. . Diagrama de procesos en la resonancia magnética funcional | 11 |
| 1.2. . Resonancia magnética | 11 |
| 1.2.1. . Componentes del resonador magnético y funcionamiento | 12 |
| 1.2.2. . Procesamiento y calidad de la imagen | 15 |
| 1.3. . Resonancia magnética funcional | 21 |
| Capítulo 2. Fundamentos del Monitoreo Sísmico 4D | 23 |
| 2.1. . Diagrama de procesos en el monitoreo sísmico 4D | 23 |
| 2.2. . Etapas internas del proceso | 25 |
| 2.2.1. . Estudios de factibilidad | 25 |
| 2.2.2. . Diseño de adquisición de datos | 26 |
| 2.2.3. . Adquisición de datos por geófonos | 26 |
| 2.2.4. . Adquisición y almacenamiento de imágenes digitales | 26 |
| 2.2.5. . Procesamiento de datos sísmicos | 28 |
| 2.2.6. . Secuencia de procesamiento de datos sísmicos | 28 |
| 2.2.7. . Pre-apilamiento | 28 |
| 2.2.8. . Apilamiento | 29 |
| 2.2.9. . Post-apilamiento | 29 |
| 2.2.10. Interpretación y realimentación | 29 |
| Capítulo 3. Paralelo y comparaciones entre los procedimientos de Resonancia Magnética Funcional y Monitoreo Sísmico 4D | 31 |
| 3.1. . Paralelo en los procedimientos | 32 |
| 3.2. . Comparación de procedimientos | 33 |
| Capítulo 4. Conclusiones | 34 |
| Capítulo 5. Recomendaciones y trabajo futuro | 35 |
| Capítulo 6. Apéndice | 37 |

| | |
|---|-----------|
| 6.1. . Metodología utilizada en el desarrollo del proyecto. | 37 |
| Bibliografía | 39 |

Índice de figuras

| | | |
|-------|---|----|
| 1.1. | Proceso sintetizado de resonancia magnética funcional. | 11 |
| 1.2. | Resonador magnético e imagen por resonancia magnética. | 12 |
| 1.3. | Áreas comúnmente encontradas en una sala de resonancia magnética. | 13 |
| 1.4. | Tipos de bobinas. (a) Bobina de cabeza y cuerpo. (b) Bobina de angiografía periférica. (c) Bobina flexible. | 14 |
| 1.5. | Componentes básicos en el funcionamiento del resonador. | 15 |
| 1.6. | Proceso de transmisión-recepción de la señal. | 16 |
| 1.7. | Precesión del protón alrededor de la dirección de campo magnético. | 17 |
| 1.8. | Estados posibles del protón. | 17 |
| 1.9. | Momento magnético total de los protones. | 18 |
| 1.10. | Espiral del momento magnético y señal detectada por el receptor. | 18 |
| 1.11. | Imagen de rodilla por PD-ponderado. | 19 |
| 1.12. | Imagen de la rodilla con un desgarro en el menisco tomada por T2. | 20 |
| 1.13. | Imagen sagital de rodilla tomada por T1. | 20 |
| 1.14. | Percepción en el campo magnético de un protón debido al campo magnético de un protón cercano. | 21 |
| 1.15. | Imagen por resonancia magnética funcional. | 22 |
| 2.1. | Diagrama de proceso de lazo cerrado en monitoreo sísmico 4D. | 24 |
| 2.2. | Flujo de trabajo del modelado en la etapa de factibilidad. | 25 |
| 2.3. | Representación de la ubicación de unos geófonos sobre un depósito. | 27 |
| 2.4. | Representación de una matriz de dos dimensiones con valores que representan la energía capturada por los transductores. | 27 |
| 2.5. | Representación de una matriz 3D. | 28 |
| 3.1. | Gráfica comparativa de etapas en los procesos de Resonancia Magnética funcional y monitoreo sísmico 4D. | 32 |
| 5.1. | Imagen del ES Teck Complex. | 36 |
| 6.1. | Diagramas de flujo utilizados en el desarrollo del plan de trabajo. | 38 |

RESUMEN

TITULO: Análisis comparativo entre resonancia magnética funcional (f-MRI) y monitoreo sísmico 4D.

AUTOR: Lucas Santiago Carvajal Leal

PALABRAS CLAVES: Resonancia, Magnetismo, Imágenes, 4D, Monitoreo Sísmico, Comparación.

En el documento encontrará una comparación entre dos técnicas aplicadas en campos distintos de trabajo, pero que buscan el objetivo común de observar los cambios que ocurren en el paso del tiempo de una estructura interna para luego identificar similitudes, diferencias y posibilidades de adaptación de estrategias de una aplicación a la otra. Por un lado se encuentra la Resonancia Magnética Funcional, es una técnica aplicada en medicina que mediante un campo magnético y señales de radio frecuencia reconstruye imágenes 4D señalando las zonas cerebrales que realizan una actividad determinada. Por otra parte se encuentra el monitoreo sísmico 4D, es una técnica aplicada en sísmica, específicamente en pozos en etapa de recobro mejorado donde por medio de ondas mecánicas y geófonos reconstruyen secciones sísmicas del interior del pozo y toman varias imágenes espaciadas temporalmente y observar los cambios en el pozo. El documento inicia estudiando el proceso macro de la Resonancia Magnética Funcional, recorriendo cada etapa y construyendo un diagrama de flujo general de su funcionamiento. Luego se realiza un procedimiento idéntico en el monitoreo sísmico 4D. Con las dos técnicas estudiadas y los diagramas de flujo de cada técnica creados se inicia el proceso de comparación, donde inicialmente se buscan analogías entre las dos técnicas para luego crear un paralelo entre los diagramas de flujo de procedimientos que desencadena posibles adaptaciones que mejoren los procedimientos.

1

¹ *Proyecto de Grado.

*Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director PhD. Daniel Alfonso Sierra Bueno Codirector Dr. Ing. Oscar Mauricio Reyes.

ABSTRACT

TITLE: Comparative analysis of functional magnetic resonance imaging (f-MRI) and 4D seismic monitoring.

AUTHOR: Lucas Santiago Carvajal Leal

KEYWORDS: Resonance, Magnetism, Images, 4D Seismic Monitoring, Compare.

The paper is a comparison between two techniques applied in different fields of work, but who seek the common objective of observing the changes that occur at the time of an internal structure and then identify similarities, differences and potential adaptation strategies from one application to the other. On one side is the Functional Magnetic Resonance Imaging, is a medical technique applied by a magnetic field and radio frequency signals pointing reconstructs 4D images of brain areas that perform a particular activity. Moreover is 4D seismic monitoring is an applied seismic , specifically in wells in step enhanced recovery technique where by mechanical waves and geophones reconstructed seismic sections inside the well and take multiple images spaced temporarily and observe changes in the well. The paper starts by studying the macro process of Functional MRI, through each stage and building a general flowchart of operation. An identical procedure is then performed on the 4D seismic monitoring. With both techniques studied and the flow charts of each technique created the comparison process , where initially analogies between the two techniques are sought to then create a parallel between the flowcharts of procedures that triggers any adjustments to improve procedures begins.

2

² *Proyecto de Grado.

*Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director PhD. Daniel Alfonso Sierra Bueno Codirector Dr. Ing. Oscar Mauricio Reyes.

INTRODUCCIÓN

La imagen por resonancia magnética funcional (fMRI) es un procedimiento empleado en medicina para generar imágenes cerebrales identificando áreas específicas del cerebro que realizan una actividad determinada. Esta técnica utiliza un procesamiento de datos para generar una imagen 3D donde se iluminan las zonas que presentan cambios metabólicos mientras el paciente realiza una actividad propuesta por el médico.

Por su parte, el monitoreo 4D es esencialmente la generación de imágenes 3D de una fuente de hidrocarburo a través del tiempo. El procedimiento se realiza generando ondas que se desplazan y reflejan a través del subsuelo que se desea observar. Los geófonos o hidrófonos (dependiendo de si se observan áreas subterráneas o submarinas) capturan las ondas reflejadas y las convierten en señales eléctricas que representan datos. Mediante un procesamiento de estos datos son generadas las imágenes 3D.

Estos dos procedimientos tienen una finalidad en común, por ello es de interés realizar una comparación para identificar posibles mejoras, que beneficien los resultados de cualquiera o ambas técnicas. En el capítulo 2 se identifican los principales procesos y etapas para lograr una imagen por resonancia magnética funcional. En el capítulo 3 se realiza un estudio similar en los procesos y etapas que componen el monitoreo sísmico 4D. Con los dos procedimientos comprendidos, se hace un paralelo y comparaciones entre ellos mostrado en el capítulo 4. En el capítulo 5 se enuncian las conclusiones obtenidas y finalmente en el capítulo 6 se exponen las recomendaciones para futuros trabajos.

Capítulo 1

Fundamentos de la resonancia magnética funcional

1.1. Diagrama de procesos en la resonancia magnética funcional

El proceso de la Resonancia Magnética (RM) y la Resonancia Magnética funcional (RMf) puede sintetizarse de igual manera como se muestra en la figura 1.1 debido a que en esencia la RMf es una modalidad dentro de la RM que requiere adicionar etapas de adquisición y proceso de datos pero aplica el mismo diagrama. En este capítulo se describirán los pasos necesario para obtener una imagen por Resonancia Magnética funcional.

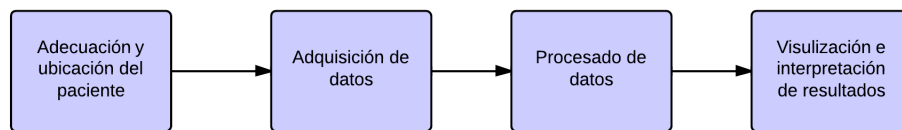


Figura 1.1. Proceso sintetizado de resonancia magnética funcional.

1.2. Resonancia magnética

La resonancia magnética es una técnica que genera imágenes detalladas de órganos y estructuras internas mediante la polarización del espín en los átomos de hidrógeno presentes en los tejidos que normalmente se encuentran orientados al azar. La orientación uniforme de los espín se logra mediante el campo magnético generado por grandes imanes. Con los protones alineados de forma paralela al campo magnético externo, se someten a pulsos de energía por radiofrecuencia para alterar momentáneamente su orientación debido a la energía absorbida por los núcleos de hidrógeno; posteriormente la energía es liberada y cada núcleo se convierte en un pequeño transmisor de señales de radiofrecuencia y recupera su orientación paralela al campo. La energía irradiada es almacenada mediante una

antena de radiofrecuencia y procesada mediante computadoras para generar la imagen del órgano que se desea observar (figura 1.2).



Figura 1.2. Resonador magnético e imagen por resonancia magnética. *Fuente [15]*

1.2.1. Componentes del resonador magnético y funcionamiento

En una sala típica de resonancia magnética encontraremos las áreas mostradas en la figura 1.3. Estas son: el cuarto técnico, el cuarto del magneto, el cuarto de control y la estación de trabajo. Frecuentemente la estación de trabajo y el cuarto de control se encuentran en una misma área.

El cuarto técnico es donde se reciben, procesan y envían las señales entre el cuarto del magneto, el cuarto de control y la estación de trabajo. Es donde se encuentra todo el equipo electrónico necesario para ejecutar el procedimiento como las secuencias de impulsos eléctricos en las bobinas de gradiente, las señales de control del resonador y la alimentación general del equipo entre otros.

El cuarto de control envía señales que indican a la máquina el posicionamiento del paciente, las secuencias de impulsos eléctricos que desean ser utilizadas y tiene un circuito cerrado de televisión y una ventana de observación para vigilar al paciente.

La estación de trabajo es donde se recibe la imagen final generada por el procedimiento; se archivan las imágenes y se dan indicaciones al cuarto de control para ubicar al

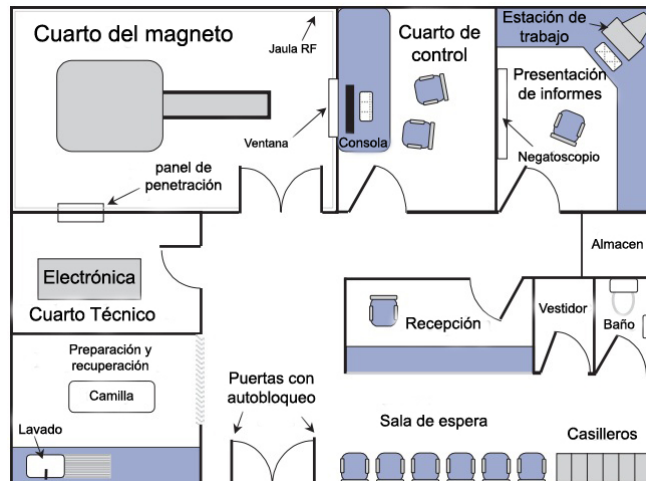


Figura 1.3. Áreas comúnmente encontradas en una sala de resonancia magnética. *Adaptado de [11]*

paciente y utilizar otras secuencias de impulsos eléctricos para obtener la imagen deseada.

El cuarto del magneto es donde está el corazón del procedimiento, contiene el imán y las bobinas, es ahí donde se ubicado el paciente. Es un cuarto aislado de radio frecuencias externas que puedan distorsionar los datos obtenidos durante el procedimiento.

El principal componente en el resonador magnético es el imán, el cual brinda el campo magnético que polariza el espín en los protones. Estos campos pueden ser horizontales o verticales dependiendo si el imán es abierto o cerrado. Existen varios tipos de imán, entre los cuales están:

- Imanes superconductores: su campo magnético siempre está presente y generan intensidades intermedias y altas, que van desde los 0,5T en adelante [11]. Para mantener las propiedades del superconductor se utiliza helio líquido como fluido refrigerante criogénico.
- Imanes permanentes: su campo siempre está presente y genera intensidades de hasta 0,3T [11].
- Resistivos y electroimanes: son alimentados eléctricamente y por ello puede apagarse su campo magnético. Son capaces de generar intensidades de hasta 0,6T [11].

La señales que proveen la información de diagnóstico son generadas por los tejidos al orientar nuevamente sus espines con el campo magnético en respuesta a los pulsos de radio frecuencia arrojados por la bobina transmisoras (figura 1.5) que son enviados desde el cuarto de control. Esta energía es la señal de resonancia magnética y es capturada

por la bobina receptora (figura 1.5), (la misma bobina transmisora pero funcionando en modo receptor). Las señales de resonancia magnética son débiles y sensibles a interferencia eléctrica. Para corregir éste problema, la habitación donde se encuentra ubicado el resonador magnético es protegido por una jaula de Faraday que minimiza las señales de radiofrecuencia externas.

Todos los sistemas de resonancia tienen diferentes bobinas específicas (Figura 1.4) para obtener imágenes más precisas de los tejidos internos que se desean observar. Existen bobinas de cabeza, bobinas de cuerpo y bobinas de espina entre otras [11].

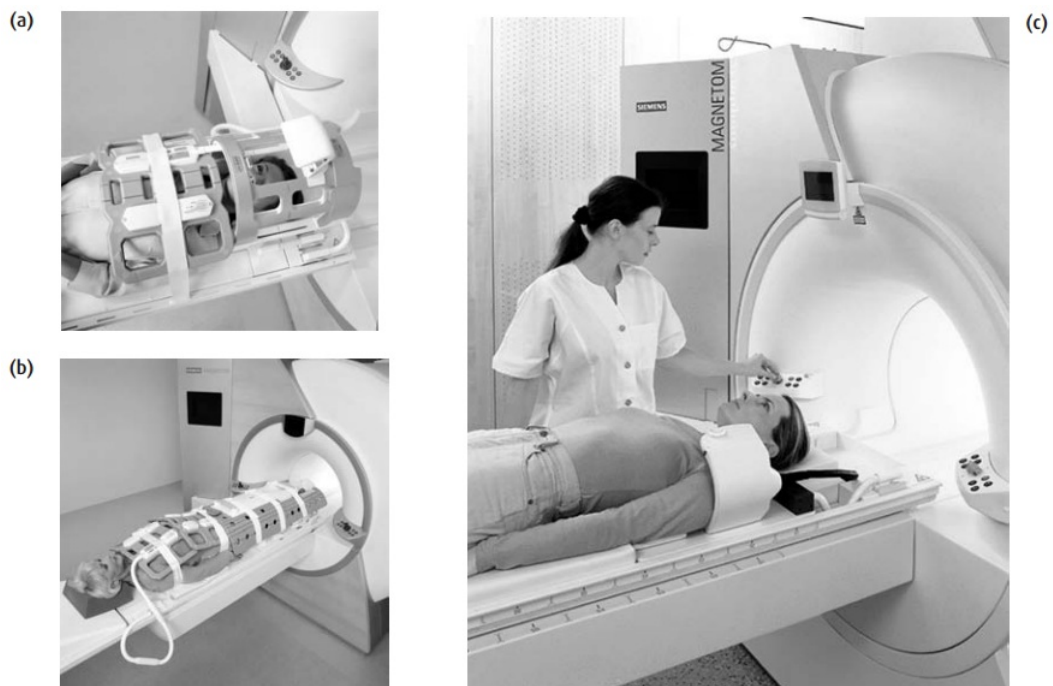


Figura 1.4. Tipos de bobinas. (a) Bobina de cabeza y cuerpo. (b) Bobina de angiografía periférica. (c) Bobina flexible. Fuente [11]

Para localizar las señales de resonancia magnética se utilizan bobinas de gradiente localizadas en los tres ejes espaciales (figura 1.5) generando variaciones espaciales de corto plazo en la fuerza del campo magnético a lo largo del paciente. Las variaciones son generadas haciendo pasar por las bobinas de gradiente grandes corrientes eléctricas en secuencias de impulsos repetidos cuidadosamente que han sido seleccionadas en el cuarto de control y enviados desde el cuarto técnico. Cuando están ejecutando secuencias de impulso, las bobinas generan un sonido fuerte de golpe que puede ser molesto para los pacientes y en ocasiones se debe utilizar protección auditiva.

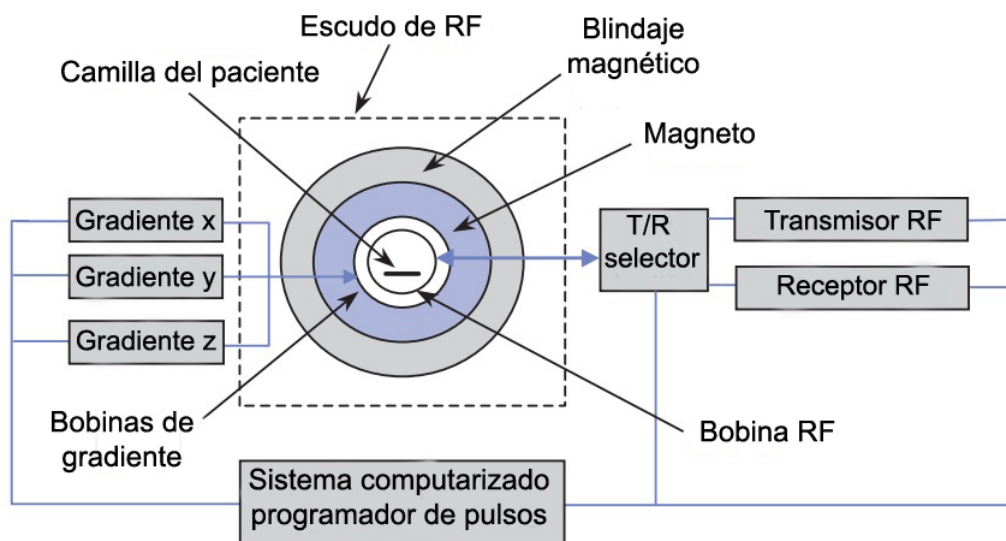


Figura 1.5. Componentes básicos en el funcionamiento del resonador. *Adaptado de [11]*

La señal de pulsos de radiofrecuencia enviada por la bobina transmisora es originalmente una señal digital que debe ser convertida en una señal analógica utilizando un DAC (*Digital to Analog Converter*, en español conversor digital-analógico) para que pueda interactuar con los tejidos que se desean observar. El caso contrario ocurre con la señal que es recibida del tejido, esta es una señal analógica y debe ser convertida a una señal digital utilizando un ADC (*Analog to Digital Converter*, en español conversor analógico-digital) para luego ser procesada en la computadora del cuarto técnico mediante un DSP (*Digital Signal Processor*, en español procesador de señales digitales) y visualizada en la estación de trabajo. Este proceso de conversión de señales se puede observar en la figura 1.6.

1.2.2. Procesamiento y calidad de la imagen

Cuando el paciente está ubicado en el escáner de forma cómoda se selecciona la bobina receptora adecuada para la imagen que se desea tomar y luego se ubica en el centro del agujero del imán; las luces láser guías del escáner marcan esta ubicación. Este punto es ideal para una buena calidad de la imagen ya que presenta la mejor homogeneidad en el campo magnético.

Con el paciente ubicado adecuadamente, las primeras imágenes son exploratorias de baja resolución utilizados para ubicar el área que se desea observar en detalle y luego se

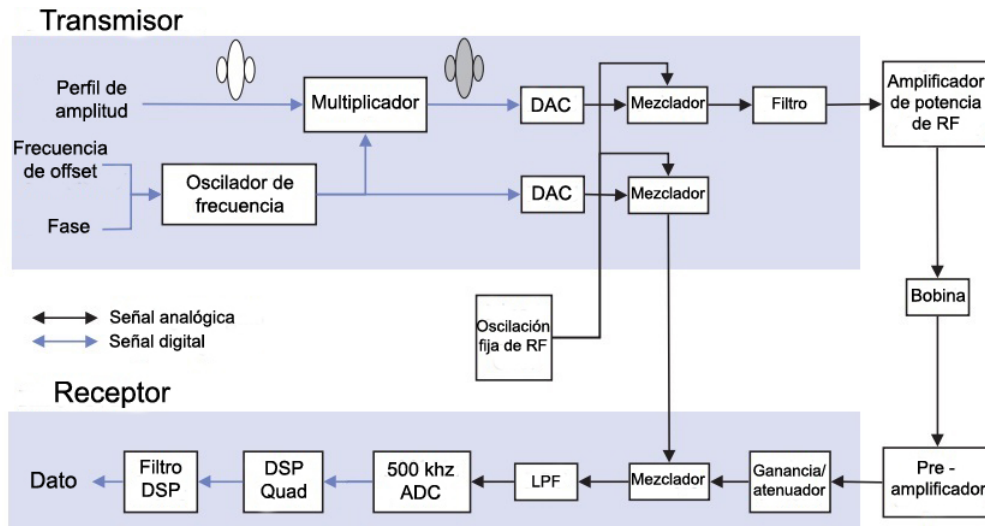


Figura 1.6. Proceso de transmisión-recepción de la señal. Adaptado de [11]

genera una imagen en alta resolución de la zona por medio de una selección adecuada de la secuencia de impulsos eléctricos. En algunas ocasiones se administra *gadolinium* al paciente para mejorar el contraste y la claridad de las imágenes. El *gadolinium* es un ion metálico para-magnético, los iones para-magnéticos se mueven diferente bajo un campo magnético y por ello son ideales para realzar el contraste en las imágenes por resonancia magnética [7].

En presencia del campo magnético generado por el imán, los protones en la molécula de hidrógeno no se alinean sencillamente sobre la dirección del campo, lo que realmente ocurre es que el protón inicia un movimiento de precesión alrededor del campo magnético (figura 1.7) y la frecuencia a la que giran es proporcional al campo externo y está dada por la ecuación Larmor.

Como todos los protones giran a la misma frecuencia de Larmor, se habla de una condición de resonancia. los protones pueden tomar dos estados, anti-paralelo o paralelo al campo magnético (figura 1.8)(*spin-up* o *spin-down*).

Existe una distribución estadística para los posibles estados del protón y se encontró que el estado paralelo requiere levemente menos energía para alinearse y por esto se encontrarán más protones en estado paralelo que anti-paralelo. Cuando se suma el momento magnético de todos los protones que giran en fase obtenemos como resultado una magnetización de red y está alineada con el campo magnético generado por el imán (figura 1.9).

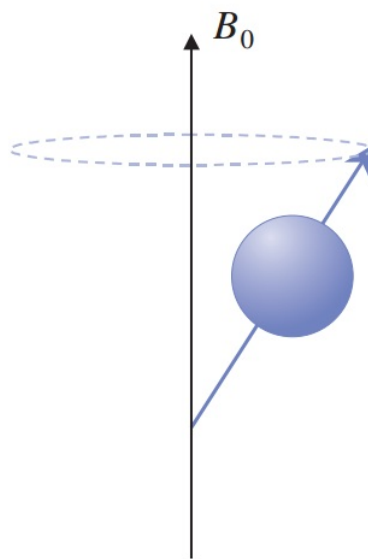


Figura 1.7. Precesión del protón alrededor de la dirección de campo magnético. Fuente [11]

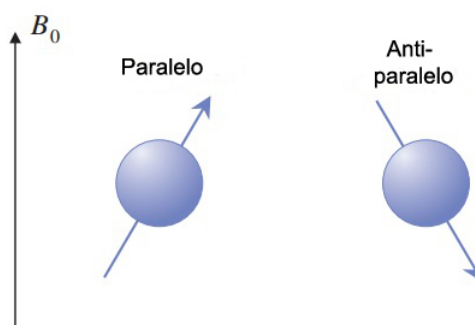


Figura 1.8. Estados posibles del protón. Adaptado de [11]

Medir la magnetización descrita anteriormente es virtualmente imposible mientras esté alineado con el campo magnético generado por el imán debido a que su valor es muy pequeño en relación al otro (en el orden de los micro Teslas para la magnetización de red y entre 0.3T y 1.5 T para el campo magnético del imán). Para poder medirlo, el momento magnético se desvía 90° del campo magnético utilizando una señal de radio frecuencia y detectores de campo que solo miden campos magnéticos en la dirección transversal al plano. Cuando se retira el pulso el momento magnético vuelve a alinearse con el plano, el movimiento y la señal detectada pueden observarse en la figura 1.10.

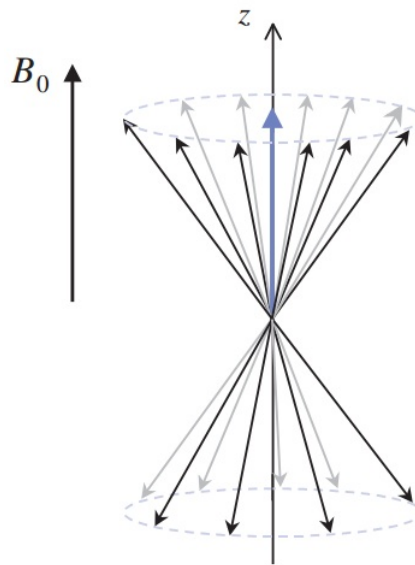


Figura 1.9. Momento magnético total de los protones. Fuente [11]

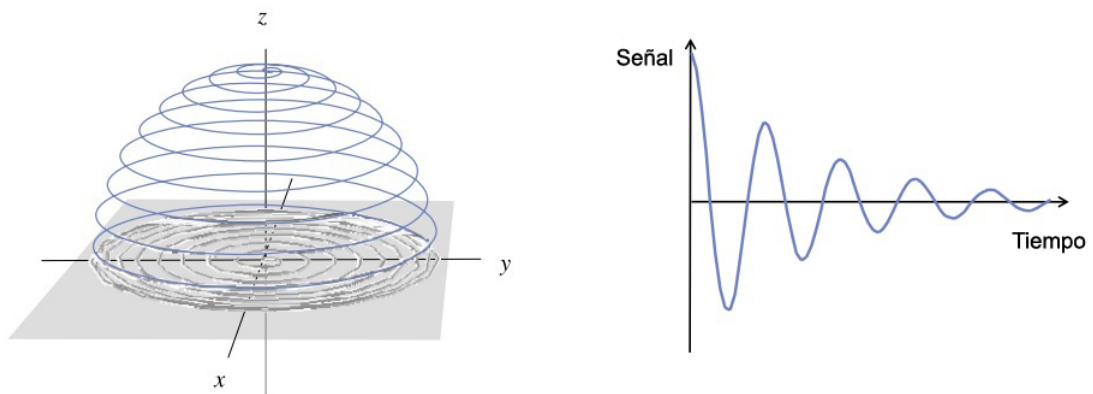


Figura 1.10. Espiral del momento magnético y señal detectada por el receptor. Adaptada de [11]

La señal original de la secuencia de pulsos RF es una señal digital enviada por el cuarto de control que debe ser procesada y convertida en una señal analógica que interactúe con los protones. La señal entregada por los protones es el caso opuesto, es una señal analógica que debe ser convertida en una señal digital para ser procesada por las computadoras mediante algoritmos de procesamiento de imagen y luego ser visualizadas en la estación de trabajo.

Hay tres propiedades importantes que nos determinan el contraste en las imágenes de los órganos:

- Densidad de protones (PD): Depende de la cantidad de hidrógenos que se encuentren

en el tejido, en general los fluidos como la sangre tienen más PD que los tejidos como los huesos o tendones.

- Tiempo de relajación SPIN-lattice (T1): Tiempo que demora en volver a su estado de equilibrio entregando energía a la estructura circundante del protón. Los fluidos tienen el T1 más prolongado (1500-2000ms), los tejidos a base de agua tienen un T1 intermedio (400-1200 ms) y los tejidos a base de grasa tienen el T1 más corto (100-150 ms).
- Tiempo de relajación SPIN-SPIN (T2): Tiempo que demora en volver a su estado de equilibrio entregando energía a otro protón circundante. Este tiempo siempre es menor a T1 aunque se comporta de manera similar con respecto a los tejidos, es decir los fluidos tienen el T2 más prolongado (700-1200ms), los tejidos a base de agua tienen un T2 intermedio (40-200ms) y los tejidos a base de grasa tienen el T2 más corto (10-100ms).

En las imágenes PD-ponderadas, los tejidos con mayor densidad de protones mostrarán los píxeles más brillantes como se observa en la imagen de la rodilla en la (figura 1.11).



Figura 1.11. Imagen de rodilla por PD-ponderado. Fuente [11]

De igual forma en las imágenes T2-ponderadas, los tejidos con un T2 más prolongada mostrarán los píxeles más brillantes aunque podría pensarse que es redundante tomar imágenes PD-ponderado o T2-ponderado, los resultados que se muestran tienen definiciones



Figura 1.12. Imagen de la rodilla con un desgarro en el menisco tomada por T2. Fuente [11]



Figura 1.13. Imagen sagital de rodilla tomada por T1. Fuente [11]

distintas y pueden facilitar ver lesiones dependiendo del tipo de imagen que se tome. En la figura 1.12 se muestra una rodilla con un desgarro de menisco, el liquido sinovial entra por la zona desgarrada del menisco (señalado por la flecha). Tanto en la figura 1.12 como en la figura 1.11 los líquidos brillan sobre los tejidos sólidos pero lo hacen en diferentes intensidades.

Por el contrario en la imágenes T1-ponderadas, los tejidos con las T1 más prolongadas producen las señales más débiles, por consiguiente los pixeles más brillantes son asociados a tejidos con T1 más cortos como se muestra en la figura 1.13.

1.3. Resonancia magnética funcional

La resonancia magnética funcional es una modalidad que se utiliza para evaluar las actividades cerebrales *in situ*. Inicialmente utiliza una imagen por resonancia magnética tridimensional del cerebro del paciente para generar una referencia espacial, luego se inicia la modalidad funcional que identifica los cambios metabólicos en el cerebro al realizar una actividad debido a que este proceso provoca que el tiempo de decaimiento de resonancia magnética en esa área sea escasamente más prolongado que en las zonas donde no se presentan cambios [3]. La prolongación en el tiempo de decaimiento ocurre porque en el lugar donde se presentan los cambios metabólicos se produce una gran concentración de protones los cuales al acercarse entre ellos experimentan niveles altos o bajos de energía debido al campo magnético de otro protón cercano. Esto provoca que el momento magnético de esa área permanezca fuera de alineación con el campo magnético del imán por más tiempo que las demás zonas del cerebro. (figura 1.14).

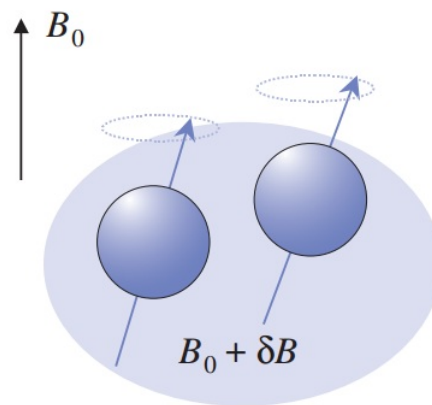


Figura 1.14. Percepción en el campo magnético de un protón debido al campo magnético de un protón cercano. Fuente [11]

Debido a la superposición de la imagen del cerebro y las señales con decaimiento más prolongado podemos identificar la zona que realiza la función (Figura 1.15). Esto permite un mapeo de activación preciso que es habitualmente utilizado por los cirujanos para no comprometer la funcionalidad del paciente al realizar una intervención quirúrgica. No obstante, la resonancia magnética funcional también se ha convertido en una de las técnicas más sensibles para identificar, investigar y monitorear tumores cerebrales, derrames cerebrales y ciertas enfermedades crónicas del sistema nervioso como la esclerosis múltiple. De igual forma permite documentar anomalías cerebrales asociadas a la demencia y a las convulsiones así como evaluar efectos de un derrame, traumatismo o alguna enfermedad

degenerativa sobre la función cerebral [5].

Si bien todos los médicos son instruidos para interpretar las imágenes arrojadas por el procedimiento, en la práctica general el radiólogo es quien inicialmente evalúa las imágenes y realiza sus comentarios, luego son enviadas al médico tratante del paciente junto con los comentarios para correlacionarlos con la historia clínica del paciente.

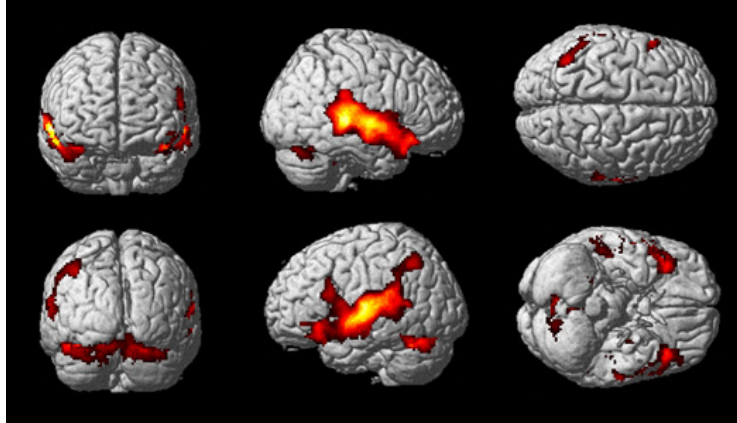


Figura 1.15. Imagen por resonancia magnética funcional. Fuente [14]

Capítulo 2

Fundamentos del Monitoreo Sísmico 4D

2.1. Diagrama de procesos en el monitoreo sísmico 4D

El monitoreo sísmico 4D (MS4D) es la combinación de la metodología sísmica 3D agregándole el factor temporal.

Esta técnica es utilizada para la inspección sísmica de un área determinada (campos de gas o petróleo) en repetidas ocasiones para observar cambios de producción.

Actualmente el monitoreo 4D se utiliza en tres áreas importantes:

- Monitoreo de yacimientos de producción de hidrocarburos.
- Monitoreo de almacenes subterráneos de CO₂.
- Monitoreo de riesgos geológicos (zonas de deslizamiento de tierras, volcanes).

Al ser basado en la sísmica 3D, su implementación es similar, con el agregado de que se debe garantizar la ubicación de los geófonos por largos periodos de tiempo para obtener una alta repetibilidad en las imágenes.

En general podemos sintetizar el método del monitoreo sísmico 4D mediante el diagrama en la figura 2.1. Dentro de éste surgen etapas internas que se deben realizar para garantizar el éxito del proceso, las cuales enunciaremos de forma breve a continuación:

- Estudios de factibilidad: Contempla los tres procesos de modelado y simulación junto con un análisis previo que determina si es posible obtener los datos necesarios de la sísmica 4D para compararlo con su modelo sintético.
- Diseño de adquisición de datos: Es una etapa perteneciente al proceso de datos sísmicos 4D donde se realiza un estudio de la ubicación de geófonos y la geología del terreno que permita la obtención de datos adecuados para correlacionarlos con la información previa del depósito.

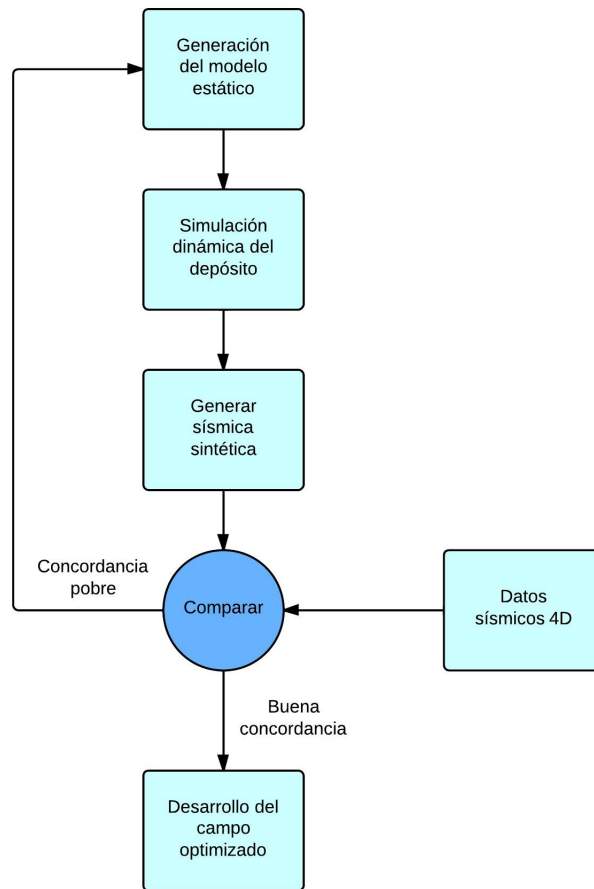


Figura 2.1. Diagrama de proceso de lazo cerrado en monitoreo sísmico 4D. *Adaptado de [8]*

- **Procesado de datos:** Es una etapa que pertenece al proceso de datos sísmicos 4D donde se adecúan los datos y se procesan mediante algoritmos buscando eliminar ruidos y generar la imagen sísmica a comparar.
- **Interpretación de datos:** Esta etapa pertenece al proceso de comparación, donde se interpretan los resultados de la sísmica 4D y se compara con las predicciones de los modelos sintéticos.
- **Realimentación:** En esta etapa se ajustan los parámetros utilizados en los modelos con la información obtenida en la comparación.

2.2. Etapas internas del proceso

2.2.1. Estudios de factibilidad

En esta primera etapa se define el objetivo del monitoreo 4D y se determina si se debe continuar o detener el proceso con base en dos problemas. El primero es identificar si es posible recibir señales sísmicas aceptables dada la profundidad del pozo y la geología del terreno usando el análisis de AVO (amplitud vs offset) utilizando un algoritmo basado en las ecuaciones de Zoeppritz [10]. El segundo es identificar si es posible recibir señales sísmicas claras que reflejen los cambios en el pozo. Para realizar esta etapa se debe recurrir a la información conocida del pozo como su geología y sus datos petrofísicos, modelos de simulación del pozo y datos PVT (comportamiento del fluido en el pozo debido a presión, volumen y temperatura), para generar una sísmica sintética que pueda ser analizada y permita tomar la decisión de continuar o no el proceso de monitoreo 4D.

Esta etapa crea un modelado del depósito utilizando los parámetros de porosidad, permeabilidad, heterogeneidad, entre otros, luego se prepara la parrilla del depósito para el modelado sísmico y se convierten los parámetros del depósito en parámetros elásticos utilizando un modelado petroelástico basado en la teoría de Gassmann (El modelado de sustitución de fluidos basado en la teoría de Gassmann es la aproximación más utilizada para predecir cambios sísmicos en las velocidades de las rocas como resultado de los cambios de fluidos porosos [9]), finalmente se hace el modelado sísmico y se interpretan los resultados como se muestra en la figura 2.2.

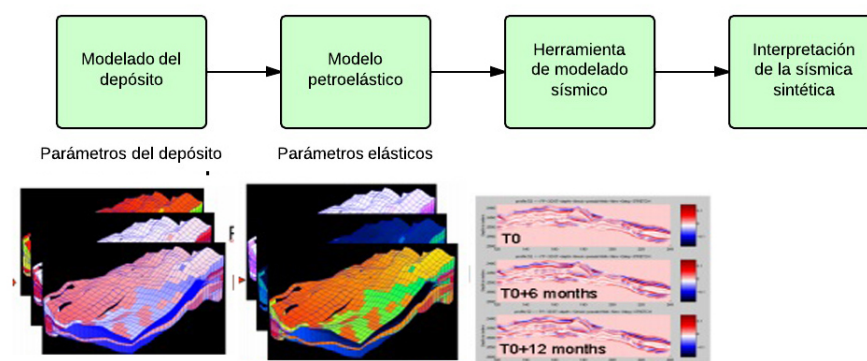


Figura 2.2. Flujo de trabajo del modelado en la etapa de factibilidad.

Adaptado de [2].

Este es un modelado sísmico genera una predicción del comportamiento del depósito debido a la inyección de gas o agua y será contrastado con los datos reales obtenidos por el monitoreo 4D.

Es importante resaltar que para un modelado adecuado se deben tener en cuenta los siguientes principios:

- Tomar en cuenta toda la heterogeneidad geológica de la parrilla estratigráfica.
- Producir imágenes sísmicas con un contenido de frecuencias realistas.
- Generar datos sísmicos en tiempo y profundidad para evaluar cambios en el tiempo y diferencias de amplitud en el contexto del 4D.
- Generar datos sísmicos predeterminados en ángulos con efecto de tramos para entender mejor los efectos 4D en AVO.
- Debe ser rápido y eficiente para probar diferentes hipótesis.

2.2.2. Diseño de adquisición de datos

Con los resultados de la factibilidad y la información de la geología del depósito se prepara el espaciamiento y la configuración de la grilla de geófonos o hidrófonos para una correcta adquisición de datos que se correlacionen a los utilizados en los modelados sintéticos creados previamente en la etapa de factibilidad, con una especial atención a los efectos AVO ya que estos repercuten en la calidad de la señal captada en los receptores.

2.2.3. Adquisición de datos por geófonos

Los geófonos son transductores de desplazamiento, velocidad o aceleración que convierten el movimiento del suelo en una señal eléctrica. Este movimiento del suelo es provocado por una fuente energética como explosiones o camiones vibradores.

Los geófonos son ubicados de forma estratégica sobre el campo que se desea observar para formar una matriz, y la fuente emite una señal de onda que se desplaza por la tierra y se refracta de diferente forma en las distintas capas de tierra con las que hace contacto (Figura 2.3). Los distintos frentes de ondas son capturados por los geófonos y representados en distintas señales eléctricas que luego son interpretadas por computadora.

2.2.4. Adquisición y almacenamiento de imágenes digitales

Para la adquisición de imágenes se requiere de un equipo transductor, que transforme la información ya sea visual o de emisión en una señal eléctrica. La señal es convertida en un arreglo de datos binarios para ser almacenadas y procesadas por una computadora. Las

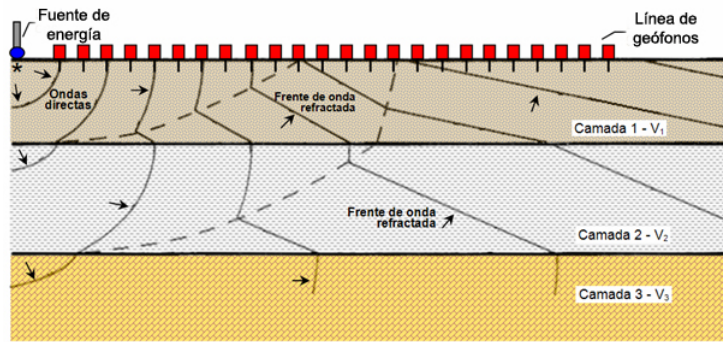


Figura 2.3. Representación de la ubicación de unos geófonos sobre un depósito. *fuentes* [1]

imágenes digitales son bidimensionales y corresponden a una matriz $N \times M$ que representan los ejes X y Y , donde cada punto representa un pixel, y cada pixel corresponde a un valor binario de intensidad representativo de la información que se ha adquirido (Figura 2.4). Este valor binario requiere de un determinado número de bits para ser representado la información y los más usuales son 8 bits, 16 bits o 32 bits, que corresponden a 1 byte, 2 bytes o 4 bytes respectivamente.

En las imágenes tridimensionales, son representados los ejes X, Y, Z y corresponden a un arreglo $M \times N \times P$, que se llama voxel (Figura 2.5). Este arreglo es equivalente a decir que se tienen P imágenes bidimensionales. [12].

Valores que representan las señales eléctricas

Coordenadas y

| | | | | |
|---|----|----|----|----|
| 1 | 15 | 25 | 32 | 69 |
| 2 | 12 | 32 | 40 | 55 |
| 3 | 12 | 85 | 95 | 31 |
| 4 | 23 | 52 | 86 | 26 |
| 5 | 33 | 68 | 58 | 75 |
| 6 | 14 | 32 | 58 | 42 |

Coordenadas x

Figura 2.4. Representación de una matriz de dos dimensiones con valores que representan la energía capturada por los transductores.

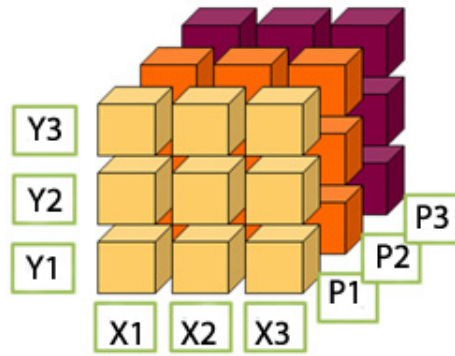


Figura 2.5. Representación de una matriz 3D. Fuente [16]

2.2.5. Procesamiento de datos sísmicos

El procesamiento de datos sísmicos consiste en seleccionar y aplicar parámetros y algoritmos de tratamiento para los datos brutos y obtener secciones sísmicas de buen calidad, aislando las reflexiones de otro tipo de eventos como ruido que afectan los resultados esperados.

Distintas empresas han desarrollado softwares especializados para aplicar diferentes algoritmos y parámetros a los datos brutos para generar las imágenes. Es importante resaltar que los datos procesados durante el monitoreo están correlacionados con los datos que se tenían del depósito para poder ser analizados.

2.2.6. Secuencia de procesamiento de datos sísmicos

A continuación se explicará la secuencia básica para el procesamiento de datos sísmicos, teniendo en cuenta los pasos más relevantes.

Para el procesamiento de datos sísmicos se establecen tres etapas. Dentro de cada una de estas etapas se aplican tratamientos fijos, mientras que algunos algoritmos, como filtrado o escalamiento en amplitud, pueden ser aplicados en cualquier momento del procesado [13].

2.2.7. Pre-apilamiento

Consta de tres procesos:

- Almacenamiento: En esta etapa se establece el tipo de formato que tendrán los datos almacenados, buscando compatibilidad con el software normalmente utilizado.

- Geometría de la adquisición: Definir correctamente las coordenadas de los arreglos fuente-receptor y efectos AVO (Distancia entre una fuente y un receptor), es esencial cuando se busca que cada una de las trazas obtenidas quede completamente caracterizada, algunos de estos datos se introduce manualmente y otros se establecen en los cabeceros de las trazas.
- Edición de registros: En esta etapa se aplican procesos de eliminación de trazas con ruido o malas conexiones, inversión de polaridad de trazas debido al terreno o al cambio de conexiones de los equipos, diferentes tipos de filtrado y análisis espectrales.

2.2.8. Apilamiento

Presenta cuatro procesos:

- Orden CMP: Por medio de este ordenamiento se agrupan todas las trazas que pertenecen a un mismo punto medio entre una fuente y un receptor.
- Correcciones dinámicas NMO (*Normal Move Out*): Las correcciones por NMO se aplican para transformar la trayectoria hiperbólica que representa una reflexión producto del *offset* entre fuente y receptor, en una línea horizontal donde las trazas a ser sumadas estarán en fase.
- Análisis de velocidad: El análisis de velocidad entrega un campo de velocidades con información acertada sobre la velocidad del subsuelo, que se usará para obtener una sección sísmica.
- Apilamiento: Con todas las correcciones aplicadas, se procede a sumar las trazas y obtener una sección sísmica formada por todas las trazas CMP.

2.2.9. Post-apilamiento

Este procesamiento busca recuperar las altas frecuencias que se pierden en el apilamiento, se busca eliminar ruido en altas y bajas frecuencias y se introduce cierta ganancia en amplitud para lograr una mejor visualización, [4].

Finalmente se obtiene una imagen sísmica compuesta por señales que representan las reflexiones del frente de onda y con características no estacionarias cuyas componentes varían en el tiempo [4].

2.2.10. Interpretación y realimentación

La principal razón para realizar monitoreo 4D es para generar información adicional para corregir o actualizar los modelos existentes del depósito. Se espera recibir datos sobre la conectividad del depósito, el flujo en las fronteras o hidrocarburos pasados por alto.

La clave en el cierre del lazo en el monitoreo 4D es que los modelos estático y dinámico comparten la misma información. Por esta razón se cierra el lazo para comparar las diferencias sísmicas observadas en los distintos escenarios posibles generados en los modelos y con esta información se actualizan los modelos para generar nuevos posibles escenarios del comportamiento futuro del depósito.

En la figura 2.1 se observan todas las componentes del proceso de monitoreo sísmico 4D, es importante advertir que existen varios software de distintas empresas que aplican diferentes algoritmos para desarrollar los objetivos de cada etapa interna.

Capítulo 3

Paralelo y comparaciones entre los procedimientos de Resonancia Magnética Funcional y Monitoreo Sísmico 4D

Inicialmente se presentarán analogías en los componentes de cada proceso.

- Paciente en RMf y pozo en MS4D: Son los objetivos que se desean observar y donde se obtiene la información necesaria para crear la imagen. Su principal diferencia es la interacción con los dispositivos de adquisición de datos, debido a que el paciente se dirige al lugar donde está ubicado el resonador magnético mientras que los geófonos, emisores y todo el equipo de procesado es ubicado en el lugar donde se encuentra el pozo.
- Bobina transmisora/receptora en RMf y geófonos y emisores de onda en MS4D: Son los encargados de la obtención de datos necesarios para generar la imagen mediante la transmisión y recepción de una señal sobre el objetivo. Su principal diferencia es que la bobina transmite y recibe la señal mientras que en el MS4D los geófonos sólo reciben la señal y necesita unas explosiones o un carro de vibración para generar la señal.
- Bobinas de gradiente en RMf y matriz de geófonos en MS4D: Son los encargados de ubicar espacialmente los datos obtenidos del objetivo. Su principal diferencia es que mientras las bobinas de gradiente son dispositivos construidos dentro del resonador magnético y necesitan una guía de pulsos eléctricos para funcionar, la matriz de geófonos es construida con los mismo geófonos utilizado para la recepción de la señal y sólo necesitan el estudio previo para su correcta ubicación sobre el terreno.
- Procesadores de datos: Existen en ambos procesos y tiene un mismo objetivo, procesar los datos para generar la imagen 4D. Sus principales diferencias radican en sus algoritmos propios de procesamiento que están establecidos de acuerdo al entorno físico en que se encuentran.

Al observar la dimensión temporal en la que se ejecutan ambos procesos, se nota una diferencia importante, la RMf tiene un rango temporal de segundos donde se observan los cambios del cerebro de forma continua, mientras que el MS4D se ejecuta durante años donde en general se produce una imagen cada 5 años. Esto ocurre porque los cambios

significativos en el pozo son perceptibles después de un periodo prolongado de inyección de agua o gas.

Otro aspecto importante a resaltar es una ventaja que tiene la RMf sobre el MS4D por el hecho de que el paciente se dirija al resonador magnético para la adquisición de datos en un cuarto aislado por la jaula de Faraday que lo protege de ruidos y señales externas que puedan introducir información falsa en los datos, y facilitando el procesado de éstos, generando imágenes de mejor calidad. Por el contrario en el MS4D la geología del terreno introduce distorsiones en los datos adquiridos y por esto es necesaria una etapa de filtrado más rigurosa que perjudica la calidad de la imagen.

3.1. Paralelo en los procedimientos

En la siguiente imagen 3.1 se crean analogías en los procedimientos de Resonancia Magnética funcional y el monitoreo sísmico 4D para destacar similitudes y diferencias.

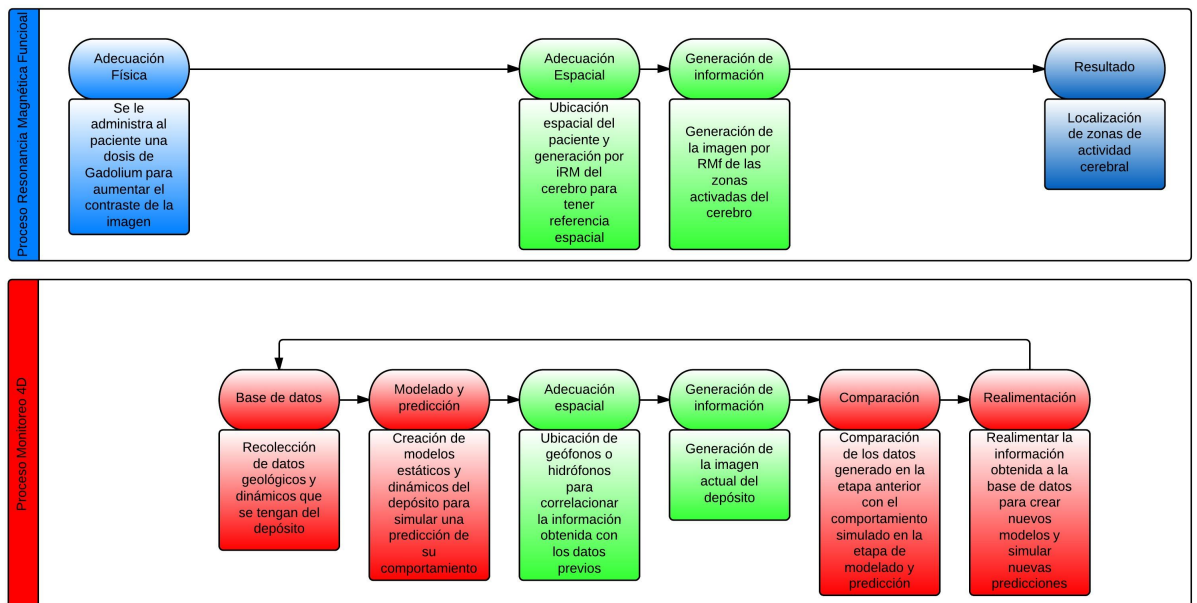


Figura 3.1. Gráfica comparativa de etapas en los procesos de Resonancia Magnética funcional y monitoreo sísmico 4D.

Aunque los procedimientos presentan distintas etapas y formas de ejecución de las etapas, podemos ver en que algunas son similares entre ellas.

3.2. Comparación de procedimientos

Las etapas resaltadas como similares en la figura 3.1 se ejecutan de forma diferente en cada procedimiento debido a las condiciones propias del entorno y los teoremas físicos a los que está sometida cada variable y por esto no es posible identificar en ellas adaptaciones que mejoren el resultado de algún procedimiento. Sin embargo al observar las etapas en las que difieren los procedimientos es posible que puedan adaptarse entre sí y generen un mejor resultado de la siguiente forma:

- La etapa de adaptación física presente en el proceso de resonancia magnética funcional consiste en inyectar al paciente con *Gandolinium* para aumentar el contraste en los tejidos y así mejorar la calidad de la imagen. Esta etapa podría ser adaptada al monitoreo 4D al sustituir el agua o gas que se inyecta para desplazar los hidrocarburos, por un fluido con propiedades de refracción que favorezcan la recepción de la señal en los geófonos y de esta manera obtener imágenes más definidas.
- La metodología de lazo cerrado utilizado en el monitoreo 4D puede ser de utilidad en el diagnóstico al aplicarlo a la resonancia magnética funcional. Se utilizaría la etapa de base de datos como una etapa de parametrización de diferentes pacientes, para crear un registro del comportamiento del cerebro en distintas actividades que emulan la parte de modelado y predicción. Finalmente se obtienen los datos del paciente que se desea diagnosticar y mediante una etapa adicional de procesado se compara con los registros que se tienen del comportamiento del cerebro identificando y señalando automáticamente anomalías en las funciones neurológicas del paciente. De esta forma el médico podría diagnosticar con mayor facilidad a su paciente y aumentar la base de datos con la información obtenida.

Capítulo 4

Conclusiones

- Aunque fue posible identificar etapas y procesos similares entre las técnicas de resonancia magnética funcional y monitoreo sísmico 4D, las alternativas para una posible mejora en los procesos provienen de las etapas en las que diferían los procedimientos.
- La geología del depósito provoca una dificultad importante en el monitoreo sísmico 4D lo que implica una etapa de filtrado más robusta que compromete la calidad final de la imagen. Este problema no se presenta en la resonancia magnética funcional y por el contrario, logra un entorno con poco ruido o señales que afecten la calidad final de la imagen .
- La parametrización del pozo es una etapa clave en el desarrollo del monitoreo sísmico 4D. Por sería plausible añadir esta etapa a la metodología de la resonancia magnética funcional y así identificar patrones generales en el comportamiento del cerebro estableciendo una base de datos con la que se comparará cada paciente.

Capítulo 5

Recomendaciones y trabajo futuro

- Se podría obtener una mejora en la calidad de la imagen del monitoreo sísmico 4D sustituyendo el fluido que se inyecta para desplazar el hidrocarburo por uno con propiedades de refracción que favorezcan la recepción de la señal por parte de los geófonos.
- Se podría aplicar una metodología de lazo cerrado en la Resonancia Magnética funcional y añadiendo etapas de base de datos, registro y comparación de información se obtendría una herramienta fuerte de diagnóstico que beneficie a médicos y pacientes. Esta metodología de lazo cerrado se ha aplicado en otras tecnologías médicas en el diagnóstico de enfermedades como lo es el ES Teck Complex (figura 5.1) de la compañía LD technology. Su funcionamiento es diferente ya que el ES Teck Complex mide las impedancias corporales trazando lazos de corrientes entre diferentes electrodos ubicados en pies, manos y cabeza del paciente. Sin embargo, su metodología interna muestra las características de un lazo cerrado de comparación, como lo es la base de datos creada a partir de años de estudios de las impedancias corporales en miles de pacientes y el diseño de un software amigable con el usuario, que permite a los médicos no sólo identificar anomalías en los órganos de sus pacientes sino observar un estimado de la ubicación y la gravedad de la anomalía mediante un modelo 3D del organismo y un tabla de colores respectivamente¹. Los resultados positivos en el uso de este sistema apoyan la viabilidad de aplicar la metodología en resonancia magnética funcional con el fin de crear una herramienta importante en el diagnóstico y estudio de problemas neuronales en la medicina moderna.

¹ Doctor Jesús David Maure, Universidad del Rosario, Medicina Biológica, Calle 49 No28-10, Edificio Galileo consultorio 201, Bucaramanga



Figura 5.1. Imagen del ES Teck Complex. *Fuente [6]*

Capítulo 6

Apéndice

6.1. Metodología utilizada en el desarrollo del proyecto.

El objetivo principal de esta investigación ha sido realizar una comparación entre las técnicas de Resonancia Magnética Funcional y el Monitoreo Sísmico 4D, para identificar y documentar similitudes y diferencias en sus respectivos procedimientos y posibilidades de adaptación de estrategias de una aplicación a la otra. Ésto implicaba lograr los siguientes objetivos específicos:

- Identificar y documentar los procesos principales que utiliza cada una de las técnicas en sus distintas etapas de procesamiento para obtener las imágenes 4D.
- Identificar factores de comparación determinantes en cada técnica que impacten en la generación de la imagen.
- Comparar técnicas e identificar alternativas de procedimiento que mejoren la generación de la imagen.

Con los objetivos definidos se elaboró un plan de trabajo que permitiera lograrlos, y se siguieron diagramas de flujo para el desarrollo de cada etapa del plan como se muestra en la figura 6.1.

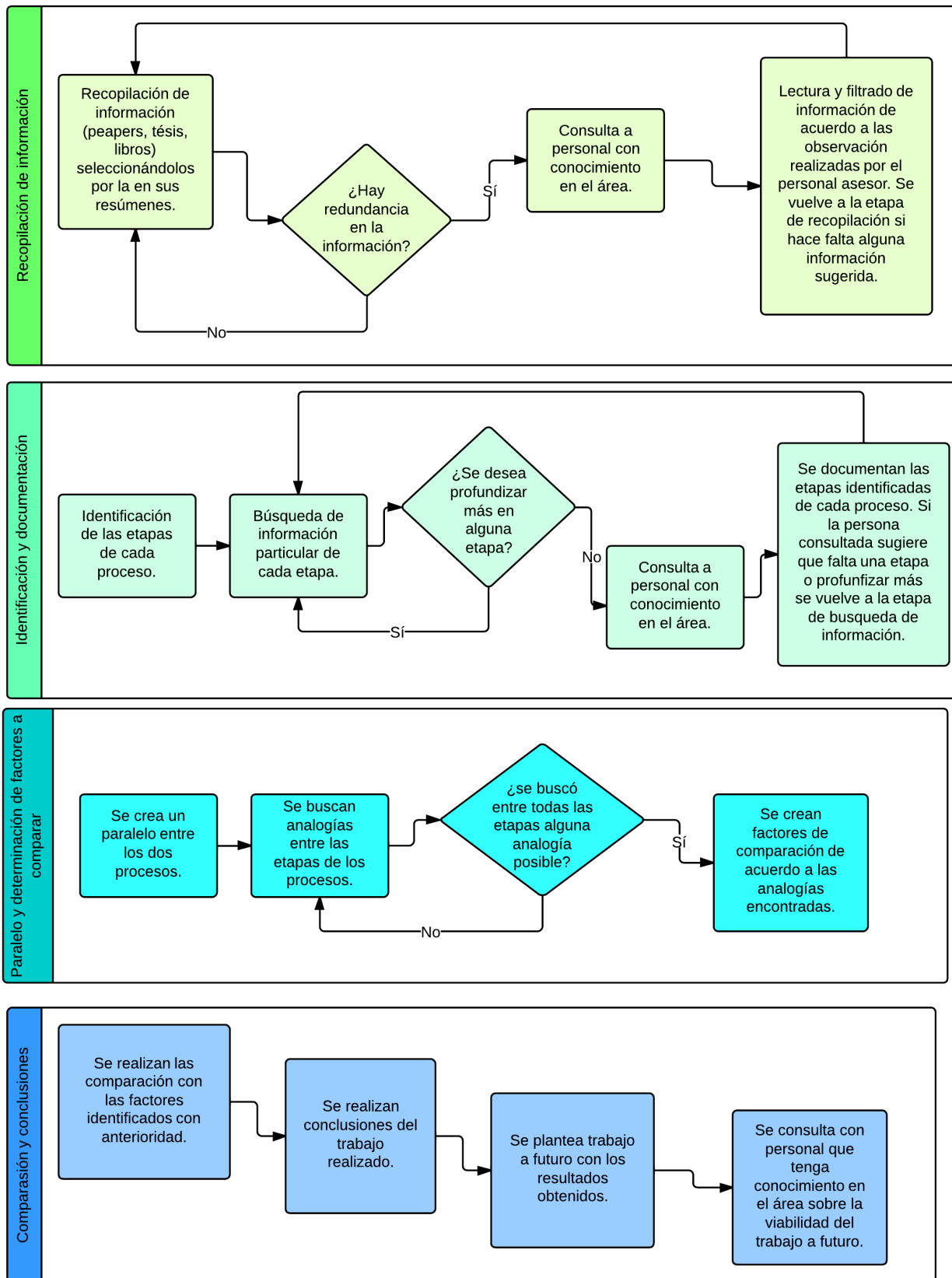


Figura 6.1. Diagramas de flujo utilizados en el desarrollo del plan de trabajo.

Bibliografía

- [1] 2.BP.BLOGSPOT.COM, 2013. Visitado en Octubre de 2013.
- [2] BRECHET, E., TOINET, S., RUELLAND, P., AND ELOUIAR, Y. 3D pre stack seismic modeling of reservoir grids for 4D feasibility and calibration. In *EAGE 65th conference and exhibition* (2003).
- [3] CAICEDO, O., AND ALADAN, C. Resonancia magnética funcional: Evolución y avances clínicos. *Tecnura* 25 (2009), 92–106.
- [4] FLOREZ., M. A. G. Procesado de sísmica de reflexión superficial en la cuenca de Ainsa, Huesca (España). Master's thesis, Universidad Simon Bolivar, 2005.
- [5] [HTTP://FUNDACIONANNAVAZQUEZ.WORDPRESS.COM](http://FUNDACIONANNAVAZQUEZ.WORDPRESS.COM), Visitado en Enero 2014.
- [6] [HTTP://VITAMETRIC.COM](http://VITAMETRIC.COM). Visitado Febrero de 2014.
- [7] [HTTP://WWW.FDA.GOV](http://WWW.FDA.GOV), Visitado en Enero 2014.
- [8] KAWAR, R., HATCHELL, P., CLAVERT, R., AND KHAN, M. The workflow for 4D seismic. In *Shell International Exploration and Production* (2003).
- [9] KUMMAR, A., AND MOHAN, S. Feasibility Assessment of a Time-Lapse Seismic Survey for Thermal EOR in Balol Field, India, Based on Rock Physics and Seismic Forward Modeling. In *5th Conference and Exposition on Petroleum Geophysics* (2004).
- [10] MA, J. Time-lapse differential AVO: Reflection coefficient at fluid-fluid boundary. In *2011 CSPG CSEG CWLS Convention* (2011).
- [11] MCROBBIE, D. W., MOORE, E. A., GRAVES, M. J., AND PRINCE, M. R. *MRI from picture to proton*. Cambridge University Press, 2006.
- [12] MEDINA, R., AND BELLERA, J. Bases del procesamiento de imágenes médicas. Tech. rep., Grupo Ingeniería Biomédica de la ULA.
- [13] OZDOGAN, Y. *Seismic data analysis, processing, inversion and interpretation of seismic data*. Society of Exploration Geophysicists, 2008.
- [14] WWW.CUANTIFICACIONQUIRONVALENCIA.ES, 2013. Visitado en Octubre de 2013.
- [15] WWW.DRCORMILLOT.COM, 2013. Visitado en Octubre de 2013.
- [16] WWW.GBIO.ES, Visitado en Octubre 2013.