

# Síntesis técnica completa: Física de RMN y exploración de yacimientos

*Principios de relajación del hidrógeno, heterogeneidades de matrices rocosas y metodología orbital pasiva.*

## PARTE I: FUNDAMENTOS FÍSICOS Y PROPIEDADES DE LAS ROCAS

### 1. Los tiempos de relajación fundamentales del hidrógeno

En física e imagenología, los tiempos de relajación del hidrógeno se refieren al tiempo que tardan los protones (los núcleos de los átomos de hidrógeno) en regresar a su estado de equilibrio termodinámico después de ser perturbados por un pulso electromagnético. Este fenómeno es fundamental para la RMN (Resonancia Magnética Nuclear) y la RMN. Dos constantes de tiempo principales caracterizan el retorno de la magnetización:

- Tiempo de relajación T1 (relajación longitudinal):
  - Definición: Es el tiempo característico (expresado en segundos) necesario para que la magnetización del hidrógeno regrese al 63% de su valor de equilibrio inicial después de la excitación. Corresponde a la repulsión de la magnetización a lo largo del eje del campo magnético principal.
  - Mecanismo: Los protones de hidrógeno liberan la energía que han absorbido transfiriéndola a su entorno molecular inmediato (la red cristalina).
  - En resonancia magnética: La señal T1 se utiliza para crear contraste anatómico. Depende del tejido: los tejidos ricos en agua (como el líquido cefalorraquídeo) tienen una señal T1 larga, mientras que los tejidos grasos tienen una señal T1 corta.
- Tiempo de relajación T2 (relajación transversal):
  - Definición: Es el tiempo característico (expresado en milisegundos) tras el cual la magnetización transversal (perpendicular al campo magnético) ha disminuido al 37% de su valor máximo. Representa la pérdida de coherencia o el desfase de los protones entre sí.
  - Mecanismo: Este fenómeno se debe a las interacciones de los protones entre sí (interacciones espín-espín).
  - En resonancia magnética: El T2 siempre es mucho más corto que el T1. Permite obtener imágenes donde los fluidos aparecen muy brillantes (como el edema o el líquido cefalorraquídeo).

### 2. La distinción crucial: T2 versus T2\* (relajación efectiva)

En la práctica, la magnetización transversal disminuye mucho más rápidamente que el efecto de las interacciones espín-espín por sí solas (T2). Este fenómeno global se mide mediante la constante de tiempo T2\*.

$$1 / T2^* = 1 / T2 + 1 / T2 , \text{ no homogéneo}$$

- Mecanismo: La pérdida de coherencia de protones se acelera por inhomogeneidades en el campo magnético principal (B0). Estas inhomogeneidades pueden ser intrínsecas al imán o inducidas por diferencias en la susceptibilidad magnética en las interfaces del medio (por ejemplo, entre la matriz de roca sólida y los fluidos que contiene).
- Reversibilidad: A diferencia del verdadero T2, que depende de colisiones moleculares

# Síntesis técnica completa: Física de RMN y exploración de yacimientos

aleatorias e irreversibles, el desplazamiento de fase relacionado con las inhomogeneidades ( $T_2$ , inhomogeneous) es fijo y estático. Puede compensarse y "cancelarse" aplicando pulsos de recentrado (como en una secuencia de eco de espín).

### 3. Dinámica del umbral de corte: Carbonatos frente a arenisca

El umbral de corte ( $T_2$ ) es la constante de tiempo límite que permite la separación hidrodinámica del agua ligada (ubicada en la microporosidad, no productiva) del agua libre (ubicada en la macroporosidad, móvil y utilizable). La principal diferencia observada entre areniscas (~33 ms) y carbonatos (~92 ms) proviene directamente de la ecuación fundamental de relajación superficial:

$$1 / T_2 \approx \rho_2 \cdot (S / V)$$

• La menor relajación superficial ( $\rho_2$ ) de los carbonatos: Las areniscas contienen naturalmente minerales arcillosos, así como trazas de óxidos de hierro o metales pesados con propiedades paramagnéticas que aceleran considerablemente la relajación de los protones al contacto. Por el contrario, los carbonatos puros (calcita, dolomita) presentan una menor cantidad de centros paramagnéticos. Su relajación  $\rho_2$  es de 2 a 3 veces menor que la de las areniscas, lo que ralentiza mecánicamente la relajación transversal y desplaza el tiempo de corte a tiempos más largos (~92 ms).

### 4. Impacto mineralógico de la crisis: Presencia de pirita (FeS<sub>2</sub>)

La pirita es un sulfuro de hierro metálico conductor y altamente paramagnético. Al aplicar el campo  $B_0$  de la herramienta, la marcada diferencia en la susceptibilidad magnética entre estos granos metálicos y los fluidos genera importantes gradientes de campo locales (Ginterne). Estos microgradientes aceleran drásticamente la despolarización por difusión molecular, acortando artificialmente el tiempo  $T_2$  medido.

$$1/T_2, \text{ medido} = 1/T_2, \text{ superficie} + 1/T_2, \text{ volumen} + (\gamma^2 \cdot G_{in}^2 \cdot TE^2 \cdot D) / 12$$

Consecuencias directas para la interpretación:

- Subestimación del tamaño de poro: Los picos del espectro  $T_2$  migran hacia la izquierda (tiempos cortos), clasificando erróneamente los poros móviles grandes como microporos.
- Sobreestimación del agua ligada (BVI): El volumen de agua irreducible se sobreestima a expensas de los hidrocarburos móviles.
- Atenuación de la señal: Si el cambio de fase es más rápido que el tiempo de eco mínimo (TE) de la sonda, la señal de RMN puede quedar completamente enmascarada.

## PARTE II: CUANTIFICACIÓN DE LA PERMEABILIDAD Y ESTRATEGIA ORBITAL PASIVA

### 1. Modelado de la permeabilidad intrínseca mediante RMN

La RMN calcula la permeabilidad continua a partir de la distribución completa del tamaño de poro utilizando dos modelos de referencia:

- Modelo de Coates (modelo de fluido libre): adaptado a areniscas y poros simples, basado en la relación de fluidos móviles/ligados:  $K_{Coates} = (\phi / C)^4 \cdot (FFI / BVI)^2$
- El modelo SDR (Schlumberger Doll Research): basado en la media geométrica del espectro:  $K_{SDR} = a \cdot \phi^4 \cdot (T_2, \log)^2$

Limitaciones en estructuras complejas: en carbonatos heterogéneos (poros gigantes aislados o 'vugs'), el fluido exhibe un T2 muy largo. El modelo SDR entonces calcula una permeabilidad inmensa, que es completamente errónea. Por lo tanto, la interpretación moderna utiliza puntos de corte de T2 variables y mapas de RMN 2D (D-T2 o T1-T2) para aislar la conectividad real.

### 2. Teledetección orbital global (sondeo pasivo RSS-NMR)

En la observación pasiva a gran escala, la combinación de búsqueda de profundidad y relajación de hidrógeno permite marcar depósitos a distancia (hasta 7 km). La calibración de profundidad se logra variando la frecuencia de Larmor ( $\omega_0 = \gamma \cdot B_0$ ). Una vez que se interrumpe el pulso, la firma espectral de la señal de radiofrecuencia reflejada sirve como descriptor físico directo.

- Metodología Operativa del "Paso Cero":

1. Escaneo Orbital Global: Cartografía satelital pasiva de una gran área sin presencia física en tierra.
2. Filtrado de Anomalías: Eliminación inmediata de zonas T2 cortas (matrices densas o arcillosas sin interés).
3. Marcado de Fluidos: Aislamiento de firmas T2 largas (fluidos móviles) y caracterización (petróleo mediante  $T1/T2 \approx 1-2$ ; gas mediante T1 largo/T2 corto por difusión).
4. Enfoque Quirúrgico (Puntos Dulces): Delimitación precisa de las áreas objetivo. De esta manera, las campañas sísmicas o de perforación intensivas se concentran exclusivamente donde se confirma la presencia y movilidad de hidrocarburos.

Este enfoque elimina la necesidad de una adquisición sísmica sistemática a ciegas, reduce drásticamente los costos, no tiene impacto ambiental (modo discreto/invisible) y permite la reevaluación rápida de campos maduros sin interrupción de la producción.