

¿Qué es la difusión en RM?

Bases físicas que todo
residente debe conocer

Manex Lasa Gurrutxaga, Virginia Díaz Fontaneda, Iñigo Deba Ayarza, Patricia Rodríguez Ripalda, Leire Ormaetxe Albeniz, Jose María Asensi Miranda, Uxue Martínez Urabayen, Juan Jose Gómez Muga

Hospital Universitario Basurto, Bilbao

OBJETIVO DOCENTE:

- Revisar las bases físicas de las secuencias potenciadas en difusión en resonancia magnética y aclarar algunos conceptos fundamentales para la mejor comprensión de esta técnica.

REVISIÓN DEL TEMA:

1. INTRODUCCIÓN:

La resonancia magnética (RM) es una técnica muy efectiva para obtener información cualitativa y cuantitativa sobre los tejidos del cuerpo humano. Las imágenes potenciadas en difusión (DWI: Diffusion-Weighted Imaging) analizan el movimiento de las moléculas de agua en estos tejidos.

Pero, ¿qué es la difusión? Se define como el movimiento aleatorio de las moléculas en un fluido cuando son inducidas térmicamente (es decir, a una temperatura mayor que 0 °K). En un medio sin limitaciones, las moléculas de agua están en constante movimiento caótico, con permanentes cambios de velocidad y dirección colisionando unas con otras. Esto se denomina **movimiento browniano** o **difusión libre**.

Sin embargo, en el cuerpo humano existen diferentes barreras, como las membranas celulares o las macromoléculas, que limitan o **restringen** el movimiento libre de las moléculas de agua.

Por lo tanto, la restricción del movimiento del agua está estrechamente vinculada con la densidad celular del tejido y la integridad de sus membranas. En tejidos con alta densidad celular y membranas intactas, el movimiento del agua se ve más limitado (**difusión restringida**). En contraposición, un entorno con baja densidad celular proporciona un espacio extracelular amplio que facilita la difusión del agua, y las membranas celulares defectuosas permiten su paso del espacio extracelular al intracelular (**difusión facilitada**).

REVISIÓN DEL TEMA:

2. SECUENCIA DE DIFUSIÓN:

En 1965, Stejskal y Tanner presentaron una secuencia que detectaba el movimiento de las moléculas de agua:

- Se basaron en una secuencia **T2 Spin-Eco**: pulso de radiofrecuencia de 90° seguido por otro pulso de radiofrecuencia de 180° .
- Añadieron un par simétrico de **gradientes** magnéticos con polaridad opuesta (uno de ellos previo al pulso de 180° y otro posterior).

3. FORMACIÓN DE LA IMAGEN:

- Con el pulso de RF de 90° , todas las moléculas en un vóxel adquieren la misma fase.
- El primer gradiente produce un rápido desfase en los spines de los protones.
- Después de este pulso, las moléculas móviles cambian de posición, mientras que las estáticas permanecen en su lugar.
- Con el pulso de 180° y aplicando el segundo gradiente (misma área que el primero), las moléculas estáticas, al no haber cambiado su posición, recuperan la fase: los cambios de fase obtenidos tras el primer gradiente son cancelados por los cambios de fase logrados tras el segundo, evitando pérdida de intensidad de señal neta y preservando la señal T2.
- Sin embargo, las moléculas que han cambiado su posición no pueden recuperar la fase con el segundo gradiente, lo que resulta en una disminución de la señal en la imagen final.

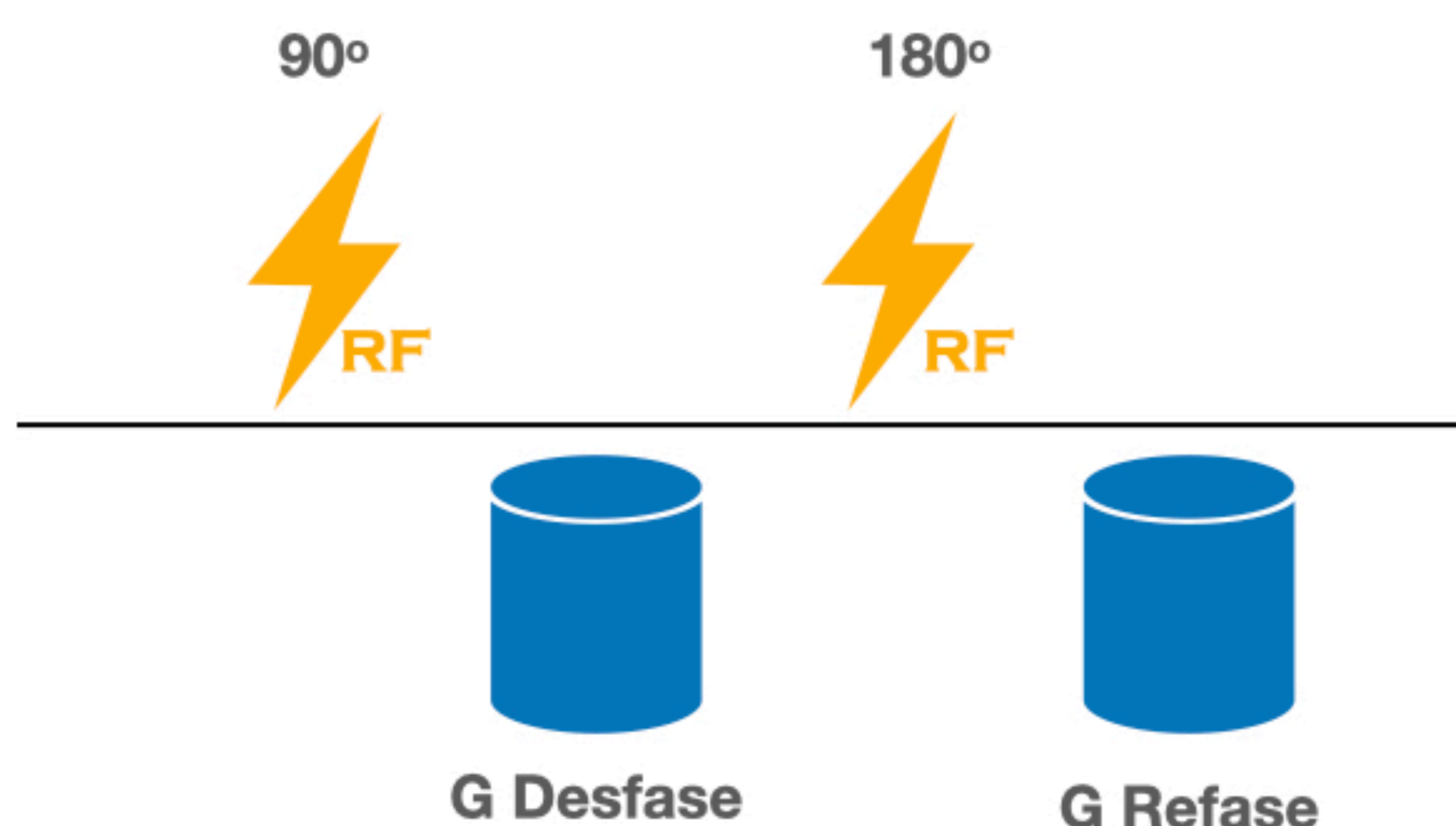


Fig. 1. Secuencia de difusión

REVISIÓN DEL TEMA:

3. FORMACIÓN DE LA IMAGEN:

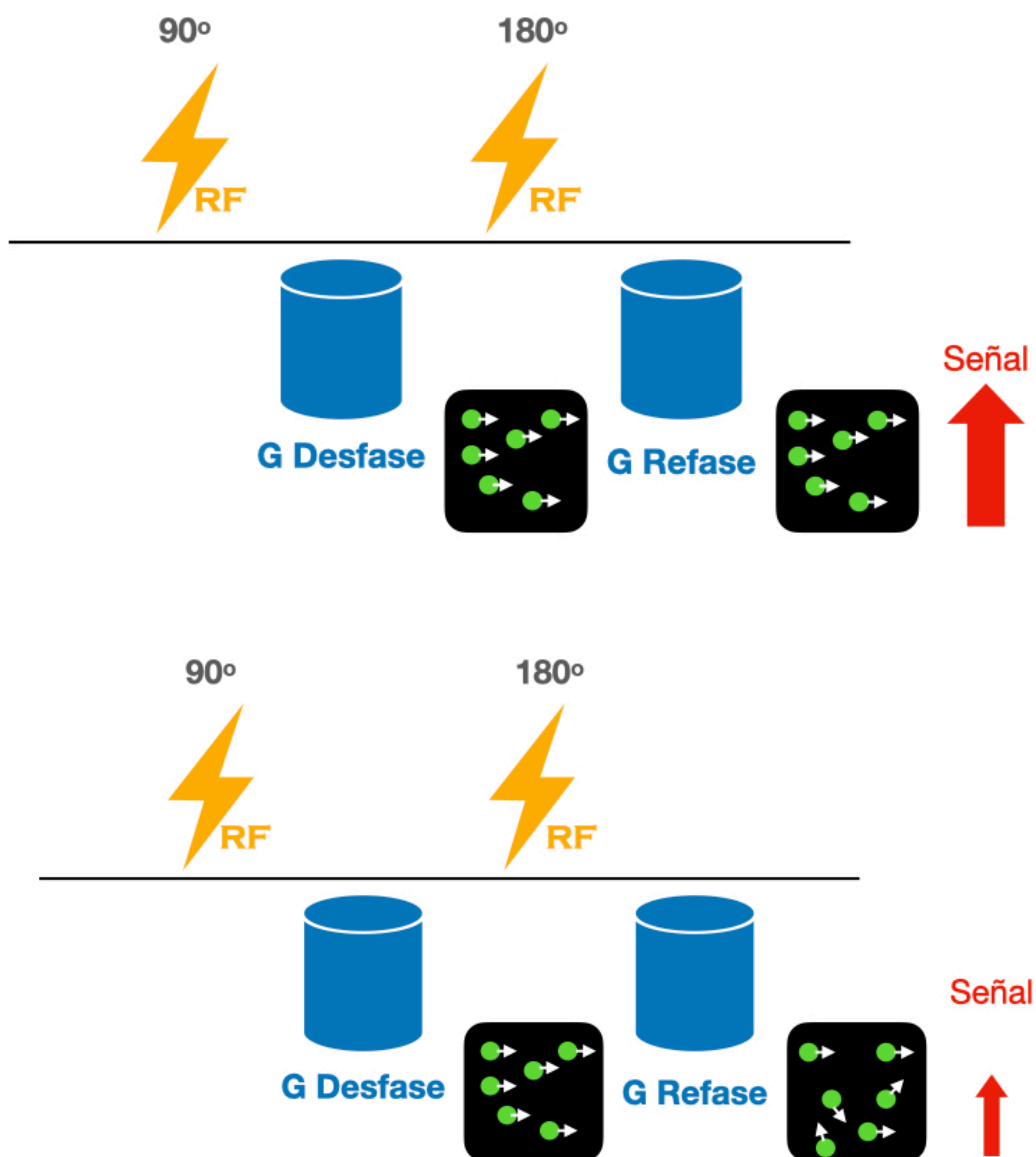


Fig. 2. Las moléculas estáticas preservan la señal T2, mientras que las que cambian de posición la pierden.

REVISIÓN DEL TEMA:

4. VALORACIÓN DE LA IMAGEN:

a) VALORACIÓN CUALITATIVA Y VALOR b

- La sensibilidad de las imágenes varía según el **valor b** que se utilice:

$$b = \gamma^2 G^2 \delta^2 \left(\Delta - \frac{\delta}{3} \right)$$

- Es un factor que el operador puede modificar (generalmente cambiando la amplitud).
 - Depende de la amplitud (G) y duración (δ) de los gradientes y del intervalo de tiempo entre ambos (Δ).
 - Un valor b mayor implica un mayor desfase entre los spines haciendo que movimientos más pequeños pierdan su señal y obteniendo mayor potenciación en difusión.
 - Determina inversamente cuánta contribución T2 tiene la imagen.
- Se seleccionan distintos valores b para ponderar la imagen (normalmente 2 o 3), eligiendo el valor más alto posible. Cada área anatómica tiene un límite para el valor b a partir del cual la señal de la imagen desaparecerá.
- Cada valor $b \rightarrow$ un set de imágenes
 - **b bajo (0 s/mm^2):** buena relación señal/ruido pero poca ponderación de difusión
 - **b alto ($1000\text{-}1500 \text{ s/mm}^2$):** más desfase, mayor sensibilidad a los efectos de difusión (a expensas de ↓ relación señal/ruido, ↑ distorsión de la imagen y ↑ tiempo de eco)

REVISIÓN DEL TEMA:

4. VALORACIÓN DE LA IMAGEN:

a) VALORACIÓN CUALITATIVA Y VALOR b

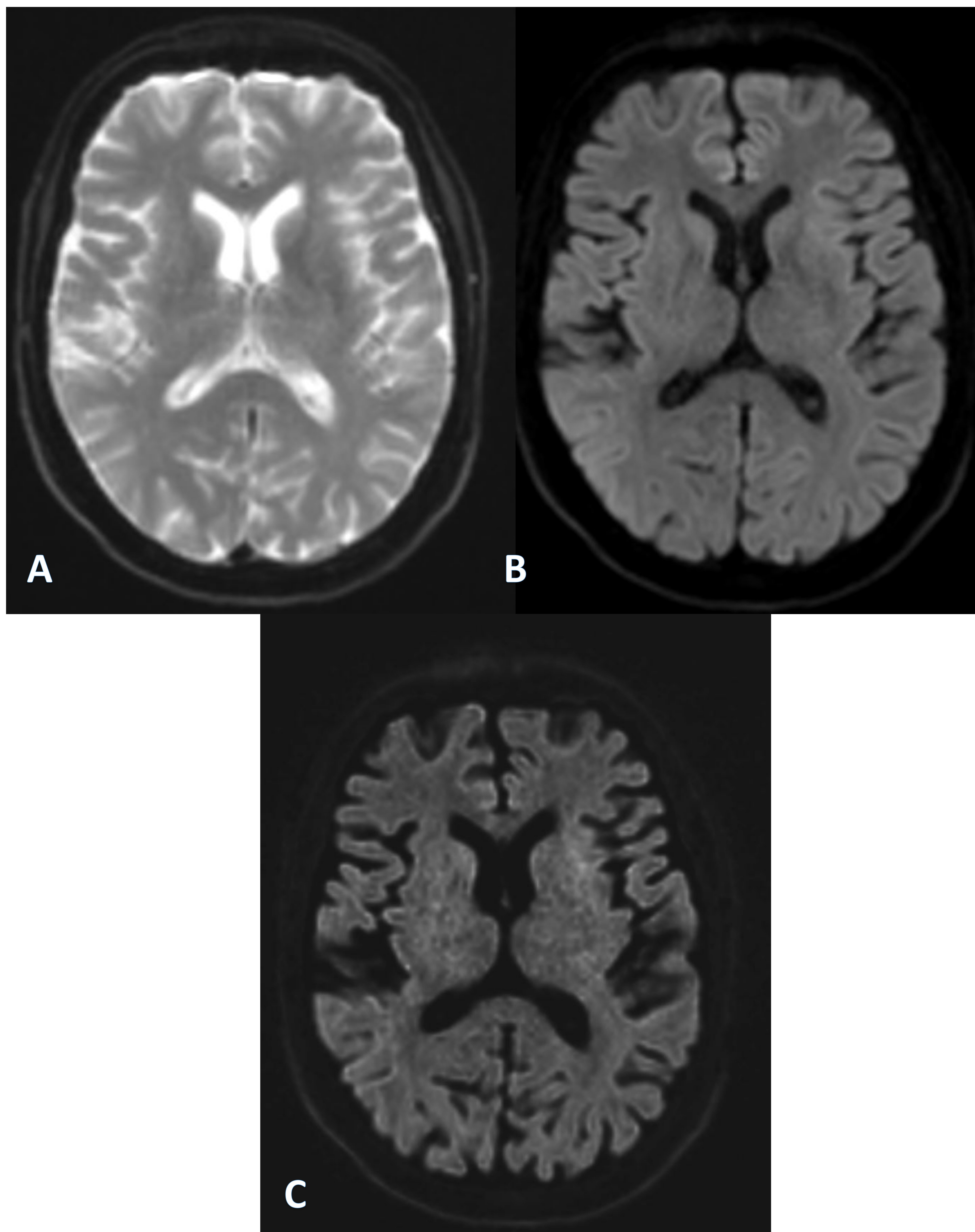


Fig. 3. RM cerebral con valores $b=0$ (A), $b=1000$ (B) y $b=3000$ (C).

REVISIÓN DEL TEMA:

4. VALORACIÓN DE LA IMAGEN:

b) VALORACIÓN CUANTITATIVA: MAPA ADC

El segundo paso en la valoración de la imagen es el análisis cuantitativo del coeficiente de difusión aparente (mapa ADC).

Coefficiente de difusión (CD): desplazamiento neto de una molécula en un tiempo

- El mapa ADC se calcula matemáticamente en cada vóxel utilizando la intensidad de señal y los valores b , y se basa en el logaritmo negativo de la relación entre dos sets de imágenes (requiere al menos dos valores b):
 - Sin gradiente de difusión ($b=0$ s/mm²)
 - Con gradiente de difusión (por ejemplo, $b=50$, 500 o 1000 s/mm²).
- Se representa como una imagen paramétrica en escala de grises que refleja las diferencias de difusión de las moléculas de agua en un área específica.

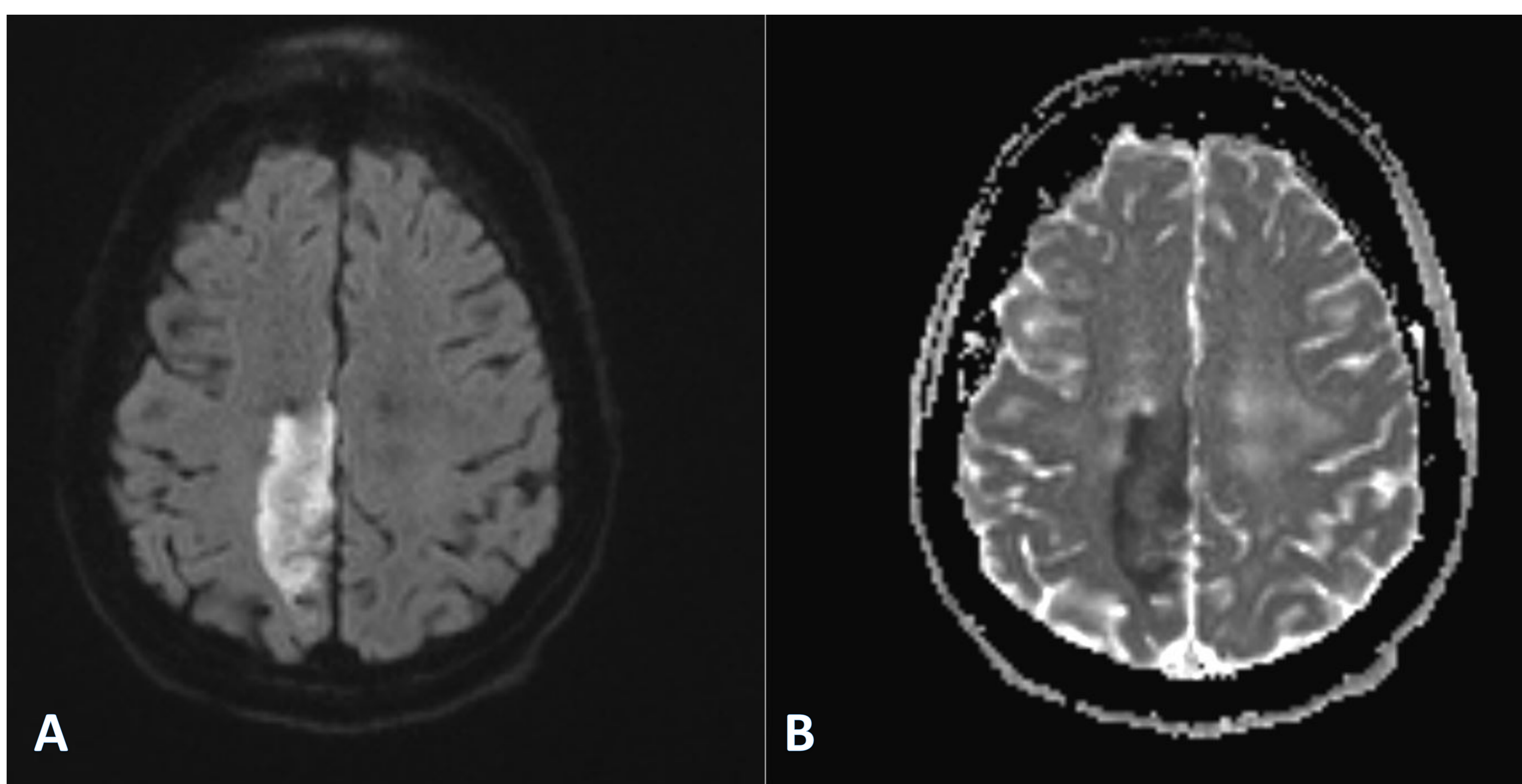


Fig. 4. A: imagen potenciada en difusión ($b=1000$) con área de restricción compatible con infarto agudo en región de la ACA derecha. B: mapa ADC que muestra caída de señal a este nivel.

REVISIÓN DEL TEMA:

5. INTERPRETACIÓN DE LA IMAGEN:

El contraste de la imagen depende del movimiento de las moléculas de agua: libre VS restringido.

- **Tejidos con moléculas de agua en movimiento libre**

- Alta intensidad en imágenes sin ponderación de difusión ($b=0$) debido al efecto T2.
- A medida que aumenta el valor b (mayor ponderación en difusión) → pérdida de intensidad.
 - Esto depende de la composición molecular del tejido (los vasos sanguíneos pierden señal con valores b bajos, mientras que la vejiga lo hace con valores b más altos).
- ADC: tono gris claro, intenso
- Ejemplos: vesícula biliar, vejiga, quistes simples, tejidos necróticos (por la alteración de las membranas celulares)...

- **Tejidos con moléculas de agua de movimiento restringido**

- Mantienen su intensidad incluso con valores b altos (500-1000 s/mm²).
- Estos tejidos se muestran consistentemente brillantes o intensos en imágenes de difusión con valores b altos, indicando restricción o limitación en el movimiento de las moléculas de agua en el tejido.
- ADC: gris oscuro, hipointenso
- Ejemplos: tejidos muy celulares (cerebro, médula...), tumores hiper celulares, abscesos...

REVISIÓN DEL TEMA:

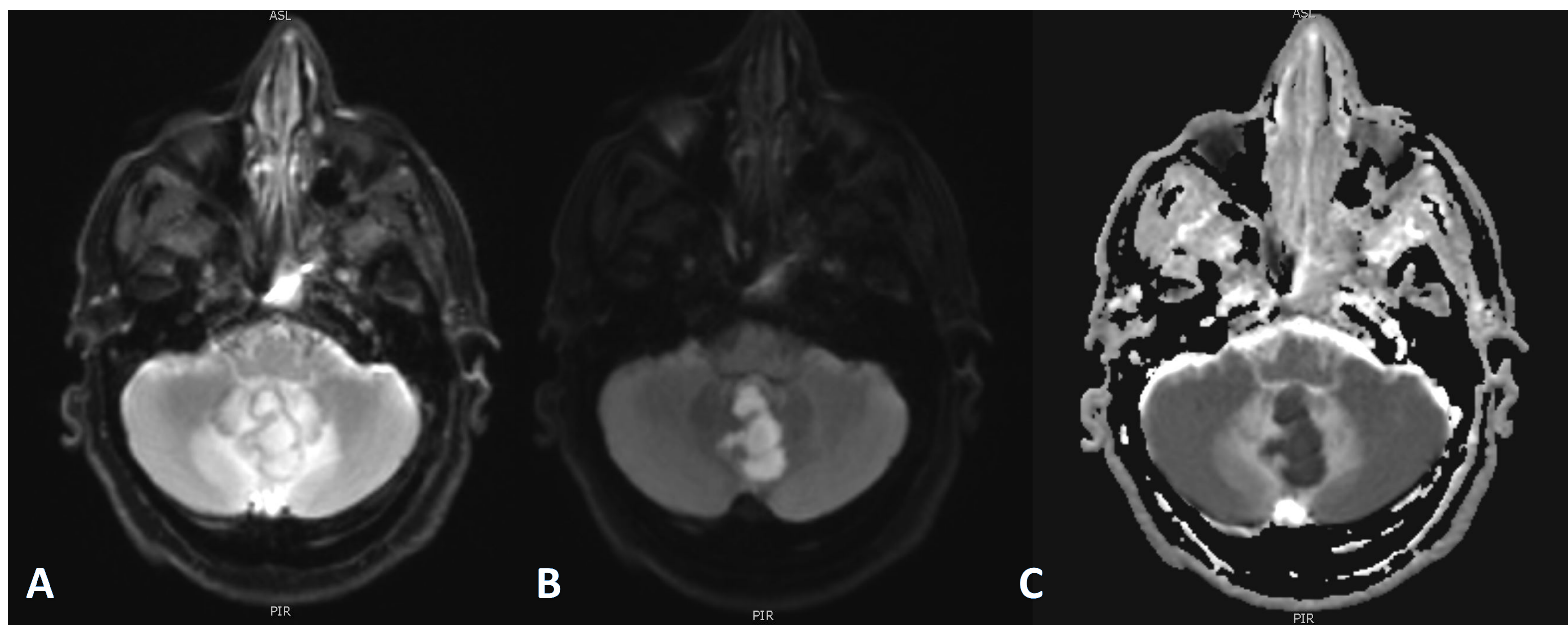


Fig. 5. RM fosa posterior que muestra el comportamiento de un absceso cerebeloso con restricción de la difusión en secuencias $b=0$ (A) y $b=1000$ (B) debido a la alta viscosidad y celularidad de la pus. Marcada hipointensidad de señal en el mapa ADC (C).

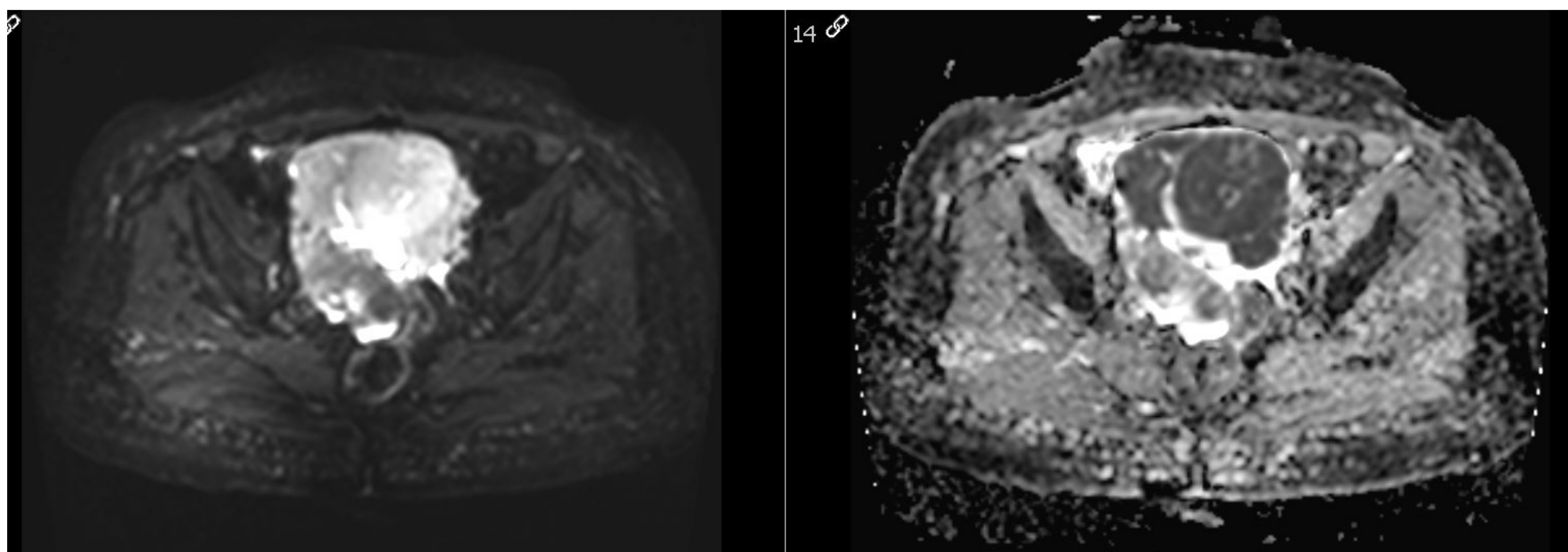


Fig. 6. RM pélvica con linfoma ovárico que muestra una hiperintensidad en imágenes potenciadas en difusión (A) e hipointensidad en el mapa ADC (B) debido a su alta celularidad.

REVISIÓN DEL TEMA:

6. ERRORES COMUNES DE INTERPRETACIÓN:

Hiperintensidad por efecto T2:

- Las secuencias de difusión están ponderadas en T2 → la intensidad depende de difusión + tiempo de relajación T2.
- Tejidos con T2 largo (vesícula biliar, quistes simples) pueden mostrar alta intensidad incluso en valores b altos
- Solución más práctica → correlacionar estas imágenes con el mapa ADC:
 - Restricción real: baja intensidad de señal
 - Efecto T2: alta intensidad de señal

Flujo sanguíneo lento:

- Las moléculas de agua en vasos sanguíneos se mueven fácilmente → pierden intensidad con valores b bajos (*efecto de sangre negra*).
- Estructuras vasculares con flujo lento (hemangiomas hepáticos...), pueden mostrar alta intensidad de señal en imágenes de difusión incluso con valores b relativamente altos, lo que puede llevar a interpretaciones erróneas.
- No se puede corregir mediante el mapa ADC (presentan baja intensidad en ADC).
- Correlacionar con otras secuencias y su respuesta al CIV.

CONCLUSIONES:

- Las secuencias de difusión en RM proporcionan información funcional de los tejidos biológicos.
- El contraste de la imagen depende del movimiento de las moléculas de agua: libre VS restringido.
- Una evaluación correcta de la imagen contiene un análisis cualitativo (valor b) y cuantitativo (mapa ADC), y la interpretación de los resultados puede ser compleja.
- La interpretación de las imágenes debe correlacionarse con secuencias morfológicas.

BIBLIOGRAFÍA:

1. Ahualli Jorge. Aspectos generales de las secuencias de difusión de imagen en resonancia magnética. Rev. argent. radiol. [Internet]. 2010 Sep; 74(3): 226-236.
2. Oleaga Zufiría O, Lafuente Martínez J. Aprendiendo los fundamentos de la resonancia magnética. Madrid: Panamericana; 2007.
3. Schild HH. IRM hecha fácil. 1st ed. Madrid: Schering España; 1992.