Clase 30
Quantitative Susceptibility Mapping

Javier Silva Orellana

jisilva8@uc.cl

Contenidos

- Secuencias
- Susceptibilidad Magnética
- QSM
- Aplicaciones de QSM
- Desafíos en QSM
- Comunidad EMPT

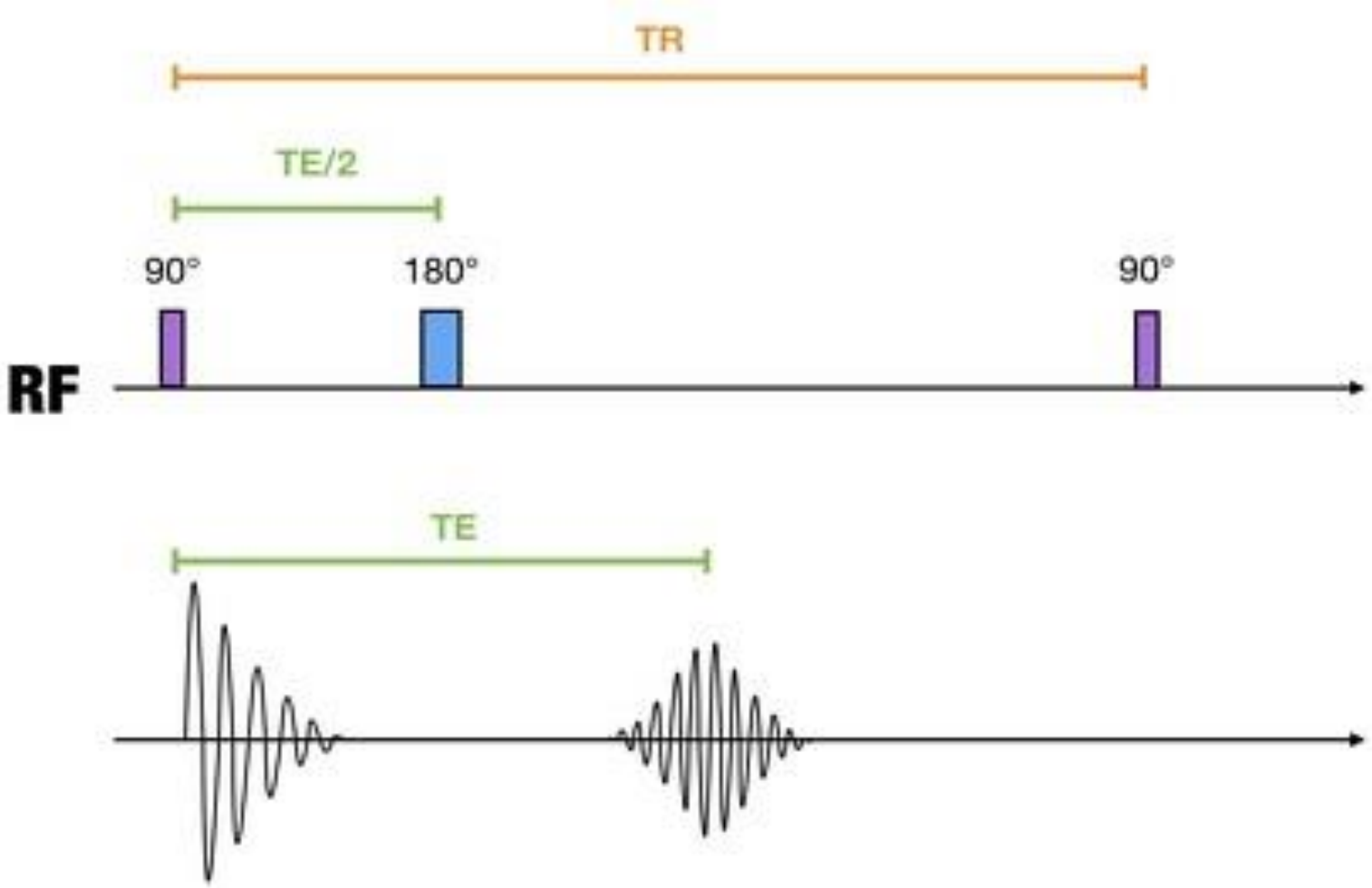
Secuencia Spin Echo

- Idea: Aplicar un pulso RF de excitación y dejar que los spins se desfasen. Después de cierto tiempo, aplicar un pulso de 180° de modo que cambiamos la dirección de desfase, haciendo que vuelvan a juntarse.

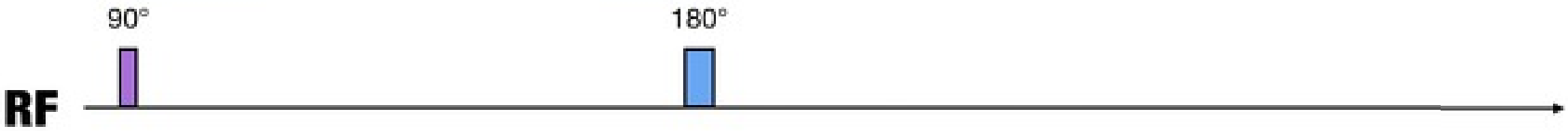
- En este caso el “eco” es generado por la aplicación de un pulso RF.

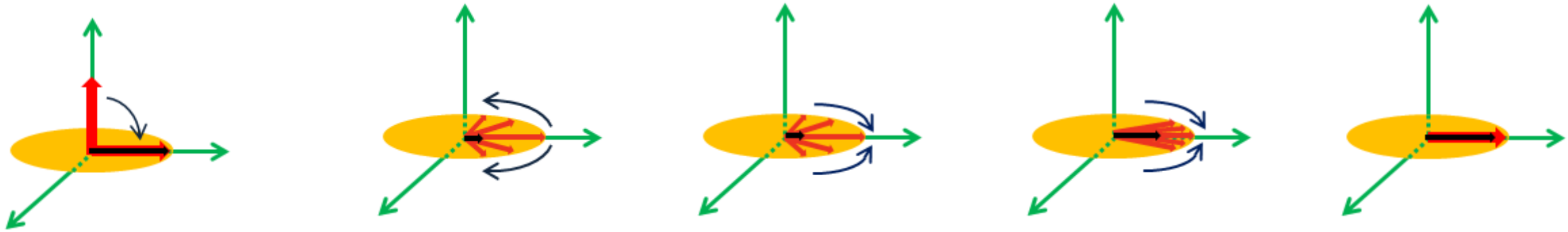
- En cada repetición de eco, la imagen experimentará un decaimiento de magnitud según T_2.

Secuencia Spin Echo



Secuencia Spin Echo





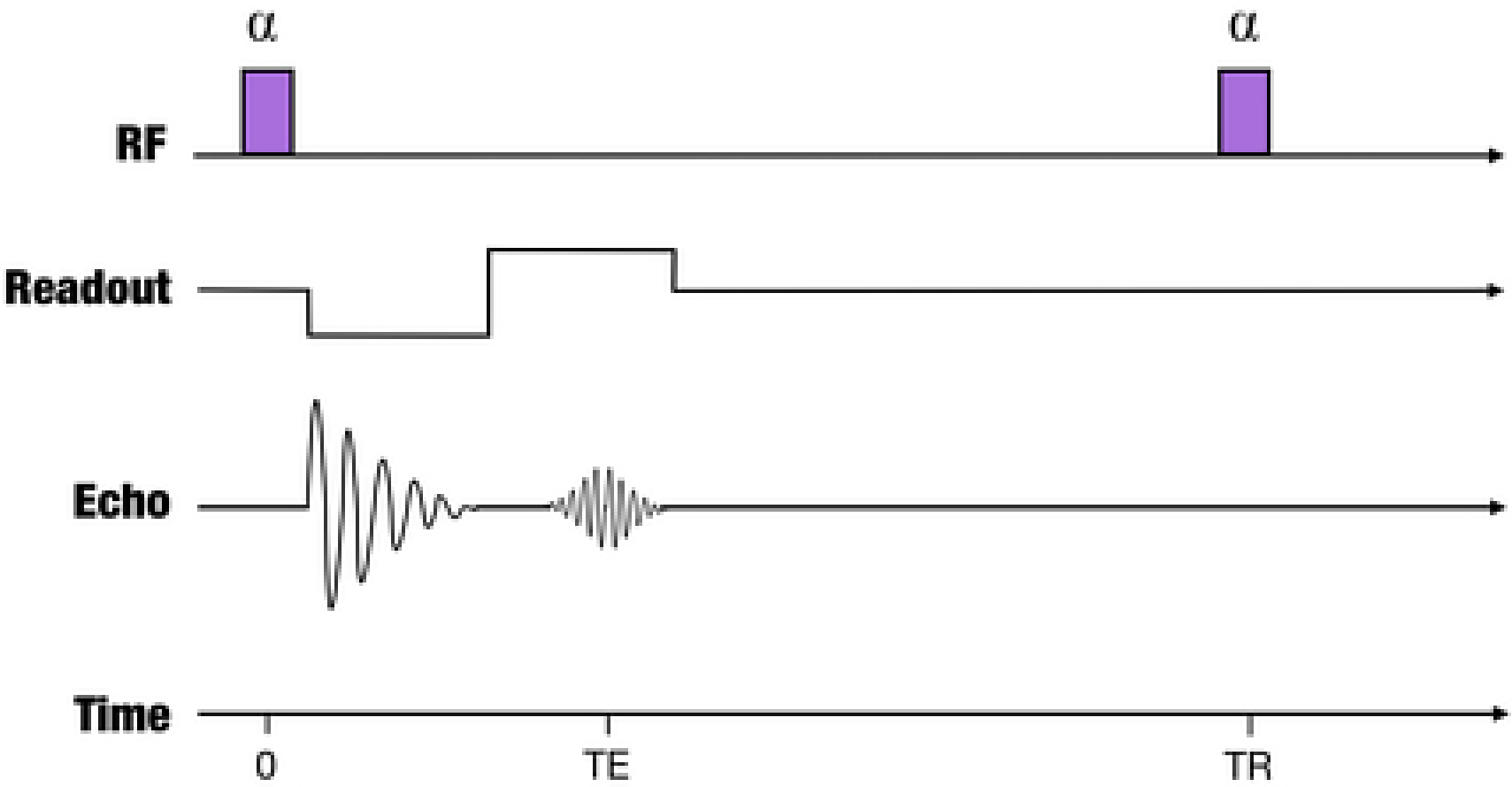
Secuencia Gradient Echo

- Idea: Aplicar un pulso RF de excitación y desfasar los spins aplicando un gradiente muy fuerte en alguna dirección. Luego, aplicar el mismo gradiente en dirección opuesta para volver a ponerlos en fase y generar la señal.

- En este caso el “eco” es generado por la aplicación de un gradiente.

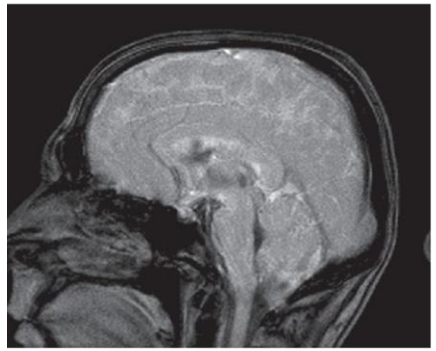
- Problema, los gradientes y campos son sensibles a muchos efectos. De modo que el decaimiento es más abrupto: $T_2 \rightarrow T_2^*$

Secuencia Gradient Echo

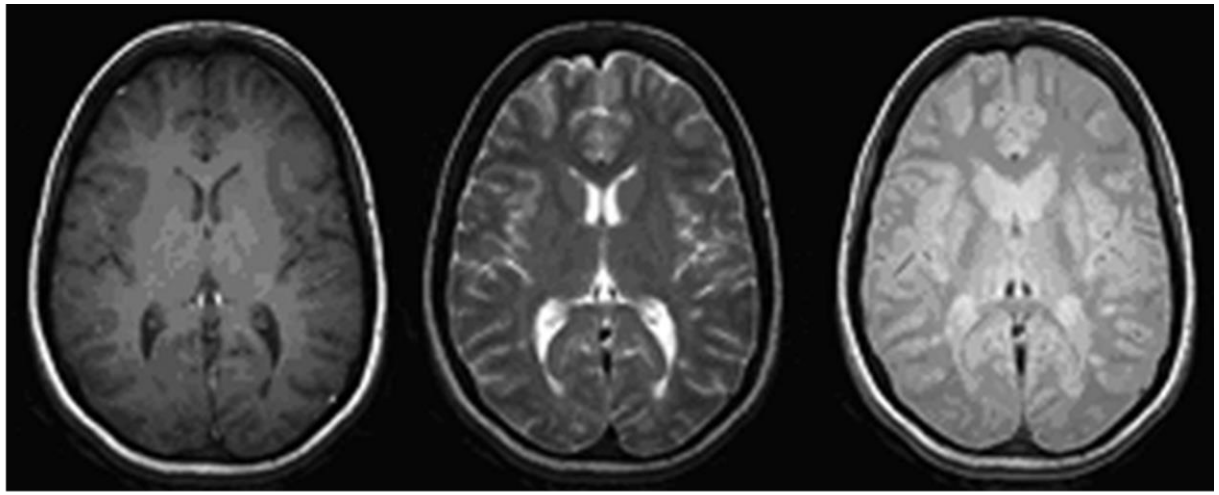


Imágenes de Magnitud y Fase

- Por un lado, la magnitud nos aporta características de anatomía y contraste.



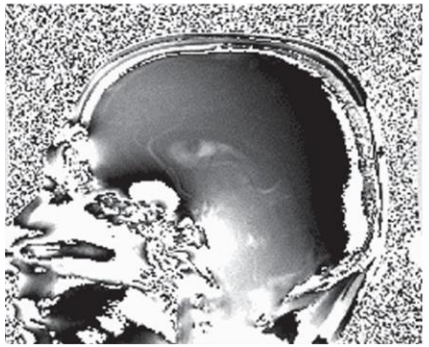
Magnitude



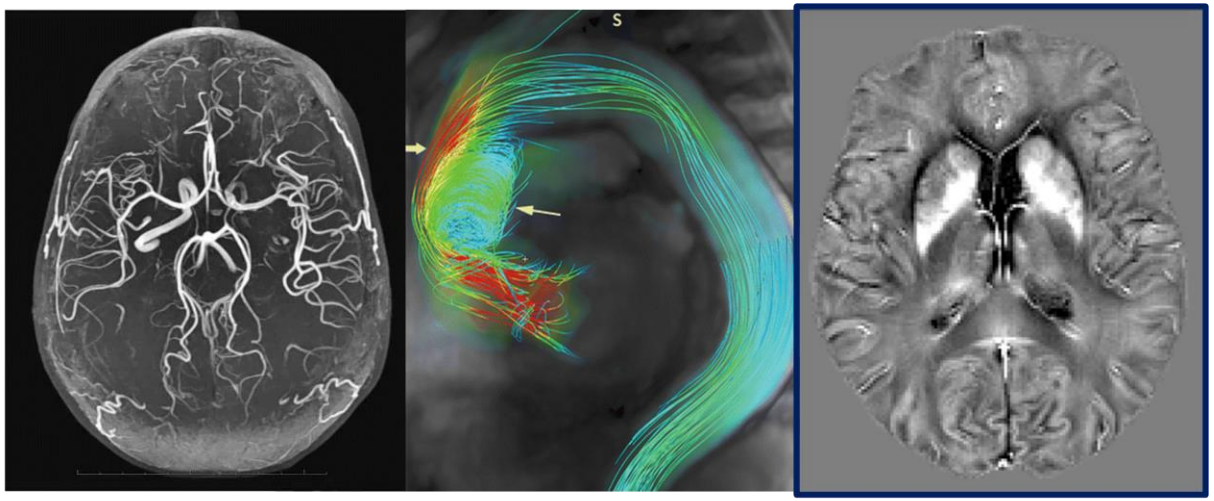
T1 T2 Proton Density

Imágenes de Magnitud y Fase

- Por otro lado, la fase nos permite modelar variables físicas más complejas, que están codificadas o “escondidas” en la fase.



Phase



MRI angiography

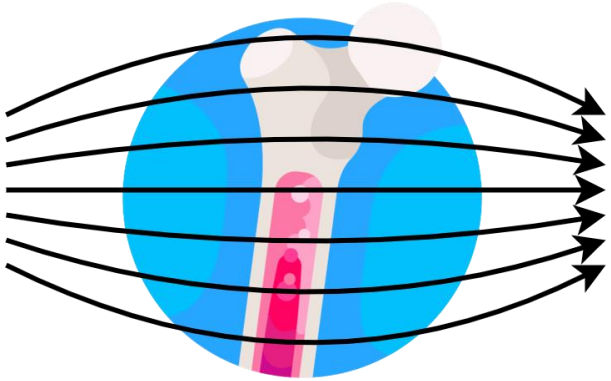
4D-Flow

Magnetic Susceptibility

Susceptibilidad

- Anteriormente, vimos que la susceptibilidad caracteriza la respuesta de un material ante la presencia de un campo magnético externo.

$B < B_0$



Diamagnético

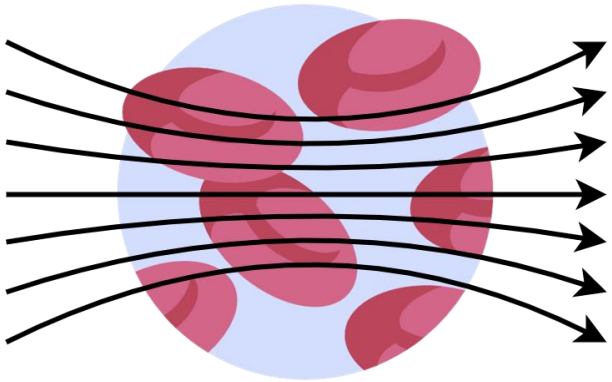
$(\chi < 0)$

$B = B_0$



$\chi = 0$

$B > B_0$

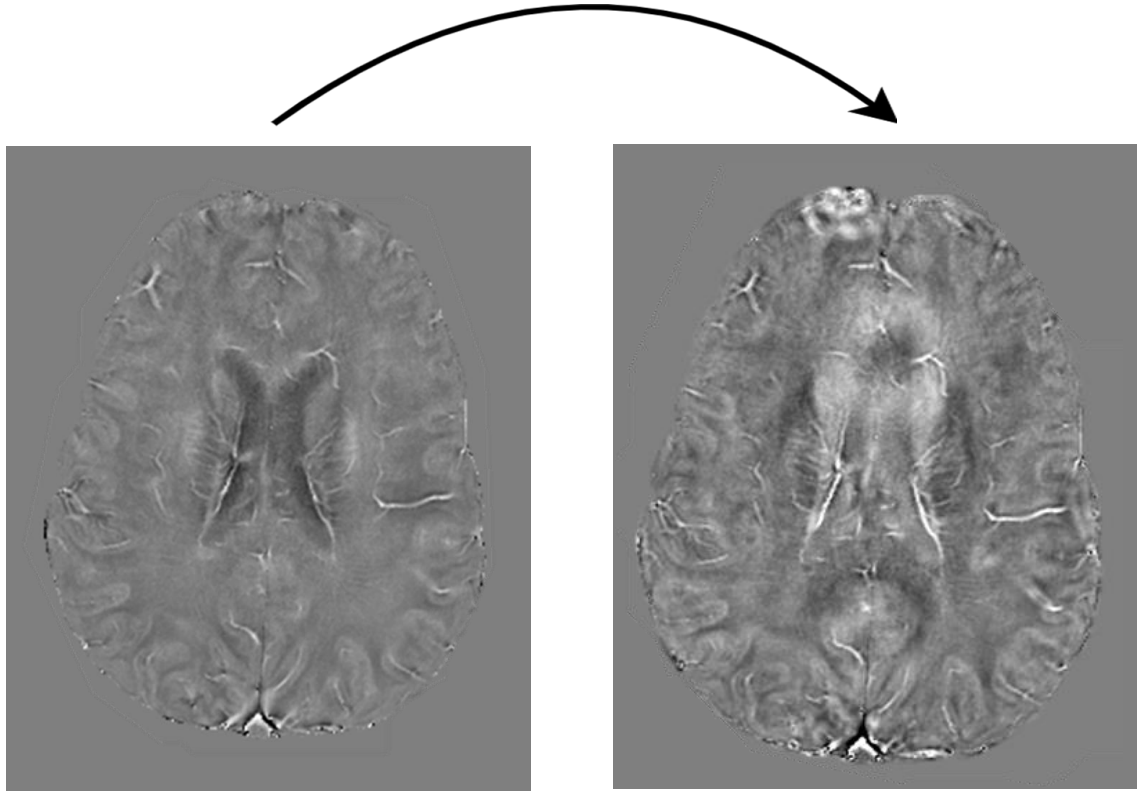


Paramagnético

$(\chi > 0)$

QSM

QSM busca estimar la distribución especial de susceptibilidades a partir de las variaciones en el campo magnético.



$\Delta B_0(\chi)$ $\Delta\chi$

QSM: Problema directo

- En general, podemos escribir la fase como:

$$\phi = \gamma B_0 TE$$

- Si hay cambios espaciales en la fase para una adquisición a un TE específico, solo puede haber un responsable:

$$\Delta\phi = \gamma \Delta B_0 TE$$

QSM: Problema directo

- En general, podemos escribir la fase como:

$$\phi = \gamma B_0 TE$$

- Si hay cambios espaciales en la fase para una adquisición a un TE específico, solo puede haber un responsable:

$$\Delta\phi = \gamma \Delta B_0 TE$$

QSM: Problema directo

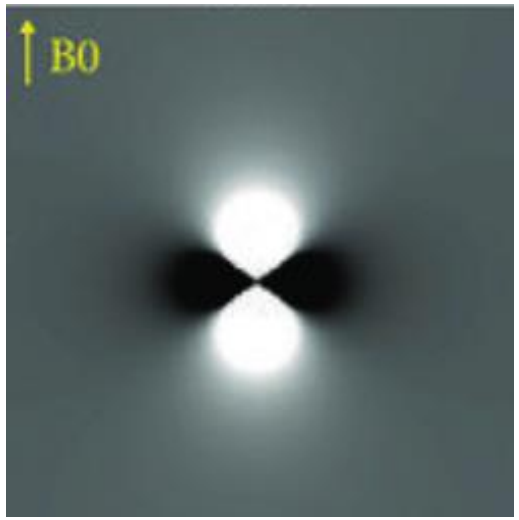
- Si solo consideramos los efectos de la susceptibilidad en el campo magnético B_0, podemos modelar las variaciones como:

$$\Delta B_0 = H_0 \cdot FT^{-1}\left[\left(\frac{1}{3} - \frac{k_z^2}{|\boldsymbol{k}|^2}\right) \cdot FT[\Delta\chi]\right]$$

$$\Delta B_0 = H_0 \cdot FT^{-1}[D \cdot FT[\Delta\chi]]$$

Kernel del dipolo

- D se conoce como el kernel del dipolo magnético. Representa a la distribución del campo magnético de un dipolo.
- Su formulación en el espacio es horrible. Pero en el dominio de la frecuencia es bastante más sencilla y fácil de trabajar.





QSM: Problema inverso

- Si a partir de la adquisición de resonancia obtenemos una imagen de fase. Obtener la susceptibilidad parece un problema no tan complejo.

$$\Delta\phi = \gamma \cdot TE \cdot H_0 \cdot FT^{-1}[D \cdot FT[\Delta\chi]]$$

$$f = \frac{\Delta\phi}{\gamma \cdot TE \cdot H_0} = FT^{-1}[D \cdot FT[\Delta\chi]]$$

$$F = D \cdot FT[\Delta\chi]$$

QSM: Problema inverso

- En teoría, solo tenemos que dividir y luego aplicar Fourier…

$$F = D \cdot FT[\Delta\chi]$$

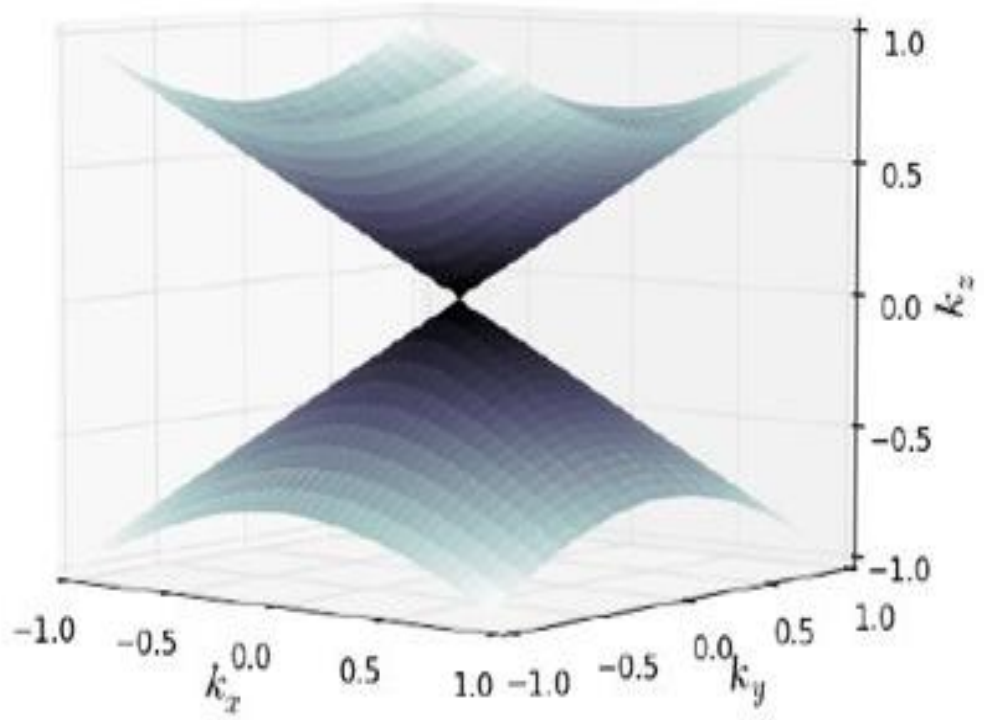
$$\Delta\chi = FT^{-1}\left[\frac{F}{D}\right]$$

$$\Delta\chi = FT^{-1}\left[\frac{F}{\frac{1}{3} - \frac{k_z^2}{|\boldsymbol{k}|^2}}\right]$$

QSM: Problema inverso

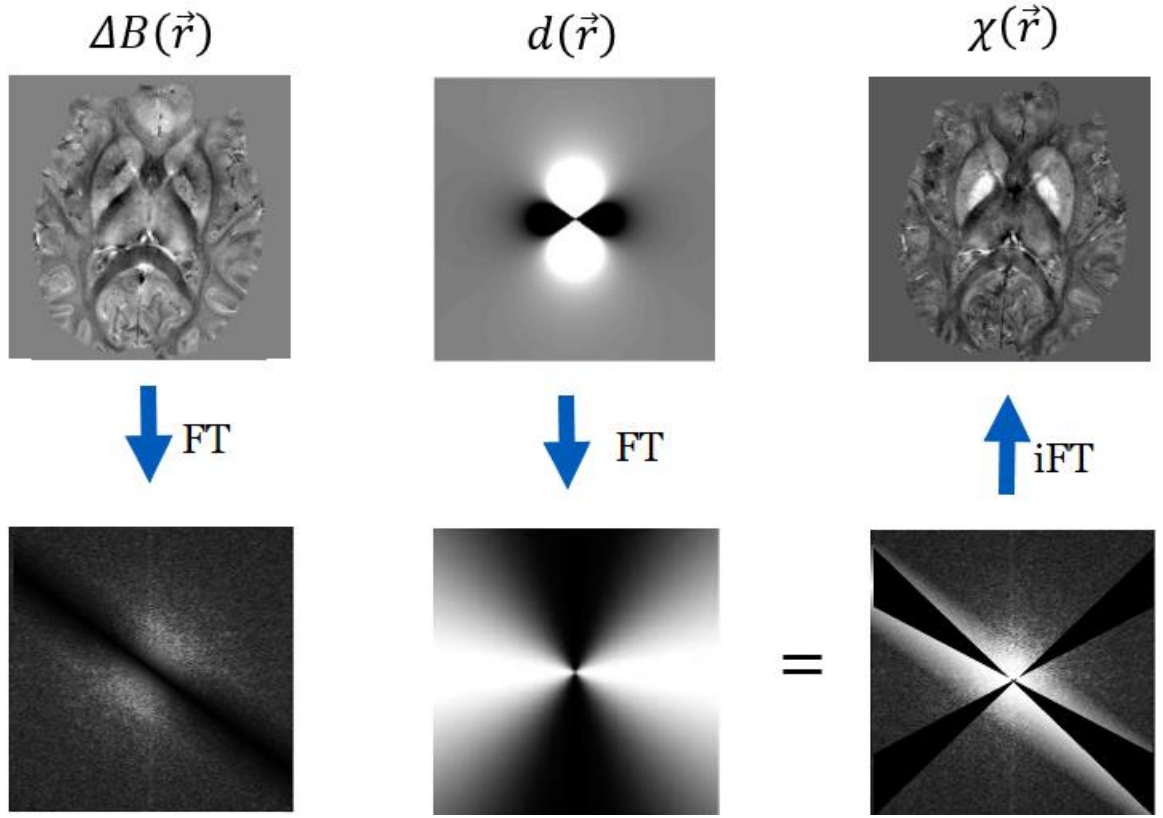
- Hay puntos donde el kernel vale 0, y el problema se indefine.

$$\Delta\chi = FT^{-1}\left[\frac{F}{\frac{1}{3} - \frac{k_z^2}{|\boldsymbol{k}|^2}}\right]$$



QSM: Problema inverso

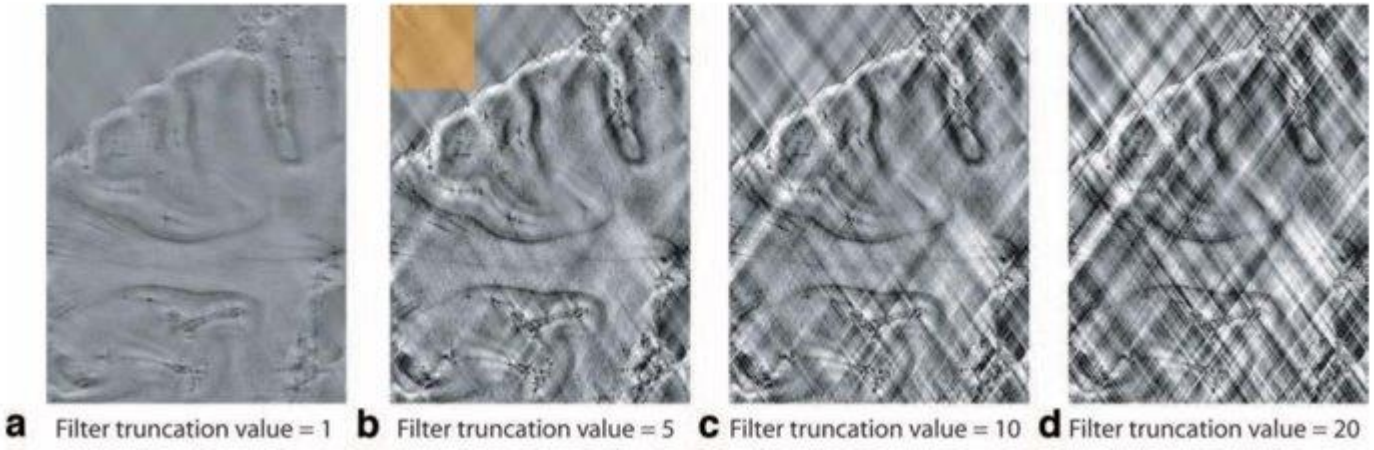
- Idea, omitamos los puntos donde se indefine el dipolo.
- Truncated Kernel Inversion (TKD).



QSM: Problema inverso

- Idea, omitamos los puntos donde se indefine el dipolo.
- Truncated Kernel Inversion (TKD).

- Digamos que no resulta muy bien…



QSM: Problema inverso

- Con el tiempo, se han formulado mejores estrategias. Muchas de ellas basadas en métodos iterativos, con una fuerte componente de optimización.
- También existen soluciones emergentes basadas en Deep Learning.
- Algunos de estas herramientas matemáticas se abordan en el curso:

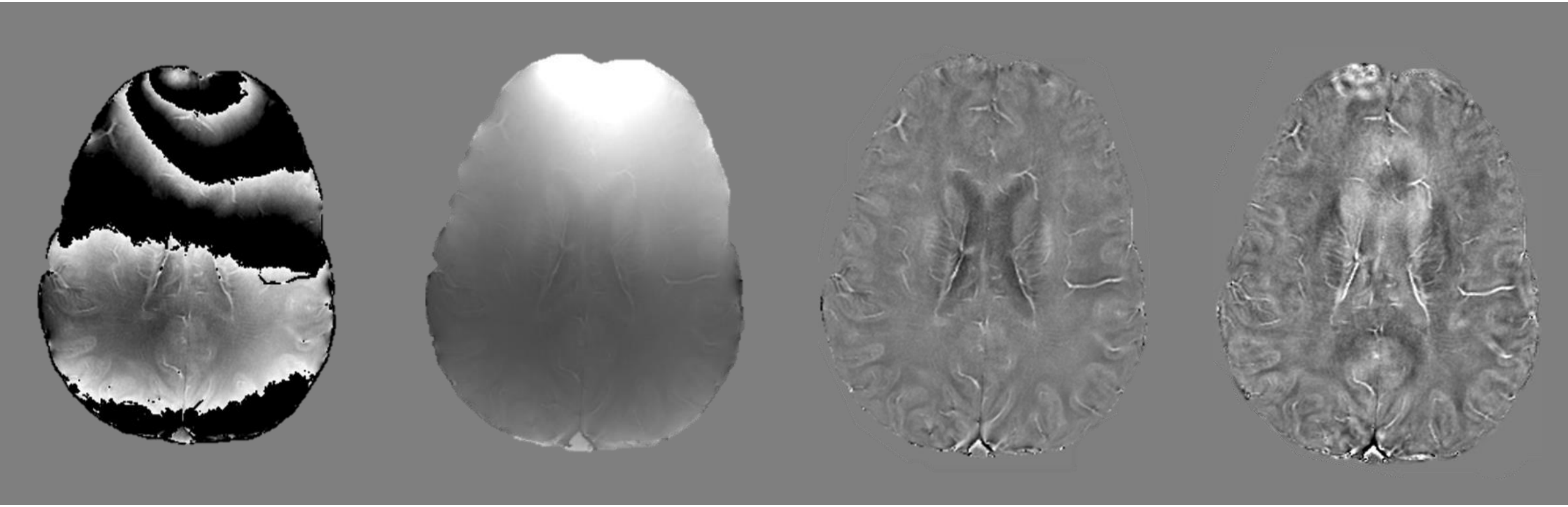
IEE3794 - Reconstrucción y Restauración de Imágenes

QSM: Problema inverso

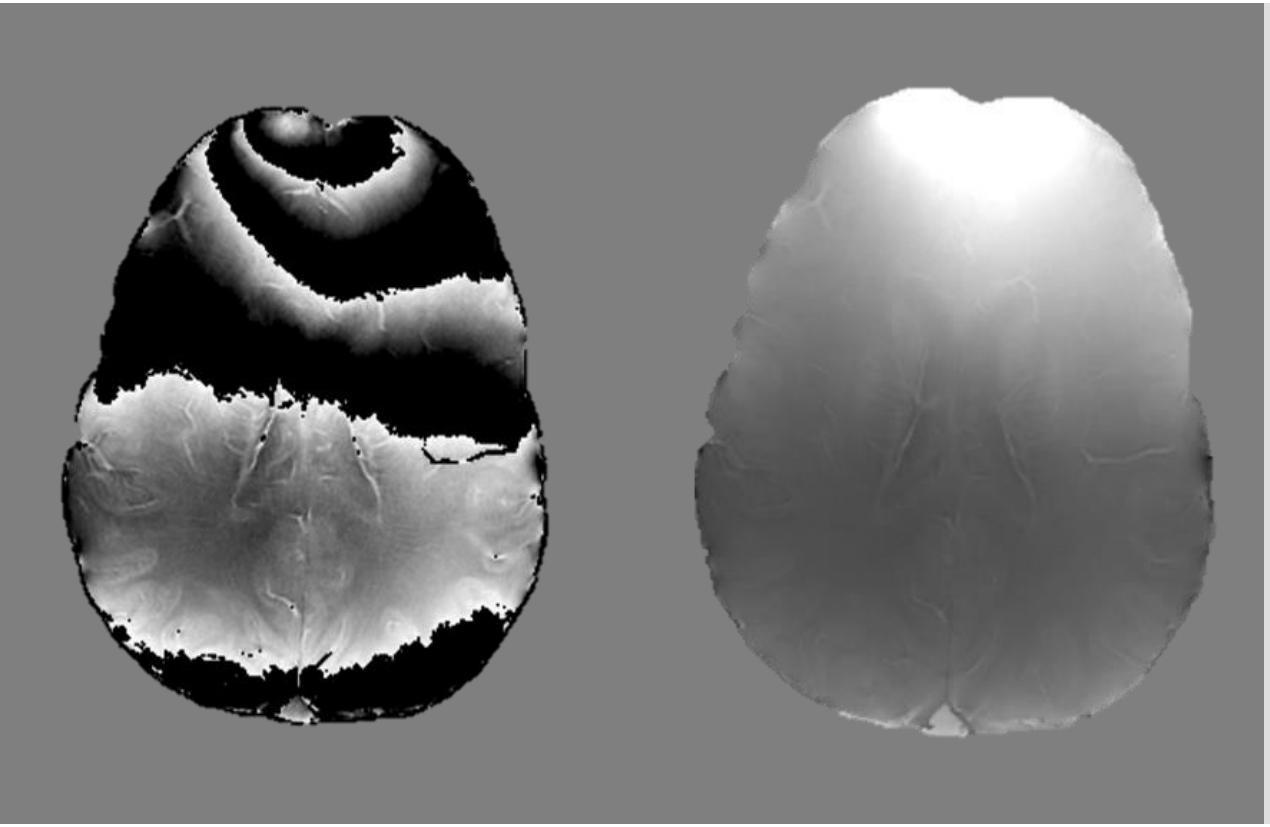
- El problema inverso, también conocido como Dipole Inversion, es solo **el último** paso de una cascada de procesamiento.

- Llegar desde una imagen de fase MRI a un mapa del campo magnético no es tan sencillo…

El pipeline de QSM



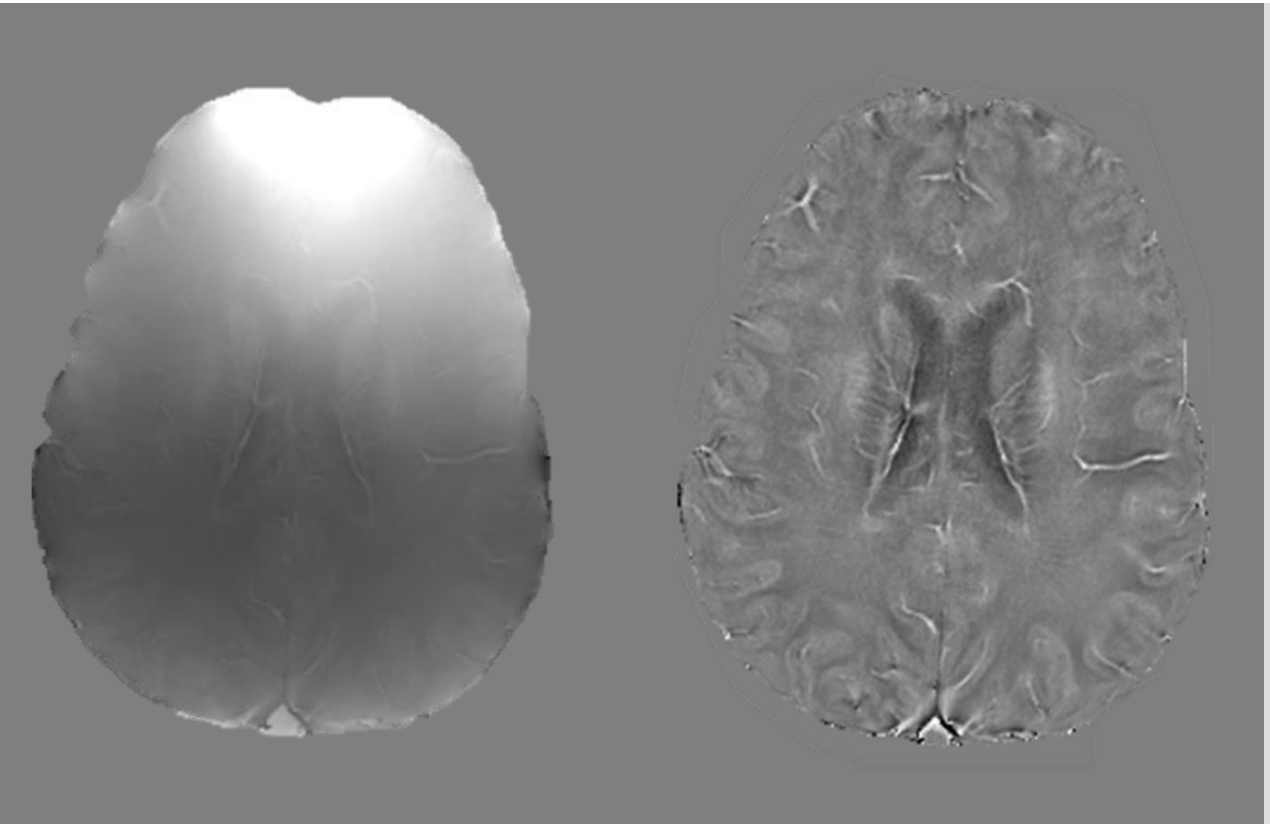
El pipeline de QSM



Phase Unwrapping

Remover los saltos de 2π causados por la naturaleza periódica de la exponencial compleja.

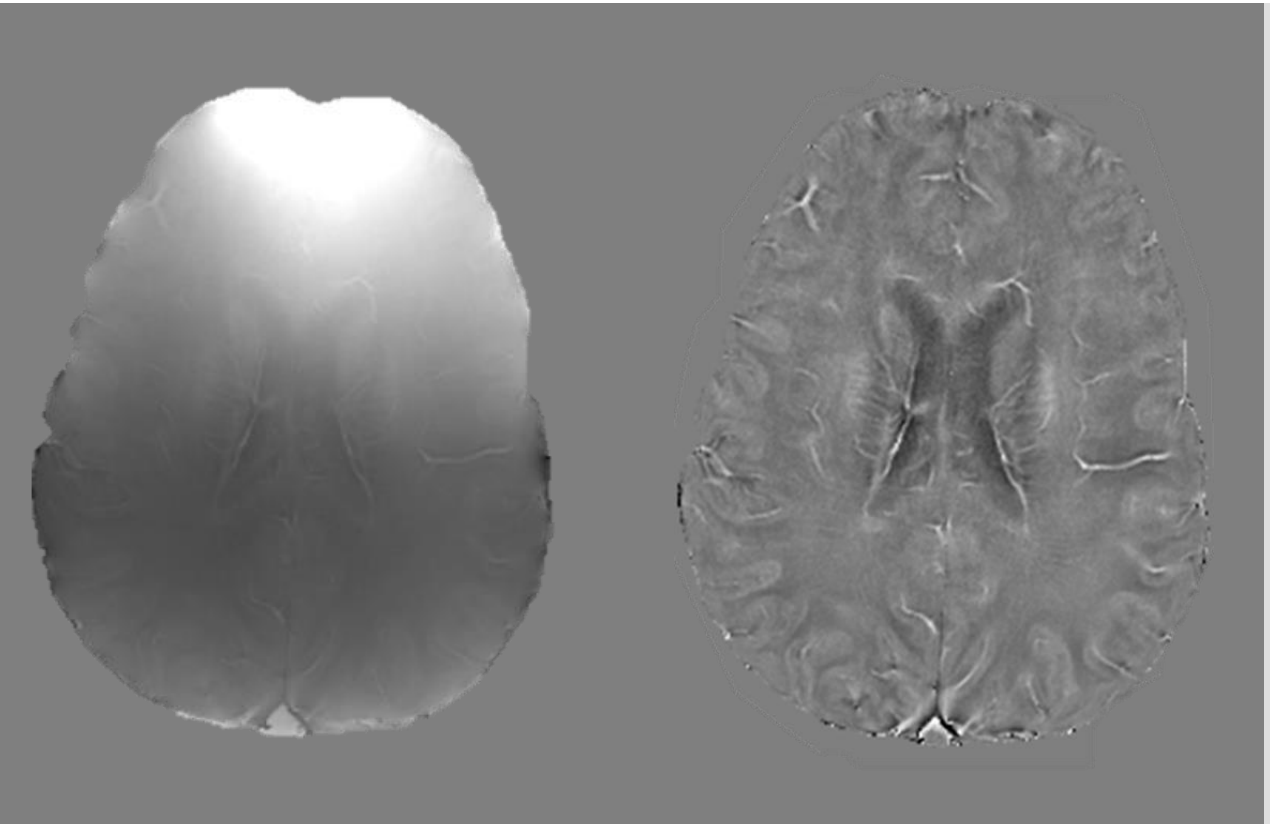
El pipeline de QSM



Background Field Removal

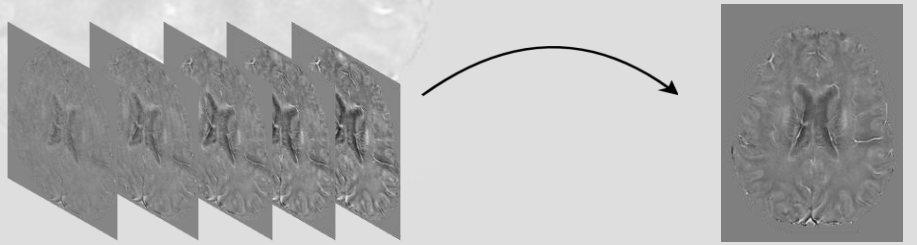
Eliminar todas las fuentes no locales de inhomogeneidades. Estas son causadas por tejidos fuera de la region de interés (ROI).

El pipeline de QSM

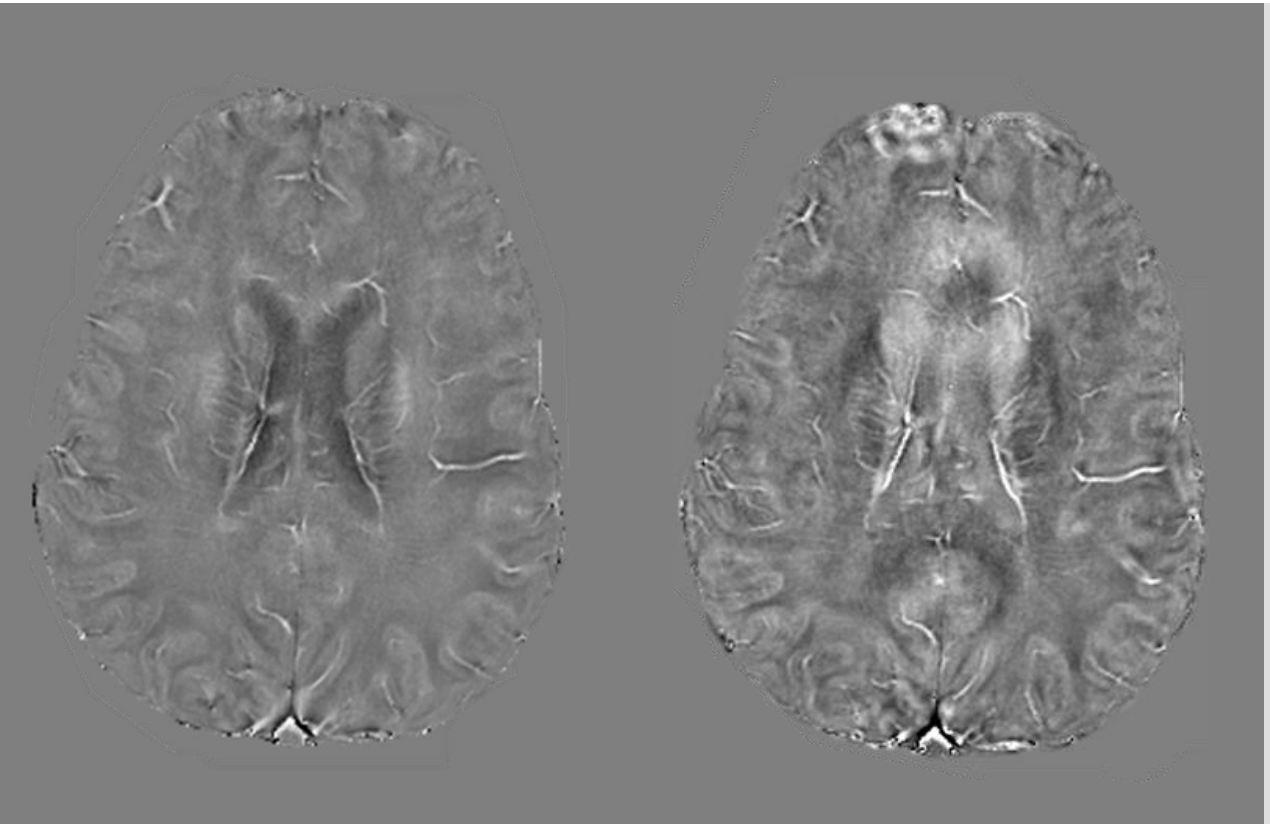


Echo combination

Integrar informacion de adquisiciones a distintos TE en una sola imagen.



El pipeline de QSM



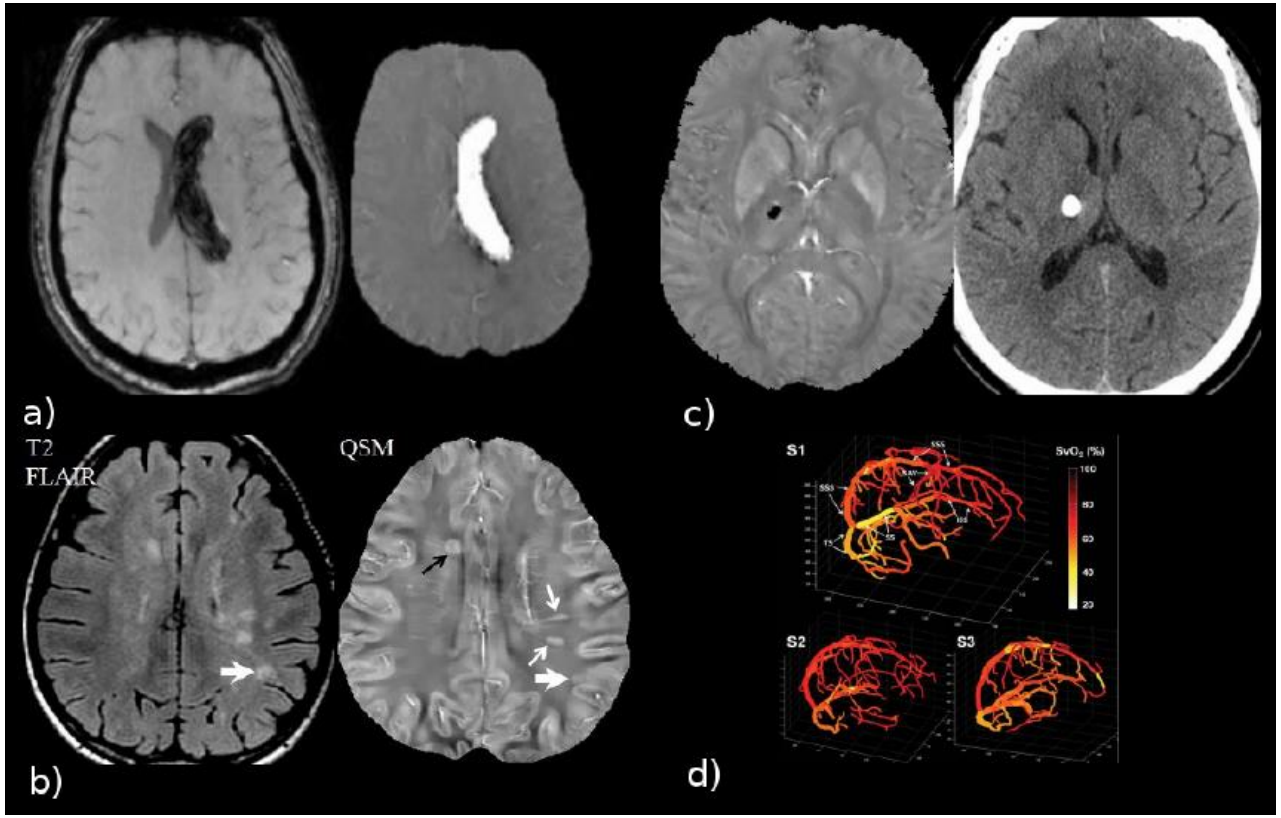
Dipole Inversion

Estimar la susceptibilidad a partir del mapa local de variaciones de campo.

QSM: Aplicaciones

- A partir de QSM, podemos estudiar diferentes patologías y fisiología del cerebro.

a. Hemorragias
b. Calcificaciones
c. Depósitos de hierro
d. Niveles de oxigenación



QSM: Desafíos

- Otro desafío importante es lograr un acuerdo en cómo hacer QSM.
- La cantidad de métodos de reconstrucción es enorme, y no todos son muy buenos.
- Esto se resolvió hace muy poco.

QSM: Desafíos

Magn Reson Med. 2024 May;91(5):1834-1862. doi: 10.1002/mrm.30006. Epub 2024 Jan 21.

Recommended implementation of quantitative susceptibility mapping for clinical research in the brain: A consensus of the ISMRM electro-magnetic tissue properties study group

QSM Consensus Organization Committee; Berkin Bilgic [1], Mauro Costagli [2 3], Kwok-Shing Chan [1 4], Jeff Duyn [5], Christian Langkammer [6], Jongho Lee [7], Xu Li [8 9], Chunlei Liu [10 11], José P Marques [4], Carlos Milovic [12], Simon Daniel Robinson [13 14], Ferdinand Schweser [15 16], Karin Shmueli [17], Pascal Spincemaille [18], Sina Straub [19], Peter van Zijl [8 9], Yi Wang [20]; ISMRM Electro-Magnetic Tissue Properties Study Group

Affiliations + expand

PMID: 38247051 PMCID: PMC10950544 (available on 2025-05-01) DOI: 10.1002/mrm.30006

QSM: Desafíos

- Durante los últimos años se ha optado por buscar métodos basados en Deep Learning, pero aún son muy malos.

- Otros han propuesto generar 2 mapas separados, uno para componentes diamagnéticas y otros para componentes paramagnéticas: DECOMPOSE, χ-Separation.

- Nuevos métodos de reconstrucción son siempre bienvenidos.

QSM: Desafíos

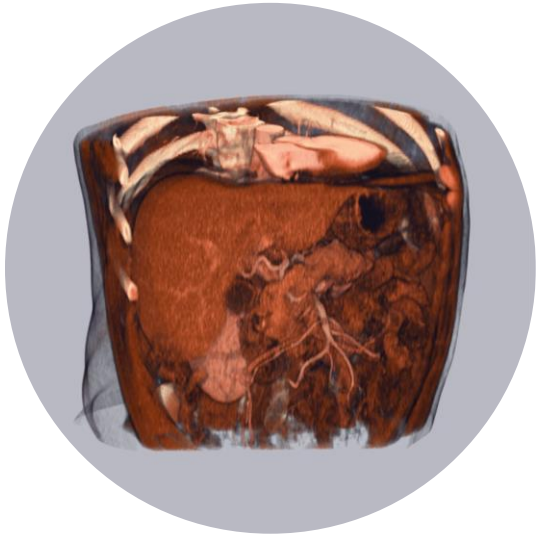
- A pesar de lo útil de sus aplicaciones, QSM sigue siendo una técnica en pañales. Lleva apenas unos 20 años formales de existencia.

- Si bien se ha estudiado principalmente en cerebro, eso no lo limita esa región en particular.

- También es aplicable en el resto del cuerpo, pero los desafíos aumentan.

QSM: Desafíos

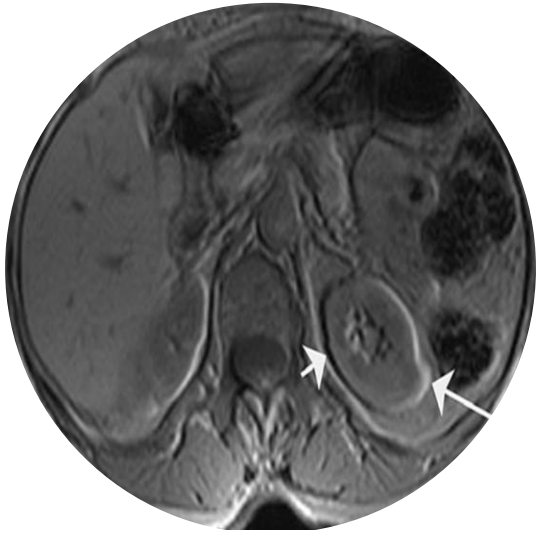
Tamaño



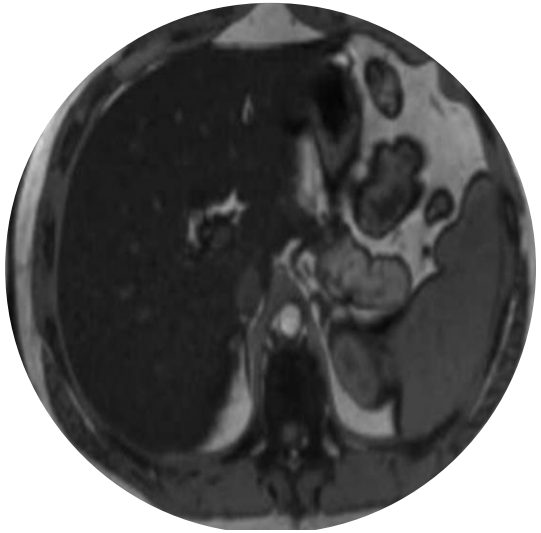
Movimientos



Grasa



Caídas de Señal



Comunidad EMPT

- Existe todo un grupo a nivel internacional dedicado al estudio de propiedades electromagnéticas de tejidos.

- Algunos gustan de llenar a sus pacientes/voluntarios de electrodos (electric properties).
- Otros prefieren meterlos en imanes muy potentes (magnétic properties)

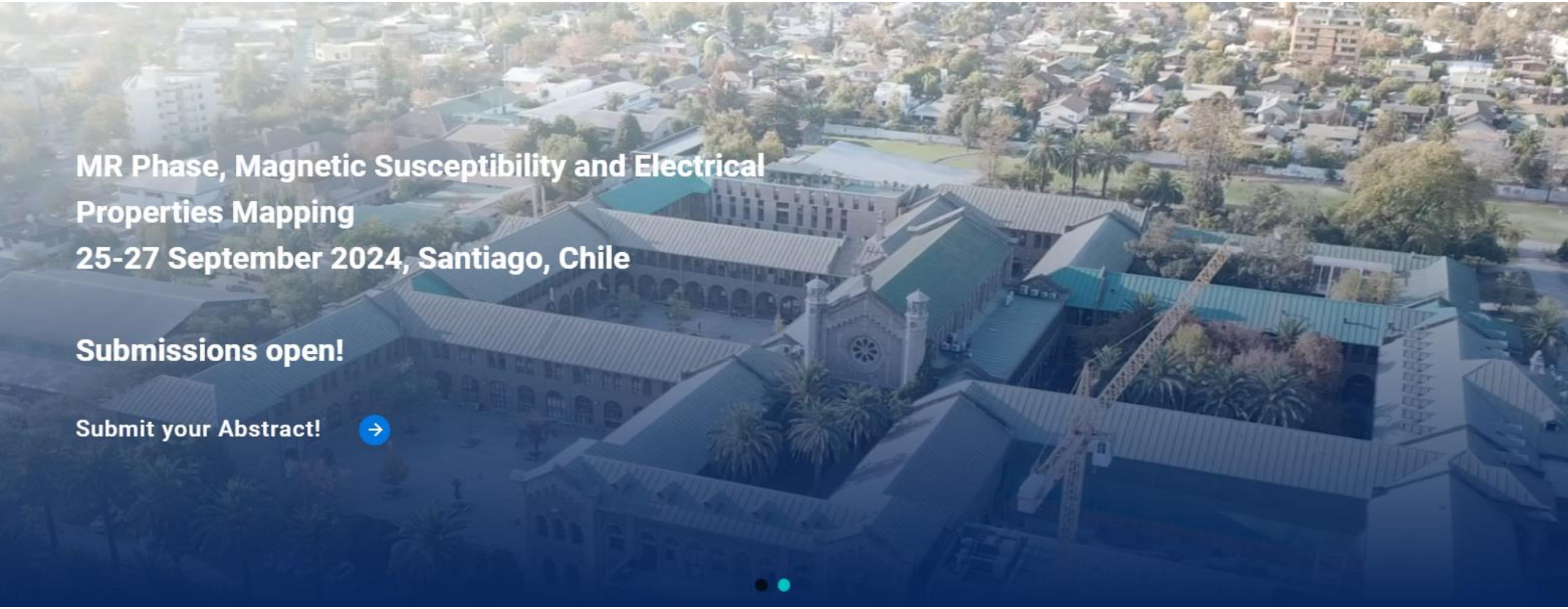
Comunidad EMPT (Lucca, Italia, 2022)







Próxima Sede: Santiago de Chile, 2024



Cerrando la clase de hoy

FIN