

Abstract

La presente exposición aborda la hipótesis METFI: mareas como oscilación resonante electromagnética. Se parte del postulado de que los movimientos de agua salada inducen señales electromagnéticas detectables que exhiben resonancias globales. Empleando datos satelitales recientes (CHAMP, Swarm) y modelos electromagnéticos 3-D validados, se analiza la generación, propagación y resonancia de campos magnéticos inducidos por las mareas principales (M_2 , O_1 , N_2). Se detallan los mecanismos físico-matemáticos —magneto-quasi-estática, corriente de inducción por movimiento de conductor, resonancia modal en cuencas oceánicas—, junto con estimaciones cuantitativas de amplitud y error. El tratamiento combina aproximaciones analíticas y simulaciones numéricas. Se concluye que la hipótesis METFI, sustentada en dichas evidencias independientes de intereses corporativos, ofrece una descripción coherente de las señales de marea como fenómenos de oscilación resonante electromagnética.

Palabras clave: METFI, mareas, oscilación resonante electromagnética, inducción magnética oceánica, Swarm, CHAMP, resonancia modal, cuencas oceánicas.

Introducción

La teoría clásica de mareas explica los movimientos del océano mediante fuerza gravitacional lunar y solar, modulada por rotación terrestre, fricción y morfología de las cuencas. No obstante, esta teoría no aborda explícitamente la generación de campos electromagnéticos asociados ni su posible resonancia global.

La hipótesis METFI plantea que las corrientes maremotrices, al desplazar agua salada conductora en el seno del campo magnético terrestre, inducen corrientes eléctricas y campos magnéticos secundarios meso- y globales. Estas señales resuenan en modos específicos determinados por la geometría oceánica y la frecuencia de las mareas dominantes (p. ej. M_2 semidiurna ≈ 12.42 h) (www1.ing.unlp.edu.ar).

El trabajo se centra exclusivamente en publicaciones científicas sin conflictos de interés: estudios de Heinrich Grayver, Alexey Kuvshinov, Jakob Velínský, así como informes de misiones Swarm/SPARC.

Fundamento físico

Generación electromagnética

Las ecuaciones de Maxwell en régimen magneto-quasi-estático describen con precisión el fenómeno:

- Ausente corriente de desplazamiento relevante, se adopta la aproximación quasi-estática.
- La densidad de corriente inducida $\mathbf{j} = \sigma(\mathbf{v} \times \mathbf{B}_M)$, con \mathbf{v} la velocidad de la corriente de marea y \mathbf{B}_M el campo magnético principal terrestre ([SpringerOpen](https://doi.org/10.1007/978-94-007-6143-7)).

Esta formulación linealiza el sistema al considerar que la perturbación bb inducida es mucho menor que el campo base, lo que simplifica las ecuaciones y permite modelado numérico en dominios esféricos con conductividad variable.

Modelado 3-D y simulaciones numéricas

Velínský et al. (2018) compararon dos enfoques tridimensionales (ecuación integral–armónica y elementos finitos–armónicos esféricos), mostrando que la aproximación 2-D verticalmente promediada es insuficiente cerca de costas y variaciones locales de batimetría: se requiere tratamiento electromagnético completo, incluyendo acoplamientos inductivos entre océano y manto subyacente ([SpringerOpen](#)).

En investigaciones más recientes (c. 2024), Grayver y colaboradores desarrollaron modelos globales de señal magnética inducida por mareas (constituentes M_2 , N_2 , O_1 y Q_1), usando análisis de mínimos cuadrados robustos aplicados a datos Swarm y CHAMP ([arxiv.org](#)). Dichos modelos permiten inferir la conductividad eléctrica del manto sub-oceánico por primera vez de modo consistente con las teorías geofísicas establecidas.

Resonancia oceánica

La resonancia de marea ocurre cuando la frecuencia de forzamiento coincide con uno de los modos normales de la cuenca oceánica. Esto ejerce una amplificación significativa de amplitud de marea, especialmente en plataformas continentales cuyo ancho se aproxima a la cuarta longitud de onda de la componente M_2 ([arxiv.org](#), [academia-lab.com](#)).

En particular, regiones como la Bahía de Fundy, plataforma patagónica o canal de Bristol exhiben mareas extremas debido a resonancias. El flujo resonante genera corrientes intensas que, al desplazarse en presencia del campo magnético terrestre, originan señales electromagnéticas detectables globalmente.

Datos satelitales y evidencia observacional

Misión CHAMP y Swarm

Los satélites CHAMP (2000–2010) y la constelación Swarm (lanzada en noviembre 2013, aún operativa 2025) han permitido observar directamente las señales magnéticas inducidas por mareas, principalmente la constituyente M_2 , pero también N_2 y O_1 ([academia-lab.com](#), [skycr.org](#)).

Utilizando un método basado en filtros de Kalman (KALMAG), se estimaron los campos magnéticos de ocho mareas principales a lo largo de 17 años de datos, obteniendo distribuciones de error posteriores (posterior error covariance) más precisas que las comparaciones inter-producto anteriores: RMSE global para M_2 entre 0.09 y 0.14 nT; errores locales de KALMAG tan bajos como ~ 0.12 nT frente a diferencias interproductos de ~ 0.96 nT ([SpringerOpen](#)).

Swarm ha detectado estas señales durante un período de mínimo solar que redujo el ruido de fondo, facilitando su extracción ([Europa Press](#)).

Coincidencia con modelos

Los resultados observacionales coinciden con las simulaciones energéticas 3-D generadas mediante códigos DNS o funciones armónicas completas, permitiendo validar el modelo MATFI como oscilación resonante electromagnética de las mareas (arxiv.org).

Interpretación resonante electromagnética (METFI)

La tesis METFI propone que:

- La inducción electromagnética activada por las corrientes de marea es una fuente resonante de señales magnéticas periódicas.
- La frecuencia dominante ($M_2 \approx 1.405 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) coincide con modos de resonancia estructural en cuencas oceánicas extensas.
- La combinación de resonancia hidrodinámica y electromagnética implica un acoplamiento físico-químico entre movimiento de agua, campo magnético base y estructura eléctrica del manto.

Este enfoque unifica resultados: amplitud de señal predicha, distribución latitudinal y temporal, errores esperables y respuesta modal en cuencas específicas.

Desarrollo matemático y modelización

Oscilación forzada y resonancia

En teoría de osciladores, un sistema forzado puede alcanzar resonancia cuando la frecuencia de la fuerza coincide con la frecuencia natural. La respuesta en amplitud crece hasta que amortiguamiento interno equilibra la entrada energética (espanol.libretexts.org).

Aplicado al sistema oceánico-electromagnético, las ecuaciones de marea (ondas largas, ecuación clásica $\partial^2 \eta / \partial t^2 = gh \partial^2 \eta / \partial x^2$) y la inducción electromagnética generan modos resonantes específicos con duraciones compatibles con M_2 , O_1 , etc (espanol.libretexts.org).

Acoplamiento oceánico-manto

La conductividad eléctrica vertical varía entre sedimentos, océano y manto. El campo inducido responde a estas transiciones: se generan componentes toroidales e inductivos que afectan la amplitud y fase de la señal detectada a órbitas satelitales (SpringerOpen, arxiv.org).

La validación cuantitativa de este acoplamiento electromagnético es crucial para sustentar METFI como teoría consistente.

Amplitud y estructura espacial de las señales electromagnéticas inducidas

Niveles de señal

La intensidad de las señales electromagnéticas inducidas por mareas depende de varios factores: velocidad de corriente maremotriz, geometría local, profundidad, y conductividad del medio. Para la constituyente M_2 , los análisis Swarm y CHAMP han reportado amplitudes típicas de:

- 0.5 a 1.5 nT en regiones costeras o con plataformas continentales extensas;
- 0.05 a 0.2 nT en áreas oceánicas profundas;
- señal más fuerte en latitudes medias y en regiones como el Atlántico Norte, costa de Chile y plataformas africanas (Grayver et al., 2021).

Estas amplitudes son coherentes con las simulaciones globales tridimensionales. En comparación, el ruido magnético asociado a actividad ionosférica o interacciones magnetosféricas suele ser de magnitud superior (> 10 nT), pero con espectro distinto y separable mediante técnicas armónicas.

Estructura modal

Los modos resonantes más prominentes para M_2 muestran estructuras simétricas respecto al ecuador. Se observan dipolos en hemisferios opuestos y nodos en cuencas cerradas. El modelado armónico evidencia que los picos energéticos coinciden con plataformas resonantes: Bahía de Fundy (Canadá), plataforma patagónica (Argentina), Golfo de Alaska.

Para otras mareas como O_1 (diurna), los patrones exhiben asimetría hemisférica, lo cual es consistente con el forzamiento gravitacional lunar desplazado.

Evaluación del error y validación

Métodos de reducción de error

Los errores en la estimación de señales electromagnéticas maremotrices provienen de:

- error instrumental del magnetómetro;
- aliasing por señales antropogénicas;
- mal modelado de la ionosfera o de corrientes de Sq (solar quiet);
- error por no linealidad en el acoplamiento marino.

Para mitigar estos, se utilizaron filtros espectrales (bandpass) centrados en frecuencias armónicas, además de segmentación temporal basada en momentos de baja actividad solar. La herramienta KALMAG (Kalman Filter with Gaussian Priors) logró reducir el error de estimación de señal M_2 a < 0.15 nT en 85 % de las regiones estudiadas (Grayver et al., 2021; Kuvshinov, 2012).

Comparación inter-producto

La comparación entre los modelos de Grayver (GFZ), Kuvshinov (ETH Zurich) y Velímský (Praga) reveló coherencia espacial y temporal en la estructura de señales. Las diferencias relativas se reducen a < 5 % en regiones donde los datos satelitales presentan mejor cobertura. Estas

coincidencias validan no solo la existencia del fenómeno, sino la posibilidad de usarlo como herramienta de inferencia geofísica.

Interpretación METFI del fenómeno: un nuevo marco coherente

La propuesta METFI no implica un rechazo de la teoría gravitacional tradicional, sino una ampliación de su marco para integrar las propiedades electromagnéticas derivadas del movimiento de agua salada en presencia de un campo magnético planetario. Esta integración permite:

- Comprender la generación de campos secundarios en frecuencias mareales;
- Inferir propiedades eléctricas del manto terrestre mediante inversión de datos mareales;
- Modelar fenómenos electromagnéticos de largo alcance como resonancias inducidas globalmente.

A diferencia de modelos gravitacionales puramente mecánicos, METFI proporciona una explicación unificada de fenómenos que presentan periodicidad estricta, acoplamiento con campo geomagnético, y manifestaciones detectables vía magnetometría orbital.

Conclusión

El enfoque METFI ha permitido consolidar una nueva interpretación sobre las mareas, no sólo como fenómenos hidrodinámicos, sino como oscilaciones resonantes electromagnéticas activadas por el movimiento del agua salada en el seno del campo geomagnético. Este enfoque, validado por datos satelitales independientes y modelado tridimensional coherente, constituye una teoría integral, sin depender de fuentes comprometidas ni sesgos institucionales.

- Las mareas oceánicas generan campos electromagnéticos detectables por satélites como CHAMP y Swarm.
- Las señales inducidas coinciden con los modos de resonancia oceánica, especialmente para M_2 , O_1 y N_2 .
- El acoplamiento oceánico-manto permite inferir la estructura eléctrica interna de la Tierra.
- Los modelos tridimensionales han sido validados por múltiples grupos independientes sin conflictos de interés.
- METFI ofrece un marco físico-coherente alternativo que incluye propiedades electromagnéticas de las mareas como oscilaciones resonantes.

Referencias

- 1.Grayver, A. et al. (2021) – Swarm-based mapping of ocean tidal magnetic signals

- Estudio clave en modelado armónico de señales mareales con datos Swarm; usa métodos robustos de inferencia bayesiana. Muestra evidencia de resonancia modal y alta calidad en reducción de error.

2.Velínský, J. et al. (2018) – Comparison of two 3-D electromagnetic field modeling approaches

- Contrasta modelos tridimensionales usando técnicas de elementos finitos e integrales armónicas; concluye necesidad de acoplamiento completo océano-manto para precisión adecuada.

3.Kuvshinov, A. (2012) – Electromagnetic induction studies in the oceans: from theory to global models

- Desarrolla los fundamentos físicos de la inducción oceánica, propone modelos globales consistentes y validados empíricamente.

4.Swarm ESA Mission (2013–2025) – Magnetometry data for Earth’s interior

- Proporciona series temporales de alta resolución sobre variaciones del campo magnético terrestre, incluyendo efectos inducidos por mareas.

5.CHAMP Mission (2000–2010) – German Aerospace Center & GFZ Potsdam

- Misiones pioneras en medir variaciones del campo magnético con precisión suficiente para estudiar señales de origen maremotriz.

6.Resonancia de Marea – AcademiaLab

- Revisión teórica sobre resonancia maremotriz; identifica condiciones geométricas para amplificación.



Tidal
forcing

METFI

Tides as electromagnetic
Resonant Oscillation

B_m

Air

Ocean

Mantle

Core

Induced currents

Resonant
oscillation

b Induced magnetic field

magnet er inetic

