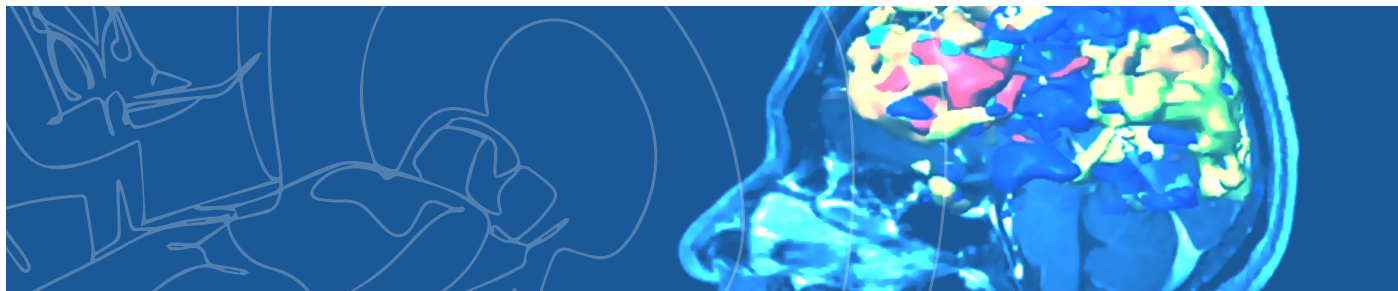


Revisión bibliográfica



Resonancia magnética funcional (fMRI-BOLD): avances, aplicaciones clínicas, hipoxia tumoral y perspectivas de implementación hospitalaria- Revisión narrativa

Functional magnetic resonance imaging (fMRI-BOLD): advances, clinical applications, tumor hypoxia, and prospects for hospital implementation—A narrative review

Daniel Fernando Aguirre-Reyes^{1, 2A}

1 Sociedad de Lucha Contra el Cáncer, SOLCA Núcleo de Loja

2 Hospital Clínica San Agustín

Fecha recepción: 20-11-2025

Fecha aceptación: 02-12-2025

Fecha publicación: 28-12-2025


Resumen

Las imágenes de resonancia magnética funcional (fMRI), basadas en el contraste dependiente del nivel de oxigenación en sangre (*Blood Oxygen Level-Dependent*, BOLD), constituyen una herramienta esencial para el estudio no invasivo de la actividad cerebral y de la oxigenación tisular en diversos órganos. Dicho método aprovecha las propiedades paramagnéticas de la desoxihemoglobina para evaluar cambios hemodinámicos vinculados con la actividad neuronal o metabólica. En esta revisión de carácter narrativo se sintetiza la evidencia científica publicada entre 2013 y 2025 sobre las aplicaciones clínicas del fMRI-BOLD, abarcando los campos neurológicos (fMRI), renal, muscular, oncológico y cardiovascular (BOLD-MRI). Asimismo, se analiza su potencial implementación hospitalaria en Ecuador considerando la infraestructura existente, los avances institucionales en diagnóstico por imagen y las oportunidades de desarrollo científico. La literatura revisada demuestra la utilidad del fMRI-BOLD en la caracterización funcional del cerebro, en la detección de hipoxia tumoral y en la monitorización de la respuesta terapéutica en cáncer. En Ecuador, la disponibilidad creciente de resonadores de 1.5 y 3 Teslas en hospitales públicos y privados, junto con el fortalecimiento de la investigación universitaria, ofrece condiciones favorables para incorporar esta tecnología en protocolos de diagnóstico y planificación clínica. Se concluye que la adopción estratégica del fMRI-BOLD fortalecería las capacidades nacionales en neuroimagen avanzada, medicina de precisión y radioterapia guiada por imagen funcional.

PALABRAS CLAVE:

Resonancia magnética funcional, fMRI, BOLD, neuroimagen

A E-mail: danaguir.hcsa@gmail.com

 ORCID iD: 0000-0003-2822-6573

Abstract

Functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI) based on the Blood Oxygen Level-Dependent (BOLD) contrast is a noninvasive tool for assessing brain activity and tissue oxygenation across multiple organs. This review summarizes scientific evidence published between 2013 and 2025 on clinical applications of fMRI-BOLD, including neurological, renal, muscular, oncological, and cardiovascular domains. It also analyzes its potential hospital implementation in Ecuador, considering national imaging infrastructure and institutional advances in diagnostic radiology and research. The reviewed literature highlights fMRI-BOLD's role in mapping neuronal activation (fMRI), detecting tumor hypoxia, and monitoring therapeutic response in cancer (BOLD-MRI). In Ecuador, the increasing availability of 1.5 and 3 Tesla MRI scanners and the strengthening of university-based research create favorable conditions for integrating this technique into clinical protocols. The strategic adoption of fMRI-BOLD would enhance national capacity for advanced neuroimaging, precision medicine, and image-guided radiotherapy.

KEYWORDS:

Functional magnetic resonance imaging, fMRI, BOLD, neuroimage

Introducción

La resonancia magnética funcional (fMRI) es una de las herramientas de imagen médica más sofisticadas en uso hoy en día. El principio se basa en la detección de fluctuaciones en la oxigenación de la sangre relacionadas con la función neuronal o metabólica, conocida como el efecto dependiente del nivel de oxígeno en sangre (BOLD, por sus siglas en inglés) ⁽¹⁾. Según un estudio publicado por Ogawa en la década de 1990, este comportamiento se basa en la respuesta paramagnética a la desoxihemoglobina, producida por variaciones de la señal T2* reflejadas por secuencias de eco de gradiente.

La evolución de la fMRI-BOLD ha transformado la descripción funcional del cerebro al identificar redes neuronales activas durante eventos cognitivos o motores ⁽²⁾. El término fMRI se refiere a la neuroimagen funcional, mientras que BOLD-MRI se refiere a aplicaciones extracerebrales, y se ha utilizado esta técnica tanto para investigar órganos extraneurales —riñón, músculo, miocardio, hígado y tejidos tumorales— como para cuantificar la oxigenación tisular sin la necesidad de agentes de contraste ⁽³⁾.

En los últimos años, se han presenciado varios desarrollos tecnológicos en resonadores de alto campo (1.5, 3, 7 y 9.4 Teslas) que han permitido obtener imágenes con mayor resolución temporal y espacial para su uso en la práctica clínica. En Ecuador, en el contexto actual, la fMRI-BOLD se está consolidando; los hospitales de tercer nivel y varios proveedores de servicios privados cuentan con equipos de resonancia magnética de 1.5 y 3 T para la realización de estas secuencias, y pueden llevar a cabo servicios de resonancia magnética estructural y posiblemente funcional. La UTPL, a nivel de laboratorios, y la

Universidad del Azuay han desarrollado proyectos en líneas de investigación en neurociencia y procesamiento de señales ^{(4), (5), (6), (7)}, que preparan al país para la adopción de la fMRI-BOLD clínica. El objetivo de esta revisión es evaluar la evidencia científica reciente relacionada con la resonancia magnética funcional basada en el efecto BOLD, la utilidad clínica de esta en la evaluación de la hipoxia tumoral y las posibles vías para la adopción hospitalaria desde Ecuador.

Metodología

La presente revisión se desarrolló bajo un enfoque narrativo, con la intención de sintetizar y contextualizar la evidencia disponible sobre las aplicaciones clínicas y biomédicas del fMRI-BOLD en nuestro país. Se realizó una búsqueda exploratoria no sistemática de la literatura publicada entre los años 2013 y 2025 en las bases de datos PubMed, Google Scholar, PubMed Central y repositorios de acceso abierto. Aunque se consultaron fuentes indexadas como Scopus y ScienceDirect, su uso se limitó a la identificación de las referencias y los DOI idóneos, accediendo únicamente a versiones de libre disponibilidad.

Se emplearon combinaciones de términos y palabras clave relacionadas, tales como “functional MRI”, “BOLD”, “brain activation”, “renal oxygenation”, “tumor hypoxia”, “oxygenation imaging” y “Ecuador”. La selección de estudios se realizó mediante un proceso iterativo en tres etapas: revisión del título, análisis del resumen y lectura completa de los textos potencialmente relevantes. Además, se aplicó la técnica de rastreo recursivo o *snowballing* para identificar artículos adicionales citados en estudios clave.

Debido al carácter narrativo de la revisión, los criterios de inclusión de los artículos se mantuvieron flexibles, pero buscando coherencia con el objetivo del trabajo. Se incluyeron artículos originales, estudios clínicos, revisiones y reportes experimentales que incluyen aplicaciones de fMRI-BOLD en contextos neurológicos, renales, musculares, oncológicos o cardiovasculares. Se excluyeron los trabajos que no mantuvieran relación directa con la temática.

En total, se analizaron 34 estudios que aportaron datos relevantes sobre fundamentos fisiológicos, evolución tecnológica, aplicación en el país y utilidad clínica del fMRI-BOLD. No se aplicaron criterios formales de evaluación de riesgo de sesgo ni procedimientos propios de revisiones sistemáticas, lo cual constituye una limitación inherente al enfoque narrativo. Sin embargo, esta metodología permitió integrar evidencia heterogénea y emergente dentro de un marco conceptual amplio y contextualizado.

Resultados

Fundamentos clínicos del efecto BOLD

Este efecto describe los avances logrados en la comprensión de su uso para la evaluación, el diagnóstico y la detección de diferentes patologías, como, por ejemplo, renales, en el caso de enfermedades glomerulares, incluidos los síndromes nefróticos y nefríticos primarios y secundarios⁽⁸⁾. Además, evalúa la capacidad para medir la biodisponibilidad tisular de oxígeno según los valores de $R2^*$ y diferenciar entre necrosis tubular aguda y rechazo agudo en comparación con la biopsia renal como prueba de referencia⁽⁹⁾; esta técnica adapta el método utilizado previamente en cerebros y riñones de ratas a riñones humanos, con lo que se demuestra la viabilidad de estimar la saturación de oxígeno de la hemoglobina y la oxigenación sanguínea en la corteza y la médula renal, lo que fue realizado en un pequeño número de voluntarios sanos y personas con enfermedad renal crónica⁽¹⁰⁾.

En otro órgano, como es el cerebro, hay casos en que se investiga una diferencia hipotética en la activación BOLD durante una tarea de atención selectiva en la memoria de trabajo en niños prematuros con peso extremadamente bajo al nacer en comparación con controles nacidos a término⁽¹¹⁾; esta técnica también se aplica en el cerebro normal para identificar los tumores y distinguirlos del tejido sano circundante⁽¹²⁾.

El efecto BOLD depende de la variación del contenido de desoxihemoglobina en la sangre venosa. En realidad, durante la activación neuronal, el aumento del flujo sanguíneo regional generalmente excede al incremento del consumo de oxígeno y disminuye la concentración de desoxihemoglobina venosa. Esto provoca un aumento de $T2$, una reducción de $R2$ ($R2^* = 1/T2^*$) y, por lo tanto, un incremento en la señal BOLD en secuencias sensibles a $T2^*$. En contraste, condiciones de mayor extracción de oxígeno o hipoxia relativa incrementan la concentración de desoxihemoglobina, lo cual reduce $T2^*$, aumenta $R2^*$ y, en consecuencia, disminuye la señal BOLD. Cuando una región cerebral se activa, aumenta el flujo sanguíneo local más de lo que crece el consumo de oxígeno, lo que genera una disminución de la señal $R2^*$ y aumenta la señal BOLD⁽¹³⁾. Este principio se extrapola a otros órganos y permite medir cambios de oxigenación en tejidos renales, musculares o tumorales.

A pesar del tiempo de uso de la técnica BOLD, es necesario establecer y calibrar la señal por medio de aplicaciones previas, con el fin de tener un protocolo validado y estandarizado para evitar inconvenientes con la medida⁽³⁴⁾. También se debe reconocer sus pros y contras; una de las principales ventajas de la señal BOLD es su resolución espacial relativamente alta y su disponibilidad, es no invasiva y puede proporcionar escaneos anatómicos de alta resolución en la misma sesión para su uso en localización, identificación de vasos sanguíneos o desarrollo de mapas de conectividad de la sustancia blanca mediante el uso de imágenes de tensor de difusión (DTI). Una debilidad importante es su baja resolución temporal, la pérdida de señal y la distorsión espacial en las regiones frontoorbitales y parietales laterales, causada por la diferencia en la susceptibilidad magnética en las interfaces entre el aire y el tejido cerebral⁽³⁵⁾. Además, es importante considerar que la señal BOLD puede ser afectada por la edad, por lo que el análisis debe ser cuidadosamente revisado⁽³⁸⁾.

Aplicaciones neurológicas y neurofuncionales

En neurociencias, la fMRI permite mapear la actividad cortical y subcortical en tiempo real. Griffiths et al. (2013) demostraron activación reducida en niños prematuros durante tareas de atención y memoria, lo cual refleja inmadurez funcional⁽¹¹⁾. En el ámbito oncológico cerebral, Feldman et al. (2009) utilizaron la fMRI para diferenciar tejido tumoral de parénquima normal sin necesidad de contraste⁽¹²⁾.

Dinatolo et al. (2023) ⁽¹⁸⁾ analizaron la variabilidad de la fMRI en población pediátrica, observando que las fluctuaciones intraindividuales constituyen un biomarcador del desarrollo neurológico. Estos hallazgos sustentan la aplicabilidad clínica del fMRI en epilepsia, tumores y planificación neuroquirúrgica. En nuestros hospitales ecuatorianos con resonadores de 1.5 y 3T, esta herramienta podría integrarse como una ayuda secundaria en estudios prequirúrgicos de tumores cerebrales o epilepsias focales.

Aplicaciones renales y metabólicas

La señal BOLD renal permite estimar la oxigenación medular y cortical. Los valores derivados de T2, especialmente R2, deben interpretarse como marcadores indirectos de cambios en susceptibilidad magnética y oxigenación relativa, pero no representan mediciones directas de presión parcial de oxígeno (pO_2). Estos parámetros pueden verse influidos por perfusión renal, volumen sanguíneo, hematocrito, estado de hidratación, fármacos, características microestructurales y variabilidad técnica (número de ecos, tiempo de eco (TE), campo magnético o movimiento). Por lo tanto, su uso es más robusto en comparaciones intraindividuo o bajo condiciones fisiológicas controladas y no como mediciones absolutas de oxigenación. Para la implementación clínica se recomienda el uso de secuencias multi-eco T2 con protocolos estandarizados, control de variables fisiológicas básicas (hidratación, hematocrito, presión arterial) y análisis integrado con hallazgos clínicos y otros biomarcadores renales.

Chen et al. (2018) ⁽³⁾ describieron los principales métodos de análisis del BOLD renal, como ROI, compartimental, hipoxia fraccional y modelos concéntricos. Posteriormente, Prasad et al. (2023) validaron el método cuantitativo (qBOLD) para estimar la presión parcial de oxígeno intrarrenal en pacientes con enfermedad renal crónica ⁽¹⁰⁾.

Asimismo, Nemirovsky et al. (2021) y Mendes et al. (2021) demostraron que la señal BOLD detecta hipoxia antes de alteraciones estructurales en trasplantes o glomerulopatías ^(8,9). Prasad et al. (2023) corroboraron que la combinación de fracción sanguínea y saturación de oxígeno mejora la correlación con la tasa de filtración glomerular ⁽¹⁰⁾. Por su parte, Lin et al. (2022) investigaron la viabilidad y la precisión de la señal BOLD para predecir la mejoría de la función renal diferencial tras la colocación de un stent en la arteria renal en pacientes con estenosis aterosclerótica de la arteria renal, obteniendo una buena sensibilidad y especificidad en sus resultados ⁽²⁹⁾. En

Ecuador, la implementación hospitalaria de esta técnica sería clave para evaluar hipoxia renal en pacientes con diabetes o hipertensión, y reducir así la dependencia de biopsias invasivas.

Aplicaciones musculares y fisiológicas

Huang et al. (2021) evidenciaron que el mapeo de la señal BOLD muscular permite cuantificar la perfusión y recuperación postejercicio. Este descubrimiento, al ser útil en rehabilitación y medicina deportiva ⁽¹³⁾, podría incorporarse en hospitales con áreas de fisioterapia avanzada y programas de rehabilitación integral.

Aplicaciones oncológicas y radioterapéuticas

La señal BOLD se ha consolidado como biomarcador de hipoxia tumoral, factor crítico en la resistencia a radioterapia. Kim et al. (2021) establecen las diferencias entre tejido cancerígeno y benigno en próstata ⁽¹⁴⁾ y Lee et al. (2019) demostraron que los valores elevados de R2* en cáncer de cérvix predicen progresión y supervivencia desfavorable tras quimiorradioterapia ⁽²³⁾. Aunque múltiples estudios han mostrado correlaciones entre parámetros como R2, $\Delta R2$ o qBOLD y la presencia de hipoxia tumoral, estos valores no deben interpretarse como marcadores directos o definitivos de hipoxia. La señal BOLD puede verse afectada por factores como perfusión, fracción vascular, hematocrito, necrosis, hemorragia, heterogeneidad microvascular y variabilidad en los parámetros de adquisición. Por ello, este indicador debe considerarse una técnica prometedora pero aún no estandarizada para evaluación de hipoxia tumoral, pues requiere validación multicéntrica y correlación con biomarcadores o modalidades complementarias. Zheng et al. (2024) reportaron resultados en carcinoma esofágico, donde el incremento postratamiento del R2* se asoció a mayor supervivencia ⁽¹⁵⁾.

Bartsch et al. (2023) y Sebestyén et al. (2021) confirmaron que la señal BOLD puede caracterizar subtipos moleculares de cáncer de mama y cuantificar la respuesta terapéutica al inducir hiperoxia ^(16, 17). Estas evidencias respaldan su utilidad como herramienta complementaria en radioterapia adaptativa y monitoreo de hipoxia tumoral ⁽²²⁾. Según Lee et al. (2019), la señal BOLD se puede usar como predictor de resultados clínicos en pacientes con cáncer cervical tratadas con quimioterapia concurrente debido a que los valores de R2* fueron significativamente diferentes entre los pacientes con y sin progresión de la enfermedad ⁽²³⁾. De acuerdo a Jordan y

Soveaux (2012), una ventaja de la señal BOLD es que es no invasivo y se puede usar para monitorear en tiempo real los cambios de la oxigenación tumoral durante el tratamiento farmacológico, pero su desventaja es que es un método no cuantitativo para monitorear los tumores, dada la extrema sensibilidad a los cambios de $R2^*$ ⁽²⁴⁾.

En opinión de Duan et al. (2022), se podría detectar mejor la diferencia entre tumores musculoesqueléticos benignos y malignos mediante análisis de espectro de potencia utilizando imágenes con señal BOLD ⁽²⁵⁾. De igual forma, Chen y Ni (2014) afirman que la señal BOLD es un método útil para evaluar el incremento de la oxigenación del tumor para radiosensibilizarlo previo a la radioterapia; también caracteriza el crecimiento de un tumor, lo que lo hace una herramienta no invasiva para evaluar los cambios hemodinámicos del oxígeno y el efecto farmacológico de las drogas antitumores. Esto correlaciona la respuesta neoadyuvante con quimioterapia en cáncer de mama e indica que existe reducción de la señal BOLD en pacientes con terapia deprivatoria andrógena en el cerebro ⁽²⁶⁾.

Hipoxia tumoral e inmunomodulación cerebral

La hipoxia es un rasgo distintivo de los tumores sólidos. Park y Lee (2023) explicaron que la hipoxia en tumores cerebrales induce inmunosupresión ⁽¹⁹⁾, lo cual afecta la eficacia de inmunoterapias y radioterapia. Esta circunstancia resalta el valor de la señal BOLD para identificar regiones hipóxicas antes del tratamiento, pues esta puede detectar la hipoxia reducida en los tumores sólidos malignos y puede allanar el camino para un enfoque de tratamiento más conservador para los cánceres de cabeza y cuello hipóxicos en el futuro ⁽³³⁾.

Respecto a glioblastomas, los investigadores del estudio MANGO (2023) validaron el uso de la señal BOLD como un biomarcador no invasivo de hipoxia, correlacionándolo con la tomografía por emisión de positrones (PET) ⁽²⁰⁾. En Ecuador, donde los servicios de neurooncología avanzan, su incorporación permitiría un monitoreo funcional sin radiación ionizante. Siguiendo con los glioblastomas, Virani et al. (2021) indican que la señal BOLD se correlaciona con las mediciones de hipoxia inducidas por pimonidazol en un modelo ortotópico de esta enfermedad, lo que ayuda a monitorizar la hipoxia durante el desarrollo tumoral y el tratamiento ⁽²⁷⁾.

Actualmente, y acorde a Lin et al. (2022), existen estudios para obtener imágenes de la hipoxia midiendo cam-

bios en la relajación longitudinal y la relajación transversal efectiva, inducida por la inhalación de oxígeno al 100%, pero la mayoría de ellos son en animales y se necesita más datos para confirmar y replicar de manera consistente en tipos de cáncer humanos ⁽²⁹⁾.

Biomarcadores de señal BOLD en pronóstico y respuesta terapéutica

Los parámetros $R2^*$, $\Delta R2^*$ y qBOLD son indicadores confiables de oxigenación y respuesta tumoral ^(10, 13, 15, 23, 29, 37). En el ámbito cardiovascular, Alogna et al. (2023) demostraron que la señal T2-BOLD correlaciona con la saturación venosa central medida por cateterismo, lo que abre la posibilidad de aplicar la señal BOLD en cardiología no invasiva ⁽²¹⁾.

La integración de estos biomarcadores en protocolos clínicos ecuatorianos permitiría avanzar hacia la medicina de precisión, optimizando terapias oncológicas, renales y cardiológicas.

Perspectivas hospitalarias y protocolos en Ecuador

La estrategia nacional para incorporar fMRI-BOLD debería considerar tres pilares:

1. **Capacitación profesional** en adquisición y análisis de datos funcionales ^{(31), (32) (33)}.
2. **Estandarización de protocolos clínicos** (neuro, renal y oncológico) ⁽³³⁾.
3. **Análisis de aplicaciones clínicas** abordando temas relacionados con niños, lesiones cerebrales, estimulación transcraneal, registro junto a electroencefalografía, epilepsia, procesamiento de lenguaje, afasias, lateralización del lenguaje, función somatosensorial y motora, estado de reposo, resección quirúrgica, estimulación cortical, conectividad del sistema motor, múltiple esclerosis, hipocampo, enfermedad de Alzheimer y demencia, párkinson, y sus correspondientes consideraciones éticas ⁽³⁷⁾.
4. **Red académica-hospitalaria** que conecte universidades con hospitales públicos y privados, promoviendo investigación aplicada.

Conclusiones

La técnica fMRI-BOLD es una tecnología consolidada de manera clara en neuroimagen funcional, mientras que las aplicaciones extracerebrales se encuentran aún en proceso de consolidación, lo que hace que en el primer caso se tenga un alto potencial clínico en Ecuador. La

evidencia demuestra su utilidad en la evaluación de la oxigenación cerebral, renal, muscular y tumoral, así como en la predicción de respuesta terapéutica. Es importante considerar que los parámetros derivados de la señal BOLD reflejan un fenómeno dependiente de susceptibilidad magnética y no una medida directa de metabolismo o flujo sanguíneo. Su interpretación requiere un enfoque multimodal y especificar el contexto clínico.

La infraestructura hospitalaria nacional cuenta con resonadores capaces de ejecutar secuencias fMRI-BOLD, lo

que facilita su adopción. Su implementación fortalecería la capacidad diagnóstica, la investigación biomédica y la planificación terapéutica en enfermedades neurológicas, oncológicas y cardiovasculares.

El impulso coordinado entre el Ministerio de Salud, universidades y hospitales podría posicionar a Ecuador como referente regional en neuroimagen funcional aplicada, y, al mismo tiempo, contribuir al desarrollo de la medicina de precisión y la radiología avanzada.

Bibliografía

1. Ogawa S, Lee T -M, Nayak AS, Glynn P. Oxygenation-sensitive contrast in magnetic resonance image of rodent brain at high magnetic fields. *Magn Reson Med* [Internet]. 1990 [cited 2025 Oct 26];14(1):68-78. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/2161986/>
2. Logothetis NK. What we can do and what we cannot do with fMRI. *Nature* [Internet]. 2008 Jun 12 [cited 2025 Oct 26];453(7197):869-78. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18548064/>
3. Chen F, Li S, Sun D. Methods of Blood Oxygen Level-Dependent Magnetic Resonance Imaging Analysis for Evaluating Renal Oxygenation. *Kidney Blood Press Res* [Internet]. 2018 [cited 2025 Oct 26];43(2):378-88. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29539614/>
4. Mapeo de la función cerebral utilizando resonancia magnética funcional en una tarea de atención, STROOP, en participantes de Loja, Ecuador. | PDF | Lóbulo temporal | Color [Internet]. [cited 2025 Oct 26]. Available from: <https://es.scribd.com/document/238668068/Mapeo-de-la-Funcion-Cerebral-utilizando-Resonancia-Magnetica-Funcional-en-una-tarea-de-atencion-STROOP-en-participantes-de-Loja-Ecuador>
5. Macisneros | Investigacion [Internet]. [cited 2025 Oct 26]. Available from: <https://investigacion.utpl.edu.ec/macisneros>
6. Cadme-Orellana D, Estévez F, Aguirre-Reyes D, Bueno G, Alvarado O, López A. Propuesta de un paradigma computarizado para valorar memoria de trabajo. *Proposal Of A Computerized Paradigm For Evaluation Of Working Memory. Revista Ecuatoriana de Neurología* 29 ARTÍCULO ORIGINAL *Rev Ecuat Neurol.* 2020;29(1):2020, 10.46997/revecuatneurol29200029.
7. Shunta-Cocha F, Estévez F, Aguirre-Reyes D, Alvarado-Cando O, López-Hidalgo A, Peña-Tapia P, Bueno-Pacheco A. Validación de un paradigma de razonamiento abstracto para resonancia magnética funcional (RMf). *Revista Ecuatoriana de Neurología* [Internet]. 2021 Nov 3 [cited 2025 Oct 26];29(2):58-66. Available from: <https://revecuatneurol.temp.publicknowledgeproject.org/index.php/revecuatneurol/article/view/1459, 10.46997/revecuatneurol29200058>

8. Nemirovsky DR, Gupta P, Hu S, Wong R, Thakor AS. Blood Oxygen Level-Dependent (BOLD) MRI in Glomerular Disease. *Transplantology* 2021, Vol 2, Pages 109-117 [Internet]. 2021 Apr 2 [cited 2025 Oct 23];2(2):109-17. Available from: <https://www.mdpi.com/2673-3943/2/2/11/htm>
9. Mendes GF, Falsarella PM, Garcia RG, Sanches LG, Baroni RH. Evaluation of the blood-oxygen-level-dependent (BOLD) sequence with 3 Tesla device in renal transplant patients in the assessment of early allograft dysfunction, correlated with biopsy. *Einstein (Sao Paulo)* [Internet]. 2021 [cited 2025 Oct 23];19:eAO6069. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34431851/>
10. Prasad P V., Li LP, Hack B, Leloudas N, Sprague SM. Quantitative Blood Oxygenation Level Dependent Magnetic Resonance Imaging for Estimating Intra-renal Oxygen Availability Demonstrates Kidneys Are Hypoxemic in Human CKD. *Kidney Int Rep* [Internet]. 2023 May 1 [cited 2025 Oct 23];8(5):1057-67. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468024923012123>
11. Griffiths ST, Gundersen H, Neto E, Elgen I, Markestad T, Aukland SM, et al. fMRI: blood oxygen level-dependent activation during a working memory-selective attention task in children born extremely preterm. *Pediatr Res* [Internet]. 2013 Aug [cited 2025 Oct 23];74(2):196-205. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23823155/>
12. Feldman SC, Chu D, Schulder M, Barry M, Cho ES, Liu WC. The blood oxygen level-dependent functional MR imaging signal can be used to identify brain tumors and distinguish them from normal tissue. *AJNR Am J Neuroradiol* [Internet]. 2009 Feb [cited 2025 Oct 23];30(2):389-95. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19208905/>
13. Huang Y, Wei J, Han D, Jiang Y, Zhang J, Zhang Z, et al. Muscular blood oxygen level-dependent MRI is beneficial to evaluate effectiveness of an exercise prescription. *Ann Transl Med* [Internet]. 2021 Mar [cited 2025 Oct 23];9(6):470-470. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33850867/>
14. Kim Y, Park JJ, Kim CK. Blood oxygenation level-dependent MRI at 3T for differentiating prostate cancer from benign tissue: a preliminary experience. *Br J Radiol* [Internet]. 2022 [cited 2025 Oct 23];95(1131). Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34235962/>
15. Zheng H, Zhang H, Zhu Y, Wei X, Liu S, Ren W. Value of blood oxygenation level-dependent magnetic resonance imaging in early evaluation of the response and prognosis of esophageal squamous cell carcinoma treated with definitive chemoradiotherapy: a preliminary study. *BMC Med Imaging* [Internet]. 2024 Dec 1 [cited 2025 Oct 23];24(1). Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38216885/>
16. Bartsch SJ, Ehret V, Friske J, Fröhlich V, Laimer-Gruber D, Helbich TH, et al. Hyperoxic BOLD-MRI-Based Characterization of Breast Cancer Molecular Subtypes Is Independent of the Supplied Amount of Oxygen: A Preclinical Study. *Diagnostics (Basel)* [Internet]. 2023 Sep 1 [cited 2025 Oct 23];13(18). Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37761313/>

17. Sebestyén A, Kopper L, Dankó T, Tímár J. Hypoxia Signaling in Cancer: From Basics to Clinical Practice. *Pathol Oncol Res* [Internet]. 2021 May 3 [cited 2025 Oct 23];27. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34257622/>
18. Dinatolo MF, Pur DR, Eagleson R, de Ribaupierre S. The Role of Blood Oxygen Level Dependent Signal Variability in Pediatric Neuroscience: A Systematic Review. *Life (Basel)* [Internet]. 2023 Jul 1 [cited 2025 Oct 23];13(7). Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37511962/>
19. Park JH, Lee HK. The Role of Hypoxia in Brain Tumor Immune Responses. *Brain Tumor Res Treat* [Internet]. 2023 Jan 1 [cited 2025 Oct 23];11(1):39-46. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36762807/>
20. Brighi C, Waddington DEJ, Keall PJ, Booth J, O'Brien K, Silvester S, et al. The MANGO study: a prospective investigation of oxygen enhanced and blood-oxygen level dependent MRI as imaging biomarkers of hypoxia in glioblastoma. *Front Oncol* [Internet]. 2023 [cited 2025 Oct 23];13. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38192626/>
21. Alogna A, Faragli A, Kolp C, Doeblin P, Tanacli R, Confortola G, et al. Blood-Oxygen-Level Dependent (BOLD) T2-Mapping Reflects Invasively Measured Central Venous Oxygen Saturation in Cardiovascular Patients. *JACC Cardiovasc Imaging* [Internet]. 2023 Feb 1 [cited 2025 Oct 23];16(2):251-3. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36648039/>
22. The Importance of Oxygen in Tumours; Accelerating Oncology Research | Oxford Optronix [Internet]. [cited 2025 Oct 26]. Available from: <https://www.oxford-optronix.com/resources/the-importance-of-oxygen-in-tumours-accelerating-oncology-research>
23. Lee J, Kim CK, Gu K won, Park W. Value of blood oxygenation level-dependent MRI for predicting clinical outcomes in uterine cervical cancer treated with concurrent chemoradiotherapy. *Eur Radiol* [Internet]. 2019 Nov 1 [cited 2025 Oct 23];29(11):6256-65. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31016443/>
24. Jordan BF, Sonveaux P. Targeting tumor perfusion and oxygenation to improve the outcome of anticancer therapy. *Front Pharmacol* [Internet]. 2012 [cited 2025 Oct 26];3. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22661950/>
25. Duan L, Huang H, Sun F, Zhao Z, Wang M, Xing M, et al. Comparing the blood oxygen level-dependent fluctuation power of benign and malignant musculoskeletal tumors using functional magnetic resonance imaging. *Front Oncol* [Internet]. 2022 Aug 12 [cited 2025 Oct 23];12. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36059651/>
26. Chen F, Ni Y. Magnetic Resonance Imaging of Cancer Therapy. *Cancer Theranostics* [Internet]. 2014 Jan 1 [cited 2025 Oct 23];95-126. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780124077225000074>
27. Virani N, Kwon J, Zhou H, Mason R, Berbeco R, Protti A. In vivo hypoxia characterization using blood oxygen level dependent magnetic resonance imaging in a precli-

- nical glioblastoma mouse model. Magn Reson Imaging [Internet]. 2021 Feb 1 [cited 2025 Oct 23];76:52-60. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0730725X2030638X>
28. O'Connor JPB, Robinson SP, Waterton JC. Imaging tumour hypoxia with oxygen-enhanced MRI and BOLD MRI. Br J Radiol [Internet]. 2018 [cited 2025 Oct 26];92(1096):20180642. Available from: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6540855/>
29. Lin Z, Zhang B, Lin L, Wang R, Niu G, Yan Z, et al. Prediction of Split Renal Function Improvement After Renal Artery Stenting by Blood Oxygen Level-Dependent Magnetic Resonance Imaging. Front Cardiovasc Med [Internet]. 2022 Feb 28 [cited 2025 Oct 26];9. Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35295270/>
30. SPM - Statistical Parametric Mapping [Internet]. [cited 2025 Oct 26]. Available from: <https://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/>
31. FSL - FMRIB Software Library [Internet]. [cited 2025 Oct 26]. Available from: <https://fsl.fmrib.ox.ac.uk/fsl/docs/>
32. Filippi M, editor. fMRI Techniques and Protocols. 2016 [cited 2025 Oct 26];119. Available from: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4939-5611-1>
33. Asha M, Ghorai L, Rajarathnam B, Kumar M, Jasti S, Deepak P. A BOLD appraisal of cancer. J Med Radiol Pathol Surg [Internet]. 2015 [cited 2025 Oct 23]. DOI: 10.15713/ins.jmrps.26
34. Blockley N, Griffeth V, Simon A, Buxton R, A review of calibrated blood oxygenation level-dependent (BOLD) methods for the measurement of task-induced changes in brain oxygen metabolism. NMR Biomed. 2013. DOI: 10.1002/nbm.2847
35. Glover G, Overview of functional magnetic resonance imaging. Neurosurg Clin N Am. DOI: 10.1016/j.nec.2010.11.001
36. Ulmer S & Jansen O. fMRI Basics and Clinical Applications. Springer. DOI: 10.1007/978-3-030-41874-8
37. Jiang L, Weatherall P, McColl R, Tripathy D, Mason R. Blood Oxygenation Level-Dependent (BOLD) Contrast Magnetic Resonance Imaging (MRI) for Prediction of Breast Cancer Chemotherapy Response: A Pilot Study, JMRI, DOI: 10.1002/jmri.23891
38. Weight M & Wise R. Can Blood Oxygenation Level Dependent Functional Magnetic Resonance Imaging Be Used Accurately to Compare Older and Younger Populations? A Mini Literature Review. Front Aging Neurosci. DOI: 10.3389/fnagi.2018.00371

Como citar el presente artículo:

Aguirre-Reyes D. Resonancia magnética funcional (fMRI-BOLD): avances, aplicaciones clínicas, hipoxia tumoral y perspectivas de implementación hospitalaria-Revisión narrativa. Revisión bibliográfica. Indexia. Diciembre 2025.