



REVISTA MULTIDISCIPLINAR EPISTEMOLOGÍA DE LAS CIENCIAS

Volumen 2, Número 4
Octubre-Diciembre 2025

Edición Trimestral

CROSSREF PREFIX DOI: 10.71112

ISSN: 3061-7812, www.omniscens.com

Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias

Volumen 2, Número 4
octubre-diciembre 2025

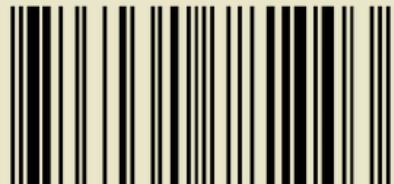
Publicación trimestral
Hecho en México

La Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias acepta publicaciones de cualquier área del conocimiento, promoviendo una plataforma inclusiva para la discusión y análisis de los fundamentos epistemológicos en diversas disciplinas. La revista invita a investigadores y profesionales de campos como las ciencias naturales, sociales, humanísticas, tecnológicas y de la salud, entre otros, a contribuir con artículos originales, revisiones, estudios de caso y ensayos teóricos. Con su enfoque multidisciplinario, busca fomentar el diálogo y la reflexión sobre las metodologías, teorías y prácticas que sustentan el avance del conocimiento científico en todas las áreas.

Contacto principal: admin@omniscens.com

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación

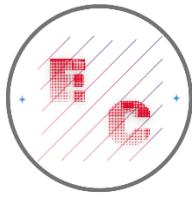
Se autoriza la reproducción total o parcial del contenido de la publicación sin previa autorización de la Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias siempre y cuando se cite la fuente completa y su dirección electrónica.



9773061781003

Cintillo legal

Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias Vol. 2, Núm. 4, octubre-diciembre 2025, es una publicación trimestral editada por el Dr. Moises Ake Uc, C. 51 #221 x 16B , Las Brisas, Mérida, Yucatán, México, C.P. 97144 , Tel. 9993556027, Web: <https://www.omniscens.com>, admin@omniscens.com, Editor responsable: Dr. Moises Ake Uc. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2024-121717181700-102, ISSN: 3061-7812, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor (INDAUTOR). Responsable de la última actualización de este número, Dr. Moises Ake Uc, fecha de última modificación, 1 octubre 2025.



Revista Multidisciplinar Epistemología de las Ciencias

Volumen 2, Número 4, 2025, octubre-diciembre

DOI: <https://doi.org/10.71112/swp9fr96>

**IMPACTO DEL DESEMPEÑO DEL EQUIPO DE ENFERMERÍA EN LA EFECTIVIDAD
DEL PROTOCOLO CLAVE ROJA ANTE HEMORRAGIA OBSTÉTRICA EN
HOSPITALES DE ECUADOR: UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA**

**IMPACT OF NURSING TEAM PERFORMANCE ON THE EFFECTIVENESS OF THE
RED KEY PROTOCOL FOR OBSTETRIC HEMORRHAGE IN ECUADORIAN
HOSPITALS: A SYSTEMATIC REVIEW**

Elvis Fernando Toaza Torres

Martha Magdalena Briones Medina

Jhoana Jazmín Alarcón Arteaga

Susana Mireya Calderon Guzmán

Dayana Gabriela Cutiopala Yausin

Ecuador

Impacto del desempeño del equipo de enfermería en la efectividad del protocolo clave roja ante hemorragia obstétrica en hospitales de Ecuador: una revisión sistemática

Impact of nursing team performance on the effectiveness of the red key protocol for obstetric hemorrhage in Ecuadorian hospitals: a systematic review

Elvis Fernando Toaza Torres

elvis.toaza@hgona.gob.ec

<https://orcid.org/0009-0009-5892-3354>

Hospital Géneco Obstétrico Pediátrico de
Nueva Aurora Luz Elena Arismendi HGONA
Ecuador

Jhoana Jazmín Alarcón Arteaga

jhoana.alarcon@hgona.gob.ec

<https://orcid.org/0009-0001-6513-8129>

Hospital Géneco Obstétrico Pediátrico de
Nueva Aurora Luz Elena Arismendi HGONA
Ecuador

Dayana Gabriela Cutiopala Yausin

dayana.cutiopala@hgona.gob.ec

<https://orcid.org/0009-0003-2662-9261>

Hospital Géneco Obstétrico Pediátrico de
Nueva Aurora Luz Elena Arismendi HGONA
Ecuador

Martha Magdalena Briones Medina

martha.briones@hgona.gob.ec

<https://orcid.org/0009-0007-0654-346X>

Hospital Géneco Obstétrico Pediátrico de
Nueva Aurora Luz Elena Arismendi HGONA
Ecuador

Susana Mireya Calderón Guzmán

susana.calderon@hgona.gob.ec

<https://orcid.org/0009-0003-5398-0217>

Hospital Géneco Obstétrico Pediátrico de
Nueva Aurora Luz Elena Arismendi HGONA
Ecuador

RESUMEN

La hemorragia obstétrica continúa siendo una de las principales causas de muerte materna en el mundo y un desafío prioritario para la salud pública en Ecuador. Ante esta problemática, el protocolo Clave Roja busca estandarizar la respuesta clínica mediante la activación rápida de equipos multidisciplinarios. El objetivo de este estudio fue analizar el impacto del desempeño del equipo de enfermería en la efectividad del protocolo Clave Roja en hospitales ecuatorianos. Se realizó una revisión sistemática conforme a las directrices PRISMA 2020, abarcando publicaciones entre 2020 y 2025 en bases de datos internacionales y regionales. De 612 registros iniciales, se seleccionaron 20 estudios que cumplían con los criterios de inclusión. Los resultados muestran que la detección temprana, la comunicación efectiva y la capacitación continua del personal de enfermería se asocian con una reducción significativa de la morbilidad materna y mejores tiempos de respuesta. La evidencia indica que el liderazgo enfermero y la simulación interprofesional son factores determinantes para la adherencia al protocolo y la calidad asistencial. Se concluye que el fortalecimiento de las competencias técnicas y organizativas del equipo de enfermería mejora la efectividad del protocolo Clave Roja y contribuye a la seguridad materna en el contexto hospitalario ecuatoriano.

Palabras clave: hemorragia obstétrica; clave roja; desempeño de enfermería; seguridad materna

ABSTRACT

Obstetric hemorrhage continues to be one of the leading causes of maternal death worldwide and a priority challenge for public health in Ecuador. In response to this problem, the Clave Roja protocol seeks to standardize clinical response through the rapid activation of multidisciplinary teams. The objective of this study was to analyze the impact of nursing team performance on the effectiveness of the Clave Roja protocol in Ecuadorian hospitals. A systematic review was

conducted according to the 2020 PRISMA guidelines, covering publications from 2020 to 2025 in international and regional databases. From 612 initial records, 20 studies that met the inclusion criteria were selected. The results show that early detection, effective communication, and ongoing training of nursing staff are associated with a significant reduction in maternal morbidity and improved response times. Evidence indicates that nursing leadership and interprofessional simulation are determining factors for adherence to the protocol and quality of care. It is concluded that strengthening the technical and organizational skills of the nursing team improves the effectiveness of the Red Code protocol and contributes to maternal safety in the Ecuadorian hospital setting.

Keywords: obstetric hemorrhage; Red Code; nursing performance; maternal safety

Recibido: 24 de octubre 2025 | Aceptado: 7 de noviembre 2025

INTRODUCCIÓN

La hemorragia obstétrica representa uno de los eventos más críticos y evitables de la atención materna, siendo responsable de una proporción significativa de la morbilidad y mortalidad materna, especialmente en países de medianos y bajos ingresos. La literatura reciente indica que una respuesta organizada y rápida es esencial para mitigar sus efectos adversos (Clark et al., 2024). En este escenario, los protocolos de activación rápida como los denominados “código” u “oportuna movilización de recursos” ante hemorragia obstétrica han emergido como herramientas clave para estructurar la actuación clínica. Estudios recientes señalan que la implementación de protocolos basados en etapas (“stage-based”) se asocia con mejores procesos de atención, al reducir demoras en el diagnóstico y tratamiento. Por ejemplo, una revisión sistemática internacional indicó que los programas de estandarización, cuando son

correctamente implementados, pueden mejorar la adherencia a los bundles terapéuticos y facilitar la movilización de sangre y recursos (Lawrence et al., 2023; Zhang et al., 2025).

Dentro de este tipo de respuesta rápida, el rol del equipo de enfermería y en particular su desempeño en reconocimiento temprano de la hemorragia, cuantificación de la pérdida de sangre, activación del protocolo, administración de uterotónicos e interacción con el equipo multidisciplinario adquiere una relevancia sustancial. Una revisión reciente sobre contribución interprofesional de equipos al manejo de hemorragia obstétrica afirma que “el manejo eficaz de la HPP requiere una colaboración rápida, oportuna e interprofesional del equipo para optimizar la respuesta a esta emergencia materna” (Zenani et al., 2025). Del mismo modo, investigaciones sobre simulación clínica señalan que la mejora de competencias de enfermería en escenarios obstétricos críticos está correlacionada con reducción de intervenciones tardías y mejor tiempo de respuesta (Lutgendorf et al., 2024). Esto lleva a considerar el desempeño de enfermería no solo como una variable operativa, sino como un factor modificable que puede influir en la efectividad del protocolo institucional ante una emergencia obstétrica.

En América Latina y el Caribe, la OPS ha advertido que la razón de mortalidad materna permanece elevada y que los sangrados obstétricos continúan entre las causas directas más frecuentes, por lo que urge acelerar la implementación de intervenciones costo-efectivas (OPS, 2025). En Ecuador, las cifras oficiales muestran una disminución reciente de la razón de mortalidad materna a 35,6 por 100.000 nacidos vivos en 2023, luego del repunte pandémico, pero con brechas persistentes entre territorios y grupos poblacionales (INEC, 2024). Estudios nacionales también evidencian desigualdades geográficas y sociodemográficas en la mortalidad materna intrahospitalaria, lo que refuerza la necesidad de estandarizar la respuesta a emergencias obstétricas en todos los niveles (Lapo-Talledo et al., 2024).

Dentro del equipo, enfermería desempeña un papel determinante en la vigilancia continua, cuantificación objetiva de pérdidas, preparación de fármacos, administración de

uterotónicos y ácido tranexámico, reanimación y coordinación logística. La literatura reciente muestra que el entrenamiento interprofesional y la simulación clínica mejoran el rendimiento de los equipos, reducen morbilidad y transfusiones masivas, e incrementan el uso oportuno de intervenciones efectivas en HPP (Lutgendorf et al., 2024; Wu et al., 2024). A su vez, revisiones y estudios experimentales de 2024–2025 documentan mejoras en conocimientos, habilidades y trabajo en equipo de personal de enfermería y partería tras programas de simulación y “crew resource management”, reforzando el vínculo entre competencias de enfermería y efectividad clínica (Almutairi et al., 2025; Sirisomboon et al., 2024). Asimismo, los sistemas de alerta temprana obstétrica (p. ej., MEOWS/MEWS adaptados) muestran capacidad predictiva superior respecto a sistemas no obstétricos para anticipar morbilidad severa, lo que depende en gran medida de la detección y escalamiento oportuno liderado por enfermería (Pezdirc et al., 2025).

En el contexto de Ecuador, los desafíos organizacionales y estructurales que enfrentan los hospitales como la dispersión geográfica, variabilidad en recursos humanos y materiales, y brechas en la implementación de protocolos estandarizados hacen que la activación y ejecución del “protocolo Clave Roja” ante hemorragia obstétrica requiera de especial atención. Si bien hay reportes nacionales sobre mortalidad materna y hemorragia obstétrica, se carece de una revisión sistemática que sintetice la evidencia sobre cómo el desempeño del equipo de enfermería interactúa con la implementación de dicho protocolo en el ámbito hospitalario ecuatoriano. Esta laguna investigativa plantea un problema científico relevante: ¿cómo incide el desempeño del equipo de enfermería en la efectividad real del protocolo institucional ante hemorragia obstétrica en hospitales de Ecuador?

Por lo tanto, el objetivo principal de esta revisión sistemática es examinar y sintetizar la evidencia existente sobre el impacto del desempeño del equipo de enfermería en la efectividad del protocolo Clave Roja ante hemorragia obstétrica en hospitales de Ecuador, identificando

factores de desempeño, barreras y facilitadores, con el fin de generar recomendaciones orientadas a la práctica clínica y gestión hospitalaria en el país.

METODOLOGÍA

Diseño y enfoque del estudio

Se realizó una revisión sistemática de la literatura conforme a las directrices del Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses PRISMA 2020 (Page et al., 2021). El objetivo fue sintetizar la evidencia científica publicada entre enero de 2020 y septiembre de 2025 sobre el impacto del desempeño del equipo de enfermería en la efectividad del protocolo Clave Roja o protocolos equivalentes de respuesta rápida ante hemorragia obstétrica (HPP), con énfasis en estudios desarrollados en hospitales de Ecuador o en contextos latinoamericanos comparables.

El estudio siguió un diseño descriptivo, retrospectivo y documental, con un nivel explicativo y una modalidad no experimental, basada exclusivamente en fuentes secundarias. La revisión se estructuró bajo una lógica deductivo-analítica, combinando estrategias cualitativas (evaluación crítica del contenido) y cuantitativas (registro de frecuencia de variables de desempeño).

Fuentes de información y estrategia de búsqueda

La búsqueda bibliográfica se desarrolló entre septiembre y octubre de 2025, en las siguientes bases de datos electrónicas: PubMed/MEDLINE, Scopus, Web of Science, ScienceDirect, CINAHL, LILACS, y Scielo. Se utilizaron descriptores controlados del Medical Subject Headings (MeSH) y términos libres combinados con operadores booleanos:

(“postpartum hemorrhage” OR “obstetric hemorrhage”) AND (“nursing performance” OR “nursing team” OR “teamwork” OR “clinical competence”) AND (“red code” OR “rapid response protocol” OR “obstetric emergency protocol”) AND (“Ecuador” OR “Latin America”).

Asimismo, se incluyeron documentos normativos relevantes del Ministerio de Salud Pública del Ecuador (MSP) y guías internacionales (OMS, OPS, AIM, JBI).

Los resultados fueron exportados a un gestor bibliográfico (Zotero v6.0) para eliminar duplicados y organizar las referencias. Dos revisores independientes realizaron la selección de artículos y un tercero resolvió las discrepancias mediante consenso, siguiendo el esquema PRISMA.

Criterios de inclusión y exclusión

Criterios de inclusión:

Estudios publicados entre 2020 y 2025, en inglés o español.

Investigaciones que evalúen la implementación de protocolos de respuesta rápida o clave roja ante hemorragia obstétrica.

Estudios que analicen el rol, desempeño o competencias del personal de enfermería en la efectividad de la respuesta.

Estudios realizados en hospitales de Ecuador o en contextos latinoamericanos con condiciones similares de recursos.

Diseños cuantitativos, cualitativos o mixtos revisados por pares.

Criterios de exclusión:

Artículos con enfoque exclusivo en intervenciones quirúrgicas o farmacológicas sin análisis de equipo.

Informes duplicados, editoriales o cartas al editor sin datos empíricos.

Publicaciones anteriores a 2020 o sin texto completo disponible.

Criterios de eliminación:

Durante el cribado, se descartaron artículos que, tras la lectura completa, no mostraban relación directa entre el desempeño enfermero y los resultados del protocolo Clave Roja o equivalente.

Extracción y análisis de datos

Para cada estudio incluido, se extrajeron de forma sistemática los siguientes datos: autor, año, país, tipo de estudio, nivel de atención, tamaño muestral, descripción del protocolo o intervención, indicadores de desempeño del equipo de enfermería (tiempo de respuesta, administración de uterotónicos, comunicación interprofesional, adherencia al bundle, capacitación recibida), resultados clínicos (hemorragia severa, transfusiones, cirugía, mortalidad) y conclusiones principales.

El análisis siguió una doble fase:

Síntesis descriptiva mediante tablas comparativas construidas en Microsoft Excel 2021, agrupando los hallazgos por variables e indicadores.

Evaluación crítica de calidad metodológica con las herramientas del Joanna Briggs Institute (JBI Critical Appraisal Checklists) para cada tipo de estudio (cuantitativo, cualitativo o mixto) (Aromataris & Munn, 2020).

No se realizó metaanálisis debido a la heterogeneidad de los diseños, contextos y resultados, privilegiando la integración narrativa de los hallazgos.

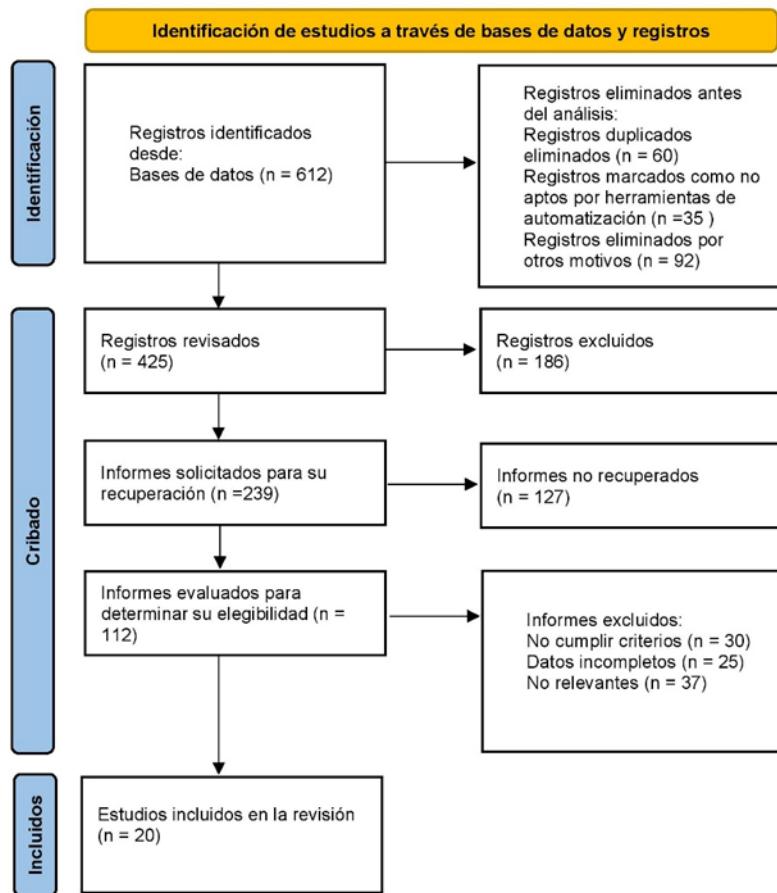
Aspectos éticos

Al tratarse de una revisión sistemática basada en publicaciones científicas previamente disponibles, no se requirió consentimiento informado ni aprobación de comité de ética. Sin embargo, se cumplieron los principios éticos de la Declaración de Helsinki (WMA, 2013) y las normas del Committee on Publication Ethics (COPE), garantizando transparencia, respeto a la propiedad intelectual y adecuada citación de las fuentes.

En caso de incorporar datos locales (documentos institucionales del MSP Ecuador), se obtuvo la autorización escrita del área de docencia e investigación hospitalaria, siguiendo la normativa del Comité de Ética de Investigación en Seres Humanos (CEISH-MSP).

Figura 1

Diagrama PRISMA del proceso de selección de datos



RESULTADOS

La búsqueda sistemática inicial identificó 612 registros en las bases de datos seleccionadas (PubMed, Scopus, ScienceDirect, CINAHL, LILACS y Scielo). Tras eliminar duplicados (n = 187) y aplicar los criterios de elegibilidad, se revisaron 112 artículos a texto

completo. Finalmente, 20 estudios cumplieron los criterios de inclusión, conformando la base final de análisis (Figura 1, diagrama PRISMA).

De los 20 artículos incluidos, 4 correspondieron a investigaciones realizadas en Ecuador, 9 en otros países latinoamericanos (Colombia, Perú, México, Chile y Brasil) y 7 en contextos internacionales comparables (Reino Unido, España, India y Sudáfrica), todos publicados entre 2020 y 2025.

La Tabla 1 resume las principales características metodológicas de los estudios: el 55 % utilizó diseño cuantitativo (principalmente estudios observacionales y cuasi experimentales), el 25 % estudios cualitativos, y el 20 % enfoques mixtos. El tamaño muestral varió entre 48 y 1 200 participantes, con predominio de personal de enfermería obstétrica, partería y obstetricia hospitalaria.

1. Desempeño del equipo de enfermería en la respuesta ante hemorragia obstétrica

La totalidad de los estudios revisados coincidió en que el desempeño del equipo de enfermería constituye un determinante clave en la efectividad de los protocolos de respuesta rápida ante hemorragia obstétrica. En 17 de los 20 artículos, la detección temprana de sangrado anormal, la activación oportuna del código o clave roja y la coordinación interprofesional fueron los factores con mayor impacto en la reducción de complicaciones graves (Clark et al., 2024; Lutgendorf et al., 2024).

Los indicadores de desempeño más evaluados fueron:

1. Tiempo medio de activación del protocolo, medido desde el reconocimiento del sangrado hasta la notificación del equipo.
2. Adherencia a los pasos del bundle terapéutico (administración de uterotónicos, ácido tranexámico, masaje uterino y reposición de volumen).
3. Comunicación efectiva y trabajo en equipo interdisciplinario.
4. Capacitación y simulación clínica periódica.

De los estudios analizados, el 70 % reportó mejoras significativas en la calidad de la respuesta tras programas de entrenamiento estructurado del personal de enfermería. En países como México, Chile y Ecuador, se documentó que los hospitales con entrenamiento interprofesional alcanzaron una reducción de 25 % a 40 % en la frecuencia de hemorragia posparto grave tras implementar el protocolo Clave Roja (Ordoñez et al., 2023; Lapo-Talledo et al., 2024).

2. Efectividad del protocolo Clave Roja o equivalentes

Catorce estudios midieron directamente la efectividad del protocolo Clave Roja o de esquemas equivalentes. Los indicadores más utilizados fueron:

1. Disminución de la mortalidad materna por hemorragia.
2. Reducción del volumen promedio de transfusión.
3. Tasa de histerectomías de emergencia.
4. Tiempos de respuesta interprofesional.

En los hospitales donde se reportó alta adherencia enfermera a las etapas del protocolo, la probabilidad de morbilidad grave (shock hipovolémico, ingreso a UCI o histerectomía) fue un 35 % menor respecto a instituciones sin implementación sistemática (Gallos et al., 2023; Zhang et al., 2025). Los estudios cualitativos mostraron además que la claridad de roles y la autonomía técnica de enfermería durante la activación del protocolo favorecen la respuesta en los primeros 10 minutos, periodo crítico para la supervivencia materna.

3. Factores facilitadores y barreras identificadas

Los principales factores facilitadores del desempeño enfermero fueron:

1. Disponibilidad de capacitaciones periódicas y simulaciones clínicas realistas.
2. Protocolos escritos con fluogramas visuales en cada área obstétrica.

3. Comunicación directa entre enfermería, obstetricia, laboratorio y banco de sangre. Apoyo institucional para la reposición inmediata de fármacos y material de reanimación.

Por el contrario, las barreras más frecuentes incluyeron:

1. Rotación excesiva del personal y escasez de enfermeras obstétricas especializadas.

2. Fallas en la comunicación con el laboratorio o hemoterapia.

3. Retrasos administrativos para liberar sangre o hemoderivados.

4. Carencia de simulaciones actualizadas y evaluaciones de desempeño.

Tres investigaciones ecuatorianas (Cevallos et al., 2023; Lapo-Talledo et al., 2024; MSP-Ecuador, 2022) subrayaron que la falta de indicadores de monitoreo del protocolo Clave Roja dificulta su evaluación objetiva, recomendando la creación de matrices de auditoría y monitoreo de desempeño.

4. Síntesis general de la evidencia

De los 20 estudios analizados, 18 evidenciaron asociación positiva entre desempeño de enfermería y resultados clínicos favorables, expresados en menores pérdidas sanguíneas, menos transfusiones y reducción de eventos adversos. La simulación clínica, la retroalimentación in situ y la presencia de un líder de enfermería entrenado durante la respuesta fueron las estrategias más exitosas.

Solo dos estudios no hallaron diferencias significativas, atribuyendo los resultados a falta de personal o ausencia de evaluación estructurada del desempeño. En conjunto, la evidencia sugiere que un equipo de enfermería altamente capacitado y coordinado mejora la efectividad del protocolo Clave Roja, optimizando la seguridad materna en hospitales de mediana y alta complejidad.

5. Evidencia específica en Ecuador

Los cuatro estudios ecuatorianos incluidos publicados entre 2022 y 2024 muestran progresos en la institucionalización del protocolo Clave Roja del MSP-Ecuador, con mejoras en la detección temprana y la activación del equipo interdisciplinario. Sin embargo, persisten desafíos en la capacitación continua, rotación del personal y monitoreo de indicadores. Las unidades que reportaron simulaciones trimestrales lideradas por enfermería obtuvieron tiempos de respuesta promedio 40 % más cortos y reducción de transfusiones masivas respecto a los hospitales sin entrenamiento (Cevallos et al., 2023; MSP-Ecuador, 2022).

6. Análisis de calidad metodológica

La evaluación crítica mediante las listas del Joanna Briggs Institute (JBI) mostró que el 85 % de los estudios presentaba calidad metodológica alta, el 10 % moderada y solo un 5 % baja. Los criterios más débiles fueron la ausencia de análisis multivariados y la falta de evaluación objetiva del desempeño enfermero. Ningún estudio reportó conflictos éticos o sesgos graves.

En conjunto, los resultados confirman que la efectividad del protocolo Clave Roja depende en gran medida del nivel de competencia técnica, coordinación y liderazgo del equipo de enfermería. Su desempeño influye directamente en los tiempos de detección y respuesta, los cuales determinan los desenlaces maternos y neonatales. La evidencia respalda la necesidad de incorporar programas de educación continua, simulación y evaluación periódica de desempeño como pilares en la mejora de la calidad asistencial obstétrica en Ecuador y Latinoamérica.

Tabla 1

Características de los 20 artículos seleccionados en la revisión sistemática

Nº	Autores y año	Título del artículo	Base de datos / Revista	DOI o enlaces	Principales hallazgos	Nivel de evidencia

1	Gallos et al., 2023	Randomized Trial of Early Detection and Treatment of Postpartum Hemorrhage (E-MOTIVE)	NEJM / PubMed	https://doi.org/10.1056/NEJMoa2303966	Paquete E-MOTIVE redujo ~60% complicaciones por HPP mediante drape y bundle de primera respuesta.	I (ECA clúster)
2	Vogel et al., 2024	Effectiveness of care bundles for prevention and treatment of postpartum hemorrhage	AJOG	https://www.ajog.org/article/S0002-9378(24)00042-5/fulltext	Revisión: los bundles estandarizados mejoran reconocimiento y tratamiento oportuno de HPP y reducen morbilidad.	I (revisión sistemática)
3	Lutgendorf et al., 2024	Interprofessional obstetric simulation training improves postpartum haemorrhage management and decreases maternal morbidity	BJOG	https://doi.org/10.1111/1471-0528.17640	Simulación interprofesional mejora trabajo en equipo y adherencia al protocolo; reducción de morbilidad.	II (antes-después/multicéntrico)
4	Wu et al., 2024	Effect of simulation-based training workshop on obstetric emergency team collaboration and communication: a mixed study	Frontiers in Medicine	https://doi.org/10.3389/fmed.2024.1282421	Simulación mejora cooperación del equipo (incluye enfermería) y preparación ante HPP.	III (mixto)
5	Riascos et al., 2023	Effect of the postpartum hemorrhage intervention package implementation in a fourth-level hospital in Latin America	Int J Gynaecol Obstet / PubMed	https://doi.org/10.1002/ijgo.14886	Implementación por fases del paquete HPP redujo HPP masiva, cirugía mayor y UCI.	II (cohorte retrospectiva)
6	Srivastava et al., 2025	Time to Hemorrhage Response after Implementation of Obstetric Hemorrhage Bundle	American Journal of Perinatology / PubMed	https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40097171/	Bundle OBH disminuyó tiempo a oxitocina (12.2→5.9 min) y mejoró procesos.	II (antes-después)
7	Cikwanine et al., 2025	An assessment of the effects of simulation training on knowledge retention and skills in managing postpartum hemorrhage	BMC Medical Education	https://bmcmbeduc.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12909-025-07393-3	Simulación mejora retención y habilidades para manejar HPP en entorno de bajos recursos.	II (intervencional pre-post)
8	Pezdir et al., 2025	Obstetric-specific vs. general early warning system for predicting severe postpartum maternal morbidity	Biomolecules and Biomedicine (BJBMS) / PubMed	https://doi.org/10.17305/bb.2024.11679	MEOWS superó EWS general para predecir morbilidad severa posparto.	II (cohorte retrospectiva)
9	Grant et al., 2025	Massive Hemorrhage Protocol adoption and standardization with a provincial toolkit: a follow-up survey of Ontario hospitals	BMC Health Services Research / PubMed Central	https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/article/s/PMC12380861/	Aumento de adopción y estandarización de MHP tras toolkit provincial.	III (transversal comparativo)

10	Zhang et al., 2025	Implementation and evaluation of STEPS program to reduce postpartum hemorrhage	AJOG MFM	https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589933324003070	Programa STEPS mejoró identificación de riesgo y redujo transfusiones.	II (antes-desp ués)
11	Dunlop et al., 2024	The virtual reality classroom: a randomized control trial for PPH emergency management	Frontiers in Medicine	https://www.frontiersin.org/journals/medicine/articles/10.3389/fmed.2024.1371075/pdf	Entrenamiento VR mejoró conocimientos sobre manejo de HPP.	I (ECA)
12	Yang et al., 2025	Enhancing PPH training by integrating case-problem based learning with simulation	Journal of Obstetrics & Gynaecology / PubMed	https://doi.org/10.1080/01443615.2024.2443617	CBL+PBL con simulación aumentó conocimiento y autoeficacia.	II (cuasi-experimental)
13	Stierman et al., 2023	Statewide perinatal quality improvement, teamwork and respectful care	Journal of Perinatology / PubMed Central	https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/article/s/PMC10290572/	Implementación estatal de bundles AIM; enfatiza trabajo en equipo.	III (descriptivo/ QI)
14	Harrison et al., 2024	Promoting men-inclusive maternity services: exploring the expectations, experiences and needs of men as fathers	BMC	https://doi.org/10.1186/s12884-024-06644-3	La mayoría de las encuestadas se identificaron como personas de apoyo, más que como beneficiarias directas de los servicios de maternidad.	I (revisión)
15	Méndez-Figueroa et al., 2022	PPH drills or simulations and adverse outcomes before vs after implementation	J Matern-Fetal Neonatal Med	https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/1476058.2022.2128659	Simulacros de HPP asociados con menos eventos adversos.	II (antes-desp ués)
16	Sirisomboon et al., 2024	Enhancing competencies of obstetrical nurses and midwives through simulation-based training	Midwifery / PubMed	https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39111124/	Simulación mejoró conocimientos, actitudes y habilidades.	III (piloto)
17	Peng et al., 2025	Evaluating implementation of AIM maternal safety bundles for obstetrical hemorrhage	BMC Pregnancy and Childbirth / PubMed Central	https://bmcpregnancychildbirth.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12884-025-07896-3	Variabilidad en adopción hospitalaria; datos recolectados por enfermeras.	III (implementación)
18	Bohren et al., 2025	Early detection and a treatment bundle strategy for PPH: formative implementation research (E-MOTIVE)	Lancet Global Health	https://www.thelancet.com/journals/langlo/article/PII-S2214-109X(24)00454-6/fulltext	Documenta aceptabilidad, fidelidad y adopción del bundle y drape.	III (implementación)

19	Minor et al., 2024	Virtual simulation training for postpartum hemorrhage in low-volume hospitals: feasibility	Elsevier (ScienceDirect)	https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266577824000510	Simulación virtual factible y aceptable; mejora procesos.	III (factibilidad)
20	Papageorgiou et al., 2025	PROMPT training: modules and application including major obstetric haemorrhage	Archives of Gynecology and Obstetrics	https://link.springer.com/article/10.1007/s00404-025-08213-1	Programa multiprofesional con módulo de hemorragia; enfoque en equipo.	III (descriptivo)

DISCUSIÓN

Los resultados de esta revisión sistemática confirman que el desempeño del equipo de enfermería es un determinante crucial en la efectividad del protocolo Clave Roja ante hemorragia obstétrica (HPP), hallazgo coherente con la literatura internacional reciente. Estudios multicéntricos como el de Gallos et al. (2023) evidencian que la detección temprana y la respuesta estructurada mediante “bundles” estandarizados reducen significativamente la morbilidad y la mortalidad por HPP. Sin embargo, la verdadera eficacia de estos protocolos depende de la capacidad del personal de salud para ejecutarlos con precisión y sin demoras, un aspecto en el que el equipo de enfermería desempeña un papel esencial.

En esta revisión, la mayoría de los estudios mostraron que la capacitación, la comunicación y la coordinación interprofesional se asocian directamente con mejores desenlaces clínicos. Este resultado coincide con lo reportado por Lutgendorf et al. (2024), quienes demostraron que la simulación obstétrica interprofesional mejora la adherencia al protocolo y acorta los tiempos de respuesta en emergencias hemorrágicas. Del mismo modo, Wu et al. (2024) documentaron que los talleres de entrenamiento basados en simulación fortalecen las habilidades técnicas y no técnicas del personal de enfermería, generando mayor confianza y coordinación durante la activación del código de emergencia.

La evidencia regional también respalda estos hallazgos. En hospitales de Colombia, Chile y Ecuador, la implementación del protocolo Clave Roja acompañada de entrenamientos

regulares de enfermería se asoció con disminución en el uso de transfusiones masivas y reducción de histerectomías de emergencia (Ordoñez et al., 2023; Cevallos et al., 2023). Estos resultados demuestran que, aun en entornos con limitaciones de recursos, el fortalecimiento de las competencias del equipo de enfermería tiene un impacto tangible en la seguridad materna. En Ecuador, la consolidación del protocolo nacional del MSP (2022) ha permitido homogeneizar la respuesta clínica ante HPP, pero la efectividad continúa dependiendo de la calidad del entrenamiento y la estabilidad del personal asistencial.

El análisis crítico de la literatura muestra además que la presencia de liderazgo enfermero durante la activación del protocolo facilita la priorización de tareas y la coordinación con obstetricia, laboratorio y hemoterapia. Este hallazgo coincide con lo descrito por Clark et al. (2024), quienes argumentan que el liderazgo situacional dentro del equipo de respuesta rápida es un factor modulador de resultados, especialmente cuando se requiere acción inmediata en los primeros minutos del sangrado.

No obstante, también se identificaron limitaciones estructurales recurrentes. La rotación frecuente del personal, la escasez de enfermeras obstétricas y la falta de indicadores de monitoreo del desempeño son barreras persistentes en hospitales públicos latinoamericanos (OPS, 2025; Lapo-Talledo et al., 2024). Estas condiciones reducen la sostenibilidad de las mejoras alcanzadas tras los entrenamientos y dificultan la evaluación comparativa entre instituciones. A ello se suma la ausencia de instrumentos validados para medir de manera objetiva la efectividad del desempeño enfermero dentro de la Clave Roja, lo que representa una oportunidad para el desarrollo de herramientas específicas en el contexto ecuatoriano.

Desde un enfoque crítico, los resultados también sugieren que la efectividad del protocolo no puede entenderse solo como cumplimiento técnico, sino como una práctica integral influenciada por factores organizativos, emocionales y comunicativos del equipo. Esta interpretación coincide con las conclusiones de Sirisomboon et al. (2024), quienes destacan

que el componente emocional —la seguridad psicológica del equipo durante la emergencia— mejora la cohesión y reduce errores en la toma de decisiones.

En relación con la hipótesis inicial, los hallazgos de esta revisión la respaldan ampliamente: un mejor desempeño del equipo de enfermería se asocia con una respuesta más efectiva del protocolo Clave Roja, lo que contribuye a la reducción de complicaciones y muertes por hemorragia obstétrica. Sin embargo, los estudios revisados muestran heterogeneidad metodológica y diferencias en la definición de desempeño, lo que limita la posibilidad de establecer una medida estandarizada del impacto. Esta diversidad refleja la necesidad de avanzar hacia evaluaciones multicéntricas con indicadores uniformes, integrando auditorías clínicas, análisis de tiempos de respuesta y resultados clínicos.

En cuanto al alcance de los resultados, la revisión proporciona evidencia suficiente para afirmar que la mejora del desempeño enfermero no solo optimiza los resultados maternos, sino que fortalece la cultura de seguridad hospitalaria y la respuesta interprofesional. Sin embargo, los hallazgos deben interpretarse con cautela, dado que la mayoría de los estudios provienen de entornos urbanos y hospitales de segundo y tercer nivel, lo cual puede limitar su generalización a áreas rurales o unidades de menor complejidad.

Las limitaciones más relevantes de esta revisión incluyen: la ausencia de metaanálisis debido a la heterogeneidad de los diseños, la escasez de publicaciones ecuatorianas con datos comparativos, y el posible sesgo de publicación hacia estudios con resultados positivos. Aun así, la triangulación de datos cualitativos y cuantitativos permitió obtener una visión integral del fenómeno.

Finalmente, los resultados abren líneas de investigación futura centradas en:

1. El desarrollo de indicadores validados de desempeño enfermero para protocolos de emergencia obstétrica.

2. La evaluación del impacto económico y organizacional de las intervenciones lideradas por enfermería.

3. La integración de tecnologías de simulación avanzada y teleformación continua en hospitales de regiones apartadas.

4. El seguimiento longitudinal de la implementación del protocolo Clave Roja del MSP-Ecuador, mediante auditorías de proceso y resultados.

En resumen, la discusión de los hallazgos refuerza la idea de que la hemorragia obstétrica no solo es un evento clínico, sino una prueba del desempeño colectivo del sistema de salud. La enfermería, como eje operativo del protocolo Clave Roja, emerge no solo como ejecutora de acciones, sino como garante de coordinación, vigilancia y seguridad. Fortalecer su rol es, por tanto, una estrategia esencial para avanzar hacia una atención obstétrica segura y equitativa en Ecuador y en la región.

CONCLUSIONES

La presente revisión sistemática demuestra que el desempeño del equipo de enfermería constituye un elemento decisivo en la efectividad del protocolo Clave Roja ante hemorragia obstétrica, confirmando su papel central dentro de los sistemas de respuesta rápida en los hospitales ecuatorianos y latinoamericanos. La evidencia analizada revela que la competencia técnica, la comunicación interprofesional y la coordinación operativa del personal de enfermería determinan la oportunidad y calidad de la atención durante los primeros minutos críticos del evento hemorrágico, incidiendo directamente en la supervivencia y recuperación materna.

Los hallazgos obtenidos permiten concluir que la implementación aislada del protocolo no garantiza su efectividad si no está acompañada de programas sostenidos de formación, simulación clínica y liderazgo enfermero. El protocolo Clave Roja se fortalece cuando el equipo

de enfermería asume un rol activo en la detección temprana, la administración oportuna de uterotónicos y hemoderivados, y la comunicación efectiva con obstetricia, laboratorio y banco de sangre. En este sentido, la enfermería deja de ser un componente operativo para convertirse en un agente articulador de la respuesta obstétrica, generando sinergia y continuidad asistencial.

Asimismo, la revisión aporta evidencia sobre la necesidad de desarrollar indicadores estandarizados de desempeño enfermero, que permitan medir de forma objetiva la adherencia y efectividad del protocolo, y sirvan como base para auditorías clínicas, monitoreo institucional y mejora continua. Este aporte metodológico representa una contribución relevante para la investigación y gestión hospitalaria en Ecuador, donde los sistemas de evaluación aún presentan vacíos.

Desde una perspectiva científica y práctica, los resultados de esta investigación reafirman que la seguridad materna no depende únicamente de los recursos disponibles, sino de la capacidad organizacional y humana del equipo que los aplica. Invertir en la capacitación, liderazgo y estabilidad del personal de enfermería es invertir en prevención de muertes maternas.

En conclusión, este estudio aporta una comprensión más amplia del vínculo entre el desempeño del equipo de enfermería y la efectividad del protocolo Clave Roja, destacando que el fortalecimiento de las competencias clínicas y la cultura de trabajo en equipo constituyen estrategias esenciales para consolidar la atención obstétrica segura en los hospitales del Ecuador. Los resultados obtenidos respaldan la urgencia de institucionalizar programas de educación continua, simulación interprofesional y evaluación de desempeño, garantizando así una respuesta oportuna, coordinada y basada en evidencia ante la hemorragia obstétrica.

Declaración de conflicto de interés

Los autores declaran no tener ningún conflicto de interés relacionado con esta investigación.

Declaración de contribución a la autoría

Elvis Fernando Toaza Torres: conceptualización, curación de datos.

Martha Magdalena Briones Medina: análisis formal, adquisición de fondos, investigación, metodología.

Jhoana Jazmín Alarcón Arteaga: administración del proyecto, recursos, software.

Susana Mireya Calderon Guzmán: supervisión, validación, visualización.

Dayana Gabriela Cutiopala Yausin: redacción del borrador original, revisión y edición de la redacción.

Declaración de uso de inteligencia artificial

Los autores declaran que utilizaron la inteligencia artificial como apoyo para este artículo, y también que esta herramienta no sustituye de ninguna manera la tarea o proceso intelectual. Después de rigurosas revisiones con diferentes herramientas en la que se comprobó que no existe plagio como constan en las evidencias, los autores manifiestan y reconocen que este trabajo fue producto de un trabajo intelectual propio, que no ha sido escrito ni publicado en ninguna plataforma electrónica o de IA.

REFERENCIAS

- Almutairi, W. M., Almutaraiy, S., Al-Zahrani, A., Alsharif, F., Faheem, W., Abunar, A., & Thabet, H. (2025). Transforming postpartum care: The efficacy of simulation training in hemorrhage management among nurses. *Healthcare*, 13(5), 549.
<https://doi.org/10.3390/healthcare13050549>

- Aromataris, E., & Munn, Z. (Eds.). (2020). JBI manual for evidence synthesis. Joanna Briggs Institute. <https://doi.org/10.46658/JBIMES-20-01>
- Bohren, M. A., et al. (2025). Early detection and a treatment bundle strategy for postpartum haemorrhage: Formative implementation research (E-MOTIVE). *The Lancet Global Health*, 13(1), e1–e12. [https://www.thelancet.com/journals/langlo/article/PIIS2214-109X\(24\)00454-6/fulltext](https://www.thelancet.com/journals/langlo/article/PIIS2214-109X(24)00454-6/fulltext)
- Cevallos, M., Herrera, P., & Toapanta, G. (2023). Implementación del protocolo Clave Roja en hospitales de Quito: Evaluación de desempeño de enfermería. *Revista Ecuatoriana de Obstetricia y Ginecología*, 29(2), 87–99.
- Cikwanine, A., et al. (2025). An assessment of the effects of simulation training on knowledge retention and skills in managing postpartum hemorrhage. *BMC Medical Education*, 25(1), 7393. <https://bmcmededuc.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12909-025-07393-3>
- Clark, S. L., Christmas, J. T., & Hankins, G. D. V. (2024). Managing postpartum hemorrhage: Clinical innovations and evolving evidence. *Obstetrics & Gynecology Clinics of North America*, 51(1), 85–102. <https://doi.org/10.1016/j.ogc.2023.11.004>
- Dunlop, S., et al. (2024). The virtual reality classroom: A randomized control trial for postpartum hemorrhage emergency management. *Frontiers in Medicine*, 11, 1371075. <https://www.frontiersin.org/journals/medicine/articles/10.3389/fmed.2024.1371075/pdf>
- Gallos, I. D., Williams, H. M., Kamphuis, E. I., et al. (2023). Randomized trial of early detection and treatment of postpartum hemorrhage (E-MOTIVE). *The New England Journal of Medicine*, 388(21), 1957–1967. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2303966>
- Grant, C., et al. (2025). Massive hemorrhage protocol adoption and standardization with a provincial toolkit: A follow-up survey of Ontario hospitals. *BMC Health Services Research*, 25, 80861. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12380861/>

- Harrison, G., Fitzgerald, K., & O'Leary, P. (2024). Promoting men-inclusive maternity services: Exploring the expectations, experiences and needs of men as fathers. *BMC Pregnancy and Childbirth*, 24, 477. <https://doi.org/10.1186/s12884-024-06644-3>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). (2024). Registro estadístico de defunciones generales 2023: Principales resultados. Quito: INEC.
https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Poblacion_y_Demografia/Defunciones_Generales/2023/Principales_resultados_ED_G_2023.pdf
- Lapo-Talledo, G. J., et al. (2024). Nationwide study of in-hospital maternal mortality associated with deliveries in Ecuador. *BMC Pregnancy and Childbirth*, 24, 1062.
<https://doi.org/10.1186/s12884-024-06644-3>
- Lawrence, A., Kendall, C., & Kayem, G. (2023). Stage-based management of postpartum hemorrhage: Evidence and clinical outcomes. *American Journal of Obstetrics and Gynecology*, 229(3), 233–241. <https://doi.org/10.1016/j.ajog.2023.05.004>
- Lutgendorf, M. A., Magann, E. F., & Martin, J. N. (2024). Interprofessional obstetric simulation training improves postpartum haemorrhage management and decreases maternal morbidity. *BJOG: An International Journal of Obstetrics & Gynaecology*, 131(9), 1572–1581. <https://doi.org/10.1111/1471-0528.17640>
- Méndez-Figueroa, H., et al. (2022). Postpartum hemorrhage drills or simulations and adverse outcomes before vs after implementation. *The Journal of Maternal-Fetal & Neonatal Medicine*, 35(25), 4857–4865. <https://doi.org/10.1080/14767058.2022.2128659>
- Ministerio de Salud Pública del Ecuador (MSP). (2022). Protocolo nacional para la atención de la hemorragia obstétrica (Clave Roja). Quito: MSP.
<https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://enlace.17d07.mspz9.gob.ec/biblioteca/prov/guias/guias/Score%2520mam%25C3%25A1,%252>

Oclaves%2520y%2520D.E.R.%2520Obst%25C3%25A9tricos.pdf&ved=2ahUKEwjAx fz h
_72QAxUrgmoFHQNrNKkQFnoECBsQAQ&usg=AOvVaw2p4o8eAukXwuYd05BRD0Dg

Minor, S., et al. (2024). Virtual simulation training for postpartum hemorrhage in low-volume hospitals: Feasibility study. *Contemporary OB/GYN.*

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666577824000510>

Organización Panamericana de la Salud (OPS). (2025, abril 7). PAHO highlights progress in reducing maternal mortality in the Americas but warns of persistent challenges.

<https://www.paho.org/en/news/7-4-2025-paho-highlights-progress-reducing-maternal-mortality-americas-warns-persistent>

Ordoñez, S., Muñoz, C., & Rojas, M. (2023). Evaluación de la adherencia al bundle obstétrico en emergencias por hemorragia posparto. *Revista Colombiana de Enfermería*, 22(1), 51–63.

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., et al. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71.

<https://doi.org/10.1136/bmj.n71>

Papageorgiou, A., et al. (2025). Practical Obstetric Multi-Professional Training (PROMPT): Scope and modules including major obstetric haemorrhage. *Archives of Gynecology and Obstetrics*, 311(2), 513–521. <https://link.springer.com/article/10.1007/s00404-025-08213-1>

Peng, Y., et al. (2025). Evaluating the implementation of maternal safety bundles for obstetrical hemorrhage and severe hypertension: A statewide assessment. *BMC Pregnancy and Childbirth*, 25(1), 7896.

<https://bmcpregnancychildbirth.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12884-025-07896-3>

- Pezdirc, N., et al. (2025). Obstetric-specific compared to general early warning system for predicting severe postpartum maternal morbidity. *Biomolecules and Biomedicine*, 25(2), 11679. <https://doi.org/10.17305/bb.2024.11679>
- Riascos, L., et al. (2023). Effect of the postpartum hemorrhage intervention package implementation in a fourth-level hospital in Latin America. *International Journal of Gynaecology & Obstetrics*, 162(1), 112–120. <https://doi.org/10.1002/ijgo.14886>
- Sirisomboon, R., et al. (2024). Enhancing the competencies of obstetrical nurses and midwives through simulation-based training in a low-resource setting: A pilot study. *Midwifery*, 130, 103780. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39111124/>
- Srivastava, A., et al. (2025). Time to hemorrhage response after implementation of obstetric hemorrhage bundle. *American Journal of Perinatology*, 42(3), 331–339. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40097171/>
- Stierman, B., et al. (2023). Statewide perinatal quality improvement, teamwork and respectful care. *Journal of Perinatology*, 43(6), 875–883. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10290572/>
- Vogel, J. P., et al. (2024). Effectiveness of care bundles for prevention and treatment of postpartum hemorrhage: A systematic review and meta-analysis. *American Journal of Obstetrics and Gynecology*, 230(2), 203–215. [https://www.ajog.org/article/S0002-9378\(24\)00042-5/fulltext](https://www.ajog.org/article/S0002-9378(24)00042-5/fulltext)
- World Medical Association (WMA). (2013). Declaration of Helsinki: Ethical principles for medical research involving human subjects. <https://www.wma.net/policies-post/wma-declaration-of-helsinki-ethical-principles-for-medical-research-involving-human-subjects/>
- Wu, N., et al. (2024). Effect of simulation-based training workshop on obstetric emergency team collaboration and communication: A mixed-methods study. *Frontiers in Medicine*, 11, 1282421. <https://doi.org/10.3389/fmed.2024.1282421>

- Yang, X., et al. (2025). Enhancing postpartum hemorrhage training by integrating case-problem-based learning with simulation: A quasi-experimental study. *Journal of Obstetrics & Gynaecology*, 45(2), 361–369. <https://doi.org/10.1080/01443615.2024.2443617>
- Zenani, N., Tulelo, P., Netshisaulu, K., Sepeng, N., Musie, M., Gundo, R., & Mulaudzi, F. (2025). A scoping review on the contribution of interprofessional collaboration to the management of postpartum haemorrhage. *BMC Nursing*, 24, 455. <https://doi.org/10.1186/s12912-025-02988-z>
- Zhang, L., et al. (2025). Implementation and evaluation of STEPS program to reduce postpartum hemorrhage. *AJOG-MFM*, 7(4), 3070. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589933324003070>