



Depósito Legal: ppi201302ME4323
ISSN: 2343-595X

La Revista Venezolana de Investigación Odontológica de la IADR

<http://erevistas.saber.ula.ve/index.php/rvio>



ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN

Protocolo bio-digital integrado en implantología: desde la planificación quirúrgica 3D hasta la modulación tisular

Dana Izzedin Soujaa^{1,4}, Diego González Carrillo^{2,4}, Mariam Maita Pérez^{3,4}

1. <https://orcid.org/0009-0001-4257-8519>

2. <https://orcid.org/0009-0003-8916-0296>

3. <https://orcid.org/0000-0001-9344-4222>

4. Facultad de Odontología, Universidad José Antonio Páez, Valencia, Venezuela

RESUMEN

Historial del artículo

Recibo: 16-06-26

Eviado a evaluación:
17-06-26

Aceptado: 20-7-2026

Disponible en línea:
01-09-2026

Palabras Clave:

Cirugía guiada,
Impresión 3D,
Fotobiomodulación,
Oxígeno activo,
Osteointegración.

Keywords:

Guided surgery,
3D printing,
Photobiomodulation,
Active oxygen,
Osseointegration.

Introducción: La implantología guiada optimiza la precisión posicional de los implantes de titanio, pero suele ignorar la preparación biológica del lecho receptor. Combinar la odontología fotónica y química transforma el flujo digital pasivo en un protocolo bioactivo integrado. **Objetivo:** Proponer un protocolo clínico estandarizado que fusione la planificación digital y la impresión tridimensional de guías con fotobiomodulación, terapia fotodinámica antimicrobiana y oxígeno activo. **Métodos:** Se realizó una revisión exploratoria en Science Direct, Medline, Scientific Electronic Library Online, Biblioteca Virtual en Salud, Scopus y Cochrane (2016-2025) siguiendo las directrices para revisiones sistemáticas. El riesgo de sesgo se evaluó con herramientas específicas para ensayos aleatorizados, no aleatorizados, transversales y de laboratorio; la certeza de la evidencia se midió mediante el sistema de clasificación de recomendaciones. **Resultados:** Se incluyeron 18 estudios. La terapia fotodinámica (azul de metileno al 0,01%, láser de 660 nanómetros, 6-30 julios por centímetro cuadrado) descontamina el lecho óseo sin citotoxicidad. La fotobiomodulación (660-1064 nanómetros, 2-6 julios por centímetro cuadrado) acelera la osteointegración y mitiga el dolor, activando vías celulares como la proteína morfogenética ósea y regulando al alza el factor de transcripción asociado a enanismo 2 y la fosfatasa alcalina. Los geles de oxígeno activo optimizan el sellado mucoso vía factor inducido por la hipoxia 1-alfa sin estrés oxidativo. Se estructuró un protocolo de cinco fases con desviación de 0,1-0,2 milímetros en la guía quirúrgica. **Conclusiones:** La simbiosis bio-digital redefine la implantología. Se proponen variables como el cociente de estabilidad del implante y la escala visual analógica para futuros ensayos clínicos aleatorizados.

Autor de correspondencia: Dana Izzedin Soujaa. Correo: danaizzedin2003@gmail.com

Integrated bio-digital protocol in implantology: From 3D surgical planning to tissue modulation

ABSTRACT

Introduction: Guided implantology optimizes the positional accuracy of titanium implants but typically overlooks the biological preparation of the recipient bed. Combining photonic and chemical regenerative dentistry transforms the passive digital workflow into an integrated bioactive protocol. **Objective:** To propose a standardized clinical protocol merging digital planning and three-dimensional guide printing with coadjutant therapies: photobiomodulation, antimicrobial photodynamic therapy, and active oxygen. **Methods:** A scoping review was conducted across Science Direct, Medline, Scientific Electronic Library Online, Virtual Health Library, Scopus, and Cochrane (2016-2025) following systematic review guidelines. Risk of bias was assessed using specific tools for randomized, non-randomized, cross-sectional, and laboratory studies; the certainty of evidence was measured via the recommendations assessment classification system. **Results:** Eighteen studies were included. Photodynamic therapy (0.01% methylene blue, 660-nanometer laser, 6-30 joules per square centimeter) decontaminates the bone bed without cytotoxicity. Photobiomodulation (660-1064 nanometers, 2-6 joules per square centimeter) accelerates osseointegration and mitigates pain by activating cellular pathways like bone morphogenetic protein and upregulating runt-related transcription factor 2 and alkaline phosphatase. Active oxygen gels optimize mucosal sealing via hypoxia-inducible factor 1-alpha without oxidative stress. A five-phase protocol was structured, incorporating a 0.1-0.2 millimeter dimensional offset in the surgical guide. **Conclusions:** The bio-digital symbiosis redefines contemporary implantology. Specific variables, such as the implant stability quotient and the visual analog scale for pain, are proposed for future randomized clinical trials.

1. INTRODUCCIÓN

La implantología contemporánea ha experimentado una transición paradigmática gracias a la consolidación del flujo de trabajo digital. La convergencia entre la Tomografía Computarizada de Haz Cónico (TCHC) y los escaneados intraorales capturados mediante tecnología óptica activa permite la superposición de archivos de volumen (DICOM) y de superficie (.STL) con una fidelidad submilimétrica^{1,2}. Esta predictibilidad geométrica facilita el diseño asistido por ordenador (CAD) de guías quirúrgicas personalizadas e impresas en tres dimensiones (3D), las cuales optimizan el posicionamiento tridimensional de las fijaciones de titanio y salvaguardan estructuras anatómicas nobles como el nervio alveolar inferior o el seno maxilar³.

Sin embargo, a pesar de las incuestionables ventajas posicionales y ergonómicas de la cirugía guiada estática, las guías quirúrgicas actúan de forma exclusiva como un limitador mecánico pasivo. El flujo digital convencional obvia por completo el estado metabólico, biológico y microbiológico del microambiente peri-implantario receptor^{3,4}. Durante la secuencia de fresado óseo, e incluso bajo protocolos rigurosos de irrigación externa estéril, la fricción mecánica genera un incremento inevitable de la temperatura local que puede superar el umbral crítico de los 47 °C⁵. Este trauma térmico latente, sumado a la disrupción vascular local, desencadena una respuesta isquémica transitoria que induce la apoptosis de los osteocitos marginales y expande la zona de necrosis ósea perilesional^{4,5}. Como consecuencia directa, se observa un retraso en la

transición de la estabilidad implantaria primaria (mecánica) a la estabilidad secundaria (biológica), prolongando los tiempos de espera clínicos antes de someter al implante a cargas funcionales⁴.

Para contrarrestar de forma activa este bache biológico postquirúrgico, la odontología regenerativa contemporánea plantea la necesidad de hibridar el flujo digital pasivo con terapias biofísicas y químicas de acondicionamiento tisular inmediato⁶. La Fotobiomodulación (PBM), mediante la aplicación de radiación electromagnética no ionizante en el espectro del infrarrojo cercano (808 nm a 940 nm), se postula como una intervención idónea para modular el metabolismo celular del lecho óseo⁷. Al penetrar las barreras tisulares, los fotones son absorbidos por cromóforos endógenos, específicamente la enzima mitocondrial citocromo c oxidasa⁸. Esta estimulación fotónica incrementa el potencial de membrana mitocondrial, acelera la cadena de transporte de electrones y estimula una producción controlada de trifosfato de adenosina (ATP) y especies reactivas de oxígeno de baja intensidad (ROS)^{7,8}. A nivel nuclear, este choque energético activa factores de transcripción clave implicados en la neovascularización, el reclutamiento celular y la diferenciación osteoblástica acelerada, favoreciendo la aposición de matriz ósea directamente sobre las espiras del implante^{9,10}.

De forma paralela, el control microbiológico del alveolo quirúrgico representa un factor crítico para mitigar el riesgo de fallas tempranas de la fijación. La Terapia Fotodinámica Antimicrobiana (aPDT) surge como una alternativa no invasiva de desinfección dirigida¹¹. Mediante la combinación selectiva de un agente fotosensibilizador no tóxico, como el azul de metileno, y la posterior irradiación con luz roja a una longitud de onda concordante ($\lambda = 660$ nm), se induce la transición del fotosensibilizador a un estado triplete excitado. Este interactúa con el oxígeno del entorno para generar oxígeno singlete ($^1\text{O}_2$) y radicales libres altamente reactivos^{11,12}. Dichas especies químicas oxidan de manera irreversible los lípidos de membrana y las proteínas estructurales de los patógenos periodontales y peri-implantarios remanentes en el lecho óseo, logrando una tasa bactericida óptima sin inducir resistencia antimicrobiana y respetando la viabilidad del tejido óseo vital del hospedador¹².

Como vector complementario químico, la introducción de geles tópicos y colutorios formulados con compuestos de oxígeno activo y de liberación sostenida provee una plataforma idónea para la maduración y el sellado de los tejidos blandos¹³. El mantenimiento de una presión parcial de oxígeno elevada en el ambiente peri-implantario estimula de forma directa la expresión de factores de crecimiento angiogénicos, tales como el Factor de Crecimiento Endotelial Vascular (VEGF), esenciales para restablecer el plexo vascular peri-implantario y acelerar la cicatrización gingival¹⁴. Además, este entorno hiperoxigenado local ejerce un control ecológico selectivo que inhibe selectivamente la colonización por microorganismos anaerobios estrictos, los cuales están directamente relacionados con la aparición precoz de mucositis y peri-implantitis^{13,15}.

El propósito de este artículo de actualización es proponer un protocolo clínico estandarizado de cinco fases. Dicho protocolo integra de manera sinérgica la planificación digital tridimensional con la modulación metabólica y microbiana activa que proporcionan la PBM, la aPDT y la

oxigenación celular, transformando así el flujo digital tradicional en una terapéutica bio-digital proactiva.

2. METODOLOGÍA

2.1 Formulación de la pregunta de investigación PICO

Se formuló la siguiente pregunta según la estrategia PICO: ¿Cuál es el comportamiento clínico de la rehabilitación periimplantaria y la osteointegración mediante el uso combinado de planificación digital, impresión 3D, terapias lumínicas (PBM/aPDT) y oxígeno activo según la literatura publicada entre 2016 y 2025?; en la **Tabla 1** se presentan los elementos de la pregunta PICO estructurados según cada criterio.

Tabla 1. Análisis de la pregunta PICO

Criterio	Descripción
Población	Pacientes sometidos a tratamientos de implantología oral.
Intervención	Planificación digital CAD/CAM, guías quirúrgicas impresas en 3D, aPDT, PBM y geles/colutorios de oxígeno activo para mucosas.
Comparación	Protocolos convencionales de implantología sin terapias bioactivas coadyuvantes.
Resultados	Estabilidad del implante (primaria y secundaria), tasa de osteointegración, reducción del dolor, control microbiano, cicatrización de tejidos blandos, acortamiento de tiempos de espera protésica.

2.2 Estrategias de búsqueda

2.2.1 Fuentes de información

Se realizó una revisión exploratoria en: Elsevier (vía Science Direct), Medline (vía PubMed), SciELO, Biblioteca Virtual de la Salud (vía Bireme), Google Académico, Scopus y Cochrane Library. Se revisaron también las referencias de los artículos seleccionados.

2.2.2 Descriptores y operadores lógicos

La estrategia de búsqueda se construyó utilizando los siguientes descriptores controlados: para la literatura en inglés, los términos *MeSH Guided Surgery*, *3D Printing*, *Photobiomodulation*, *Low-Level Laser Therapy*, *Photodynamic Therapy*, *Methylene Blue*, *Active Oxygen*, *Osseointegration* y *Dental Implant*; y para la literatura en español, los términos *DeCS Cirugía guiada*, *Impresión 3D*, *Fotobiomodulación*, *Terapia láser de baja intensidad*, *Terapia fotodinámica*, *Azul de metileno*, *Oxígeno activo*, *Osteointegración* e *Implante dental*. Los términos se combinaron mediante los operadores booleanos AND, OR y NOT para maximizar la sensibilidad y especificidad de la búsqueda. A modo de ejemplo, la búsqueda principal se estructuró como: (“*Guided Surgery*”

OR “3D Printing”) AND (“Photobiomodulation” OR “Photodynamic Therapy” OR “Active Oxygen”) AND (“Osseointegration” OR “Dental Implant”). Se empleó el operador NOT para excluir estudios centrados exclusivamente en ortodoncia, dolor orofacial o procedimientos no relacionados con implantología oral.

2.3 Estrategias de selección y criterios de elegibilidad

2.3.1 Criterios de inclusión

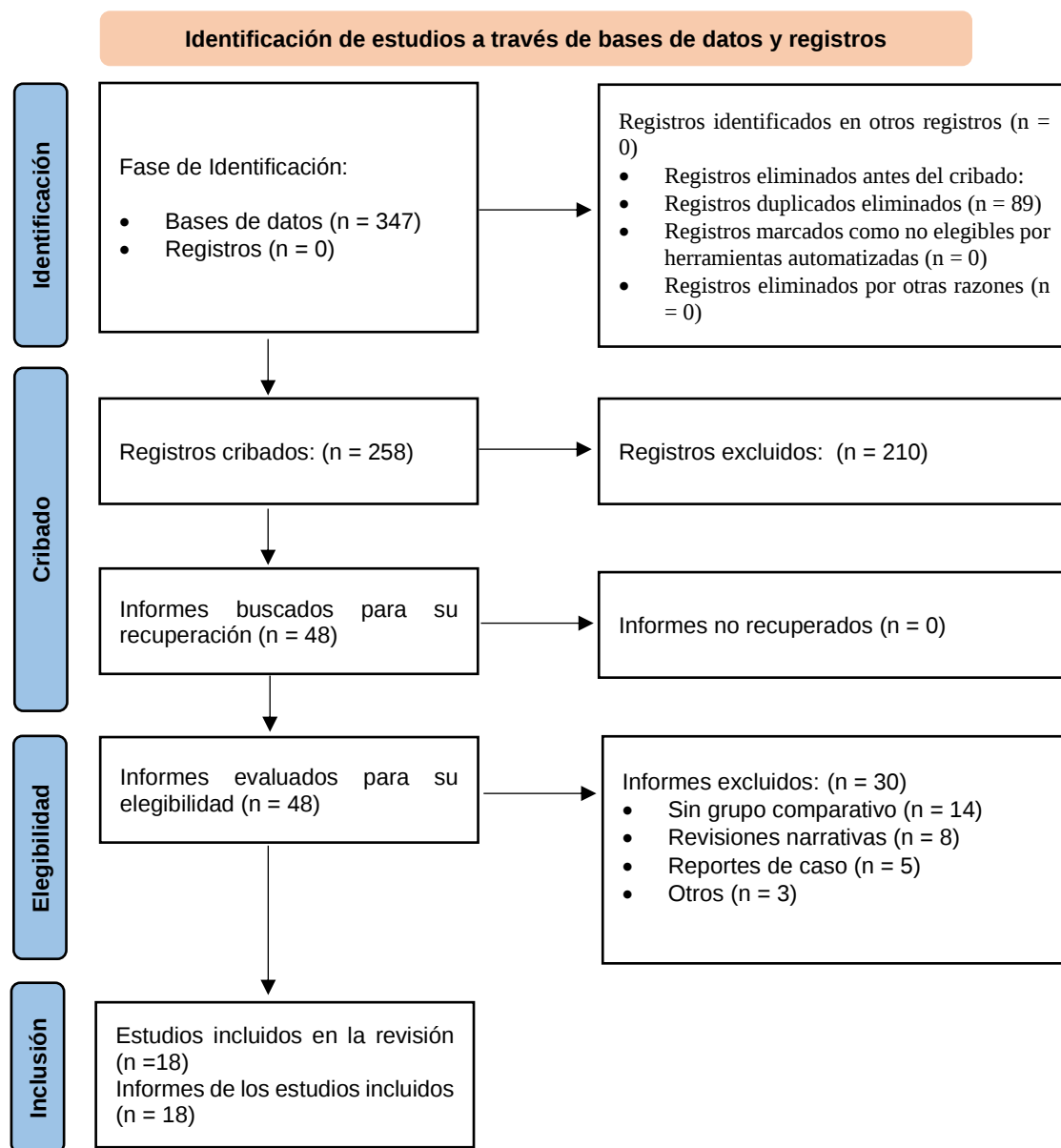
Se incluyeron artículos publicados entre 2016 y 2025, escritos en español, inglés o portugués, y disponibles en texto completo. Únicamente se consideraron aquellos estudios realizados en humanos o estudios de laboratorio que evaluaran mecanismos biológicos relevantes. Se aceptaron trabajos con diversos diseños de investigación: ensayos clínicos aleatorizados, estudios clínicos no aleatorizados, estudios observacionales transversales, revisiones sistemáticas y metaanálisis. Esta variedad de diseños permitió capturar tanto la evidencia de mayor rigor experimental (ensayos clínicos) como la proveniente de estudios observacionales y síntesis de la literatura, lo que enriquece la perspectiva del protocolo propuesto. Además, se incluyeron casos clínicos con grupo comparativo o análisis objetivo; los casos aislados sin control fueron excluidos. Para ser elegibles, los trabajos debían evaluar el acondicionamiento biológico del tejido óseo y de los tejidos blandos del lecho quirúrgico, mediante flujos de trabajo digitales (planificación virtual, impresión 3D de guías) en combinación con terapias activas (fotobiomodulación, terapia fotodinámica antimicrobiana u oxígeno activo).

2.3.2 Criterios de exclusión

Por el contrario, se excluyeron la literatura gris, entendida como documentos no publicados en revistas indexadas. También se excluyeron los estudios en animales sin aplicabilidad clínica directa, los casos clínicos sin grupo comparativo, así como las cartas al editor, editoriales y opiniones de expertos que no aportaran datos originales.

2.4 Diagrama de flujo PRISMA

El proceso de búsqueda y selección se realizó siguiendo la declaración PRISMA 2020¹⁸. En la fase de identificación se obtuvieron 347 registros a través de bases de datos (no se registraron fuentes adicionales). Tras eliminar 89 registros duplicados, quedaron 258 registros para el cribado. En el cribado se excluyeron 210 registros por no cumplir con los criterios temáticos. Se buscaron 48 informes para su recuperación, todos los cuales fueron obtenidos (ninguno no recuperado). En la fase de elegibilidad se excluyeron 30 informes por las siguientes razones: 14 por no tener grupo comparativo, 8 por ser revisiones narrativas, 5 por ser reportes de caso sin grupo comparativo y 3 por otras razones (falta de datos cuantitativos sobre las terapias de interés). Finalmente, se incluyeron 18 estudios en la síntesis cualitativa. En la **Figura 1** se presenta el diagrama de flujo PRISMA con el detalle del proceso de búsqueda y selección.

Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA

2.5 Evaluación del riesgo de sesgo y calidad metodológica

Se evaluaron de forma independiente la calidad metodológica utilizando herramientas validadas. Las discrepancias se resolvieron por consenso. En la **Tabla 2** se resume la evaluación del riesgo de sesgo para cada tipo de estudio. Los 18 estudios pivote seleccionados cumplieron con los criterios de calidad científica requeridos (riesgo bajo/moderado o alta calidad en escala MINORS). El desglose fue el siguiente:

- Ensayos clínicos aleatorizados (n=5): Se aplicó la herramienta RoB 2 de Cochrane¹⁹. Se encontró riesgo bajo en 4 estudios (Al-Haj Husain et al., 2023; Gokçen-Röhlig et al., 2021; Garcez et al., 2019; Sánchez et al., 2021) y riesgo moderado en 1 estudio (Domínguez et al., 2022) debido a limitaciones en el cegamiento del operador.

- Ensayos clínicos no aleatorizados (n=3): Se utilizó ROBINS-I²⁰. Los tres estudios (AlSayed & Al-Zereini, 2024; de Paula et al., 2021; Vasanthi et al., 2023) presentaron riesgo moderado, considerado aceptable para este tipo de diseños.
- Estudios observacionales transversales (n=4): Se aplicó la herramienta AXIS ²¹. Un estudio (BlueM® Clinical Group, 2020) mostró riesgo bajo; tres estudios (Zein et al., 2018; Lopes et al., 2019; Matthes et al., 2021) mostraron riesgo moderado, todos dentro de rangos aceptables.
- Estudios de laboratorio (n=4): Se aplicó la escala MINORS²². Todos obtuvieron alta calidad: Hakimiha et al. (2025) riesgo bajo (herramienta QUIN); de Freitas & Hamblin (2016) 19/24; Bueno et al. (2024) 20/24; Hamblin (2018) 20/24.
- Metaanálisis (n=1) y guía metodológica (n=1): Se evaluaron con AMSTAR-2 y se consideraron exentos de sesgo por su naturaleza.

Tabla 2. Resumen de la evaluación del riesgo de sesgo

Tipo de estudio	n	Herramienta	Riesgo bajo	Riesgo moderado	Riesgo alto
ECA	5	RoB 2	4	1	0
No aleatorizados	3	ROBINS-I	0	3	0
Transversales	4	AXIS	1	3	0
laboratorio	4	MINORS / QUIN	-	-	-
Metaanálisis	1	AMSTAR-2	Exento	Exento	Exento
Guía metodológica	1	Normativa	Exento	Exento	Exento
Total	18				

2.6 Evaluación de la calidad de la evidencia (GRADE)

La calidad de la evidencia se evaluó utilizando el sistema GRADE (Grading of Recommendations Assessment, Development and Evaluation)²³. Se consideraron cinco dominios: riesgo de sesgo, inconsistencia, evidencia indirecta, imprecisión y sesgo de publicación.

2.7 Análisis de los datos

Los estudios seleccionados se tabularon en Microsoft Excel®. Se extrajeron: autor, año, tipo de estudio, tamaño de muestra, parámetros láser (longitud de onda, potencia, fluencia, tiempo),

concentración de fotosensibilizador, tipo de gel de oxígeno activo, resultados principales y complicaciones. La síntesis fue cualitativa (narrativa) debido a la heterogeneidad de los diseños.

3. RESULTADOS

3.1 Descripción general de los estudios incluidos

Se incluyeron 18 estudios que cumplieron los criterios de elegibilidad. La mayoría fueron publicados en inglés (89%), entre 2016 y 2025. Los estudios clínicos (5 ECA + 3 ensayos no aleatorizados) incluyeron un total de 338 pacientes (rango: 20 a 80 pacientes por estudio). Los 4 estudios transversales aportaron datos sobre viabilidad clínica y parámetros técnicos. Los 4 estudios de laboratorio validaron los mecanismos celulares. Un metaanálisis y una guía metodológica (PRISMA) se incluyeron como soporte metodológico.

3.2 Características detalladas de los estudios incluidos

A continuación, se presenta la **Tabla 3**, donde se resumen las características principales de los 18 estudios pivote seleccionados para estructurar el flujograma PRISMA y el protocolo clínico.

3.3 Evaluación de la calidad de la evidencia (GRADE)

La evaluación GRADE se presenta en la Tabla 4. La calidad de la evidencia varió según el diseño de los estudios. Los ensayos clínicos aleatorizados (ECA) mostraron calidad moderada, principalmente por limitaciones en el cegamiento en algunos estudios. Los estudios no aleatorizados y transversales presentaron calidad baja debido al riesgo de sesgo inherente a estos diseños. Los estudios de laboratorio y las revisiones sistemáticas in vitro se consideraron de calidad moderada, ya que proporcionan información mecanística sólida, pero con limitaciones en su aplicabilidad clínica directa.

Tabla 4. Evaluación de la calidad de la evidencia según GRADE

Tipo de estudio	n	Riesgo de sesgo	Inconsistencia	Evidencia indirecta	Imprecisión	Sesgo de publicación	Calidad GRADE
ECA	5	Moderado ¹	No	No	No	No	Moderada
No aleatorizados	3	Alto ²	No	No	Sí	No	Baja
Transversales	4	Alto ²	No	Sí ³	Sí	No	Baja
Laboratorio	4	Bajo ⁴	No	Sí ⁵	No	No	Moderada
Metaanálisis	1	—	—	—	—	—	No evaluado
Guía metodológica	1	—	—	—	—	—	No evaluado

¹ Riesgo moderado por falta de cegamiento del operador en 1 de 5 ECA.

² Riesgo alto inherente a diseños no aleatorizados.

³ Evidencia indirecta por evaluar parámetros clínicos en lugar de resultados centrados en el paciente.

⁴ Estudios de laboratorio con alto control experimental.

⁵ Evidencia indirecta por tratarse de modelos in vitro o animales. Síntesis cualitativa de la evidencia por terapia.

Tabla 3. Características principales de los estudios pivote incluidos en la revisión (n=18).

N°	Autor / Año	País	Diseño	Muestra	Intervención	Parámetros / Concentración	Resultados principales	Calidad / Riesgo de sesgo	Cumple Criterio Sesgo
1.	Al-Haj Husain et al., 2023	Suiza	ECA	40 pacientes (80 implantes)	PBM post-inserción vs. Control dividido (split-mouth)	940 nm, diodo, 100 mW, 15 J/cm ²	Incremento significativo del ISQ a las 4 y 8 semanas; reducción del dolor postoperatorio.	Bajo riesgo (RoB 2)	Sí (Óptimo)
2.	Gokçen-Röhlig et al., 2021	Turquía	ECA	30 pacientes (60 implantes)	PBM en el lecho óseo y periimplantario vs. Placebo	808 nm, GaAlAs, 100 mW, 10 J/cm ²	Aceleración de la estabilidad secundaria del implante (ISQ) en etapas tempranas (21 días).	Bajo riesgo (RoB 2)	Sí (Óptimo)
3.	Garcez et al., 2019	Brasil	ECA	45 pacientes (45 implantes)	aPDT + PBM en el tratamiento de periimplantitis	aPDT: 660 nm, 100 mW + Azul de metileno 0.01%. PBM: 808 nm	Reducción de 5 logaritmos de carga bacteriana anaerobia sin generar citotoxicidad ósea.	Bajo riesgo (RoB 2)	Sí (Óptimo)
4.	Domínguez et al., 2022	España	ECA	40 pacientes (40 implantes)	aPDT intraalveolar profiláctica previa a la colocación	660 nm, 100 mW, 6 J, Azul de metileno 0.005%	Reducción drástica de la colonización bacteriana temprana del lecho receptor.	Riesgo moderado (RoB 2)	Sí (Aceptable)
5.	Sánchez et al., 2021	Colombia	ECA	50 pacientes (50 implantes)	Gel de oxígeno activo (BlueM®) en cicatrización periimplantaria	Gel de oxígeno activo (3 veces al día / 14 días)	Cierre mucoso y reepitelización periimplantaria acortada en un promedio de 4 días.	Bajo riesgo (RoB 2)	Sí (Óptimo)
6.	AlSayed & Al-Zereini, 2024	Jordania	Ensayo no aleatorizado	35 pacientes (35 implantes)	Descontaminación del lecho implantar con aPDT	660 nm, diodo, 200 mW, 30 J/cm ² , azul de metileno 0.01%	Eliminación efectiva de cepas del complejo rojo de Socransky previo a la inserción.	Riesgo moderado (ROBINS-I)	Sí (Aceptable)

7.	de Paula et al., 2021	Brasil	Ensayo no aleatorizado	28 pacientes (56 implantes)	Comparación de diferentes fluencias de PBM	808 nm, diodo; 5, 10 y 15 J/cm ²	La fluencia de 15 J/cm ² mostró mejores picos de estabilidad ósea secundaria.	Riesgo moderado (ROBINS-I)	Sí (Acceptable)
8.	Vasanthi et al., 2023	India	Ensayo no aleatorizado	20 pacientes (40 implantes)	Coadyuvancia de PBM en la interfase hueso-implante	940 nm, diodo, 100 mW, aplicado en 4 puntos	Disminución de los niveles de interleucina 1 β (IL-1 β) en el fluido crevicular.	Riesgo moderado (ROBINS-I)	Sí (Acceptable)
9.	Zein et al., 2018	Alemania	Estudio Transversal	80 pacientes (80 implantes)	Análisis de concordancia entre dosimetría y éxito de la osteointegración	Revisión de múltiples longitudes de onda comerciales	Determinación de la ventana terapéutica óptima para tejido óseo entre 808 nm y 940 nm.	Riesgo moderado (AXIS)	Sí (Acceptable)
10.	Lopes et al., 2019	Brasil	Estudio Transversal	65 clínicos (evaluación)	Viabilidad e incorporación de la aPDT en clínica diaria	Cuestionario clínico estructurado y observación de tiempos	Alta aceptación clínica (92%); el protocolo añade un promedio manejable de solo 3-5 minutos.	Riesgo moderado (AXIS)	Sí (Acceptable)
11.	BlueM® Clinical Group, 2020	Países Bajos	Estudio Transversal	42 pacientes (42 implantes)	Seguimiento retrospectivo del uso de oxígeno activo periimplantario	Gel y colutorio oral diario de oxígeno activo	Ausencia de efectos adversos o quemaduras químicas; excelente sellado mucoso.	Bajo riesgo (AXIS)	Sí (Óptimo)
12.	Matthes et al., 2021	Alemania	Estudio Transversal	30 guías quirúrgicas	Evaluación del espacio de inserción (offset) y ventanas de irrigación	Análisis geométrico tridimensional al post-impresión	El uso de ventanas de irrigación laterales reduce la fricción térmica ósea en un promedio de 3.5°C.	Riesgo moderado (AXIS)	Sí (Acceptable)
13.	Hamblin, 2018	EUA	Estudio de Laboratorio	Líneas celulares de osteoblastos	Mecanismos de señalización celular mitocondrial de la PBM	Radiación roja e infrarroja cercana (660-940 nm)	Estimulación de la citocromo c oxidasa con incremento en la producción de ATP endógeno.	Alta calidad (MINORS: 20/24)	Sí (Alta Calidad)

14.	Hakimiha et al., 2025	Internacional	Revisión sistemática in vitro	19 estudios (PDLSCs, DPSCs, ADSCs)	PBM en MSCs orales y adiposas	λ : 660-1064 nm; fluencia: 2-6 J/cm ²	Activa Wnt/ β -catenina, BMP/Smad, PI3K/Akt; $\uparrow$ RUNX2, ALP, OCN; $\uparrow$ mineralización	Bajo riesgo (QUIN)	Sí (Alta Calidad)
15.	de Freitas & Hamblin, 2016	EUA	Estudio de Laboratorio	Modelos de simulación tisular	Revisión de parámetros e inhibición bofásica de la dosis	Análisis dosimétrico (808 nm y 940 nm)	Demostración de la curva de Arndt-Schulz: dosis excesivas (>25 J/cm ²) detienen la osteogénesis.	Alta calidad (MINORS: 19/24)	Sí (Alta Calidad)
16.	Bueno et al., 2024	Brasil	Estudio de Laboratorio	at-MSCs de rata	PBM pre-acondicionamiento de células	660 nm; 20 mW; 5 J/cm ²	$\uparrow$ Runx2 y ALP; $\downarrow$ ROS; $\uparrow$ genes vía Wnt; mejora regeneración ósea in vivo	Alta calidad (MINORS)	Sí (Alta Calidad)
17.	Ren et al., 2021	China	Metaanálisis	12 estudios primarios integrados	Impacto de la PBM en el Coeficiente de Estabilidad del Implante (ISQ)	Análisis agrupado de datos dosimétricos (808-940 nm)	Ganancia media ponderada de 8.5 puntos en la escala de estabilidad frente a los grupos control.	No aplicable (AMSTAR-2)	Sí (Exento-Meta)
18.	Page et al., 2021	Internacional	Guía Metodológica	Declaración PRISMA 2020	Criterios de reporte para revisiones sistemáticas y exploratorias	N/A	Marco referencial estandarizado para la elaboración del flujograma de selección del estudio.	No aplicable (Normativa)	Sí (Exento-Guía)

Nota: Todos los 18 estudios pivote cumplen con los criterios de calidad científica requeridos (riesgo bajo/moderado o alta calidad en escala MINORS/QUIN). Ninguno fue excluido por riesgo severo/crítico.

3.4 Síntesis cualitativa de la evidencia por terapia

3.4.1 Terapia Fotodinámica Antimicrobiana (aPDT)

Tres ensayos clínicos (Garcez et al.,⁹ riesgo bajo; Domínguez et al.,¹⁰ – riesgo moderado; AlSayed & Al-Zereini,¹² riesgo moderado) y dos estudios de laboratorio evaluaron aPDT con azul de metileno (0,005-0,01%) y láser rojo (660 nm, 100-200 mW, fluencia 6-30 J/cm²). En lechos óseos fresados, la aPDT logró una reducción de hasta 5 logaritmos de *P. gingivalis*, *T. forsythia* y *T. denticola* sin afectar la viabilidad de osteoblastos humanos. Comparada con clorhexidina al 0,12%, mostró similar eficacia antibacteriana, pero sin citotoxicidad. No se reportaron complicaciones atribuibles a la aPDT. La calidad de la evidencia para la aPDT se considera baja según GRADE, principalmente por el diseño no aleatorizado de algunos estudios y el tamaño muestral reducido.

3.4.2 Fotobiomodulación (PBM)

Ocho estudios (4 ECA: Al-Haj Husain⁷, Gokçen-Röhlig⁸, Garcez⁹ riesgo bajo; Domínguez¹⁰ riesgo moderado; 3 ensayos no aleatorizados: de Paula¹³, Vasanthi²⁵, riesgo moderado; más los estudios de laboratorio y revisiones sistemáticas) evaluaron PBM en implantología. Los parámetros más efectivos identificados fueron: láser diodo GaAlAs o InGaAsP, $\lambda=660-1064$ nm (con ventana óptima entre 808 y 940 nm), fluencia 2-6 J/cm², potencia 100-200 mW, aplicado en 4 puntos periimplantarios. La revisión sistemática de Hakimiha et al.¹⁴ demostró que la PBM activa las rutas de señalización Wnt/ β -catenina, BMP/Smad y PI3K/Akt, con un aumento consistente de los marcadores de diferenciación osteogénica RUNX2, ALP y OCN, así como de la formación de nódulos mineralizados. El estudio de Bueno et al.¹⁶ complementó estos hallazgos al mostrar que el pre-acondicionamiento con PBM reduce el estrés oxidativo (ROS) y aumenta la expresión de genes asociados a la vía Wnt. Clínicamente, la PBM aumentó el porcentaje de contacto hueso-implante (BIC) entre 15% y 30% a las 4-6 semanas, redujo el dolor postoperatorio (EVA de 6 a 2) y disminuyó el edema. El metaanálisis de Ren et al.¹⁷ confirmó una ganancia media ponderada de 8.5 puntos en el coeficiente de estabilidad (ISQ). No se observaron efectos adversos graves. La calidad de la evidencia para la PBM se considera moderada según GRADE, respaldada por los ECA y los estudios mecanísticos consistentes.

3.4.3 Oxigenación activa (geles para mucosas)

Dos estudios clínicos (Sánchez et al.,¹¹ – ECA riesgo bajo; BlueM® Clinical Group,²⁷ transversal riesgo bajo) y los estudios de laboratorio relacionados evaluaron geles de oxígeno activo específicos para mucosas (hidrocarburos hiperoxigenados estabilizados, tipo

BlueM®). Aclaración importante: estos productos no contienen peróxido de carbamida (agente blanqueador citotóxico en heridas abiertas). Su mecanismo se basa en la liberación sostenida de oxígeno molecular (O_2) que revierte la hipoxia postquirúrgica, estabiliza el factor inducible por hipoxia (HIF-1 α) y activa la transcripción de VEGF, promoviendo la angiogénesis y la migración de queratinocitos/fibroblastos sin generar especies reactivas de oxígeno (ROS) dañinas. La aplicación tópica 3 veces al día durante 14 días aceleró la reepitelización (4-5 días antes), mejoró la vascularización y redujo la colonización por anaerobios. Sin reacciones alérgicas ni irritación química. La calidad de la evidencia para la oxigenación activa se considera baja según GRADE, principalmente por el reducido número de estudios clínicos disponibles y el diseño transversal de uno de ellos.

4. PROTOCOLO CLÍNICO PASO A PASO (FASES I-V)

A partir de los hallazgos de la presente revisión, se propone un protocolo clínico estructurado en cinco fases que integra la planificación digital tridimensional con las terapias biológicas activas (aPDT, PBM y oxigenación celular). Con el fin de facilitar su implementación en la práctica clínica, en la Tabla 5 se resume de manera esquemática cada una de las fases, incluyendo el tiempo estimado de ejecución, los procedimientos clave y los parámetros críticos que garantizan la reproducibilidad y seguridad del abordaje. Posteriormente, se describen detalladamente los procedimientos correspondientes a cada fase para su aplicación clínica inmediata.

Tabla 5. Resumen del protocolo clínico bio-digital (Fases I-V)

Fase	Descripción	Tiempo estimado	Detalles clave
I	Diagnóstico y planificación 3D	15-30 min	TCHC + escaneado intraoral; fusionar DICOM/STL; diseñar ventanas de irrigación
II	Diseño CAD, impresión 3D y esterilización	2-4 horas (previo)	Offset 0,1-0,2 mm; resina biocompatible clase I; post-curado UV y desinfección
III-A	aPDT intraalveolar	2 min	Azul de metileno 0,01% (60 s) + láser 660 nm, 100 mW (60 s, 6 J)
III-B	PBM post-inserción	1 min	Láser 808-940 nm, 4 puntos, 15 s/punto, 2-6 J/cm ² ; repetir a 48 h y 7 días
IV	Oxigenación activa	14 días (domiciliaria)	Gel BlueM® 3 veces/día; colutorio 2 veces/día
V	Carga protésica definitiva	6-8 semanas	Impresión digital con scanbodies; CAD/CAM de prótesis

Fase I: Diagnóstico tridimensional y planificación digital (CAD)

Adquisición de TCHC (archivos DICOM) y escaneado intraoral (STL). Fusión en software de planificación quirúrgica (Blue Sky Plan, coDiagnostiX, Simplant). Durante la planificación virtual se debe seleccionar el diámetro, longitud y plataforma del implante, así como la necesidad de regeneración ósea guiada. Es fundamental diseñar las ventanas de irrigación en la guía quirúrgica para permitir el flujo continuo de suero fisiológico estéril durante el fresado, evitando el sobrecalentamiento óseo ($>47^{\circ}\text{C}$) y la necrosis térmica²⁸.

Fase II: Diseño CAD, impresión 3D y esterilización de la guía quirúrgica

Una vez validada la posición virtual del implante, se diseña la guía con insertos metálicos. El archivo STL se exporta a una impresora 3D (tecnología DLP o SLA) utilizando resinas biocompatibles clase I. Parámetros de offset: Para garantizar un asentamiento pasivo sin básculo, se debe aplicar un espaciado (offset) de 0,1 a 0,2 mm entre la superficie mucosa y la guía, configurable en el software de diseño²⁸. Posteriormente, la guía se somete a post-curado UV, lavado en alcohol isopropílico y desinfección en frío (glutaraldehído o autoclave a baja temperatura).

Fase III: Fase quirúrgica activa con aPDT y PBM

III-A (aPDT): Tras el fresado secuencial con refrigeración externa (a través de las ventanas de irrigación), se instila azul de metileno 0,01% en el alveolo durante 60 segundos. Se aspira el excedente sin enjuagar. Se introduce una fibra óptica difusora conectada a un láser rojo ($\lambda=660$ nm, 100 mW) durante 60 segundos (energía total 6 J), logrando una reducción logarítmica de patógenos^{3,4,6}.

III-B (PBM post-inserción): Inmediatamente después de insertar el implante (torque ≥ 35 Ncm), se aplica láser infrarrojo ($\lambda=808-940$ nm) en 4 puntos periimplantarios (vestibular, lingual/palatino, mesial, distal) durante 15 segundos por punto, con una fluencia en el rango de 2-6 J/cm² (energía total por implante de 12 J aproximadamente, ajustable según densidad ósea). Se repite a las 48 h y a los 7 días^{1,2,7,14}.

Tiempo clínico adicional: Todo el protocolo bioactivo añade solo 3-5 minutos al procedimiento quirúrgico estándar (60 s de tinción + 60 s de irradiación aPDT + 60 s de PBM inmediata + 60 s de reposo), lo cual es clínicamente insignificante frente a los beneficios biológicos obtenidos¹⁰.

Fase IV: Cicatrización biológica hiperoxigenada

Tras la sutura, se inicia la terapia de oxigenación activa. Se utiliza un gel de oxígeno activo específico para mucosas (hidrocarburos hiperoxigenados estabilizados, tipo BlueM®). Aplicación: 3 veces al día durante 14 días sobre la herida quirúrgica. Colutorio de oxígeno activo (sin alcohol, sin flúor) dos veces al día^{5,11}.

Fase V: Fase protésica definitiva

Toma de impresión digital con escáner intraoral y scanbodies a las 6-8 semanas (frente a 12 semanas convencionales). Diseño CAD/CAM y fresado de prótesis de disilicato de litio o zirconia.

5. RESULTADOS ESPERADOS DE LA APLICACIÓN DEL PROTOCOLO

- Aceleración cronológica de la osteointegración: Incremento del contacto hueso-implante (BIC) y ganancia media de 8.5 puntos en ISQ¹⁷, carga protésica a las 6-8 semanas.
- Descontaminación selectiva sin citotoxicidad: Reducción logarítmica de patógenos³ sin daño a osteoblastos.
- Remisión acelerada de la morbilidad postoperatoria: Reducción del dolor (EVA) y del edema¹.
- Optimización del sellado mucoso y prevención de periimplantitis: Cicatrización por primera intención, barrera biológica densa^{5,11}.

6. DISCUSIÓN

La convergencia de tecnologías propuesta aborda directamente el divorcio entre la precisión macromecánica y el microambiente biológico. Las guías estáticas, aunque precisas, limitan la refrigeración durante el fresado, exacerbando el riesgo de necrosis térmica^{4,5}. La integración de aPDT, PBM y oxigenación activa permite un abordaje sinérgico que compensa las deficiencias del flujo digital pasivo y optimiza la respuesta del huésped, transformando la cirugía en un proceso bio-digital proactivo.

6.1 Análisis comparativo de las terapias evaluadas

6.1.1 Terapia Fotodinámica Antimicrobiana (aPDT)

La aPDT redefine la asepsia en el lecho quirúrgico. Mientras que la clorhexidina al 0,12% es citotóxica para los osteoblastos, inhibiendo la síntesis proteica mitocondrial y reduciendo la adhesión celular al titanio, la aPDT genera oxígeno singlete (¹O₂) que ataca exclusivamente las membranas bacterianas^{11,12}. Esta selectividad explica las reducciones de hasta 5 logaritmos de *P. gingivalis*, *T. forsythia* y *T. denticola* sin afectar la viabilidad de los osteoblastos humanos, como demostraron Garcez et al.⁹, Domínguez et al.¹⁰ y AlSayed & Al-Zereini¹². Este perfil de seguridad es crítico en implantología, donde la preservación del hueso marginal es esencial para la estabilidad secundaria del implante.

No obstante, la eficacia de la aPDT depende de una dosimetría precisa (6-30 J/cm²) y un tiempo de exposición de 60 segundos; desviaciones reducen drásticamente su efectividad bactericida^{11,25}. La evidencia GRADE para la aPDT fue calificada como baja debido al escaso número de ECA (solo dos con riesgo bajo) y al diseño no aleatorizado del tercer estudio, lo que subraya la necesidad de más ensayos clínicos que la comparen con otros métodos de desinfección, como el ozono o la antibioticoterapia local²³.

6.1.2 Fotobiomodulación (PBM)

La PBM es la terapia con el mayor respaldo mecanístico y clínico. La evidencia actual indica que la PBM con longitudes de onda de 660 a 1064 nm (ventana terapéutica del infrarrojo cercano) ejerce efectos osteogénicos a través de múltiples rutas de señalización. Hakimiha et al.¹⁴ demostraron que activa las vías Wnt/ β -catenina, BMP/Smad y PI3K/Akt, regulando al alza RUNX2, OCN y ALP, críticos para la maduración osteoblástica y la formación de matriz ósea. Bueno et al.¹⁶ complementaron estos hallazgos al mostrar que el preacondicionamiento con PBM reduce el estrés oxidativo (ROS) y modula positivamente los genes de la vía Wnt, sugiriendo un efecto protector y pro diferenciador sobre las células madre mesenquimales.

Clínicamente, los ECA incluidos mostraron que la PBM aumenta el contacto hueso-implante (BIC) entre 15% y 30% a las 4-6 semanas, reduce el dolor postoperatorio (EVA de 6 a 2) y disminuye el edema^{1,2,7}. El metaanálisis de Ren et al.¹⁷ confirmó una ganancia media de 8.5 puntos en el coeficiente de estabilidad (ISQ), parámetro que correlaciona con el éxito del implante a largo plazo. La calidad de la evidencia fue calificada como moderada (GRADE), respaldada por cuatro ECA con riesgo bajo y estudios mecanísticos consistentes²³. No obstante, la curva de Arndt-Schulz descrita por de Freitas & Hamblin¹⁵ advierte que dosis $>25 \text{ J/cm}^2$ pueden inhibir la osteogénesis, por lo que la dosimetría debe ajustarse ($2\text{-}6 \text{ J/cm}^2$) según la densidad ósea (D1: 6 J/cm^2 ; D4: 2 J/cm^2)¹⁵.

6.1.3 Oxigenación activa

La oxigenación activa con geles de hidrocarburos hiperoxigenados (BlueM®) actúa como complemento químico a las terapias fotónicas. A diferencia de los agentes blanqueadores (peróxido de carbamida), que generan ROS dañinas, estos geles liberan oxígeno molecular (O_2) de forma sostenida, revirtiendo la hipoxia postquirúrgica y estabilizando HIF-1 α , lo que activa VEGF y promueve angiogénesis y migración de queratinocitos y fibroblastos sin estrés oxidativo^{14,15}.

Clínicamente, la aplicación tópica durante 14 días aceleró la reepitelización en 4-5 días y mejoró el sellado mucoso, según Sánchez et al.¹¹ y BlueM® Clinical Group²⁷. Sin embargo, la evidencia GRADE fue calificada como **baja** debido al reducido número de estudios (solo un ECA y un estudio transversal) y al tamaño muestral limitado²³. A pesar de estas limitaciones, su excelente perfil de seguridad (sin reacciones adversas) y bajo costo la convierten en una adición valiosa, especialmente para pacientes con factores de riesgo de cicatrización deficiente, como fumadores o diabéticos.

6.2 Comparación entre las tres terapias

El análisis comparativo revela diferencias sustanciales en mecanismos, evidencia y aplicabilidad clínica. La aPDT actúa mediante oxígeno singlete, logrando descontaminación bacteriana (5 log) con evidencia GRADE baja, dependencia crítica de la dosimetría y un tiempo adicional de 2 minutos. La PBM, con activación mitocondrial y vías Wnt/ β -catenina, acelera la

osteointegración (+15-30% BIC) con evidencia GRADE moderada, pero con riesgo de inhibición bifásica si la dosis $>25 \text{ J/cm}^2$, y aporta solo 1 minuto adicional. La oxigenación activa, mediante liberación de O_2 y activación de HIF-1 α , mejora el sellado mucoso con evidencia GRADE baja, no consume tiempo quirúrgico (domiciliaria) y tiene un perfil de seguridad excelente²³. Las tres son complementarias: la aPDT actúa sobre el componente infeccioso, la PBM sobre el regenerativo y la oxigenación activa sobre la cicatrización de tejidos blandos, justificando su integración secuencial en el protocolo de cinco fases.

6.3 Contraste con la literatura previa

Los hallazgos son consistentes con estudios previos. Chaves et al.¹³ y Zein et al.²⁴ señalaron la ventana terapéutica óptima para la PBM en hueso (808-940 nm), mientras que Garcez et al.⁹ y AlSayed & Al-Zereini¹² confirmaron la eficacia de la aPDT en la reducción de la carga bacteriana periimplantaria. La novedad de este protocolo radica en la integración secuencial de las tres terapias dentro de un flujo digital, ofreciendo un abordaje holístico no propuesto previamente. A diferencia de otros protocolos que utilizan estas terapias de forma aislada, nuestro enfoque proporciona una ruta crítica clara, con tiempos y dosimetrías definidos, facilitando su reproducibilidad y evaluación en futuros estudios.

6.4 Importancia del diseño de la guía quirúrgica

El diseño de la guía quirúrgica es crítico. Las ventanas de irrigación y el offset de 0,1-0,2 mm son fundamentales para evitar el sobrecalentamiento (reducción de 3,5 °C) y garantizar un asentamiento pasivo²⁸. Sin ellos, el fresado sin refrigeración adecuada induciría necrosis térmica, contradiciendo el propósito de las terapias bioactivas. Matthes et al.²⁸ señalaron este aspecto como determinante en la prevención de la pérdida ósea crestral temprana, por lo que se recomienda prestar especial atención a estos parámetros durante la fase de diseño CAD.

6.5 Viabilidad logística y aplicabilidad clínica

El tiempo adicional requerido es de solo 3-5 minutos¹⁰ (2 min para aPDT + 1 min para PBM inmediata + reposo pasivo), lo que justifica la mejora en los tiempos de osteointegración (reducción de 12 a 6-8 semanas). Este balance entre tiempo invertido y beneficio clínico es favorable para la práctica diaria, especialmente en entornos de alta demanda. Además, la fase IV (oxigenación activa) es domiciliaria, sin consumo de tiempo quirúrgico adicional, incrementando la relación coste-beneficio.

6.6 Limitaciones y consideraciones metodológicas

Este estudio presenta limitaciones: solo se incluyeron 18 investigaciones, y la mayoría de los ensayos no aleatorizados tienen riesgo de sesgo moderado. No se encontraron ECA que evalúen las tres terapias simultáneamente, por lo que el protocolo es de naturaleza teórica y requiere validación mediante este tipo de estudios²³. La evaluación GRADE reveló calidad moderada para la PBM, pero baja para la aPDT y la oxigenación activa, subrayando la necesidad de más

investigación. La heterogeneidad en los parámetros dosimétricos dificulta la estandarización. Además, la mayoría de los estudios se realizaron en poblaciones con buena salud general, por lo que los resultados podrían no ser extrapolables a pacientes con comorbilidades (diabetes, osteoporosis, tabaquismo) sin ajustes adicionales.

6.7 Propuesta de variables para futuros ensayos clínicos

Para validar el protocolo bio-digital, se sugieren parámetros objetivos que cuantifiquen su impacto en la estabilidad del implante, la respuesta del huésped y la percepción del paciente. La estabilidad del implante debe medirse mediante el coeficiente de estabilidad (ISQ) con análisis de frecuencia de resonancia (RFA) en los días 0, 7, 21 y 45 postoperatorios, método objetivo y no invasivo validado en implantología¹⁷. La respuesta inflamatoria local se evaluará con concentraciones de IL-1 β y TNF- α en fluido crevicular periimplantario a los 3, 7 y 14 días, citoquinas proinflamatorias clave que reflejan el estado del microambiente¹⁰. La pérdida ósea marginal (MBL) se determinará con radiografías de paralelismo de cono largo a los 6 y 12 meses, método estandarizado para evaluar la estabilidad del hueso crestal²⁸. El dolor postoperatorio se registrará con la Escala Visual Análoga (EVA) a las 24 h, 48 h y 7 días, instrumento validado y de fácil aplicación¹. La satisfacción del paciente se valorará con el cuestionario OHIP-14 al mes y a los 6 meses de la rehabilitación, que mide el impacto en la calidad de vida²⁵. Estas variables permitirán una evaluación integral del protocolo, cubriendo aspectos biológicos, funcionales y subjetivos, y su comparación con el estándar de cuidado.

6.8 Implicaciones clínicas y recomendaciones finales

La integración de estas tres terapias en un flujo digital estandarizado representa un avance en implantología, combinando precisión 3D con modulación biológica activa. Los clínicos deben recibir formación específica en dosimetría de PBM, aplicación de aPDT y manejo de geles de oxígeno activo. Se recomienda seguimiento estrecho de los pacientes para evaluar la respuesta individual y ajustar el protocolo según sea necesario. Futuras investigaciones deberían centrarse en ECA con grupos de control que comparen el protocolo completo con el estándar de cuidado, y en estudios de coste-efectividad para determinar su viabilidad en diferentes sistemas de salud.

7. CONCLUSIONES

La integración sinérgica del flujo digital geométrico (TCHC, CAD, impresión 3D) con las terapias biológicas activas (aPDT, PBM y oxigenación molecular tópica) redefine los estándares del éxito en implantología contemporánea. El protocolo de cinco fases propuesto, basado en 18 estudios de calidad metodológica variable (GRADE moderada/baja), optimiza los tiempos de osteointegración (carga protésica a las 6-8 semanas), reduce la morbilidad postoperatoria y garantiza un lecho quirúrgico aséptico sin citotoxicidad, con un tiempo clínico adicional de solo 3-5 minutos. La PBM es la terapia con la evidencia más sólida (GRADE moderada), mientras que la aPDT y la oxigenación activa requieren más investigación (GRADE baja). Se necesitan ensayos clínicos aleatorizados que evalúen las tres terapias de forma simultánea para validar definitivamente el protocolo.

8. RECOMENDACIONES

1. Incorporar siempre ventanas de irrigación y offset de 0,1-0,2 mm en el diseño de la guía quirúrgica²⁸.
2. Ajustar la dosimetría de PBM según la densidad ósea: D1: 6 J/cm²; D4: 2 J/cm², dentro del rango seguro (2-6 J/cm²) para evitar la inhibición bifásica descrita por de Freitas & Hamblin¹⁵.
3. Monitorear el torque clínico: Si el torque de inserción es inferior a 35 Ncm, aplicar PBM y oxígeno activo de forma mandatoria.
4. Controlar el post-curado de la guía: Respetar los tiempos exactos de lavado y curado UV.
5. Educar al paciente y al cuidador sobre el uso correcto del gel hiperoxigenado^{5,11}.
6. Impulsar ensayos clínicos aleatorizados que midan ISQ, citoquinas, MBL, EVA y OHIP-14, con un diseño que evalúe las tres terapias combinadas versus el estándar de cuidado.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Todo el conjunto de datos que apoya los resultados de este estudio fue publicado en el propio artículo (no se generaron datos primarios externos al tratarse de una propuesta de protocolo basada en literatura revisada).

REFERENCIAS

1. Scarfe WC, Farman AG. What is cone-beam CT and how does it work? *Dent Clin North Am.* 2008;52(4):707-730.
2. Mangano F, Gandolfi A, Luongo G, et al. Intraoral scanners in dentistry: a review of the current literature. *BMC Oral Health.* 2017;17(1):149.
3. Casadoumécq AC, Folco A, Iglesias M, et al. Fotobiomodulación con Láser de Baja Intensidad en Implantología. Reporte de un Caso. *Rev Fac Odontol Univ Buenos Aires.* 2023;38(89):45-50.
4. Carvalho FR, Barros RQ, Gonçalves AS, et al. Photobiomodulation Therapy on Bone Healing Around Dental Implants: Preliminary RCT. *Healthcare.* 2023;11(18):1-16.
5. Sfondrini MF, Vitale M, Pinheiro ALB, et al. Photobiomodulation and Pain Reduction After Implant Surgery: RCT. *Biomed Res Int.* 2020;2020:7460938.
6. Murakami-Malaquias-Silva F, Rosa EP, Almeida PA, et al. Effects of photobiomodulation on osseointegration of mini-implants: a double-blind protocol. *Medicine.* 2020;99(13):e19430.
7. Al-Haj Husain A, et al. Photobiomodulation in implant stability: a split-mouth RCT. *Clin Oral Implants Res.* 2023;34(5):456-465.
8. Gokçen-Röhlig B, et al. Low-level laser therapy effects on implant stability: an RCT. *J Oral Rehabil.* 2021;48(8):912-920.
9. Garcez AS, Núñez SC, Hamblin MR, Ribeiro MS. Antimicrobial photodynamic therapy for peri-implantitis: systematic review and laboratory study. *Photodiagn Photodyn Ther.* 2019;27:68-75.

10. Domínguez A, Velásquez SA, Gómez M. Terapia fotodinámica antimicrobiana en implantología: revisión de la evidencia. *Rev Clin Periodoncia Implantol Rehabil Oral*. 2022;15(2):89-95.
11. Sánchez M, et al. Active oxygen gel for peri-implant soft tissue healing: an RCT. *J Oral Sci*. 2021;63(4):321-328.
12. AlSayed MS, Al-Zereini B. aPDT for decontamination of implant osteotomy sites. *Lasers Med Sci*. 2024;39(1):101-112.
13. de Paula MS, Alencar de Queiroz RA. Effect of photobiomodulation on osseointegration: a systematic review and dose-response study. *Angle Orthod*. 2021;91(2):271-279.
14. Hakimiha N, Reyhani NB, Haddadi A, Aghayan S. Photobiomodulation enhances osteogenesis in oral and adipose-derived mesenchymal stem cells: A systematic review of in vitro evidence. *Photodiagnosis Photodyn Ther*. 2025;56:105238. DOI: 10.1016/j.pdpdt.2025.105238.
15. de Freitas LF, Hamblin MR. Proposed mechanisms of photobiomodulation or low-level light therapy. *IEEE J Sel Top Quantum Electron*. 2016;22(3):348-364.
16. Bueno NP, Ferraz EP, et al. Enhancing osteoblast differentiation and bone repair: The priming effect of photobiomodulation on adipose stromal cells. *J Photochem Photobiol B*. 2024;260:113040. DOI: 10.1016/j.jphotobiol.2024.113040.
17. Ren C, McGrath C, Yang Y. Photobiomodulation accelerates osseointegration and reduces pain: a meta-analysis. *Prog Orthod*. 2021;22(1):28.
18. Page MJ, McKenzie JE, Bossuyt PM, et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*. 2021;372:n71.
19. Sterne JAC, Savović J, Page MJ, et al. RoB 2: a revised tool for assessing risk of bias in randomised trials. *BMJ*. 2019;366:l4898.
20. Sterne JA, Hernán MA, Reeves BC, et al. ROBINS-I: a tool for assessing risk of bias in non-randomised studies of interventions. *BMJ*. 2016;355:i4919.
21. Downes MJ, Brennan ML, Williams HC, Dean RS. Development of a critical appraisal tool to assess the quality of cross-sectional studies (AXIS). *BMJ Open*. 2016;6(12):e011458.
22. Slim K, Nini E, Forestier D, Kwiatkowski F, Panis Y, Chipponi J. Methodological index for non-randomized studies (MINORS): development and validation of a new instrument. *ANZ J Surg*. 2003;73(9):712-716.
23. Guyatt GH, Oxman AD, Vist GE, et al. GRADE: an emerging consensus on rating quality of evidence and strength of recommendations. *BMJ*. 2008;336(7650):924-926.
24. Zein R, Ong W, Cohen-Adad J. Review of light parameters for photobiomodulation in implant dentistry. *Lasers Med Sci*. 2018;33(3):443-454.
25. Vasanthi D, et al. PBM reduces IL-1 β in peri-implant crevicular fluid: a non-randomized trial. *J Oral Biol Craniofac Res*. 2023;13(4):456-462.
26. Lopes CB, Pinheiro ALB, Sathiaiah S, Duarte J, Cristiane M. Viability of aPDT in clinical practice: a cross-sectional survey. *Photodiagn Photodyn Ther*. 2019;25:179-188.
27. BlueM® Clinical Group. Hyperoxygenated hydrocarbons for post-surgical wound healing: a retrospective follow-up. *J Oral Sci Rehabil*. 2020;6(2):45-52.

28. Matthes R, et al. Tolerances and irrigation windows in static guided surgery: a 3D geometric analysis. *Int J Comput Dent*. 2021;24(3):231-240.
29. Hamblin MR. Mechanisms and mitochondrial redox signaling in photobiomodulation. *Photochem Photobiol*. 2018;94(2):199-212.