

Revisión científica sistemática sobre las aleaciones de magnesio para el desarrollo de implantes  
ortopédicos: efecto de la adición de elementos aleantes

Andrea Lizeth López Coy y Luisa Fernanda González Pilonieta

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Metalúrgico

Director

Ana Emilse Coy Echeverría

Dr. Ciencia y Tecnología de Materiales

Codirector

Fernando Viejo Abrante

Dr. Ciencia y Tecnología de Materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Bucaramanga

2023

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	9
1. Objetivos .....	12
1.1 Objetivo general.....	12
1.2 Objetivos específicos .....	12
2. Descripción metodológica .....	13
2.1 Identificación y comprensión del tema.....	13
2.2 Identificación de bases de datos y fuentes de información.....	14
2.3 Búsqueda, selección y filtración de información.....	14
2.3.1 Identificación .....	15
2.3.2 Cribado.....	16
2.3.3 Incluidos.....	16
2.4 Análisis bibliométrico.....	16
2.5 Identificación de avances y desafíos.....	17
3. Resultados .....	17
3.1 Identificación y comprensión del tema.....	17
3.2 Búsqueda, selección y filtración de información.....	18
3.3 Análisis bibliométrico.....	22
3.4 Reconocimiento de avances y tendencias tecnológicas .....	24
3.4.1 Fundamentos de la corrosión del magnesio y sus aleaciones .....	24
3.4.2 Elementos aleantes en implantes de magnesio más comunes en aplicaciones biomédicas.	26

3.4.2.1 Mg-xCa.....	27
3.4.2.2 Mg-xZn.....	29
3.4.2.3 Mg-xSr. ....	31
3.4.2.4 Mg-X (REE, rare earth elements). ....	33
3.4.2.5 Estudios de aleaciones ternarias y cuaternarias de Mg-X(Ca, Zn, Sr, Mn, REE) .....	36
3.4.2.5.1. Mg-Sr-Ca y MgSrZn.....	36
3.4.2.5.2. Mg-Zn-Ca-Mn-Sr.....	36
3.5 Discusión de los desafíos actuales y perspectivas .....	37
4. Conclusiones.....	38
Referencias Bibliográficas .....	40
Apéndices.....	58

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. Ecuaciones de búsqueda y resultados arrojados según cada base de datos .....	18
Tabla 2. Cantidades diarias recomendadas en el cuerpo humano y solubilidad de los elementos más comúnmente usados en aleaciones de Mg.....	27
Tabla 3. Resultados de publicaciones de aleaciones de magnesio con adición de calcio.....	29
Tabla 4. Resultados de publicaciones de aleaciones de magnesio con adición de zinc.....	31
Tabla 5. Resultados de publicaciones de aleaciones de magnesio con adición de estroncio.....	32
Tabla 6. Resultados de publicaciones de aleaciones de magnesio con adición de tierras raras. ..	35
Tabla 7. Resultados de publicaciones de aleaciones de magnesio con adición de Cu, Sn, Si, Zr, Mn, Ag, Mo y Li.....	58

**Lista de Figuras**

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Etapas metodológicas empleadas para el desarrollo de la revisión sistemática .....	13
Figura 2. Diagrama de flujo del proceso de identificación y selección de documentos mediante el método PRISMA.....	15
Figura 3. a) Metodología empleada para la exclusión de publicaciones b) porcentajes de publicaciones rechazadas según cada criterio de exclusión.....	20
Figura 4. Resultados de la selección de documentos incluidos mediante el método PRISMA....	21
Figura 5. Número de publicaciones por año .....	22
Figura 6. Palabras claves representativas de los documentos seleccionados para la revisión .....	23

**Lista de Apéndices**

	<b>Pág.</b>
Apéndice A. Resultados de publicaciones de aleaciones de magnesio con adición de Cu, Sn, Si, Zr, Mn, Ag, Mo y Li. ....	58

## Resumen

**Título:** Revisión científica sistemática sobre las aleaciones de magnesio para el desarrollo de implantes ortopédicos: efecto de la adición de elementos aleantes\*

**Autor:** González Pilonieta Luisa Fernanda, López Coy Andrea Lizeth\*\*

**Palabras clave:** aleaciones de magnesio, implantes ortopédicos, corrosión, elementos aleantes.

### Descripción:

Las aleaciones de magnesio se han convertido en un excelente candidato para la aplicación en implantes ortopédicos, pues exhiben varias ventajas como un módulo elástico similar al hueso humano (evitando efectos indeseables como el stress shielding), una buena biocompatibilidad y biodegradabilidad. Sin embargo, estos materiales han demostrado tener baja resistencia a la corrosión, limitando así su aplicabilidad clínica. El presente trabajo busca reconocer los estudios realizados sobre el efecto de los elementos aleantes en las aleaciones a base de magnesio para el desarrollo de implantes ortopédicos, e identificar los avances y posibles retos mediante una búsqueda sistemática aplicando el protocolo “Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyzes” (PRISMA). Los resultados mostraron que, los elementos aleantes más empleados para disminuir la velocidad de corrosión y favorecer las propiedades mecánicas en las aleaciones de magnesio son el calcio, zinc, estroncio y algunas tierras raras. Sin embargo, se evidenció que las tierras raras estudiadas son los elementos aleantes más atractivos por presentar alta solubilidad en las aleaciones de magnesio, además de mejorar la resistencia a la corrosión y las propiedades mecánicas del material al refinar el tamaño de grano. Finalmente, se presenta una discusión sobre el panorama actual y se proponen para futuras investigaciones, continuar con el estudio del efecto de estas tierras raras sobre las aleaciones de magnesio y la consecuencia fisiológica de estos en el cuerpo humano.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Director: Ana Emilse Coy Echeverría Dr. Ciencia y Tecnología de Materiales. Codirector: Fernando Viejo Abrante Dr. Ciencia y Tecnología de Materiales

### Abstract

**Title:** Systematic scientific review on magnesium alloys for the development of orthopedic implants: effect of the addition of alloying elements\*.

**Authors:** González Pilonieta Luisa Fernanda, López Coy Andrea Lizeth\*\*

**Key Words:** magnesium alloys, orthopedic implants, corrosion, alloying elements

#### Description:

Magnesium alloys have become an excellent candidate for application in orthopedic implants, as they exhibit several advantages such as an elastic modulus similar to human bone (avoiding undesirable effects such as stress shielding), good biocompatibility, and biodegradability. However, these materials have been shown to have low corrosion resistance, thus limiting their clinical applicability. The present work aims to recognize the studies carried out on the effect of alloying elements in magnesium-based alloys for the development of orthopedic implants, and to identify the advances and possible challenges through a systematic search applying the “Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses” (PRISMA). The results showed that the alloying elements most used to reduce the corrosion rate and favor the mechanical properties in magnesium alloys are calcium, zinc, strontium and some rare earths. However, it was evidenced that the studied rare earths are the most attractive alloying elements because they present high solubility in magnesium alloys, in addition to improving the resistance to corrosion and the mechanical properties of the material by refining the grain size. Finally, a discussion on the current panorama is presented and it is proposed for future research to continue with the study of the effect of these rare earths on magnesium alloys and its physiological consequence in the human body.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales. Director: Ana Emilse Coy Echeverría Dr. Ciencia y Tecnología de Materiales. Codirector: Fernando Viejo Abrante Dr. Ciencia y Tecnología de Materiales



## Introducción

Las fracturas óseas son uno de los traumas más comunes que sufren las personas. Dichas fracturas pueden ser provocadas por accidentes o por enfermedades como la osteoporosis. Dependiendo el tipo de fractura, el hueso puede curarse sólo con la inmovilización externa de la parte afectada, o ser reparado quirúrgicamente mediante implantes ortopédicos para facilitar la curación.

Actualmente, la mayoría de los implantes para fijación de fracturas utilizados en cirugía ortopédica, están hechos de materiales metálicos como el acero inoxidable AISI 316LVM, titanio y sus aleaciones, principalmente la aleación Ti-6Al-4V ELI, y aleaciones cromo-cobalto, debido a su alta resistencia mecánica y estabilidad. Sin embargo, la gran diferencia de sus módulos de elasticidad (acero inoxidable: 190-205GPa; Ti:110-117GPa; Co-Cr 230GPa), comparados con el del hueso cortical (18,6 - 27GPa), inducen el fenómeno de “stress shielding” o protección del hueso contra la carga, lo que trae como consecuencia la reducción de la densidad ósea de la parte afectada, el aflojamiento del implante y afectaciones colaterales del tejido circundante (Xing et al., 2022). Además, estos implantes metálicos requieren de su extracción después de la consolidación de la fractura, dado que su permanencia en el cuerpo puede causar dolor residual, irritación o reacciones inflamatorias debida a la liberación de sus elementos aleantes, lo que ocasiona un trauma para el paciente y en ocasiones complicaciones graves, además de los costos económicos (Tsakiris et al., 2021).

A causa de las limitaciones presentadas por estos materiales metálicos tradicionales, surge el interés por desarrollar una nueva generación de materiales metálicos biodegradables para implantes ortopédicos, que tengan la capacidad de degradarse paulatinamente dentro del cuerpo,

mientras se favorece la formación de hueso nuevo, sin ocasionar traumatismos o efectos adversos sobre la salud del paciente, eliminando así la necesidad de una segunda cirugía. Es aquí donde el magnesio y sus aleaciones cobran gran relevancia.

El magnesio es un metal con una baja densidad entre  $1.74 \text{ g/cm}^3$ , similar a la del hueso ( $1.8 - 2.1 \text{ g/cm}^3$ ), presenta excelente biocompatibilidad ya que es un elemento esencial involucrado en diversos procesos metabólicos y reacciones químicas en el cuerpo humano, regula la proliferación celular, promueve la deposición de calcio y es un elemento que promueve el crecimiento óseo, almacenándose de manera natural en los huesos. (Dong et al., 2022). Además, presenta un módulo elástico cercano al del hueso cortical, favoreciendo la disminución del stress shielding.

De esta forma, es evidente que el magnesio es el candidato idóneo para implantes ortopédicos temporales de fijación ósea, dado que además de ser biocompatible y tener propiedades mecánicas similares a la del hueso, es biodegradable gracias a que su potencial de electrodo estándar es relativamente bajo y se corroe fácilmente en los fluidos fisiológicos del cuerpo humano. Además, los productos de corrosión no tienen efectos adversos y se absorben principalmente a través del metabolismo y la filtración. Sin embargo, la elevada cinética de corrosión es la principal limitación para su aplicación extendida.

Varias alternativas se han propuesto para controlar la velocidad de degradación del magnesio y sus aleaciones, dentro de las cuales se encuentran: i) el diseño de la composición de la aleación a través de la modificación de sus elementos aleantes, ii) nuevos procesos de fabricación de las aleaciones, iii) la aplicación de tratamientos superficiales como el uso de recubrimientos que ralenticen el proceso de degradación mientras el hueso es sanado. Con esta última alternativa se han obtenido resultados significativos al reducir la velocidad de corrosión de la aleación en el

estado inicial de la implantación; sin embargo, una vez el recubrimiento falla, se produce la corrosión acelerada de la aleación base (Tsakiris et al., 2021).

Lo anterior permite concluir que es necesario integrar las tres alternativas, siendo el diseño de la composición de la aleación la primera etapa fundamental. Por tanto, el presente trabajo tiene como objetivo realizar una revisión científica sistemática, que permita identificar el avance y desarrollo en el campo de estudio de los elementos aleantes en las aleaciones de magnesio para implantes ortopédicos, centrándose fundamentalmente en el efecto que tienen éstos sobre la resistencia a la corrosión de la aleación, sin perjudicar la biocompatibilidad del implante.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo general**

Realizar un estudio de vigilancia científica relacionado con el efecto de la adición de elementos aleantes en el desarrollo de aleaciones de magnesio para implantes.

### **1.2 Objetivos específicos**

Realizar un estudio de vigilancia científica relacionado con el tema de investigación.

Identificar los avances científicos y tecnológicos en el campo de estudio.

Identificar los desafíos en el campo de estudio que sirva de base para el planteamiento de futuras propuestas de investigación.

## 2. Descripción metodológica

Para la realización de la revisión sistemática se llevó a cabo la metodología presentada en la figura 1.

### Figura 1.

*Etapas metodológicas empleadas para el desarrollo de la revisión sistemática*



### 2.1 Identificación y comprensión del tema

Se realizó una búsqueda y lectura de documentos base que permitieron comprender y establecer un panorama general sobre el tema a desarrollar en la revisión bibliográfica sistemática.

## **2.2 Identificación de bases de datos y fuentes de información**

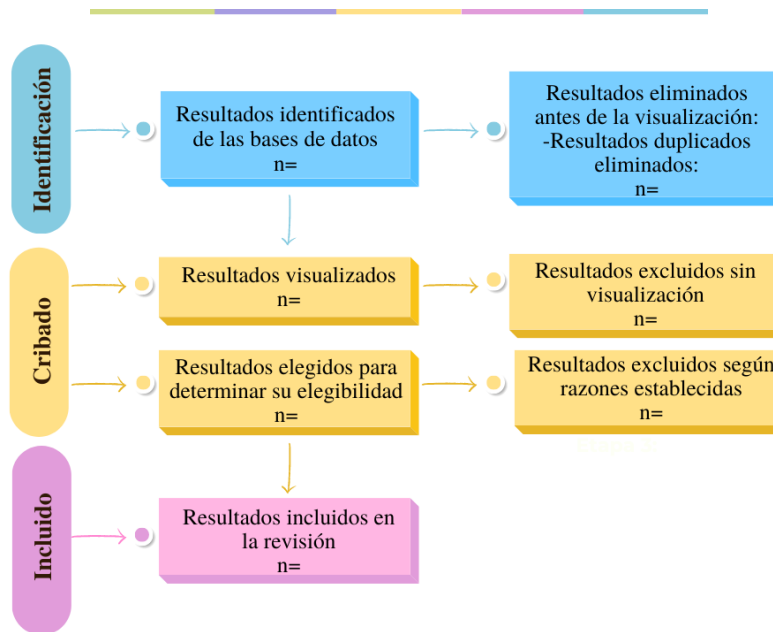
Se realizó la identificación y reconocimiento de las bases de datos disponibles en la biblioteca virtual de la Universidad Industrial de Santander. Las bases de datos a emplear fueron Web of Science, Scopus, American Chemical Society (ACS) y Taylor & Francis.

## **2.3 Búsqueda, selección y filtración de información**

Para esta etapa se siguieron los lineamientos del protocolo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic reviews and Meta-Analyses) que establece normas útiles para planificar, realizar y presentar revisiones sistemáticas con el fin de garantizar que se recopile toda la información recomendada. Además, se presentan 27 ítems donde se detallan los contenidos específicos que deben reportarse en la revisión y un diagrama de flujo donde se especifica el proceso que se sigue desde la identificación inicial de los estudios hasta la selección definitiva de estos (figura 2) (Urrutia & Bonfill, 2010). Se señala que los ítems relacionados con el metanálisis fueron omitidos en esta revisión.

**Figura 2.**

*Diagrama de flujo del proceso de identificación y selección de documentos mediante el método PRISMA*



### 2.3.1 Identificación

Se realizó la búsqueda en las diferentes bases de datos ajustando la ecuación de búsqueda según los parámetros que cada una requería. Los resultados obtenidos de la búsqueda fueron exportados e ingresados a una aplicación web de uso libre denominada Rayyan, que permite la selección de publicaciones por medio de un proceso de semi automatización, mediante la clasificación inicial de resúmenes y títulos (Ouzzani, 2016). Una vez ingresados los resultados, se eliminaron los documentos duplicados.

### **2.3.2 Cribado**

Durante esta etapa se depuraron los resultados realizando la revisión de cada documento a nivel de título, resumen o introducción. Así mismo, se establecieron los criterios de exclusión y se seleccionaron los documentos que fueron analizados posteriormente. Para aquellos resultados donde, entre los revisores no se llegó a un consenso, se solicitó la opinión de un tercer y cuarto revisor para la toma de una decisión final.

### **2.3.3 Incluidos**

Se evaluó individualmente cada uno de los documentos potencialmente elegibles verificando que estos no coincidieran con los criterios de exclusión. Los documentos restantes fueron incluidos dentro de la revisión.

## **2.4 Análisis bibliométrico**

Con las publicaciones seleccionadas según los criterios, se descargó el archivo Excel del programa Rayyan donde se extrajo información de las publicaciones como el año de publicación, tipo de documento, número de citas, palabras clave, país de la publicación, etc. A partir de los datos se diseñaron gráficas empleando los programas Microsoft Excel, AnyChart y Vosviewer que son herramienta para realizar gráficas de anillos y redes bibliométricas (Centre for Science and Technology Studies, s. f.). Posteriormente, estas gráficas se usaron para el análisis de los resultados.



## 2.5 Identificación de avances y desafíos

Inicialmente, para el reconocimiento de los avances y desafíos se dividieron las publicaciones en dos ítems; el primero, cuando el tema de la publicación aborda principalmente los tipos y el comportamiento frente a la corrosión de las aleaciones de magnesio y el segundo, cuando en la publicación se estudia el efecto de uno o varios elementos aleantes sobre las aleaciones de magnesio. Posteriormente, en un documento Excel, se organizaron las publicaciones del ítem dos según el principal elemento aleante. Este proceso facilitó la identificación de los elementos aleantes con más investigaciones y las fechas en que fueron realizadas las publicaciones.

## 3. Resultados

### 3.1 Identificación y comprensión del tema

A partir de la búsqueda previa realizada para establecer una idea general sobre el tema a desarrollar, la lectura se centró principalmente en los artículos **Factors affecting biocompatibility and biodegradation of magnesium based alloys** (Kumar & Katyal, 2022) y **Research advances of magnesium and magnesium alloys worldwide in 2021** (Song et al., 2022), que permitieron crear una idea global de las áreas que se están estudiando, los países donde existen mayor publicación, principales revistas con artículos sobre aleaciones de Mg y reconocer las palabras claves para la búsqueda sistemática.

### 3.2 Búsqueda, selección y filtración de información

Seleccionadas las bases de datos, se inició esta etapa con la identificación de variables para establecer la ecuación de búsqueda que proporcionara la mayor cantidad de resultados posibles y se ajustara a los parámetros de la investigación. Para ello, se inició con la construcción de la ecuación de búsqueda empleando la base de datos Web of Science y se definieron cuatro palabras claves: aleaciones de magnesio, implantes y corrosión; también se excluyeron las palabras recubrimientos, PEO (Oxidación Electrolítica por Plasma) y tratamientos superficiales. Además, se limitó la búsqueda a artículos y revisiones que hayan sido publicados en los últimos seis años (2017 hasta el 10 de octubre de 2022) y se seleccionaron áreas de interés como ciencia de materiales, ingeniería e ingeniería metalúrgica. A partir de esta ecuación inicial, se ajustó la ecuación atendiendo a los comandos de búsqueda que posee cada base de datos. Las ecuaciones de búsqueda son presentadas en la Tabla 1.

**Tabla 1.**

*Ecuaciones de búsqueda y resultados arrojados según cada base de datos*

<b>Ecuación de búsqueda</b>	<b>Base de datos</b>	<b>Resultados</b>
FOR "magnesium alloys"AND "implants" AND "corrosion" AND NOT "coatings" AND NOT "peo" AND NOT "surface treatment"and 2017 or 2018 or 2019 or 2020 or 2021 or 2022 (years of publication) and 2017 or 2018 or 2019 or 2020 or 2021 or 2022 (years of publication) and materials Science Biomaterials or Metallurgy Metallurgical Engineering or Multidisciplinary Materials Science or Multidisciplinary Engineering or Biomedical Engineering (Web of Science Categories)	Web of Science	50

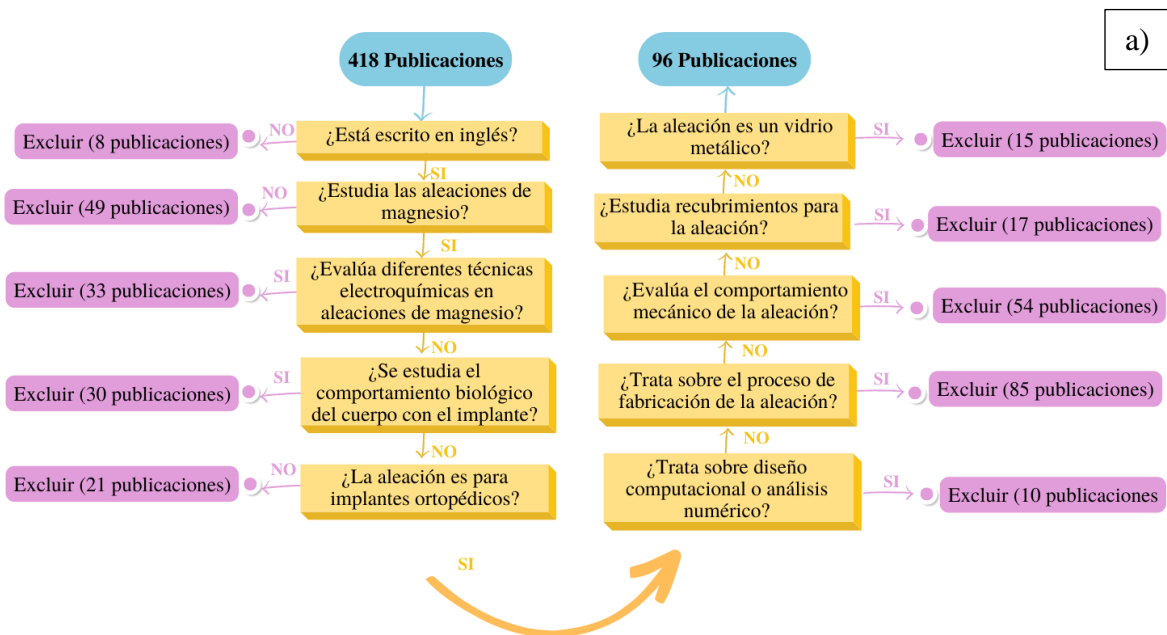
Ecuación de búsqueda	Base de datos	Resultados
TITLE-ABS-KEY ( "magnesium alloys" AND "implants" AND "corrosion" AND NOT "coatings" AND NOT "PEO" AND NOT "surface treatment" ) AND ( LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2022 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2021 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2020 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2019 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2018 ) OR LIMIT-TO ( PUBYEAR , 2017 ) ) AND ( LIMIT-TO ( DOCTYPE , "ar" ) OR LIMIT-TO ( DOCTYPE , "re" ) ) AND ( LIMIT-TO ( SUBJAREA , "MATE" ) OR LIMIT-TO ( SUBJAREA , "ENGI" ) )	Scopus	383
[All: "magnesium alloys"] AND [All: "implants"] AND [All "corrosión"] AND NOT [All "coatings"] AND NOT [All "peo"] AND NOT [All "surface treatment"] AND [Publication Date: (01/01/2017 TO 12/31/2022)]	Taylor & Francis	15
[All: "magnesium alloys"] AND [All: "implants"] AND [All: "corrosión"] AND NOT [All: "coatings"] AND NOT [All: "peo"] AND NOT [All: "surface treatment"] AND [Earliest: (01/01/2017 TO 12/31/2022)]	American Chemical Society	14
<b>Total</b>		<b>441</b>

Los resultados de cada base de datos fueron exportados e ingresados al programa de uso libre Rayyan. Se exportaron un total de 462 resultados, de los cuales se eliminaron 34 resultados por estar duplicados y 10 por no ser accesibles para su visualización, obteniendo así un total de 418 documentos para determinar su elegibilidad. Posteriormente, se desarrolló un sistema de decisión (figura 3) para organizar las publicaciones y establecer los criterios de exclusión, obteniendo así, los siguientes criterios: *i) idioma:* si el idioma de la publicación es diferente al inglés, *ii) otra aleación:* el implante tiene magnesio como elemento aleante, pero no como elemento base, *iii) objetivo diferente:* reúne las publicaciones que no están alineadas con los objetivos de esta revisión. A su vez se realizó la división de este criterio de exclusión en cuatro ítems: *Evaluación de diferentes técnicas electroquímicas:* que estudian más estrictamente los

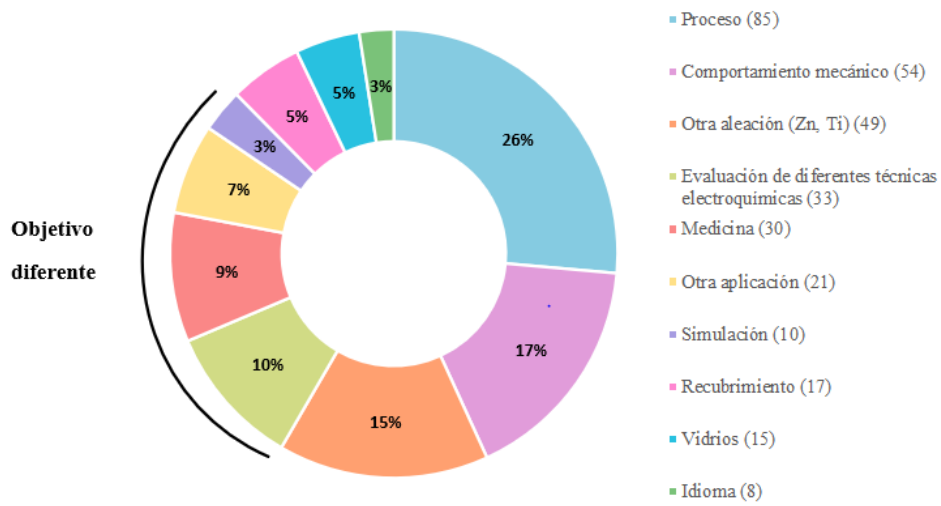
procesos corrosivos (ruido electroquímico, entre otros), **medicina:** se estudia la respuesta y comportamiento biológico del cuerpo humano frente a la presencia de la aleación (adsorción de proteínas en la biocorrosión, propiedades antimicrobianas in vitro de implantes, etc., **otra aplicación:** si el implante no es ortopédico (stents vasculares, implantes dentales), **simulación:** si se realizan análisis de diseño computacional o modelos numéricos; **iv) proceso:** si la publicación aborda los procesos de fabricación de las aleaciones de magnesio o si fue sometida a algún tratamiento térmico, **v) comportamiento mecánico:** si se centra en el estudio de las propiedades mecánicas, **vi) recubrimiento:** si se enfoca en el desarrollo de recubrimientos, **vii) vidrio:** si la aleación es un vidrio metálico. Como resultado de este proceso de selección, se excluyeron 322 publicaciones, quedando un total de 96 publicaciones incluidas para la revisión. El proceso y resultados de la implementación del protocolo PRISMA son presentados en la figura 4.

**Figura 3.**

a) Metodología empleada para la exclusión de publicaciones b) porcentajes de publicaciones rechazadas según cada criterio de exclusión

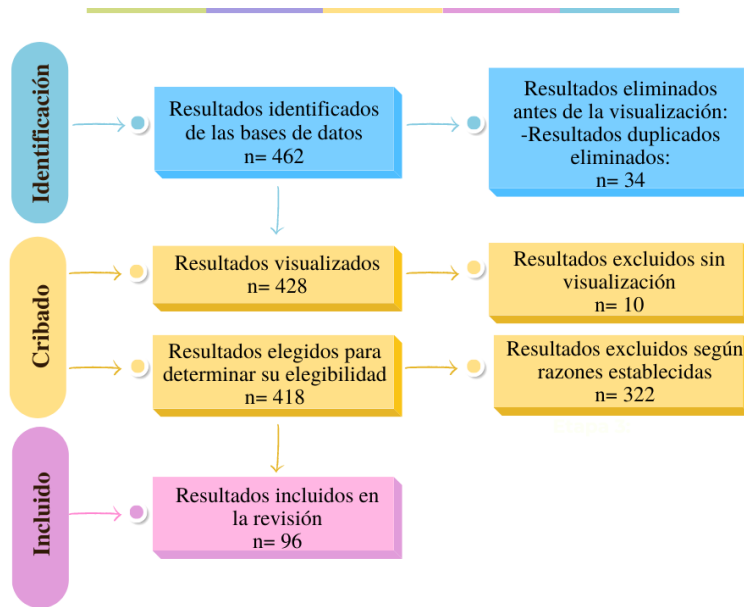


b)



**Figura 4.**

*Resultados de la selección de documentos incluidos mediante el método PRISMA*



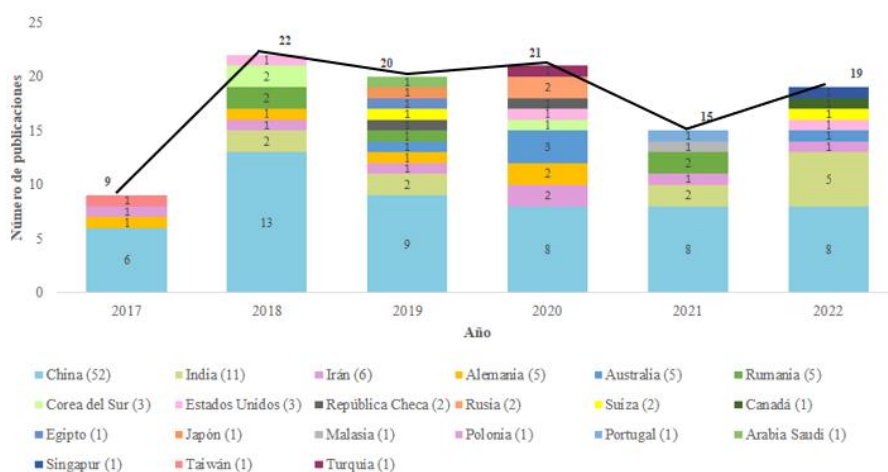
### 3.3 Análisis bibliométrico

En la figura 5 se observa un incremento significativo en el 2018 de la cantidad de investigaciones realizadas sobre aleaciones de magnesio para implantes. En general, entre los años 2018 a 2022 se aprecia una tendencia en el número de publicaciones realizadas por año y aunque se registró una reducción durante el 2021, posiblemente relacionado con la situación mundial causada por la pandemia, se evidencia que después del 2017 se ha adquirido mayor interés en la investigación y desarrollo de este tema.

Asimismo, el país con mayor cantidad de contribuciones es China con 52 publicaciones, seguido por India e Irán con 11 y 6 publicaciones, respectivamente. Durante esta ventana de tiempo se destaca que China es el país que realiza la mayor cantidad de publicaciones por año y que India aumentó significativamente el número de publicaciones entre el 2021 y 2022. Por otro lado, no se observa una tendencia de los otros países pues varía la cantidad de aportes que realizan por año.

**Figura 5.**

*Número de publicaciones por año*

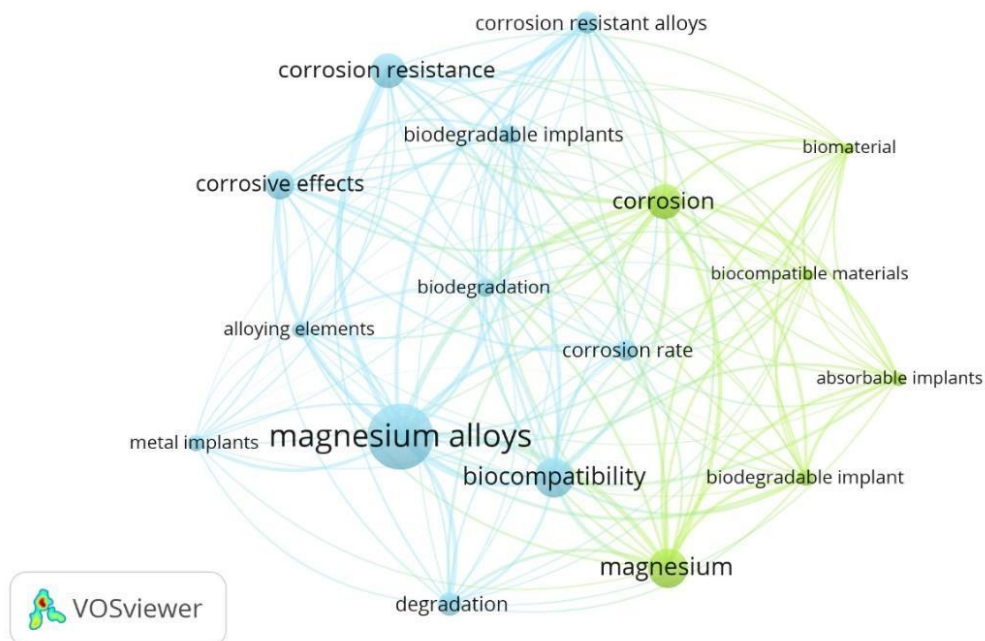


En la figura 6 se presenta la red bibliométrica de palabras claves con una ocurrencia de repetición igual a diez. Se observa que la tendencia de las palabras con mayor presencia dentro de los textos de investigación son magnesium alloys, biocompatibility, magnesium, corrosion y corrosion resistance, las cuales, resultan ser acordes con las palabras claves empleadas en las ecuaciones de búsqueda.

Los dos principales clústeres, uno de color celeste y otro verde, referentes a los términos aleaciones de magnesio y corrosión, reflejan las palabras claves utilizadas con mayor frecuencia dentro de las publicaciones. Además, se observa que existen uniones con mayor espesor que destacan sobre otras, indicando que estos temas se abordan con mayor frecuencia dentro de las investigaciones.

### Figura 6.

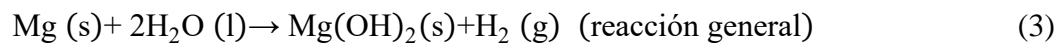
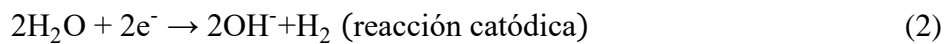
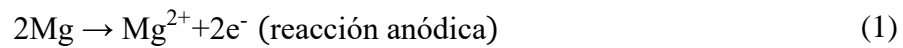
*Palabras claves representativas de los documentos seleccionados para la revisión*



### 3.4 Reconocimiento de avances y tendencias tecnológicas

#### 3.4.1 Fundamentos de la corrosión del magnesio y sus aleaciones

La degradación de los implantes metálicos se da a través del proceso de corrosión cuando entran en contacto con los fluidos fisiológicos del cuerpo humano. Es ampliamente aceptado que, en estas condiciones fisiológicas, la degradación del magnesio y sus aleaciones involucran las siguientes reacciones electroquímicas:



En términos generales, una vez se da la inmersión del magnesio en el fluido fisiológico tiene lugar su oxidación (1) y la reducción del agua (2). Los iones metálicos de  $\text{Mg}^{2+}$  reaccionan con los iones hidroxilo formando  $\text{Mg(OH)}_2$  y  $\text{H}_2$  gaseoso (3). Dado que esta reacción ocurre sobre toda la superficie, el hidróxido de magnesio generado se deposita formando una película que protege el material de la corrosión. Sin embargo, al estar en un entorno agresivo, donde hay alta concentración de iones cloruro, esta capa formada pierde su capacidad protectora y forma cloruro de magnesio de acuerdo con la siguiente reacción (4).



El cloruro de magnesio es altamente soluble por lo que la superficie se vuelve más activa. Esto, sumado a la alta reactividad del magnesio debido a su potencial de reducción  $-2,375 \text{ V}$ , causa un aumento en la velocidad de corrosión. Esta disolución acelerada, termina afectando la capacidad mecánica de soporte del implante y generando altos volúmenes de hidrógeno gaseoso.



Inicialmente, la formación de burbujas de este gas por vía subcutánea puede desaparecer después de las primeras semanas posteriores a la cirugía (Agarwal et al., 2016) y dependiendo del tiempo y la cantidad, el cuerpo humano tiene la capacidad de transportarlo fuera del sitio. Song, et al. postuló que el cuerpo puede tolerar una tasa de liberación de hidrógeno de  $0,01 \text{ ml} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{día}^{-1}$  y no representa una amenaza grave (Agarwal et al., 2016). Sin embargo, las concentraciones altas conllevan a la acumulación de burbujas de hidrógeno, lo que puede generar abultamientos subcutáneos e impedir la buena conductividad de los osteocitos, interfiriendo con el proceso inicial de cicatrización del hueso. (Ali et al., 2019; Tsakiris et al., 2021).

Las formas de corrosión más comunes que presenta el magnesio y sus aleaciones son corrosión uniforme y corrosión microgalvánica (Agarwal et al., 2016; Neves et al., 2021). La corrosión uniforme se produce de forma relativamente generalizada en la toda la superficie y la velocidad de corrosión es aproximadamente la misma en cualquier parte de esta. La corrosión microgalvánica se da por la presencia de zonas anódicas y catódicas en la microestructura del material, lo que favorecen la reacción de corrosión. En este caso, la presencia de fases secundarias suele ser más nobles que la matriz de  $\alpha$ -magnesio, lo que conduce a la formación de pares microgalvánicos. En este caso las fases secundarias actúan como cátodo y la matriz de  $\alpha$ -magnesio actúa como ánodo, generándose la disolución de la matriz en la zona de la interfase.

Por lo anterior, se evidencia que el comportamiento frente a la corrosión del Mg y sus aleaciones, además de otros factores, depende significativamente de su microestructura, la cual está determinada por la composición de la aleación y el proceso de manufactura. Varios estudios realizados han demostrado que la adición de elementos aleantes como el Al, Ca, Zr, Zn y las tierras raras (RE) entre otros, mejoran significativamente la resistencia a la corrosión de las aleaciones de magnesio (Ali et al., 2019). Sin embargo, en el diseño de la aleación, se requiere tener en cuenta

que los elementos aleantes sean biocompatibles (que no perjudiquen la salud del paciente), que mejoren las propiedades mecánicas del magnesio y que tenga una apropiada degradación, es decir, que se procure que la aleación tenga una corrosión de tipo uniforme, ya que esto permite predecir la vida del implante, y así mismo reducir el riesgo que puedan tener los productos de corrosión generados durante la degradación, en la salud del paciente (Dong et al., 2022).

### ***3.4.2 Elementos aleantes en implantes de magnesio más comunes en aplicaciones biomédicas***

Dentro de los principales elementos aleantes del magnesio se encuentran Al, Zn, Ca, Cu, Th, Zr, Li, Mn, Ag, Si, Y, Sb y las tierras raras. De todos ellos, se destacan el Ca, Zn, Sr, Zr y algunas tierras raras como el Y, Nd, Gd, Dy, por su efecto en la resistencia a la corrosión y biocompatibilidad (Ali et al., 2019; Tan et al., 2018).

Como se mencionó en el apartado anterior, la velocidad de degradación de las aleaciones de magnesio depende fundamentalmente de la composición de la aleación y de su microestructura. Así mismo, es esencial que los implantes biomédicos se diseñen teniendo en cuenta los elementos que los constituyen dado que, aunque el cuerpo humano puede tolerar algunos iones metálicos en bajas concentraciones, la liberación excesiva puede traer efectos adversos en la salud del paciente (Agarwal et al., 2016).

En la tabla 2 se muestran las cantidades diarias recomendadas en el cuerpo humano y la solubilidad de los elementos más comúnmente usados en aleaciones de Mg biocompatibles. Estos datos permiten establecer las cantidades adecuadas para diseñar esas aleaciones, minimizando efectos adversos con respecto a la citotoxicidad y controlando la formación de fases secundarias.

**Tabla 2.**

*Cantidades diarias recomendadas en el cuerpo humano y solubilidad de los elementos más comúnmente usados en aleaciones de Mg.*

<b>Símbolo</b>	<b>Elemento aleante</b>	<b>Solubilidad máxima en Mg / % en peso.</b>	<b>Dosis diaria recomendada / mg</b>
Mg	Magnesio	-	350–1000 <sup>c</sup>
Ca	Calcio	0.5–1.34 <sup>b</sup>	882–996 <sup>c</sup>
Zn	Zinc	6.2 <sup>b</sup>	11–50 <sup>c</sup>
Mn	Manganeso	2.2 <sup>b</sup>	2–10 <sup>c</sup>
Sr	Estroncio	0.11 <sup>b</sup>	5 <sup>a</sup>
Zr	Zirconio	3.8 <sup>b</sup>	3.5 <sup>a</sup>

*Nota.* <sup>a</sup> Ali (2019). <sup>b</sup> Kuśnierczyk (2017). <sup>c</sup> Su (2020). Ali (2019) y colaboradores presentan la dosis máxima permitida sin efectos adversos para el cuerpo humano.

A continuación, se presentan estudios realizados en diferentes sistemas de aleaciones, donde se evidencia la influencia de los elementos aleantes más comunes, usados en implantes ortopédicos a base de Mg. En el apéndice A se presentan algunas investigaciones adicionales de aleaciones de magnesio con adición de Cu, Sn, Si, Zr, Mn, Ag, Mo y Li.

**3.4.2.1 Mg–xCa.** El calcio posee una baja densidad 1,55g/cm<sup>3</sup>, es uno de los elementos más usados por su biocompatibilidad, dado que promueve el crecimiento del hueso y se encuentra en la estructura del tejido óseo, el 99,5% del calcio total está presente en los huesos. Adicionalmente, en las aleaciones de Mg, el Ca permite la refinación del tamaño de grano, aumenta el porcentaje de elongación y la resistencia mecánica. Además, reduce la velocidad de corrosión en electrolitos estándar (Zander & Zumdick, 2015). Se observó la formación de una capa de corrosión de fosfato de calcio durante la inmersión en fluido corporal simulado (SBF), lo que apunta a una influencia beneficiosa en la adhesión celular y la protección contra la corrosión

(Zander & Zumdick, 2015). Sin embargo, cuando la cantidad de Ca es mayor al 1% en peso, se favorece la formación de fases secundarias como  $Mg_2Ca$  causando el aumento en la velocidad de corrosión de la aleación (Kim et al., 2018; Tan et al., 2018). El potencial electroquímico de esta fase es menor comparada con la matriz de  $\alpha$ -Mg, actuando como ánodo, disolviéndose de forma preferencial con respecto a la matriz adyacente (Yang et al., 2021).

Makkar et al. (2018) presentó el estudio in vitro (en PBS; solución buffer fosfato salino) de la degradación de Mg-xCa (con  $x = 0.5, 1.6, 3.8$  y  $5\%$  peso Ca). Se observó que la presencia de Ca en la aleación afecta la evolución de  $H_2$  y la producción de  $Mg(OH)_2$  causando el aumento del pH y por lo tanto, la disminución de la proliferación celular en la recuperación del tejido. En cuanto al estudio in vivo (en fémur de conejos), se evidenció inflamación del tejido debido a la acumulación de gas en la zona del implante, sin embargo, se observó que la inflamación se redujo más rápido en la aleación de menor contenido de Ca (Mg-0.5Ca), comparada con las demás aleaciones. Por otro lado, la degradación de la aleación Mg-5.0Ca fue más rápida respecto a Mg-0.5Ca, causada por una alta velocidad de corrosión, lo que llevó a una menor formación de hueso. Además, la caracterización de las aleaciones de Mg-xCa mostraron la formación de las fases  $\alpha$ -Mg y  $Mg_2Ca$ , donde la aleación Mg-5.0Ca presentó una fase eutéctica de  $\alpha$ -Mg+ $Mg_2Ca$ , que como se mencionó anteriormente, propicia un aumento en la velocidad de corrosión.

En la tabla 3 se presentan algunas investigaciones adicionales de aleaciones de Mg-Ca que han concluido que adiciones de hasta 1% de Ca favorecen la formación de tejido óseo mientras que, aquellas con mayor contenido de Ca presentan una alta probabilidad de precipitación de la fase secundaria de  $Mg_2Ca$ .

**Tabla 3.***Resultados de publicaciones de aleaciones de magnesio con adición de calcio.*

<b>Aleaciones estudiadas</b>	<b>% del elemento aleante estudiado</b>	<b>Resultado general</b>	<b>Referencia</b>
Mg-35Zn-xCa	x = 1-5% peso	A mayor adición de Ca, mayor refinamiento de grano y mejores propiedades mecánicas.	Kim et al., 2018
Mg-0.5Ca-0.5Zn	-	A mayor adición de Ca se favorece la formación de la fase Mg <sub>2</sub> Ca causando la disminución de la resistencia a la corrosión.	Školáková et al., 2020
Mg-xZn-yCa	x = 1.2 y 2.5 % peso y = 0.6, 0,6 y 1.5 % peso	Para adiciones de hasta un 2% peso de Zn se favorece la reducción de la velocidad de corrosión debido a la formación de Ca <sub>2</sub> Mg <sub>6</sub> Zn <sub>3</sub>	Abdel-Gawad & Shoeib, 2019
Mg-2Zn-0.2Mn-xCa	x = 0.38, 0.76 y 1.10 % peso	Al agregar Ca después de un 0.2 % peso se generan más fases secundarias, celdas microgalvánicas y se aumenta la velocidad de corrosión.	Zhang et al., 2018
Mg-6Zn-0.3Mn-xCa	x = 0, 0.2 y 0.5% peso		Liu, Cao et al., 2021
Mg-0.1Mn-1.0Zn-xCa	x = 0.1, 0.2 y 0.3% peso	La adición de Ca junto con el Mn y Zn mejoran las propiedades mecánicas comparada con la aleación de magnesio puro.	Wang et al., 2019

**3.4.2.2 Mg-xZn.** El Zn es un oligoelemento esencial, su contenido en el cuerpo humano está alrededor de los 2g. El aporte de Zn es importante para el crecimiento y desarrollo celular y el fortalecimiento del sistema inmunitario y nervioso (Yang et al., 2021). Al igual que con el Ca, el Zn es biodegradable, biocompatible y mejora las propiedades mecánicas de las aleaciones a base de Mg. La investigación existente muestra que el Zn, cuando se encuentra en bajos porcentajes, tiene la habilidad de transformar impurezas como el hierro, el cobre y el níquel a compuestos intermetálicos menos catódicos, lo que resulta en un aumento de la resistencia a la corrosión de las aleaciones de magnesio (Agarwal et al., 2016). Sin embargo, a partir de cantidades mayores al 7%

se observó la precipitación de la fase secundaria  $Mg_7Zn_3$ , que actúa como zona catódica en la aleación ocasionando la corrosión micro-galvánica de la matriz (Su et al., 2020).

Por otro lado, en las aleaciones de Mg-Ca-Zn al añadir pequeñas cantidades de Zn se mejora la ductilidad de la aleación mientras que el Ca permite refinar el tamaño del grano. Adicionalmente, las fases secundarias de Mg-Zn como  $MgZn_2$ ,  $Mg_2Zn_3$  y la fase  $Ca_2Mg_6Zn_3$  favorecen el endurecimiento del material (Kim et al., 2018). Estas fases juegan un papel importante en el comportamiento del material en ambientes fisiológicos, Cihova et al. (2019) obtuvo las aleaciones Mg-1.0Zn-0.3Ca (ZX10) y Mg-1.5Zn-0.25Ca (ZX20) diseñadas para la generación de fases secundarias: binaria  $Mg_2Ca$  y ternaria IM1:  $Ca_3Mg_xZn_{15-x}$  ( $4.6 \leq x \leq 12$  % atómico). En estudios anteriores el comportamiento de estas fases en el material no era claro, por lo tanto, el porcentaje en peso de cada elemento en la composición de las aleaciones fue escogido, para que en cada aleación predomine una de las dos fases y concluyeron que la fase  $Mg_2Ca$  en presencia de pequeñas cantidades de Zn disminuye la velocidad de corrosión y la fase IM1 aumenta la velocidad de corrosión con respecto al magnesio sin alear.

Con el fin de emplear nuevos materiales livianos utilizando desechos de bajo costo, Parande (2020) y colaboradores estudiaron el efecto de la cáscara de huevo como refinador de grano para mejorar las propiedades mecánicas en una aleación de Mg-Zn. Esta fue usada debido a su alto contenido de Ca (95%  $CaCO_3$ ) y baja toxicidad en comparación con otras fuentes de Ca naturales como conchas de ostras. La densidad de la aleación Mg-2.5Zn ( $1.858 \text{ g/cm}^3$ ) aumentó luego de añadir 3, 5 y 7% en peso de polvo de cáscara de huevo a 1.881, 1.895 y  $1.910 \text{ g/cm}^3$ , respectivamente. Adicionalmente, la aleación con partículas de cáscara de huevo presentó una disminución en el tamaño de grano de hasta 58.7% (7 % peso) y la formación de granos del material casi equiaxiales mejoraron la resistencia a la corrosión. Sin embargo, las aleaciones con

partículas de 3% y 5% en peso de cáscara de huevo mostraron una menor velocidad de corrosión con respecto a las aleaciones de Mg-2.5Zn-7ES y Mg-2.5Zn.

Otros estudios realizados se presentan en la tabla 4, donde varían el % en peso del Zn para estudiar su efecto en las aleaciones a base de Mg.

**Tabla 4.**

*Resultados de publicaciones de aleaciones de magnesio con adición de zinc.*

Aleaciones estudiadas	% del elemento aleante estudiado	Resultado general	Referencia
Mg-2Gd-xZn	x = 0.3, 4 y 5 % peso	La adición de Zn a la aleación mejoró las propiedades mecánicas, también redujo la velocidad de corrosión y mostró una buena citocompatibilidad.	M. Zhang et al., 2019
Mg-1.8Zn-xGd	x = 0.2, 1.8 y 2 % peso		Bian et al., 2018
Mg-xZn	x = 1, 2.5, 25, 50, 75, 99 % peso	Al aumentar el contenido de Zn se mejoró la resistencia a la corrosión y a la compresión, pero la aleación presenta mayor fragilidad por la formación de la fase MgZn <sub>2</sub> .	Yan et al., 2018
Mg-xZn	x = 10, 20, 30 % peso		Hu et al., 2022
Mg-xZn-0.3Ca	x = 10, 20, 30 % peso	La adición de Zn de 1.0 % a 1.5% en peso en la aleación Mg-0.3Ca ayudó a disminuir la velocidad de corrosión por medio de la formación de una capa de productos de corrosión.	Cihova et al., 2019z

**3.4.2.3 Mg-xSr.** El 99% en peso del estroncio presente en el cuerpo humano se encuentra almacenado en los huesos. Se ha destacado en aplicaciones biomédicas debido a su biocompatibilidad y en implantes temporales favorece la formación de hueso, cabe resaltar que el Sr es un elemento traza, por lo tanto, no debe superar su cantidad máxima permitida en el cuerpo humano (ver tabla 2), ya que un valor superior conduce a la excreción renal de Ca produciendo hipocalcemia (Ali et al., 2019).

Jiang (2018) y colaboradores compararon la biocompatibilidad y velocidad de degradación de las aleaciones Mg-xSr y Mg-1Ca-xSr ( $x = 0.2, 0.5, 1$  y  $2$  % peso) *in vitro*, en presencia de células madre mesenquimales derivadas de médula ósea de rata (BMSC). La cantidad de Sr en las aleaciones de Mg debe ser del 2% en peso o menor para reducir la velocidad de corrosión. Del estudio se concluyó que las aleaciones con menor densidad de corrosión (*Icorr*), menor velocidad de degradación y mejor biocompatibilidad, es decir, las más adecuadas para su implementación en futuros estudios *in vivo*, corresponden a Mg-1Sr, Mg-1Ca-0.5Sr y Mg-1Ca-1Sr. En la tabla 5 se muestran los resultados de esta y otras investigaciones donde se varía la cantidad de Sr en las aleaciones a base de Mg.

**Tabla 5.**

*Resultados de publicaciones de aleaciones de magnesio con adición de estroncio.*

<b>Aleaciones estudiadas</b>	<b>% del elemento aleante estudiado</b>	<b>Resultado general</b>	<b>Referencia</b>
65.2Mg-30Zn-4Ca-0.8Mn-XSr	$x = 0, 0.3, 0.5$ y $0.8$ % peso	El aumento de Sr propicia la disminución del tamaño de grano e incrementa la dureza gradualmente al adicionar Sr.	J. Wang et al., 2018
Mg-2Zn-2Ca-0.5Mn-xSr	$x = 0, 0.2, 0.4, 0.8$ y $1\%$ peso	La adición de Sr se disuelve en la matriz de Mg, causando que el Mn se precipite en los límites de grano y dificulte el crecimiento de la fase dendrítica MnZn <sub>13</sub> .	Zengin, 2020
Mg-1Ca-xSr	$x = 0.2, 0.5, 1$ y $2\%$ peso	La adición de Sr en la aleación Mg-1Ca no mostró cambios significativos, no obstante, la presencia de Ca neutralizó los efectos del aumento del Sr sobre la velocidad de corrosión.	Jiang et al., 2018
Mg-Si-xSr	$x = 0.25 - 2\%$ peso	La velocidad de corrosión aumentó con la adición de Sr, por lo tanto, se recomendó	Gil-Santos et al., 2017



Aleaciones estudiadas	% del elemento aleante estudiado	Resultado general	Referencia
		no adicionar una cantidad mayor a 0.25% de Sr y 0.15% de Si.	
Mg-4Zn-0.6Zr-xSr	x = 0, 0.4, 0.8, 1.2 y 1.6% peso	La adición de Sr aumenta la velocidad de corrosión debido al aumento de precipitados en el límite de grano. Las propiedades de la aleación Mg-4Zn-0.6Zr-xSr mejoraron con adición mínima de Sr mientras que, la adición excesiva condujo a la formación de precipitados frágiles Mg <sub>17</sub> Sr <sub>2</sub> .	Chen et al., 2017
Mg-5Zn-0.5Ca-xSr	x = 0, 0.14, 0.36, 0.50 y 0.70% peso	La adición menor de Sr mejora la velocidad de corrosión y genera una capa de productos de corrosión que ayuda en la resistencia de la corrosión.	L. Yan et al., 2018

**3.4.2.4 Mg-X (REE, rare earth elements).** Los elementos catalogados como tierras raras (REE) mejoran las propiedades mecánicas del Mg debido al refinamiento de grano y ayudan a controlar la velocidad de degradación del material, cuando están en solución sólida o como precipitado de envejecimiento. Las tierras raras más utilizadas en aleaciones con metales biodegradables son el Y, Nd, Gd, Ce, Er, Dy, Ho y Sc. Además, son a menudo usadas en materiales biomédicos, debido a su alta solubilidad en el Mg ayudando a disminuir la formación de fases secundarias. El Y es uno de los metales que presenta esta alta solubilidad en el Mg y, además, tiene gran afinidad en la aleación con otras tierras raras permitiendo mejorar las propiedades mecánicas de las aleaciones de Mg. El Nd y el Gd forman fases secundarias que aumentan la resistencia a la corrosión. Por otro lado, la adición de La y Ce ha mostrado tener efecto citotóxico, por lo que su uso es limitado (Li et al. 2021).

El gadolinio suele ser utilizado como medio de contraste para obtener imágenes por resonancia magnética. La administración del medio de contraste ha causado, en algunos casos, la acumulación de iones  $Gd^{3+}$  en huesos de pacientes por el intercambio iónico con el  $Ca^{2+}$ . Un estudio donde se implantó una aleación de Mg-Gd en ratas, mostró la acumulación de Gd en varios órganos internos, por lo tanto, es importante verificar la citotoxicidad del Gd usado en implantes (Myrissa et al., 2017).

Por otro lado, Peruzzi et al. (2021) estudió el comportamiento y los subproductos de la degradación de las aleaciones de Mg-5Gd y Mg-10Gd en implantes de tornillos en tibias de rata, además se buscó comprobar la acumulación de Gd en los órganos susceptibles. Después de 12 semanas se observó que la corrosión se debe únicamente al Mg y el Gd permaneció en la zona del implante, sin acumulación en los órganos de las ratas estudiadas. A partir de la corrosión del Mg, se observó la acumulación de Ca, O y P por el intercambio iónico con el Mg y no por la regeneración celular del hueso. Sin embargo, del estudio realizado no es claro el efecto citotóxico del Gd si se mantiene el implante más tiempo en el organismo, ya sea que se degrade y elimine eficientemente o que permanezca y con el tiempo libere iones tóxicos de  $Gd^{3+}$ .

En la siguiente tabla se resumen algunos estudios de aleaciones a base de Mg utilizando REE como elementos aleantes.

**Tabla 6.***Resultados de publicaciones de aleaciones de magnesio con adición de tierras raras.*

<b>Aleaciones estudiadas</b>	<b>% del elemento aleante estudiado</b>	<b>Resultado general</b>	<b>Referencia</b>
Mg-2Zn-0.5Zr-xGd	x = 0.5, 1, 2% peso	Al aumentar el contenido de Gd en la aleación, el tamaño de grano disminuyó. Se observó que el contenido de Gd (0-1%) disminuye la velocidad de corrosión al formar fases uniformes que previenen la degradación, sin embargo, al añadir 2% en peso de Gd se forman segundas fases grandes y gruesas en el límite de grano que propicia la corrosión galvánica.	J. Chen et al., 2019
Mg-0.6Zr-0.5Sc-xSr	x = 0.5, 1, 2, 3% peso	Altas adiciones de Sc en aleaciones que contienen Sr ayudan a suprimir compuestos intermetálicos en el límite de grano y mejoran la resistencia de corrosión al formar capas de óxido de Sc.	Munir et al., 2020
Mg-6Al-1Zn-xY	x = 0, 1, 2, 3 y 4% peso	Al agregar Y en la aleación de Mg-6Al-1Zn se redujo la velocidad de corrosión, con reducción de la fase Mg <sub>17</sub> Al <sub>12</sub> y la formación de la fase Al <sub>2</sub> Y ayudando a disminuir la corrosión galvánica. La dureza aumentó a medida que aumentó la cantidad de Y debido a una distribución uniforme de las fases Al <sub>2</sub> Y y Mg <sub>17</sub> Al <sub>12</sub>	Liu et al., 2017
Mg-xDy	x = 5, 10, 15, 20% peso	Al aumentar la adición de Dy, la velocidad de corrosión disminuye debido a la formación de una capa protectora producto de la corrosión.	L. Yang et al., 2017

### 3.4.2.5 Estudios de aleaciones ternarias y cuaternarias de Mg-X(Ca, Zn, Sr, Mn, REE)

**3.4.2.5.1. Mg-Sr-Ca y MgSrZn.** Chen et al. (2020) comparó el comportamiento *in vitro* e *in vivo* de las aleaciones de Mg-2Sr con Mg-2Sr-Ca y Mg-2Sr-Zn, donde del estudio *in vitro* se evidenció una alta citocompatibilidad en cultivo celular por parte de todas las aleaciones, una microestructura más fina y una menor densidad de corrosión ( $I_{corr}$ ) de las aleaciones con Ca ( $18.42 \mu A/cm^2$ ) y Zn ( $4.68 \mu A/cm^2$ ) con respecto a la aleación de Mg-2Sr. Adicionalmente, el estudio *in vivo* realizado en ratones mostró una baja velocidad de degradación de las aleaciones Mg-2Sr-Ca y Mg-2Sr-Zn, sin inflamación de la zona que rodea las aleaciones debido a una baja producción de  $H_2$  y un efecto positivo en la generación de tejido óseo. En ambos ambientes fisiológicos estas aleaciones ternarias exhiben una mejor resistencia a la corrosión y menor velocidad de degradación con respecto a la aleación de Mg-Sr, con el Mg-2Sr-Zn mejor que el Mg-2Sr-Ca.

**3.4.2.5.2. Mg-Zn-Ca-Mn-Sr.** Wang et al. (2018) estudió el efecto de la adición de Sr a la aleación  $Mg_{65.2-x}Zn_{30}Ca_4Mn_{0.8}Sr_x$  ( $x = 0, 0.3, 0.5$  and  $0.8\%$  peso) para comprobar la biodegradabilidad en presencia de PBS y citotoxicidad *in vitro* del material. La adición de Sr mostró una reducción significativa en la precipitación de la fase  $MnZn_{13}$ , además, a partir de la curva de evolución de  $H_2$  ( $5.06 mL/cm^2$   $0.5 Sr < 8.468 mL/cm^2$   $0 Sr$ ) se concluyó que la aleación con  $0.5 Sr$  presentó una mayor resistencia a la corrosión ( $Sr-0.5 > Sr-0.3 > Sr-0.8 > Sr-0$ ). Adicionalmente, a partir de los compuestos de  $Mg(OH)_2$ ,  $Sr(OH)_2$  y  $Ca(OH)_2$  se favoreció la formación de una capa de  $Zn(OH)_2$  que redujo la velocidad de corrosión del material.

### 3.5 Discusión de los desafíos actuales y perspectivas

En los últimos años, se ha observado un incremento significativo en las investigaciones sobre aleaciones de magnesio para su implementación en implantes ortopédicos. Sin embargo, a pesar de sus muchos beneficios potenciales, existen varios desafíos asociados con el desarrollo y uso de estas aleaciones. Por ello, parte de las investigaciones se han enfocado en mejorar las propiedades mecánicas y disminuir la velocidad de corrosión a partir de la adición de elementos aleantes.

Si bien, se han realizado varios estudios con diferentes elementos, se evidenció que dentro de los elementos aleantes más empleados estaban el Ca, Zn, Sr y las tierras raras. Inicialmente, las investigaciones se enfocaron en estudiar el efecto de cada elemento y la combinación de estos sobre la matriz de Mg. Se encontró que, debido a la baja solubilidad del Ca, Zn y Sr en el Mg, estos elementos favorecían la formación de fases secundarias mientras que, al adicionar elementos de las tierras raras que presentaban una mayor solubilidad, disminuía la formación de dichas fases.

Actualmente, existen aleaciones comerciales aleadas con tierras raras como el Magnezix (MgYREZr) empleada en la fabricación de pines de fijación, tornillos para hueso cortical y de compresión; y el Resoloy (MgDy) para implantes cardiovasculares biorreabsorbibles, y aunque ha existido un progreso significativo en el desarrollo de aleaciones de magnesio biodegradables, aún existen grandes retos en esta área. El rango de aplicaciones médicas de aleaciones de magnesio es aún limitado y por tanto solamente se ha empleado para la fabricación de implantes de pequeño volumen.

Atendiendo al efecto positivo que tienen las tierras raras en el aumento de la resistencia a la corrosión de las aleaciones de magnesio es necesario determinar el efecto fisiológico de cada elemento de tierras raras, ya que su biocompatibilidad aún es discutible.

Por otro lado, la rápida velocidad de degradación sigue siendo un obstáculo para el uso del magnesio en varias aplicaciones médicas. Por ello, es necesario realizar estudios que logren disminuir la degradación y aseguren, se complete la fase de reparación y cicatrización adecuada del hueso fracturado. Además, también se lograría controlar la liberación de productos de corrosión, como el hidrógeno gaseoso.

Si bien, durante la revisión se logró identificar los diferentes elementos aleantes y las cantidades adecuadas que permiten reducir la velocidad de corrosión o mejorar las propiedades mecánicas de las aleaciones de magnesio, es necesario realizar un estudio complementario donde se revisen los procesos de fabricación, por la influencia significativa que tiene estos sobre la microestructura de la aleación.

#### **4. Conclusiones**

A partir del análisis bibliométrico se observó un incremento importante en el número de publicaciones realizadas después del 2017, manteniéndose una cantidad variable pero relativamente alta en los últimos 5 años. Lo anterior, permite sugerir que el tema de investigación sigue siendo un tema de amplio interés.

Adicionalmente, el análisis permitió identificar a China como el país con la mayor cantidad de contribuciones (49.06%), seguido de India (10.37%) e Irán (5.67%). Se destaca que, dentro de

las publicaciones seleccionadas para esta revisión, no se encontraron contribuciones de países latinoamericanos.

Por otro lado, se encontró que algunos elementos de las tierras raras se prefieren sobre otros elementos aleantes como el calcio, el zinc o el estroncio. En la actualidad, los elementos de tierras raras son más ampliamente utilizados en aleaciones a base de magnesio, se destacan por la alta solubilidad que tienen sobre las aleaciones de magnesio, además mejoran la resistencia a la corrosión y las propiedades mecánicas de los metales biodegradables al refinar el tamaño del grano.

**Referencias Bibliográficas**

- Abdel-Gawad, S. A., & Shoeib, M. A. (2019c). Corrosion studies and microstructure of Mg–Zn–Ca alloys for biomedical applications. *Surfaces and Interfaces*, 14, 108-116. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2018.11.011>
- Agarwal, S., Curtin, J., Duffy, B., & Jaiswal, S. (2016). Biodegradable magnesium alloys for orthopaedic applications: A review on corrosion, biocompatibility and surface modifications. *Materials Science and Engineering: C*, 68, 948-963. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.06.020>
- Aggarwal, D., Singla, V. K., & Sharma, S. (2022). Investigation of the mechanical and corrosion properties of Mg-Hydroxyapatite composite by addition of rare-earth oxide particulates for biomedical applications. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 237(2), 420-439. <https://doi.org/10.1177/09544062221121990>
- Ali, M., Hussein, M., & Al-Aqeeli, N. (2019). Magnesium-based composites and alloys for medical applications: A review of mechanical and corrosion properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 792, 1162-1190. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.04.080>
- Amirnejad, M., Rajabi, M., & Motavalli, A. (2018b). Effect of addition of Si on microstructure, mechanical properties, bio-corrosion and cytotoxicity of Mg-6Al-1Zn alloy. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 28(9), 1755-1762. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(18\)64819-8](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(18)64819-8)
- Bazhenov, V., Kolytgin, A., Komissarov, A., Li, A., Bautin, V., Khasenova, R., Anishchenko, A., Seferyan, A., Komissarova, J., & Estrin, Y. (2020). Gallium-containing magnesium alloy



- for potential use as temporary implants in osteosynthesis. *Journal of Magnesium and Alloys*, 8(2), 352-363. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2020.02.009>
- Bian, D., Deng, J., Li, N., Chu, X., Liu, Y., Li, W., Cai, H., Xiu, P., Zhang, Y., Guan, Z., Zheng, Y., Kou, Y., Jiang, B., & Chen, R. (2018b). In Vitro and in Vivo Studies on Biomedical Magnesium Low-Alloying with Elements Gadolinium and Zinc for Orthopedic Implant Applications. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 10(5), 4394-4408. <https://doi.org/10.1021/acsami.7b15498>
- Byun, S., Lim, H., Cheon, K., Lee, S., Kim, H., & Lee, J. (2020b). Biodegradable magnesium alloy (WE43) in bone-fixation plate and screw. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, 108(6), 2505-2512. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.34582>
- Chen, J., Peng, W., Zhu, L., Tan, L., Etim, I. P., Wang, X., & Yang, K. (2018b). Effect of copper content on the corrosion behaviors and antibacterial properties of binary Mg–Cu alloys. *Materials Technology*, 33(2), 145-152. <https://doi.org/10.1080/10667857.2018.1432170>
- Chen, J., Tan, L., Yu, X., & Yang, K. (2019b). Effect of minor content of Gd on the mechanical and degradable properties of as-cast Mg-2Zn-xGd-0.5Zr alloys. *Journal of Materials Science & Technology*, 35(4), 503-511. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.10.022>
- Chen, K., Xie, X., Tang, H., Sun, H., Qin, L., Zheng, Y., Gu, X., & Fan, Y. (2020). In vitro and in vivo degradation behavior of Mg–2Sr–Ca and Mg–2Sr–Zn alloys. *Bioactive Materials*, 5(2), 275-285. <https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2020.02.014>
- Chen, L., Bin, Y., Zou, W., Wang, X., & Li, W. (2017b). The influence of Sr on the microstructure, degradation and stress corrosion cracking of the Mg alloys – ZK40xSr. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 66, 187-200. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2016.11.014>

- Chiu, C., Lu, C. T., Chen, S. H., & Ou, K. L. (2017). Effect of Hydroxyapatite on the Mechanical Properties and Corrosion Behavior of Mg-Zn-Y Alloy. *Materials*, 10(8), 855. <https://doi.org/10.3390/ma10080855>
- Cho, D. H., Avey, T., Nam, K. H., Dean, D., & Luo, A. A. (2022). In vitro and in vivo assessment of squeeze-cast Mg-Zn-Ca-Mn alloys for biomedical applications. *Acta Biomaterialia*, 150, 442-455. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2022.07.040>
- Cihova, M., Martinelli, E., Schmutz, P., Myrissa, A., Schäublin, R., Weinberg, A., Uggowitzer, P., & Löffler, J. (2019c). The role of zinc in the biocorrosion behavior of resorbable Mg-Zn-Ca alloys. *Acta Biomaterialia*, 100, 398-414. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2019.09.021>
- Dargusch, M., Balasubramani, N., Venezuela, J., Johnston, S., Wang, G., Lau, C., Bermingham, M., Kent, D., & StJohn, D. (2020). Improved biodegradable magnesium alloys through advanced solidification processing. *Scripta Materialia*, 177, 234-240. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2019.10.028>
- Dong, J., Lin, T., Shao, H., Wang, H., Wang, X., Song, K., & Li, Q. (2022). Advances in degradation behavior of biomedical magnesium alloys: A review. *Journal of Alloys and Compounds*, 908, 164600. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.164600>
- Dubey, A., Jaiswal, S., & Lahiri, D. (2019). Mechanical Integrity of Biodegradable Mg-HA Composite During In Vitro Exposure. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28(2), 800-809. <https://doi.org/10.1007/s11665-018-3778-8>
- Dvorský, D., Kubásek, J., Voňavková, I., & Vojtěch, D. (2019). Structure, mechanical and corrosion properties of extruded Mg-Nd-Zn, Mg-Y-Zn and Mg-Y-Nd alloys. *Materials Science and Technology*, 35(5), 520-529. <https://doi.org/10.1080/02670836.2019.1570680>

- Gil-Santos, A., Marco, I., Moelans, N., Hort, N., & Van der Biest, O. (2017b). Microstructure and degradation performance of biodegradable Mg-Si-Sr implant alloys. *Materials Science and Engineering: C*, 71, 25-34. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2016.09.056>
- Guo, Y., Li, G., Xu, Y., Xu, Z., Gang, M., Sun, G., Zhang, Z., Yang, X., Yu, Z., Lian, J., & Ren, L. (2021). The microstructure, mechanical properties, corrosion performance and biocompatibility of hydroxyapatite reinforced ZK61 magnesium-matrix biological composite. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 123, 104759. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2021.104759>
- Han, Y. Y., You, C., Zhao, Y., Chen, M. F., & Wang, L. (2019b). Effect of Mn Element Addition on the Microstructure, Mechanical Properties, and Corrosion Properties of Mg-3Zn-0.2Ca Alloy. *Frontiers in Materials*, 6. <https://doi.org/10.3389/fmats.2019.00324>
- Hu, Y., Guo, X., Qiao, Y., Wang, X., & Lin, Q. (2022b). Preparation of medical Mg-Zn alloys and the effect of different zinc contents on the alloy. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 33(1). <https://doi.org/10.1007/s10856-021-06637-0>
- Istrate, B., Munteanu, C., Chelariu, R., Mihai, D., Cimpoesu, R., & Ville Tudose, F. S. (2019b). Electrochemical Evaluation of Some Mg-Ca-Mn-Zr Biodegradable Alloys. *Revista de Chimie*, 70(9), 3435-3440. <https://doi.org/10.37358/rc.19.9.7565>
- J., L. K. (2020). Applications of Magnesium Metal Matrix Composites-A Review. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*, 12(SP3), 10-16. <https://doi.org/10.5373/jardcs/v12sp3/20201232>
- Jabbarzare, S., Bakhsheshi-Rad, H. R., Nourbakhsh, A. A., Ahmadi, T., & Berto, F. (2021). Effect of graphene oxide on the corrosion, mechanical and biological properties of Mg-based

- nanocomposite. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 29(2), 305-319. <https://doi.org/10.1007/s12613-020-2201-2>
- Jaiswal, S., Kumar, R. M., Gupta, P., Kumaraswamy, M., Roy, P., & Lahiri, D. (2018). Mechanical, corrosion and biocompatibility behaviour of Mg-3Zn-HA biodegradable composites for orthopaedic fixture accessories. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 78, 442-454. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2017.11.030>
- Jiang, W., & Yu, W. (2022b). In Vitro Degradation Behavior, Mechanical Properties, and Cytocompatibility of Biodegradable Mg-1Zn-xSn Alloys. *Crystals*, 12(9), 1219. <https://doi.org/10.3390/cryst12091219>
- Jiang, W., Cipriano, A. F., Tian, Q., Zhang, C., Lopez, M., Sallee, A., Lin, A., Cortez Alcaraz, M. C., Wu, Y., Zheng, Y., & Liu, H. (2018b). In vitro evaluation of MgSr and MgCaSr alloys via direct culture with bone marrow derived mesenchymal stem cells. *Acta Biomaterialia*, 72, 407-423. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2018.03.049>
- Jiang, W., Wang, J., Zhao, W., Liu, Q., Jiang, D., & Guo, S. (2019b). Effect of Sn addition on the mechanical properties and bio-corrosion behavior of cytocompatible Mg-4Zn based alloys. *Journal of Magnesium and Alloys*, 7(1), 15-26. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2019.02.002>
- Johnston, S., Shi, Z., Venezuela, J., Wen, C., Dargusch, M. S., & Atrens, A. (2019b). Investigating Mg Biocorrosion In Vitro: Lessons Learned and Recommendations. *JOM*, 71(4), 1406-1413. <https://doi.org/10.1007/s11837-019-03327-9>
- Kamrani, S., & Fleck, C. (2019). Biodegradable magnesium alloys as temporary orthopaedic implants: a review. *BioMetals*, 32(2), 185-193. <https://doi.org/10.1007/s10534-019-00170-y>

- Kiani, F., Lin, J., Vahid, A., Munir, K., Wen, C., & Li, Y. (2022b). Mechanical and corrosion properties of extruded Mg–Zr–Sr alloys for biodegradable implant applications. *Materials Science and Engineering: A*, 831, 142192. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2021.142192>
- Kiani, F., Wen, C., & Li, Y. (2020). Prospects and strategies for magnesium alloys as biodegradable implants from crystalline to bulk metallic glasses and composites—A review. *Acta Biomaterialia*, 103, 1-23. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2019.12.023>
- Kim, S. Y., Kim, Y. K., Kwang-kyun, Y., Lee, K. B., & Lee, M. H. (2018b). Determination of ideal Mg–35Zn–xCa alloy depending on Ca concentration for biomaterials. *Journal of Alloys and Compounds*, 766, 994-1002. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.06.088>
- Kujur, M. S., Manakari, V., Parande, G., Prasad, S., Wong, R., Mallick, A., & Gupta, M. (2021b). Development of rare-earth oxide reinforced magnesium nanocomposites for orthopaedic applications: A mechanical/immersion/biocompatibility perspective. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 114, 104162. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2020.104162>
- Kumar, R., & Katyal, P. (2022). Effects of alloying elements on performance of biodegradable magnesium alloy. *Materials Today: Proceedings*, 56, 2443-2450. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.233>
- Kuśnierczyk, K., & Basista, M. (2016c). Recent advances in research on magnesium alloys and magnesium–calcium phosphate composites as biodegradable implant materials. *Journal of Biomaterials Applications*, 31(6), 878-900. <https://doi.org/10.1177/0885328216657271>
- Kuśnierczyk, K., & Basista, M. (2016d). Recent advances in research on magnesium alloys and magnesium–calcium phosphate composites as biodegradable implant materials. *Journal of Biomaterials Applications*, 31(6), 878-900. <https://doi.org/10.1177/0885328216657271>

- Li, H., Wang, P., Lin, G., & Huang, J. (2021). The role of rare earth elements in biodegradable metals: A review. *Acta Biomaterialia*, 129, 33-42. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2021.05.014>
- Li, J., Zhou, P., Wang, L., Hou, Y., Zhang, X., Zhu, S., & Guan, S. (2021). Investigation of Mg–xLi–Zn alloys for potential application of biodegradable bone implant materials. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 32(4). <https://doi.org/10.1007/s10856-021-06516-8>
- Lin, Y., Liu, J., Bian, D., Huang, Z., Lin, Z., Wang, M., Chu, X., Li, M., Zhang, Y., & Zheng, Y. (2020b). In vivo studies on Mg-1Sc alloy for orthopedic application: A 5-months evaluation in rabbits. *Materials Letters*, 262, 127130. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2019.127130>
- LIU, B. S., CAO, M. M., ZHANG, Y. Z., HU, Y., GONG, C. W., HOU, L. F., & WEI, Y. H. (2021c). Microstructure, anticorrosion, biocompatibility and antibacterial activities of extruded Mg–Zn–Mn strengthened with Ca. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 31(2), 358-370. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(21\)65501-2](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(21)65501-2)
- Liu, L., Yuan, F., Zhao, M., Gao, C., Feng, P., Yang, Y., Yang, S., & Shuai, C. (2017b). Rare Earth Element Yttrium Modified Mg-Al-Zn Alloy: Microstructure, Degradation Properties and Hardness. *Materials*, 10(5), 477. <https://doi.org/10.3390/ma10050477>
- Liu, Y., Li, H., Xu, J., TerBush, J., Li, W., Setty, M., Guan, S., Nguyen, T. D., Qin, L., & Zheng, Y. (2021). Biodegradable metal-derived magnesium and sodium enhances bone regeneration by angiogenesis aided osteogenesis and regulated biological apatite formation. *Chemical Engineering Journal*, 410, 127616. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127616>

- Liu, Y., Zhang, Y., Wang, Y. L., Tian, Y. Q., & Chen, L. S. (2021). Research progress on surface protective coatings of biomedical degradable magnesium alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 885, 161001. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161001>
- Lupescu, S., Istrate, B., Munteanu, C., Minciuna, M. G., Focsaneanu, S., & Earar, K. (2017). Characterization of Some Master Mg-X System (Ca, Mn, Zr, Y) Alloys Used in Medical Applications. *Revista de Chimie*, 68(6), 1310-1315. <https://doi.org/10.37358/rc.17.6.5664>
- Lupescu, S., Munteanu, C., Istrate, B., & Earar, K. (2019). The Influence of Zr on Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Resistance in Mg-Y-Zr Biodegradable Alloys. *Revista de Chimie*, 69(12), 3382-3385. <https://doi.org/10.37358/rc.18.12.6754>
- Maier, H. J., Julmi, S., Behrens, S., Klose, C., Gartzke, A. K., Wriggers, P., Waselau, A. C., & Meyer-Lindenberg, A. (2020). Magnesium Alloys for Open-Pored Bioresorbable Implants. *JOM*, 72(5), 1859-1869. <https://doi.org/10.1007/s11837-020-04078-8>
- Makkar, P., Sarkar, S. K., Padalhin, A. R., Moon, B. G., Lee, Y. S., & Lee, B. T. (2018c). In vitro and in vivo assessment of biomedical Mg–Ca alloys for bone implant applications. *Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials*, 16(3), 126-136. <https://doi.org/10.1177/2280800017750359>
- Mandal, T., Dasgupta, S., Barui, A., & Kundu, S. (2022c). Effect of strontium on microstructure, mechanical, and biological responses of Mg–Al–Zn–Sr alloys. *Materials Science and Technology*, 38(14), 1134-1150. <https://doi.org/10.1080/02670836.2022.2072071>
- Merson, D., Brilevsky, A., Myagkikh, P., Tarkova, A., Prokhorikhin, A., Kretov, E., Frolova, T., & Vinogradov, A. (2020). The Functional Properties of Mg–Zn–X Biodegradable Magnesium Alloys. *Materials*, 13(3), 544. <https://doi.org/10.3390/ma13030544>

- Mousavizadeh, S. M., & Tabaian, S. H. (2021). Effect of Mn Addition on Corrosion and Biocompatibility Characteristics of a New Biodegradable Mg–1Ca–2Zn–1RE Alloy. *Metals and Materials International*, 27(12), 5074-5081. <https://doi.org/10.1007/s12540-020-00885-5>
- Munir, K., Lin, J., Wen, C., Wright, P. F., & Li, Y. (2020b). Mechanical, corrosion, and biocompatibility properties of Mg-Zr-Sr-Sc alloys for biodegradable implant applications. *Acta Biomaterialia*, 102, 493-507. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2019.12.001>
- Munteanu, C., Vlad, D. M., Sindilar, E. V., Istrate, B., Butnaru, M., Pasca, S. A., Nastasa, R. O., Mihai, I., & Burlea, S. L. (2021). Novel Mg-0.5Ca-xMn Biodegradable Alloys Intended for Orthopedic Application: An In Vitro and In Vivo Study. *Materials*, 14(23), 7262. <https://doi.org/10.3390/ma14237262>
- Nakka, P. K., Chikkala, N., Desetti, S., Daida, A., Janyavula, N. S., Subramaniyan, A. K., Irulappasamy, S., Badisha, V., Madiga, J., & Sunil Buradagunta, R. (2018). Developing composites of ZE41 Mg alloy - naturally derived hydroxyapatite by friction stir processing: investigating in vitro degradation behavior. *Materials Technology*, 33(9), 603-611. <https://doi.org/10.1080/10667857.2018.1483470>
- Nazirah, R., Zuhailawati, H., Siti Nur Hazwani, M. R., Abdullah, T. K., Azzura, I., & Dhindaw, B. K. (2021). The Influence of Hydroxyapatite and Alumina Particles on the Mechanical Properties and Corrosion Behavior of Mg-Zn Hybrid Composites for Implants. *Materials*, 14(21), 6246. <https://doi.org/10.3390/ma14216246>
- Neves, C., Sousa, I., Freitas, M., Moreira, L., Costa, C., Teixeira, J., Fraga, S., Pinto, E., Almeida, A., Scharnagl, N., Zheludkevich, M., Ferreira, M., & Tedim, J. (2021). Insights into corrosion behaviour of uncoated Mg alloys for biomedical applications in different aqueous



- media. *Journal of Materials Research and Technology*, 13, 1908-1922.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.05.090>
- Oshibe, N., Marukawa, E., Yoda, T., & Harada, H. (2019). Degradation and interaction with bone of magnesium alloy WE43 implants: A long-term follow-up in vivo rat tibia study. *Journal of Biomaterials Applications*, 33(9), 1157-1167.  
<https://doi.org/10.1177/0885328218822050>
- Öteyaka, M. Z., Apaydin, F., & Apaydin, U. (2022b). The Effect of Strontium Content on the Corrosion Behavior of New Biodegradable Mg–1Ca–1Y Composite for Implant Application. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 61(1-2), 107-118.  
<https://doi.org/10.1007/s11106-022-00298-6>
- Ouzzani, M., Hammady, H., Fedorowicz, Z., & Elmagarmid, A. (2016). Rayyan—a web and mobile app for systematic reviews. *Systematic Reviews*, 5(1).  
<https://doi.org/10.1186/s13643-016-0384-4>
- Parande, G., Manakari, V., Sharma Kopparchy, S. D., & Gupta, M. (2020c). A study on the effect of low-cost eggshell reinforcement on the immersion, damping and mechanical properties of magnesium–zinc alloy. *Composites Part B: Engineering*, 182, 107650.  
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107650>
- Peruzzi, N., Galli, S., Helmholz, H., Kardjilov, N., Krüger, D., Markötter, H., Moosmann, J., Orlov, D., Prgomet, Z., Willumeit-Römer, R., Wennerberg, A., & Bech, M. (2021b). Multimodal ex vivo methods reveal that Gd-rich corrosion byproducts remain at the implant site of biodegradable Mg-Gd screws. *Acta Biomaterialia*, 136, 582-591.  
<https://doi.org/10.1016/j.actbio.2021.09.047>

- Prasadh, S., Parande, G., Gupta, M., & Wong, R. (2022c). Compositional Tailoring of Mg–2Zn–1Ca Alloy Using Manganese to Enhance Compression Response and In-Vitro Degradation. *Materials*, 15(3), 810. <https://doi.org/10.3390/ma15030810>
- Qiao, M., Sha, J., Yin, S., Liu, W., Zhao, Z., Cui, J., & Zhang, Z. (2022b). Effect of trace copper on the microstructure, corrosion behavior and biological properties of biodegradable Mg–2Zn–1Gd–0.5Zr alloy. *Journal of Materials Research and Technology*, 18, 1607–1622. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.03.051>
- Rahim, M., Ullah, S., & Mueller, P. (2018b). Advances and Challenges of Biodegradable Implant Materials with a Focus on Magnesium-Alloys and Bacterial Infections. *Metals*, 8(7), 532. <https://doi.org/10.3390/met8070532>
- Rajendran, R., & Dondapati, S. (2022b). Insights of Microstructural Features and Their Effect on Degradation and the In Vitro Bioactivity Response of as-Cast Mg–Sn Alloys for Orthopedic Implant Applications. *Materials*, 15(18), 6327. <https://doi.org/10.3390/ma15186327>
- Razzaghi, M., Kasiri-Asgarani, M., Bakhsheshi-Rad, H. R., & Ghayour, H. (2020). Microstructure, mechanical properties, and in-vitro biocompatibility of nano- NiTi reinforced Mg–3Zn–0.5Ag alloy: Prepared by mechanical alloying for implant applications. *Composites Part B: Engineering*, 190, 107947. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107947>
- Razzaghi, M., Kasiri-Asgarani, M., Bakhsheshi-Rad, H. R., & Ghayour, H. (2019). In Vitro Degradation, Antibacterial Activity and Cytotoxicity of Mg–3Zn–xAg Nanocomposites Synthesized by Mechanical Alloying for Implant Applications. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28(3), 1441–1455. <https://doi.org/10.1007/s11665-019-03923-5>

- Sharma, S. K., Saxena, K. K., Malik, V., Mohammed, K. A., Prakash, C., Buddhi, D., & Dixit, S. (2022). Significance of Alloying Elements on the Mechanical Characteristics of Mg-Based Materials for Biomedical Applications. *Crystals*, 12(8), 1138. <https://doi.org/10.3390/cryst12081138>
- Shi, L., Yan, Y., Shao, C. S., Yu, K., Zhang, B., & Chen, L. J. (2022). The influence of yttrium and manganese additions on the degradation and biocompatibility of magnesium-zinc-based alloys: In vitro and in vivo studies. *Journal of Magnesium and Alloys*. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2022.06.010>
- Shuai, C., Liu, L., Gao, C., Yang, W., Zhao, Z., Tan, Y., & Liao, W. (2019). Mn-promoting formation of a long-period stacking-ordered phase in laser-melted Mg alloys to enhance degradation resistance. *Materials and Corrosion*, 71(4), 553-563. <https://doi.org/10.1002/maco.201911257>
- Školáková, A., Lovaši, T., Pinc, J., Kačenka, Z., Rieszová, L., & Žofková, Z. (2020c). The Effect of Zinc and Calcium Addition on Magnesium Alloy. *Manufacturing Technology*, 20(5), 668-676. <https://doi.org/10.21062/mft.2020.107>
- Song, M. S., Zeng, R. C., Ding, Y. F., Li, R. W., Easton, M., Cole, I., Birbilis, N., & Chen, X. B. (2019). Recent advances in biodegradation controls over Mg alloys for bone fracture management: A review. *Journal of Materials Science & Technology*, 35(4), 535-544. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2018.10.008>
- Sriraman, N., & Kumaran, S. (2019). Improved bio-acceptability of thermomechanically processed ZM21 magnesium alloy. *Materials Research Express*, 6(5), 056524. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab0323>

- Su, J. L., Teng, J., Xu, Z. L., & Li, Y. (2020). Biodegradable magnesium-matrix composites: A review. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 27(6), 724-744. <https://doi.org/10.1007/s12613-020-1987-2>
- Tan, L., Dong, J., Chen, J., & Yang, K. (2017). Development of magnesium alloys for biomedical applications: structure, process to property relationship. *Materials Technology*, 33(3), 235-243. <https://doi.org/10.1080/10667857.2017.1405890>
- Tang, M., Yan, Y., OuYang, J., Yu, K., Liu, C., Zhou, X., Wang, Z., Deng, Y., & Shuai, C. (2019). Research on corrosion behavior and biocompatibility of a porous Mg-3%Zn/5%β-Ca<sub>3</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> composite scaffold for bone tissue engineering. *Journal of Applied Biomaterials & Functional Materials*, 17(2), 228080001985706. <https://doi.org/10.1177/2280800019857064>
- Tsakiris, V., Tardei, C., & Clicinschi, F. M. (2021e). Biodegradable Mg alloys for orthopedic implants – A review. *Journal of Magnesium and Alloys*, 9(6), 1884-1905. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2021.06.024>
- Urrútia, G., & Bonfill, X. (2010). Declaración PRISMA: una propuesta para mejorar la publicación de revisiones sistemáticas y metaanálisis. *Medicina Clínica*, 135(11), 507-511. <https://doi.org/10.1016/j.medcli.2010.01.015>
- Vignesh, R., & Velusamy, R. (2022). Preliminary Investigation of Magnesium-Silver Nanocomposite for Feasibility as Degradable Biomaterial. *Journal of Testing and Evaluation*, 50(5), 20220102. <https://doi.org/10.1520/jte20220102>
- Wang, H., Kumazawa, T., Zhang, Y., Wang, H., & Ju, D. (2021b). In vivo degradation behaviour and bone response of a new Mg-rare earth alloy immobilized in a rat femoral model.

- Materials Today Communications, 26, 101727.  
<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101727>
- Wang, J., Li, J. Y., Zhang, Y., & Yu, W. M. (2019b). Effects of the Addition of Micro-amounts of Calcium on the Corrosion Resistance of Mg-0.1Mn-1.0Zn-xCa Biomaterials. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28(3), 1553-1562.  
<https://doi.org/10.1007/s11665-019-03958-8>
- Wang, J., Ma, Y., Guo, S., Jiang, W., & Liu, Q. (2018b). Effect of Sr on the microstructure and biodegradable behavior of Mg–Zn–Ca–Mn alloys for implant application. *Materials & Design*, 153, 308-316. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.04.062>
- Wang, J., Wu, Y., Li, H., Liu, Y., Bai, X., Chau, W., Zheng, Y., & Qin, L. (2018b). Magnesium alloy based interference screw developed for ACL reconstruction attenuates peri-tunnel bone loss in rabbits. *Biomaterials*, 157, 86-97.  
<https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2017.12.007>
- Wang, L., Jiang, J., Yuan, T., Xie, Q., Liu, H., & Ma, A. (2019). Recent Progress on Corrosion Behavior and Mechanism of Mg–RE Based Alloys with Long Period Stacking Ordered Structure. *Metals and Materials International*, 26(5), 551-563.  
<https://doi.org/10.1007/s12540-019-00410-3>
- Wang, L., Li, J. B., Li, L., Nie, K. B., Zhang, J. S., Yang, C. W., Yan, P. W., Liu, Y. P., & Xu, C. X. (2016b). Microstructure, mechanical and bio-corrosion properties of Mg–Zn–Zr alloys with minor Ca addition. *Materials Science and Technology*, 33(1), 9-16.  
<https://doi.org/10.1080/02670836.2016.1152348>

- Xia, D., Liu, Y., Wang, S., Zeng, R. C., Liu, Y., Zheng, Y., & Zhou, Y. (2018d). In vitro and in vivo investigation on biodegradable Mg-Li-Ca alloys for bone implant application. *Science China Materials*, 62(2), 256-272. <https://doi.org/10.1007/s40843-018-9293-8>
- Xu, L., Liu, X., Sun, K., Fu, R., & Wang, G. (2022). Corrosion Behavior in Magnesium-Based Alloys for Biomedical Applications. *Materials*, 15(7), 2613. <https://doi.org/10.3390/ma15072613>
- Yan, L., Zhou, J., Sun, Z., Yang, M., & Ma, L. (2018c). Microstructure and bio-corrosion behaviour of Mg-5Zn-0.5Ca-xSr alloys as potential biodegradable implant materials. *Materials Research Express*, 5(4), 045401. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/aab878>
- Yan, X., Wan, P., Tan, L., Zhao, M., Qin, L., & Yang, K. (2018b). Corrosion and biological performance of biodegradable magnesium alloys mediated by low copper addition and processing. *Materials Science and Engineering: C*, 93, 565-581. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.08.013>
- Yan, Y., Liu, H., Fang, H., Yu, K., Zhang, T., Xu, X., Zhang, Y., & Dai, Y. (2018d). Effects of the Intermetallic Phases on Microstructure and Properties of Biodegradable Magnesium Matrix and Zinc Matrix Prepared by Powder Metallurgy. *MATERIALS TRANSACTIONS*, 59(11), 1837-1844. <https://doi.org/10.2320/matertrans.m2018142>
- Yang, J., Koons, G. L., Cheng, G., Zhao, L., Mikos, A. G., & Cui, F. (2018b). A review on the exploitation of biodegradable magnesium-based composites for medical applications. *Biomedical Materials*, 13(2), 022001. <https://doi.org/10.1088/1748-605x/aa8fa0>
- Yang, L., Ma, L., Huang, Y., Feyerabend, F., Blawert, C., Höche, D., Willumeit-Römer, R., Zhang, E., Kainer, K. U., & Hort, N. (2017b). Influence of Dy in solid solution on the degradation

- behavior of binary Mg-Dy alloys in cell culture medium. *Materials Science and Engineering: C*, 75, 1351-1358. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.03.010>
- Yang, Y., Guo, X., He, C., Gao, C., & Shuai, C. (2018c). Regulating Degradation Behavior by Incorporating Mesoporous Silica for Mg Bone Implants. *ACS Biomaterials Science & Engineering*, 4(3), 1046-1054. <https://doi.org/10.1021/acsbiomaterials.8b00020>
- Yang, Y., Ling, C., Yang, M., Yang, L., Wang, D., Peng, S., & Shuai, C. (2022). Selective Laser Melted Rare Earth Magnesium Alloy with High Corrosion Resistance. *International Journal of Bioprinting*, 8(3). <https://doi.org/10.18063/ijb.v8i3.574>
- Yang, Y., Xiong, X., Chen, J., Peng, X., Chen, D., & Pan, F. (2021). Research advances in magnesium and magnesium alloys worldwide in 2020. *Journal of Magnesium and Alloys*, 9(3), 705-747. <https://doi.org/10.1016/j.jma.2021.04.001>
- Yao, H., Wang, S., Xiong, Y., Shi, X., Singh, H., Huttula, M., & Cao, W. (2022). Enhanced Mechanical Properties and Corrosion Resistance by Minor Gd Alloying with a Hot-Extruded Mg Alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31(12), 9997-10009. <https://doi.org/10.1007/s11665-022-07024-8>
- Yu, L., Zhao, Z., Tang, C., Li, W., You, C., & Chen, M. (2020b). The mechanical and corrosion resistance of Mg-Zn-Ca-Ag alloys: the influence of Ag content. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(5), 10863-10875. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.088>
- Zander, D., & Zumdick, N. A. (2015). Influence of Ca and Zn on the microstructure and corrosion of biodegradable Mg-Ca-Zn alloys. *Corrosion Science*, 93, 222-233. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2015.01.027>

- Zengin, H. (2019b). Role of Sr in Microstructure, Hardness and Biodegradable Behavior of Cast Mg–2Zn–2Ca–0.5Mn (ZXM220) Alloy for Potential Implant Application. *International Journal of Metalcasting*, 14(2), 442-453. <https://doi.org/10.1007/s40962-019-00366-5>
- Zhang, E. L., Fu, S., Wang, R. X., Li, H. X., Liu, Y., Ma, Z. Q., Liu, G. K., Zhu, C. S., Qin, G. W., & Chen, D. F. (2019). Role of Cu element in biomedical metal alloy design. *Rare Metals*, 38(6), 476-494. <https://doi.org/10.1007/s12598-019-01245-y>
- Zhang, L., Zhang, Y., Zhang, J., Zhao, R., Zhang, J., & Xu, C. (2020b). Effect of Alloyed Mo on Mechanical Properties, Biocorrosion and Cytocompatibility of As-Cast Mg–Zn–Y–Mn Alloys. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 33(4), 500-513. <https://doi.org/10.1007/s40195-019-00995-z>
- Zhang, M., Deng, W. L., Yang, X. N., Wang, Y. K., Zhang, X. Y., Hang, R. Q., Deng, K. K., & Huang, X. B. (2019b). In vitro biodegradability of Mg–2Gd–xZn alloys with different Zn contents and solution treatments. *Rare Metals*, 38(7), 620-628. <https://doi.org/10.1007/s12598-019-01220-7>
- Zhang, Y., Li, J., Lai, H., & Xu, Y. (2018d). Effect of Homogenization on Microstructure Characteristics, Corrosion and Biocompatibility of Mg-Zn-Mn-xCa Alloys. *Materials*, 11(2), 227. <https://doi.org/10.3390/ma11020227>
- Zhao, Z. X., Hua, Z. M., Li, D. W., Wei, D. S., Liu, Y., Wang, J. G., Luo, D., & Wang, H. Y. (2018b). Effect of Sn Content on the Microstructure, Mechanical Properties and Corrosion Behavior of Biodegradable Mg–x (1, 3 and 5 wt.%) Sn–1Zn–0.5Ca Alloys. *Materials*, 11(12), 2378. <https://doi.org/10.3390/ma11122378>



Zhu, T., Xiong, Y., & Shen, M. (2022). Effect of pH Value on Wear Behavior of AZ80 Magnesium Alloy in Simulated Body Fluid. *Journal of Materials Engineering and Performance*.

<https://doi.org/10.1007/s11665-022-07223-3>

Zong, X., Zhang, J., Liu, W., Zhang, Y., You, Z., & Xu, C. (2018). Corrosion Behaviors of Long-Period Stacking Ordered Structure in Mg Alloys Used in Biomaterials: A Review.

*Advanced Engineering Materials*, 20(7), 1800017.

<https://doi.org/10.1002/adem.201800017>

## Apéndices

**Apéndice A. Resultados de publicaciones de aleaciones de magnesio con adición de Cu, Sn, Si, Zr, Mn, Ag, Mo y Li.**

Tabla 7

*Resultados de publicaciones de aleaciones de magnesio con adición de Cu, Sn, Si, Zr, Mn, Ag, Mo y Li.*

<b>Aleaciones estudiadas</b>	<b>% del elemento aleante estudiado</b>	<b>Resultado general</b>	<b>Referencia</b>
<b>Mg-xCu</b>	x = 0.1, 0.2, 0.3% en peso	Al aumentar la adición de Cu, mejoró la propiedad antibacteriana por la liberación de iones $\text{Cu}^{+2}$ que inducen la actividad antimicrobiana.	X. Yan et al., 2018
		La velocidad de corrosión aumentó con el contenido de Cu, debido a la corrosión galvánica entre la matriz Mg y la fase intermetálica de $\text{Mg}_2\text{Cu}$ .	J. Chen et al., 2018
<b>Mg-2Zn-1Gd-0.5Zr-xCu</b>	x = 0, 0.1, 0.3, 0.5% en peso	A medida que aumentó el contenido de Cu, se evidenció menor tamaño de grano y la fase $\text{MgZnCu}$ actuó como barrera física para impedir la corrosión.	Qiao et al., 2022
<b>Mg-4Zn-xSn</b>	x = 1, 1.5, 2.0 % en peso	El Sn participa en la formación de una capa externa protectora de $\text{Sn/SnO}_2$ resistente a la corrosión.	Jiang et al., 2019
<b>Mg-xSn</b>	x = 1, 5, 10% en peso	El porcentaje de Sn superior al 5% en peso afecta de manera negativa las propiedades mecánicas, bioactivas y la velocidad de corrosión.	Rajendran & Dondapati, 2022

<b>Aleaciones estudiadas</b>	<b>% del elemento aleante estudiado</b>	<b>Resultado general</b>	<b>Referencia</b>
<b>Mg-1Zn-xSn</b>	x = 0, 1,0, 1,5, 2,0% en peso	La adición de Sn disminuyó la velocidad de corrosión al convertir la corrosión por picaduras en uniforme.	Jiang & Yu, 2022
<b>Mg-6Al-1Zn-1Si</b>	-	Al adicionar el 1% de Si la aleación, se presentó la formación de la fase Mg <sub>2</sub> Si que ayudó a aumentar la resistencia a la compresión y mejoró la resistencia a la corrosión.	AMIRNEJAD et al., 2018
<b>Mg-1Y-XZr</b>	x = 0.5, 1	El Zr forma una capa de oxidación que presenta buenas propiedades anticorrosivas que tienen un papel protector de la aleación.	Istrate et al., 2019
<b>Mg-4Zn-0.2Ca-xMn</b>	x = 0.3, 0.5, 0.7, 0.9 % en peso	La adición de Mn forma precipitados que refina el tamaño de grano, controlando su crecimiento en la nucleación.	x = 0,3, 0,5 y 0,7% en peso
<b>Mg-2Zn-1Ca-xMn</b>	x = 0,3, 0,5 y 0,7% en peso	Al agregar Mn hasta un 0.5% en peso, se disminuye la velocidad de corrosión y por encima de 0.5% reduce la resistencia a la corrosión por la segregación no uniforme de Mn en el límite de grano.	Prasadh et al., 2022
<b>Mg-3Zn-0.2Ca-xAg</b>	x = 0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, % en peso	El contenido de Ag mejora la resistencia a la corrosión al disminuir el tamaño de grano y forma fases secundarias uniformemente distribuidas.	Yu et al., 2020
<b>Mg-6Zn-8.16Y-2.02Mn-xMo</b>	x=0.0, 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 % en peso	La adición de Mo favorece el refinamiento de grano, mejora las propiedades mecánicas y disminuye la velocidad de corrosión. El Mo podría actuar como inhibidor de la corrosión por picaduras.	L. Zhang et al., 2020
<b>Mg-3.5Li-0.5Ca</b>	-	El contenido de Li mejora la resistencia mecánica y refina el tamaño de grano Los iones Li <sup>+</sup> liberados de la aleación de Mg-3.5Li-0.5Ca promueve la formación de hueso.	Xia et al., 2018