

**ANÁLISIS DE LA OZONIZACIÓN CATALÍTICA EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES MEDIANTE BIBLIOMETRÍA Y MAPEO SISTEMÁTICO DE
PATENTES**

Autores:

Astrid Carolina Ángel Ospina

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
SANTIAGO DE CALI**

2022

**ANÁLISIS DE LA OZONIZACIÓN CATALÍTICA EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS
RESIDUALES MEDIANTE BIBLIOMETRÍA Y MAPEO SISTEMÁTICO DE
PATENTES**

Autores:

Astrid Carolina Ángel Ospina

**Tesis de grado para optar por el título
INGENIERO QUÍMICO**

Director

Fiderman Machuca Martínez, Ph.D.

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
SANTIAGO DE CALI**

2022

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, hermana y demás familiares por el apoyo incondicional y acompañamiento recibido durante todos estos años. Sin su ayuda, no hubiera sido posible llegar a este momento.

Al Dr. Fiderman Machuca Martínez por su guía y acompañamiento durante la realización de esta tesis y por darme la oportunidad de trabajar con el Grupo de Investigación en Procesos Avanzados para Tratamientos Biológicos y Químicos (GAOX).

A los doctores y evaluadores de este trabajo, Dra. Adriana Niño, Dr. Luis Andrés Betancourt, Dr. Howard Ramírez Malule y Dr. Carlos Madera.

Y finalmente, a la Universidad del Valle, por haberme recibido todos estos años como estudiante, formándome tanto profesional como personalmente.

CONTENIDO

	pág.
LISTA DE FIGURAS	6
LISTA DE TABLAS.....	7
RESUMEN.....	8
INTRODUCCIÓN.....	9
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
2. JUSTIFICACIÓN.....	14
3. OBJETIVOS	16
4.1. OBJETIVO GENERAL	16
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
4. MARCO TEÓRICO	17
4.1. Antecedentes generales de la investigación	17
4.2. Ozonización Catalítica (OC)	20
4.2.1. Tipos de Ozonización Catalítica	21
4.2.2. Catalizadores.....	24
4.2.3. Reactores.....	26
4.3. Análisis bibliométrico	29
4.4. Patentes	30
4.4.1. Clasificación Internacional de Patentes (IPC).....	31
4.4.2. Dominio tecnológico.....	32
4.4.3. Oficinas de patentamiento.....	32
4.4.4. Análisis de patentes: una fuente de inteligencia de negocios.....	33
4.4.5. Reporte de Panorama de Patentes (Patent Landscape Report).....	34
4.4.6. Pronóstico de la tecnología: ciclo de vida de la tecnología.....	35
5. METODOLOGÍA.....	42
5.1. Alcance y tipo de investigación	42
5.2. Tipo de base de datos	42
5.3. Recolección de los datos y depuración.....	43
5.4. Discusión de los resultados	45
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	48

6.1.	Análisis de Correlación	48
6.2.	Códigos IPC principales.....	51
6.3.	Análisis de co-ocurrencia	52
6.3.1.	Conceptos	52
6.3.2.	Dominios tecnológicos	55
6.4.	Análisis de citasiones	58
6.5.	Análisis co-autoría y competidores	59
6.5.1.	Países	59
6.5.2.	Oficinas de patentamiento.....	66
6.5.3.	Competidores	67
6.6.	Pronóstico de la tecnología	73
7.	CONCLUSIONES	84
8.	REFERENCIAS	86

LISTA DE FIGURAS

Fig.	pág.
1. Mecanismo de reacción de la ozonización catalítica	20
2. Ozonización catalítica en efluentes de aguas residuales industriales al año 2015	21
3. Comparación entre ozonización catalítica homogénea y heterogénea	23
4. Sistema de ozonización catalítica	27
5. Reactores más comunes de ozonización catalítica	29
6. Curva S para TLC	40
7. Metodología propuesta para el análisis bibliométrico y de patentes	43
8. Indicadores de análisis.....	46
9. Evolución temporal de publicaciones y patentes	48
10. Evolución temporal de principales códigos IPC.....	51
11. Mapa de conceptos relevantes sobre ozonización catalítica.....	49
12. Análisis de tendencias de conceptos.....	51
13. Dominios tecnológicos principales para publicaciones y patentes.....	55
14. Indicadores de co-ocurrencia y citación por país.....	64
15. Evolución temporal de patentes y publicaciones para Estados Unidos y China	66
16. Patentes triádicas para los países principales.....	66
17. Evolución temporal de publicaciones y patentes para academia e industria	69
18. Indicadores de co-ocurrencia y citación para instituciones y competidores.....	71
19. Antigüedad del portafolio de patentes por instituciones y competidores.....	72
20. Curva S publicaciones y patentes.....	74
21. Prueba de homocedasticidad	78
22. Prueba de correlación.....	79
23. Modelo linealizado	80

LISTA DE TABLAS

Tabla	pág.
1. Clasificación IPC/CPC para ozonización catalítica en aguas y aguas residuales	31
2. Niveles de madurez científica y tecnológica	36
3. Indicadores de pronóstico científico y tecnológico	39
4. Indicadores para análisis co-ocurrencia y citación	47
5. Resultados del análisis de correlación	50
6. Indicadores de velocidad de difusión científica y tecnológica	58
7. Top 5 de publicaciones de revisión más relevantes de los últimos 20 años.....	60
8. Top 5 de publicaciones de investigación más relevantes de los últimos 20 años	62
9. Top 5 de patentes más relevantes de los últimos 20 años	63
10. Resultados de los ajustes de la curva S para publicaciones	75
11. Resultados de los ajustes de la curva S para patentes	76
12. Resultados de la prueba de normalidad para residuales.....	77
13. Indicadores de pronóstico para publicaciones y patentes con modelo logístico	81
14. TLC de la ozonización catalítica.....	83

RESUMEN

En esta tesis se realizó un análisis bibliométrico y un análisis de patentes para estimar el nivel de madurez científica y tecnológica de la ozonización catalítica en el tratamiento de aguas residuales. Debido a que existen diversas formas de abordar estos análisis, se realizó un compendio de los indicadores más importantes hallados en la literatura y se consolidaron para estimar el ciclo de madurez tecnológica. Los análisis se realizaron a partir de publicaciones de la base de datos Scopus y patentes de Questel-Orbit. Los datos se trataron mediante el software Orbit Intellixir de la empresa Questel-Orbit para analítica de datos.

Se evidenció que China es el país con mayor número de publicaciones y patentes, sin embargo, su impacto (cuantificado a través de las citaciones de los documentos producidos) es menor en relación con otros países con menos documentos, como España, Portugal y Estados Unidos. El análisis de conceptos y palabras clave permitió determinar que, si bien la ozonización catalítica se viene investigando desde los años 70s, todavía existen importantes inconsistencias en los mecanismos de reacción propuestos, lo que ha dificultado su adopción a escala industrial como tecnología de tratamiento de aguas residuales.

Finalmente, se estimó que la ozonización catalítica como campo de estudio científico y tecnología se encuentra en un nivel de madurez científica del 24%, lo cual corresponde con la etapa de crecimiento según el TLC y de madurez tecnológica del 50%, que corresponde con una etapa de madurez temprana. Esto indica que la tecnología todavía es atractiva y posee un rango de tiempo amplio para la investigación y desarrollo, tanto por parte de investigadores y académicos, como industriales.

Palabras clave: *ozonización catalítica; tratamiento de aguas residuales; análisis bibliométrico; análisis de patentes; nivel de madurez tecnológica.*

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso básico y fundamental para garantizar la vida en el planeta. Aunque los recursos hídricos (aguas superficiales y subterráneas) se renuevan con el ciclo del agua, las actividades humanas han perturbado en gran medida este equilibrio, produciendo variaciones en la dinámica del agua. En este sentido, utilizando un conjunto de modelos climáticos y escenarios socioeconómicos, el WRI (World Resources Institute) realizó un estudio en el que predice que para el año 2040 existirá estrés hídrico en 167 países, debido al crecimiento demográfico y económico, y se espera que al menos unos 33 países lo afronten de manera severa (Mekonnen & Hoekstra, 2016).

Para hacer frente a esta situación, las economías mundiales (especialmente las de los países desarrollados) han recurrido a la reutilización de aguas residuales, las cuales deben pasar por tratamientos previos para su posterior utilización. Los tratamientos convencionales generalmente se dividen en dos etapas: una primera etapa de remoción de macropartículas y una segunda etapa, en la que ya sea por métodos fisicoquímicos o biológicos, se rompen cadenas de compuestos complejos. Sin embargo, con el fin de reutilizar o verter de manera segura las aguas residuales, se deben considerar algunos parámetros fisicoquímicos que no se cumplen al finalizar estas etapas de tratamiento.

Los compuestos que perduran después de estas etapas se conocen con el nombre de contaminantes emergentes (CE por sus siglas en inglés) o contaminantes de preocupación emergente (CECs), los cuales son químicamente estables y no biodegradables, generalmente tóxicos, cancerígenos y mutágenos en composiciones que van desde los ngL^{-1} hasta los $\mu\text{g L}^{-1}$

(Macías-Quiroga et al., 2021). Para poder remover los CECs han surgido un grupo de nuevas tecnologías que forman parte de lo que se denomina “Tratamientos avanzados de aguas residuales”.

Si bien todas las tecnologías que se enmarcan actualmente dentro de estos tratamientos avanzados tienen sus ventajas, esta tesis pretende centrarse en el análisis de una de ellas, la ozonización catalítica (OC), la cual ha recibido intensa investigación durante los últimos 20 años por haber demostrado altas eficiencias en el tratamiento de aguas residuales sintéticas y reales (Beltrán et al., 2005; Ikhtlaq et al., 2019; Nakrst et al., 2011; Psaltou & Zouboulis, 2020). A pesar de esto, todavía existe una falta de comprensión con respecto al mecanismo de reacción detallado que tiene lugar, lo cual dificulta su escalamiento e industrialización (J. Wang & Chen, 2020a).

Con el objetivo de determinar el estado en el que se encuentra el desarrollo científico y tecnológico de la OC, esta tesis pretende evaluar la tecnología en términos de publicaciones y patentes, teniendo en cuenta que además de las publicaciones, las patentes constituyen una métrica crítica de la innovación y una piedra angular de la comercialización de nuevas tecnologías, además de que brindan información relevante para analizar productos tecnológicos; sin embargo, su aplicación para la toma de decisiones, tanto a nivel académico como industrial, todavía no es común en todos los frentes de investigación innovadores (Smith, 2018).

Es por ello que debido a que hasta el momento no se han realizado estudios patentométricos alrededor de la OC, esta tesis también pretende proponer una metodología unificada con indicadores existentes y nuevos para realizar e interpretar análisis bibliométricos y de patentes con el objetivo de estimar tendencias mundiales, dominios tecnológicos, principales países, instituciones y competidores, estado de madurez y realizar pronósticos de cualquier tecnología. De igual manera, como parte integrante de esta tesis, se anexa un artículo ya publicado en la revista

Ingeniería y Competitividad por los autores (Angel-Ospina & Machuca-Martínez, 2022), el cual funciona como acercamiento inicial al análisis de la OC y a la metodología propuesta.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los problemas generados por la escasez de agua potable en los países en vías de desarrollo son extremadamente graves, además de resultar muy numerosos y variados: enfermedades, hambrunas, guerras, etc. Actualmente, 2.500 millones de personas (36% de la población mundial) viven en zonas de alto "estrés hídrico" y más del 20% del PIB global ya se produce en zonas en riesgo de escasez de agua (Fortuño, 2017). El estrés hídrico se refiere no sólo a la escasez física de agua, sino a la escasez económica, que está relacionada con la falta de disponibilidad de agua de calidad que pueda utilizarse plenamente con fines productivos (FAO, 2013). Según estimaciones del Banco Mundial, las tasas de crecimiento económico de algunas regiones podrían reducirse hasta un 6% del PIB en 2050, como consecuencia de pérdidas vinculadas con el agua en las esferas de agricultura, salud, ingresos y propiedad (The World Bank, 2021).

En vista de esta situación, la recolección, tratamiento y reutilización de aguas residuales han pasado de ser procesos opcionales a obligatorios en la mayoría de los países del mundo (Mateo-Sagasta, 2013). Debido a que los tratamientos convencionales no permiten la remoción completa de compuestos persistentes como los CECs, han surgido tratamientos avanzados para aguas residuales, entre los que se encuentran los Procesos Avanzados de Oxidación (PAOs), que incluyen la ozonización catalítica (OC), la ozonización fotocatalítica (OFC), fenton, electrooxidación, ultrasonido, fotocatálisis, radiación ionizante, oxidación basada en membranas y otros procesos combinados (Krishnan et al., 2021). La elección de alguna de estas tecnologías depende en gran medida de la "sostenibilidad" de la misma, es decir, que la tecnología cumpla con (i) bajo requerimiento de energía (ii) economía circular y reducción de desperdicios, (iii) mejor desempeño y eficiencia en la remoción y (iv) fácil escalamiento (Krishnan et al., 2021).

Si bien la producción bibliográfica alrededor de la OC ha permitido establecer estimaciones sobre los requerimientos energéticos y las eficiencias de remoción (Aggarwal & Chandra, 2021; Crousier et al., 2016; Dang et al., 2020a; Fontanier et al., 2005; Kasprzyk-Hordern et al., 2003a; Kolosov et al., 2018; Lara-Ramos et al., 2022; Nawrocki & Kasprzyk-Hordern, 2010; J. Wang & Chen, 2020b), la configuración de equipos más idónea, su combinación con otras tecnologías en orden de favorecer la reducción de desperdicios, la síntesis y reutilización de catalizadores y el escalamiento de la tecnología, han sido problemas latentes dentro de estas investigaciones. Más aún, surge la pregunta de si se está tomando en cuenta el desarrollo de patentes que ha tenido lugar alrededor de la OC, ya que el mismo puede servir como indicativo de las tendencias de investigación, empresariales y tecnológicas que se están produciendo en el mercado mundial.

Una breve revisión de la literatura permitió determinar que las publicaciones han aumentado exponencialmente desde hace más de 20 años y que el patentamiento de la tecnología se encuentra en auge, sin embargo, no se encontró ningún documento que articule y relacione lo encontrado en ambas fuentes (publicaciones y patentes), por lo cual, una tesis que permita realizar la determinación de patrones en la evolución de los principales conceptos y dominios científicos y tecnológicos aportaría información relevante que permita la unificación de conceptos y la identificación de sectores aptos para inversión en investigación y desarrollo (I+D).

2. JUSTIFICACIÓN

El tratamiento y reutilización de aguas residuales es una actividad que requiere una intensa inversión de capital, tanto inicial como operativo. Los recursos financieros que se necesitan para ejecutar este tipo de proyectos, generalmente, están por encima de los presupuestos nacionales de muchos países del mundo, sin embargo, debido a la situación creciente de escasez de agua y a la actual preocupación por parte de ciertos sectores sobre el acceso al recurso, el paradigma del tratamiento y la reutilización de agua se perfila cada vez más como un motor de crecimiento, empleo y una oportunidad de fomentar el financiamiento innovador, así como nuevos modelos de negocio que puedan atraer al sector privado para financiar infraestructura nacional (Rodriguez et al., 2020).

Actualmente, muchas organizaciones están realizando asociaciones, grupos de trabajo y esfuerzos de colaboración para identificar rápidamente tecnologías emergentes que, como la OC, resultan prometedoras, no sólo en el tratamiento y reutilización de las aguas residuales, sino también en la generación de valor agregado (Pablo, 2020). La OC es una tecnología amigable con el medio ambiente, eficiente en la remoción de CECs, y, al mismo tiempo, presenta costos operativos asequibles para su implementación a gran escala (J. Wang & Chen, 2020b). Estudios recientes sugieren que la utilización de nanocatalizadores desarrollados para procesos de OC, también se podrían utilizar para fabricar otros materiales, lo que implica la creación de nuevas líneas de investigación, nuevos stakeholders e involucrados y nuevas fuentes de financiación (Giwa et al., 2021).

En términos del análisis de patentes, los líderes empresariales e instituciones públicas son los primeros interesados en conocer el estado de las tecnologías antes de invertir sus recursos en

ellas. De acuerdo con la WIPO (Organización Mundial de la Propiedad Intelectual en español), el desarrollo de un mapeo sistemático de patentes es necesario para entender el progreso de una tecnología específica (información importante, tanto para los emprendedores en el campo, como para las instituciones financiadoras) e identificar agentes clave como competidores, socios ascendentes y descendentes, posibles adquisiciones/adquirentes y sus tenencias, y tendencias de propiedad intelectual (WIPO, 2020). De igual forma, este análisis es una herramienta importante en el seguimiento de la evolución de la tecnología en relación con el desarrollo activo de I+D, lo cual representa una gran oportunidad para empresas que trabajan en base a capitales de riesgo (WIPO, 2022).

3. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar el estado de madurez científica y tecnológica de la ozonización catalítica (OC) en el tratamiento de aguas residuales mediante bibliometría y mapeo sistemático de patentes al año 2022.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Proponer la aplicación de una metodología unificada para el análisis de publicaciones y patentes que pueda ser aplicable a otros tipos de tecnologías existentes.
- Estimar las tendencias en investigación científico-tecnológicas mediante la identificación de conceptos, dominios tecnológicos, países y competidores.
- Evaluar la aplicación de diferentes modelos de curva S para determinar el nivel de madurez tecnológica de la OC.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. Antecedentes generales de la investigación

La OC se ha investigado de manera importante desde el siglo pasado. (Hill, 1949) llevó a cabo una investigación en la que utilizó un catalizador de cobalto (Co^{2+}) y encontró que podía promover la descomposición de O_3 para producir radicales $\bullet\text{OH}$ en medio ácido (ácido acético o perclórico). De igual manera, (Hewes & Davison, 1972) investigaron el tratamiento de aguas residuales municipales utilizando metales de transición (Co^{2+} , Ti^{2+} , Mn^{2+} , etc) como catalizadores y encontraron buenos resultados en la remoción de carbono orgánico total (COT). Subsecuentes investigaciones demostraron que los radicales $\bullet\text{OH}$ se forman tras la descomposición catalizada de O_3 a través de iones OH^- en agua, y que las velocidades relativas con las que los sustratos orgánicos compiten entre sí por consumir los intermedios oxidativos son más altas que las del O_3 por sí solo (Hoigné & Bader, 1976).

Seguidamente, durante la década de los 80, otros autores identificaron compuestos como los carbonatos, bicarbonatos y materia orgánica natural (normalmente presente en las aguas residuales), que secuestraban los radicales $\bullet\text{OH}$, inhibiendo la efectividad en la degradación de los compuestos (Chelkowska & Grasso, 1989). Para solucionar estos problemas, estudios realizados a finales de los 90 (Kaptijin, 1997; Logemann & Annee, 1997; Zaror, 1997) identificaron que el uso de catalizadores y otros materiales como el carbón activado mejoraba la eficiencia del proceso de ozonización en fase acuosa y demostraron que la generación de radicales $\bullet\text{OH}$ en el medio podría disminuir las limitaciones de velocidad y selectividad ocasionadas por la utilización de O_3 .

En cuanto a los modelos de análisis y pronóstico tecnológico, tradicionalmente se han utilizado indicadores de innovación basados en insumos, los cuales se refieren a aquellas medidas

que analizan los insumos de los procesos de innovación, como los gastos de I+D (Dangelico et al., 2010; Hargadon & Sutton, 1997; Rogers, 1998), sin embargo, estos datos están disponibles solo para industrias específicas o aplicaciones generales, y no exhiben siempre una relación directa con los resultados de la innovación (Semenoglou et al., 2021). Por este motivo, los indicadores basados en resultados, que tienen en cuenta los resultados de las actividades de innovación, como, por ejemplo, patentes, publicaciones, prototipos, nuevos productos, etc., se han convertido en valiosas fuentes de información para estudiar la dinámica innovadora de una tecnología (Albino et al., 2014; Semenoglou et al., 2021).

En el caso de las publicaciones, el término bibliometría se utilizó por primera vez en 1960 en el *Journal of Documentation* (Broadus, 1987) y fue definida en su momento como la aplicación de métodos matemáticos y estadísticos al procesamiento de información en libros y otros medios de comunicación. Sin embargo, el termino evolucionó en los próximos años y al aplicarse al procesamiento de información contenida en publicaciones científicas se le llamó cienciometría, lo cual causó confusión y ambigüedad en el uso ambos términos (Broadus, 1987). Hoy en día, la bibliometría se puede utilizar para comprender el pasado, e incluso, pronosticar el futuro de una tecnología, un producto, una investigación, etc., (Donthu et al., 2021). La bibliometría ayuda a explorar, organizar y analizar grandes cantidades de datos históricos ayudando a los investigadores a identificar "patrones ocultos" que pueden ayudar en el proceso de toma de decisiones (Nobanee et al., 2021).

En cuanto a las patentes, los cimientos de la Propiedad Intelectual (PI) y el sistema de patentes actual se establecieron en la revolución industrial, específicamente con las batallas legales alrededor de la máquina de vapor de James Watt, en donde quedaron determinadas las condiciones por las cuales se pueden otorgar patentes por mejoras de una máquina ya existente o ideas o

principios sin aplicación práctica específica (Valdés & Zaror, 2005). Más adelante, en 1883, los sistemas de patentes se internacionalizaron a través de convenio de París y más recientemente, desde el año 1980, se desarrollaron las primeras oficinas de patentes internacionales: la Oficina Europea de Patentes (EPO) y la Organización Mundial de Propiedad Intelectual OMPI o WIPO, por sus siglas en inglés (EPO, 2020).

Varios estudios demuestran que la bibliometría y la patentometría son métodos similares utilizados con un mismo propósito: observar la evolución de un tema o tecnología específica y realizar pronósticos (Daim et al., 2006). En este sentido, enfocando la patentometría alrededor de tecnologías de tratamiento de aguas residuales se encuentran estudios como los de (Hara et al., 2016), (Lee, 2007), (Linley et al., 2013) y (Muscetta & Russo, 2021), quienes lo aplicaron a tecnologías magnéticas, fotocatálisis, tratamientos electroquímicos y tratamientos biológicos, respectivamente; sin embargo, a la fecha no se encontraron análisis de patentes enfocados a la ozonización o a la OC.

A nivel nacional, el grupo GAOX de la Universidad del Valle (Colombia), ha investigado extensamente sobre PAOs desde el año 2013 y en OC desde el año 2019 aproximadamente, con publicaciones resaltantes como las de (Mueses et al., 2013) y (Lara-Ramos et al., 2021), respectivamente. En cuanto a patentes, GAOX registró y publicó en el año 2014 la patente con clasificación IPC/CPC C02F9/14 número CO 7120274 A1 (Machuca-Martínez et al., 2014), la cual está relacionada con un proceso de OC heterogénea de lixiviados y aguas residuales industriales empleando un catalizador magnético.

4.2. Ozonización Catalítica (OC)

El O_3 es una molécula inestable compuesta por 3 átomos de oxígeno. Tiene un potencial oxidante de 2,07 V, por lo que se ha utilizado desde finales del siglo XIX en la degradación de contaminantes orgánicos (Angel-Ospina & Machuca-Martínez, 2022; Lara-Ramos et al., 2022). El O_3 reacciona de dos formas con el contaminante: primero por un ataque electrofílico directo (mecanismo de reacción directa), segundo por atracción indirecta con el radical hidroxilo ($\bullet OH$) como oxidante primario (mecanismo de reacción indirecta), como se observa en la Figura 1.

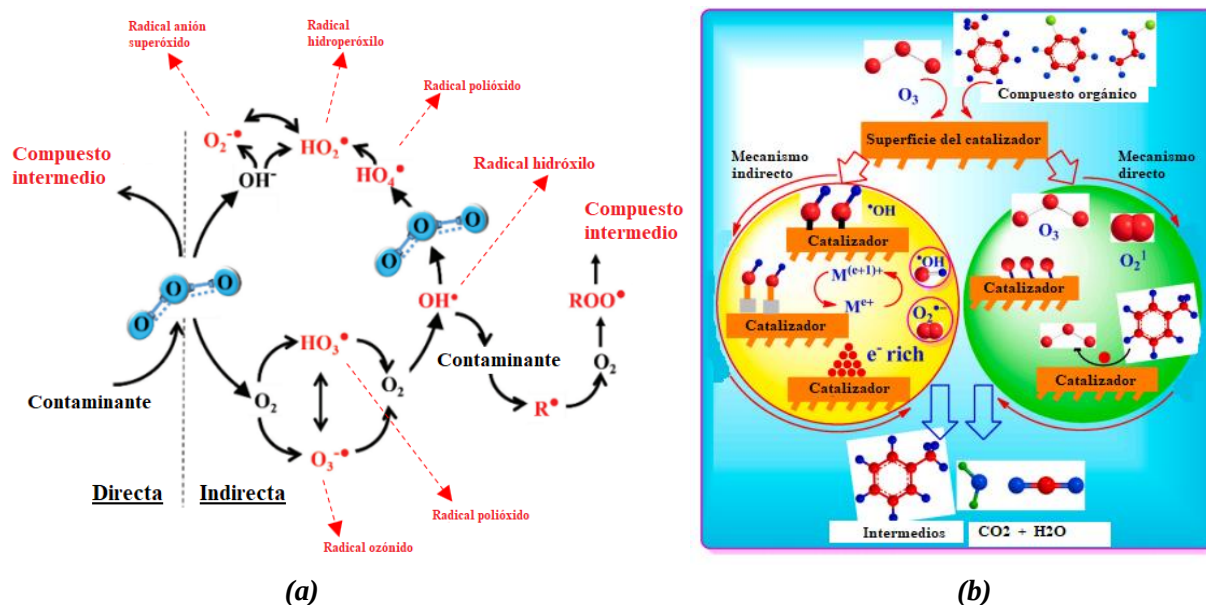


Figura 1. Mecanismo de reacción de la ozonización catalítica (a) Especies en rojo son productos de reacción y especies oxidantes producto de la descomposición de O_3 . $R\bullet$ y $ROO\bullet$ son intermediarios que pueden funcionar como radical (b) El catalizador permite la descomposición del O_3 por el mecanismo directo y la generación de $\bullet OH$ por el mecanismo indirecto. Fuente: adaptado de (Issaka et al., 2022; Lara-Ramos et al., 2022)

Los catalizadores utilizados en la OC permiten mejorar o incluso, superar, algunas desventajas de la ozonización, como la baja solubilidad en agua del O₃, la oxidación parcial de CECs y contaminantes orgánicos y la generación de subproductos de desinfección tóxicos (Issaka

et al., 2022; Y. Wang et al., 2019). Autores como (Ghuge & Saroha, 2018) estudiaron la aplicación de OC en distintas matrices de agua y encontraron que las aguas provenientes del sector textil y petrolero son las que más estudios reúnen (Figura 2).

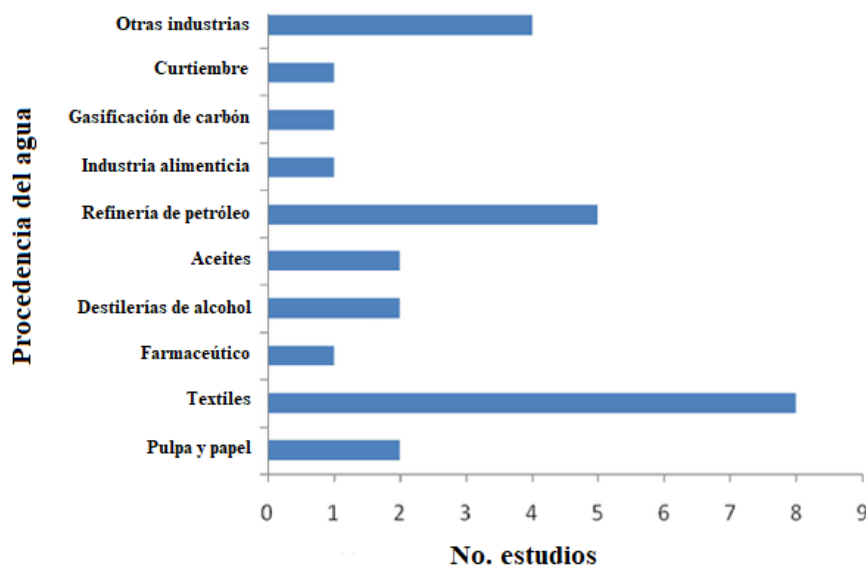


Figura 2. Ozonización catalítica en efluentes de aguas residuales industriales al año 2015. Fuente: adaptado de (Ghuge & Saroha, 2018)

4.2.1. Tipos de Ozonización Catalítica

De acuerdo a la forma en la que se presente el catalizador en el medio, la OC puede ser clasificada como homogénea (que utiliza O_3 en fase acuosa junto a metales de transición disueltos) o heterogénea (en donde existe un sistema de 3 fases (gas-sólido-líquido), en el cual la fase sólida puede ser un catalizador metálico (óxidos de manganeso, hierro, aluminio, titanio, etc) inmovilizado en un soporte y la fase líquida es el agua residual en donde se burbujea la fase gaseosa, que incluye el O_3) (Angel-Ospina & Machuca-Martínez, 2022).

La OC homogénea se lleva a cabo a través de las siguientes etapas (Psaltou et al., 2021):

1. La presencia de iones metálicos disueltos puede descomponer el O_3 ; y, por tanto, potenciar la producción de radicales $\bullet OH$, que posteriormente pueden oxidar más eficazmente los compuestos orgánicos.
2. Los iones metálicos agregados pueden crear complejos intermedios con los compuestos orgánicos objetivo; y, por tanto, favorecer su posterior oxidación por parte del O_3 .
3. La presencia de metales disueltos en condiciones altamente oxidantes puede dar lugar a la formación de óxidos/oxihidróxidos en el rango de nanoescala (1–5 nm), lo que mejora la descomposición del O_3 y la producción de radicales $\bullet OH$. Estas nanoestructuras convierten la OC homogénea en heterogénea.

Por otro lado, la OC heterogénea se lleva a cabo a través de las siguientes etapas (Lara-Ramos et al., 2022; Nawrocki & Kasprzyk-Hordern, 2010):

1. Aproximación del O_3 a la superficie del catalizador.
2. Las moléculas orgánicas se adsorben en la superficie del catalizador.
3. Se producen reacciones en la superficie del catalizador y se generan productos adsorbidos.
4. Se desorben los productos de reacción del catalizador al medio líquido.

La Figura 3 muestra el efecto de ambos tipos de OC en la degradación de contaminantes. Un ejemplo de ambos tipos de OC se puede observar en el estudio de (Y. Wang et al., 2019), quienes utilizan catalizadores basados en nanotubos de carbono enlazados con iones de manganeso (Mn^{2+}), en donde los autores afirman que la principal diferencia entre ambos tipos de OC es la capacidad de reutilización del catalizador. Debido a que los catalizadores entran en contacto con

los contaminantes solo en la interfase líquido-sólido, los rendimientos de la OC homogénea pueden ser superiores a los de la heterogénea en términos de transferencia de masa, sin embargo, los catalizadores homogéneos son difíciles de recuperar, lo cual implica limitaciones operativas y económicas para el proceso.

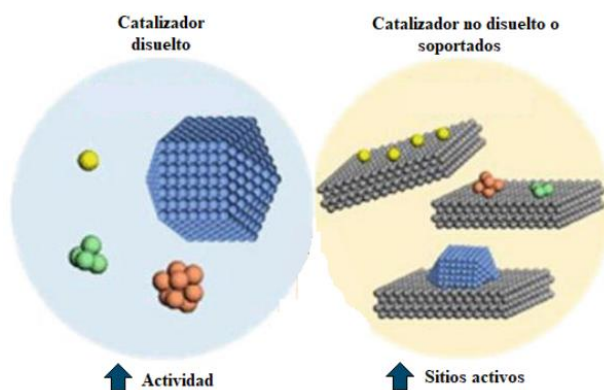


Figura 3. Comparación entre ozonización catalítica homogénea y heterogénea. Fuente: propia

En las últimas décadas, para mejorar la transferencia de masa en la catálisis heterogénea se han fabricado catalizadores y/o soportes porosos, los cuales podrían reducir la resistencia a la difusión, favoreciendo la transferencia de masa en los sitios activos del catalizador (Parlett et al., 2013).

De igual forma, existe bibliografía contradictoria sobre la forma de las ecuaciones cinéticas que rigen ambos procesos, sin embargo, se han observado algunas expresiones en común (Parlett et al., 2013; B. Wang, Zhang, Wang, Xiong, Tian, et al., 2019; Wu et al., 2008) que a rasgos generales permiten obtener las Ec.1 y 2 para OC homogénea y heterogénea, respectivamente. Es importante resaltar que a pesar de que el término de adsorción predomina en los sistemas heterogéneos, los sistemas homogéneos también pueden incluirlo por la formación de óxidos/oxihidróxidos que permiten que la OC homogénea se transforme en heterogénea. Algunos

estudios incluso sugieren que ambos tipos de ozonización pueden ocurrir simultáneamente, dependiendo del tipo de catalizador utilizado (J. Yang et al., 2019).

$$-\frac{d[A]}{dt} = k_{O_3}[A][O_3] + k_{\bullet OH}[A][\bullet OH] \quad (1)$$

$$-\frac{d[A]}{dt} = k_{O_3}[A][O_3] + k_{\bullet OH}[A][\bullet OH] + \left(\frac{d[A]}{dt}\right)_{ads} \quad (2)$$

En donde A es el contaminante, k_{O_3} y $k_{\bullet OH}$ son las velocidades de reacción que siguen las reacciones de degradación directas e indirectas (Ec.1 y 2), respectivamente, las cuales varían dependiendo del tipo de catalizador utilizado, el pH del medio, el tipo de contaminante, entre otros factores; y, el término $\left(\frac{d[A]}{dt}\right)_{ads}$, el cual se refiere a la contribución en la degradación que siguen los contaminantes por acción de la oxidación catalítica. Finalmente, es importante resaltar que autores como (Nawrocki, 2013b), señalan que, aunque estas expresiones cinéticas parecen ser las más aceptadas, es importante no perder de vista el papel del agua en la degradación de los compuestos y unificar todos los hallazgos realizados hasta ahora en materia de cinéticas de reacción, sin embargo, a la fecha no se han encontrado investigaciones orientadas a este fin.

4.2.2. Catalizadores

Los catalizadores utilizados pueden ser de distintos tipos dependiendo de su aplicación, del método de preparación y de la concentración requerida del mismo (Lara-Ramos et al., 2022). Algunos de ellos son los metales de transición disueltos, metales u óxidos metálicos soportados (Chen et al., 2011), minerales modificados con metales, como las perovskitas (Algburi et al., 2021) y catalizadores no metálicos, como carbón activado, zeolitas, óxidos de grafeno, nanotubos de carbono, materiales cerámicos, etc. (Y. Wang et al., 2019; Zhao et al., 2009).

Para el caso de la OC homogénea, los metales de transición disueltos más utilizados son el Fe (II), Fe(III), Mn (II), Ni (II), Co (II), Cu (II), Zn (II), y en menor medida, Cd (II), Ag (I), Cr (III) (Lara-Ramos et al., 2022). Investigaciones previas sugieren que estos metales reaccionan con el O₃ para formar un ión de óxido metálico inestable y O₂ (descomposición de O₃). Luego, el primero reacciona con agua para promover la formación de radicales •OH (Kasprzyk-Hordern et al., 2003b; J. Wang & Chen, 2020c). Otra vía de reacción posible involucra la formación de complejos, los cuales son más fácilmente atacados por el O₃ (J. Yang et al., 2019).

Para la OC heterogénea, diversos estudios han encontrado que el uso de O₃ junto con catalizadores de óxidos metálicos como MnO₂, TiO₂, Al₂O₃ o soportados como Cu-Al₂O₃, Cu-TiO₂, Ru-CeO₂, Fe₂O₃/ Al₂O₃, V-O/TiO₂, V-O/sílica gel y TiO₂/Al₂O₃ (Kasprzyk-Hordern et al., 2003b; J. L. Wang & Xu, 2012a) mejoran exitosamente la remoción y mineralización de CECs, siendo los catalizadores basados en Mg, Mn, Fe, Zn, Ti y Al los más investigados. La eficiencia del proceso depende en gran medida de las propiedades superficiales del catalizador y del pH de la solución, el cual influye en las propiedades de los sitios activos (como los sitios ácidos de Lewis y los sitios ácidos de Bronsted) (B. Wang, Zhang, Wang, Xiong, Tian, et al., 2019).

En cuanto a los materiales que sirven de soporte, diversos estudios han investigado materiales mesoporosos como el SBA-15, el MCM-41 y el MCM-48 a base de sílice, cuya estructura combina microporosidad con mesoporosidad (Chen et al., 2011; Eberhardt & Sihufe, 2013).

Se han investigado también materiales basados en carbono (CMs), los cuales provienen de las investigaciones que indican que la combinación de carbón activado (AC) y O₃ puede mejorar la eficiencia de degradación de contaminantes orgánicos, ya que se comporta al mismo tiempo como un adsorbente y un catalizador (B. Wang, Zhang, Wang, Xiong, & Tian, 2019). Algunos son

el carbon activado granular (GAC) (Gu et al., 2008), los óxidos de grafeno (GO) y óxidos de grafeno reducido (r-GO) (Y. Wang et al., 2016b), nanotubos de carbono (CNTs) (Soares et al., 2015), nanotubos de carbono multipared (MWCNT) (Gonçalves et al., 2013) y materiales mesoporosos de aerogel de carbono como soportes (MCA) (Hu et al., 2016b).

Finalmente, por su fácil obtención y bajo costo, los minerales sólidos naturales, como arena (Si), zeolita (Al, Si), lodo rojo (Fe, Si, Ti), goetita (Fe, Mn), perovskita (Ti, Ca) y turmalina (Na, Ca, Fe, Al, Mg, Mn, Si), se han utilizado recientemente en la OC heterogénea de contaminantes orgánicos. Los últimos hallazgos muestran una fuerte dependencia de su actividad catalítica de las características químicas y físicas de su superficie, su concentración en el medio líquido, el nivel de pH de la mezcla de reacción y otros parámetros (Inchaurrondo & Font, 2022).

4.2.3. Reactores

A escala de laboratorio (Figura 4a) y piloto (Figura 4b) un proceso de OC incluye cuatro componentes principales: generador de O_3 (un equipo en el que se producen descargas corona que ionizan el O_2), suplemento de O_2 o aire (compresor), contactor de O_3 y un sistema de destrucción de O_3 (Lara-Ramos et al., 2022). Dentro del reactor se incluye el catalizador que puede estar disuelto en el agua residual (OC homogénea) o como una fase sólida separada (OC heterogénea), sin embargo, en general, la OC heterogénea ha sido por mucho la más investigada y aplicada en los últimos años, debido a los costes adicionales que implican un postratamiento para remover los restos de catalizador que permanecen luego de la OC homogénea (J. Wang & Wang, 2020). Si se tuviera una OC homogénea, entonces al sistema se le agregaría una etapa adicional de recuperación de catalizador.

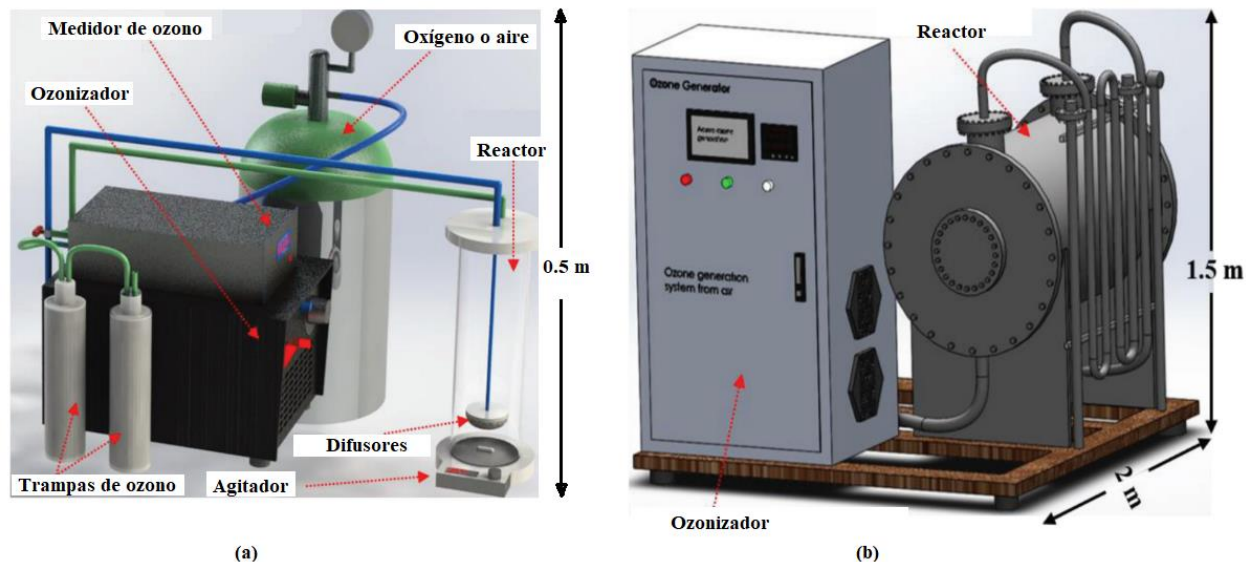


Figura 4. Sistema de ozonización catalítica (a) Escala de laboratorio (b) Escala piloto. Fuente: adaptado de (Lara-Ramos et al., 2022)

Entre los reactores de OC más investigados se encuentran los reactores de lecho empacado (PBR por sus siglas en inglés), los cuales pueden ser de lecho fijo o fluidizado. Por ejemplo, (Naghizadeh et al., 2022) utilizaron un reactor de lecho fluidizado con un catalizador de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GAC}$ para la remoción y mineralización de hidroclorotiazida, obteniendo eficiencias de degradación mayores al 90% con 10 minutos de operación. Estos resultados fueron superiores a otros procesos investigados por los autores en el mismo estudio, como la OC con GAC solamente y la adsorción con GAC. Otros reactores de lecho fluidizado que se han investigado recientemente son el reactor de lecho empacado rotatorio (o RPB por sus siglas en inglés) (Hu et al., 2016a) y el reactor de agitación de espuma rotatoria (RFSR), los cuales han mostrado buenas eficiencias de remoción y rendimientos en términos de transferencia de masa, además de altas concentraciones de O_3 en el medio (Y.-C. Yang et al., 2021).

En cuanto a reactores de lecho fijo, los autores (Cao et al., 2021) utilizaron un reactor con microempaques fijos para la remoción de fenol. Encontraron indicadores de remoción cercanos al 90% y de mineralización del 50%, valores que mejoraban con niveles altos de pH ($\text{pH} = 11$) y con mayores concentraciones iniciales de O_3 . Estos reactores se diferencian de los reactores empacados convencionales por el tamaño de sus empaques, que oscila entre los 50-400 μm (Navarro-Brull, 2018).

Se han observado también reactores catalíticos de membrana (CMR por sus siglas en inglés) en el tratamiento de aguas residuales con OC. Autores como (Xu et al., 2022) utilizaron una membrana de nanotubos de carbono (CNT por sus siglas en inglés) con MnO_2 obteniendo resultados mayores al 75% de degradación para azul de metileno con solo 20 minutos de tratamiento, mientras que se alcanzó la mineralización completa del contaminante con 40 min de proceso. Estos reactores también se han utilizado en patentes como la US20210039968 A1 (Qian et al., 2021), la cual consiste en un prototipo con un reactor de membranas de placa y marco compuestas de CNT y óxido de grafeno reducido (r-GO). Este tipo de reactores son los únicos para los cuales se ha realizado una revisión de los conceptos más importantes, por los autores (Psaltou & Zouboulis, 2020).

Los reactores de burbujas y microburbujas también están entre los más comunes. Estos sistemas consisten en un generador de microburbujas que alimenta la mezcla O_3 -agua residual al medio catalítico y que mejoran no solo la transferencia de masa, sino la tasa de generación de radicales $\bullet\text{OH}$ (Khuntia et al., 2016). Autores como (Zhang et al., 2022) utilizaron OC homogénea con iones metálicos de Mn (II) y permanganato en un reactor de microburbujas para estudiar la cinética de la descomposición del O_3 y la subsecuente formación de complejos metálicos con el catalizador, los cuales son completamente mineralizados por el O_3 . A continuación la Figura 5 muestra un resumen visual de los reactores anteriormente mencionados.

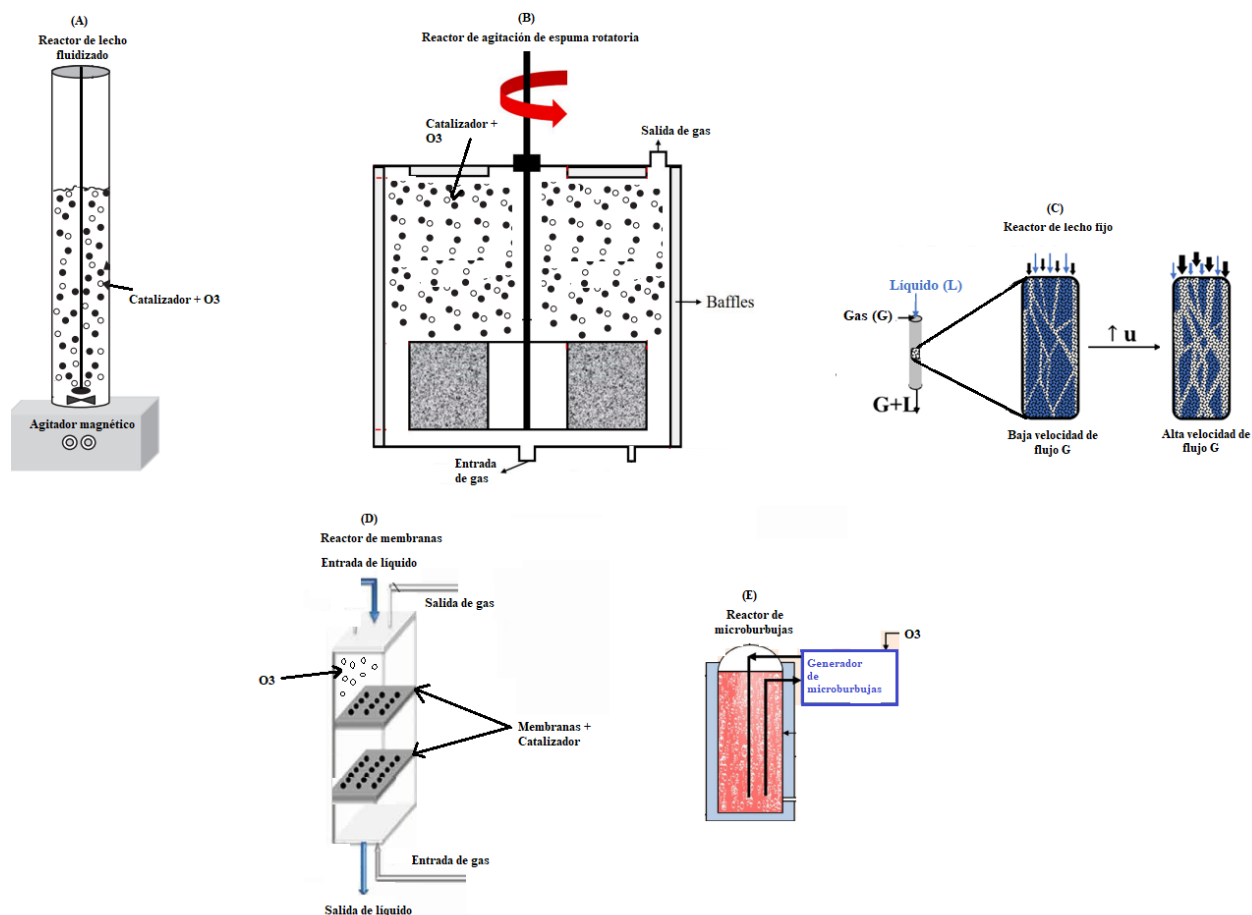


Figura 5. Reactores más comunes de ozonización catalítica (a) reactor de lecho fluidizado (b) Reactor de agitación de espuma rotatoria (c) reactor de lecho fijo (d) reactor de membranas (e) reactor de microburbujas. Fuente: adaptado de (Naghizadeh et al., 2022; Navarro-Brull, 2018; Xu et al., 2022; Y.-C. Yang et al., 2021; Zhang et al., 2022)

4.3. Análisis bibliométrico

Existen muchos métodos para identificar, analizar y sintetizar la literatura, que van desde centrarse en el contenido de la literatura hasta centrarse en la forma en que se lleva a cabo la investigación y las características de la publicación (P. Gao et al., 2021). Por ejemplo, el campo de la bibliometría o análisis bibliométricos (BA por sus siglas en inglés) tiene como objetivo analizar la literatura publicada (libros, capítulos de libros, artículos científicos y de revisión, conferencias,

editoriales, etc) utilizando técnicas cuantitativas o estadísticas para evaluar el impacto de un área (Morales-Zapata et al., 2021), mientras que otros enfoques de síntesis de investigación, como el mapeo sistemático de la literatura (SLR por sus siglas en inglés), se centran en evaluar el contenido de las publicaciones para obtener metainferencias entre estudios (Kalogiannakis et al., 2021).

En los últimos años, el BA también se ha utilizado para determinar el estado de un área de investigación específica, lo que se conoce a menudo como su nivel de madurez, debido a que para los investigadores es necesario conocer si el área de investigación es nueva y altamente teórica o si se ha venido desarrollando de manera práctica y aplicable en orden de producir información relevante para la comunidad científica (Keathley-Herring et al., 2016).

Las instancias de este tipo de evaluación comparten algunas características básicas, como centrarse en los cambios a lo largo del tiempo, evaluar el desarrollo de un campo específico mediante la exploración de los vínculos entre publicaciones, países, puntos críticos de investigación, etc., y determinar el nivel de madurez a través de la literatura producida, la cual se desarrolla desde una etapa altamente conceptual en la que la mayor parte de la investigación es exploratoria, pasando por la propuesta y validación de marcos conceptuales, la exposición a la industria y, finalmente, la etapa más avanzada en la que se realizan estudios cuantitativos, se identifican las mejores prácticas, se difunde información prescriptiva y terminología consistente y se explotan los conocimientos ya establecidos (Aleta et al., 2019).

4.4. Patentes

De acuerdo con la OMPI o WIPO (por sus siglas en inglés), una patente es un derecho exclusivo que se concede sobre una invención. En términos generales, una patente faculta a su titular a decidir si la invención puede ser utilizada por terceros y, en ese caso, de qué forma. Como

contrapartida de ese derecho, el titular de la patente pone a disposición del público la información técnica relativa a la invención (WIPO, 2008). De la misma forma, al registrar la patente, el titular adquiere el derecho exclusivo de impedir que su invención pueda ser patentada y/o explotada por terceros, sin embargo, la protección de la patente expira al cabo de 20 años, a partir de lo cual se vuelve pública (WIPO, 2008).

4.4.1. Clasificación Internacional de Patentes (IPC)

El IPC es una estructura jerárquica proveniente del sistema de clasificación internacional de patentes utilizado por la WIPO (WIPO, 2021) en su base de datos PATENTSCOPE. Cada IPC consta de secciones, clases, subclases, grupos principales y subgrupos en orden de detalle (WIPO, 2021). Otro tipo de clasificación es la CPC (Clasificación Cooperativa de Patentes) de la base de datos ESPACENET, la cual surge de un mutuo acuerdo entre la Oficina Europea de Patentes (EPO), Estados Unidos, Reino Unido, España, Suecia y China (Zikova, 2013). Hoy en día, ambos sistemas de clasificación son los más utilizados a nivel mundial para registrar patentes en cualquier oficina del mundo. Ambos códigos se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación IPC/CPC para ozonización catalítica en aguas y aguas residuales

Nivel	Subdivisión	Contenido	Símbolo	Nombre
1	Sección	A-H (IPC) o A-H e Y (CPC)	C	Química o metalurgia
2	Clase	Número de dos dígitos	02	Tratamiento de aguas, aguas residuales o lodos
3	Subclase	Letra mayúscula	F	Procesos para hacer que las sustancias químicas dañinas sean inofensivas o menos dañinas, efectuando un cambio químico en las sustancias
4	Grupo	Número de uno a tres dígitos	01	Tratamiento fisicoquímico
5	Subgrupo	Al menos dos dígitos	78	Con ozono (le precede el código 72 relacionado con oxidación)

Fuente: Adaptado de (Mailänder, 2016)

4.4.2. Dominio tecnológico

Los dominios tecnológicos son clasificaciones relacionadas con la información proporcionada por el IPC, las palabras clave y la descripción del cuerpo de la patente (OECD, 2009a) y se realiza generalmente a través de identificación de texto. El OST-INPI/FhG-ISI (Observatoire des Sciences et Technologies, Institut National de la Propriété Intellectuelle) y el Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research han propuesto una partición de los campos técnicos a partir del IPC, que consiste en una lista de 30 categorías técnicas (Schmoch, 2008). En esta clasificación, el código C02 del IPC (ver Tabla 1), pertenece a tecnologías ambientales, subdominio tecnológico agrupado en el macrodominio Ingeniería de procesos.

4.4.3. Oficinas de patentamiento

Para obtener una patente de una invención, la persona o institución propietaria de la invención (una empresa o una institución pública o privada) debe presentar una solicitud en la oficina de patentes, ya sea de su país o de un país extranjero. Un solicitante que desee tener protección de patentes en varios países puede solicitar una patente en cada país por separado, lo que convierte la patente en una familia de patentes, las cuales protegen la misma invención en distintos países y por ende, en distintas oficinas (OECD, 2009b).

Con el objetivo de esclarecer cuales son los países, inventores, aplicantes, instituciones públicas o privadas más competitivas en términos de actividad tecnológica, la OCDE estableció un indicador conocido como “*familia de patentes triádicas*”, que corresponde a patentes que registran un mismo invento de manera simultánea en las oficinas más importantes del mundo: la Oficina Europea de Patentes (EPO), la Oficina de Patentes de Japón (JPO) y la Oficina de Patentes y Marcas Registradas de EE.UU (USPTO) (OECD, 2009b). Las patentes registradas allí cubren aquellas

invenciones que el solicitante espera que tengan un alto valor económico, ya que valen el costoso proceso de solicitud en los mercados más importantes del mundo (Sternitzke, 2009).

4.4.4. *Análisis de patentes: una fuente de inteligencia de negocios*

Los indicadores y estudios basados en datos de patentes como el análisis de patentes, son extremadamente diversos en cuanto al formato de publicación (directorios estadísticos, informes de políticas, investigación académica); el nivel de agregación de los datos compilados (nacional, regional, nivel de empresa, industria o nivel de campo técnico); el enfoque adoptado (recopilación de indicadores, realización de estimaciones econométricas) y las cuestiones analíticas o de política abordadas (OECD, 2009a). A continuación, se resumen brevemente algunos resultados importantes que pueden ser estimados al estudiar patentes, según el manual estadístico de la OCDE para el análisis de patentes (OECD, 2009c):

- 1) *Evaluar desempeño tecnológico*: a través del análisis de patentes es posible monitorear el desempeño tecnológico de empresas (u otras organizaciones), regiones o países. En comparación con otros indicadores de producción, como las publicaciones, las patentes son un indicador más adecuado de las actividades más cercanas al desarrollo tecnológico.
- 2) *Descubrir tecnologías emergentes*: los indicadores de patentes a veces constituyen un medio único para rastrear el auge de tecnologías emergentes. La identificación de estas tecnologías se puede llevar a cabo buscando en bases de datos de patentes internacionales, ya sea por palabras clave o en resúmenes. A partir de esta información, también se pueden identificar empresas innovadoras que estén invirtiendo en estas tecnologías.
- 3) *Difusión del conocimiento y dinámica del cambio técnico*: dado que proporcionan una descripción detallada de cómo se ha realizado la invención y el estado de la técnica, las

patentes son una medida fiable de la transferencia de conocimiento. Las citas entre patentes apuntan al uso de invenciones anteriores en nuevas invenciones, mientras que las citas de la literatura científica son útiles para cuantificar las transferencias de conocimiento entre organizaciones (por ejemplo, de empresa a empresa o de universidad a industria), regiones geográficas y/o campos tecnológicos.

- 4) *Innovación geográfica*: el análisis de patentes puede utilizarse también para estudiar el proceso inventivo desde el punto de vista geográfico, el rol de actores locales, regionales y nacionales (universidades, pequeñas y grandes empresas, gobierno), sus interacciones y el impacto en el desarrollo endógeno de una región o país (Malecki, 2021).
- 5) *Rol de universidades en el desarrollo tecnológico*: el impacto de las universidades en el panorama tecnológico se puede observar evaluando la producción de patentes y la relevancia en términos de citas. También se puede estimar a partir de las citas de publicaciones o patentes académicas en patentes industriales ya que según autores como (Tseng et al., 2020), existen extensos estudios que demuestran que la mayoría de las empresas desarrollan sus productos, procesos y tecnologías sin establecer pactos de cooperación con otras organizaciones e instituciones, especialmente, instituciones universitarias.

4.4.5. Reporte de Panorama de Patentes (*Patent Landscape Report*)

Al análisis de un grupo de patentes que conforman una tecnología o una familia de tecnologías se le conoce como análisis de patentes y se utiliza para realizar lo que se conoce como “*reporte de panorama de patentes*”. Conocido por sus siglas en inglés, el PLR es una metodología propuesta por la WIPO que permite descubrir tendencias y alcance de una tecnología, distribución geográfica, patentes muy citadas, ciclo de vida de la tecnología (TLC, por sus siglas en inglés),

entre otros (WIPO, 2020). En los últimos años, este análisis ha atraído cada vez en mayor cantidad, investigadores y responsables políticos porque sirven como un indicador cuantitativo de fenómenos que son difíciles de medir, incluida la innovación, la difusión del conocimiento, dominios tecnológicos, la colaboración entre agentes y el espacio tecnológico (Mahlia et al., 2020).

4.4.6. *Pronóstico de la tecnología: ciclo de vida de la tecnología*

Las decisiones relacionadas con las inversiones en cualquier tecnología se ven afectadas por diferentes factores como el marketing, los recursos humanos, la ubicación, etc., además de los factores usuales, como la sostenibilidad de la tecnología en términos financieros, científicos y tecnológicos. Por ello, la previsión o pronóstico de tecnologías, o TF por sus siglas en inglés, es un área de investigación de gran interés, utilizada para predecir los beneficios de la inversión en una nueva tecnología (Altuntas et al., 2015).

En orden de prever las tendencias de investigación y adopción de una tecnología, existen modelos de crecimiento, los cuales se basan en el comportamiento de un sistema dinámico, el cual con frecuencia se asemeja a una serie de ondas logísticas o "loglets". El análisis Loglet implica analizar conjuntos de datos de crecimiento de series temporales existentes para descomponer el proceso en subprocesos y dilucidar información con el fin de determinar el comportamiento del sistema a nivel macro (Meyer et al., 1999).

Este comportamiento ocurre porque toda tecnología está supeditada a un proceso productivo desde la fase de introducción hasta la sustitución, una vez agotada sus capacidades. Esta caracterización de una tecnología atada a un proceso o a un conjunto de procesos es la base de los modelos de *Ciclo de vida de la Tecnología* (TLC), los cuales intentan definir la evolución de las características de una tecnología a través de etapas secuenciales y bien definidas (Taylor & Taylor,

2012). Las etapas de un TLC y como estas se relacionan con los productos obtenidos de las tecnologías y los stakeholders se observan en la Tabla 2.

Tabla 2. Niveles de madurez científica y tecnológica

Etapa	Estado	Porcentaje de madurez (%P)	Difusión tecnológica	Concentración de productos	Productos / Vendedores
Emergente o I+D	En laboratorios y pruebas piloto. Se busca inversión	$0 < \%P \leq 10$	Baja, aumentando	Alta	Primera generación Precios altos Alto nivel de personalización Inversión riesgosa Bajo impacto competitivo Baja integración en productos y procesos
Crecimiento	Entendimiento y escalamiento del proceso.	$10 < \%P \leq 50$	Alta, aumentando	Disminuyendo	Segunda generación Precios bajan Menos nivel de personalización Alto impacto competitivo Baja integración en productos y procesos Comienza la inversión
Madurez	Temprana: Tecnología probada. Evolución y adopción rápida de la tecnología	$50 < \%P \leq 75$	Estable	Estable	Tercera generación Investigaciones centradas en mejorar metodologías Validación de la tecnología Alto impacto competitivo Mejor momento para invertir Alta integración en productos y procesos
	Tardía: Tecnología robusta. Disminuye la innovación de productos	$75 < \%P \leq 90$	Estable	Estable	Se posicionan vendedores consolidados y comienza a saturarse el mercado. Se optan por nuevas tecnologías Baja el impacto competitivo Alta integración en productos y procesos
Saturación	No se buscan nuevos desarrollos ni inversiones	$90 < \%P \leq 99$	Baja, disminuyendo	Incrementándose, alta	Precios de mantenimiento Acumulación de productos Bajo impacto competitivo Alta integración en productos y procesos

Fuente: Adaptado de (Adamuthe & Thampi, 2019; Fenn, 2007; Mogee, 1994; Nagula, 2016; Nieto et al., 1998)

El TLC establece que la primera etapa del desarrollo de una tecnología es la *etapa emergente o etapa I+D*, que es cuando surge una nueva tecnología de bajo impacto competitivo y

de baja integración en productos o procesos; le sigue una *etapa de crecimiento*, en donde la tecnología presenta un ritmo sostenido de desarrollo, genera alto impacto competitivo, pero aún no se han integrado en nuevos productos o procesos. En la *etapa de madurez*, la tecnología se convierte en una tecnología clave, se integra en productos o procesos y mantiene su alto impacto competitivo. Finalmente, tan pronto como la tecnología pierde su impacto competitivo, se convierte en una tecnología base entrando en la *etapa de saturación*, en la que podría ser reemplazada por una nueva tecnología (Adamuthe & Thampi, 2019; Lezama-Nicolás et al., 2018).

El modelo matemático más ampliamente utilizado para describir el crecimiento de un sistema se basa en ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO) que describen un crecimiento exponencial (similar al de los organismos en biología), como se ve en la Ec.3 (Meyer et al., 1999). $P(t)$ es el crecimiento de la población que depende del tiempo y α es una constante de proporcionalidad.

$$\frac{dP(t)}{dt} = \alpha P(t) \quad (3)$$

Sin embargo, en realidad pocos sistemas crecen exponencialmente, sino que, por el contrario, la expresión debe modificarse con un límite. La modificación más utilizada es el modelo logístico (Ec.4), el cual agrega un término de “retroalimentación negativa” que ralentiza la tasa de crecimiento del sistema a medida que se acerca al límite κ o de saturación (Kucharavy & Guio, 2015):

$$\frac{dP(t)}{dt} = \alpha P(t) \left(1 - \frac{P(t)}{\kappa}\right) \quad (4)$$

Al resolver la anterior EDO, se encuentra la Ec.5 conocida comúnmente como *Modelo Logístico* y linealizando se encuentra la Ec.6:

$$y = \frac{\kappa}{1 + e^{-r(t-t_m)}} \quad (5)$$

$$-\ln\left(\frac{\kappa}{y}\right) = rt + t_m \quad (6)$$

Otro modelo para determinar el TLC es el *Modelo de Gompertz*, descrito por la Ec.7. Linealizando se encuentra la Ec.8 (Nagula, 2016):

$$y = \kappa e^{-e^{-r(t-t_m)}} \quad (7)$$

$$-\ln\left(\ln\left(\frac{\kappa}{y}\right)\right) = rt + t_m \quad (8)$$

Ambos modelos se utilizan ampliamente en la actualidad en trabajos de investigación aplicada para modelar y pronosticar el comportamiento de muchos procesos de difusión, crecimiento de poblaciones, tasa de adopción de productos basados en tecnología y desarrollo de marketing (Nguimkeu, 2014).

En las Ec.5 y 7, r especifica el "ancho" o "inclinación" de la curva sigmoideal, el cual corresponde con la velocidad o tasa de crecimiento. Este vapor a menudo es útil reemplazar por una variable que especifica el tiempo requerido para que el sistema crezca del 10% al 90% del límite κ , un período llamado duración característica o Δt (C.-Y. Liu & Wang, 2010). El parámetro t_m especifica el momento en que la curva alcanza su punto de inflexión. Para el caso del modelo logístico este punto es $t_m = 1/2\kappa$, o el punto medio de la trayectoria de crecimiento alrededor del cual la curva del modelo logístico es simétrica.

En el caso del modelo de Gompertz, la curva no es simétrica alrededor del punto t_m (Loaiza-Echeverri et al., 2013), por lo tanto, el punto de inflexión se define como k/e y el tiempo en este punto corresponde a la Ec.9.

$$t_m = \frac{\ln\left(\ln\left(\frac{\kappa}{e}\right)\right)}{-e^{-r(t_m+1)}} \quad (9)$$

El parámetro κ para ambos modelos es el límite asintótico al que se acerca una curva de crecimiento, es decir, el valor de saturación del sistema. Al graficar cualquiera de las Ec.5 y 7 en sus formas más sencillas, se obtienen las conocidas curvas S, utilizadas como modelo matemático para evaluar el TLC.

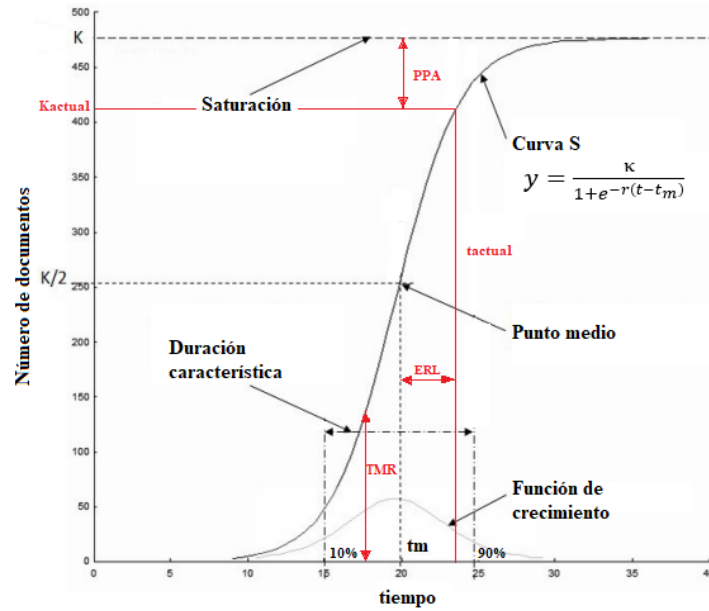
Si a su vez, los resultados de la curva S se combinan con otros indicadores, es posible anticipar parámetros como el número de documentos o patentes potenciales y el tiempo de vida restante antes de que la tecnología entre en su etapa de saturación, en donde según la Tabla 2, ya no es atractiva la inversión. Uno de los grupos de indicadores más conocidos son los propuestos por (Yoon et al., 2018). Estos se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Indicadores de pronóstico científico y tecnológico

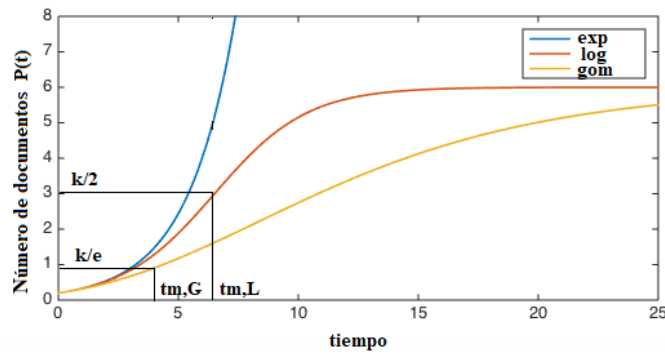
Indicador	Nombre	Unidades	Ecuación
TMR	Tasa de madurez tecnológica	%	$TMR = \frac{\kappa_{actual}}{\kappa} * 100$ (10)
ERL	Vida restante esperada	Tiempo	$ERL = t_{\kappa} - t_{actual}$ (11)
PPA	Número de patentes potenciales	Nº de documentos	$PPA = \kappa - \kappa_{actual}$ (12)

Fuente: Adaptado de (Yoon et al., 2018)

De esta forma, al reunir los indicadores de la Tabla 3 y las etapas anteriormente descritas, se obtiene la característica curva S (Figura 6a). En la Figura 6b se observa una comparación entre los 3 modelos mencionados anteriormente: exponencial, logístico y de gompertz. Si bien el modelo de gompertz también da como resultado la curva S, el punto de inflexión no es el punto medio de la curva, además de que el modelo de gompertz tiene un r generalmente inferior al logístico, por lo cual, la tasa de crecimiento es más lenta.



(a)



(b)

Figura 6. Curva S para TLC. Fuente: adaptado de (Driscoll, 2015; L. Gao et al., 2013; Kucharavy & Guio, 2015; Yoon et al., 2018)

Diversos artículos han podido determinar la curva S mediante PLR y BA. Estudios previos como el de (L. Gao et al., 2013), utilizan el análisis de patentes para realizar un modelo de curva S con distintas tecnologías de prueba (LCD y nanobiosensores) y así predecir en qué fase del ciclo de vida se encuentran. Aunque logran determinar el TLC para cada una, los autores son muy enfáticos a la hora de esclarecer que un amplio rango de factores externos puede alterar la dirección de la trayectoria, incluyendo nuevas combinaciones tecnológicas, fuerzas socioeconómicas y

políticas, inversión estatal e internacional, etc. Por parte de los BA, se resalta el estudio de (Mao et al., 2021), quienes determinan el estado en la investigación de diferentes tecnologías aplicadas al tratamiento de agua residual desde el año 1998 al 2019 a través de la evaluación de curvas S.

A pesar de lo anterior, existen pocas aproximaciones cuantitativas y metodológicas estandarizadas para realizar un TF a través de un TLC con datos obtenidos de un BA y/o un PLR. Algunos estudios, cómo los de (Linton, 2002), (Lin & Yang, 2003), (Cheng et al., 2008), (Íntepe et al., 2013), (Dehghan et al., 2019) y (X. He & Yu, 2020) proponen distintos métodos aplicados a tecnologías como Televisión 3D, desarrollo de nuevos nanomateriales, dispositivos optoelectrónicos, energía eólica y evaluación del ciclo de vida (LCA por sus siglas en inglés), entre los que se encuentran la regresión múltiple, la regresión lineal y no lineal, redes neuronales, técnicas de agrupamiento, ponderación Bayesiana y método Delphi.

5. METODOLOGÍA

La metodología se dividió en 2 partes: en *primer lugar*, la realización de un PLR (basado en la metodología sugerida por la WIPO (WIPO, 2020) y un BA para determinar las tendencias científicas y tecnológicas actuales con respecto a la OC, con base en la investigación de (Donthu et al., 2021). En *segundo lugar*, la construcción de la curva S de la tecnología con los modelos logístico y de gompertz y el cálculo de un conjunto de indicadores de distintas fuentes y autores y propios con el fin de realizar un TLC y estimar el estado actual y futuro de la OC en términos de producción científica y tecnológica.

5.1. Alcance y tipo de investigación

Se fijó un alcance mundial en orden de abarcar la mayor cantidad de información posible para determinar el estado de la tecnología en el momento de la realización del estudio. No se delimitó un tiempo específico, sino que se analizaron todos los artículos y patentes desde la primera mención del tema en las bases de datos seleccionadas hasta la actualidad. Se manejó un tipo de investigación de tipo cuantitativa.

5.2. Tipo de base de datos

La búsqueda de publicaciones se realizó en la base de datos Scopus de Elsevier, ya que estudios comparativos han demostrado que el uso de Scopus sobre otras bases de datos similares es más eficaz, dado que permite un mayor procesamiento de información científica (Garrido-Cardenas et al., 2020). Los resultados exportados de SCOPUS incluyen artículos de revisión, artículos de investigación, libros y capítulos de libro y artículos de conferencia.

Para realizar la búsqueda de patentes se utilizó la base de datos de la plataforma Questel-Orbit, ya que este software proporciona herramientas de minería de datos para analizar patentes a través de características únicas, como concepto, estado legal, etc (Questel, 2021). Es importante señalar que los resultados aquí presentados en cuanto a patentes corresponden a familias de patentes, es decir, una patente que ha sido registrada en diferentes países, pero que constituye la misma invención con diferentes códigos de país (OECD, 2009a). Los resultados se agruparon en familias con el fin de evitar datos repetidos de una misma patente con diferentes códigos de registro.

5.3. Recolección de los datos y depuración

Para cumplir con este paso, se definieron las ecuaciones de búsqueda para artículos y patentes de la Figura 7. Se recogieron todos los resultados hasta el 29 de Mayo de 2022 (incluyendo preprints) y se procesaron todos los documentos hasta la fecha.

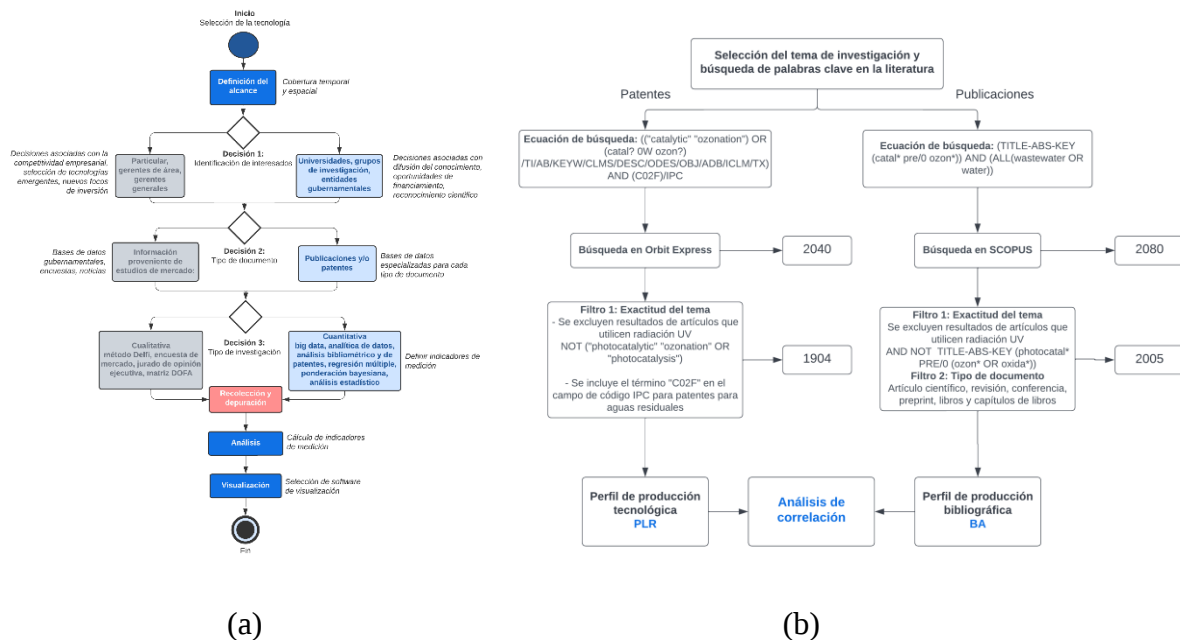


Figura 7. Metodología propuesta para el análisis bibliométrico y de patentes (a) Diagrama de flujo, (b) Protocolo de búsqueda. La Figura 7b parte del proceso “Recolección y Depuración” de la Figura 7a.

Fuente: propia

Como se observa en la Figura 7, en el caso de la ecuación de búsqueda para Scopus, el operador pre/0 asegura que la palabra catal* se encuentre primero que ozon* y que no existan palabras entre ambos términos. Por su parte, los términos “catal*” y “ozon*” poseen un operador de truncamiento * que permite obtener variaciones de estas palabras como “catalysts”, “catalytic”, “ozonization”, “ozonation”, “ozonated”, “ozone”, entre otras combinaciones. Finalmente, la aplicación del comando TITLE-ABS-KEY y el procesamiento manual de la base de datos permitió depurar aquellos artículos que mencionen el tema de investigación, pero que no se centren en él específicamente.

Para la ecuación de búsqueda de patentes se utilizó el tesoro de Orbit Express, el cual asegura que la tecnología sea la especificada en la ecuación de búsqueda. Debido a que existen también patentes de OC para la depuración de aire y para la síntesis de compuestos químicos, se utilizó el IPC C02F, el cual corresponde específicamente a tratamientos de aguas residuales (ver Tabla 1). Finalmente, para ambas búsquedas, se excluyeron resultados de ozonización fotocatalítica, ya que esta agrega radiación UV al tratamiento y se puede considerar como una tecnología diferente.

La última etapa del proceso de recolección y depuración incluye un análisis de correlación entre publicaciones (x) y patentes (y) en el período de estudio, el cual se realizó a través del coeficiente de correlación de Pearson, el cual se define como una medida de la relación entre dos variables aleatorias cuantitativas continuas (Ziegler et al., 2021). Este coeficiente se define con la Ec.13-16:

$$r_{xy} = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx}S_{yy}}} \quad (13)$$

$$S_{xy} = \sum xy - \frac{\sum x \sum y}{n} \quad (14)$$

$$S_{xx} = \sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n} \quad (15)$$

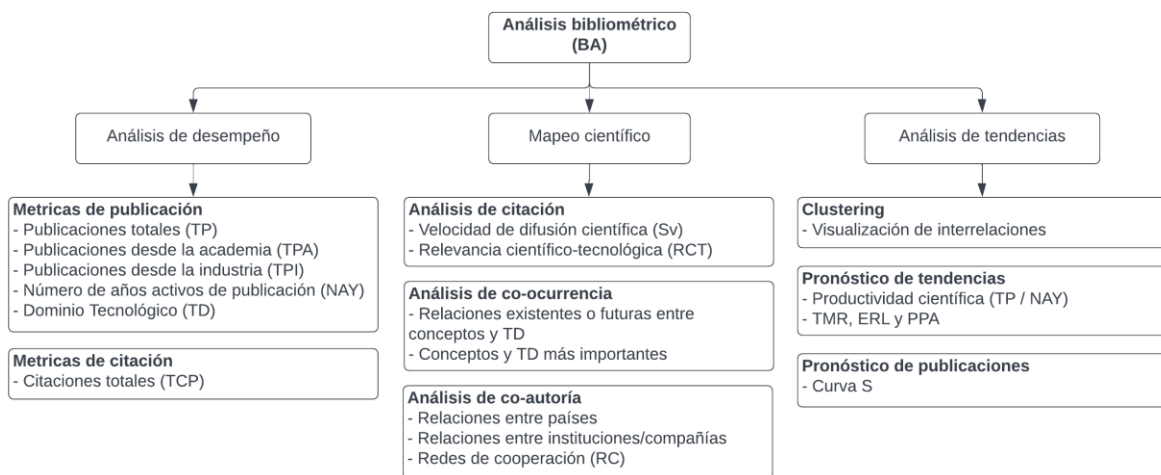
$$S_{yy} = \sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n} \quad (16)$$

El valor del coeficiente varía entre [-1,1] y la interpretación del grado de correlación se calcula como sigue:

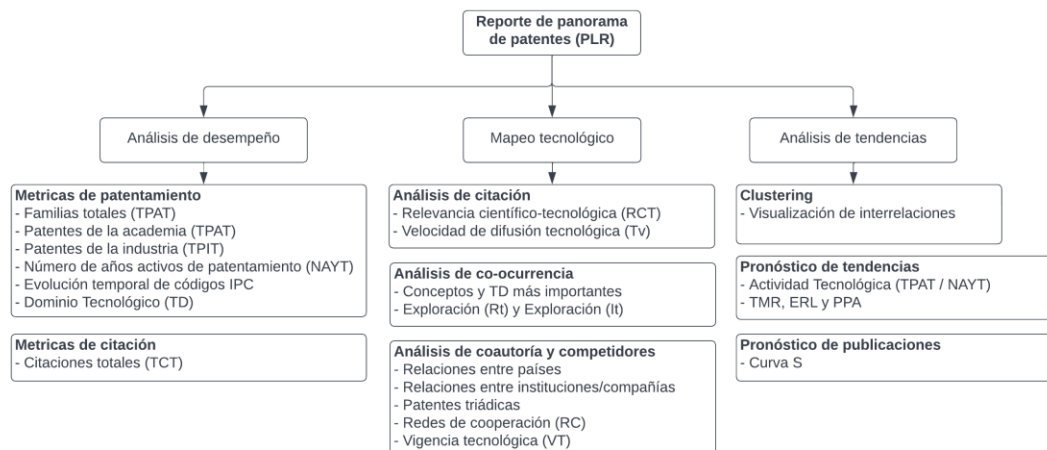
- $0.00 < r_{xy} < 0.30$: correlación lineal débil
- $0.30 < r_{xy} < 0.60$: correlación lineal moderada
- $0.60 < r_{xy} < 0.90$: correlación lineal fuerte
- $0.90 < r_{xy} < 1.00$: correlación lineal muy fuerte

5.4. Discusión de los resultados

Los resultados obtenidos se compararon mediante análisis gráfico, el cual se realizó con el complemento Intellixir del software Orbit Intelligence (Questel, 2022) y a través de otras herramientas de análisis de datos, como Microsoft Excel. La Figura 8 muestra los indicadores utilizados.



(a)



(b)

Figura 8. Indicadores de análisis para (a) BA y (b) PLR. Fuente: propia y basado en información de (Donthu et al., 2021)

De acuerdo con la Figura 8, se seleccionaron indicadores de citación y co-ocurrencia para determinar la velocidad de difusión (v), el nivel de exploración (R_t) y de explotación de la tecnología (I_t) (ver Tabla 4). Estos indicadores se dividieron en 3 períodos: 1975-1991 (período 1), 1992-2007 (período 2) y 2008-2022 (período 3). El indicador R_t se compone de la relación entre IPCs recientemente utilizadas n_t^r en el período t respecto del total de IPC en el período de estudio t (n_t), mientras que I_t se define como la relación entre el número total de IPCs utilizadas en los períodos t y $t-1$ (n_t^i) respecto del total de IPC en el período de estudio t (n_t).

Otros indicadores utilizados fueron los de antigüedad de las patentes, ya que permiten estimar la antigüedad de un potafolio de patentes, ya sea de una tecnología específica, un país, una universidad o una compañía. Adicionalmente, propusieron dos indicadores propios: relevancia y vigencia científico – tecnológica. Finalmente, se exportó el indicador de redes de cooperación del software VosViewer (ver Tabla 4).

Tabla 4. Indicadores para análisis co-ocurrencia y citación

Indicador	Nombre	Unidades	Ecuación	Referencia
v	Velocidad de difusión científica (Sv) o tecnológica (Tv)	$\frac{\text{Citaciones totales}}{\text{Nº patentes o publicaciones}}$	$v = \frac{TCP \text{ o } TCT}{TP \text{ o } TPAT}$	(17) (Altuntas et al., 2015)
Rt	Exploración en el período t	%	$R_t = \frac{n_t^r}{n_t} * 100$	(18) (Son & Cho, 2020)
It	Explotación en el período t	%	$I_t = \frac{n_t^i}{n_t} * 100$	(19) (Son & Cho, 2020)
AP	Antigüedad de las patentes	Años	$AP = \text{Año actual} - \text{Año de prioridad}$	(20) (Questel, 2022)
RTC	Relevancia científica y tecnológica	%	$RTC = \frac{TCP+TCT}{TP+TPAT} * 100$	(21) Propio
RC	Redes de cooperación	$\frac{\text{Nº de colaboraciones}}{\text{Publicaciones}}$	$RC = \frac{\text{Nº de colaboraciones}}{TP}$	(22) (Eck & Waltman, 2014)
VT	Vigencia tecnológica	$\frac{\text{Patentes activas}}{\text{Año}}$	$VT = \frac{TPATA}{NAYT}$	(23) Propio

Fuente: propia

El TLC se determinó mediante la construcción de la curva S para publicaciones y patentes con el fin de determinar el estado científico y tecnológico, respectivamente. Esta curva se realizó por medio del software Loglet Lab propiedad de la Universidad Rockefeller (The Rockefeller University, 2010). La curva se construyó con los dos modelos más utilizados en la literatura para calcularla: el modelo logístico (Ec.5) y el de Gompertz (Ec.7). El mejor modelo para el análisis fue aquel con los menores errores (desviación media absoluta (MAD), raíz del error cuadrático medio (RMS) y suma de cuadrados (SSE)) y mejores indicadores estadísticos de ajuste para la linealización (R^2). Para comprobar la bondad del ajuste se realizaron análisis de normalidad y heterocedasticidad de los residuales. Todos los cálculos se realizaron con un intervalo de confianza del 95% ($\alpha=0,05$). Los ajustes se realizaron utilizando el método de Montecarlo. Finalmente, se utilizaron los indicadores propuestos por (Yoon et al., 2018) con el mejor modelo (ver Tabla 3).

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Análisis de Correlación

La Figura 9 muestra la evolución temporal de publicaciones (verde) y patentes (azul) durante el período de estudio. Se analizaron en total 1904 patentes y 2005 publicaciones. En cuanto a publicaciones el 89,4% son artículos de investigación, el 6,6% artículos de conferencia, el 3,1% artículos de revisión y 0,9% capítulos de libro.

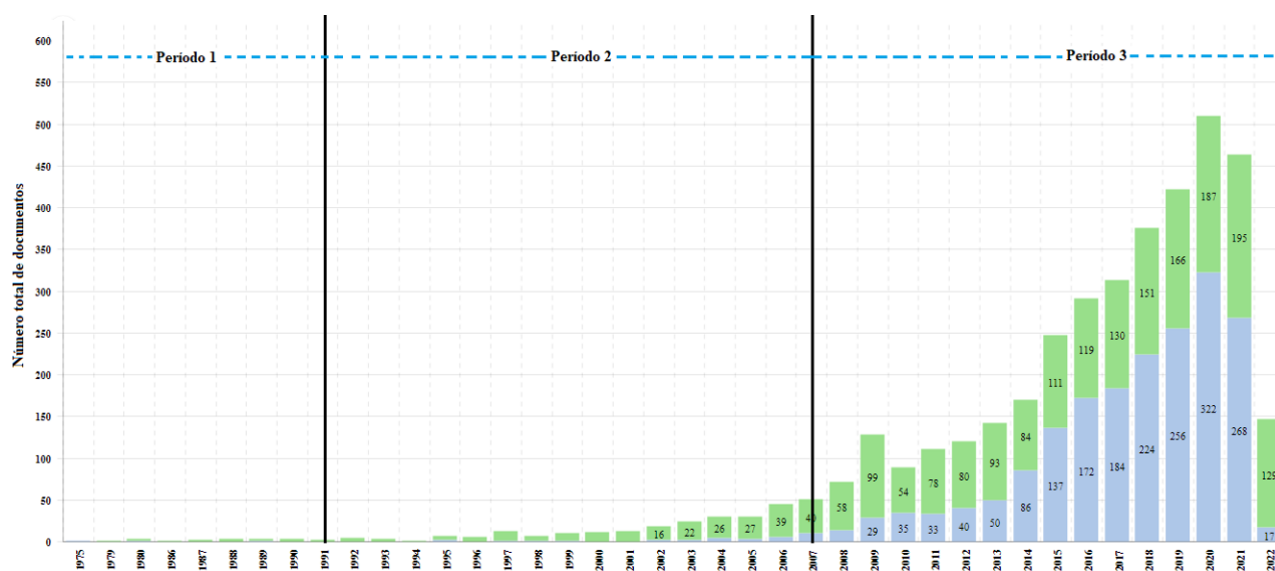


Figura 9. Evolución temporal del número de publicaciones (verde) y patentes (azul). Fuente: propia con información de Scopus y Orbit Intellixir

La Figura 9 se dividió en periodos para entender mejor la evolución en la investigación científica y tecnológica. Durante el período 1 (1975-1991), la producción científica (TP/NAY ver Figura 8a) fue en promedio 81% del total de documentos publicados, contrastando con la actividad tecnológica (TPAT/NAYT ver Figura 8b) que fue del 19%. En cuanto a publicaciones, solo se observan artículos de investigación y de conferencia, lo que implica que en este período se realizaron los primeros avances científicos en materia, los cuales se difundieron mayormente en congresos nacionales y/o internacionales. Se observan los primeros artículos de OC homogénea

por parte de empresas como Mitsubishi utilizando H_2O_2 como catalizador (Nakayama et al., 1979). Otros catalizadores notables son los basados en aleaciones de níquel y aluminio, los óxidos de hierro y carbón activado (Sierka & Bryant, 1987). También se postulan los primeros modelos cinéticos para describir el comportamiento de las reacciones catalíticas. En patentes se observan acercamientos, mayormente a la OC heterogénea, con catalizadores de óxidos de níquel, cobalto, platino, paladio, hierro, titanio o aluminio (Amos Turk & Danbury, 1975).

Para el período 2 (1992-2007), la producción científica aumenta al 90% y la actividad tecnológica disminuye al 10%. Los principales avances de esta etapa son científicos, ya que las publicaciones se incrementan dramáticamente desde 16 publicaciones en el anterior período a 299 al final del período 2. Uno de los artículos más importantes de esta etapa es el de (Kasprzyk-Hordern et al., 2003b), quienes a través de una revisión proponen mecanismos de reacción y expresiones cinéticas generales. Desde el año 1997 se comienza a utilizar OC en matrices de agua real y en CECs (Hostachy et al., 1997). Culminando esta etapa se comienza a observar la aplicación de nanocatalizadores en orden de disminuir las restricciones de transferencia de masa de la OC heterogénea (Y. Yang et al., 2007). En cuanto a patentes, se siguen manejando catalizadores de óxidos metálicos, pero surgen catalizadores honeycomb de cerámica (Jun et al., 2003). Empresas como DEGREMONT realizaron avances en el diseño de reactores que permitan un mejor contacto entre las fases involucradas (gas/líquido/sólido) (Karpel et al., 2003).

Finalmente, para el período 3 (2008-2022), la producción científica disminuye drásticamente hasta el 55% y la actividad tecnológica aumenta al 45%, sobre todo porque la publicación de patentes aumenta dramáticamente desde 48 patentes en el período 2 a 1853 patentes en el período 3, de las cuales la mayoría son chinas. En publicaciones, los más resaltantes son aquellos que intentan dilucidar el rol del radical $\bullet\text{OH}$ en las reacciones de degradación del

contaminante (J. L. Wang & Xu, 2012b) y nuevamente, los autores (Nawrocki & Kasprzyk-Hordern, 2010) quienes realizan una revisión sobre los principales catalizadores utilizados en OC. Más recientemente se utilizan catalizadores de zeolita, cerio, soportes de sílica-gel y todo tipo de nanocatalizadores y materiales mesoporosos (Dang et al., 2020b; Ghuge & Saroha, 2018; Inchaurredo & Font, 2022; Niu et al., 2020). En este período también aumentan las publicaciones a escala piloto, sin embargo, las aproximaciones a escala industrial son escasas.

Aplicando las Ec.13-16 se obtiene que el número de publicaciones (TP) y el número de patentes (TPAT) exhiben una fuerte correlación lineal, especialmente durante el período 1 (Tabla 5). Se observa que en general, la producción científica y la actividad tecnológica es similar y está relacionada, pero en el período 3 el coeficiente es menor, lo que implica que la correlación ha disminuido entre los años 2008 – 2022. La Figura 8 mostró que durante el período 3, específicamente desde el año 2008, el TP y TPAT aumentaron exponencialmente, sin embargo, TP sufrió una desaceleración en el ritmo de producción científica comparado con el período anterior, caso contrario a la actividad tecnológica que aumentó dramáticamente, lo cual puede ser una causa en la pérdida de correlación en el conjunto de datos durante este período.

Tabla 5. Resultados del análisis de correlación

Período	Resultado	Interpretación
1975-1991	0.99	$0.90 \leq r < 1.00$ - Relación lineal muy fuerte
1992-2007	0.96	$0.90 \leq r < 1.00$ - Relación lineal muy fuerte
2008-2022	0.89	$0.60 \leq r < 0.90$ - Relación lineal fuerte

Fuente: propia

6.2. Códigos IPC principales

Al evaluar la evolución de IPC se obtuvo la Figura 10. El IPC con más patentes es el C02F1/78 que corresponde a tratamientos de aguas residuales y lodos por oxidación con ozono, el cual comienza a tomar relevancia a finales del Período 2 (desde el año 2006 aproximadamente) en adelante. Le sigue el IPC C02F101/30, el cual toma relevancia desde el año 2014 y está relacionado con la naturaleza del contaminante, mayormente, compuestos orgánicos que incluyen: hidrocarburos, grupos funcionales de oxígeno (como los ácidos carboxílicos), halogenuros y nitrogenados (aminas y amidas). Estos resultados concuerdan con los ya encontrados por los autores de esta tesis en el artículo (Angel-Ospina & Machuca-Martínez, 2022), en donde compuestos como el tolueno, el fenol y el ácido oxálico, han sido algunos de los contaminantes más estudiados en investigaciones de OC.

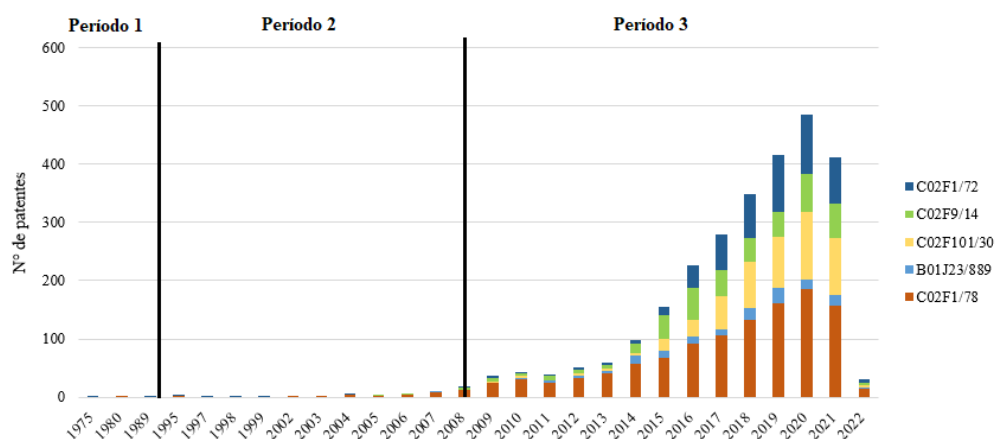


Figura 10. Evolución temporal de principales códigos IPC. Fuente: propia

Seguidamente, los IPC C02F1/72 (tratamiento de aguas residuales por oxidación de compuestos), C02F9/14 (tratamientos multietapas de aguas residuales con al menos una etapa biológica) y B01J23/889 (catalizadores que comprenden metales, óxidos e hidróxidos metálicos) son en orden, los que más patentes contienen y los tres cobran importancia desde el año 2012, aproximadamente, lo cual sugiere que la investigación se ha centrado en la combinación de OC

con procesos biológicos y en el desarrollo de prototipos que permitan el escalamiento efectivo de la tecnología, optimizando costos, catalizadores y rendimientos de remoción.

6.3. Análisis de co-ocurrencia

6.3.1. Conceptos

La Figura 11 muestra un análisis de palabras clave y conceptos y divide los resultados en 9 subgrupos principales: agua residual, efluente, catálisis heterogénea, tratamiento de ozonización catalítica, reactor, tratamiento de agua, efluente bioquímico, biodegradación del agua residual y tanques de sedimentación.

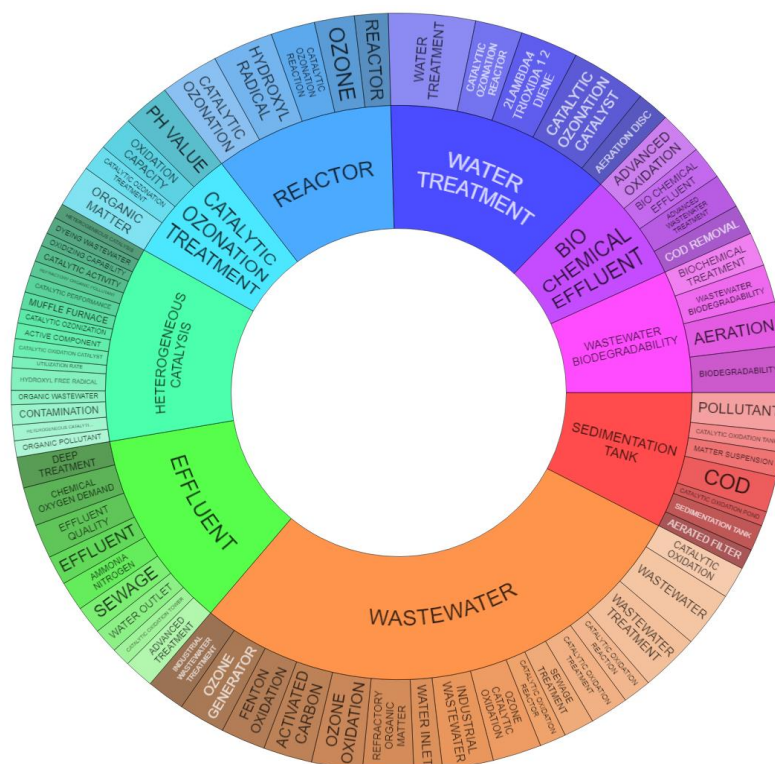


Figura 11. Mapa de conceptos relevantes sobre ozonización catalítica. Fuente: Orbit Intellixir

Los subgrupos *agua residual, efluente y tratamiento de agua* se enfocan en la utilización de la OC en la degradación de materia orgánica y contaminantes refractarios y se centran en temas

como los mecanismos de oxidación, catalizadores, calidad del agua de entrada y salida al proceso, monitoreo de parámetros en el agua residual, desempeño del generador de ozono y mecanismo de aireación a través del cual se bombea O_3 en el medio. Por otro lado, los subgrupos *catálisis heterogénea* y *tratamiento de ozonización catalítica* se centran en la actividad y capacidad del catalizador sobre el contaminante y el efecto de variables de operación como el tipo de catalizador y el pH en la formación de radicales $\bullet OH$.

En cuanto a equipos, se observan los subgrupos *reactor* y *tanque de sedimentación*, en donde los conceptos O_3 , radical $\bullet OH$ y filtros de aireación son los más importantes, lo cual podría significar que las innovaciones y limitaciones del proceso se encuentran alrededor de la mejora en la transferencia de masa entre las fases involucradas dentro del reactor que permitan un mejor contacto y, por ende, mejores rendimientos en la degradación, así como en el acople de otras etapas de tratamiento que permitan disminuir el contenido inicial de materia orgánica antes del tratamiento con OC. Un ejemplo reciente es la investigación de (Li et al., 2021), quienes comparan los rendimientos de reactores de burbujas con los de microburbujas y señalan que este último puede llegar a tener hasta un 21% más de rendimiento en la remoción de nitrobenceno por la mejora en el contacto entre las interfases líquido-gas-sólido. Los principios de investigaciones relacionadas con microburbujas también se han observado en patentes como la CN114671508 A (Sun et al., 2022), quienes desarrollaron un prototipo de OC compuesto por un reactor con un núcleo de catalizador en un lecho fijo, el cual posee un disco rotatorio de aireación a través del cual se inyecta O_3 en forma de microburbujas.

Finalmente, los subgrupos referidos a parámetros biológicos (*efluente bioquímico* y *biodegradación del agua residual*) se refieren a que la OC ha demostrado su eficacia en la remoción tanto de contaminantes químicos como patógenos, además desde el año 2010 se ha venido

utilizando el acople con procesos biológicos en orden de degradar subproductos de reacción que se generan durante la ozonización o de hacer el efluente del proceso de OC apto para un proceso biológico (Moussavi et al., 2010). Una patente reciente que aplica este acople es la CN216764640 U (Changli et al., 2022), un sistema de tratamiento bioquímico de lixiviados de lodo rojo, que comprende un tanque de sedimentación para separación sólido-líquido, una unidad de reacción bioquímica alta en sal, una torre de OC y un tanque de filtro de aireación biológica, en donde la unidad de OC se utiliza para oxidar y degradar materia orgánica de alto peso molecular.

Por otro lado, generalmente, la producción científica es la que aporta nuevos conceptos a una investigación o tecnología determinada. Por ello, se realizó un análisis de tendencias de conceptos basándose en el número de ocurrencias de cada concepto durante los 3 períodos de estudio. La Figura 12 muestra los resultados y se observa que desde el año 2008, la aparición de nuevos conceptos ha venido decreciendo, manteniéndose alrededor de 21 conceptos/año/documento en promedio, lo cual concuerda con el descenso en la producción científica de la Figura 9 (que pasó del 90% en el período 2 al 52% en el período 3).

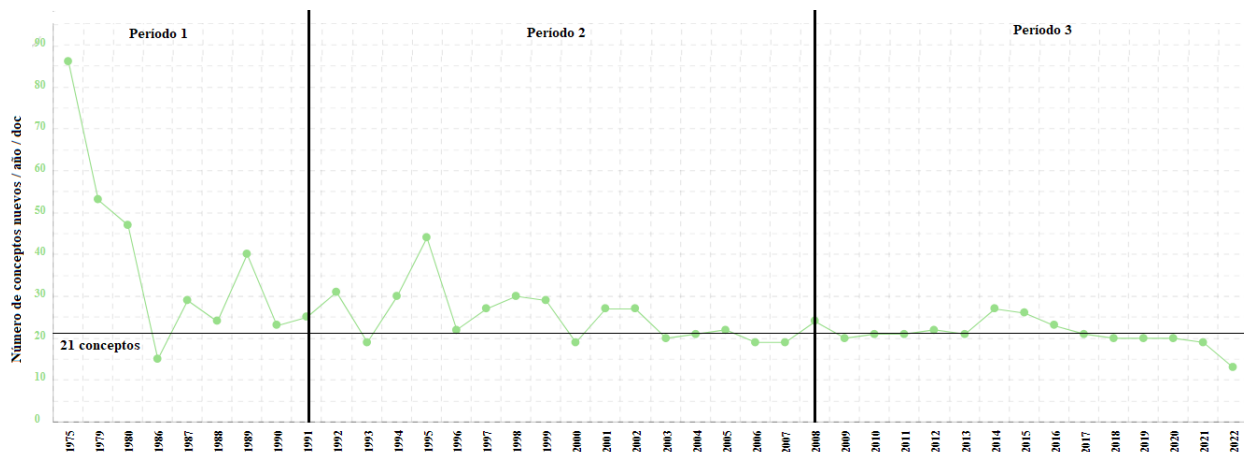


Figura 12. Análisis de tendencias de conceptos. Fuente: propia con información de Orbit Intellixir

6.3.2. Dominios tecnológicos

Seguidamente, la Figura 13 muestra los dominios científicos y tecnológicos más importantes para publicaciones y patentes, en donde adicionalmente, se muestra la proporción de patentes activas y muertas, lo cual es un indicativo de qué tanta atención en términos de publicaciones y patentes ha recibido un dominio tecnológico determinado. El dominio *ciencia de materiales* incluye ciencias como física y química y está relacionado principalmente con catalizadores; *ciencias ambientales* está relacionado con toda la química detrás del proceso de degradación de contaminantes en agua potable y residual, referida a mecanismos de reacción, expresiones cinéticas, ecuaciones químicas, vías de degradación, interacción O₃-especies oxidantes-contaminante-catalizador, estudios a nivel de laboratorio, entre otros.

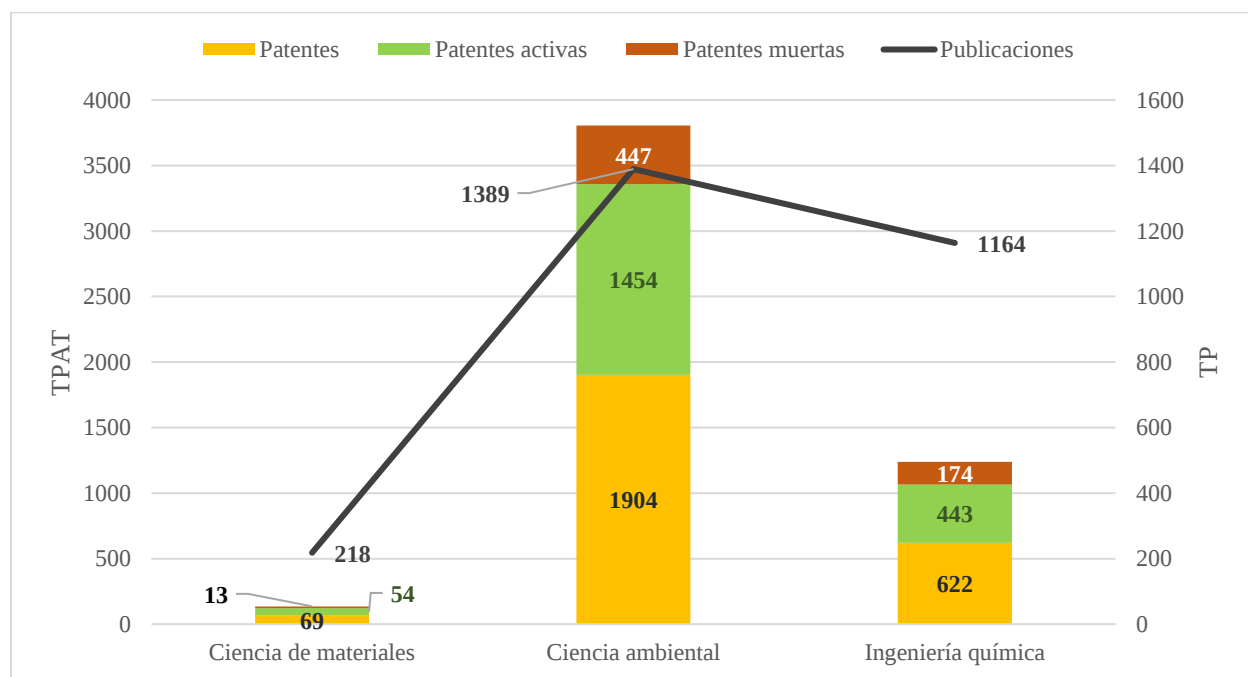


Figura 13. Dominios tecnológicos principales para publicaciones y patentes. Adicionalmente se señala estado legal de las patentes (vivas y muertas). Fuente: propia con información de Orbit Intellixir

El dominio *Ingeniería Química* está relacionado con la configuración más idónea de equipos para lograr los mejores rendimientos, las especificaciones del proceso, el diseño de reactores, estudios a escala piloto y el escalamiento del proceso. Finalmente, *Otras ingenierías* comprende algunos documentos relacionados con la parte eléctrica, mecánica y civil de los estudios realizados a escala piloto e industrial.

Se observa que el dominio tecnológico con más patentes y publicaciones es el de *ciencias ambientales*, con un total de 1904 patentes, de las cuales, el 78.26% se encuentran activas; y, 1389 publicaciones. En el caso de publicaciones, las investigaciones a escala de laboratorio han sido bien documentadas para la degradación de contaminantes orgánicos y CECs desde la década de los 60s y 90s, respectivamente. Además, aunque existen varios estudios que proponen mecanismos de reacción para diferentes tipos de contaminante y catalizadores en particular, al momento de la realización de esta tesis no se ha llegado todavía a un consenso general con respecto al entendimiento de los mecanismos que tienen lugar, debido a la existencia de incertidumbre y contradicciones con respecto a los sitios activos de los catalizadores. Esto ha ocasionado que, a pesar de la floreciente investigación académica, la OC se haya aplicado significativamente menos en el tratamiento real de agua y aguas residuales en comparación con la ozonización convencional y otros procesos establecidos basados en el ozono (Von Gunten, 2018).

El dominio de *Ingeniería Química* es el segundo más importante (622 patentes y 1164 publicaciones) y se relaciona principalmente con equipos y prototipos de OC. Como se dijo anteriormente, aunque la tecnología está bien desarrollada a nivel de laboratorio, todavía existen dificultades importantes para su escalamiento debido a que no existe un consenso científico unificado sobre el mecanismo de reacción que tienen lugar en el proceso (Issaka et al., 2022). Más aún, estudios recientes parecen estar centrándose de manera excesiva en el diseño y la

caracterización de nuevos catalizadores (Z. Yang et al., 2022), sin terminar de lograr todavía un progreso simultáneo en la comprensión de la química del proceso de OC para el tratamiento de agua y aguas residuales, lo cual ha provocado que muy pocas publicaciones se hayan centrado en escalar el proceso y todavía menos de ellas, a mirarlo desde el punto de vista comercial.

De igual manera, las patentes no han sido utilizadas casi en lo absoluto en el panorama de la producción científica, por lo cual, existe extensa información en patentes referidas mayormente a prototipos de OC, acoples con otros procesos de tratamiento biológico y de oxidación, métodos de preparación y regeneración de catalizadores los cuales no han sido descritos ni estudiados en el panorama científico. Otro aspecto resaltante que se tratará en secciones posteriores es la relación entre el patentamiento por parte de instituciones públicas como universidades o centros de investigación y empresas, ya que este indicador es sumamente importante para observar si la tecnología ha recibido atención para su escalamiento con fines comerciales y si se ha realizado una efectiva transferencia tecnológica.

Finalmente, se encuentra el dominio *ciencias de materiales* (69 patentes y 218 publicaciones) el cual está relacionado con la síntesis de catalizadores novedosos para la optimización del proceso, materiales básicos, micro y nanotecnología de materiales, tecnologías de superficie, entre otros. Al comparar este dominio con los demás, se observa que se encuentra en una etapa emergente, con gran proporción de patentes vivas (76.37%) y según lo señalado en la Figura 9, con IPC B01J-23 (catalizadores) entrando en el panorama desde el año 2012, lo que sugiere un campo muy atractivo para la investigación y el patentamiento. Sobre este grupo también se ha reportado extensamente que la combinación de O_3 y catálisis heterogénea puede mejorar la cinética de reacción, la eficiencia en la utilización de O_3 y reducir el tiempo requerido para lograr la mineralización completa de los CECs en aguas residuales (Priyadarshini et al., 2022). Sin

embargo, algunos de los desafíos más importantes para la adopción generalizada de la tecnología se encuentran en este dominio, siendo la selección de catalizadores eficientes y rentables, el desarrollo de protocolos de regeneración y reutilización eficientes del catalizador y estrategias preventivas para controlar la lixiviación del catalizador algunos de los más importantes (Priyadarshini et al., 2022).

6.4. Análisis de citaciones

Seguidamente, el análisis de citaciones permitió evaluar la velocidad de difusión y las tendencias en exploración y explotación de IPC de OC (Altuntas et al., 2015), los cuales se resumen en la Tabla 6.

Tabla 6. Indicadores de velocidad de difusión científica y tecnológica

Período	Velocidad de difusión científica S_v^*	Velocidad de difusión tecnológica T_v^{***}	Exploración tecnológica (Rt)	Explotación tecnológica (It)
1975-1991	35,25	3,00	-	-
1992-2007	31,77	3,12	25,00%	1,42%
2008-2022	3,67	0,18	8,33%	7,78%

*Unidades: *Citaciones totales en publicaciones/Publicaciones totales; ** Citaciones totales en patentes/Patentes totales. Fuente: propia*

Se observa que, en comparación, la velocidad de difusión científica (S_v) puede llegar a ser entre 10 a 20 veces superior a la velocidad de difusión tecnológica (T_v). Esto trae como consecuencia que los investigadores acudan preferiblemente a fuentes bibliográficas como artículos y libros para estudiar y dar a conocer resultados de OC, sin embargo, la información contenida en patentes podría ser considerada como un complemento vital al momento de consultar el estado de la técnica que permita complementar el desarrollo de nuevas e innovadoras

configuraciones de equipos o en el diseño reactores de OC, así como analizar hacia qué dominio tecnológico se están orientando las invenciones, información importante para identificar la dirección de las inversiones. Es más, estudios demuestran que una tecnología que tiene un potencial alto de difusión puede resultar luego en un alto potencial de mercado (Altuntas et al., 2015), sin embargo, como lo indica la Tabla 6, T_v todavía es muy inferior a S_v . La Tabla 6 también muestra que S_v es muy inferior en el período 3 en comparación a los períodos 1 y 2, lo cual corresponde con los resultados de la Figura 9 y la Figura 12, los cuales muestran que la producción e innovación en el panorama científico ha venido estancándose desde el año 2008.

Por otro lado, el indicador R_t muestra que la exploración fue predominante en el período 2, lo cual implica que este período recibió la aparición de nuevos conceptos y códigos IPC. En cuanto al indicador I_t , se observa que fue predominante en el período 3 (mientras que la exploración decreció), lo cual implica que la aparición de nuevos IPC disminuyó en comparación con el anterior período y las nuevas patentes sugieren una explotación de IPC ya estudiados y patentados, lo cual es un primer indicativo de que la innovación se está ralentizando y la tecnología está pasando desde la etapa conceptual y emergente a una fase de crecimiento, en donde se requiere la unificación de conceptos y estandarización de configuraciones y procesos.

6.5. Análisis co-autoría y competidores

6.5.1. Países

En orden de evaluar la competitividad entre países que publican y patentan sobre OC se reunieron en las Tablas 7, 8 y 9, los hallazgos más importantes en términos de publicaciones de revisión, investigación y patentes por país, respectivamente. Es importante resaltar la drástica diferencia existente entre las citaciones de publicaciones (Tabla 7 y 8) y patentes (Tabla 9), siendo

las primeras, en promedio, hasta 10 veces más citadas que las segundas, lo cual corresponde con los hallazgos sobre la velocidad de difusión, resumidos en la Tabla 6. Consistentemente se observa que la tecnología posee hallazgos contradictorios, los cuales han sido resaltados por varios autores como se señala a continuación, por lo cual es necesaria la estandarización de conceptos y la unificación de mecanismos de reacción y expresiones cinéticas generales.

Tabla 7. Top 5 de publicaciones de revisión más relevantes de los últimos 20 años

Publicación	Principales hallazgos	Citaciones totales (TCP)	Año	País	Ref
Catalytic ozonation and methods of enhancing molecular ozone reactions in water treatment	Este es el primer artículo que intenta proponer ideas generales sobre los mecanismos de reacción que gobiernan ambos tipos de OC. Se presenta también un resumen de los principales logros y catalizadores más utilizados.	1178	2003	Polonia	(Kasprzyk-Hordern et al., 2003b)
The efficiency and mechanisms of catalytic ozonation	Este artículo, de los mismos autores del anterior, profundiza en los hallazgos realizados en cuanto a mecanismos de reacción desde los últimos 10 años y destaca factores esenciales del proceso como: pH (el cual influencia la carga en los centros activos del catalizador), mecanismo de adsorción de O ₃ y otras especies, influencia de iones inorgánicos (actúan como sabotadores de los sitios activos del catalizador) y estabilidad de los catalizadores.	707	2010	Polonia	(Nawrocki & Kasprzyk-Hordern, 2010)
Fe-based catalysts for heterogeneous catalytic ozonation of emerging contaminants in water and wastewater	Se hace una revisión de la aplicación de catalizadores basados en Fe en sistemas de OC heterogénea. No se encontraron a la fecha mecanismos de reacción consistentes, pero se concluye que la adsorción de O ₃ , contaminantes orgánicos y agua en la superficie de los catalizadores conducirá a la degradación de los contaminantes y que, en el caso del Fe, el mecanismo de reacción es similar al que se obtiene en OC homogénea con iones metálicos suspendidos, a excepción de que el catalizador permanece sólido y puede recuperarse.	364	2017	China	(J. Wang & Bai, 2016)
Catalytic ozonation for water and wastewater treatment: Recent advances and perspective	Revisión histórica del desarrollo de la OC. Recolección de principales aportes en términos de OC homogénea y heterogénea. Descripción de los mecanismos de reacción directa e indirecta. Compendio de PAOs basados en O ₃ . Descripción de los principales catalizadores a la fecha y los principales contaminantes en los que se ha aplicado la tecnología.	266	2020	China	(J. Wang & Chen, 2020c)
Challenges and pitfalls in the investigation of the catalytic ozonation mechanism: A critical review	Revisión más reciente de la tecnología. Se exponen estudios inconsistentes que indican que el radical superóxido ($\bullet\text{O}_2^-$) y oxígeno molecular (O ₂) son las especies oxidantes principales, hallazgos que van en contravía de los primeros estudios cinéticos sobre OC que indican que son los radicales $\bullet\text{OH}$ los principales responsables de la degradación. Sobre la base de las dificultades identificadas, se sugieren varias medidas para mejorar el diseño experimental y la interpretación de datos en los estudios de OC.	1	2022	China	(Y. Wang & Gang, 2022)

Fuente: propia con información de Scopus

Otros artículos de revisión importantes realizados por China son los que investigan catalizadores basados en carbono (Y. Liu et al., 2021) y cerio (Niu et al., 2020). Polonia aporta

también revisiones para catalizadores basados en alúmina (Kasprzyk-Hordern, 2004), mientras que otros países como Argentina lo hicieron con respecto a óxidos minerales y zeolitas (Inchaurredo & Font, 2022), Vietnam con respecto a nanocatalizadores (Dang et al., 2020b) e India, en el caso de materiales mesoporosos (Ghuge & Saroha, 2018). Estas investigaciones proponen mecanismos de reacción para cada grupo de catalizadores en particular, exploran sus características y las condiciones de operación a las que han sido validados, dependiendo del contaminante tratado.

Además de los artículos de la Tabla 7 realizados por Polonia y China, este último aporta otras revisiones recientes como las de (Issaka et al., 2022) quienes lo enfocan a contaminantes farmacéuticos y (B. Wang, Zhang, Wang, Xiong, Tian, et al., 2019) orientados a CECs. A la fecha de la recolección de resultados, los autores (Y. Wang & Gang, 2022), han realizado la revisión más reciente de conceptos, exponiendo controversias de la tecnología y enfatizando que los mecanismos de reacción propuestos hasta ahora exhiben inconsistencias, producto de errores experimentales, interpretaciones erróneas, sobre-estimación de la actividad catalítica, falta de un correcto control de pH e interferencia debido a impurezas en el catalizador.

También se han realizado revisiones con respecto a las controversias de la tecnología, de las cuales se resaltan la más reciente aportada por China (Z. Yang et al., 2022), quienes hicieron una revisión de los principales catalizadores, resumiendo hallazgos generales y resaltando que, en la actualidad, la estructura de los catalizadores propuestos son inestables, los componentes activos del catalizador se pierden fácilmente y, con ellos, el efecto catalítico, por lo tanto, el desarrollo de catalizadores con buena estabilidad se ha convertido en la principal dirección de la investigación actual; y la primera, aportada por Polonia (Nawrocki, 2013a), quienes reunieron hallazgos a la fecha y resaltaron las inconsistencias en las investigaciones realizadas con respecto a mecanismos de reacción, las cuales son revisadas de nuevo por (Y. Wang & Gang, 2022).

En términos de artículos de investigación científica y tecnológica, la Tabla 8 reúne los 5 documentos más importantes de acuerdo a citaciones totales, antigüedad, remoción de COT y país. Se observa que el total de las publicaciones más importantes analizadas se refieren a catalizadores, formas de preparación y validación, a través de la remoción de COT. Al respecto, estudios como el de (Y. Wang & Gang, 2022) indican que es posible que exista una *sobre-explotación* de investigaciones relacionadas con catalizadores, descuidando la investigación relacionada con la química inherente al proceso.

Tabla 8. Top 5 de publicaciones de investigación más relevantes de los últimos 20 años

Publicación	Principales hallazgos	Remoción de COT	Citaciones totales (TCP)	Año	País	Ref
Mechanism of catalytic ozonation in Fe ₂ O ₃ /Al ₂ O ₃ @SBA-15 aqueous suspension for destruction of ibuprofen	Catalizador mesoporoso SBA-15 como soporte para Fe ₂ O ₃ y/o Al ₂ O ₃ que mejora la tasa de mineralización del ibuprofeno debido a la acción conjunta de los sitios ácidos de Lewis del Al ³⁺ y Fe ³⁺ , los cuales incrementan la generación de radicales •OH y O ₂ •-. Mejores rendimientos a pH comprendidos entre 5-7	70-90%	197	2015	China	(Bing et al., 2015)
2D/2D nano-hybrids of γ-MnO ₂ on reduced graphene oxide for catalytic ozonation and coupling peroxymonosulfate activation	Primera aplicación de catalizadores híbridos 2D (nanohíbridos 2D γ-MnO ₂ /2D rGO) de 4-nitrofenol. Se logra una mejora considerable de la eficiencia catalítica comparado con los resultados de cada catalizador por separado.	80-90%	162	2016	China y Australia	(Y. Wang et al., 2016a)
High surface area mesoporous nanocast LaMO ₃ (M = Mn, Fe) perovskites for efficient catalytic ozonation and an insight into probable catalytic mechanism	Primera aplicación de perovskitas mesoporosas nanomoldeadas (NC-LaMnO ₃ y NC-LaFeO ₃) de 2-clorofenol en comparación con perovskitas mesoporosas normales convencionales, óxidos metálicos de Mn y Fe y ozonización. Se encontró que los radicales •OH eran las especies reactivas que contribuían a una alta actividad catalítica por el fácil acceso de los reactivos a los sitios activos	80%	144	2017	China y Australia	(Afzal et al., 2017)
Catalytic performance and an insight into the mechanism of CeO ₂ nanocrystals with different exposed facets in catalytic ozonation of p-nitrophenol	Primera evaluación de catalizadores basados en Ce en la remoción de p-nitrofenol con diferentes facetas: nanobarras, nanocubos y nanooctaedros. Los rendimientos más altos se obtuvieron con nanobarras de CeO ₂ , mientras que los más bajos fueron con nanooctaedros de CeO ₂	86-60%	85	2019	China	(Afzal et al., 2019)
Co/Fe and Co/Al layered double oxides ozone catalyst for the deep degradation of aniline: Preparation, characterization and kinetic model	Se sintetizan Óxidos dobles laminares Co/Fe y Co/Al, los cuales se obtuvieron a partir de intermedios de hidróxidos dobles laminares Co/Fe y Co/Al. Se determinaron parámetros de preparación óptimos, se estudió la microestructura morfológica y mineralógica de los catalizadores y se validó el catalizador utilizándolo en la degradación anilina en aguas residuales	71-67%	59	2020	China	(Qi et al., 2020)

Fuente: propia con información de Scopus

Finalmente, en términos de artículos de patentes, la Tabla 9 reúne las 5 más relevantes. Se observa que 4 de las 5 publicaciones patentan métodos para sintetizar catalizadores. Solamente la primera patente es una invención relacionada con un equipo para descontaminar aguas mediante especies oxidantes que generen radicales libres.

Tabla 9. Top 5 de patentes más relevantes de los últimos 20 años

Patente	Principales hallazgos	Citaciones totales (TCT)	Año de publicación	País	Ref
US6361697 B1 - Decontamination reactor system and method of using same	Método para descontaminar agua con oxidantes como O ₂ , O ₃ y/o H ₂ O ₂ para proporcionar una mezcla de reacción a través de un inductor de radicales libres. El aparato utilizado induce la presencia de pequeñas burbujas que mejoran el contacto entre las fases	50	2002	Estados Unidos	(Williams & Griscom Bettle, 2002)
CN102151567B B - Catalyst for oxidation and decomposition of organic pollutants in water with ozone and method thereof for catalyzing sewage treatment with ozone	La invención proporciona un método para el tratamiento de aguas residuales mediante la catálisis de O ₃ mediante el uso de un catalizador para la descomposición de contaminantes orgánicos en agua por oxidación con O ₃	46	2011	China	(Jun et al., 2011)
CN105363465 A - Preparation method of ozone oxidation catalyst loaded with polymetallic oxide	Método de preparación de un catalizador de oxidación de ozono soportado por óxido multimetálico, que comprende los siguientes pasos: pretratamiento, lavado y empapado del soporte en solución ácida. Secado del soporte para llevar a cabo al menos un tratamiento de impregnación en el portador de catalizador.	38	2016	China	(Ruiping et al., 2016)
CN103586026 A - Carbon supported catalyst for ozone oxidation, and preparation method and use thereof	Catalizador con soporte de CA para aplicaciones de OC heterogénea, compuesto por un componente activo de metal de transición (Fe, Cu, Ni o Mg) y un cocatalizador de Ce, La o K capaz de eliminar eficientemente contaminantes (fenol, nitrobenzono, colorante o clorobenceno) en aguas residuales a temperatura y presión normales, tiene buena actividad catalítica, estabilidad, larga vida útil y es adecuado para aplicaciones industriales.	37	2013	China	(Kaichang et al., 2014)
WO2021196522 A1 - Supported two-component metal oxide catalyst for advanced treatment of petrochemical wastewater and method for preparing same	Método para preparar un catalizador soportado de óxido metálico de dos componentes para un tratamiento avanzado de aguas residuales petroquímicas. El catalizador se prepara a partir de bolas de alúmina activa disponibles comercialmente mediante los pasos de activación del portador, preparación del líquido de impregnación, impregnación del portador, tostado del catalizador y limpieza del catalizador.	2	2020	China	(Changyong et al., 2020)

Fuente: propia con información de Orbit Intellixir

Seguidamente, en orden de seleccionar los países más importantes que publican y patentan sobre OC, se clasificaron de acuerdo a 5 indicadores, los cuales se observan en la Figura 14: redes de cooperación, relevancia científica y tecnológica, vigencia tecnológica, actividad tecnológica y producción científica (ver Tabla 4 para las definiciones).

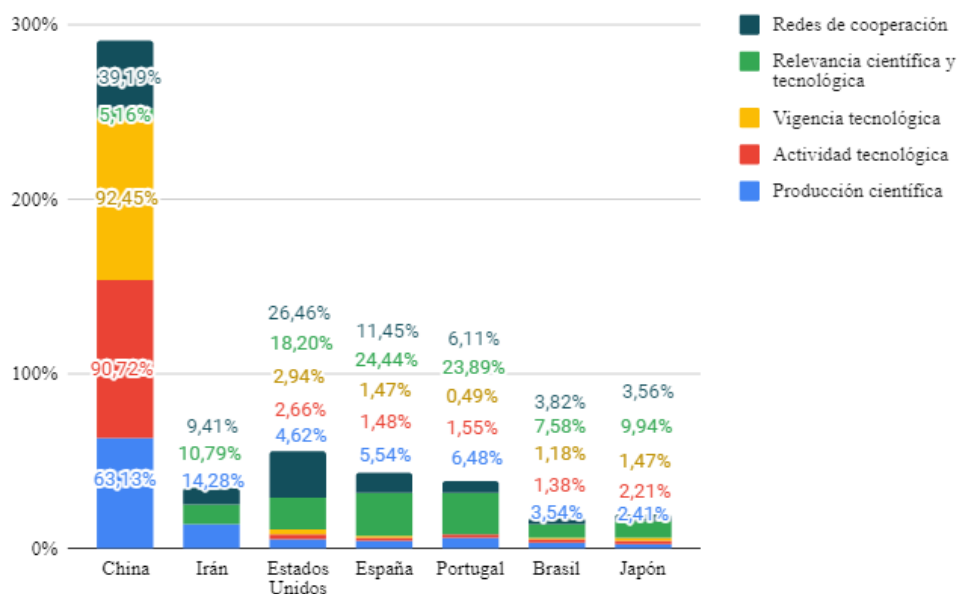


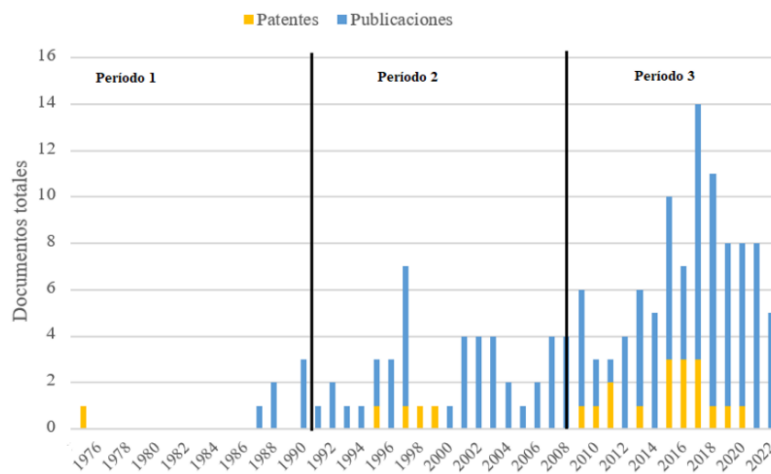
Figura 14. Indicadores de co-ocurrencia y citación por país. Fuente: propia con información de Scopus y Orbit Intellixir.

Es claro que China es el país con mayor producción científica y tecnológica (63,13% y 90,72%, respectivamente), además de que es un país central en redes de cooperación internacional (39,19%) con gran actividad tecnológica vigente (92,45%). Sin embargo, tiene el nivel de relevancia científica y tecnológica más bajo de todos los países (5,16%), lo cual implica que, aunque China produce gran número de documentos anualmente, su investigación no tiene tanto impacto como, por ejemplo, el caso de España y Portugal.

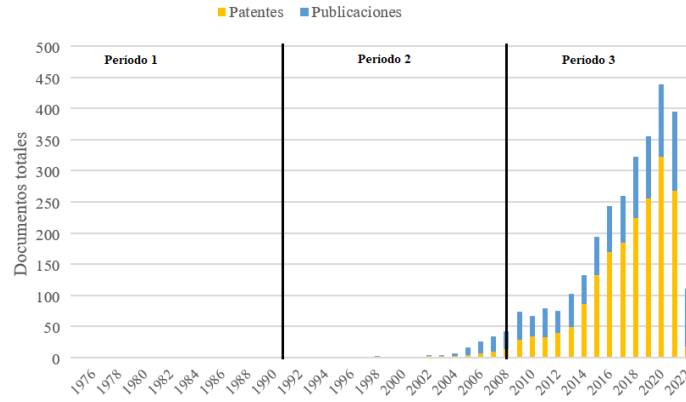
España, a pesar de ser un país con menores índices de vigencia y actividad tecnológica (0,49% y 1,48%, respectivamente), producción científica (5,54%) y redes de cooperación (11,45%), tiene una relevancia científica y tecnológica del 24,44% (la más alta), lo cual implica que este país es el que ha tenido mayor impacto en el panorama investigativo de OC. Portugal por su parte, le sigue en relevancia (23,89%), aunque tiene el resultado más bajo de vigencia tecnológica (0,49%), lo que indica que es un país con pocas patentes activas al año 2022.

Otros países importantes por sus índices de producción científica y relevancia fueron Irán (14,28% y 10,79%), Brasil (3,54% y 7,58%, respectivamente) y Japón (2,41% y 9,94%). Es importante hacer notar que Irán no tiene patentes a la fecha y por ello sus índices de vigencia y actividad tecnológica son nulos.

Finalmente, el país que le sigue en indicadores de cooperación y patentamiento a China es Estados Unidos, con un 26,46% y 2,66%, respectivamente. Para comparar la producción científica y tecnológica de ambos países, se realizó la Figura 15, en donde se observa que el aporte de Estados Unidos (Figura 15a) a la OC ha sido mayormente de tipo bibliográfico que de patentamiento en los 3 períodos ya definidos, mientras que el de China (Figura 15b) durante el período 3, ha sido en gran medida en torno a las patentes, observándose años en donde incluso, el número de patentes supera el de publicaciones. Antes de este período, la actividad científica y tecnológica de China era muy baja en comparación con la de Estados Unidos, lo cual sugiere que Estados Unidos ha sido un país clave en el establecimiento de los fundamentos de la OC.



(a)



(b)

Figura 15. Evolución temporal de patentes y publicaciones para (a) Estados Unidos y (b) China. Fuente: propia con información de Scopus y Orbit Intellixir

6.5.2. Oficinas de patentamiento

Con el objetivo de evaluar cuales de los países de la Figura 14 son los más competitivos en términos de actividad tecnológica, se utilizó el indicador de patentes triádicas de la OCDE (definido en la sección 5.4.3). Se contabilizaron aquellas patentes registradas en la EPO, la JPO y la UPSTO por país y se obtuvo la Figura 16. De la Figura 13 se excluyeron Portugal, por tener el menor índice de vigencia tecnológica (0,49%) e Irán, ya que a la fecha no se identificaron patentes de este país.

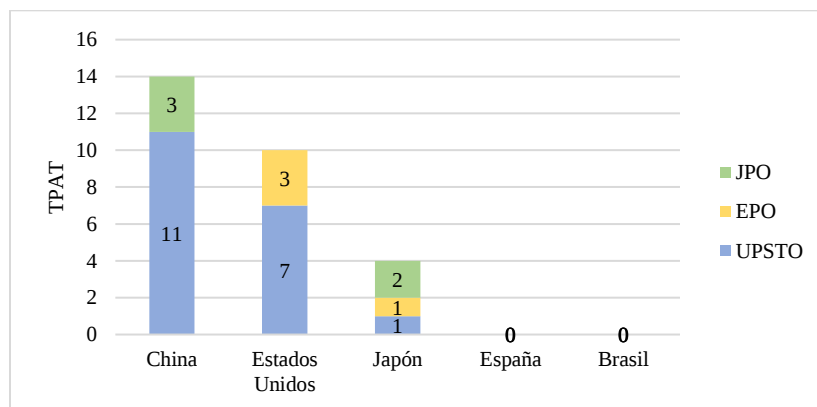


Figura 16. Patentes triádicas para los países principales. Fuente: propia con información de Orbit Intellixir

La Figura 16 muestra que, si bien China es el país más competitivo en términos de producción científica y actividad tecnológica, así como en términos de cooperación internacional, a la fecha no tiene ninguna patente triádica y del total de patentes (1885), solamente 11 han sido registradas en la UPSTO y 3 en la JPO; del restante, la gran mayoría de patentes (1858) han sido registradas en la oficina nacional de patentes china. Por su parte, Estados Unidos tiene 36 patentes, de las cuales 7 han sido registradas en la UPSTO y 3 en la EPO. Solamente Japón tiene patentes triádicas. España y Brasil no tienen patentes triádicas, ni siquiera registradas en oficinas internacionales, sino que han registrado el total de sus invenciones en las oficinas de patentes de sus respectivos países.

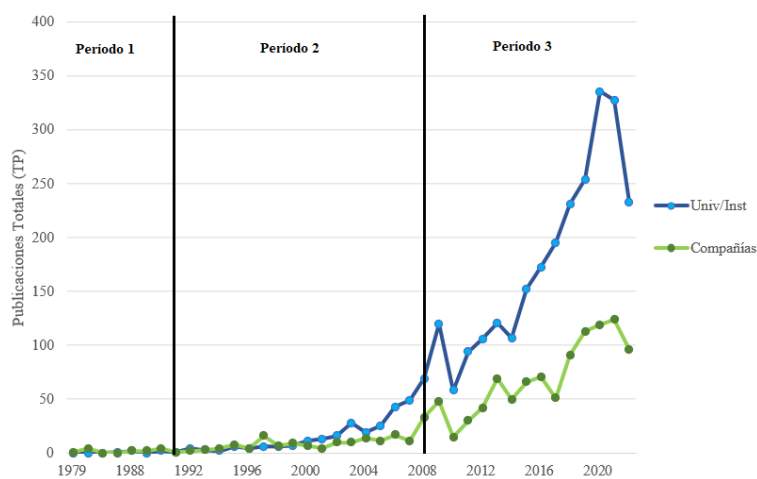
Con estos resultados, es importante analizar la gran cantidad de patentes producidas por China, con el objetivo de verificar si en efecto contienen información innovadora, si la tecnología realmente es del interés de la comunidad científica china e internacional, si vale la pena registrarlas en las oficinas de patentes de los mercados tecnológicos más competitivos del mundo y si las empresas pueden favorecerse de ellas, o si por el contrario, la abrumadora cantidad de patentes observadas corresponden a otros incentivos de índole estatal que distorsionan el panorama científico y tecnológico de la OC y de otras tecnologías (A. He & Center for International Governance Innovation, 2021).

6.5.3. Competidores

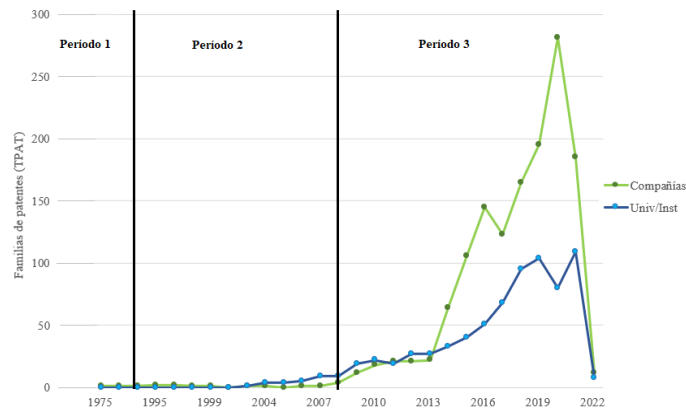
A la fecha existen pocos estudios comparativos acerca de los motivos por los cuales inventores individuales, universidades e institutos patentan sus invenciones, frente a los grandes productores de patentes, esto es, las grandes y medianas empresas. Más aún, los motivos por los cuales una universidad o instituto patentan no es el mismo que el de una empresa, la cual

mayormente lo hace con fines comerciales, mientras que las universidades tienden a hacerlo con fines de divulgación (Veer & Jell, 2012) o en respuesta a incentivos estatales que desarrollan políticas enfocadas a la colaboración entre academia e industria, con el fin de generar crecimiento económico a largo plazo (Temel et al., 2021).

La Figura 17 muestra la evolución de publicaciones (Figura 17a) y patentes (Figura 17b) por parte de universidades e institutos o centros de investigación y compañías a nivel mundial. En el caso de la Figura 17a, se observa claramente que las universidades prefieren difundir sus hallazgos a través de publicaciones, mientras que la Figura 17b muestra que las compañías prefieren hacerlo a través de patentes. La Figura 17a también señala que entre los periodos 2 (1991-2007) y 3 (2008-2022) se presentaron los mayores avances en materia científica sobre OC, aumentando su producción bibliográfica hasta 8 veces con respecto al período 1, pero también se observa una desaceleración en el ritmo de publicaciones durante el período 3; mientras que para la actividad tecnológica (Figura 17b) se ha visto un incremento más pronunciado durante este último período, mostrando hasta 50 veces más producción de patentes con respecto a los períodos anteriores.



(a)



(b)

Figura 17. Evolución temporal de (a) publicaciones y (b) patentes para academia (Univ/Inst) e industria (compañías). Fuente: propia con información de Scopus y Orbit Intellixir

Con base en la Figura 17, en los últimos años, la transformación del conocimiento en los países ha sido abordada con referencia a procesos endógenos basados en la recombinación de conocimiento previamente acumulado en diferentes dominios industriales, sin embargo, el papel de las universidades en los procesos de especialización y desarrollo regional se le ha dado menos preponderancia (Caviggioli et al., 2021). Esto es sorprendente dado que, en las últimas dos décadas, ha habido un consenso cada vez mayor sobre el papel clave de la academia en el mantenimiento de las capacidades de innovación a través de actividades de transferencia de tecnología y se han introducido políticas relacionadas para apoyar más interacciones efectivas entre la industria y la universidad (Good et al., 2019). Entre los resultados más importantes hallados por (Caviggioli et al., 2021) se observa que para un subconjunto de regiones europeas estudiadas entre los años 2003 a 2014, existía un patrón divergente de especialización tecnológica entre los sistemas industrial y académico, lo cual sugiere distintas direcciones en la actividad tecnológica de ambos sectores.

Algunas causas de estas situaciones podrían ser las inherentes diferencias por las cuales academia y empresas patentan sus invenciones. En un estudio de (Veer & Jell, 2012), se encontró

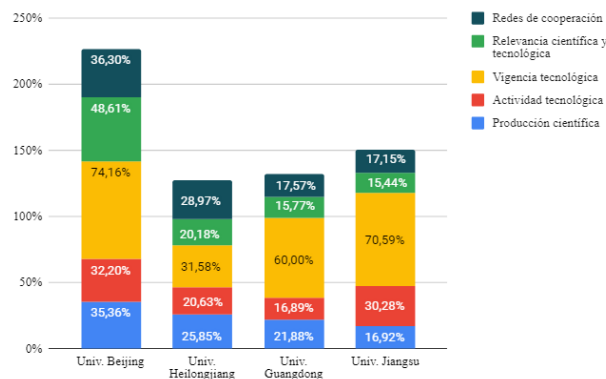
que una de las principales razones por las cuales las universidades patentan es por la señalización, la visibilidad, el acceso a incentivos económicos estatales y la generación de oportunidades de licenciamiento, sin embargo, para las empresas, las razones se relacionan más con prevenir las imitaciones y bloquear la actividad de otros competidores en el mercado.

En la mayoría de los casos, las empresas buscan maximizar sus ingresos económicos patentando sus productos antes que sus competidores, sin embargo, estos autores también señalan que, si bien para las universidades es menos importante la prevención de imitaciones o el bloqueo de competidores, las patentes pueden constituir una forma de maximizar sus ganancias. Un ejemplo es la oficina de transferencia de tecnología de la Universidad de Michigan (Arbor, 2009), donde las oficinas de transferencia de tecnología de varias universidades se clasifican según parámetros como el número de nuevas empresas fundadas, los ingresos anuales en dólares y el personal encargado de otorgar licencias. Esto además de darles visibilización en la comunidad académica, es un incentivo para convertirlas en instituciones competitivas frente a las demandas tecnológicas del mercado, lo cual podría mejorar la alianza academia – empresa y podría incentivar a las universidades para acceder a otro tipo de financiamiento diferente al estatal.

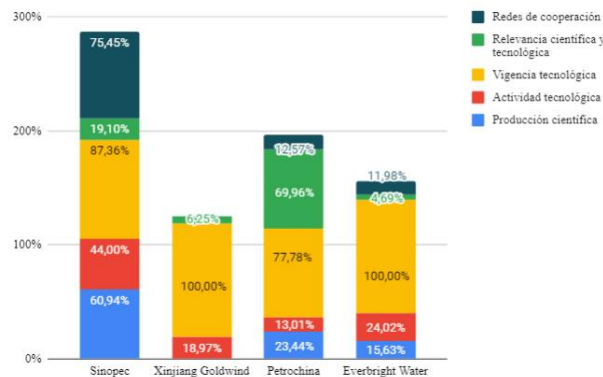
Seguidamente, se aplicaron los mismos indicadores de la Figura 14 al análisis de competidores, con el fin de determinar cuáles son los competidores más importantes en términos de universidades o institutos (Figura 18a) y compañías (Figura 18b). Se encontró que la universidad más competitiva es la Universidad de Beijing, con los mejores indicadores de producción científica (32,36%), actividad tecnológica (32,40%), vigencia tecnológica (74,16%), relevancia científica y tecnológica (48,61%) y redes de cooperación (36,30%).

Sinopec (Sinopec Shanghai Petrochemical Company Limited) es la compañía más importante en términos de producción científica (60,94%), actividad tecnológica (44,00%) y redes

de cooperación (75,45%), pero le superan Everbright Water (China Everbright Water Limited) y Xinjiang Goldwind (Xinjiang Goldwind Science & Technology Company Limited) en términos de vigencia tecnológica (con un 100% que implica que todas sus patentes están activas) y Petrochina (Petrochina Company Limited) con un 69,96% de relevancia científica y tecnológica (el más alto), lo cual implica que en términos de citaciones, esta empresa es la que ha tenido mayor impacto en el desarrollo científico y tecnológico de la OC a nivel mundial.



(a)



(b)

Figura 18. Indicadores de co-ocurrencia y citación para (a) instituciones y (b) competidores. Fuente: propia con información de Scopus y Orbit Intellixir

En el caso de la Figura 18b, se observa que Xinjiang Goldwind (Xinjiang Goldwind Science & Technology Company Limited) es una empresa sin producción científica a la fecha, por

lo que su contribución radica en su actividad tecnológica (18,97%), la cual supera a la de Petrochina. De igual manera, tiene un índice de vigencia tecnológica del 100%, lo cual indica que al igual que Everbright Water es una empresa emergente en el panorama de OC.

Finalmente, se analizó el indicador de antigüedad de las patentes (AP) (Ec.20) de los competidores más importantes. Como 2022 sigue en curso, este indicador abarca el conteo hasta el año 2021. Dividiendo el gráfico en 4 cuadrantes a través de la mediana de TPAT y AP, se llegó a la Figura 19, en donde es posible clasificar cuales son las empresas emergentes y cuales las más antiguas que patentan sobre OC.

Como se observó en la Figura 18b, tanto Everbright Water como Xinjiang Goldwind tienen indicadores de relevancia bajos (4,69% y 6,25%, respectivamente) y la totalidad de sus patentes activas; al respecto, la Figura 19 indica que ambos son los competidores más reciente que ha entrado al panorama de patentes de OC. Caso contrario es el de la Universidad de Heilongjiang, institución con un alto nivel de relevancia (28,97%), pero que tiene en promedio el portafolio de patentes más antiguo (aproximadamente 10 años), lo cual también se ve reflejado en su indicador de vigencia tecnológica, el más bajo de todos (31,58%).

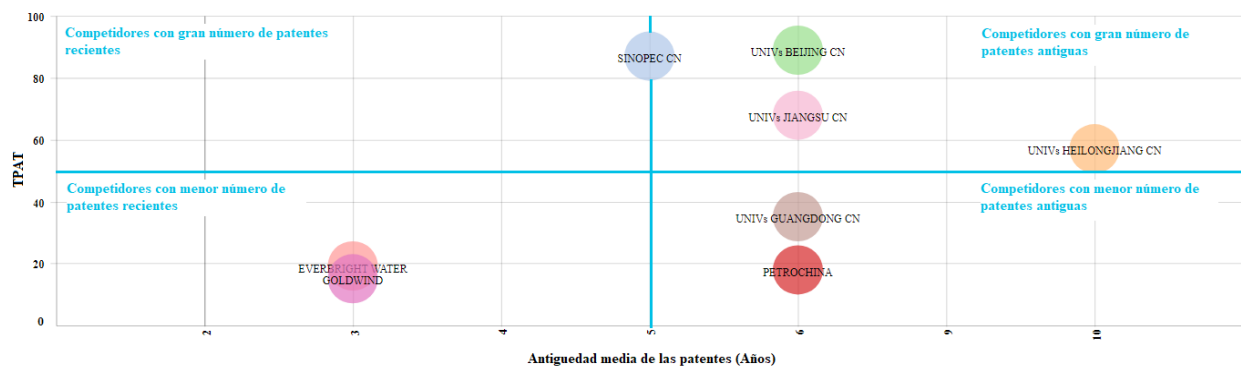


Figura 19. Antigüedad del portafolio de patentes por instituciones y competidores. Fuente: Scopus y

Orbit Intellixir

Realizando la comparación entre la Universidad de Beijing y Sinopec, se observa que la producción científica es mayor en esta última (61%), lo cual es interesante, dado que es una empresa y no una universidad. Los indicadores de vigencia (87%) y redes de cooperación (75%) también son mejores para Sinopec y en promedio, tiene un portafolio de patentes menos antiguo que la Universidad de Beijing, sin embargo, su indicador de relevancia es bajo (19,10%), lo cual indica que es un competidor interesante dentro del panorama, con buena producción bibliográfica y vigencia de patentamiento, pero con una velocidad de difusión baja (indicador relacionado con la relevancia), muy seguramente porque publican sus resultados a través de su actividad tecnológica (que ronda el 44%), la cual tiene una velocidad de difusión inferior a la producción científica (ver Tabla 6).

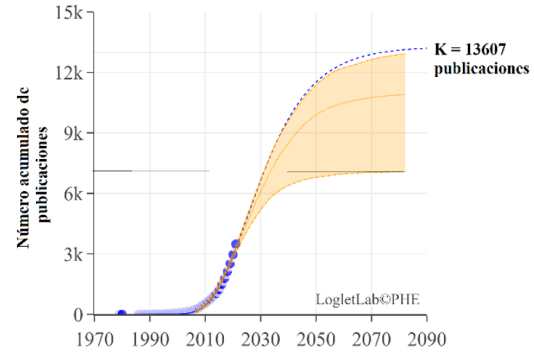
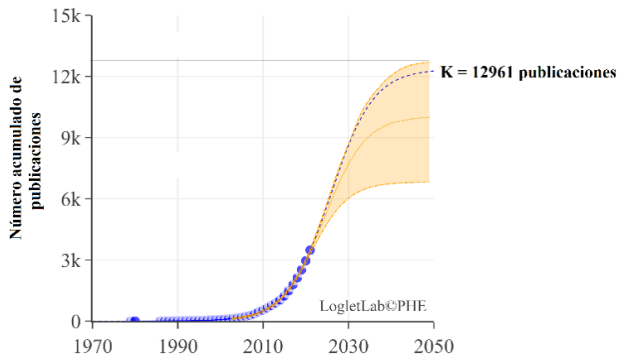
Finalmente, en relación con la Figura 19, las implicaciones de un portafolio de patentes más antiguo o reciente en comparación con el valor potencial de las patentes en términos económicos y de innovación, todavía sigue sin ser claro. Investigaciones como las de (Vimalnath et al., 2017) sugieren que, en algunos casos, las empresas que buscan identificar tecnologías emergentes prefieren hacerlo mediante el análisis de portafolios más recientes, mientras que en el caso de los portafolios más maduros, estos podrían tener un precio más alto en un período de tiempo posterior cuando la invención patentada se vuelva relevante para el mercado, por lo cual también son casos de estudio importantes dependiendo de las demandas del inversor.

6.6. Pronóstico de la tecnología

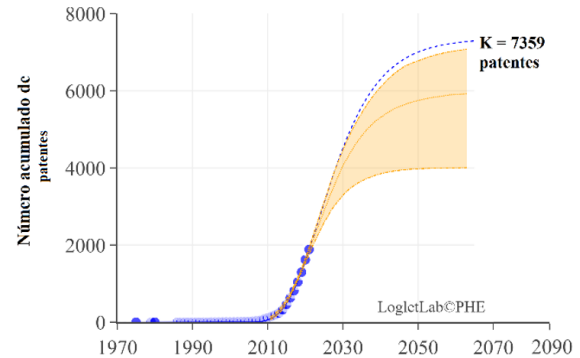
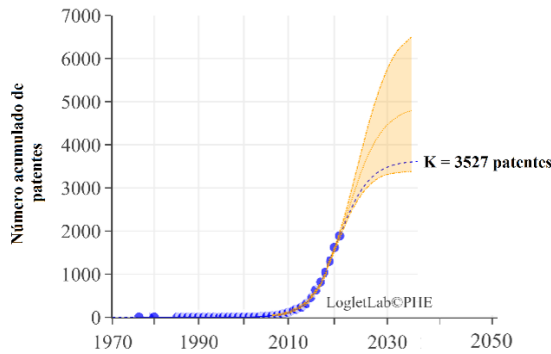
Para realizar la curva S de la tecnología, se realizó el ajuste de los resultados de TP y TPAT acumulados para el período de estudio con los modelos logístico (Ec.5) y de gompertz (Ec.7), como se observa en la Figura 20 y partiendo de la suposición de que los datos siguen una distribución normal.

Modelo Logístico

Modelo de Gompertz



(a)



(b)

Figura 20. Curva S (a) publicaciones y (b) patentes con $\alpha=0.05$. Fuente: propia

Los resultados del ajuste estadístico de la Figura 20 se muestran en las Tablas 10 y 11 (para publicaciones y patentes, respectivamente) con un $\alpha=0.05$. Los resultados indican que el ajuste con el modelo logístico tiene los menores errores SSE, RMS y MAD tanto para publicaciones (Figura 20a y Tabla 10), como para patentes (Figura 20b y Tabla 11). Nótese que el modelo de gompertz no logra incluir la media del valor de saturación K en el intervalo de confianza asumido. De igual manera, tanto publicaciones como patentes alcanzan su nivel de saturación alrededor de 30 años después con el modelo de gompertz en comparación con el modelo logístico. Esto se explica debido a que la tasa de crecimiento del modelo de gompertz es más lenta, por lo cual, se

espera que la cantidad total de documentos producidos alcance el nivel de saturación más adelante en el tiempo (Trappey & Wu, 2008).

Las Tablas 10 y 11 muestran también el resultado de la duración característica. Se observa que con el modelo logístico patentes y publicaciones se demoran de 13 a 23 años, respectivamente, en pasar del 10% de su TLC al 90%, mientras que con el modelo de gompertz lo hacen en 27 a 39 años, respectivamente, lo cual concuerda con lo dicho anteriormente sobre el parámetro r .

Tabla 10. Resultados de los ajustes de la curva S para publicaciones

Parámetro	Descripción	Unidades	Lógico	Gompertz
k	Valor de saturación	TP acumuladas	12961 [7506 - 13594]	13607 [7064 - 13408]
t_m	Tiempo medio	Año	2027 [2022-2026]	2026 [2020-2026]
r	Velocidad de crecimiento	TP acumuladas /año	0,196 [0.190-0.220]	0,078 [0.077-0.120]
Δt_m	Duración característica	Año	23	39
SSE	Error Suma de Cuadrados		59896 [13355-134000]	503311 [179301-192940]
RMS	Error cuadrático medio		58 [27-86]	113 [109-183]
MAD	Desviación absoluta media		50 [22-73]	94 [96-144]

Fuente: propia

Tabla 11. Resultados de los ajustes de la curva S para patentes

Parámetro	Descripción	Unidades	Lógico	Gompertz
k	Valor de saturación	TPAT acumuladas	3527 [2562 - 5846]	7359 [4010-7181]
t_m	Tiempo medio	año	2021 [2019 - 2024]	2024 [2019-2024]
r	Velocidad de crecimiento	TPAT acumuladas/año	0,339 [0.27-0.40]	0,115 [0.11-0.16]
Δt_m	Duración característica	Año	13	27
SSE	Error Suma de Cuadrados		19570 [2277 - 22582]	53169 [7587-82602]
RMS	Error cuadrático medio		36 [12 - 39]	70 [26-87]
MAD	Desviación absoluta media		40 [14-43]	63 [23-73]

Fuente: propia

Se realizó un análisis estadístico de residuales con el fin de verificar el ajuste de ambos modelos. Se parte de las siguientes hipótesis:

- Los residuos tienen una distribución normal, para ello se realizó un test de Shapiro-Wilks asumiendo que la hipótesis nula (H_0) es que los datos siguen una distribución normal (Romero-Saldaña, 2016). También se evaluó el supuesto (b) que establece que los residuos deben tener media cero, lo cual corresponde con una varianza constante en la variable de respuesta y (N° de publicaciones o patentes acumuladas). Estos resultados se muestran en

la Tabla 12, en donde M es la media de los residuos, W_{calc} y W_{tab} son los resultados del estadístico de Shapiro-Wilks calculado y tabulado, respectivamente, α es el nivel de significancia y p es el estadístico de probabilidad.

Tabla 12. Resultados de la prueba de normalidad para residuales

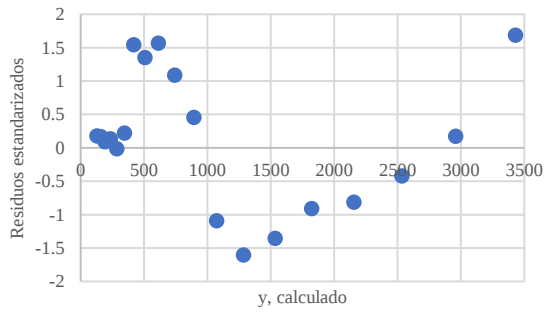
Modelo	Tipo de documento	Resultados de la prueba estadística				
		M	W_{calc}	W_{tab}	α	p
Logístico	Publicaciones	0,13	0,94	0,90	0,05	0,36
	Patentes	0,11	0,99	0,88	0,05	0,33
Gompertz	Publicaciones	0,08	0,93	0,88	0,05	0,33
	Patentes	0,04	0,86	0,85	0,05	0,07

Fuente: propia

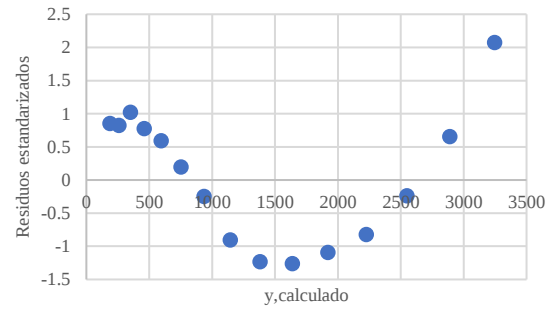
En la Tabla 12 se observa que como $W_{\text{calc}} > W_{\text{tab}}$ y $p > \alpha$ para ambos modelos, se acepta H_0 y se comprueba que los residuos siguen una distribución normal, sin embargo, se observa que, con el modelo logístico, la media de los datos no es aproximadamente 0, por lo cual, no se puede comprobar el supuesto (b).

- c) Los residuos tienen varianza constante, la cual se comprueba a través de una prueba de homocedasticidad, en la que se graficaron residuales estandarizados vs valores ajustados de y . Para que el supuesto de homocedasticidad se cumpla, el gráfico debe corresponder con una nube de puntos sin tendencia observable (Molina, 2021). La Figura 21 muestra los resultados obtenidos.
- d) Los residuos no están correlacionados. Para cumplir con este supuesto se graficaron residuales estandarizados vs tiempo. De igual manera, para que exista independencia en los residuos, estos deben mostrarse como una nube de puntos sin tendencia observable (Molina, 2021). La Figura 22 muestra los resultados obtenidos.

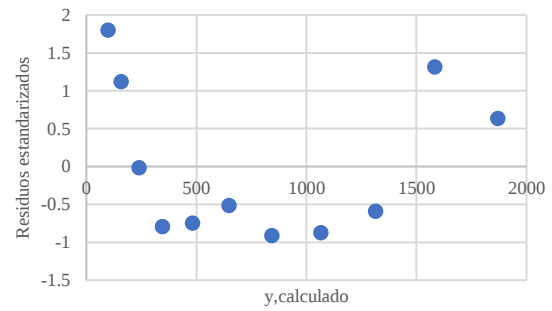
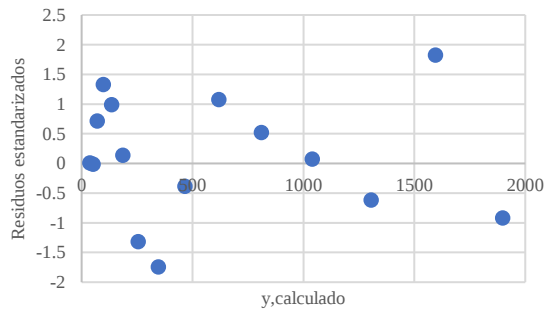
Modelo Logístico



Modelo de Gompertz



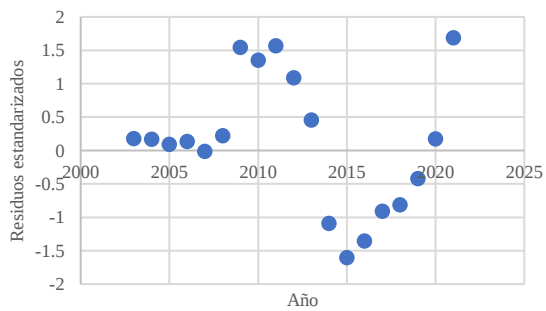
(a)



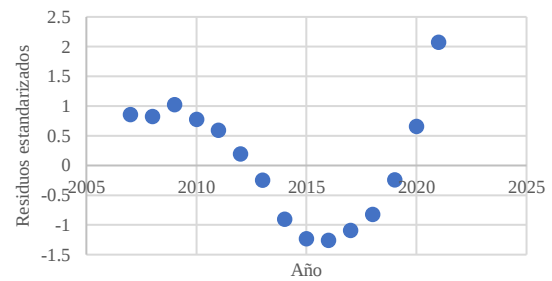
(b)

Figura 21. Prueba de homocedasticidad (a) publicaciones y (b) patentes. Fuente: propia

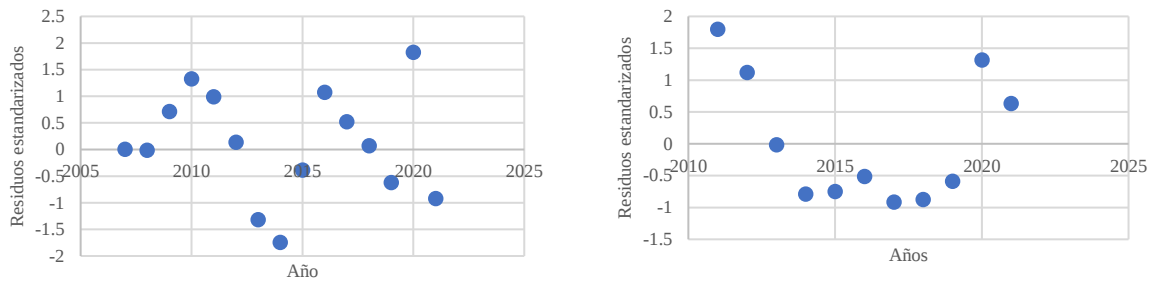
Modelo Logístico



Modelo de Gompertz



(a)



(b)

Figura 22. Prueba de correlación (a) publicaciones y (b) patentes. Fuente: propia

Las Figuras 21 y 22 muestran que, de las pruebas de normalidad y correlación aplicadas a publicaciones (Figura 21a y 22a) y patentes (Figura 21b y 22b), las que exhiben menos tendencia en la disposición de los residuos y se asemejan más a una nube de datos son las correspondientes al modelo logístico. Los resultados obtenidos para estos análisis con el modelo de gompertz exhiben una clara tendencia en los residuos, por lo cual se descarta que cumplan con el criterio de homocedasticidad e independencia de los supuestos (c) y (d), respectivamente.

La Figura 23 muestra el ajuste de los datos bajo las formas linealizadas del modelo logístico (Ec.6) y de gompertz (Ec.8). Se observa que los mejores R^2 los tiene el modelo logístico para publicaciones ($R^2=0.999$) y patentes ($R^2=0.998$). El software Loglet lab permite obtener también un intervalo de confianza para la variación que podrían tener los datos desde el año 2022 en adelante para el modelo linealizado (sombra amarilla). Se observa que este intervalo es más preciso en el modelo logístico.

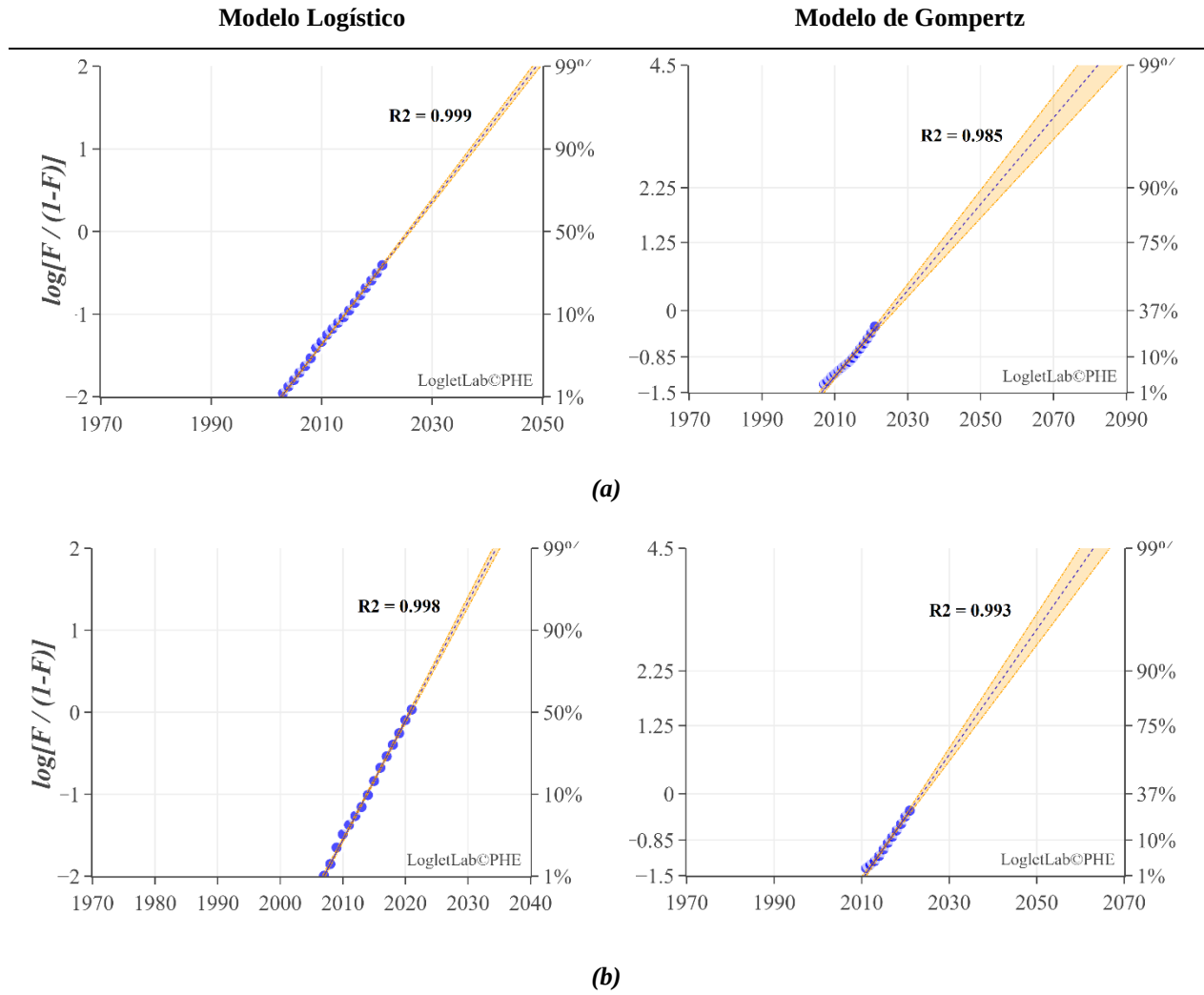


Figura 23. Modelo linealizado (a) publicaciones y (b) patentes con $\alpha=0.05$. Fuente: propia

Teniendo en cuenta las Tablas 10 y 11 y las Figuras 20 a 23, se decide aceptar el modelo logístico como el mejor ajuste, para el cual, la Ec.5 queda de la siguiente manera una vez se sustituyen los parámetros del modelo, con t en unidades de años:

$$\text{Publicaciones:} \quad TP \text{ acumuladas} = \frac{12961}{1 + e^{-0.196(t-2027)}} \quad (24)$$

$$\text{Patentes:} \quad TPAT \text{ acumuladas} = \frac{3527}{1 + e^{-0.339(t-2021)}} \quad (25)$$

Con base en el modelo logístico se calcularon los indicadores de pronóstico o TF de la Tabla 3 (Ec. 10-12), cuyos resultados se resumen en la Tabla 13. Se observa que la tasa o estado de madurez bibliográfica de la OC al año 2022 para publicaciones se encuentra en el 24%, que según la Tabla 2 corresponde a una producción bibliográfica en etapa de crecimiento.

Tabla 13. Indicadores de pronóstico para publicaciones y patentes con modelo logístico

Parámetro	Descripción	Logístico	
		Publicaciones	Patentes
TMR	Estado de madurez tecnológica en %	24	50
ERL	Vida restante esperada en años	28	12
PPA	Número de documentos potenciales	9905	1764

Fuente: propia

En términos bibliográficos, que la tecnología se encuentre en la etapa de crecimiento significa que se encuentra migrando desde la etapa conceptual de corte mayormente exploratorio al establecimiento de marcos conceptuales definidos y estandarizados, sin embargo, como se observó anteriormente, todavía falta reunir toda la información disponible del mecanismo de reacción del proceso, en orden de poder encontrar resultados más generales y que puedan utilizarse con distintas matrices de agua.

En cuanto a la madurez tecnológica, la Tabla 13 muestra que se encuentra en un estado de madurez del 50%, lo cual implica que la producción de patentes está en fase de crecimiento todavía, pero avanzando a la etapa de madurez. El análisis de correlación realizado (ver Tabla 5) permite concluir que los datos de evolución de patentes se han venido alejando de los

correspondientes a producción bibliográfica, debido a que la investigación ha experimentado un decrecimiento en su velocidad de publicación, mientras que la velocidad de patentamiento ha aumentado en gran volumen, sobre todo en el período 2008-2022, lo cual implica que, en términos tecnológicos, la investigación está migrando al escalamiento del proceso. Esto contrasta con los resultados encontrados en términos de producción científica, en donde se observó que los acercamientos a publicaciones de OC a escala piloto e industrial son muy pocos.

De acuerdo con la Tabla 6, la tecnología parece encontrarse frente a una tasa de difusión tecnológica alta y aumentando, sin embargo, esto contrasta con los resultados obtenidos en la Tabla 9, en donde se observó que las citas que reciben las patentes son muy inferiores a aquellas recibidas por las publicaciones. De igual manera, la Tabla 6 señala que, en la etapa de madurez temprana, la tecnología ya ha mostrado su efectividad, pero se busca optimizar procesos y mejorar metodologías para la construcción de prototipos. Esto corresponde con los resultados encontrados en la Figura 9, que demuestran un crecimiento drástico en la actividad tecnológica entre los períodos 2 y 3 de la ventana de tiempo estudiada.

Por otro lado, la vida restante esperada para la producción científica es, en promedio, 24 años, mientras que para la actividad tecnológica es de 12 años y esto es de esperarse, ya que los recursos económicos que se utilizan en la producción bibliográfica generalmente son más bajos que los utilizados en el patentamiento, sobre todo, si los productos se registran en las principales oficinas de patentes del mundo (patentes triádicas). Finalmente, se estima que el número de documentos potenciales que se va a generar durante la vida restante esperada de la tecnología es de 9905 publicaciones y 1764 patentes.

Los resultados del software Loglet Lab permitieron dividir en cuartiles la evolución esperada de los documentos y clasificarlas en etapas de madurez, como se indica en la Tabla 14,

con el fin de construir el TLC de la tecnología. Al comparar el total de patentes al año 2021 según lo pronosticado por el modelo logístico, se observa un total de 1764 patentes comparado con el resultado real que fue de 1887 patentes, lo cual implica una diferencia del 6.5% entre el valor calculado y el real, respectivamente.

De igual manera, se espera que la tecnología entre en etapa de saturación (90% de avance en el TLC) en el año 2038 para publicaciones y 2027 para patentes, por lo cual, a partir del año 2022, la vida restante recomendada para continuar publicando y patentando es de 16 y 5 años, respectivamente, ya que una vez la tecnología entre en su etapa de saturación final (90-99%), no será atractiva para la inversión. Este resultado es sumamente importante ya que permite una estimación inicial de los tiempos que deben ser tenidos en cuenta para realizar inversiones (ya sea a partir de fondos públicos o privados) en materia científica y tecnológica alrededor de la OC.

Tabla 14. *TLC de la ozonización catalítica*

Etapa de desarrollo tecnológico	Porcentaje de avance	Documentos acumulados		Año	
		Publicaciones	Patentes	Publicaciones	Patentes
Emergente	1%	116	30	2003	2007
Crecimiento	10%	1126	301	2015	2014
Madurez	50%	6481	1764	2027	2021
Saturación	90%	11616	3119	2038	2027
Final	99%	12820	3485	2050	2034

Fuente: propia

7. CONCLUSIONES

La metodología unificada para la realización de un BA y un PLR propuesta por el autor y la combinación de indicadores de distintas fuentes y autores, así como la construcción, evaluación y validación de dos indicadores propios para determinar el TLC de la tecnología constituye un primer acercamiento con el fin de ayudar en la generación de un modelo estándar de análisis de grandes cantidades de información científica y tecnológica. En el caso de esta tesis, proporciona contribuciones tanto a la industria como a la academia, permitiendo identificar que la OC como campo de estudio y como tecnología se encuentra en un nivel de madurez científica del 24%, lo cual corresponde con la etapa de crecimiento según el TLC y de madurez tecnológica del 50%, que corresponde con una etapa de madurez temprana.

Desde una perspectiva práctica, los resultados de esta tesis pueden proporcionar información reveladora a los expertos que trabajan en el campo del tratamiento de aguas residuales, mientras que también puede aportar incentivos en la academia para que los investigadores analicen la posibilidad de incluir resultados hallados en patentes (además de publicaciones científicas), ya que como se observó, la tecnología está en un punto de crecimiento científico y madurez tecnológica, por lo cual, existe mucha literatura de patentes no revisada que podría aportar información reveladora para complementar los hallazgos difundidos en revistas científicas, sobre todo con relación a dispositivos, reactores, configuraciones y catalizadores.

Por otro lado, el análisis de tendencias permitió demostrar que, si bien la OC ha sido investigada arduamente en los últimos 20 años, no se ha llegado a un consenso sobre la cinética de reacción de los procesos de OC, más aún, se han encontrado contradicciones importantes al respecto de los radicales que actúan sobre los contaminantes. Los principales catalizadores son de composición metálica (óxidos metálicos), sin embargo, las investigaciones se han centrado

extensamente en este punto por existir limitaciones importantes en la desactivación del catalizador y la transferencia de masa entre fases.

En términos del ajuste de regresión no lineal realizado, se encontró que el modelo logístico es que el mejor se ajusta a los datos de publicaciones y patentes, ya que cumple con tres de las pruebas estadísticas realizadas comúnmente para diagnosticar la bondad del modelo ajustado. Como se explicó previamente en esta tesis, el ajuste de los datos no solamente depende de análisis cuantitativos de tipo estadístico, sino que depende también de otro tipo de análisis de tipo cualitativo (como el método Delphi, el análisis DOFA-CAME, entre otros), además, de que los resultados siempre se verán influenciados por cambios en la situación política, económica y social de los países que se analizan, además, de los incentivos a los que responde el desarrollo tecnológico en estas regiones. Para profundizar al respecto, se requieren investigaciones adicionales que correlacionen los resultados obtenidos en esta tesis con estudios de mercado e información de tipo general y no necesariamente científica.

8. REFERENCIAS

- Adamuthe, A. C., & Thampi, G. T. (2019). Technology forecasting: A case study of computational technologies. *Technological Forecasting & Social Change*, 143, 181–189. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.03.002>
- Afzal, S., Quan, X., & Lu, S. (2019). Catalytic performance and an insight into the mechanism of CeO₂ nanocrystals with different exposed facets in catalytic ozonation of p-nitrophenol. *Applied Catalysis B: Environmental*, 248, 526–537. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2019.02.010>
- Afzal, S., Quan, X., & Zhang, J. (2017). High surface area mesoporous nanocast LaMO₃ (M = Mn, Fe) perovskites for efficient catalytic ozonation and an insight into probable catalytic mechanism. *Applied Catalysis B: Environmental*, 206, 692–703. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.01.072>
- Aggarwal, S., & Chandra, A. (2021). An insight into patent landscape analysis of plant stem cells. *World Patent Information*, 65, 102025. <https://doi.org/10.1016/j.wpi.2021.102025>
- Albino, V., Ardito, L., Dangelico, R. M., & Petruzzelli, A. M. (2014). Understanding the development trends of low-carbon energy technologies: A patent analysis. *Applied Energy*, 135, 836–854. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.012>
- Aleta, A., Meloni, S., Perra, N., & Moreno, Y. (2019). Explore with caution: mapping the evolution of scientific interest in physics. *EPJ DataScience*, 8, 27. <https://doi.org/10.1140/epjds/s13688-019-0205-9>
- Algburi, H., Aziz, H., Zwain, H., & Noor, A. (2021). Treatment of Landfill Leachate by Heterogeneous Catalytic Ozonation with Granular Faujasite Zeolite. *Environmental Engineering Science*, 38(7), 635–644. <https://doi.org/10.1089/ees.2020.0233>
- Altuntas, S., Dereli, T., & Kusiak, A. (2015). Forecasting technology success based on patent data. *Technological Forecasting & Social Change*, 96, 202–214. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.03.011>
- Amos Turk, & Danbury, C. (1975). *Catalytic process for ozonation of water containing organic contaminants* (Patent No. US4029578A). <https://patents.google.com/patent/US4029578>
- Angel-Ospina, A. C., & Machuca-Martínez, F. (2022). Ozonización catalítica en el tratamiento de Contaminantes de Preocupación Emergente en aguas residuales: Un análisis bibliométrico. *Ingeniería y Competitividad*, 24(1), e11603. <https://doi.org/10.25100/iyv.v24i1.11603>
- Arbor, A. (2009). Markets for Patents: Emerging Practices and Directions for Research. *University of Michigan Ross School of Business 6th Floor Colloquium Room*. <https://www.techpolicy.com/Events/Markets-for-Patents--Emerging-Practices-and-Direct.aspx>
- Beltrán, F. J., Rivas, F. J., & Gimeno, O. (2005). Comparison between photocatalytic ozonation and other oxidation processes for the removal of phenols from water. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 80(9), 973–984. <https://doi.org/10.1002/jctb.1272>

- Bing, J., Hu, C., Nie, Y., Yang, M., & Qu, J. (2015). Mechanism of Catalytic Ozonation in Fe₂O₃/Al₂O₃@SBA-15 Aqueous Suspension for Destruction of Ibuprofen. *Environ. Sci. Technol.*, 49(3), 1690–1697. <https://doi.org/10.1021/es503729h>
- Broadus, R. (1987). TOWARD A DEFINITION OF “BIBLIOMETRICS.” *Scientometrics*, 12(5–6), 373–379.
- Cao, Q., Sang, L., Tu, J., Xiao, Y., Liu, N., & Wu, L. (2021). Rapid degradation of refractory organic pollutants by continuous ozonation in a micro-packed bed reactor. *Chemosphere*, 270, 128621. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128621>
- Caviggioli, F., Colombelli, A., Marco, A. De, Marco, A. De, & Ughetto, E. (2021). Co-evolution patterns of university patenting and technological specialization in European regions. *The Journal of Technology Transfer*. <https://doi.org/10.1007/s10961-021-09910-0>
- Changli, Y., Shujuan, L., Jiaxing, P., Jun, X., Shan, J., & Yun, L. (2022). *Red mud leachate biochemical treatment system* (Patent No. CN216764640 U).
- Changyong, W., Yuexi, Z., & Liya, F. (2020). *Supported two-component metal oxide catalyst for advanced treatment of petrochemical wastewater and method for preparing same* (Patent No. WO2021196522 A1).
- Chelkowska, K., & Grasso, D. (1989). Early aqueous ozone decomposition - progeny speciation. *Ozone in Water Treatment Proceedings, 9th Ozone World Congress, Vol I*, 106–114.
- Chen, Y.-H., Hsieh, D.-C., & Shang, N.-C. (2011). Efficient mineralization of dimethyl phthalate by catalytic ozonation using TiO₂/Al₂O₃ catalyst. *Journal of Hazardous Materials*, 192(3), 1017–1025. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.06.005>
- Cheng, A.-C., Chen, C.-J., & Chen, C.-Y. (2008). A fuzzy multiple criteria comparison of technology forecasting methods for predicting the new materials development. *Technological Forecasting and Social Change*, 75(1), 131–141. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2006.08.002>
- Crousier, C., Pic, J.-S., Albet, J., Baig, S., & Roustan, M. (2016). Urban Wastewater Treatment by Catalytic Ozonation. *Ozone: Science & Engineering*, 38(1), 3–13. <https://doi.org/10.1080/01919512.2015.1113119>
- Daim, T. U., Rueda, G., Martin, H., & Gerdasri, P. (2006). Forecasting emerging technologies: Use of bibliometrics and patent analysis. *Technological Forecasting & Social Change*, 73, 981–1012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.techfore.2006.04.004>
- Dang, T. T., Do, V. M., & Trinh, V. T. (2020a). Nano-Catalysts in Ozone-Based Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment. *Curr Pollution Rep*, 6, 217–229. <https://doi.org/10.1007/s40726-020-00147-3>
- Dang, T. T., Do, V. M., & Trinh, V. T. (2020b). Nano-Catalysts in Ozone-Based Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment. *Current Pollution Reports*, 6, 217–229. <https://doi.org/10.1007/s40726-020-00147-3>
- Dangelico, R. M., Garavelli, A. C., & Petruzzelli, A. M. (2010). A system dynamics model to analyze technology districts’ evolution in a knowledge-based perspective. *Technovation*,

- 30(2), 142–153. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2009.09.006>
- Dehghan, M., Ahmadi, F., Shirmohammadi, R., & Alireza Aslani. (2019). Forecasting of wind energy technology domains based on the technology life cycle approach. *Energy Reports*, 5, 1236–1248. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.08.069>
- Donthu, N., Kumar, S., Mukherjee, D., Pandey, N., & Lim, W. M. (2021). How to conduct a bibliometric analysis: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 133, 285–296. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2021.04.070>
- Driscoll, T. (2015). *Exponential, logistic, and Gompertz growth*. Chebfun. <https://www.chebfun.org/examples/applics/Gompertz.html>
- Eberhardt, M., & Sihufe, M. B. (2013). *Preparación de sistemas estructurados con CuCe-SBA-15 para la reacción de COPrOx*. <https://bibliotecavirtual.unl.edu.ar:8443/bitstream/handle/11185/1504/8.9.5.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Eck, N. J. van, & Waltman, L. (2014). Visualizing Bibliometric Networks. In Y. Ding, R. Rousseau, & D. Wolfram (Eds.), *Measuring Scholarly Impact* (pp. 285–320). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10377-8_13
- EPO. (2020). *World's five largest patent offices agree on joint task force for emerging technologies and AI*. EPO.Org. <https://www.epo.org/news-events/news/2019/20190613a.html>
- FAO. (2013). *Afrontar la escasez de agua Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria*. <http://www.fao.org/3/i3015s/i3015s.pdf>
- Fenn, J. (2007). *Understanding Gartner's Hype Cycles*. https://infota.siss.cl/concesiones/empresas/P05/ESSAL/06 Información Entregada/4 ADICIONAL ANEXO 5/Estudio Sistemas-comunicaciones/Documentacion y referencias/understanding_gartners_hype__144727.pdf
- Fontanier, V., Farines, V., Albet, J., Baig, S., & Molinier, J. (2005). Oxidation of Organic Pollutants of Water to Mineralization by Catalytic Ozonation. *Ozone: Science and Engineering*, 27(2), 115–128. <https://doi.org/10.1080/01919510590925239>
- Fortuño, M. (2017). *La economía del agua cada vez será más importante*. El Blog Salmón. <https://www.elblogsalmon.com/economia/la-economia-del-agua-cada-vez-sera-mas-importante>
- Gao, L., Porter, A. L., Wang, J., Fang, S., Zhang, X., Ma, T., Wang, W., & Huang, L. (2013). Technology life cycle analysis method based on patent documents. *Technological Forecasting and Social Change*, 80(3), 398–407. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2012.10.003>
- Gao, P., Meng, F., Mata, M. N., Martins, J. M., Iqbal, S., Correia, A. B., Dantas, R. M., Waheed, A., Rita, J. X., & Farrukh, M. (2021). Trends and Future Research in Electronic Marketing: A Bibliometric Analysis of Twenty Years. *J. Theor. Appl. Electron. Commer. Res.*, 16(5), 1667–1679. <https://doi.org/10.3390/jtaer16050094>
- Garrido-Cardenas, J. A., Esteban-García, B., Agüera, A., Sánchez-Pérez, J. A., & Manzano-Agugliaro, F. (2020). Wastewater Treatment by Advanced Oxidation Process and Their

- Worldwide Research Trends. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 17(1), 170. <https://doi.org/10.3390/ijerph17010170>
- Ghuge, S. P., & Saroha, A. K. (2018). Catalytic ozonation for the treatment of synthetic and industrial effluents - Application of mesoporous materials: A review. *Journal of Environmental Management*, 211, 83–102. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.01.052>
- Giwa, A., Yusuf, A., Balogun, H. A., Sambudi, N. S., Bilad, M. R., Adeyemi, I., Chakraborty, S., & Curcio, S. (2021). Recent advances in advanced oxidation processes for removal of contaminants from water: A comprehensive review. *Process Safety and Environmental Protection*, 146(February 2021), 220–256. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.08.015>
- Gonçalves, A. G., Órfão, J. J. M., & Pereira, M. F. R. (2013). Ozonation of sulfamethoxazole promoted by MWCNT. *Catalysis Communications*, 35, 82–87. <https://doi.org/10.1016/J.CATCOM.2013.02.012>
- Good, M., Knockaert, M., Soppe, B., & Wright, M. (2019). The technology transfer ecosystem in academia. An organizational design perspective. *Technovation*, 82–83, 35–50. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2018.06.009>
- Gu, L., Zhang, X., & Lei, L. (2008). Degradation of Aqueous p-Nitrophenol by Ozonation Integrated with Activated Carbon. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 47(18), 6809–6815. <https://doi.org/10.1021/ie071584h>
- Hara, K., Kuroda, M., Yabar, H., Kimura, M., & Uwasu, M. (2016). Historical development of wastewater and sewage sludge treatment technologies in Japan – An analysis of patent data from the past 50 years. *Environmental Development*, 19, 59–69. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2016.05.001>
- Hargadon, A., & Sutton, R. I. (1997). Technology Brokering and Innovation in a Product Development Firm. *Administrative Science Quarterly*, 42(4), 716–749. <https://doi.org/10.2307/2393655>
- He, A., & Center for International Governance Innovation. (2021). *What Do China's High Patent Numbers Really Mean?* INNOVATION INTELLECTUAL PROPERTY. <https://www.cigionline.org/articles/what-do-chinas-high-patent-numbers-really-mean/>
- He, X., & Yu, D. (2020). Research trends in life cycle assessment research: A 20-year bibliometric analysis (1999–2018). *Environmental Impact Assessment Review*, 85, 106461. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106461>
- Hewes, C. G., & Davison, R. R. (1972). Renovation of wastewater by ozonation. *AIChE Symp. Series*, 129, 71–80.
- Hill, G. R. (1949). The Kinetics of the Oxidation of Cobaltous Ion by Ozone. *Journal of the American Chemical Society*, 71(7), 2434–2435.
- Hoigné, J., & Bader, H. (1976). The role of hydroxyl radical reactions in ozonation processes in aqueous solutions. *Water Research*, 10(5), 377–386. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(76\)90055-5](https://doi.org/10.1016/0043-1354(76)90055-5)
- Hostachy, J.-C., Lenon, G., Pisicchio, J.-L., Coste, C., & Legay, C. (1997). Reduction of pulp and

- paper mill pollution by ozone treatment. *Water Science & Technology*, 35(2–3), 261–268. <https://doi.org/10.2166/wst.1997.0533>
- Hu, E., Wu, X., Shang, S. min, Tao, X., Jiang, S., & Gan, L. (2016a). Catalytic ozonation of simulated textile dyeing wastewater using mesoporous carbon aerogel supported copper oxide catalyst. *Journal of Cleaner Production*, 112(5), 4710–4718. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.127>
- Hu, E., Wu, X., Shang, S., Tao, X. M., Jiang, S. X., & Gan, L. (2016b). Catalytic ozonation of simulated textile dyeing wastewater using mesoporous carbon aerogel supported copper oxide catalyst. *Journal of Cleaner Production*, 112, 4710–4718. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2015.06.127>
- Ikhlaq, A., Munir, H. M. S., Khan, A., Javed, F., & Joya, K. S. (2019). Comparative study of catalytic ozonation and Fenton-like processes using iron-loaded rice husk ash as catalyst for the removal of methylene blue in wastewater. *Ozone: Science & Engineering*, 41(3), 250–260. <https://doi.org/10.1080/01919512.2018.1525276>
- Inchaurredo, N. S., & Font, J. (2022). Clay, Zeolite and Oxide Minerals: Natural Catalytic Materials for the Ozonation of Organic Pollutants. *Molecules*, 27(7), 2151. <https://doi.org/10.3390/molecules27072151>
- İntepe, G., Bozdag, E., & Koc, T. (2013). The selection of technology forecasting method using a multi-criteria interval-valued intuitionistic fuzzy group decision making approach. *Computers & Industrial Engineering*, 65(2), 277–285. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2013.03.002>
- Issaka, E., AMU-Darko, J. N.-O., Yakubu, S., Fapohunda, F. O., Ali, N., & Bilal, M. (2022). Advanced catalytic ozonation for degradation of pharmaceutical pollutants—A review. *Chemosphere*, 289, 133208. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133208>
- Jun, M., Yueming, R., Jing, F., Qing, D., Qing, W., Yafei, Z., & Jing, Y. (2011). *Catalyst for oxidation and decomposition of organic pollutants in water with ozone and method thereof for catalyzing sewage treatment* (Patent No. CN102151567 A).
- Jun, M., Zhizhong, S., Jinsheng, G., Lei, Z., Yanjun, H., & Yinghui, Y. (2003). *Method for honeycomb ceramics catalytic ozonization decomposition of organic matters in water* (Patent No. CN1226198C). <https://patents.google.com/patent/CN1226198C/en>
- Kaichang, Y., Tao, X., Peijuan, L., & Yunxia, L. (2014). *Carbon supported catalyst for ozone oxidation, and preparation method and use thereof* (Patent No. CN103586026 A).
- Kalogiannakis, M., Papadakis, S., & Zourmpakis, A.-I. (2021). Gamification in Science Education. A Systematic Review of the Literature. *Educ. Sci.*, 11(1), 22. <https://doi.org/10.3390/educsci11010022>
- Kaptijin, J. (1997). Ecoclear a heterogeneous catalytic ozonation process. *Ozone Science Engineering*, 19, 297–305.
- Karpel, N., Legube, B., & Pontlevoy, F. (2003). *Method for the treatment of industrial effluent containing organic pollutants* (Patent No. WO03/064333 A1).
- Kasprzyk-Hordern, B. (2004). Chemistry of alumina, reactions in aqueous solution and its

- application in water treatment. *Advances in Colloid and Interface Science*, 110(1–2), 19–48. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2004.02.002>
- Kasprzyk-Hordern, B., Ziółek, M., & Nawrocki, J. (2003a). Catalytic ozonation and methods of enhancing molecular ozone reactions in water treatment. *Applied Catalysis B: Environmental*, 46(4), 639–669. [https://doi.org/10.1016/S0926-3373\(03\)00326-6](https://doi.org/10.1016/S0926-3373(03)00326-6)
- Kasprzyk-Hordern, B., Ziółek, M., & Nawrocki, J. (2003b). Catalytic ozonation and methods of enhancing molecular ozone reactions in water treatment. *Applied Catalysis B: Environmental*, 46, 639–669. [https://doi.org/10.1016/S0926-3373\(03\)00326-6](https://doi.org/10.1016/S0926-3373(03)00326-6)
- Keathley-Herring, H., Van Aken, E., & Gonzalez-Aleu, F. (2016). Assessing the maturity of a research area: bibliometric review and proposed framework. *Scientometrics*, 109, 927–951. <https://doi.org/10.1007/s11192-016-2096-x>
- Khuntia, S., Majumder, S. K., & Ghosh, P. (2016). Catalytic ozonation of dye in a microbubble system: Hydroxyl radical contribution and effect of salt. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(2), 2250–2258. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.04.005>
- Kolosov, P., Peyot, M.-L., & Yargeau, V. (2018). Novel materials for catalytic ozonation of wastewater for disinfection and removal of micropollutants. *Science of the Total Environment*, 644, 1207–1218. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.022>
- Krishnan, R. Y., Manikandan, S., Subbaiya, R., Biruntha, M., Govarathanan, M., & Karmegam, N. (2021). Removal of emerging micropollutants originating from pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in water and wastewater by advanced oxidation processes: A review. *Environmental Technology & Innovation*, 23(August 2021), 101757. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101757>
- Kucharavy, D., & Guio, R. De. (2015). Application of Logistic Growth Curve. *Procedia Engineering*, 131, 280–290. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.390>
- Lara-Ramos, J. A., Angulo, M. A. F., Machuca-Martínez, F., & Mueses, M. A. (2021). Sensitivity Analysis of the Catalytic Ozonation under Different Kinetic Modeling Approaches in the Diclofenac Degradation. *Water*, 13(21), 3003. <https://doi.org/10.3390/w13213003>
- Lara-Ramos, J. A., Machuca-Martínez, F., Angel-Mueses, M., & Diaz-Angulo, J. (2022). 9 - Catalytic Ozonation Processes for Wastewater Treatment. In S. Upadhyayula & A. Chaudhary (Eds.), *Advanced Materials and Technologies for Wastewater Treatment* (1st ed., pp. 165–200). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003138303-9>
- Lee, C.-K. (2007). Basic study and patent analysis of electrochemical denitrification from industrial wastewater. *Resources Recycling*, 16(6), 52–60.
- Lezama-Nicolás, R., Rodríguez-Salvador, M., Río-Belver, R., & Bildosola, I. (2018). A bibliometric method for assessing technological maturity: the case of additive manufacturing. *Scientometrics*, 117, 1425–1452. <https://doi.org/10.1007/s11192-018-2941-1>
- Li, Z., Jing, J., Gao, K., Ren, G., Zhang, J., Jiao, W., & Liu, Y. (2021). Degradation of nitrobenzene by high-gravity intensified heterogeneous catalytic ozonation with Mn-Fe/ZSM-5 catalysts. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 169, 108642. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2021.108642>

- Lin, C.-T., & Yang, S.-Y. (2003). Forecast of the output value of Taiwan's opto-electronics industry using the Grey forecasting model. *Technological Forecasting and Social Change*, 70(2), 177–186. [https://doi.org/10.1016/S0040-1625\(01\)00191-3](https://doi.org/10.1016/S0040-1625(01)00191-3)
- Linley, S., Leshuk, T., & Gu, F. X. (2013). Magnetically Separable Water Treatment Technologies and their Role in Future Advanced Water Treatment: A Patent Review. *Clean – Soil, Air, Water*, 41(12), 1152–1156. <https://doi.org/10.1002/clen.201100261>
- Linton, J. D. (2002). Forecasting the market diffusion of disruptive and discontinuous innovation. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 49(4), 365–374. <https://doi.org/10.1109/TEM.2002.806723>
- Liu, C.-Y., & Wang, J.-C. (2010). Forecasting the development of the biped robot walking technique in Japan through S-curve model analysis. *Scientometrics*, 82, 21–36. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-0055-5>
- Liu, Y., Chen, C., Duan, X., Wang, S., & Wang, Y. (2021). Carbocatalytic ozonation toward advanced water purification. *Journal of Materials Chemistry A*, 9(35), 18994–19024. <https://doi.org/10.1039/D1TA02953C>
- Loaiza-Echeverri, A. M., Bergmann, J. A. G., Toral, F. L. B., Osorio, J. P., Carmo, A. S., Mendonça, L. F., Moustacas, V. S., & Henry, M. (2013). Use of nonlinear models for describing scrotal circumference growth in Guzerat bulls raised under grazing conditions. *Theriogenology*, 79(5), 751–759. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2012.11.031>
- Logemann, F. P., & Annee, J. H. J. (1997). Water treatment with a fixed bed catalytic ozonation process. *Water Science and Technology*, 35(4), 353–360. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00045-0](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00045-0)
- Machuca-Martínez, F., Mena-Guerrero, N., & Manrique, J. J. (2014). *Proceso de remoción de contaminantes en lixviados y aguas residuales industriales mediante ozonización catalítica heterogénea* (Patent No. CO 7120274 A1). <https://worldwide.espacenet.com/patent/search/family/052544188/publication/CO7120274A1?q=pn%3DCO7120274A1>
- Macías-Quiroga, I. F., Henao-Aguirre, P. A., Marín-Flórez, A., Arredondo-López, S. M., & Sanabria-González, N. R. (2021). Bibliometric analysis of advanced oxidation processes (AOPs) in wastewater treatment: global and Ibero-American research trends. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 23791–2381. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11333-7>
- Mahlia, T. M. I., Syazmi, Z. A. H. S., Mofijur, M., Abas, A. E. P., Bilad, M. R., Ong, H. C., & Silitonga, A. S. (2020). Patent landscape review on biodiesel production: Technology updates. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 118, 109526. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109526>
- Mailänder, L. (2016). *Topic 8: IPC and CPC Basis*. https://www.wipo.int/edocs/mdocs/africa/en/wipo_ip_pre_16/wipo_ip_pre_16_t_8.pdf
- Malecki, E. J. (2021). The Geography of Innovation. In M. Fischer & P. Nijkamp (Eds.), *Handbook of Regional Science* (pp. 819–834). Springer, Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-3-662->

- Mao, G., Hu, H., Liu, X., Crittenden, J., & Huang, N. (2021). A bibliometric analysis of industrial wastewater treatments from 1998 to 2019. *Environmental Pollution*, 275, 115785. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115785>
- Mateo-Sagasta, J. (Ed.). (2013). *Reutilización de aguas para agricultura en América Latina y el Caribe: estado, principios y necesidades*. FAO. <https://hdl.handle.net/10568/91293>
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. (2016). Four billion people facing severe water scarcity. *Science Advances*, 2(2), e1500323. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1500323>
- Meyer, P., Yung, J., & Ausubel, J. (1999). A Primer on Logistic Growth and Substitution: The Mathematics of the Loglet Lab Software. *Technological Forecasting and Social Change*, 61(3), 247–271.
- Mogee, M. (1994). Patent Analysis for strategic advantage: Using International Patent Records. *Competitive Intelligence Review*, 5(1), 27–35.
- Molina, M. (2021). No lo dejes a medias. Diagnóstico del modelo de regresión. *Revista Electrónica de Anestesia*, 13(7), 2.
- Morales-Zapata, D., Valencia-Arias, A., Garcés-Giraldo, L., Toro-Vanegas, E., & Quiroz-Fabra, J. (2021). Trends in Research Around the Sustainable Development Objectives: A Bibliometric Analysis. In G. Nhamo, M. Togo, & K. Dube (Eds.), *Sustainable Development Goals for Society Vol. 1* (pp. 247–260). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-70948-8_17
- Moussavi, G., khavanin, A., & Alizadeh, R. (2010). The integration of ozonation catalyzed with MgO nanocrystals and the biodegradation for the removal of phenol from saline wastewater. *Applied Catalysis B: Environmental*, 97(1–2), 160–167. <https://doi.org/10.1016/J.APCATB.2010.03.036>
- Mueses, M. A., Machuca-Martinez, F., & Puma, G. L. (2013). Effective quantum yield and reaction rate model for evaluation of photocatalytic degradation of water contaminants in heterogeneous pilot-scale solar photoreactors. *Chemical Engineering Journal*, 215–216, 937–947. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.11.076>
- Muscetta, M., & Russo, D. (2021). Photocatalytic Applications in Wastewater and Air Treatment: A Patent Review (2010–2020). *Catalysts*, 11(7), 834. <https://doi.org/10.3390/catal11070834>
- Naghizadeh, M., Aghapour, A. A., & Khorsandi, H. (2022). The degradation and mineralization of hydrochlorothiazide (HCTZ) using catalytic ozonation process (COP) with Al₂O₃/granular activated carbon composite. *Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis*, 135, 1875–1889. <https://doi.org/10.1007/s11144-022-02226-6>
- Nagula, M. (2016). Forecasting of Fuel cell technology in hybrid and electric vehicles using Gompertz growth curve. *Journal of Statistics and Management Systems*, 19(1), 73–88. <http://dx.doi.org/10.1080/09720510.2014.1001601>
- Nakayama, S., Esaki, K., Namba, K., & Tabata, Y. T. (1979). Improved Ozonation in Aqueous Systems. *Ozone: Science & Engineering*, 1(2), 119–131. <https://doi.org/10.1080/01919517908550839>

- Nakrst, J., Bistan, M., Tisler, T., Zagorc-Koncan, J., Derco, J., & Gotvajn, A. Z. (2011). Comparison of Fenton's oxidation and ozonation for removal of estrogens. *Water Sci Technol*, 63(10), 2131–2137. <https://doi.org/10.2166/wst.2011.339>
- Navarro-Brull, F. (2018). *Modeling, simulation and optimization of multiphase micropacked-bed reactors and capillary sonoreactors* [Universidad de Alicante]. https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/90920/1/tesis_francisco_jose_navarro_brull.pdf
- Nawrocki, J. (2013a). Catalytic ozonation in water: Controversies and questions. Discussion paper. *Applied Catalysis B: Environmental*, 142–143(October–November 2013), 465–471. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2013.05.061>
- Nawrocki, J. (2013b). Catalytic ozonation in water - controversies and questions. Discussion paper. *Applied Catalysis B: Environmental*, 142–143, 465–471. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2013.05.061>
- Nawrocki, J., & Kasprzyk-Hordern, B. (2010). The efficiency and mechanisms of catalytic ozonation. *Applied Catalysis B: Environmental*, 99, 27–42. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2010.06.033>
- Nguimkeu, P. (2014). A simple selection test between the Gompertz and Logistic growth models. *Technological Forecasting & Social Change*, 88, 98–105. <http://dx.doi.org/10.1016/j.techfore.2014.06.017>
- Nieto, M., López, F., & Cruz, F. (1998). Performance analysis of technology using the S curve model: the case of digital signal processing (DSP) technologies. *Technovation*, 18(6/7), 439–457.
- Niu, L., We, T., Li, Q., Zhang, G., Xian, G., Long, Z., & Ren, Z. (2020). Ce-based catalysts used in advanced oxidation processes for organic wastewater treatment: A review. *Journal of Environmental Sciences*, 96, 109–116. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2020.04.033>
- Nobanee, H., Hamadi, F. Y. Al, Abdulaziz, F. A., Abukarsh, L. S., Alqahtani, A. F., AlSubaey, S. K., Alqahtani, S. M., & Almansoori, H. A. (2021). A Bibliometric Analysis of Sustainability and Risk Management. *Sustainability*, 13(6), 3277. <https://doi.org/10.3390/su13063277>
- OECD. (2009a). *OECD Patent Statistics Manual*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264056442-en>
- OECD. (2009b). Patent Systems and Procedures. In *OECD Patent Statistics Manual* (pp. 39–57). <https://doi.org/10.1787/9789264056442-4-en>
- OECD. (2009c). Patents as Statistical Indicators of Science and Technology. In *OECD Patent Statistics Manual* (pp. 17–38). <https://doi.org/10.1787/9789264056442-3-en>
- Pablo, C. de. (2020, April 14). La gestión de las aguas residuales, oportunidad y riesgo para el futuro de América Latina. *El Ágora: Diario Del Agua*. <https://www.elagoradiario.com/general/aguas-residuales-america-latina-caribe-gestion-agua/>
- Parlett, C. M. A., Wilson, K., & Lee, A. F. (2013). Hierarchical porous materials: catalytic applications. *Chemical Society Reviews*, 42(9), 3876–3893. <https://doi.org/10.1039/C2CS35378D>

- Priyadarshini, M., Das, I., Ghangrekar, M. M., & Blaney, L. (2022). Advanced oxidation processes: Performance, advantages, and scale-up of emerging technologies. *Journal of Environmental Management*, 316, 115295. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2022.115295>
- Psaltou, S., Kaprara, E., Mitrakas, M., & Zouboulis, A. (2021). Comparative study on heterogeneous and homogeneous catalytic ozonation efficiency in micropollutants' removal. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 70(8), 1121–1134. <https://doi.org/10.2166/aqua.2021.067>
- Psaltou, S., & Zouboulis, A. (2020). Catalytic Ozonation and Membrane Contactors—A Review Concerning Fouling Occurrence and Pollutant Removal. *Water*, 12(11), 2964. <https://doi.org/10.3390/w12112964>
- Qi, Y., Guo, C., Xu, X., Gao, B., Yue, Q., Jiang, B., Wang, C., & Qian, Z. (2020). Co/Fe and Co/Al layered double oxides ozone catalyst for the deep degradation of aniline: Preparation, characterization and kinetic model. *Science of The Total Environment*, 715, 136982. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136982>
- Qian, F., Gao, S., & Wang, J. (2021). *Device and method for advanced water treatment* (Patent No. US 2021/0039968 A1).
- Questel. (2021). *Orbit IP Business Intelligence*. Questel. <https://www.questel.com/business-intelligence-software/orbit-intelligence/>
- Questel. (2022). *Orbit Intellixir. BUSINESS INTELLIGENCE SOFTWARE*. <https://www.questel.com/orbit-software-suite/orbit-intellixir/>
- Rodriguez, D. J., Serrano, H. A., Delgado, A., Nolasco, D., & Saltiel, G. (2020). *Agua Residual: De Residuo a Recurso*. Banco Mundial. <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/33436/146823SP.pdf>
- Rogers, M. (1998). *The Definition and Measurement of Innovation* (No. 10/98; Melbourne Institute Working Paper). <https://melbourneinstitute.unimelb.edu.au/downloads/working-paper-series/wp1998n10.pdf>
- Romero-Saldaña, M. (2016). Pruebas de bondad de ajuste a una distribución normal. *Revista Enfermería Del Trabajo*, 6(3), 105–114.
- Ruiping, Q., Cuiyu, G., Lunliang, Z., Wei, J., & Guangsheng, C. (2016). *Preparation method of ozone oxidation catalyst loaded with polymetallic oxide* (Patent No. CN105363465 A).
- Schmoch, U. (2008). *Concept of a Technology Classification for Country Comparisons*. https://www.wipo.int/export/sites/www/ipstats/en/statistics/patents/pdf/wipo_ipc_technology.pdf
- Semenoglou, A. A., Spiliotis, E., Makridakis, S., & Assimakopoulos, V. (2021). Investigating the accuracy of cross-learning time series forecasting methods. *International Journal of Forecasting*, 37(3), 1072–1084. <https://doi.org/10.1016/J.IJFORECAST.2020.11.009>
- Sierka, R. A., & Bryant, C. W. (1987). Removal of Organic Carbon and Chlorine from a Kraft Mill Wastewater by Pretreatment with Catalyzed Ozone and Powdered Activated Carbon. *Water Quality Research Journal*, 22(3), 456–467. <https://doi.org/10.2166/wqrj.1987.036>

- Smith, J. A. (2018). *Patent Landscape Reporting Quality and Predicting Drug Approval* [University of Oxford]. <https://ora.ox.ac.uk/objects/uuid:c6215056-9e45-4710-af72-7fb68c8d2996>
- Soares, O. S. G. P., Gonçalves, A. G., Delgado, J. J., Órfão, J. J. M., & Pereira, M. F. R. (2015). Modification of carbon nanotubes by ball-milling to be used as ozonation catalysts. *Catalysis Today*, 249, 199–203. <https://doi.org/10.1016/J.CATTOD.2014.11.016>
- Son, S., & Cho, N. W. (2020). Technology fusion characteristics in the solar photovoltaic industry of south korea: A patent network analysis using ipc co-occurrence. *Sustainability (Switzerland)*, 12(21), 1–19. <https://doi.org/10.3390/su12219084>
- Sternitzke, C. (2009). Defining triadic patent families as a measure of technological strength. *Scientometrics*, 81(1), 91–109. <https://doi.org/10.1007/s11192-009-1836-6>
- Sun, S., Wang, F., & Liu, M. (2022). *Ozone catalytic oxidation system for advanced wastewater treatment* (Patent No. CN114671508 A).
- Taylor, M., & Taylor, A. (2012). The technology life cycle: Conceptualization and managerial implications. *International Journal of Production Economics*, 140(1), 541–553. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.07.006>
- Temel, S., Dabić, M., Ar, I. M., Howells, J., Mert, A., & Yesilay, R. B. (2021). Exploring the relationship between university innovation intermediaries and patenting performance. *Technology in Society*, 66, 101665. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2021.101665>
- The Rockefeller University. (2010). *Loglet Analysis*. Phe.Rockefeller.Edu. <https://logletlab.com/?page=index&preload=library.get.1>
- The World Bank. (2021). *Water. Understanding Poverty*. <https://www.worldbank.org/en/topic/water/overview>
- Trappey, C. V., & Wu, H.-Y. (2008). An evaluation of the time-varying extended logistic, simple logistic, and Gompertz models for forecasting short product lifecycles. *Advanced Engineering Informatics*, 22, 421–430. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2008.05.007>
- Tseng, F.-C., Huang, M.-H., & Chen, D.-Z. (2020). Factors of university–industry collaboration affecting university innovation performance. *The Journal of Technology Transfer Volume*, 45, 560–577. <https://doi.org/10.1007/s10961-018-9656-6>
- Valdés, H., & Zaror, C. (2005). Heterogeneous and homogeneous catalytic ozonation of benzothiazole promoted by activated carbon: kinetic approach. *4th MERCOSUR Congress on Process Systems Engineering*, 1–11.
- Veer, T., & Jell, F. (2012). Contributing to markets for technology? A comparison of patent filing motives of individual inventors, small companies and universities. *Technovation*, 32(9–10), 513–522. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2012.03.002>
- Vimalnath, P., Gurtoo, A., & Mathew, M. (2017). The relationship between patent age and selling price across bundling strategies for United States patents, predominately for computer and communication technology. *World Patent Information*, 48, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.wpi.2016.12.001>

- Von Gunten, U. (2018). Oxidation Processes in Water Treatment: Are We on Track? *Environmental Science & Technology*, 52(9), 5062–5075. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b00586>
- Wang, B., Zhang, H., Wang, F., Xiong, X., & Tian, K. (2019). Application of Heterogeneous Catalytic Ozonation for Refractory Organics in Wastewater. *Catalysts*, 9, 241. <https://doi.org/10.3390/catal9030241>
- Wang, B., Zhang, H., Wang, F., Xiong, X., Tian, K., Sun, Y., & Yu, T. (2019). Application of heterogeneous catalytic ozonation for Refractory Organics in Wastewater. *Catalysts*, 9(3), 241. <https://doi.org/10.3390/catal9030241>
- Wang, J., & Bai, Z. (2016). Fe-based catalysts for heterogeneous catalytic ozonation of emerging contaminants in water and wastewater. *Chemical Engineering Journal*, 312, 79–98. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.11.118>
- Wang, J., & Chen, H. (2020a). Catalytic ozonation for water and wastewater treatment: Recent advances and perspective. *Science of the Total Environment*, 704, 135249. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135249>
- Wang, J., & Chen, H. (2020b). Catalytic ozonation for water and wastewater treatment: Recent advances and perspective. *Science of The Total Environment*, 704, 135249. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135249>
- Wang, J., & Chen, H. (2020c). Catalytic ozonation for water and wastewater treatment: Recent advances and perspective. *Science of the Total Environment*, 704, 135249. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135249>
- Wang, J. L., & Xu, L. J. (2012a). Advanced oxidation processes for wastewater treatment: Formation of hydroxyl radical and application. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 42(3), 251–325.
- Wang, J. L., & Xu, L. J. (2012b). Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment: Formation of Hydroxyl Radical and Application. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 42(3), 251–325. <https://doi.org/10.1080/10643389.2010.507698>
- Wang, J., & Wang, S. (2020). Reactive species in advanced oxidation processes: Formation, identification and reaction mechanism. *Chemical Engineering Journal*, 401, 126158. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126158>
- Wang, Y., Chen, L., Chen, C., Xi, J., & Cao, H. (2019). Occurrence of both hydroxyl radical and surface oxidation pathways in N-doped layered nanocarbons for aqueous catalytic ozonation. *Applied Catalysis B: Environmental*, 254, 283–291. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2019.05.008>
- Wang, Y., & Gang, Y. (2022). Challenges and pitfalls in the investigation of the catalytic ozonation mechanism: A critical review. *Journal of Hazardous Materials*, 436, 129157. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129157>
- Wang, Y., Xie, Y., Sun, H., Xiao, J., Cao, H., & Wang, S. (2016a). 2D/2D nano-hybrids of γ -MnO₂ on reduced graphene oxide for catalytic ozonation and coupling peroxymonosulfate activation. *Journal of Hazardous Materials*, 301, 56–64.

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.08.031>

- Wang, Y., Xie, Y., Sun, H., Xiao, J., Cao, H., & Wang, S. (2016b). Efficient Catalytic Ozonation over Reduced Graphene Oxide for p-Hydroxylbenzoic Acid (PHBA) Destruction: Active Site and Mechanism. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 8(15), 9710–9720. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b01175>
- Williams, C., & Griscom Bettel, I. (2002). *Decontamination reactor system and method of using same* (Patent No. US6361697 B1).
- WIPO. (2008). *What is a patent*. Sobre La PI. <https://www.wipo.int/patents/en/>
- WIPO. (2020). *Guidelines for Preparing Patent Landscape Reports*. https://www.wipo.int/edocs/pubdocs/en/wipo_pub_946.pdf
- WIPO. (2021). *International Patent Classification (IPC)*. International Classifications. <https://www.wipo.int/classifications/ipc/en/>
- WIPO. (2022). *Hydrogen fuel cells in transportation*. <http://dx.doi.org/10.34667/tind.46069>
- Wu, C.-H., Kuo, C.-Y., & Chang, C.-L. (2008). Homogeneous catalytic ozonation of C.I. Reactive Red 2 by metallic ions in a bubble column reactor. *Journal of Hazardous Materials*, 154(1–3), 748–755.
- Xu, D., Ding, T., Sun, Y., Li, S., & Jing, W. (2022). Interlayer-confined two-dimensional manganese oxide-carbon nanotube catalytic ozonation membrane for efficient water purification. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 16, 731–744. <https://doi.org/10.1007/s11705-021-2110-6>
- Yang, J., Zhang, H., Zhang, Z., & Lai, B. (2019). Degradation of 2,4-Dinitrophenol in Aqueous Solution by Microscale Fe⁰/H₂O₂/O₃ Process. *Environmental Engineering Science*, 36(2), 207–218. <https://doi.org/10.1089/ees.2018.0143>
- Yang, Y.-C., Zeng, S.-S., Ouyang, Y., Sang, L., Yang, S.-Y., & Zhang, X.-Q. (2021). An intensified ozonation system in a tank reactor with foam block stirrer: Synthetic textile wastewater treatment and mass transfer modeling. *Separation and Purification Technology*, 257, 117909. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117909>
- Yang, Y., Ma, J., Qin, Q., & Zhai, X. (2007). Degradation of nitrobenzene by nano-TiO₂ catalyzed ozonation. *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 267(1–2), 41–48. <https://doi.org/10.1016/J.MOLCATA.2006.09.010>
- Yang, Z., Yang, H., Liu, Y., Hu, C., Jing, H., & Li, H. (2022). Heterogeneous Catalytic Ozonation for Water Treatment: Preparation and Application of Catalyst. *Ozone: Science & Engineering*. <https://doi.org/10.1080/01919512.2022.2050183>
- Yoon, J., Jeong, B., Lee, W. H., & Kim, J. (2018). Tracing the Evolving Trends in Electronic Skin (e-Skin) Technology Using Growth Curve and Technology Position-Based Patent Bibliometrics. *IEEE Access*, 6, 26530–26542. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2834160>
- Zaror, C. A. (1997). Enhanced oxidation of toxic effluents using simultaneous ozonation and activated carbon treatment. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 70(1), 21–

28. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4660\(199709\)70:1%3C21::AID-JCTB706%3E3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4660(199709)70:1%3C21::AID-JCTB706%3E3.0.CO;2-3)
- Zhang, J., Shao, S., Ding, X., Li, Z., Jing, J., & Jiao, W. (2022). Removal of phenol from wastewater by high-gravity intensified heterogeneous catalytic ozonation with activated carbon. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 34830–34840. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18093-y>
- Zhao, L., Sun, Z., & Ma, J. (2009). Novel relationship between hydroxyl radical initiation and surface group of ceramic honeycomb supported metals for the catalytic ozonation of nitrobenzene in aqueous solution. *Environmental Science and Technology*, 43(11), 4157–4163. <https://doi.org/10.1021/es900084w>
- Ziegler, C., Sinigaglia, T., Martins, M. E. S., & Souza, A. M. (2021). Technological Advances to Reduce *Apis mellifera* Mortality: A Bibliometric Analysis. *Sustainability*, 13(15), 8305. <https://doi.org/10.3390/su13158305>
- Zikova, M. (2013). *Clasificación de patentes*. https://www.wipo.int/export/sites/www/tisc/es/doc/patent_classification_advantages.pdf