

Síntesis de nanocatalizadores basados en nanopartículas de óxido de hierro: una revisión bibliométrica

Synthesis of nanocatalysts based on iron oxide nanoparticles: a bibliometric review

Leidy C. Chagiendo-Figueroa ^{1a}, Diego F. Coral ^{1b}, Edgar Mosquera-Vargas ^{2,3}

¹ Grupo de Investigación en Ciencia y Tecnología de Materiales Cerámicos- CYTEMAC, Departamento de Física, Universidad del Cauca, Popayán, Colombia. Orcid: [0000-0001-7078-2368](https://orcid.org/0000-0001-7078-2368)^b. Correo electrónico: lcchaguendo@unicauca.edu.co^a, dfcoral@unicauca.edu.co^b

² Grupo de Transiciones de Fase y Materiales Funcionales, Departamento de Física, Universidad del Valle, Cali, Colombia. Orcid: [0000-0003-1561-6994](https://orcid.org/0000-0003-1561-6994). Correo electrónico: edgar.mosquera@correounivalle.edu.co

³ Centro de Excelencia en Nuevos Materiales (CENM), Universidad del Valle, Cali Colombia

Recibido: 12 junio, 2023. Aceptado: 15 octubre, 2023. Versión final: 7 febrero, 2024.

Resumen

En este artículo se presenta una revisión bibliográfica de las rutas de síntesis de nanopartículas de óxido de hierro con aplicaciones como nanocatalizadores en la síntesis de nanoestructuras de carbono por el método de pirólisis de plásticos. Por medio de la pirólisis, es posible sintetizar estructuras tales como nanotubos de carbono de pared simple (SWCNTs), de pared doble (DWCNTs), de pared múltiple (MWCNTs) y nano fibras de carbono (CNFs), las propiedades morfológicas y químicas de los nanocatalizadores garantizan la producción mayoritaria y poco defectuosa de estas nanoestructuras. En cuanto al nanocatalizador de óxido de hierro, esta revisión expone la importancia de parámetros como su forma y tamaño, propiedades que son controladas desde el proceso de síntesis, y la importancia de la interacción entre las nanopartículas y el soporte utilizado. Estos factores influyen directamente en el rendimiento del nanocatalizador, en términos de la actividad catalítica, la selectividad y la durabilidad.

Palabras clave: catalizador; óxidos de hierro; pirólisis; nanotubos de carbono.

Abstract

This article presents a literature review of the iron oxide nanoparticles synthesis routes with applications as nanocatalysts in the synthesis of carbon nanostructures using the plastic pyrolysis method. Through pyrolysis, it is possible to synthesize structures such as single-walled carbon nanotubes (SWCNTs), double-walled carbon nanotubes (DWCNTs), multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs), and carbon nanofibers (CNFs). The morphological and chemical properties of the nanocatalysts ensure the majority production with minimal defects of these nanostructures. Regarding the iron oxide nanocatalyst, this review emphasizes the importance of parameters such as its shape and size, properties that are controlled during the synthesis process, and the significance of the interaction between nanoparticles and the support material used. These factors directly influence the nanocatalyst's performance in terms of catalytic activity, selectivity, and durability.

Keywords: Catalyst; iron oxide; pyrolysis; carbon nanotubes.

1. Introducción

La catálisis es un proceso por el cual se modifica la velocidad de una reacción química, mediante la adición de una sustancia no consumida definida como un catalizador [1] que actúa para disminuir la energía de activación de la reacción y por consiguiente el costo en dichos procesos [2]. Es importante mencionar, que el campo de la catálisis, ha permitido la incursión del avance de la nanociencia y la nanotecnología [3], puesto que, se han presentado importantes avances en la investigación y desarrollos en la síntesis, control y manipulación de estructuras, dispositivos y sistemas con nuevas propiedades que se revelan únicamente a la nanoescala [4]. Una de las propiedades que se ven beneficiadas al nivel nanométrico es la reactividad química, puesto que en una nanoestructura los sitios activos son más abundantes, en comparación al material en bloque, puesto que hay mucho más material expuesto al exterior, es decir tiene una relación superficie-volumen mayor y por consiguiente son muy buenos candidatos para aplicaciones en los procesos catalíticos [5].

Sin embargo, quedan desafíos para maximizar su eficiencia y mantener su estabilidad y actividad durante un período prolongado, así como el desarrollo de nuevos métodos para la fabricación de los mismos, con el fin de optimizar sus propiedades, enfocados en el estudio del control y el proceso de separación del catalizador del producto obtenido [6]. Específicamente en catálisis se requiere mejorar el rendimiento en procesos de degradación catalítica, controlando desde la síntesis parámetros como la eficiencia del catalizador, el rendimiento de la reacción y la morfología de los productos obtenidos [7].

En el área de la nanocatálisis, las nanopartículas de óxidos de hierro han ganado un creciente interés debido a las propiedades ya mencionadas [8]. Las propiedades fisicoquímicas de las nanoestructuras de óxidos de hierro varían de acuerdo al tamaño de la partícula, su morfología (que puede ser esférica, cilíndrica, elipsoidal, entre otras), y a la forma ingenieril adoptada, ya sea como película, nanocristal auto ensamblado, o ferrofluido [9]. Razón por la cual, se ha investigado una gran variedad de rutas, para la síntesis de estas nanopartículas con el fin de obtener las propiedades y estructuras deseadas y por lo tanto optimizar su aplicación.

Es así como, la síntesis química de nanopartículas de óxido de hierro, ofrece enfoques innovadores para el control de los procesos de nucleación y crecimiento de las nanopartículas a nivel atómico, logrando predecir el tamaño y la morfología a través de una metodología específica, ajustando los parámetros de reacción, como el

precursor metálico, el disolvente, la temperatura, el tiempo y atmósfera de reacción, entre otros [10]. Esto mediante un enfoque “*bottom up*” [11], que consisten en el crecimiento de las nanopartículas a partir de precursores moleculares, tal como se ha reportado en métodos de síntesis tales como la condensación de gas inerte, microemulsión, sol-gel, síntesis hidrotermal, coprecipitación y síntesis por poliol [12].

Por otro lado, una de las aplicaciones de interés en los procesos catalíticos de las nanopartículas de óxidos de hierro, se enmarca en la producción de nanotubos de carbono sintetizados por medio de procesos de pirólisis de plásticos, u otros materiales como precursores carbonosos [13]. Este tipo de nanoestructuras carbonosas poseen propiedades interesantes como alta resistencia mecánica y conductividad eléctrica, cuya producción se ha limitado al método de síntesis utilizado [14].

Dichas propiedades dependen principalmente del diámetro y la quiralidad del tubo, el parámetro más importante que define las propiedades y características de los nanotubos de carbono, conocida como la expresión matemática que regula el ángulo con el que se dobla la capa del nanotubo de carbono [15].

De esta manera, en la producción de los nanotubos de carbono, el diámetro del nanotubo está estrechamente relacionado con el tamaño de la nanopartícula del catalizador, dado que, la capacidad de generar nanopartículas de tamaño uniforme ha permitido la producción de nanotubos de carbono de diámetro uniforme [16], así mismo al variar la composición de las nanopartículas del catalizador también es posible producir diferentes tipos de nanotubos de pared simple o de pared múltiple [17].

Por lo tanto, esta revisión aborda el diseño del nanocatalizador, el mecanismo de crecimiento, la importancia de estos y su aplicación. Finalmente, concluimos con una breve mención del uso de óxidos de hierro como nanocatalizadores para la síntesis de nanoestructuras carbonos.

2. Metodología

La metodología empleada para la revisión bibliométrica se basó en la revisión de artículos científicos, obtenidos usando motores de búsqueda como Google Scholar, Scopus, Scielo, Lens Org, y Library Genesis. La revisión inicia con el motor de búsqueda Google Scholar y Scopus, empleando la palabra clave “*Iron nanocatalysts*”. La búsqueda se restringió en un intervalo de tiempo a partir del año 2012 hasta el año 2021, obteniendo como resultado 58 publicaciones relevantes

para nuestro estudio. Se correlacionó los resultados con las palabras claves “*carbon nanotubes, magnetic nanocatalysts, valent iron nanoparticles, sustainable nanocatalysts, double wall carbon nanotubes, iron nanocatalysts, multi-walled carbon nanotubes, iron oxide nanocatalysts*”. Además, se empleó los motores de búsqueda secundarios Scielo y Library Genesis con la palabra clave “*Iron nanocatalysts*”. Se aplicó los filtros de búsqueda tales como año de publicación y el tipo de literatura a partir del año 2011 con pocos resultados obtenidos (11 artículos científicos, 2 libros).

Por otro lado, empleando el motor de búsqueda Lens Org, se usó la frase “*Iron oxide catalysts to produce carbon nanomaterials*”, eligiendo las obras académicas y un filtro temporal a partir del año 2016. Se obtuvo como resultado 804 obras académicas. La Figuras 1 y 2

resumen los resultados bibliográficos utilizando la metodología propuesta.

Además, en la búsqueda bibliométrica se incluyó todo tipo de revisión referente a catalizadores de óxidos de hierro empleados en la producción de nanomateriales de carbono. El principal criterio de exclusión empleado fueron los artículos científicos que no incluyeran información sobre este tipo de catalizadores. Al depurar la revisión bibliométrica, 71 artículos científicos fueron seleccionados.

3. La catálisis

El proceso de catálisis se define como el proceso a través del cual se incrementa la velocidad de una reacción química.

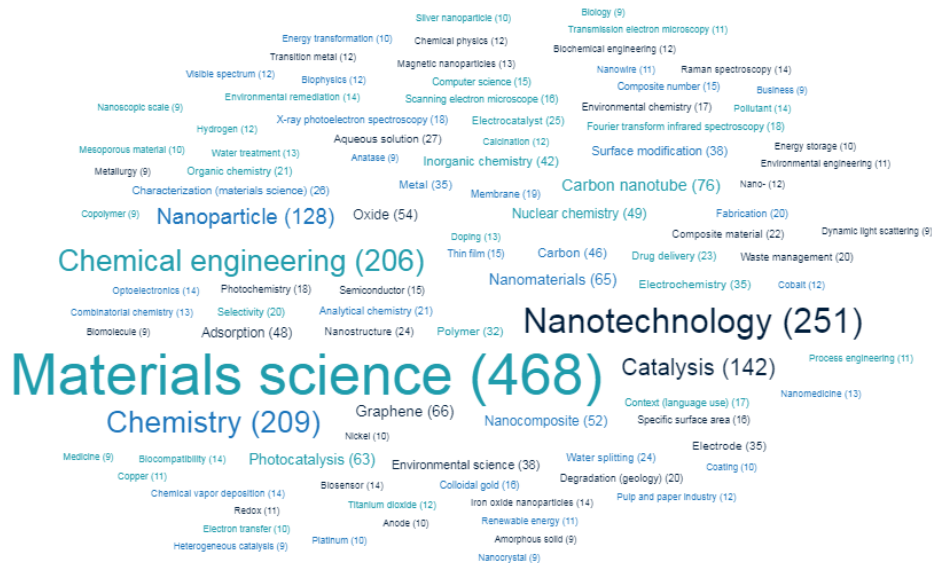


Figura 1. Principales campos de estudio. Fuente propia.

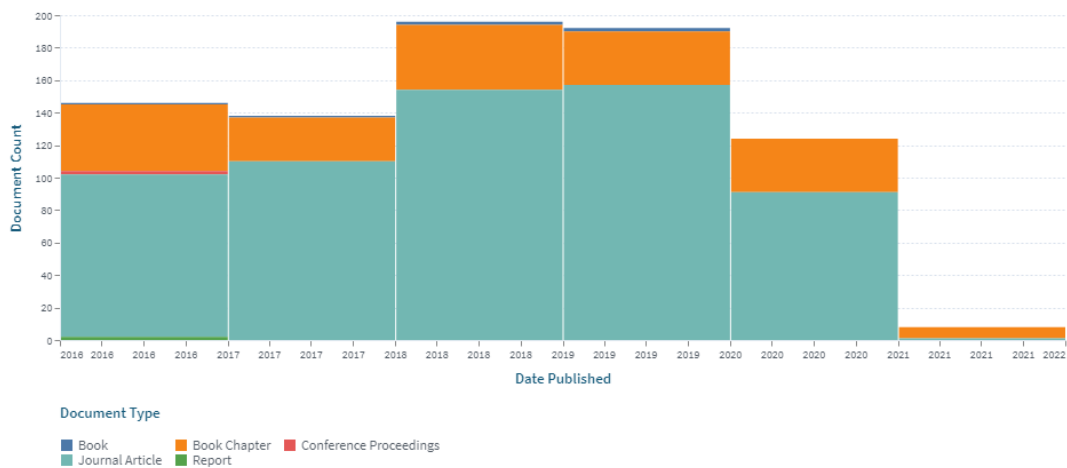


Figura 2. Número de artículos científicos revisados para la revisión bibliométrica. Fuente propia.

El proceso de catálisis implica la presencia de una sustancia conocida como un catalizador; sustancia encargada de acelerar una reacción química, formando lazos con las moléculas en reacción, permitiendo que reaccionen en un producto que se separa del catalizador, dejándolo inalterado para que esté disponible para la siguiente reacción [18].

De esta manera, se puede definir una reacción catalítica como un evento cíclico, con la participación de un catalizador que se recupera al final del ciclo [19]. Sin embargo, es importante mencionar, que una reacción sin la presencia de un catalizador, presenta una mayor energía de activación, es decir, la reacción no catalítica debe superar una barrera energética considerable, comparada con la reacción que cuenta con la presencia del catalizador, cuyas barreras energéticas en la ruta catalítica son menores [20].

3.1. El nanocatalizador

El avance en la nanociencia y la nanotecnología ha permitido la producción de nanopartículas con diversidad de morfología, tamaños y composiciones, y han ampliado los límites de la tecnología, dado que cuentan con numerosas aplicaciones en muchos campos de interés. En el campo de la catálisis, uno de los retos se enmarca en la síntesis de nanomateriales con el fin de mejorar el potencial catalítico a largo plazo, es decir, nanomateriales con excelente actividad y alta estabilidad en catálisis. De esta manera, se hace necesario la fabricación de un nanocatalizador que conserve la alta actividad, selectividad, fácil separación y recuperación, es decir, un catalizador capaz de hacer un puente entre la catálisis homogénea y heterogénea [21].

Químicamente, los catalizadores pueden ser metales, óxidos, sulfuros, carburos, nitruros, ácidos o sales, en diferentes formas y pueden estar soportados en un sustrato o soporte. Además, las propiedades del catalizador se relacionan directamente con las propiedades de las nanopartículas, el soporte y la porosidad de este. Es importante mencionar, que, durante la deposición de las nanopartículas en el soporte, pueden ocurrir cambios en la morfología, tamaño estado de agregación y cambios en fases de las nanopartículas debido a procesos de sinterización y lixiviación, principalmente [22].

Cabe destacar que, el rendimiento del catalizador depende del ajuste de los sitios activos en la estructura porosa y en la superficie del soporte [23]. De esta manera, ajustar las características de porosidad del soporte es esencial para el diseño de catalizadores funcionales, dado que el análisis de porosidad no solo proporciona datos

sobre el área superficial, el tamaño y el volumen de los poros, sino también de la morfología, la topología y la interconexión entre los poros [24].

Por consiguiente, el diseño de nanocatalizadores enmarca los siguientes aspectos [25]: la construcción de bloques funcionalizados en una nanoestructura, el control de la asignación de sitios activos, la matriz de soporte, el control de la dispersión y la distancia entre sitios activos, y el ajuste de la accesibilidad al sitio activo [26]. Para el crecimiento de los nanotubos de carbono (CNTs), la formación de CNTs de pared simple (SWCNTs – siglas en inglés), doble (DWCNTs – siglas en inglés), o pared múltiple (MWCNTs – siglas en inglés) se rige por el tamaño de la partícula del catalizador. En términos generales, cuando el tamaño de partícula son unos pocos nanómetros, hay formación de nanotubos de pared simple o doble, mientras que las partículas con unas decenas de nanómetros de diámetro favorecen la formación de nanotubos de pared múltiple.

3.1.1. Nanopartículas de óxidos de hierro como nanocatalizadores

La revisión bibliométrica destaca para la síntesis de nanopartículas magnéticas, los siguientes métodos físicos y químicos [27]:

(i) Métodos físicos:

El uso de los métodos físicos implica triturar, romper o fraccionar materiales en partes más pequeñas para producir nanopartículas a través de la acción mecánica. Entre los métodos físicos se destacan la molienda mecánica y la condensación de gas inerte, principalmente [28]. Aunque estos métodos se utilizan para la síntesis de nanopartículas, se catalogan como métodos poco efectivos para el control del tamaño y morfología de las nanopartículas y por lo tanto limitan su aplicación como nanocatalizadores [29].

En la molienda mecánica, el proceso se lleva a cabo colocando una mezcla de polvos elementales (o pre aleados) junto con una o varias bolas (el material puede ser acero de alta dureza, acero inoxidable o cerámica) en un recipiente (fabricado con ágata para prevenir la contaminación proveniente de la molienda). El recipiente es sometido a agitación, consiguiendo que el polvo de las partículas quede atrapado entre las bolas que chocan entre sí, logrando la trituración de estos materiales [30].

La energía del proceso para triturar el material depende de factores tales como la amplitud de la vibración, la velocidad de rotación y la relación bola-polvo, entre otros

[31]. En todos los casos el principal evento que se produce es el choque bola-polvo-bola.

La naturaleza de estos procesos depende del comportamiento mecánico de los componentes en polvo, de sus fases de equilibrio y de las tensiones inducidas por la molienda. El proceso puede realizarse en seco o en húmedo, dependiendo del resultado que se pretende obtener. La molienda en seco permite tanto la aleación mecánica como el refinamiento de la partícula. La molienda en húmedo permite solo refinar el tamaño de la partícula [32].

Por otro lado, en el método de condensación de gas inerte, el metal es evaporado a temperaturas muy altas (alrededor de 1500 °C) en presencia de un gas no reaccionante de alta pureza. Al colisionar con el gas inerte los átomos metálicos pierden su energía cinética y se condensan sobre una punta fría en forma de un polvo ultrafino. La condensación y evaporación del material respectivo se llevan a cabo en una cámara de vacío [33].

Las nanopartículas sintetizadas de esta forma son amorfas y este método permite controlar el tamaño final de los agregados, manipulando los parámetros del proceso tales como la temperatura, el tipo de gas y la velocidad de evaporación, produciendo nanopartículas con un bajo contenido de impurezas [34].

(ii) Métodos químicos:

Los métodos químicos son los más usados para la síntesis de nanopartículas. En general, estos métodos se basan en la precipitación de un núcleo constituido por unos pocos átomos metálicos y su posterior crecimiento. El procedimiento general se realiza a partir de una solución de sales que contienen el metal específico.

En presencia de un líquido con un pH adecuado, las sales se descomponen liberando los iones metálicos. Estos iones tienden a unirse formando partículas, y si el crecimiento de dichas partículas se bloquea en la escala nano se obtienen las nanopartículas [35]. Con el fin de bloquear el crecimiento de la partícula estos métodos pueden incluir agentes de recubrimiento (surfactantes) que se adhieren a los átomos metálicos o a la superficie del núcleo, evitando que se unan más átomos, controlando así el crecimiento de las nanopartículas [36]. En otros casos, estos agentes interactúan fuertemente con los átomos de la superficie de las nanopartículas, modificando la estructura química superficial y por lo tanto sus propiedades.

El producto final suele ser del orden de miligramos, sin embargo, hay algunos métodos que permiten preparar grandes cantidades de nanopartículas [37].

Dentro de los métodos químicos de nanopartículas existen una amplia gama de métodos para la síntesis tales como coprecipitación, sol-gel, descomposición térmica, emulsión y micro emulsión, métodos hidrotermales y asistidos por microondas [38].

Para el caso de las nanopartículas de óxido de hierro como la magnetita, el método de coprecipitación es el que se utiliza en mayor porcentaje [39]. Este proceso implica dos vías posibles: la primera es la oxidación parcial de sales de hierro (II) y la segunda es el envejecimiento de una mezcla estequiométrica de hidróxido férrico y ferroso en un medio acuoso. Seguidamente, mediante la adición de una solución alcalina se conduce a la nucleación, crecimiento y finalmente a la generación de nanopartículas de Fe_3O_4 [40].

Es importante mencionar que, la revisión bibliográfica basada en artículos científicos destaca, principalmente, el uso de las siguientes fases de óxidos de hierro como catalizadores en el proceso de síntesis de nanoestructuras de carbono por el método de pirólisis: la magnetita (Fe_3O_4), la hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), y la maghemita ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$).

La Figura 3, muestra la revisión bibliométrica para cada óxido férrico.

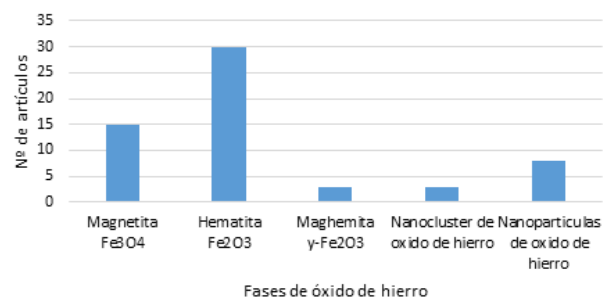


Figura 3. Número de artículos que reportan el uso de óxidos de hierro como catalizadores. Fuente propia.

3.1.2. Influencia del tamaño de nanopartícula

La importancia del tamaño de partícula en las propiedades catalíticas de los óxidos de hierro se reconoce desde 1925 [41], cuando es introducido el concepto de sitios activos, definidos como átomos particulares o grupos de átomos en la superficie de los sólidos responsables de su actividad catalítica [42]. De esta manera, el tamaño de partícula influye tanto en el número de coordinación superficial como en la extensión

de la interacción partícula-soporte, es decir, las partículas más pequeñas, especialmente en el rango de nanómetros, exponen más bordes, esquinas y torceduras, por unidad de peso, que las partículas más grandes [43], lo que evidencia, que la actividad del catalizador, está determinada principalmente por el tamaño de nanopartícula, depositada sobre el soporte, dado que solo los átomos de hierro superficiales pueden participar en la reacción química [44].

Es importante mencionar que el tamaño del catalizador, también tiene una influencia directa en el crecimiento de las nanoestructuras carbonosas, específicamente en los nanotubos de carbono (CNT), dado que solo las partículas de tamaño adecuado pueden nuclear estas nanoestructuras [45], [46]. Previos resultados experimentales reportados por Morel et al. [47] empleando magnetita mineral como catalizador, mostró que pequeñas partículas pueden ser generadas por la reducción del hierro durante el proceso de nucleación y crecimiento de los CNTs. Además, el estudio estructural evidencia la formación de FeC y FeO durante el crecimiento de los nanotubos. Por lo tanto, se deben considerar las condiciones de síntesis durante el crecimiento de estas nanoestructuras carbonosas.

3.1.3. Soporte del nanocatalizador

En la fabricación del nanocatalizador el material de soporte, juega un papel importante, esto debido principalmente al potencial de selectividad mejorada, al potencial de la catálisis y a la inhibición de la agregación de nanopartículas, proporcionando la inmovilización y la separación sobre el soporte heterogéneo [48].

En la nanocatálisis, entre los materiales más utilizados como soportes, se destacan los materiales porosos, mesoporosos, materiales carbonosos, biopolímeros y óxidos metálicos [49].

Los materiales porosos se definen como un sólido que comprende una red interconectada o poros cuyas propiedades texturales y físicas dependen de sus constituyentes [50]. Su uso como soporte para las nanopartículas permite generar sitios de adsorción específicos, creando una partición entre el exterior y la estructura porosa interior [51]. También, tienen la capacidad de inhibir el crecimiento de las nanopartículas y reduce la agregación de estas cuando la síntesis del nanocatalizador se realiza sobre el sustrato [52].

Es importante mencionar que seleccionando y manipulando las propiedades texturales del soporte poroso, es posible controlar el tamaño y la forma de las

nanoestructuras de carbono obtenidas a partir del proceso de pirólisis.

Entre los principales materiales para fabricar los soportes se encuentran los materiales carbonosos, los óxidos metálicos, los polímeros, los materiales mesoporosos y los materiales microporosos.

Por su parte, los materiales carbonosos ofrecen ventajas como soportes, dada su porosidad definida, área superficial alta y alta conductividad eléctrica. Estos materiales conforman una familia de materiales carbonosos mesoporosos conocidos como STARBON [53], los cuales son obtenidos a partir de la carbonización controlada con almidón expandido mesoporoso, como precursor sin necesidad de un agente moldeador [54].

En cambio, los óxidos metálicos ofrecen altas estabilidades térmicas y químicas combinadas con una estructura porosa bien definida y áreas superficiales altas. Entre los óxidos más utilizados se encuentran el óxido de silicio o sílice [55], alúmina [56], óxido de titanio [57], óxido de cerio [58], la circonia, y óxidos de hierro como la magnetita [59].

Por otro lado, los polímeros son catalogados como soportes para nanopartículas metálicas [60], debido principalmente a sus propiedades de estabilización de nanopartículas metálicas y resistencia a la sinterización y a la aglomeración de estas. Entre los polímeros como soportes se destacan los poliorganofosfacenos con un esqueleto inorgánico, polivinilpiridina, fibras y dendrímeros. Cabe mencionar que, frente a estos soportes tradicionales, los biopolímeros ofrecen ventajas que incluyen baja toxicidad, bajo costo y alta biocompatibilidad, disponibilidad, y abundancia [61].

Así mismo, los materiales mesoporosos son utilizados como soportes, debido a sus propiedades fisicoquímicas como su gran área superficial específica, la uniformidad de los poros, su interacción con iones, su facilidad de síntesis, y múltiples aplicaciones en adsorción, catálisis, fotocatalisis, intercambio iónico, petroquímica, absorción de gases, entre otras [62].

Existe una amplia variedad de mesoporosos que se encuentran disponibles y son sencillos de sintetizar; ejemplos de ellos son las arcillas y los silicatos [63]. Las arcillas son minerales mesoporosos muy abundantes en la naturaleza.

Finalmente, dentro de los materiales microporosos, se encuentran las zeolitas que son aluminosilicatos cristalinos de origen natural o sintético. Considerados como polímeros inorgánicos cristalinos basados en una

red tridimensional de tetraedros de SiO_4 y AlO_4 enlazados entre sí a través de oxígenos. Poseen propiedades como la alta estabilidad térmica, la capacidad de adsorción y homogeneidad en la distribución de centros, con diversas aplicaciones en procesos de catálisis y adsorción [64].

El principal inconveniente de los materiales zeolíticos es su limitado tamaño de poro, esto debido a que su estructura microporosa causa frecuentemente limitaciones en la difusión de las moléculas a lo largo de la estructura cristalina, debido a la dificultad en el transporte de los reactantes a los sitios activos o a la salida de los productos generados [65].

En este contexto, la revisión bibliométrica, destaca el uso del soporte de alúmina (ver Figura 4), debido a su fuerte interacción metal-soporte, alta dispersión de metal y alta densidad del sitio catalítico, aumentando el rendimiento de los nanotubos de carbono [66]. También se reportó el uso de soportes porosos como el óxido de magnesio y la zeolita, con el fin de que las nanopartículas del óxido de hierro utilizadas tengan una dispersión más uniforme sobre el soporte y haya poca o nula aglomeración [67]. La desventaja de estos soportes es la cantidad de carbono amorfo que tiende a acumularse en los poros de los materiales porosos después del proceso de pirólisis, lo que hace necesario un paso adicional de purificación para obtener la nanoestructura de carbón [68].

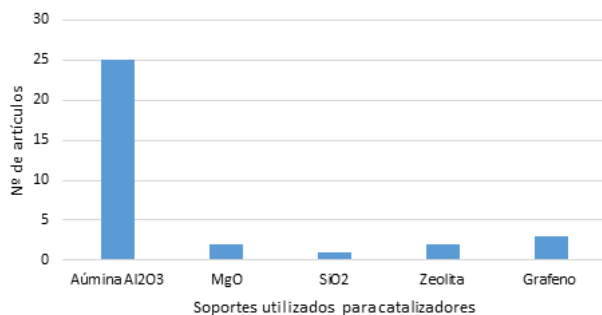


Figura 4. Revisión bibliométrica de soportes utilizados para catalizadores en el crecimiento de materiales carbonosos. Fuente propia.

3.2. Rutas para la síntesis: soporte-nanopartículas metálicas

Es de destacar la importancia que tienen en las aplicaciones catalíticas, la dispersión de las nanopartículas sobre la superficie del soporte, dado que generaran la mayor cantidad de sitios activos. Entre los métodos más utilizados para la dispersión de las nanopartículas sobre el soporte del nanocatalizador se encuentran los métodos físicos, con técnicas como la sonicación, microondas, ablación con láser pulsado, y los

métodos químicos con técnicas como electroquímicas y la impregnación [69].

(i) Métodos físicos

Dentro de los métodos físicos, la ultrasonificación emplea la capacidad de la energía transportada por las ondas sonoras para provocar cavitación. Esta técnica tiene la capacidad de controlar la distribución del tamaño de agregados de nanopartículas [70].

Para la dispersión de nanopartículas sobre un soporte, la irradiación de microondas presenta ventajas sobre los métodos de calentamiento convencionales. Los tiempos de preparación y reacción son menores, y se obtienen nanopartículas con distribución de tamaño del orden de 1-5 nm [71].

Por otro lado, la ablación con láser pulsado (PLA – siglas en inglés) utiliza un láser con ciertas características específicas para vaporizar un metal o una mezcla de metales. Por lo general, se emplea una deposición controlada por láser pulsado.

(ii) Métodos químicos

Dentro de los métodos químicos, la impregnación, la coprecipitación, y la deposición-precipitación son ampliamente usados. Algunas otras rutas novedosas tales como la fotoquímica, impregnación de vapor químico y reducción electroquímica [72] son también empleadas.

La impregnación implica la humectación de la superficie sólida con una solución que contiene el precursor de metal, es decir, el precursor de nanopartículas metálicas, típicamente una sal, se disuelve en la cantidad mínima de solvente para lograr su disolución completa, la solución resultante se agrega luego al soporte, hasta formar una pasta espesa, seguidamente, el disolvente se elimina en un evaporador rotatorio y el sólido final se seca al horno [73]. Es importante mencionar, que las nanopartículas dispersas sobre el soporte por este método se dispersan de manera diferente y con diferentes tamaños de partícula dependiendo del metal, el soporte y la carga de metal en el sólido final [74].

La coprecipitación involucra la precipitación simultánea del metal y el soporte [75]. Este método presenta inconvenientes asociados a la presencia de los precursores metálicos en solución y pueden interferir con la química de polimerización del material, lo que puede dar como resultado muestras con propiedades indeseables, con tamaño y forma de poro menos definidos, limitando la aplicabilidad a soportes poliméricos [76].

El método de deposición-precipitación implica la disolución del precursor, es decir, el metal en un solvente apropiado, seguido de un ajuste del pH en un rango de 5–10 para lograr la precipitación completa del hidróxido metálico, el cual es posteriormente depositado en la superficie del soporte [77]. Los sólidos finales luego se calcinan para reducir las nanopartículas a metales elementales [78].

Finalmente, el método de microemulsión se puede definir como una combinación homogénea de agua, aceites y tensioactivos, en presencia de un alcohol o un derivado de amina, seguidamente un soporte sólido se impregna con una microemulsión que contiene un precursor de sal metálica disuelta [79]. Cabe destacar que, la interacción microemulsión-soporte mejora al aumentar la hidrofobicidad del soporte, lo que lo hace más compatible químicamente con la microemulsión durante el paso de deposición [80].

De esta manera la bibliometría reporta que la dispersión de las nanopartículas dependerá de los novedosos métodos de síntesis empleados en comparación con los métodos tradicionales [81].

3.3. Aplicaciones del nanocatalizador

Una de las tantas aplicaciones de las nanopartículas de óxidos de hierro es su uso como catalizadores en la producción de nanoestructuras de carbono por el método de pirólisis, que abarca la formación de nanotubos de carbono de pared simple (SWCNTs – siglas en inglés), nanotubos de pared doble (DWCNTs – siglas en inglés), nanotubos de pared múltiple (MWCNTs – siglas en inglés), nanofibras de carbono (CNFs – siglas en inglés), etc [82], [83], [84], [85]. Estas nanoestructuras son obtenidas a partir de procesos de pirólisis en presencia de un catalizador nanoparticulado (ver Figura 5).

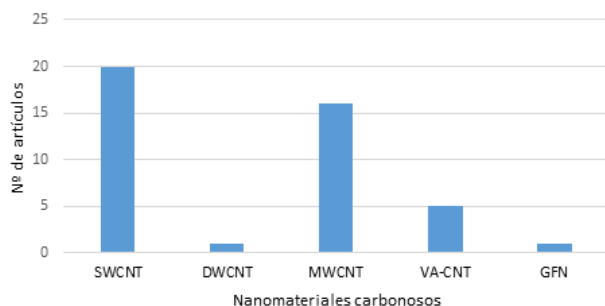


Figura 5. Revisión bibliométrica para el crecimiento de materiales carbonosos. Fuente propia.

Producto de la revisión bibliométrica se identifican los siguientes parámetros que optimizan el rendimiento y

morfología de las nanoestructuras carbonosas, entre los que se destacan:

- ✓ El catalizador: tamaño, fase y morfología.
- ✓ El soporte o sustrato del catalizador.
- ✓ La fuente de carbono.
- ✓ La temperatura del reactor.
- ✓ La presión del sistema.
- ✓ La velocidad de flujo del gas portador.
- ✓ El tiempo de deposición.
- ✓ El tipo de reactor.

Finalmente, la **Tabla 1** destaca las distintas fases del óxido de hierro que han sido utilizadas como catalizadores en procesos de degradación catalítica y el tipo de nanoestructura carbonosa obtenida.

4. Conclusiones

Los recientes avances en la nanotecnología han abierto nuevas vías para potenciar la tecnología catalítica. La compilación de la información expuesta en esta revisión bibliométrica, ilustran que se han dado grandes pasos para el control de los sistemas catalíticos a nivel molecular y atómico, aunque claramente, existen retos en el planteamiento de una metodología, especialmente para el control de los sitios activos. Se enfatiza en el potencial que tiene el uso de las nanopartículas de óxido de hierro como nanocatalizadores, cuyo potencial incluyen determinaciones de tamaño, forma, estructura, cristalinidad y comportamiento magnético, que, en conjunto con factores como el soporte, la ruta de deposición, permiten la conformación de un nanocatalizador capaz de mejorar procesos de degradación catalítica como la pirolisis, para la síntesis de nanoestructuras carbonosas.

Financiación

Este trabajo es financiado por el gobierno de Colombia desde el CTeI - SGR y Minciencias bajo el proyecto BPIN 2020000100377.

Contribución de los autores

L. C. Chagüendo-Figueroa: Conceptualización, Escritura-revisión y edición. D. F. Coral: Conceptualización, Escritura-revisión y edición. E. Mosquera-Vargas: Conceptualización, Supervisión, Escritura-revisión y edición.

Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Tabla 1. Catalizadores en el crecimiento de nanoestructuras carbonosas

Fase del catalizador	Soporte	Nano estructura	Referencia
Hematita Fe ₂ O ₃	Alúmina Al ₂ O ₃	SWCNT	[86]
Hematita Fe ₂ O ₃	Óxido de silicio SiO ₂	SWCNT	[87]
Hematita Fe ₂ O ₃	Óxido de silicio SiO ₂	SWCNT	[88]
Hematita Fe ₂ O ₃	Óxido de silicio SiO ₂	SWCNT MWCNT	[89]
Hematita Fe ₂ O ₃	Alúmina Al ₂ O ₃	MWCNT	[90]
Hematita Fe ₂ O ₃	Alúmina Al ₂ O ₃	SWCNT	[91]
Hematita Fe ₂ O ₃	Alúmina Al ₂ O ₃	CNT	[92]
Hematita Fe ₂ O ₃	Alúmina Al ₂ O ₃	MWCNT	[93]
Hematita Fe ₂ O ₃	Alúmina Al ₂ O ₃	SWCNT	[94]
Hematita Fe ₂ O ₃	Nps Titanio	CNT	[95]
Hematita Fe ₂ O ₃	Zeolita	MWCNT	[96]
Hematita Fe ₂ O ₃	Óxido de magnesio MgO	CNT	[97]
Hematita Fe ₂ O ₃	Alúmina Al ₂ O ₃	CNT	[98]
Hematita Fe ₂ O ₃	Óxido de silicio SiO ₂	CNT	[99]
Hematita Fe ₂ O ₃	Cuarzo	CNT	[100]
Hematita Fe ₂ O ₃	Óxido de magnesio MgO	CNT	[101]
Hematita Fe ₂ O ₃	Óxido de magnesio MgO	CNT	[102]
Hematita Fe ₂ O ₃	Alúmina Al ₂ O ₃	MWCNT	[103]
Hematita Fe ₂ O ₃	Alúmina Al ₂ O ₃	MWCNT	[104]
Hematita Fe ₂ O ₃	Zeolita	MWCNT MWCNC	[105]
Hematita Fe ₂ O ₃	-	GNF CNT	[106]
Hematita Fe ₂ O ₃	Sustratos planos de silicio	CNT	[107]
Magnetita Fe ₃ O ₄	Sílice mesoporosa esférica	MWCNT	[108]
Magnetita Fe ₃ O ₄	-	SWCNT	[109]
Magnetita Fe ₃ O ₄	Grafeno	CNT	[110]
Magnetita Fe ₃ O ₄	Grafeno	MWCNT	[111]
Magnetita Fe ₃ O ₄	Zeolita	MWCNT	[112]
Magnetita Fe ₃ O ₄	Alúmina Al ₂ O ₃	MWCNT SWCNT	[113]
Magnetita Fe ₃ O ₄	Alúmina Al ₂ O ₃	CNT	[114]
Magnetita Fe ₃ O ₄	Surfactante	CNT	[115]
Magnetita Fe ₃ O ₄	Sustrato de silicio con una capa de óxido térmico	SWCNT	[116]
Magnetita Fe ₃ O ₄	Sustrato de silicio	SWCNT	[117]
Magnetita Fe ₃ O ₄	Sustrato de silicio	CNT	[118]
Magnetita Fe ₃ O ₄	Alúmina Al ₂ O ₃ Óxido de silicio SiO ₂	MWCNT	[119]
Magnetita Fe ₃ O ₄	Óxido de silicio SiO ₂	MWCNT	[120]
Magnetita Fe ₃ O ₄	Óxido de cobalto CoO	CNT	[121]
Magnetita Fe ₃ O ₄	Óxido de silicio SiO ₂	CNT	[122]
Magnetita Fe ₃ O ₄	Óxido de silicio SiO ₂	CNT	[123]
Magnetita Fe ₃ O ₄	Sustrato de silicio	CNT	[124]
Magnetita Fe ₃ O ₄ Hueca	Óxido de silicio SiO ₂	TWCNT	[125]
Magnetita Fe ₃ O ₄	Microcristales de silicata-1	CNT	[126]
Magnetita Fe ₃ O ₄	Sustrato de silicio	CNT	[125]
Magnetita Fe ₃ O ₄	Sustrato de silicio	VA-CNT	[127]
Magnetita Fe ₃ O ₄	Plantilla AAO	CNT	[128]
Magnetita Fe ₃ O ₄	Sustrato de silicio	VA-CNT	[129]
Magnetita Fe ₃ O ₄	Nps de carbono	CNT	[130]
Maghemita γ-Fe ₂ O ₃	Sustrato de silicio	MWCNT	[131]
Nanocristales de óxido de hierro	Alúmina Al ₂ O ₃ Óxido de silicio SiO ₂	CNT	[132]
Nps de óxido de hierro	Óxido de magnesio MgO	CNT	[133]
Nps de óxido de hierro	Alúmina Al ₂ O ₃	VA-CNT	[134]
Nps de óxido de hierro	Matriz de Nps de zirconia	SWCNT	[135]
Nps de óxido de hierro	Oxido de magnesio MgO	SWCNT DWCNT	[136]
Nps de óxido de hierro	Alúmina Al ₂ O ₃	CNT	[137]
Nps de óxido de hierro	Sustrato de silicio	CNT	[138]
Nanocluster de óxido de hierro	Sustrato de silicio	CNT	[139]
Nanocluster de óxido de hierro	Oblea de silicio cubierta con Al ₂ O ₃	MWCNT	[140]
Nanocluster de óxido de hierro	Película delgada micelar de copolímero en bloque	CNT	[141]
Óxidos de hierro FeOx	Alúmina Al ₂ O ₃	SWCNT	[142]

Conflicto de interés

Los autores declaran que no tienen ningún conflicto de interés.

Declaración de la Junta de Revisión Institucional

No aplica.

Declaración de consentimiento informado

No aplica.

References

- [1] A. Fürstner, "Iron catalysis in organic synthesis: A critical assessment of what it takes to make this base metal a multitasking champion," *ACS Cent. Sci.*, vol. 2, no. 11, pp. 778–789, Nov. 2016, doi: https://doi.org/10.1021/ACSCENTSCI.6B00272/ASSET/IMAGES/LARGE/OC-2016-00272T_0014.JPEG
- [2] R. Ricciardi, J. Huskens, W. Verboom, "Nanocatalysis in Flow," *ChemSusChem*, vol. 8, no. 16, pp. 2586–2605, Aug. 2015, doi: <https://doi.org/10.1002/CSSC.201500514>
- [3] J. O. Guevara-pulido, J. Caicedo, F. David, M. Vela, J. González, H. del Artículo, "Catálisis asimétrica, una nueva era en la síntesis de fármacos: Historia y evolución," *Revista Facultad de Ciencias Básicas*, vol. 13, no. 2, pp. 105–116, 2017, doi: <https://doi.org/10.18359/rfcb.2747>
- [4] L. Li et al., "Synthesis, properties, and environmental applications of nanoscale iron-based materials: A review," *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, vol. 36, no. 5, pp. 405–431, Oct. 2006, doi: <https://doi.org/10.1080/10643380600620387>
- [5] S. Zhang, L. Nguyen, Y. Zhu, S. Zhan, C. K. F. Tsung, and F. F. Tao, "In-situ studies of nanocatalysis," *Acc. Chem. Res.*, vol. 46, no. 8, pp. 1731–1739, Aug. 2013, doi: <https://doi.org/10.1021/AR300245G>
- [6] H. Woo, K. H. Park, "Recent developments in hybrid iron oxide–noble metal nanocatalysts for organic reactions," *Catal. Today*, vol. 278, pp. 209–226, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/J.CATTOD.2016.01.030>
- [7] T. Vangijzegem, D. Stanicki, S. Laurent, "Magnetic iron oxide nanoparticles for drug delivery: applications and characteristics," *Expert Opin. Drug Deliv.*, vol. 16, no. 1, pp. 69–78, Jan. 2019, doi: <https://doi.org/10.1080/17425247.2019.1554647>
- [8] C. Goswami, K. K. Hazarika, P. Bharali, "Transition metal oxide nanocatalysts for oxygen reduction reaction," *Mater. Sci. Energy Technol.*, vol. 1, no. 2, pp. 117–128, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/J.MSET.2018.06.005>
- [9] H. F. Orozco, "Síntesis, caracterización y recubrimiento de nanopartículas superparamagnéticas," proyecto fin de master, Universidad Autónoma de Zacatecas, 2018.
- [10] L. Wu, A. Mendoza-Garcia, Q. Li, S. Sun, "Organic Phase Syntheses of Magnetic Nanoparticles and Their Applications," *Chem. Rev.*, vol. 116, no. 18, pp. 10473–10512, Sep. 2016, doi: <https://doi.org/10.1021/ACS.CHEMREV.5B00687>
- [11] G. Priyadarshana, N. Kottegoda, A. Senaratne, A. De Alwis, V. Karunaratne, "Synthesis of magnetite nanoparticles by top-down approach from a high purity ore," *J. Nanomater.*, vol. 2015, 2015, doi: <https://doi.org/10.1155/2015/317312>
- [12] A. Ali et al., "Synthesis, characterization, applications, and challenges of iron oxide nanoparticles," *Nanotechnol. Sci. Appl.*, vol. 9, pp. 49–67, 2016, doi: <https://doi.org/10.2147/NSA.S99986>
- [13] C. Jiang et al., "Methane Catalytic Pyrolysis by Microwave and Thermal Heating over Carbon Nanotube-Supported Catalysts: Productivity, Kinetics, and Energy Efficiency," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 61, no. 15, pp. 5080–5092, Apr. 2022, doi: <https://doi.org/10.1021/ACS.IECR.1C05082>
- [14] K. S. Ibrahim, "Carbon nanotubes-properties and applications: a review," *Carbon Lett.*, vol. 14, no. 3, pp. 131–144, Jul. 2013, doi: <https://doi.org/10.5714/CL.2013.14.3.131>
- [15] E. T. Thostenson, Z. Ren, T. W. Chou, "Advances in the science and technology of carbon nanotubes and their composites: a review," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 61, no. 13, pp. 1899–1912, Oct. 2001, doi: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(01\)00094-X](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(01)00094-X)

- [16] E. F. Kukovitsky, S. G. L'vov, N. A. Sainov, V. A. Shustov, L. A. Chernozatonskii, "Correlation between metal catalyst particle size and carbon nanotube growth," *Chem. Phys. Lett.*, vol. 355, no. 5–6, pp. 497–503, Apr. 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/S0009-2614\(02\)00283-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2614(02)00283-X)
- [17] S. P. Patole, H. Kim, J. Choi, Y. Kim, S. Baik, J. B. Yoo, "Kinetics of catalyst size dependent carbon nanotube growth by growth interruption studies," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 96, no. 9, 2010, doi: <https://doi.org/10.1063/1.3330848>
- [18] M. T. Darby, M. Stamatakis, A. Michaelides, and E. C. H. Sykes, "Lonely Atoms with Special Gifts: Breaking Linear Scaling Relationships in Heterogeneous Catalysis with Single-Atom Alloys," *J. Phys. Chem. Lett.*, vol. 9, no. 18, pp. 5636–5646, 2018, doi: <https://doi.org/10.1021/ACS.JPCLETT.8B01888>
- [19] / Chorkendotff, J. W. Niemantsverdriet, *Concepts of Modern Catalysis and Kinetics Second*. Wiley, 2007.
- [20] S. Mousavi, M. H. Keshavarz, and S. Moeini, "Palladium doped with boron and phosphorus on activated carbon: a high-performance nanocatalyst for the hydrogenation of alkenes," *Mater. Today Chem.*, vol. 28, p. 101360, Mar. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/J.MTCHEM.2022.101360>
- [21] A. Zuliani, F. Ivars, and R. Luque, "Advances in Nanocatalyst Design for Biofuel Production," *ChemCatChem*, vol. 10, no. 9, pp. 1968–1981, May 2018, doi: <https://doi.org/10.1002/CCTC.201701712>
- [22] P. Prinsen and R. Luque, "Chapter 1 Introduction to Nanocatalysts," *RSC Catal. Ser.*, vol. 2019, no. 38, pp. 1–36, 2019, doi: <https://doi.org/10.1039/9781788016292-00001>
- [23] M. Behrens et al., "Performance improvement of nanocatalysts by promoter-induced defects in the support material: Methanol synthesis over Cu/ZnO:Al," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 135, no. 16, pp. 6061–6068, Apr. 2013, doi: <https://doi.org/10.1021/JA310456F>
- [24] C. S. Diercks, Y. Liu, K. E. Cordova, and O. M. Yaghi, "The role of reticular chemistry in the design of CO₂ reduction catalysts," *Nat. Mater.*, vol. 17, no. 4, pp. 301–307, Feb. 2018, doi: <https://doi.org/10.1038/s41563-018-0033-5>
- [25] G. Zhan, P. Li, H. C. Zeng, "Architectural Designs and Synthetic Strategies of Advanced Nanocatalysts," *Adv. Mater.*, vol. 30, no. 47, p. 1802094, Nov. 2018, doi: <https://doi.org/10.1002/ADMA.201802094>
- [26] S. Chaudhury, "Theoretical investigations of the dynamics of chemical reactions on nanocatalysts with multiple active sites," *ACS Publ.*, vol. 12, no. 6, p. 44, Mar. 2020, doi: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcclett.0c00316>
- [27] P. A. Sabatier, "Top-Down and Bottom-Up Approaches to Implementation Research: a Critical Analysis and Suggested Synthesis," *J. Public Policy*, vol. 6, no. 1, pp. 21–48, 1986, doi: <https://doi.org/10.1017/S0143814X00003846>
- [28] P. Shrimal, G. Jadeja, S. Patel, "A review on novel methodologies for drug nanoparticle preparation: Microfluidic approach," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 153, pp. 728–756, Jan. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/J.CHERD.2019.11.031>
- [29] A. D. Mihai, C. Chircov, A. M. Grumezescu, and A. M. Holban, "Magnetite Nanoparticles and Essential Oils Systems for Advanced Antibacterial Therapies," *Int. J. Mol. Sci.*, vol. 21, no. 19, p. 7355, Oct. 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/IJMS21197355>
- [30] Y. Wang et al., "A simple solid–liquid grinding/templating route for the synthesis of magnetic iron/graphitic mesoporous carbon composites," *Carbon N. Y.*, vol. 51, no. 1, pp. 397–403, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/J.CARBON.2012.08.073>
- [31] D. Chen, J. Li, X. Chen, J. Chen, and J. Zhong, "Grinding Synthesis of APbX₃ (A = MA, FA, Cs; X = Cl, Br, I) Perovskite Nanocrystals," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 11, no. 10, pp. 10059–10067, 2019, doi: <https://doi.org/10.1021/ACSAMI.8B19002>
- [32] D. Chen, S. Ni, and Z. Chen, "Synthesis of Fe₃O₄ nanoparticles by wet milling iron powder in a planetary ball mill," *China Particuology*, vol. 5, no. 5, pp. 357–358, Oct. 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/J.CPART.2007.05.005>
- [33] M. Raffi, A. Rumaiz, "Studies of the growth parameters for silver nanoparticle synthesis by inert gas condensation," *Cambridge*, vol. 22, no. 12, pp. 3378–3384, Dec. 2007, doi: <https://doi.org/10.1557/JMR.2007.0420>

- [34] W. P. Halperin, "Quantum size effects in metal particles," *Rev. Mod. Phys.*, vol. 58, no. 3, pp. 533–606, 1986, doi: <https://doi.org/10.1103/REVMODPHYS.58.533>
- [35] S. Panigrahi, S. Kundu, S. K. Ghosh, S. Nath, and T. Pal, "General method of synthesis for metal nanoparticles," *J. Nanoparticle Res.*, vol. 6, no. 4, pp. 411–414, Aug. 2004, doi: <https://doi.org/10.1007/S11051-004-6575-2>
- [36] M. S. Bakshi, "How Surfactants Control Crystal Growth of Nanomaterials," *Cryst. Growth Des.*, vol. 16, no. 2, pp. 1104–1133, Feb. 2016, doi: <https://doi.org/10.1021/ACS.CGD.5B01465>
- [37] N. T. K. Thanh, N. Maclean, and S. Mahiddine, "Mechanisms of nucleation and growth of nanoparticles in solution," *Chem. Rev.*, vol. 114, no. 15, pp. 7610–7630, Aug. 2014, doi: <https://doi.org/10.1021/CR400544S>
- [38] G. Oskam, "Metal oxide nanoparticles: synthesis, characterization and application," *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, vol. 37, no. 3, pp. 161–164, Mar. 2006, doi: <https://doi.org/10.1007/s10971-005-6621-2>
- [39] M. Niederberger, G. Garnweitner, "Organic reaction pathways in the nonaqueous synthesis of metal oxide nanoparticles," *Chemistry – A European Journal*, vol. 12, no. 28, pp. 7282–7302, Sep. 2006, doi: <https://doi.org/10.1002/chem.200600313>
- [40] V. Sachdeva, A. Monga, R. Vashisht, D. Singh, A. Singh, N. Bedi, "Iron Oxide Nanoparticles: The precise strategy for targeted delivery of genes, oligonucleotides and peptides in cancer therapy," *J. Drug Deliv. Sci. Technol.*, vol. 74, p. 103585, Aug. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/J.JDDST.2022.103585>
- [41] H. Stott Taylor, "A theory of the catalytic surface," *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, vol. 108, no. 745, pp. 105–111, May 1925, doi: <https://doi.org/10.1098/RSPA.1925.0061>
- [42] M. Che, C. O. Bennett, "The Influence of Particle Size on the Catalytic Properties of Supported Metals," *Adv. Catal.*, vol. 36, no. C, pp. 55–172, Jan. 1989, doi: [https://doi.org/10.1016/S0360-0564\(08\)60017-6](https://doi.org/10.1016/S0360-0564(08)60017-6)
- [43] G. L. Haller and D. E. Resasco, "Metal–Support Interaction: Group VIII Metals and Reducible Oxides," *Adv. Catal.*, vol. 36, no. C, pp. 173–235, Jan. 1989, doi: [https://doi.org/10.1016/S0360-0564\(08\)60018-8](https://doi.org/10.1016/S0360-0564(08)60018-8)
- [44] J. Grunes, J. Zhu, G. A. Somorjai, "Catalysis and nanoscience," *Chem. Commun.*, vol. 3, no. 18, pp. 2257–2260, Sep. 2003, doi: <https://doi.org/10.1039/B305719B>
- [45] G. Allaedini, S. M. Tasirin, P. Aminayi, Z. Yaakob, M. Z. Meor Talib, "Carbon nanotubes via different catalysts and the important factors that affect their production: A review on catalyst preferences," *Int. J. Nano Dimens.*, vol. 7, no. 3, pp. 186–200, Aug. 2016, doi: <https://doi.org/10.7508/IJND.2016.03.002>
- [46] Y. Magnin, A. Zappelli, H. Amara, F. Ducastelle, and C. Bichara, "Size Dependent Phase Diagrams of Nickel–Carbon Nanoparticles," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 115, no. 20, Nov. 2015, doi: <https://doi.org/10.1103/PHYSREVLETT.115.205502>
- [47] M. Morel, E. Mosquera, D. E. Diaz-Droguett, N. Carvajal, M. Roble, V. Rojas, R. Espinoza-González, "Mineral magnetite as precursor in the synthesis of multi-walled carbon nanotubes and their capabilities of hydrogen adsorption," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 40, pp. 15540–15548, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.09.112>
- [48] S. Cao, F. F. Tao, Y. Tang, Y. Li, J. Yu, "Size- and shape-dependent catalytic performances of oxidation and reduction reactions on nanocatalysts," *Chem. Soc. Rev.*, vol. 45, no. 17, pp. 4747–4765, Sep. 2016, doi: <https://doi.org/10.1039/C6CS00094K>
- [49] L. Yi, B. Yu, W. Yi, Y. Zhou, R. Ding, X. Wang, "Carbon-Supported Bimetallic Platinum-Iron Nanocatalysts: Application in Direct Borohydride/Hydrogen Peroxide Fuel Cell," *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol. 6, no. 7, 2018, doi: <https://doi.org/10.1021/ACSSUSCHEMENG.7B04438>
- [50] C. Wang et al., "Iron-Based Nanocatalysts for Electrochemical Nitrate Reduction," *Small Methods*, vol. 6, no. 10, Oct. 2022, doi: <https://doi.org/10.1002/SMTD.202200790>
- [51] L. Liu and A. Corma, "Confining isolated atoms and clusters in crystalline porous materials for catalysis," *Nat. Rev. Mater.* 2020 63, vol. 6, no. 3, pp. 244–263, 2020, doi: <https://doi.org/10.1038/s41578-020-00250-3>

- [52] N. Sun et al., “Multifunctional Tubular Organic Cage-Supported Ultrafine Palladium Nanoparticles for Sequential Catalysis,” *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 58, no. 50, pp. 18011–18016, 2019, doi: <https://doi.org/10.1002/ANIE.201908703>
- [53] R. A. Milescu et al., “The role of surface functionality of sustainable mesoporous materials Starbon® on the adsorption of toxic ammonia and sulphur gasses,” *Sustain. Chem. Pharm.*, vol. 15, p. 100230, Mar. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/J.SCP.2020.100230>
- [54] G. Gómez Millán et al., “Furfural production in a biphasic system using a carbonaceous solid acid catalyst,” *Appl. Catal. A Gen.*, vol. 585, p. 117180, Sep. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/J.APCATA.2019.117180>
- [55] M. J. Ndolomingo, R. Meijboom, “Noble and Base-Metal Nanoparticles Supported on Mesoporous Metal Oxides: Efficient Catalysts for the Selective Hydrogenation of Levulinic Acid to γ -Valerolactone,” *Catal. Letters*, vol. 149, no. 10, pp. 2807–2822, 2019, doi: <https://doi.org/10.1007/S10562-019-02790-Y>
- [56] T. Epicier, S. Koneti, P. Avenier, A. Cabiac, A. S. Gay, L. Roiban, “2D & 3D in situ study of the calcination of Pd nanocatalysts supported on delta-Alumina in an Environmental Transmission Electron Microscope,” *Catal. Today*, vol. 334, pp. 68–78, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/J.CATTOD.2019.01.061>
- [57] X. Du et al., “Size-dependent strong metal-support interaction in TiO₂ supported Au nanocatalysts,” *Nat. Commun.* 2020 111, vol. 11, no. 1, pp. 1–8, 2020, doi: <https://doi.org/10.1038/s41467-020-19484-4>
- [58] F. Naaz, U. Farooq, T. Ahmad, “Nanocatalysts”, *Ceria as an Efficient Nanocatalyst for Organic Transformations*, IntechOpen, 2019. doi: <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.82688>
- [59] R. Nemati, D. Elhamifar, A. Zarnegaryan, M. Shaker, “Core-shell structured magnetite silica-supported hexatungstate: A novel and powerful nanocatalyst for the synthesis of biologically active pyrazole derivatives,” *Appl. Organomet. Chem.*, vol. 35, no. 11, 2021, doi: <https://doi.org/10.1002/AOC.6409>
- [60] M. Daraie, M. M. Heravi, N. Sarmasti, “Synthesis of polymer-supported Zn(II) as a novel and green nanocatalyst for promoting click reactions and using design of experiment for optimization of reaction conditions,” *J. Macromol. Sci. Part A Pure Appl. Chem.*, vol. 57, no. 7, pp. 488–498, Jul. 2020, doi: <https://doi.org/10.1080/10601325.2020.1725389>
- [61] J. Xie, C. Lei, W. Chen, and B. Huang, “Conductive-polymer-supported palladium-iron bimetallic nanocatalyst for simultaneous 4-chlorophenol and Cr(VI) removal: Enhanced interfacial electron transfer and mechanism,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 424, p. 127748, Feb. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2021.127748>
- [62] M. H. Amin, “Relationship Between the Pore Structure of Mesoporous Silica Supports and the Activity of Nickel Nanocatalysts in the CO₂ Reforming of Methane,” *Catalysts*, doi: <https://doi.org/10.3390/catal10010051>
- [63] W. Zhang, M. K. S. Li, R. Wang, P. L. Yue, P. Gao, “Preparation of stable exfoliated Pt-clay nanocatalyst,” *Langmuir*, vol. 25, no. 14, pp. 8226–8234, Jul. 2009, doi: <https://doi.org/10.1021/LA900416V>
- [64] N. Wang et al., “Impregnating Subnanometer Metallic Nanocatalysts into Self-Pillared Zeolite Nanosheets,” *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 143, no. 18, pp. 6905–6914, 2021, doi: <https://doi.org/10.1021/JACS.1C00578>
- [65] R. Srivastava, “Synthesis and Characterization Techniques of Nanomaterials,” *Sage*, vol. 4, no. 1, pp. 17–27, 2012, doi: <https://doi.org/10.1080/19430892.2012.654738>
- [66] I. U. Din, M. A. Alotaibi, and A. I. Alharthi, “Green synthesis of methanol over zeolite based Cu nano-catalysts, effect of Mg promoter,” *Sustain. Chem. Pharm.*, vol. 16, p. 100264, Jun. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/J.SCP.2020.100264>
- [67] G. Gogoi et al., “Mixed valent copper oxide nanocatalyst on Zeolite-Y for mechanochemical oxidation, reduction and C–C bond formation reaction,” *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 326, p. 111392, Oct. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/J.MICROMESO.2021.111392>

- [68] C. Sarkar et al., "Interface Engineering of Graphene-Supported Cu Nanoparticles Encapsulated by Mesoporous Silica for Size-Dependent Catalytic Oxidative Coupling of Aromatic Amines," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 11, no. 12, pp. 11722–11735, Mar. 2019, doi: <https://doi.org/10.1021/ACSAMI.8B18675>
- [69] D. V. Quang, J. E. Lee, J. K. Kim, Y. N. Kim, G. N. Shao, and H. T. Kim, "A gentle method to graft thiol-functional groups onto silica gel for adsorption of silver ions and immobilization of silver nanoparticles," *Powder Technol.*, vol. 235, pp. 221–227, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2012.10.015>
- [70] P. Duel de Juan, "Síntesis y Caracterización de Nanomateriales Híbridos para la captura de Iones de interés Medioambiental," tesis doctoral, Universitat de les Illes Balears, 2022.
- [71] S. Xu et al., "Uniform, Scalable, High-Temperature Microwave Shock for Nanoparticle Synthesis through Defect Engineering," *Matter*, vol. 1, no. 3, pp. 759–769, Sep. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/J.MATT.2019.05.022>
- [72] R. Sharma, S. Dutta, S. Sharma, R. Zboril, "Fe₃O₄ (iron oxide)-supported nanocatalysts: synthesis, characterization and applications in coupling reactions," *ChemInform*, 2016, doi: <https://doi.org/10.1002/chin.201630262>
- [73] J. R. Peralta-Videa, L. Zhao, M. L. Lopez-Moreno, G. de la Rosa, J. Hong, and J. L. Gardea-Torresdey, "Nanomaterials and the environment: A review for the biennium 2008-2010," *J. Hazard. Mater.*, vol. 186, no. 1, pp. 1–15, Feb. 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2010.11.020>
- [74] C. W. Lim and I. S. Lee, "Magnetically recyclable nanocatalyst systems for the organic reactions," *Nano Today*, vol. 5, no. 5, pp. 412–434, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/J.NANTOD.2010.08.008>
- [75] B. Rahmani Vahid, M. Haghghi, J. Toghiani, and S. Alaei, "Hybrid-coprecipitation vs. combustion synthesis of Mg-Al spinel based nanocatalyst for efficient biodiesel production," *Energy Convers. Manag.*, vol. 160, pp. 220–229, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2018.01.030>
- [76] S. Tazikeh, A. Akbari, A. Talebi, "Synthesis and characterization of tin oxide nanoparticles via the Coprecipitation method," *Materials Science-Poland*, vol. 32, no. 1, pp. 98–101, 2014, doi: <https://doi.org/10.2478/s13536-013-0164-y>
- [77] R. Shelat, S. Chandra, and A. Khanna, "Detailed toxicity evaluation of β -cyclodextrin coated iron oxide nanoparticles for biomedical applications," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 110, pp. 357–365, Apr. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/J.IJBIOMAC.2017.09.067>
- [78] J. M. Costa, A. F. de Almeida Neto, "Nanocatalysts deposition assisted by supercritical carbon dioxide technology: A review," *Synth. Met.*, vol. 271, p. 116627, Jan. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/J.SYNTHMET.2020.116627>
- [79] M. W. Iqbal, Y. Yu, D. S. A. Simakov, "Enhancing the surface area stability of the cerium oxide reverse water gas shift nanocatalyst via reverse microemulsion synthesis," *Catal. Today*, vol. 407, pp. 230–243, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/J.CATTOD.2021.11.029>
- [80] C. Liu, Y. Li, Y. Zhang, X. Zeng, J. Chen, and L. Shao, "Synthesis of Ni-CeO₂ nanocatalyst by the microemulsion-gas method in a rotor-stator reactor," *Chem. Eng. Process. - Process Intensif.*, vol. 130, pp. 93–100, Aug. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/J.CEP.2018.06.001>
- [81] A. M. Prodan, S. L. Iconaru, C. S. Ciobanu, M. C. Chifiriuc, M. Stoicea, D. Predoi, "Iron oxide magnetic nanoparticles: Characterization and toxicity evaluation by in vitro and in vivo assays," *J. Nanomater.*, 2013, doi: <https://doi.org/10.1155/2013/587021>
- [82] Y. H. Chung and S. Jou, "Carbon nanotubes from catalytic pyrolysis of polypropylene," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 92, no. 1, pp. 256–259, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/J.MATCHEMPHYS.2005.01.023>
- [83] Q. Kong, J. Zhang, "Synthesis of straight and helical carbon nanotubes from catalytic pyrolysis of polyethylene," *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 92, no. 11, pp. 2005–2010, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/J.POLYMDEGRADSTAB.2007.08.002>

- [84] M. Raffi, A. K. Rumaiz, M. M. Hasan, and S. I. Shah, "Studies of the growth parameters for silver nanoparticle synthesis by inert gas condensation," *J. Mater. Res.*, vol. 22, no. 12, pp. 3378–3384, 2007, doi: <https://doi.org/10.1557/JMR.2007.0420>
- [85] G. Elordi, M. Olazar, R. Aguado, G. Lopez, M. Arabiourrutia, and J. Bilbao, "Catalytic pyrolysis of high density polyethylene in a conical spouted bed reactor," *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, vol. 79, no. 1–2, pp. 450–455, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2006.11.010>
- [86] J. Kong, A. M. Cassell, and H. Dai, "Chemical vapor deposition of methane for single-walled carbon nanotubes," *Chem. Phys. Lett.*, vol. 292, no. 4–6, pp. 567–574, 1998, doi: [https://doi.org/10.1016/S0009-2614\(98\)00745-3](https://doi.org/10.1016/S0009-2614(98)00745-3)
- [87] Y. Li, W. Kim, Y. Zhang, M. Rolandi, D. Wang, and H. Dai, "Growth of single-walled carbon nanotubes from discrete catalytic nanoparticles of various sizes," *J. Phys. Chem. B*, vol. 105, no. 46, pp. 11424–11431, Nov. 2001, doi: <https://doi.org/10.1021/JP012085B>
- [88] Y. Homma, T. Yamashita, P. Finnie, M. Tomita, and T. Ogino, "Single-walled carbon nanotube growth on silicon substrates using nanoparticle catalysts," *Japanese J. Appl. Physics, Part 2 Lett.*, vol. 41, no. 1 A/B, Jan. 2002, doi: <https://doi.org/10.1143/JJAP.41.L89/META>
- [89] W. Kim et al., "Synthesis of ultralong and high percentage of semiconducting single-walled carbon nanotubes," *ACS Publ.*, vol. 2, no. 7, pp. 703–708, Jul. 2002, doi: <https://doi.org/10.1021/nl025602q>
- [90] F. Danafar, A. Fakhru'l-Razi, M. A. M. Salleh, and D. R. A. Biak, "Fluidized bed catalytic chemical vapor deposition synthesis of carbon nanotubes-A review," *Chem. Eng. J.*, vol. 155, no. 1–2, pp. 37–48, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2009.07.052>
- [91] E. Lamouroux, P. Serp, Y. Kihn, and P. Kalck, "New efficient Fe₂O₃ and FeMo supported OMCVD catalysts for single wall carbon nanotubes growth," *Catal. Commun.*, vol. 7, no. 8, pp. 604–609, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/J.CATCOM.2006.01.020>
- [92] M. H. Khedr, K. S. Abdel Halim, and N. K. Soliman, "Effect of temperature on the kinetics of acetylene decomposition over reduced iron oxide catalyst for the production of carbon nanotubes," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 255, no. 5 PART 1, pp. 2375–2381, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2008.07.096>
- [93] V. I. Alexiadis, X. E. Verykios, "Influence of structural and preparation parameters of Fe₂O₃/Al₂O₃ catalysts on rate of production and quality of carbon nanotubes," *Mater. Chem. Phys.*, vol. 117, no. 2–3, pp. 528–535, Oct. 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/J.MATCHEMPHYS.2009.06.033>
- [94] K. Kouravelou and X. Verykios, "Dynamic Study of Gas-Phase Species during Single-Walled Carbon Nanotubes Production by Chemical Vapor Deposition of Ethanol," *ECS Trans.*, vol. 25, no. 8, pp. 997–1005, Sep. 2009, doi: <https://doi.org/10.1149/1.3207698/META>
- [95] N. Publications, S. S. Kim, P. B. Amama, T. Fisher, and T. S. Fisher, "Preferential biofunctionalization of carbon nanotubes grown by microwave plasma-enhanced CVD," *ACS Publ.*, vol. 114, no. 21, pp. 9596–9602, Jun. 2010, doi: <https://doi.org/10.1021/jp912092n>
- [96] W. Zhao, D. N. Seo, H. T. Kim, and I. J. Kim, "Characterization of multi-walled carbon nanotubes (MWNTs) synthesized by CCVD using zeolite template from acetylene," *J. Ceram. Soc. Japan*, vol. 118, no. 1383, pp. 983–988, 2010, doi: <https://doi.org/10.2109/JCERSJ2.118.983>
- [97] N. D. Hien, "Optical properties of a single quantum well with Pöschl–Teller confinement potential," *Phys. E Low-dimensional Syst. Nanostructures*, vol. 145, p. 115504, Jan. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/J.PHYSE.2022.115504>
- [98] E. Teblum, Y. Gofer, C. L. Pint, and G. D. Nessim, "Role of catalyst oxidation state in the growth of vertically aligned carbon nanotubes," *J. Phys. Chem. C*, vol. 116, no. 46, pp. 24522–24528, Nov. 2012, doi: <https://doi.org/10.1021/JP305169B>
- [99] S. H. Liu et al., "Template effect of hydrolysis of the catalyst precursor on growth of carbon nanotube arrays," *J. Colloid Interface Sci.*, vol. 374, no. 1, pp. 34–39, May 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/J.JCIS.2012.02.005>
- [100] F. Dillon, M. Copley, A. A. Koós, P. Bishop, and N. Grobert, "Flame spray pyrolysis generated transition metal oxide nanoparticles as catalysts for the growth of carbon nanotubes," *RSC Adv.*, vol. 3, no. 43, pp. 20040–20045, Nov. 2013, doi: <https://doi.org/10.1039/C3RA40773J>

- [101] M. Song, B. Liu, S. Huang, and A. Zhou, "Experimental study of seismic performance on three-story prestressed fabricated concrete frame," *Adv. Mater. Res.*, vol. 250–253, pp. 1287–1292, 2011, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.250-253.1287>
- [102] W. W. Liu, T. Adam, A. Aziz, S. P. Chai, A. R. Mohamed, and U. Hashim, "Formation of carbon nanotubes from methane decomposition: Effect of concentration of Fe₃O₄ on the diameters distributions," *Adv. Mater. Res.*, vol. 832, pp. 62–67, 2014, doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.832.62>
- [103] S. Shukrullah, M. Y. Naz, N. M. Mohamed, K. A. Ibrahim, A. Ghaffar, and N. M. AbdEl-Salam, "Synthesis of MWCNT forests with alumina-supported Fe₂O₃ catalyst by using a floating catalyst chemical vapor deposition technique," *J. Nanomater.*, vol. 2019, 2019, doi: <https://doi.org/10.1155/2019/4642859>
- [104] S. Shukrullah, M. Y. Naz, N. M. Mohamed, K. A. Ibrahim, A. Ghaffar, and N. M. AbdEl-Salam, "Production of bundled CNTs by floating a compound catalyst in an atmospheric pressure horizontal CVD reactor," *Results Phys.*, vol. 12, pp. 1163–1171, Mar. 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/J.RINP.2019.01.001>
- [105] Y. Suda, T. Iida, H. Takikawa, ... T. H.-A. C., and undefined 2016, "Effects of catalyst support and chemical vapor deposition condition on synthesis of multi-walled carbon nanocoils," *AIP Conf. Proc.*, vol. 1709, p. 20008, Feb. 2016, doi: <https://doi.org/10.1063/1.4941207>
- [106] S. McCaldin, M. Bououdina, D. M. Grant, and G. S. Walker, "The effect of processing conditions on carbon nanostructures formed on an iron-based catalyst," *Carbon*, vol. 44, no. 11, pp. 2273–2280, Sep. 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/J.CARBON.2006.02.030>
- [107] F. Le Normand et al., "Aligned carbon nanotubes catalytically grown on iron-based nanoparticles obtained by laser-induced CVD," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 254, no. 4, pp. 1058–1066, Dec. 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2007.08.054>
- [108] R. Atchudan, B. Cha, N. Lone, J. Kim, J. Joo, "Synthesis of high-quality carbon nanotubes by using monodisperse spherical mesoporous silica encapsulating iron oxide nanoparticles," *Korean Journal of Chemical Engineering*, vol. 36, no. 1, pp. 157–165, 2018, doi: <https://doi.org/10.1007/s11814-018-0200-z>
- [109] J. Z. Wen et al., "Experimental study of catalyst nanoparticle and single walled carbon nanotube formation in a controlled premixed combustion," *J. Mater. Chem.*, doi: <https://doi.org/10.1039/b717067j>
- [110] T. Tsuji, K. Hata, D. N. Futaba, S. Sakurai, "Additional obstacles in carbon nanotube growth by gas-flow directed chemical vapour deposition unveiled through improving growth density," *Nanoscale Adv.*, vol. 1, no. 10, pp. 4076–4081, Oct. 2019, doi: <https://doi.org/10.1039/C9NA00209J>
- [111] S. Shukrullah, N. M. Mohamed, Y. Khan, M. Y. Naz, A. Ghaffar, I. Ahmad, "Effect of Gas Flowrate on Nucleation Mechanism of MWCNTs for a Compound Catalyst," *J. Nanomater.*, vol. 2017, 2017, doi: <https://doi.org/10.1155/2017/3407352>
- [112] M. Morel et al., "Mineral magnetite as precursor in the synthesis of multi-walled carbon nanotubes and their capabilities of hydrogen adsorption," *International Journal of Hydrogen Energy*, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.09.112>
- [113] Z. Aslam, X. Li, R. Brydson, B. Rand, U. Falke, and A. Bleloch, "Supported Catalytic Growth of SWCNTs using the CVD Method," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 26, no. 1, p. 139, 2006, doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/26/1/033>
- [114] X. Wang et al., "Coating alumina on catalytic iron oxide nanoparticles for synthesizing vertically aligned carbon nanotube arrays," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 3, no. 11, pp. 4180–4184, 2011, doi: <https://doi.org/10.1021/AM201082M>
- [115] Y. S. Cho, G. S. Choi, S. Y. Hong, and D. Kim, "Carbon nanotube synthesis using a magnetic fluid via thermal chemical vapor deposition," *J. Cryst. Growth*, vol. 243, no. 1, pp. 224–229, 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(02\)01496-3](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(02)01496-3)
- [116] Y. Kobayashi, H. Nakashima, D. Takagi, and Y. Homma, "CVD growth of single-walled carbon nanotubes using size-controlled nanoparticle catalyst," *Thin Solid Films*, vol. 464–465, pp. 286–289, 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/J.TSF.2004.06.045>
- [117] L. Jodin, A. C. Dupuis, E. Rouvière, and P. Reiss, "Influence of the catalyst type on the growth of carbon nanotubes via methane chemical vapor deposition," *J. Phys. Chem. B*, vol. 110, no. 14, pp. 7328–7333, 2006, doi: <https://doi.org/10.1021/JP056793Z>

- [118] P. N. Minh, N. Van Chuc, P. N. Hong, N. T. T. Tam, P. H. Khoi, "New technique for the synthesis of carbon nanotubes," *J. Korean Phys. Soc.*, vol. 53, no. 5, pp. 2725–2730, 2008, doi: <https://doi.org/10.3938/JKPS.53.2725>
- [119] D. Roy and K. Ram, "Magnetite nanoparticles by organic-phase synthetic route for carbon nanotube growth," *Synth. Met.*, vol. 159, no. 3–4, pp. 343–346, Feb. 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/J.SYNTHMET.2008.09.010>
- [120] M. Felisberto, L. Sacco, I. Mondragon, G. H. Rubiolo, R. J. Candal, and S. Goyanes, "The growth of carbon nanotubes on large areas of silicon substrate using commercial iron oxide nanoparticles as a catalyst," *Mater. Lett.*, vol. 64, no. 20, pp. 2188–2190, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/J.MATLET.2010.07.016>
- [121] K. Mandel et al., "Customised transition metal oxide nanoparticles for the controlled production of carbon nanostructures," *RSC Adv.*, doi: <https://doi.org/10.1039/c2ra01324j>
- [122] M. Kushida, T. Koide, I. Osada, Y. Imaizumi, K. Kawasaki, and T. Sugawara, "Fabrication of Fe₃O₄/SiO₂ core-shell nanoparticle monolayer as catalyst for carbon nanotube growth using Langmuir-Blodgett technique," *Thin Solid Films*, vol. 537, pp. 252–255, Jun. 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/J.TSF.2013.04.031>
- [123] M. Ohashi, T. Sugawara, K. Kawasaki, and M. Kushida, "Synthesis and diameter control of vertically-aligned carbon nanotube growth from Langmuir-Blodgett films deposited Fe₃O₄@SiO₂ core-shell nanoparticles," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 53, no. 2, 2014, doi: <https://doi.org/10.7567/JJAP.53.02BD09/META>
- [124] T. Thanh Cao et al., "Effects of ferrite catalyst concentration and water vapor on growth of vertically aligned carbon nanotube," *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 2014, doi: <https://doi.org/10.1088/2043-6262/5/4/045009>
- [125] A. Baliyan, Y. Nakajima, T. Fukuda, T. Uchida, T. Hanajiri, and T. Maekawa, "Synthesis of an ultradense forest of vertically aligned triple-walled carbon nanotubes of uniform diameter and length using hollow catalytic nanoparticles," *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 136, no. 3, pp. 1047–1053, Jan. 2014, doi: <https://doi.org/10.1021/JA410794P>
- [126] W. Zhao, B. Basnet, S. Kim, and I. J. Kim, "Synthesis of vertically aligned carbon nanotubes on silicalite-1 monolayer-supported substrate," *J. Nanomater.*, vol. 2014, 2014, doi: <https://doi.org/10.1155/2014/327398>
- [127] W. Zhao, D. N. Seo, J. Gong, S. Kim, and I. J. Kim, "Synthesis of vertically-aligned CNT arrays from diameter-controlled Fe₃O₄ nanoparticles," *J. Ceram. Soc. Japan*, vol. 122, no. 1423, pp. 187–191, 2014, doi: <https://doi.org/10.2109/JCERSJ2.122.187>
- [128] D. M. Tang et al., "Structural changes in iron oxide and gold catalysts during nucleation of carbon nanotubes studied by in situ transmission electron microscopy," *ACS Nano*, vol. 8, no. 1, pp. 292–301, Jan. 2014, doi: <https://doi.org/10.1021/NN403927Y>
- [129] K. Nakamura, N. Kuriyama, S. Takagiwa, T. Sato, and M. Kushida, "Film fabrication of Fe or Fe₃O₄ nanoparticles mixed with palmitic acid for vertically aligned carbon nanotube growth using Langmuir-Blodgett technique," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 55, no. 3, Mar. 2016, doi: <https://doi.org/10.7567/JJAP.55.03DD06/META>
- [130] T. Endah Saraswati, O. Dewi Indah Prasiwi, A. Masykur, and M. Anwar, "Bifunctional catalyst of graphite-encapsulated iron compound nanoparticle for magnetic carbon nanotubes growth by chemical vapor deposition," *AIP Conference Proceedings*, vol. 1788, Jan. 2017, doi: <https://doi.org/10.1063/1.4968282>
- [131] M. C. Altay and S. Eroglu, "Thermodynamic analysis and chemical vapor deposition of multi-walled carbon nanotubes from pre-heated CH₄ using Fe₂O₃ particles as catalyst precursor," *J. Cryst. Growth*, vol. 364, pp. 40–45, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/J.JCRYSGRO.2012.11.062>
- [132] S. S. Lee et al., "Control over the diameter, length, and structure of carbon nanotube carpets using aluminum ferrite and iron oxide nanocrystals as catalyst precursors," *J. Phys. Chem. C*, vol. 116, no. 18, pp. 10287–10295, May 2012, doi: <https://doi.org/10.1021/JP212404J>
- [133] B. Bahrami, A. Khodadadi, Y. Mortazavi, and M. Esmaili, "Short time synthesis of high quality carbon nanotubes with high rates by CVD of methane on continuously emerged iron nanoparticles," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 257, no. 23, pp. 9710–9716, Sep. 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2011.05.086>

- [134] N. T. Alvarez et al., “Uniform large diameter carbon nanotubes in vertical arrays from premade near-monodisperse nanoparticles,” *ACS Publ.*, vol. 23, no. 15, pp. 3466–3475, Aug. 2011, doi: <https://doi.org/10.1021/cm200664g>
- [135] S. Han et al., “Diameter-controlled synthesis of discrete and uniform-sized single-walled carbon nanotubes using monodisperse iron oxide nanoparticles embedded in zirconia nanoparticle arrays as catalysts,” *J. Phys. Chem. B*, vol. 108, no. 24, pp. 8091–8095, Jun. 2004, doi: <https://doi.org/10.1021/JP037634N>
- [136] H. Ago, K. Nakamura, S. Imamura, and M. Tsuji, “Growth of double-wall carbon nanotubes with diameter-controlled iron oxide nanoparticles supported on MgO,” *Chem. Phys. Lett.*, vol. 391, no. 4–6, pp. 308–313, Jun. 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/J.CPLETT.2004.04.110>
- [137] P. Pandey, M. Datta, B. D. Malhotra, “Prospects of nanomaterials in biosensors,” *Anal. Lett.*, vol. 41, no. 2, pp. 159–209, Jan. 2008, doi: <https://doi.org/10.1080/00032710701792620>
- [138] X. P. Zou et al., “Selective growth of carbon nanotube on silicon substrates,” *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 2006, doi: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(06\)60214-8](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(06)60214-8)
- [139] X. Liu, T. P. Bigioni, Y. Xu, A. M. Cassell, and B. A. Gruden, “Vertically aligned dense carbon nanotube growth with diameter control by block copolymer micelle catalyst templates,” *J. Phys. Chem. B*, vol. 110, no. 41, pp. 20102–20106, Oct. 2006, doi: <https://doi.org/10.1021/JP0647378>
- [140] R. D. Bennett, A. J. Hart, A. C. Miller, P. T. Hammond, D. J. Irvine, and R. E. Cohen, “Creating patterned carbon nanotube catalysts through the microcontact printing of block copolymer micellar thin films,” *Langmuir*, vol. 22, no. 20, pp. 8273–8276, Sep. 2006, doi: <https://doi.org/10.1021/LA061054A>
- [141] R. D. Bennett, A. J. Hart, R. E. Cohen, “Controlling the morphology of carbon nanotube films by varying the areal density of catalyst nanoclusters using block-copolymer micellar thin films,” *Adv. Mater.*, vol. 18, no. 17, pp. 2274–2279, 2006, doi: <https://doi.org/10.1002/ADMA.200600975>
- [142] S. M. Tan, S. P. Chai, W. W. Liu, and A. R. Mohamed, “Effects of FeOx, CoOx, and NiO catalysts and calcination temperatures on the synthesis of single-walled carbon nanotubes through chemical vapor deposition of methane,” *J. Alloys Compd.*, vol. 477, no. 1–2, pp. 785–788, May 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2008.10.114>