

INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA QUÍMICA. DOSIER I

Coordinado por los Drs. Rafael Rojas Herrera, David Betancur Ancona y Julio César Sacramento Rivero.

Nanopartículas de sílice mesoporosa: Pequeños gigantes con grandes aplicaciones *Mesoporous silica nanoparticles: small giants with big applications*

Cristian Carrera-Figueiras, David Muñoz-Rodríguez, Jesús Alberto Barrón-Zambrano, Adriana Esparza-Ruiz, Yamile Pérez-Padilla, William Alejandro Talavera-Pech, Julio César Sánchez-Pech, Juan Antonio Juárez-Moreno, Martha Dzib Vivas y Alejandro Avila-Ortegas

Resumen

Las nanopartículas de sílice mesoporosas (MSNs por sus siglas en inglés) son materiales diminutos compuestos de sílice (SiO_2) con una estructura porosa altamente ordenada, ideales para diversas aplicaciones gracias a su gran área superficial interna. Estos poros se generan durante la formación y depósito del SiO_2 sobre andamios micelares formados con jabón y agua. Las MSNs tienen un enorme potencial en la administración controlada y/o dirigida de fármacos, así como en sistemas de diagnóstico. Estos materiales pudieran ser cruciales en la protección del medio ambiente por su alta capacidad de remover diversos contaminantes en agua y aire por adsorción. También, por su estructura las convierte en excelentes materiales para elaborar catalizadores que aumentan la velocidad de diversas reacciones químicas. A pesar de su gran potencial, todavía persisten desafíos relacionados con la toxicidad y la estabilidad



a largo plazo de las MSNs. Estudios futuros se centrarán en superar estos obstáculos y ampliar aún más sus potenciales aplicaciones.

Palabras clave: Nanopartículas de sílice mesoporosas, Administración controlada y dirigida de fármacos, Diagnóstico biomédico, Remediación ambiental, Catálisis.

Abstract

Mesoporous silica nanoparticles (MSNs) are tiny materials composed of silica (SiO_2) with a highly ordered porous structure, ideal for various applications due to their large internal surface area. These pores are generated during the formation and deposition of SiO_2 on micellar scaffolds formed with soap and water. MSNs have enormous potential in controlled and/or targeted drug delivery and diagnostic systems. These materials could be crucial in environmental protection due to their high capacity to remove various pollutants in water and air by adsorption. Also, their structure makes them excellent materials for making catalysts that increase the speed of various chemical reactions. Despite their extraordinary potential, there are still challenges related to the toxicity and long-term stability of MSNs. Future studies will focus on overcoming these obstacles and expanding their potential applications.

Keywords: Mesoporous silica nanoparticles, Controlled and targeted drug delivery, Biomedical diagnostics, Environmental remediation, Catalysis.

Introducción

Nanopartículas de sílice mesoporosas: Pequeñas maravillas con un gran potencial

En el mundo de la nanotecnología, donde lo increíblemente pequeño encierra inmensas posibilidades, las nanopartículas mesoporosas de sílice han surgido como un área de investigación cautivadora. Estas diminutas partículas compuestas de sílice o SiO_2 poseen singulares estructuras en forma de panal y sus extraordinarias propiedades, están a punto de revolucionar diversos campos, desde la medicina hasta las ciencias medioambientales.

Adentrémonos en el fascinante mundo de las nanopartículas mesoporosas de sílice y exploremos sus posibles aplicaciones.

¿Qué son las nanopartículas de sílice mesoporosa?

Son partículas de tamaño nanométrico (una mil millonésima parte de 1 metro) compuestas de sílice que es un compuesto químico formado por silicio y oxígeno (SiO_2) que se pueden encontrar de forma natural en el medioambiente o bien se pueden fabricar en un laboratorio. Son una clase de materiales altamente porosos y con un volumen de poro alto; llamados mesoporosos por tener tamaños de poro entre 2 y 50 nanómetros. Imagina que tienes una esponja, pero en lugar de tener solo unos pocos agujeros grandes, tiene muchísimos agujeros diminutos por todas partes. ¡Tantos que, si pudieras extender toda su superficie interna, cubriría una cancha de fútbol entera! Eso es lo que significa un material con un área superficial extremadamente alta. Ahora, piensa en todos esos agujeritos como pequeñas habitaciones vacías dentro de la esponja. Todas esas habitaciones juntas forman un gran volumen de espacio vacío dentro de la esponja, eso es lo que llamamos un gran volumen de poro. En la Figura 1 se representan los diversos tipos de nanopartículas mesoporosas de sílice que poseen estructuras y características distintivas como lo son las nanopartículas del tipo MCM-41, MCM-48, SBA-15 y SBA-16, entre otras.

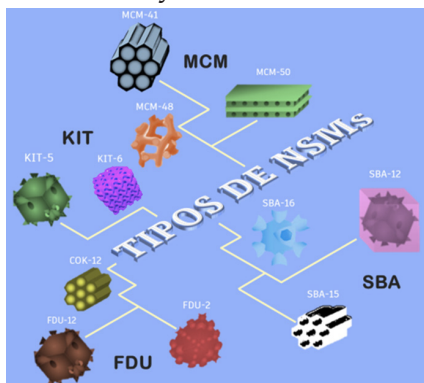


Figura 1. Diferentes tipos de nanopartículas mesoporosas de sílice.

Síntesis de Nanopartículas Mesoporosas de Silice (ej. MCM-41, MCM-48, SBA-15, SBA-16)

El desarrollo de la sílice mesoporosa (SiO_2) comenzó a destacarse a principios de la década de 1990 con el descubrimiento de materiales

como el MCM-41 y MCM-48, por parte de la compañía Mobil (de ahí el nombre MCM, que son siglas en inglés de Mobil Composition of Matter), y las del tipo SBA-15 y SBA-16 que toman su nombre del inglés Santa Barbara Amorphous (pues fueron desarrolladas en la Universidad de California en Santa Barbara). La síntesis de las nanopartículas de sílice mesoporosa (MSNs) es un proceso que se pueda resumir en dos etapas que son clave para determinar las propiedades finales de estos materiales. En la primera etapa, la concentración de jabón (surfactante) en agua debe alcanzar un nivel adecuado que permita la formación de arreglos micelares cilíndricos (Figura 2a). En la segunda etapa tiene lugar un conjunto de reacciones químicas llamadas sol-gel que transforman al tetraetilortosilicato (TEOS) en sílice (SiO_2) que se deposita sobre cilindros micelares ordenados en columnas hexagonales. Al final, el surfactante es removido y se obtiene una estructura sólida que se encuentra llena de poros que están listos para atrapar sustancias entre ellos o cumplir otras funciones (Figura 2b)(2).

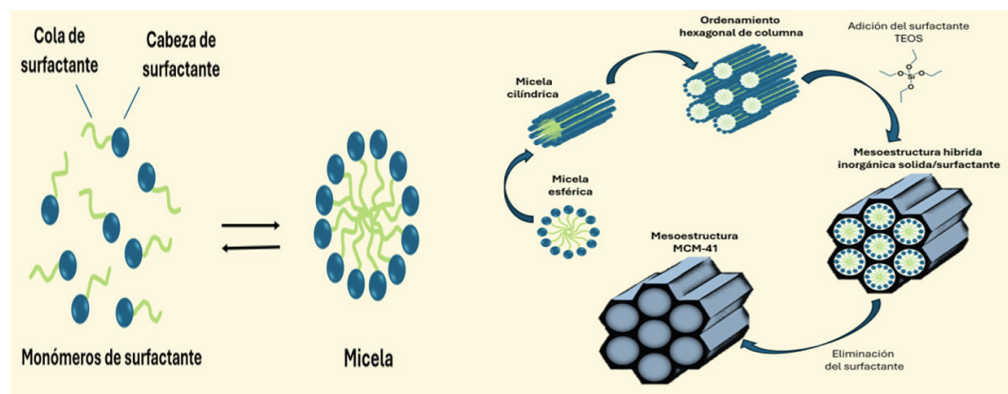


Figura 2. a) Formación de micelas a partir de monómeros de surfactante en medio acuoso, b) Formación de partículas de SiO_2 mesoporosas (MCM-41) a través de la hidrólisis y condensación del TEOS sobre columnas hexagonales formadas de micelas.

Usando la técnica de sol-gel, es posible controlar el tamaño y la disposición de los poros que existen dentro de las MSNs modificando el tipo y concentración del surfactante, así como la temperatura. En este sentido, las diferentes geometrías mostradas en la Figura 1 se pueden obtener variando la proporción y la naturaleza de las sustancias empleadas.

- MCM-41: Se utiliza un surfactante con carga positiva como el cloruro de cetiltrimetilamonio (CTAB) y condiciones alcalinas.
- MCM-48: Similar a MCM-41, pero se ajusta la relación surfactante/TEOS para obtener una estructura cúbica.
- SBA-15: Se utiliza un polímero como surfactante en condiciones ácidas. Esto da lugar a poros más grandes y una mayor estabilidad térmica.
- SBA-16: Similar a SBA-15, pero se ajusta la relación surfactante/TEOS para obtener una estructura cúbica.

La versatilidad de la técnica de sol-gel permite diseñar nanopartículas de SiO₂ para aplicaciones específicas. Esta técnica esquematizada en la Figura 3 comprende en una serie de reacciones de descomposición de compuestos alcoxisilanos (ejem. TEOS) que son conocidos como precursores.

Pasos generales de la síntesis por sol-gel:

1. Hidrólisis. La hidrólisis es una reacción química que ocurre cuando una mezcla de agua/alcohol descomponen al TEOS (hidrólisis) para formar sílice. Esta hidrólisis forma un sol (suspensión de partículas pequeñas de sílice en un medio líquido) que se genera alrededor de las micelas formadas previamente por la disolución del surfactante en agua.
2. Condensación: Los productos generados de la hidrólisis del TEOS condensan alrededor de las micelas, formando una red de sílice inorgánica tridimensional en el medio líquido llamado gel.
- 3-4. Envejecimiento y secado: El gel se deja envejecer a una temperatura determinada para permitir que la estructura tridimensional de SiO₂ se termine de condensar. Terminada el proceso de gelación, se separa el líquido de las partículas de sílice ya sea por secado supercrítico, térmico o secado por liofilización
5. Calcinación o extracción: Las nanopartículas de sílice secas son sujetas a un calentamiento a altas temperaturas (500-600°C) conocida como calcinación para descomponer las moléculas orgánicas de surfactante o jabón con las que se formaba las micelas que funcionaron como templates. De esta forma se generaron espacios libres que constituyen los poros de

las nanopartículas de sílice que, por su tamaño de poro, como habíamos mencionado con anterioridad se denominan mesoporos.

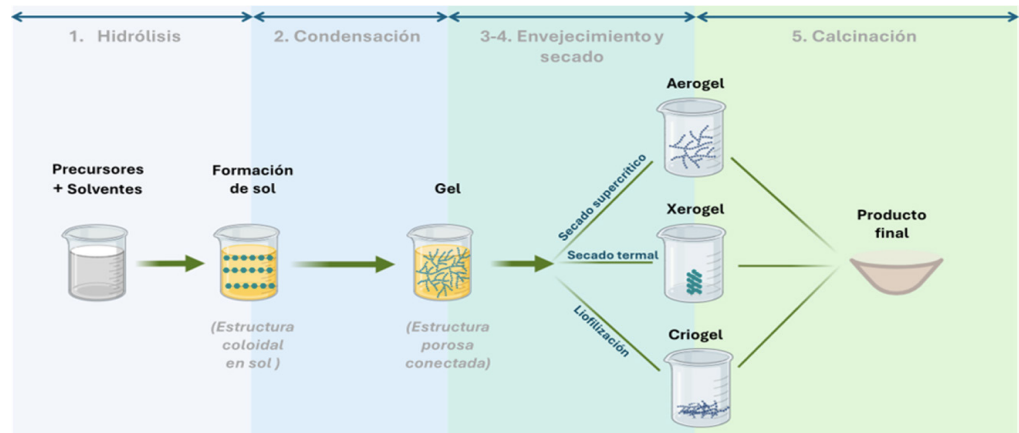


Figura 3. Esquema de los pasos generales para las síntesis de sílice (SiO_2) por el método de sol-gel.

La magia de los mesoporos

La magia de las nanopartículas de sílice mesoporosa reside en sus excepcionales propiedades, que se derivan de sus singulares estructuras porosas. Estas propiedades incluyen:

- **Elevada área superficial:** La gran superficie interna de las nanopartículas de sílice mesoporosas les permite adsorber una gran cantidad de sustancias que van desde fármacos hasta contaminantes en medio acuosos.
- **Tamaño de poro ajustable:** El tamaño de los poros de estas nanopartículas no es fijo, sino que puede alterarse durante la síntesis, lo que significa que es posible la optimización para ciertas propiedades para lograr aplicaciones específicas.
- **Biocompatibilidad:** Muchos tipos de nanopartículas de sílice mesoporosa se consideran biocompatibles, lo que implica que no representan un riesgo para la salud humana.
- **Propiedades ópticas:** Algunas de las sílices mesoporosas pueden ser alteradas para proporcionar características ópticas que las hagan adecuadas para técnicas de detección e imagenología.

INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA QUÍMICA. DOSIER I

Coordinado por los drs. Rafael Rojas Herrera, David Betancur Ancona y Julio César Sacramento Rivero.

Nanopartículas de sílice mesoporosa: Pequeños gigantes con grandes aplicaciones *Mesoporous silica nanoparticles: small giants with big applications*

Cristian Carrera-Figueiras, David Muñoz-Rodríguez, Jesús Alberto Barrón-Zambrano, Adriana Esparza-Ruiz, Yamile Pérez-Padilla, William Alejandro Talavera-Pech, Julio César Sánchez-Pech, Juan Antonio Juárez-Moreno, Martha Dzib Vivas y Alejandro Avila-Ortegas

Resumen

Las nanopartículas de sílice mesoporosas (MSNs por sus siglas en inglés) son materiales diminutos compuestos de sílice (SiO_2) con una estructura porosa altamente ordenada, ideales para diversas aplicaciones gracias a su gran área superficial interna. Estos poros se generan durante la formación y depósito del SiO_2 sobre andamios micelares formados con jabón y agua. Las MSNs tienen un enorme potencial en la administración controlada y/o dirigida de fármacos, así como en sistemas de diagnóstico. Estos materiales pudieran ser cruciales en la protección del medio ambiente por su alta capacidad de remover diversos contaminantes en agua y aire por adsorción. También, por su estructura las convierte en excelentes materiales para elaborar catalizadores que aumentan la velocidad de diversas reacciones químicas. A pesar de su gran potencial, todavía persisten desafíos relacionados con la toxicidad y la estabilidad



a largo plazo de las MSNs. Estudios futuros se centrarán en superar estos obstáculos y ampliar aún más sus potenciales aplicaciones.

Palabras clave: Nanopartículas de sílice mesoporosas, Administración controlada y dirigida de fármacos, Diagnóstico biomédico, Remediación ambiental, Catálisis.

Abstract

Mesoporous silica nanoparticles (MSNs) are tiny materials composed of silica (SiO_2) with a highly ordered porous structure, ideal for various applications due to their large internal surface area. These pores are generated during the formation and deposition of SiO_2 on micellar scaffolds formed with soap and water. MSNs have enormous potential in controlled and/or targeted drug delivery and diagnostic systems. These materials could be crucial in environmental protection due to their high capacity to remove various pollutants in water and air by adsorption. Also, their structure makes them excellent materials for making catalysts that increase the speed of various chemical reactions. Despite their extraordinary potential, there are still challenges related to the toxicity and long-term stability of MSNs. Future studies will focus on overcoming these obstacles and expanding their potential applications.

Keywords: Mesoporous silica nanoparticles, Controlled and targeted drug delivery, Biomedical diagnostics, Environmental remediation, Catalysis.

Introducción

Nanopartículas de sílice mesoporosas: Pequeñas maravillas con un gran potencial

En el mundo de la nanotecnología, donde lo increíblemente pequeño encierra inmensas posibilidades, las nanopartículas mesoporosas de sílice han surgido como un área de investigación cautivadora. Estas diminutas partículas compuestas de sílice o SiO_2 poseen singulares estructuras en forma de panal y sus extraordinarias propiedades, están a punto de revolucionar diversos campos, desde la medicina hasta las ciencias medioambientales.

Adentrémonos en el fascinante mundo de las nanopartículas mesoporosas de sílice y exploremos sus posibles aplicaciones.

¿Qué son las nanopartículas de sílice mesoporosa?

Son partículas de tamaño nanométrico (una mil millonésima parte de 1 metro) compuestas de sílice que es un compuesto químico formado por silicio y oxígeno (SiO_2) que se pueden encontrar de forma natural en el medioambiente o bien se pueden fabricar en un laboratorio. Son una clase de materiales altamente porosos y con un volumen de poro alto; llamados mesoporosos por tener tamaños de poro entre 2 y 50 nanómetros. Imagina que tienes una esponja, pero en lugar de tener solo unos pocos agujeros grandes, tiene muchísimos agujeros diminutos por todas partes. ¡Tantos que, si pudieras extender toda su superficie interna, cubriría una cancha de fútbol entera! Eso es lo que significa un material con un área superficial extremadamente alta. Ahora, piensa en todos esos agujeritos como pequeñas habitaciones vacías dentro de la esponja. Todas esas habitaciones juntas forman un gran volumen de espacio vacío dentro de la esponja, eso es lo que llamamos un gran volumen de poro. En la Figura 1 se representan los diversos tipos de nanopartículas mesoporosas de sílice que poseen estructuras y características distintivas como lo son las nanopartículas del tipo MCM-41, MCM-48, SBA-15 y SBA-16, entre otras.

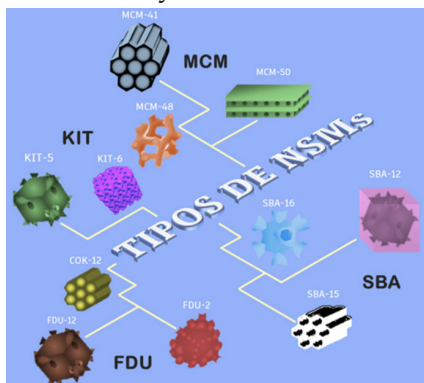


Figura 1. Diferentes tipos de nanopartículas mesoporosas de sílice.

Síntesis de Nanopartículas Mesoporosas de Sílice (ej. MCM-41, MCM-48, SBA-15, SBA-16)

El desarrollo de la sílice mesoporosa (SiO_2) comenzó a destacarse a principios de la década de 1990 con el descubrimiento de materiales

como el MCM-41 y MCM-48, por parte de la compañía Mobil (de ahí el nombre MCM, que son siglas en inglés de Mobil Composition of Matter), y las del tipo SBA-15 y SBA-16 que toman su nombre del inglés Santa Barbara Amorphous (pues fueron desarrolladas en la Universidad de California en Santa Barbara). La síntesis de las nanopartículas de sílice mesoporosa (MSNs) es un proceso que se pueda resumir en dos etapas que son clave para determinar las propiedades finales de estos materiales. En la primera etapa, la concentración de jabón (surfactante) en agua debe alcanzar un nivel adecuado que permita la formación de arreglos micelares cilíndricos (Figura 2a). En la segunda etapa tiene lugar un conjunto de reacciones químicas llamadas sol-gel que transforman al tetraetilortosilicato (TEOS) en sílice (SiO_2) que se deposita sobre cilindros micelares ordenados en columnas hexagonales. Al final, el surfactante es removido y se obtiene una estructura sólida que se encuentra llena de poros que están listos para atrapar sustancias entre ellos o cumplir otras funciones (Figura 2b)(2).

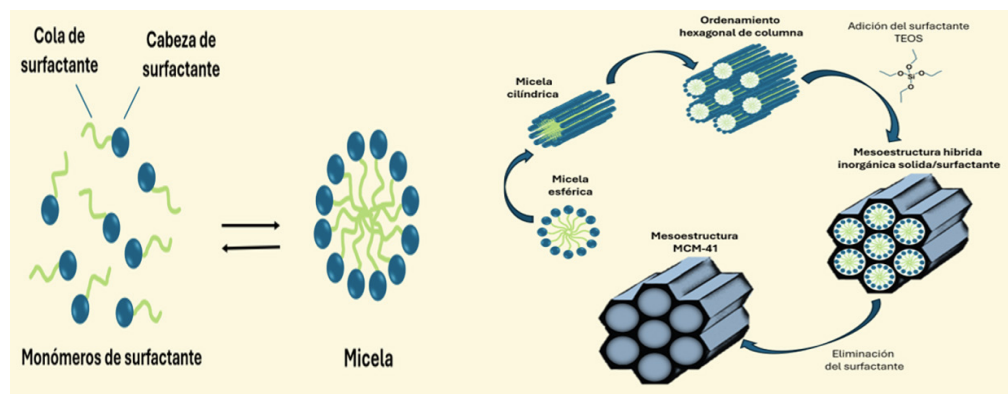


Figura 2. a) Formación de micelas a partir de monómeros de surfactante en medio acuoso, b) Formación de partículas de SiO_2 mesoporosas (MCM-41) a través de la hidrólisis y condensación del TEOS sobre columnas hexagonales formadas de micelas.

Usando la técnica de sol-gel, es posible controlar el tamaño y la disposición de los poros que existen dentro de las MSNs modificando el tipo y concentración del surfactante, así como la temperatura. En este sentido, las diferentes geometrías mostradas en la Figura 1 se pueden obtener variando la proporción y la naturaleza de las sustancias empleadas.

- MCM-41: Se utiliza un surfactante con carga positiva como el cloruro de cetiltrimetilamonio (CTAB) y condiciones alcalinas.
- MCM-48: Similar a MCM-41, pero se ajusta la relación surfactante/TEOS para obtener una estructura cúbica.
- SBA-15: Se utiliza un polímero como surfactante en condiciones ácidas. Esto da lugar a poros más grandes y una mayor estabilidad térmica.
- SBA-16: Similar a SBA-15, pero se ajusta la relación surfactante/TEOS para obtener una estructura cúbica.

La versatilidad de la técnica de sol-gel permite diseñar nanopartículas de SiO₂ para aplicaciones específicas. Esta técnica esquematizada en la Figura 3 comprende en una serie de reacciones de descomposición de compuestos alcoxisilanos (ejem. TEOS) que son conocidos como precursores.

Pasos generales de la síntesis por sol-gel:

1. Hidrólisis. La hidrólisis es una reacción química que ocurre cuando una mezcla de agua/alcohol descomponen al TEOS (hidrólisis) para formar sílice. Esta hidrólisis forma un sol (suspensión de partículas pequeñas de sílice en un medio líquido) que se genera alrededor de las micelas formadas previamente por la disolución del surfactante en agua.
2. Condensación: Los productos generados de la hidrólisis del TEOS condensan alrededor de las micelas, formando una red de sílice inorgánica tridimensional en el medio líquido llamado gel.
- 3-4. Envejecimiento y secado: El gel se deja envejecer a una temperatura determinada para permitir que la estructura tridimensional de SiO₂ se termine de condensar. Terminada el proceso de gelación, se separa el líquido de las partículas de sílice ya sea por secado supercrítico, térmico o secado por liofilización
5. Calcinación o extracción: Las nanopartículas de sílice secas son sujetas a un calentamiento a altas temperaturas (500-600°C) conocida como calcinación para descomponer las moléculas orgánicas de surfactante o jabón con las que se formaba las micelas que funcionaron como templates. De esta forma se generaron espacios libres que constituyen los poros de

las nanopartículas de sílice que, por su tamaño de poro, como habíamos mencionado con anterioridad se denominan mesoporos.

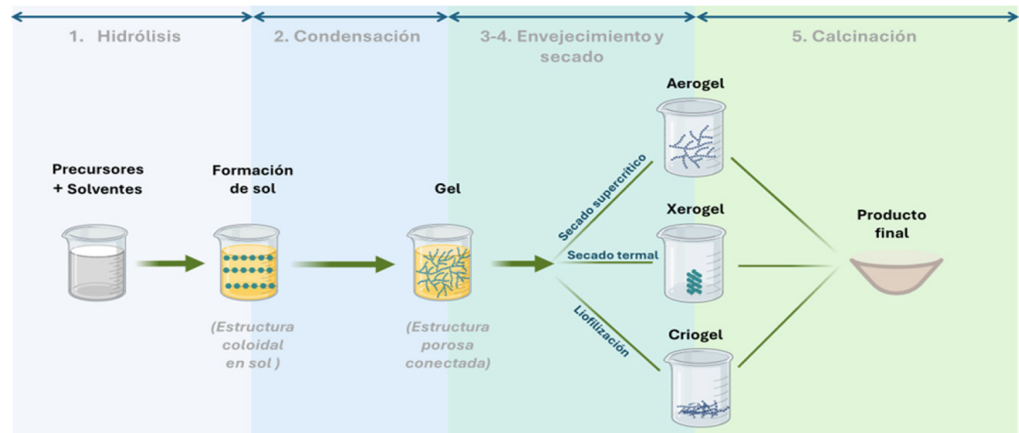


Figura 3. Esquema de los pasos generales para las síntesis de sílice (SiO_2) por el método de sol-gel.

La magia de los mesoporos

La magia de las nanopartículas de sílice mesoporosa reside en sus excepcionales propiedades, que se derivan de sus singulares estructuras porosas. Estas propiedades incluyen:

- **Elevada área superficial:** La gran superficie interna de las nanopartículas de sílice mesoporosas les permite adsorber una gran cantidad de sustancias que van desde fármacos hasta contaminantes en medio acuosos.
- **Tamaño de poro ajustable:** El tamaño de los poros de estas nanopartículas no es fijo, sino que puede alterarse durante la síntesis, lo que significa que es posible la optimización para ciertas propiedades para lograr aplicaciones específicas.
- **Biocompatibilidad:** Muchos tipos de nanopartículas de sílice mesoporosa se consideran biocompatibles, lo que implica que no representan un riesgo para la salud humana.
- **Propiedades ópticas:** Algunas de las sílices mesoporosas pueden ser alteradas para proporcionar características ópticas que las hagan adecuadas para técnicas de detección e imagenología.

Aplicaciones potenciales

La versatilidad de su estructura, su gran área superficial y su alta capacidad de adsorción, convierte a las nanopartículas de sílice mesoporosa (MSNs) en materiales extremadamente efectivos en múltiples aplicaciones médicas, medioambientales e industriales. A continuación, se presentan las principales categorías en las que se utilizan estas nanopartículas:

Administración de fármacos

Una de las aplicaciones más prometedoras de las MSN tiene lugar en el ámbito médico, particularmente en lo que respecta a la administración controlada de medicamentos. Las MSN pueden cargarse con medicamentos y solo suministrar la dosis requerida a la parte del cuerpo deseado, minimizando así los efectos secundarios. Imagina que estas nanopartículas son como "drones" médicos, transportando el medicamento de manera precisa a las células enfermas en lugar de inyectarlo en todo el cuerpo, de la misma manera en que se trata a los pacientes con cáncer. Una liberación específica de los medicamentos genera tratamientos más efectivos y menos tóxicos (3). La Figura 4 muestra la capacidad de las MSM para ser decoradas con diversas sustancias como proteínas, anticuerpos o marcadores fluorescentes, lo que aumenta de manera impresionante la especificidad en la administración de estos nanosistemas de transporte de medicamentos hacia los tejidos u órganos que requieren tratamiento (4,5).

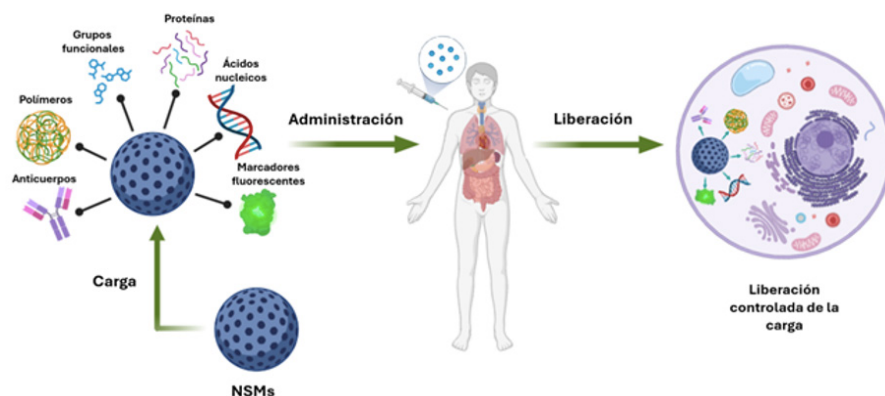


Figura 4. Esquema de administración y liberación controlada-dirigida de fármacos usando NMSs.

Aplicaciones potenciales

La versatilidad de su estructura, su gran área superficial y su alta capacidad de adsorción, convierte a las nanopartículas de sílice mesoporosa (MSNs) en materiales extremadamente efectivos en múltiples aplicaciones médicas, medioambientales e industriales. A continuación, se presentan las principales categorías en las que se utilizan estas nanopartículas:

Administración de fármacos

Una de las aplicaciones más prometedoras de las MSN tiene lugar en el ámbito médico, particularmente en lo que respecta a la administración controlada de medicamentos. Las MSN pueden cargarse con medicamentos y solo suministrar la dosis requerida a la parte del cuerpo deseado, minimizando así los efectos secundarios. Imagina que estas nanopartículas son como "drones" médicos, transportando el medicamento de manera precisa a las células enfermas en lugar de inyectarlo en todo el cuerpo, de la misma manera en que se trata a los pacientes con cáncer. Una liberación específica de los medicamentos genera tratamientos más efectivos y menos tóxicos (3). La Figura 4 muestra la capacidad de las MSM para ser decoradas con diversas sustancias como proteínas, anticuerpos o marcadores fluorescentes, lo que aumenta de manera impresionante la especificidad en la administración de estos nanosistemas de transporte de medicamentos hacia los tejidos u órganos que requieren tratamiento (4,5).

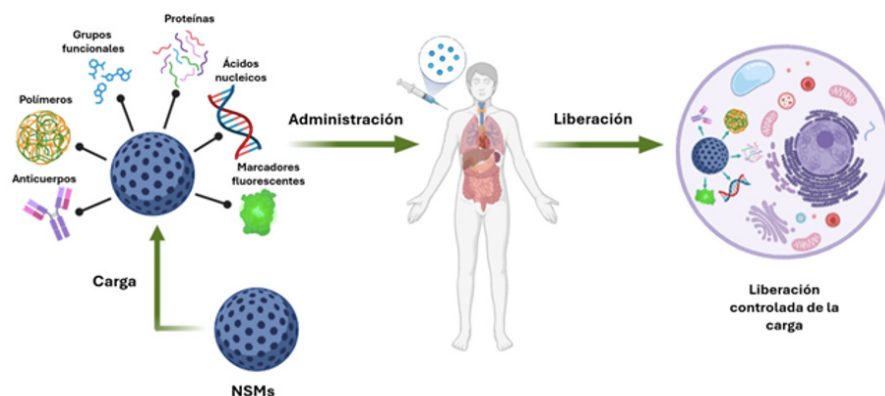


Figura 4. Esquema de administración y liberación controlada-dirigida de fármacos usando NMSs.

La capacidad de las MSNs de responder a estímulos específicos, como cambios de pH, temperatura o campos magnéticos, abre nuevas oportunidades en el tratamiento de enfermedades complejas como el cáncer o el Alzheimer (Figura 5)(6).

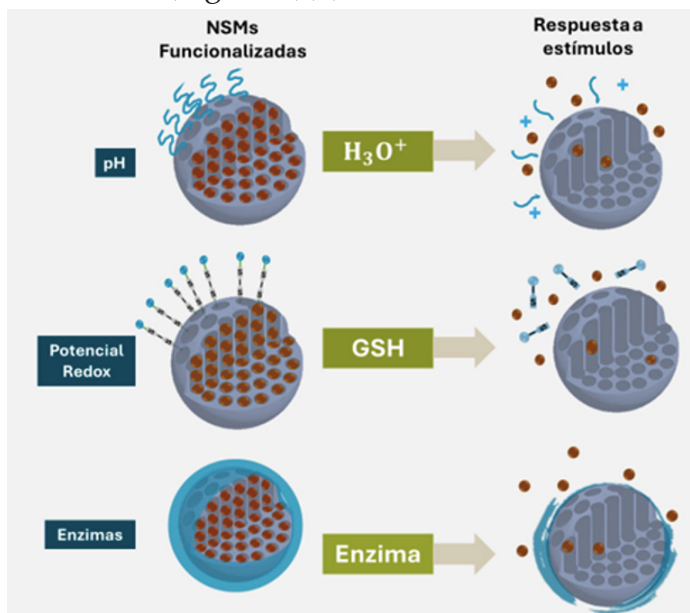


Figura 5. Funcionalización de las MSNs con polímeros y su respuesta a estímulos externos.

Sistemas de diagnóstico

Además de su aplicación en la administración de fármacos, las nanopartículas de sílice mesoporosa (MSNs) están demostrando ser herramientas muy valiosas en el diagnóstico de enfermedades. Gracias a su estructura porosa y gran área superficial, estas nanopartículas pueden ser funcionalizadas, es decir, modificadas para cargar agentes de contraste o colorantes que ayudan a identificar biomarcadores en el cuerpo. Los biomarcadores son sustancias que pueden indicar la presencia de enfermedades como el cáncer o la diabetes. Siendo así, es posible que estas nanopartículas actúen como 'micro-detectives' que se introducen en el organismo y buscan focos biológicos indicadores del daño (biomarcadores). Estas partículas se encargan de liberar agentes de contraste o colorantes que logran evidenciar dentro del cuerpo una enfermedad usando técnicas de imagenología, resonancias o tomografías. De esta manera, las MSNs aumentan la precisión y rapidez

de los diagnósticos a diferentes enfermedades, lo que puede marcar la diferencia en la calidad de la atención a la enfermedad (7).

Aplicaciones en la remediación medioambiental

Las nanopartículas de sílice mesoporosas pueden utilizarse para remover contaminantes del agua y el aire por su gran capacidad de adsorción y tamaño ajustable de poros, que les permite eliminar muchos contaminantes entre los cuales podemos mencionar a diversos colorantes, metales pesados, plaguicidas entre otros contaminantes (10,11). Las MSNs funcionan como pequeñas esponjas que absorben metales pesados peligrosos, como el plomo y el mercurio, sustancias que dañan tanto la salud humana como el medio ambiente. Al estar cargadas con estos contaminantes, las nanopartículas pueden retirarse del agua, dejando el líquido más limpio y seguro. En general la adsorción presenta grandes ventajas en comparación con otras técnicas para remover contaminantes en agua y aire. Sin embargo, hoy en día sigue siendo su aplicación a gran escala uno de los retos a resolver (12).

Catálisis

Las MSNs cuando aumentan la velocidad de las reacciones químicas se les conoce como catalizadores (Figura 6). Por la gran cantidad de poros de las MSNs, se comportan como si tuviera muchos 'centros de operación' de reacciones químicas. Los poros actúan como pequeñas áreas de trabajo donde las moléculas reaccionan más fácilmente. Al tener más espacio para que las moléculas interactúen, las reacciones químicas pueden producirse a mayor velocidad y con menos energía. Esto es especialmente útil en la industria química, donde las reacciones rápidas y eficientes son esenciales para fabricar productos como medicamentos, plásticos o combustibles(13).

A continuación, se describen algunos ejemplos de aplicaciones catalíticas usando nanopartículas mesoporosas de sílice:

- Catálisis ácido-base: Los grupos silanol (Si-OH) en la superficie de la sílice pueden actuar como sitios ácidos, permitiendo reacciones como la deshidratación de alcoholes o la isomerización de olefinas. La funcionalización con

- Catálisis redox: La incorporación de metales de transición (ej. Ti, V, Fe) en la estructura mesoporosa crea sitios activos redox para reacciones de oxidación (ej. epoxidación de olefinas) o reducción (ej. hidrogenación de compuestos insaturados).
- Catálisis enzimática: Aplicada en la producción de fármacos o alimentos, las enzimas pueden inmovilizarse en los poros, combinando la selectividad enzimática con la estabilidad y facilidad de recuperación del soporte sólido.
- Catálisis fotocatalítica: La incorporación de semiconductores (ej. TiO_2) en la sílice mesoporosa permite la degradación fotocatalítica de contaminantes orgánicos en agua o aire bajo luz UV o visible que tendría un impacto positivo en la calidad del agua y aire.

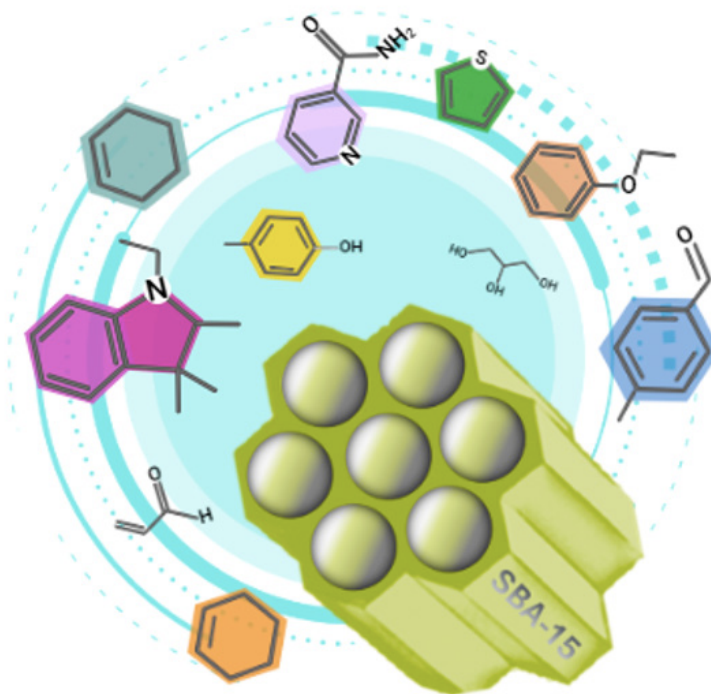


Figura 6. Representación de la actividad catalítica de las MSNs para diversos tipos de reacciones químicas.

Las MSNs son bastante estables, por lo que pueden ser empleadas en condiciones extremas de temperatura y presión sin sufrir descomposición, lo cual es una buena ventaja en los procesos industriales relevantes.

Conclusiones

Las nanopartículas de sílice mesoporosa (MSNs) han demostrado su potencial en diversas áreas de la ciencia y la tecnología. Su estructura porosa y capacidad de adsorción hacen de estos nanomateriales prometedores para mejorar la farmacoterapia, diagnosticar enfermedades, acelerar las velocidades de las reacciones y remover por adsorción contaminantes en agua y aire. Sin embargo, aún hay muchos retos que deben atenderse para un uso más extendido y masivo de las MSNs como son costo de producción, su escalamiento a nivel industrial y su seguridad a largo plazo.



Referencias

1. Li Q, Zhou Y. Brief History, Preparation Method, and Biological Application of Mesoporous Silica Molecular Sieves: A Narrative Review. Vol. 28, *Molecules*. MDPI; 2023.
2. Carrera-Figueiras C, Pérez-Padilla Y, Alejandro Estrella-Gutiérrez M, G. Uc-Cayetano E, Antonio Juárez-Moreno J, Avila-Ortega A. Surface Science Engineering through Sol-Gel Process. In: *Applied Surface Science [Working Title]*. 2019.
3. Manzano M, Vallet-Regí M. Mesoporous Silica Nanoparticles for Drug Delivery. *Adv Funct Mater*. 2020 Jan 1;30(2).
4. Xu B, Li S, Shi R, Liu H. Multifunctional mesoporous silica nanoparticles for biomedical applications. Vol. 8, *Signal Transduction and Targeted Therapy*. 2023.
5. Ávila-Ortega A, Carrillo-Cocom LM, Olán-Noverola CE, Nic-Can GI, Vilchis-Nestor AR, Talavera-Pech WA. Increased Toxicity of Doxorubicin Encapsulated into pH-Responsive Poly(β -Amino Ester)-Functionalized MCM-41 Silica Nanoparticles. *Curr Drug Deliv*. 2020;17(9).
6. Nair A, Chandrashekhara H. R, Day CM, Garg S, Nayak Y, Shenoy PA, et al. Polymeric functionalization of mesoporous silica nanoparticles: Biomedical insights. *Int J Pharm*. 2024 Jul;660:124314.
7. Mladenović M, Jarić S, Mundžić M, Pavlović A, Bobrinetskiy I, Knežević NŽ. Biosensors for Cancer Biomarkers Based on Mesoporous Silica Nanoparticles. *Biosensors (Basel)*. 2024 Jun 30;14(7):326.
8. Huang Y, Li P, Zhao R, Zhao L, Liu J, Peng S, et al. Silica nanoparticles: Biomedical applications and toxicity. *Biomedicine & Pharmacotherapy*. 2022 Jul 1;151:113053.
9. Sivamaruthi BS, Kapoor DU, Kukkar RR, Gaur M, Elossaily GM, Prajapati BG, et al. Mesoporous Silica Nanoparticles: Types, Synthesis, Role in the Treatment of Alzheimer's Disease, and Other Applications. *Pharmaceutics*. 2023 Nov 24;15(12):2666.
10. Diagboya PNE, Dikio ED. Silica-based mesoporous materials; emerging designer adsorbents for aqueous

pollutants removal and water treatment. *Microporous and Mesoporous Materials*. 2018 Aug 1;266:252–67.

11. Talavera-Pech WA, Ávila-Ortega A, Pacheco-Catalán D, Quintana-Owen P, Barrón-Zambrano JA. Effect of Functionalization Synthesis Type of Amino-MCM-41 Mesoporous Silica Nanoparticles on Its RB5 Adsorption Capacity and Kinetics. *Silicon* [Internet]. 2018; Available from: <https://doi.org/10.1007/s12633-018-9975-0>
12. Guerrero-Florez V, Barbara A, Kodjikian S, Oukacine F, Trens P, Cattoën X. Dynamic light scattering unveils stochastic degradation in large-pore mesoporous silica nanoparticles. *J Colloid Interface Sci*. 2024 Dec;676:1098–108.
13. Singh B, Na J, Konarova M, Wakihara T, Yamauchi Y, Salomon C, et al. Functional Mesoporous Silica Nanomaterials for Catalysis and Environmental Applications. *Bull Chem Soc Jpn* [Internet]. 2020 Dec 15;93(12):1459–96. Available from: <https://doi.org/10.1246/bcsj.20200136>