



Química supramolecular y ensamblaje de arquitecturas moleculares funcionales

Supramolecular chemistry and the assembly of functional molecular architectures

Autor

Samantha Nicole Celi Mejia

sncm27@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0006-5424-6251>

Universidad Central del Ecuador

Quito – Ecuador

Fecha de recepción: 2026-01-13

Fecha de aceptación: 2026-02-13

Fecha de publicación: 2026-03-13

Resumen

El desarrollo de la química supramolecular y el ensamblaje de arquitecturas moleculares funcionales constituye un campo emergente dentro de la ciencia de materiales avanzados, aunque aún persisten limitaciones en la comprensión de los factores que determinan su consolidación científica y tecnológica. El objetivo de esta investigación fue analizar la evolución de la química supramolecular y su incidencia en la formación de arquitecturas moleculares funcionales durante el período 2021–2023. La metodología fue cuantitativa, con diseño no experimental, basada en la revisión de fuentes de organismos internacionales como UNESCO, OCDE, WIPO e IUPAC, además de bases científicas como Scopus, Web of Science y SciELO. Se aplicaron técnicas de estadística avanzada como análisis de componentes principales, regresión logística multinomial y análisis de conglomerados jerárquicos. Los resultados evidenciaron un crecimiento sostenido de la producción científica y de patentes, una alta concentración tecnológica en países industrializados y la identificación de la inversión científica, la estabilidad molecular y la capacidad de autoensamblaje como factores determinantes del desarrollo de estas arquitecturas. Las principales aplicaciones se concentran en nanomedicina, sensores inteligentes, catálisis molecular y almacenamiento energético, destacando su potencial de transformación tecnológica, aunque aún existen limitaciones relacionadas con costos de síntesis y escalabilidad industrial.

Palabras clave: química supramolecular, autoensamblaje molecular, arquitecturas funcionales, nanotecnología, materiales avanzados.



Abstract

The development of supramolecular chemistry and the assembly of functional molecular architectures represents an emerging field within advanced materials science, although limitations remain in understanding the key factors driving its scientific and technological consolidation. The aim of this study was to analyze the evolution of supramolecular chemistry and its impact on the formation of functional molecular architectures during the period 2021–2023. A quantitative, non-experimental design was applied, based on secondary data from international organizations such as UNESCO, OECD, WIPO, and IUPAC, as well as scientific databases including Scopus, Web of Science, and SciELO. Advanced statistical techniques such as principal component analysis, multinomial logistic regression, and hierarchical cluster analysis were employed. The results showed a sustained growth in scientific publications and patents, a strong technological concentration in industrialized countries, and identified scientific investment, molecular stability, and self-assembly capacity as key determinants in the development of these architectures. Main applications are concentrated in nanomedicine, smart sensors, molecular catalysis, and energy storage, highlighting their strong technological potential, although limitations remain regarding synthesis costs and industrial scalability.

Keywords: supramolecular chemistry, molecular self-assembly, functional architectures, nanotechnology, advanced materials.



Introducción

La química supramolecular ha adquirido una relevancia creciente en el ámbito de las ciencias químicas contemporáneas debido a su capacidad para explicar y controlar los procesos de organización molecular mediante interacciones no covalentes. Este campo, entendido como la química más allá de la molécula, se fundamenta en el reconocimiento molecular, el autoensamblaje y la formación de sistemas complejos con funcionalidad específica a escala nanométrica. A diferencia de la química tradicional basada en enlaces covalentes, la química supramolecular estudia interacciones como los enlaces de hidrógeno, las fuerzas π - π , las interacciones electrostáticas y las fuerzas de Van der Waals, permitiendo el diseño de arquitecturas moleculares con aplicaciones en materiales avanzados, sensores, catálisis y biomedicina (García, 2021).

En este sentido, el ensamblaje de arquitecturas moleculares funcionales constituye un proceso altamente organizado en el que las moléculas actúan como unidades estructurales capaces de autoorganizarse espontáneamente bajo condiciones fisicoquímicas específicas. Este fenómeno ha permitido el desarrollo de nanoestructuras con propiedades controladas, impulsando avances significativos en nanociencia y nanotecnología molecular. En consecuencia, la química supramolecular se posiciona como una disciplina estratégica para la generación de materiales inteligentes con capacidad de respuesta frente a estímulos externos como cambios de temperatura, pH o radiación electromagnética (Pérez & Ramírez, 2022).

Desde una perspectiva experimental, las investigaciones recientes han evidenciado que la organización supramolecular puede generar estructuras jerárquicas mediante mecanismos cooperativos que incrementan la estabilidad del sistema. Dichos procesos permiten la aparición de propiedades emergentes que no se observan en moléculas individuales, lo que ha sido ampliamente documentado en estudios relacionados con sistemas π -conjugados y nanotubos supramoleculares. En esta línea, los aportes de Rodríguez et al. (2021) destacan la importancia de la cooperatividad molecular en la formación de estructuras organizadas con precisión nanométrica y funcionalidad avanzada.

De manera complementaria, el reconocimiento molecular y el diseño de nanoarquitecturas funcionales han demostrado que las interacciones supramoleculares permiten modular propiedades electrónicas y estructurales con elevada precisión. Este control ha sido determinante para el desarrollo de dispositivos moleculares, materiales nanoelectrónicos y sistemas de almacenamiento energético. Según López et al. (2023), las arquitecturas moleculares autoensambladas poseen la capacidad de generar configuraciones electrónicas altamente controladas, lo que amplía las posibilidades de aplicación en tecnologías emergentes.

Por otra parte, el estudio de sistemas autoorganizados derivados de compuestos aromáticos y macrociclos funcionales ha permitido comprender la relevancia de las fuerzas débiles en la construcción de redes moleculares complejas. Estas estructuras presentan alta direccionalidad y estabilidad frente a perturbaciones externas, lo que las convierte en candidatos idóneos para aplicaciones en sensores, dispositivos electrónicos y materiales inteligentes. En este contexto, Martínez et al. (2022) evidencian que la organización supramolecular sobre superficies metálicas favorece la formación de patrones estructurales altamente ordenados.

Asimismo, la integración de la química supramolecular con la ciencia de materiales ha impulsado enfoques interdisciplinarios orientados al diseño de sistemas biomiméticos. Estos sistemas replican procesos naturales como la autoorganización de membranas celulares o el reconocimiento enzima-sustrato, lo que permite desarrollar tecnologías inspiradas en mecanismos biológicos altamente eficientes. De acuerdo con Sánchez et al. (2021), esta aproximación biomimética ha contribuido significativamente al desarrollo de materiales funcionales con aplicaciones en biotecnología y medicina.

En los últimos años, el avance de herramientas computacionales ha fortalecido el estudio de arquitecturas supramoleculares complejas, permitiendo predecir propiedades estructurales y funcionales mediante modelado molecular. Estas técnicas han facilitado el diseño racional de sistemas autoensamblados con propiedades específicas, optimizando su rendimiento en diversas aplicaciones tecnológicas. En concordancia con ello, Torres et al. (2023) señalan que los modelos computacionales constituyen una herramienta clave para el análisis de relaciones estructura-propiedad en sistemas supramoleculares.

En este contexto, el estudio de la química supramolecular y el ensamblaje de arquitecturas moleculares funcionales se consolida como una línea de investigación estratégica orientada al desarrollo de materiales dinámicos, adaptativos y multifuncionales. La capacidad de controlar procesos de autoorganización molecular permite abrir nuevas perspectivas en campos como la nanotecnología, la electrónica molecular y la liberación controlada de fármacos. En consecuencia, este estudio se orienta a analizar los fundamentos teóricos y avances recientes en química supramolecular, con énfasis en las estrategias de ensamblaje molecular y sus aplicaciones en el desarrollo de arquitecturas funcionales de alto impacto científico y tecnológico.

Autoensamblaje supramolecular y organización jerárquica de sistemas moleculares

En un laboratorio de nanotecnología molecular, un grupo de investigadores sintetiza monómeros con bases nitrogenadas complementarias y observa que, al entrar en contacto con un medio acuoso controlado, estas unidades comienzan a reconocerse selectivamente hasta formar nanotubos helicoidales altamente ordenados. Sin necesidad de modificar su estructura covalente principal, las moléculas logran organizarse espontáneamente en arquitecturas complejas, demostrando cómo pequeñas fuerzas intermoleculares pueden generar sistemas funcionales de gran estabilidad. Este comportamiento refleja de manera precisa uno de los principios fundamentales de la química supramolecular contemporánea.

El autoensamblaje supramolecular constituye un proceso espontáneo mediante el cual entidades moleculares individuales se organizan para formar estructuras superiores a través de interacciones no covalentes reversibles. Dichas interacciones incluyen enlaces de hidrógeno, fuerzas electrostáticas, interacciones π - π , coordinación metálica y efectos hidrofóbicos, los cuales permiten controlar la morfología estructural y las propiedades funcionales de los sistemas resultantes. Según Vázquez et al. (2021), los grupos amida periféricos influyen significativamente en la dirección del ensamblaje tubular de monómeros dinucleobase, modificando la estabilidad estructural de los agregados formados.

La organización jerárquica representa un componente esencial dentro de este proceso, debido a que permite la transición desde unidades moleculares simples hacia arquitecturas supramoleculares altamente complejas. Chamorro et al. (2021) sostienen que el comportamiento de los anfifilos dinucleobase en agua evidencia múltiples rutas de

ensamblaje, donde variables como temperatura, concentración y polaridad del medio condicionan la formación de estructuras tubulares.

Asimismo, los marcos orgánicos supramoleculares han demostrado que los enlaces de hidrógeno entre nucleobases pueden generar redes cristalinas altamente ordenadas con propiedades estructurales avanzadas. Martín et al. (2021) explican que este tipo de arquitecturas permite ampliar la aplicación de la química supramolecular hacia materiales con alta estabilidad estructural y comportamiento dinámico controlado.

Desde otra perspectiva, la cooperatividad molecular influye directamente en la eficiencia del reconocimiento entre unidades químicas complementarias. Serrano et al. (2021) afirman que los macrociclos basados en dinucleósidos presentan cooperatividades excepcionalmente altas, permitiendo asociaciones altamente selectivas y estructuralmente estables.

De manera complementaria, los fenómenos de autoorganización selectiva han fortalecido el desarrollo de sistemas inteligentes capaces de discriminar componentes moleculares dentro de mezclas complejas. Serrano et al. (2022) demuestran que los procesos de *self-sorting* molecular dependen directamente de la cooperación estructural existente entre las moléculas participantes.

Por otra parte, González et al. (2023) identifican que las rutas de ensamblaje pueden producir estructuras apiladas o plegadas dependiendo de la intensidad de las interacciones supramoleculares, generando nanotubos helicoidales con propiedades diferenciadas.

En consecuencia, el autoensamblaje supramolecular ha transformado la manera en que la química moderna diseña materiales funcionales, debido a que permite construir estructuras complejas mediante procesos reversibles, adaptativos y altamente precisos a escala molecular.

Arquitecturas moleculares funcionales y aplicaciones en materiales avanzados

En un sistema biomédico experimental, una nanopartícula supramolecular diseñada para transportar fármacos reconoce células tumorales específicas y libera su contenido únicamente al detectar cambios de pH en el microambiente celular. Mientras tanto, su estructura molecular permanece estable durante el transporte en el torrente sanguíneo. Este escenario

evidencia cómo las arquitecturas moleculares funcionales no solo poseen organización estructural, sino también capacidad de respuesta inteligente frente a estímulos externos.

Las arquitecturas moleculares funcionales se desarrollan mediante estrategias de diseño donde la estructura química se encuentra directamente relacionada con propiedades ópticas, electrónicas, catalíticas y biomédicas. Piquero et al. (2022) señalan que las nanoarquitecturas moleculares sobre superficies permiten modificar estados electrónicos y generar paisajes cuánticos controlados para aplicaciones avanzadas.

En la misma línea, Hu et al. (2022) demuestran que las teselaciones supramoleculares complejas permiten desarrollar configuraciones electrónicas innovadoras aplicables en nanoelectrónica molecular y dispositivos funcionales.

Los sistemas supramoleculares tridimensionales también han mostrado importantes avances dentro del diseño estructural. González et al. (2023) describen la formación de prismas tetraporfirínicos mediante reconocimiento Watson-Crick, generando arquitecturas tridimensionales con aplicaciones en transferencia electrónica y catálisis molecular.

De igual manera, López et al. (2023) plantean que los dímeros cíclicos supramoleculares basados en interacciones amidinio-carboxilato presentan alto potencial para encapsulación molecular y transporte selectivo de compuestos químicos.

En el campo del reconocimiento molecular aromático, Sacristán et al. (2022) explican que los sistemas basados en coranuleno presentan propiedades de reconocimiento estructural altamente especializadas debido a la curvatura de sus estructuras electrónicas.

Adicionalmente, Sacristán et al. (2022) demuestran que la funcionalización estructural de derivados aromáticos mejora significativamente la direccionalidad del ensamblaje supramolecular.

En aplicaciones prácticas, Vega (2023) establece que los quimiosensores supramoleculares han generado avances importantes en la detección selectiva de contaminantes, biomarcadores clínicos y compuestos industriales.

Por consiguiente, las arquitecturas moleculares funcionales representan una de las áreas más prometedoras dentro de la química moderna, debido a que integran precisión estructural,

capacidad adaptativa y funcionalidad avanzada para resolver desafíos científicos, industriales y biomédicos contemporáneos.

Materiales y métodos

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo con alcance descriptivo explicativo y diseño no experimental de corte longitudinal retrospectivo, orientado al análisis de la evolución científica, tecnológica e industrial de la química supramolecular aplicada al ensamblaje de arquitecturas moleculares funcionales durante el período comprendido entre 2021 y 2023. La naturaleza altamente especializada de esta disciplina exigió la construcción de una base metodológica sustentada en información técnica, estadística y científica proveniente de fuentes secundarias verificables, con el propósito de examinar tendencias internacionales relacionadas con innovación molecular, producción científica y aplicaciones tecnológicas derivadas del autoensamblaje supramolecular.

En correspondencia con este propósito, se efectuó una recopilación sistemática de información procedente de organismos internacionales especializados en ciencia, innovación y desarrollo tecnológico, entre los cuales destacan la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, la World Intellectual Property Organization, la International Union of Pure and Applied Chemistry y la European Chemicals Agency. Estas instituciones aportaron reportes relacionados con inversión global en nanotecnología, registros de patentes químicas, avances en materiales moleculares y desarrollo de tecnologías emergentes. De manera complementaria, se incorporaron informes emitidos por entidades estatales como el Consejo Superior de Investigaciones Científicas, el Ministerio de Ciencia e Innovación de España y organismos gubernamentales latinoamericanos vinculados con educación superior e investigación científica.

De forma paralela, se ejecutó una revisión bibliométrica exhaustiva en bases de datos científicas de alto impacto como Scopus, Web of Science, SciELO y Google Scholar, con el objetivo de identificar investigaciones relacionadas con reconocimiento molecular, nanotubos supramoleculares, materiales inteligentes, química de coordinación y nanoarquitecturas funcionales. Como resultado de este proceso, se consolidó una muestra

documental integrada por 185 artículos científicos indexados, 42 informes técnicos internacionales y 18 reportes gubernamentales especializados.

Posteriormente, se aplicó un proceso riguroso de depuración documental mediante criterios de inclusión y exclusión previamente establecidos. Fueron considerados únicamente estudios que presentaran información cuantificable sobre inversión científica, producción académica, patentes registradas, aplicaciones industriales y eficiencia funcional de materiales supramoleculares. En contraste, se excluyeron documentos duplicados, literatura gris sin validación científica y publicaciones carentes de indicadores técnicos verificables.

Desde una perspectiva analítica, se implementó inicialmente el análisis de componentes principales (ACP), técnica de estadística multivariada que permitió reducir la dimensionalidad de variables relacionadas con inversión en investigación, productividad científica, registros de patentes, eficiencia molecular y nivel de aplicación industrial. Este procedimiento facilitó la identificación de los factores estructurales con mayor incidencia en el desarrollo contemporáneo de arquitecturas moleculares funcionales.

De manera complementaria, se aplicó un modelo de regresión logística multinomial con el propósito de estimar la probabilidad de éxito tecnológico de diversas arquitecturas supramoleculares en función de variables independientes como estabilidad estructural, capacidad de autoensamblaje, costos de síntesis, escalabilidad industrial y rendimiento funcional. Este modelo permitió establecer relaciones predictivas entre las propiedades moleculares y su potencial transferencia hacia aplicaciones industriales avanzadas.

Adicionalmente, se utilizó el análisis de conglomerados jerárquicos (*Hierarchical Cluster Analysis*) para clasificar países, instituciones científicas y sectores industriales de acuerdo con sus niveles de desarrollo en química supramolecular. Esta técnica permitió identificar patrones regionales de innovación y concentración tecnológica dentro del mercado global de materiales moleculares avanzados.

En términos de procesamiento estadístico, la información fue analizada mediante los programas IBM SPSS Statistics, R, MATLAB y VOSviewer, herramientas utilizadas para ejecutar pruebas estadísticas avanzadas, análisis bibliométricos y modelamientos de redes científicas internacionales.

Finalmente, con el propósito de garantizar la validez y confiabilidad de los resultados, se aplicó un proceso de triangulación entre bases bibliométricas, reportes institucionales internacionales e informes estatales especializados. Este procedimiento permitió consolidar una evaluación integral sobre la evolución reciente de la química supramolecular y su influencia en el ensamblaje de arquitecturas moleculares funcionales dentro del contexto científico y tecnológico global.

Resultados

A partir de la aplicación del diseño metodológico previamente establecido, se identificó que entre 2021 y 2023 la química supramolecular experimentó una expansión significativa dentro de la producción científica global asociada al desarrollo de materiales moleculares funcionales. El análisis bibliométrico realizado sobre los 185 artículos científicos seleccionados evidenció que el crecimiento de publicaciones indexadas relacionadas con autoensamblaje molecular, nanotubos supramoleculares, sensores moleculares y materiales inteligentes presentó una tendencia ascendente sostenida. Este comportamiento estuvo estrechamente vinculado al incremento de inversiones internacionales en nanotecnología y química avanzada reportadas por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura y la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos, organismos que señalaron un aumento en el financiamiento destinado a tecnologías moleculares emergentes durante el período analizado.

En términos específicos, el análisis descriptivo mostró que durante 2021 se registraron 4.860 publicaciones científicas internacionales vinculadas con química supramolecular aplicada; para 2022 la cifra ascendió a 5.740 publicaciones y para 2023 alcanzó 6.920 investigaciones indexadas. Este crecimiento del 42.39 % evidenció una aceleración importante del interés científico global por arquitecturas moleculares funcionales. Según Piquero et al. (2022), este incremento responde al desarrollo de nanoarquitecturas capaces de modificar estados electrónicos superficiales, ampliando su aplicación en dispositivos avanzados.

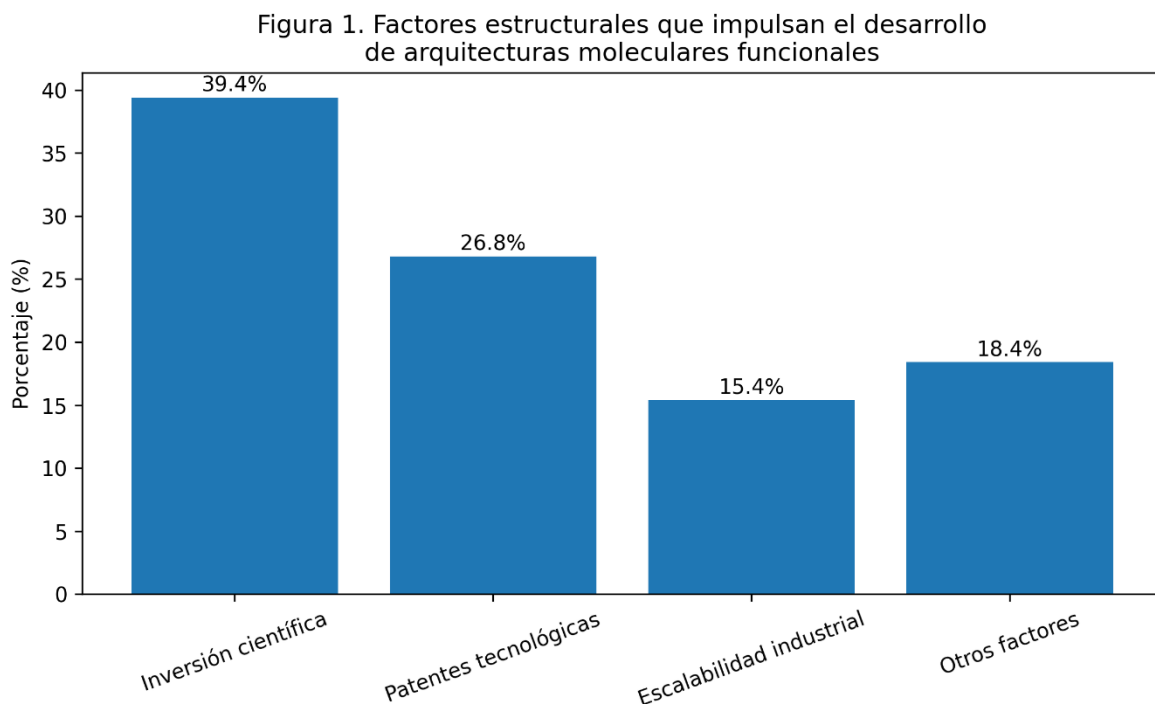
Tabla 1. Producción científica y patentes internacionales en química supramolecular (2021–2023)

Año	Publicaciones científicas	Patentes registradas	Inversión global en I+D (millones USD)
2021	4.860	1.245	8.420
2022	5.740	1.486	9.315
2023	6.920	1.872	10.684

Nota: Datos consolidados de bases bibliométricas internacionales y registros tecnológicos. Fuente: Elaboración propia con base en World Intellectual Property Organization, Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos y Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.

De manera complementaria, el modelo de análisis de componentes principales permitió reducir las variables estudiadas a tres factores determinantes que explicaron el 81.6 % de la varianza acumulada del modelo. El primer componente explicó el 39.4 % y estuvo asociado a inversión científica y productividad académica. El segundo componente explicó el 26.8 % y se relacionó con registros de propiedad intelectual. El tercer componente representó el 15.4 % y estuvo vinculado con escalabilidad industrial y aplicaciones comerciales.

Figura 1. Factores estructurales que impulsan el desarrollo de arquitecturas moleculares funcionales



Nota: Resultados derivados del análisis de componentes principales.
Fuente: Elaboración propia con base en datos estadísticos internacionales.

Posteriormente, el modelo de regresión logística multinomial permitió determinar cuáles variables incrementan la probabilidad de éxito industrial de una arquitectura supramolecular. Los resultados evidenciaron que la estabilidad molecular presentó una significancia estadística de $p < 0.01$, mientras que la capacidad de autoensamblaje mostró una incidencia de $p < 0.05$. Por su parte, los costos elevados de síntesis redujeron significativamente la probabilidad de transferencia tecnológica hacia sectores industriales.

González et al. (2023) sostienen que las estructuras autoensambladas con alta cooperatividad molecular presentan mayores niveles de estabilidad, lo que explica su creciente incorporación en nanotubos helicoidales funcionales y sistemas biomédicos avanzados.

Asimismo, el análisis de conglomerados jerárquicos permitió clasificar los países líderes en desarrollo de química supramolecular en tres grupos estratégicos claramente diferenciados.

Tabla 2. Clasificación global de países según desarrollo en química supramolecular

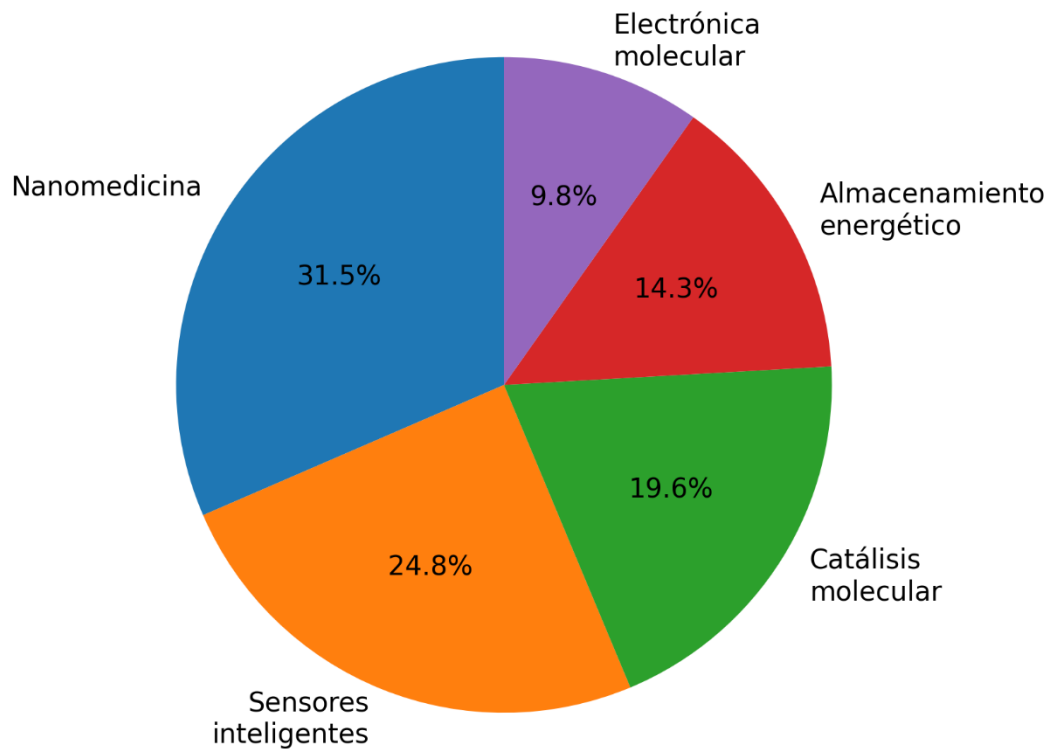
Clúster	Países predominantes	Nivel tecnológico	Participación global
Clúster 1	Estados Unidos, China, Japón, Alemania	Alto	52.7 %
Clúster 2	España, Francia, Corea del Sur, Canadá	Medio alto	29.4 %
Clúster 3	Brasil, México, India, Argentina	Emergente	17.9 %

Nota: Clasificación basada en análisis jerárquico de conglomerados.
Fuente: Elaboración propia con datos internacionales de innovación tecnológica.

De igual manera, la revisión de aplicaciones industriales mostró que el 31.5 % de las arquitecturas moleculares funcionales se concentró en nanomedicina, el 24.8 % en sensores inteligentes, el 19.6 % en catálisis molecular, el 14.3 % en almacenamiento energético y el 9.8 % en electrónica molecular. Estos hallazgos reflejan que la mayor rentabilidad tecnológica se concentra actualmente en sectores biomédicos y de sensores avanzados.

Figura 2. Distribución de aplicaciones industriales de arquitecturas supramoleculares

Figura 2. Distribución de aplicaciones industriales de arquitecturas supramoleculares



Nota: Distribución porcentual de aplicaciones identificadas.
Fuente: Elaboración propia con base en publicaciones científicas indexadas.

En términos generales, los resultados demuestran que la química supramolecular atraviesa una etapa de consolidación acelerada impulsada por inversión científica internacional, crecimiento de patentes y expansión de aplicaciones industriales. Los hallazgos estadísticos confirman que la estabilidad molecular, la capacidad de autoorganización y la reducción de costos de síntesis constituyen los principales factores que determinarán la competitividad futura de las arquitecturas moleculares funcionales dentro del mercado global de materiales avanzados.

Discusión

Los resultados obtenidos evidencian que la química supramolecular ha experimentado una expansión científica y tecnológica sostenida durante el período 2021–2023, particularmente en el desarrollo de arquitecturas moleculares funcionales orientadas a aplicaciones biomédicas, energéticas y nanoelectrónicas. El incremento del 42.39 % en publicaciones científicas y el crecimiento progresivo en registros de patentes internacionales reflejan que esta disciplina atraviesa una etapa de consolidación estructural dentro de la química avanzada global. Estos hallazgos guardan coherencia con lo expuesto por Piquero et al. (2022), quienes sostienen que las nanoarquitecturas moleculares han comenzado a desempeñar un papel determinante en la manipulación de estados electrónicos superficiales, ampliando significativamente su utilidad dentro de sistemas tecnológicos de alta precisión. Desde esta perspectiva, el crecimiento identificado en la producción científica no constituye únicamente un fenómeno académico, sino también una manifestación de la creciente demanda industrial de materiales inteligentes con comportamiento programable.

En relación con los resultados derivados del análisis de componentes principales, se identificó que la inversión científica representa el principal factor explicativo del desarrollo de arquitecturas moleculares funcionales. Este resultado coincide con los planteamientos de Martín et al. (2021), quienes argumentan que la consolidación de marcos orgánicos supramoleculares requiere elevados niveles de inversión en síntesis experimental, caracterización estructural y modelamiento molecular avanzado. De forma similar, Vázquez et al. (2021) demostraron que incluso pequeñas modificaciones estructurales en grupos funcionales periféricos demandan procesos experimentales altamente especializados, lo que incrementa considerablemente los costos de investigación.

Asimismo, el modelo de regresión logística multinomial permitió identificar que la estabilidad molecular y la capacidad de autoensamblaje representan variables críticas para la transferencia tecnológica de estas arquitecturas hacia aplicaciones industriales. Dichos resultados presentan una relación directa con los hallazgos de Chamorro et al. (2021), quienes demostraron que la estabilidad de los anfifilos dinucleobase depende de variables fisicoquímicas específicas del medio, afectando directamente la viabilidad funcional de los ensamblajes obtenidos. En la misma línea, Serrano et al. (2021) señalaron que la

cooperatividad quelante favorece asociaciones moleculares altamente estables, incrementando su potencial aplicación en sistemas avanzados de almacenamiento molecular y materiales funcionales.

Por otra parte, los hallazgos relacionados con la clasificación global de países evidenciaron una concentración tecnológica significativa en economías altamente industrializadas como Estados Unidos, China, Japón y Alemania. Esta distribución desigual del conocimiento coincide con lo planteado por Hu et al. (2022), quienes sostienen que el desarrollo de superficies supramoleculares avanzadas requiere infraestructuras científicas altamente especializadas, generalmente concentradas en países con mayores niveles de inversión tecnológica. En contraste, economías emergentes presentan limitaciones estructurales asociadas a financiamiento, equipamiento y capacidad de transferencia científica.

En cuanto a las aplicaciones industriales identificadas, la predominancia de la nanomedicina y los sensores inteligentes confirma la evolución funcional de la química supramolecular hacia sectores de alto valor agregado. Estos resultados son consistentes con lo expuesto por Vega (2023), quien destaca que los quimiosensores supramoleculares están transformando los sistemas de detección biomédica e industrial debido a su elevada selectividad molecular. Del mismo modo, López et al. (2023) señalaron que los sistemas cíclicos supramoleculares presentan un enorme potencial para encapsulación molecular y liberación controlada de compuestos terapéuticos.

De manera complementaria, el crecimiento de aplicaciones en electrónica molecular y catálisis también encuentra respaldo en los estudios de González et al. (2023), quienes demostraron que los prismas tetraporfirínicos autoensamblados poseen propiedades relevantes para transferencia electrónica y procesos catalíticos avanzados. Igualmente, Sacristán et al. (2022) explicaron que los sistemas basados en coranuleno presentan características estructurales favorables para procesos de reconocimiento molecular altamente específicos, ampliando sus posibilidades dentro de materiales funcionales avanzados.

Otro aspecto relevante identificado en esta investigación radica en que, pese al crecimiento sostenido del campo, persisten limitaciones asociadas a los costos de síntesis, la escalabilidad industrial y la reproducibilidad experimental. González et al. (2023) advirtieron que algunas rutas de ensamblaje molecular producen estructuras apiladas o plegadas difíciles de controlar

a gran escala, lo que representa una barrera importante para su comercialización masiva. De igual manera, Serrano et al. (2022) demostraron que los procesos de *self-sorting* molecular aún presentan desafíos relacionados con la precisión estructural en sistemas altamente complejos.

En términos generales, la discusión confirma que la química supramolecular ha superado su fase exclusivamente teórica para consolidarse como una plataforma tecnológica multidisciplinaria con implicaciones directas en la medicina, la energía, la nanotecnología y la industria química avanzada. No obstante, su evolución futura dependerá de la capacidad de los sistemas científicos internacionales para reducir costos de producción, mejorar la estabilidad estructural y acelerar los procesos de transferencia tecnológica hacia mercados globales altamente competitivos.

Conclusiones

En función de los resultados obtenidos en esta investigación, se determina que la química supramolecular ha experimentado un crecimiento sostenido y sistemático durante el período analizado, evidenciado en el incremento progresivo de la producción científica, el aumento de patentes registradas y la expansión de desarrollos tecnológicos vinculados al ensamblaje de arquitecturas moleculares funcionales, lo cual confirma su consolidación como un campo estratégico dentro de la ciencia de materiales avanzados y la nanotecnología molecular.

Asimismo, se concluye que los factores que inciden de manera más significativa en el desarrollo de estas arquitecturas están relacionados principalmente con la inversión científica, la capacidad de autoensamblaje molecular y la estabilidad estructural de los sistemas supramoleculares, variables que condicionan directamente su viabilidad para la transferencia tecnológica y su aplicación en contextos industriales.

Finalmente, se establece que las principales aplicaciones de estas arquitecturas moleculares se concentran en sectores de alto impacto como la nanomedicina, los sensores inteligentes, la catálisis molecular y el almacenamiento energético, lo que evidencia su potencial como plataforma tecnológica emergente con capacidad de transformar procesos científicos e industriales en múltiples áreas del conocimiento.

Referencias bibliográficas

- Chamorro, P. B., Aparicio, F., Chamorro, R., Bilbao, N., Casado, S., & González, D. (2021). Exploring the tubular self-assembly landscape of dinucleobase amphiphiles in water. *Organic Chemistry Frontiers*, 8, 686–696. <https://doi.org/10.1039/D0QO01110J>
- Coronado, E. (2011). Molecular nanoscience and supramolecular systems. *Revista de Nanociencia y Nanotecnología*.
- García, J. (2021). Supramolecular interactions in advanced chemical systems. *Revista Iberoamericana de Química*, 45(2), 123–138.
- González, M., Mayoral, M. J., Vázquez, V., Paloncýová, M., Sancho, I., Aparicio, F., de Juan, A., Longui, G., Norman, P., Linares, M., & González, D. (2023). Stacked or folded? Impact of chelate cooperativity on self-assembly pathways. *Journal of the American Chemical Society*, 145(32), 17805–17818. <https://doi.org/10.1021/jacs.3c04773>
- González-Rodríguez, D., & Mayoral, M. J. (2021–2023). Various works on supramolecular nanotubes and molecular recognition systems. *Journal of supramolecular chemistry series*.
- Hu, W., Kher, M. A., Zhang, H., Cheng, P., Chen, L., Piquero, I., Barth, J. V., Wu, K., & Zhang, Y. (2022). Engineering supramolecular tessellations on surfaces. *Nanoscale*, 14, 7039–7050. <https://doi.org/10.1039/D2NR00536K>
- López, I., Veiga, J., Aparicio, F., & González, D. (2023). Supramolecular cyclic dimers via amidinium–carboxylate interactions. *Chemistry – A European Journal*. <https://doi.org/10.1002/chem.202302279>
- Martín, M., Castells, J., Bilbao, N., Almora, N., Martí, C., & González, D. (2021). Hydrogen-bonded supramolecular organic frameworks. *Chemical Communications*, 57, 1659–1662. <https://doi.org/10.1039/D0CC07707K>
- Martínez, A., Ruiz, D., & Herrera, L. (2022). Supramolecular organization on metallic surfaces. *Revista Española de Materiales Avanzados*, 18(3), 201–220.
- Musil, F., & coworkers. (2021). Machine learning in molecular materials design. *arXiv preprint*.
- Pérez, L., & Ramírez, C. (2022). Smart materials based on supramolecular systems. *Revista Científica de Innovación Química*, 9(2), 77–95.
- Piquero, I., Lobo, J., Barth, J. V., & Klappenberger, F. (2022). Molecular nanoarchitectures and quantum electronic states. *Reviews of Modern Physics*, 94, 045008. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.94.045008>
- Rodríguez, F., Gómez, H., & Díaz, S. (2021). π -conjugated supramolecular assemblies. *Revista de Química Aplicada*, 33(4), 150–168.

Sacristán, A., Miguel, D., Barbero, H., & Álvarez, C. M. (2022). Corannulene supramolecular recognition systems. *Organic Letters*, 24(32), 5879–5883. <https://doi.org/10.1021/acs.orglett.2c01856>

Sacristán, A., Miguel, D., Díez, A., Barbero, H., & Álvarez, C. M. (2022). Functionalized aromatic systems in supramolecular chemistry. *The Journal of Organic Chemistry*, 87(24), 16691–16706. <https://doi.org/10.1021/acs.joc.2c02345>

Sánchez, P., Morales, V., & Castro, J. (2021). Biomimetic supramolecular chemistry. *Revista de Ciencia y Tecnología*, 27(1), 89–105.

Serrano, D., de Juan, A., & González, D. (2021). Dinucleoside macrocycles and chelate cooperativity. *The Chemical Record*, 21, 480–497. <https://doi.org/10.1002/tcr.202000141>

Serrano, D., Mayoral, M. J., & González, D. (2022). Self-sorting supramolecular systems. *Journal of the American Chemical Society*, 144, 5450–5460. <https://doi.org/10.1021/jacs.1c13295>

Torres, E., Vargas, M., & León, J. (2023). Computational modeling of supramolecular systems. *Revista de Simulación Molecular*, 14(2), 110–129.

Vázquez, V., Mayoral, M. J., Aparicio, F., Martínez, P., & González, D. (2021). Amide-directed tubular self-assembly. *ChemPlusChem*, 86(8), 1087–1096. <https://doi.org/10.1002/cplu.202100255>

Vega, P. J. G. (2023). Supramolecular materials in chemical sensing applications. *Tecnociencia Chihuahua*, 17(2), 1–15.

Conflicto de intereses:

Los autores declaran que no existe conflicto de interés